

Table des matières

Avant-propos : Une brève histoire de l'astronomie pré-télescopique..... p. 17

Introduction..... p. 27

PREMIÈRE PARTIE : MÉCANOLOGIE ET GÉNÉTIQUE TECHNIQUE

Chapitre 1 : Le projet d'une analyse génétique p. 43

1. Le programme des Annales..... p. 44

1.1. Science et technique ; histoire des sciences et histoire des techniques..... p. 44

1.2. L'internalisme, ou l'histoire technique des techniques..... p. 46

1.3. L'externalisme, l'histoire globale et l'histoire économique..... p. 48

2. Les ambitions de l'approche génétique..... p. 50

2.1. La complémentarité des approches internalistes et externalistes p. 50

2.2. La génétique technique de Michel Cotte p. 52

2.3. De l'origine du terme « génétique »..... p. 53

3. Le concept de lignée technique..... p. 54

3.1. L'étude des objets techniques p. 54

3.2. Rapide généalogie du concept..... p. 56

3.3. Les lignées techniques chez et après Simondon..... p. 59

4. De l'utilité des diagrammes pour la gestion des connaissances p. 60

4.1. Le rôle des diagrammes..... p. 60

4.2. La valeur prospective des diagrammes p. 62

Conclusion de chapitre p. 66

Chapitre 2 : État de l'art en mécanologie..... p. 69

1. De la technologie à la mécanologie..... p. 70

1.1. La machine comme objet d'étude p. 70

1.2. De la mécano-*graphie*... p. 72

1.3. ... à la mécano-*logie*..... p. 73

2. Naissance et premiers développements mécanologiques p. 74

2.1. Les travaux de Jacques Lafitte.....	p. 74
2.2. Le statut de la mécanologie	p. 76
2.3. La classification des machines.....	p. 77
3. Les travaux de Gilbert Simondon	p. 79
3.1. Ontologie et classification chez Simondon.....	p. 79
3.2. Une approche mécanologique	p. 82
3.3. Les échelles de la technique.....	p. 83
3.4. Génétique et concrétisation.....	p. 85
4. La technologie génétique d'Yves Deforge	p. 89
4.1. L'objet industriel plutôt que l'objet technique.....	p. 89
4.2. Les lignées, classes et familles techniques chez Yves Deforge	p. 91
5. L'apport de la TRIZ	p. 93
5.1. Résolution de problème et contradiction technique.....	p. 93
5.2. La notion d'idéalité	p. 95
5.3. Inertie psychologique et obstacle mécanologique.....	p. 96
6. Synthèse mécanologique des notions.....	p. 97
6.1. La convergence des notions	p. 97
6.2. La mécanologie génétique et IDID.....	p. 98
Conclusion de chapitre	p. 100

Chapitre 3 : Présentation des outils opératoiresp. 101

1. Niveaux de classification.....	p. 102
1.1. Un champ lexical d'inspiration biologique.....	p. 102
1.2. Classe, groupe et lignée	p. 103
1.3. Famille, opération et intention techniques.....	p. 105
1.4. Générations, espèces, sous-lignées, genres	p. 107
2. Les diagrammes de fonctionnement.....	p. 108
2.1. De l'utilité des représentations graphiques	p. 108
2.2. Principes de construction des diagrammes	p. 110
2.3. Diagrammes et niveaux de la technique	p. 112
3. Les diagrammes de lignées.....	p. 115
3.1. Regards croisés d'Yves Deforge et Michel Cotte	p. 115
3.2. Principes de construction	p. 117
4. L'invention et l'innovation dans les processus de conception.....	p. 118

4.1. La technique comme optimisation.....	p. 118
4.2. La matrice des performances	p. 121
4.3. La typologie des inventions.....	p. 123
4.4. La matrice coûts/performances.....	p. 127
Conclusion de chapitre	p. 128
Conclusion de partie.....	p. 129

DEUXIÈME PARTIE : HISTOIRE GÉNÉTIQUE DES LIGNÉES DE TÉLESCOPES

Chapitre 4 : Construction de l'objet d'étude p. 133

1. L'analogie biologique.....	p. 134
1.1. L'œil et la vision	p. 134
1.2. L'œil et le télescope.....	p. 134
2. Approche opératoire du télescope	p. 139
2.1. Une première définition de l'objet d'étude	p. 139
2.2. Focalisation par réfraction et réflexion.....	p. 141
3. Première caractérisation du télescope.....	p. 144
3.1. Quelques notions d'optique	p. 144
3.2. Les aberrations géométriques et chromatiques	p. 147
3.3. La limite de diffraction.....	p. 153
3.4. La limite de visibilité.....	p. 154
4. Genre technique et domaines d'application.....	p. 156
4.1. Spectre électromagnétique et observations astronomiques.....	p. 156
4.2. Les « non-télescopes ».....	p. 162
4.3. Autres genres de télescopes.....	p. 165
Conclusion de chapitre	p. 172

Chapitre 5 : Analyse mécanologique des télescopes optiques..... p. 175

1. Analyse structurale.....	p. 176
1.1. Les éléments techniques constitutifs du télescope.....	p. 176
1.2. Caractéristiques techniques structurales	p. 179
1.3. Propriétés optiques opérationnelles	p. 181
2. Analyse opérationnelle	p. 183

2.1. Le diagramme de fonctionnement du télescope	p. 183
2.2. Application de la matrice des critères de performance	p. 185
3. Analyse historique	p. 187
3.1. La naissance des réfracteurs	p. 187
3.2. La concurrence des télescopes réflecteurs	p. 196
3.3. L'exception catadioptrique	p. 199
4. L'évolution des télescopes	p. 202
4.1. <i>L'aperture fever</i>	p. 202
4.2. Diagramme génétique des télescopes optiques	p. 208
Conclusion de chapitre	p. 211

Chapitre 6 : Extension de l'analyse aux autres échelles de la technique..... p. 213

1. Le progrès à l'échelle élémentaire	p. 214
1.1. L'évolution des miroirs et des lentilles.....	p. 214
1.2. La diminution de la masse surfacique	p. 216
1.3. La segmentation et le passage à l'optique active	p. 219
2. L'échelle infra-élémentaire.....	p. 222
2.1. Les propriétés des matériaux.....	p. 222
2.2. La pertinence du concept de lignée de matériaux.....	p. 226
2.3. Aparté : les étranges miroirs liquides	p. 228
3. L'insertion du télescope au sein de l'observatoire astronomique	p. 229
3.1. La coopération avec les instruments.....	p. 229
3.2. L'affranchissement vis-à-vis du milieu associé	p. 231
3.3. La segmentation et la virtualisation.....	p. 235
4. L'échelle supérieure de la technique.....	p. 240
4.1. Les réseaux d'observatoires	p. 240
4.2. L'observatoire comme terminal.....	p. 241
4.3. La synchronicité du progrès aux différentes échelles	p. 242
Conclusion de chapitre	p. 244
Conclusion de partie	p. 245

TROISIÈME PARTIE : ÉTUDE DES DYNAMIQUES TECHNIQUES

Chapitre 7 : Les directions de l'évolution technique	p. 249
1. Évolutionnisme et déterminisme technique	p. 250
1.1. Les lois d'évolution et l'autonomie de la technique.....	p. 250
1.2. La critique du déterminisme technique	p. 252
1.3. Les différentes échelles du progrès technique.....	p. 254
2. Les enjeux du concept de progrès technique.....	p. 257
2.1. Quelques arguments antiévolutionnistes.....	p. 257
2.2. Progrès et lignées techniques	p. 261
2.3. Évolution convergente et téléonomie.....	p. 263
3. Technoévolution et bioévolution	p. 265
3.1. L'inspiration biologique de la mécanologie.....	p. 265
3.2. Darwinisme et lamarckisme techniques	p. 268
3.3. Le caractère méthodologique de l'analogie	p. 271
4. L'évolutionnisme technique vu par la mécanologie génétique	p. 273
4.1. L'évolution des machines chez Jacques Lafitte	p. 273
4.2. Le statut du progrès en génétique technique.....	p. 275
4.3. Les lois d'évolution de la TRIZ.....	p. 278
5. Mécanologie et dynamiques évolutives.....	p. 280
5.1. Première synthèse	p. 280
5.2. Le(s) rythme(s) de l'évolution technique.....	p. 281
5.3. Le statut des tendances évolutives	p. 283
Conclusion de chapitre	p. 284

Chapitre 8 : Les tendances évolutives des télescopes

p. 287

1. Les logiques d'évolution à l'échelle individuelle.....	p. 288
1.1. La course au gigantisme	p. 288
1.2. La complexification correctrice	p. 266
1.3. Les risques d'hypertélie	p. 294
2. Concrétisation et idéalisation des instruments scientifiques	p. 296
2.1. Surabondance des effets et convergence fonctionnelle	p. 296
2.2. La concrétisation comme processus émergent.....	p. 297
2.3. La substitution des lignées techniques et le processus d'idéalisation.....	p. 299

3. Logiques évolutives des ensembles instrumentaux.....	p. 300
3.1. La virtualisation des observatoires astronomiques	p. 300
3.2. La logique de segmentation.....	p. 303
3.3. La transition vers le réseau	p. 305
4. L'évolution des instruments scientifiques	p. 307
4.1. Le progrès phénoménotechique des instruments.....	p. 307
4.2. Une interprétation des processus de concrétisation et d'idéalisation.....	p. 308
4.3. Virtualisation et informatisation	p. 311
Conclusion de chapitre	p. 313

Chapitre 9 : Perspectives évolutionnistes et prospective technique **p. 315**

1. Le système industriel à l'ère scientifique de la technique.....	p. 316
1.1. Bref historique des rapports entre science et technique	p. 316
1.2. La concrétisation phénoménotechique	p. 320
1.3. Les trois stades de la technique.....	p. 323
1.4. Recherches technologiques fondamentales et appliquées	p. 326
2. La naturalisation des artefacts	p. 329
2.1. L'objet technique comme médiation	p. 329
2.2. La nature comme stock de potentialités d'évolution.....	P. 331
2.3. La naturalisation technologique.....	p. 333
3. Éléments de prospective technique.....	p. 335
3.1. Une prospective exploratoire	p. 335
3.2. Les dimensions du possible technique.....	p. 336
3.3. Les scénarios d'évolution.....	p. 338
4. Les futurs des télescopes.....	p. 340
4.1. Le scénario tendanciel	p. 340
4.2. Les scénario probables	p. 341
4.3. Les scénarios ambitieux	p. 342
Conclusion de chapitre	p. 344
Conclusion de partie.....	p. 345

Conclusion et perspectives..... **p. 347**

ANNEXES

Bibliographie	p. 353
----------------------------	--------

Annexe A

A.1. Bibliométrie et grands observatoires	p. 375
A.2. Entretien avec le responsable du segment sol de la mission Euclid.....	p. 385
A.3. Les grands télescopes optiques au sol.....	p. 394

Annexe B - Publications

B.1. La généalogie des Micromegas	p. 401
B.2. L'étude des lignées phénoménotecniques	p. 407
B.3. Quel laser pour Mars ?.....	p. 419
B.4. Relecture mécanologique de l'histoire des télescopes.....	p. 437
B.5. Le travailleur-machine.....	p. 451

Rapport-Gratuit.com

Avant-propos¹

Une brève histoire de l'astronomie pré-télescopique

L'astronomie est la plus ancienne science de la nature.

Paul COUDERC, *Histoire de l'astronomie classique*

La tentation est grande de projeter sur nos ancêtres notre propre fascination pour les étoiles. Cependant, il semble bien que l'observation des astres soit une pratique apparue à l'aube des premières civilisations. Probablement cantonnée à un rôle mystique lors du Paléolithique, cette observation s'est ensuite nourrie de la nécessité de disposer de calendriers réguliers pour les premiers cultivateurs du Néolithique. Que ce soit le cercle de Goseck (4800 av. J.-C.) ou les mégalithes de Nabta Playa (4000 av. J.-C.) et de Stonehenge (3000 av. J.-C.), tous disposent, en plus de leurs fonctions sacrées et rituelles, d'indéniables fonctions calendaires, marquant avec une relative précision le passage des solstices, « les peuples cultivateurs [ayant] éprouvé le besoin d'ajuster leur calendrier au cours du Soleil qui rythme l'agriculture ; en s'y efforçant, ils ont fondé l'astronomie² ». Même si leur vocation est encore largement discutée aujourd'hui, ces grands cercles mégalithiques semblent bien être les ancêtres des observatoires modernes.

Avec l'apparition de l'écriture, l'astronomie a commencé à se constituer en tant que corpus de connaissances, transmissible et cumulatif, notamment chez les Babyloniens et les Égyptiens, marquant ainsi véritablement sa naissance en tant que science naturelle³. Toujours en lien avec le sacré (position des astres) ou l'agriculture (passage des saisons), elle se dota aussi rapidement d'instruments permettant d'améliorer la précision des observations. Le gnomon (Babylone, 2000 av. J.-C.), ancêtre du cadran solaire, et la clepsydre (Égypte, 1400 av. J.-C.) permettent ainsi une meilleure mesure de l'écoulement du temps, préalable à toute observation astronomique, et sont des instruments que l'on retrouve en Chine et chez les Mayas, deux civilisations ayant

¹ Cet avant-propos a vocation à mettre en perspective les travaux présentés dans ce manuscrit. En effet, l'astronomie, qu'elle soit théorique ou observationnelle, ne démarre pas avec l'apparition du télescope ; il nous semblait donc pertinent de proposer un bref panorama de l'évolution de cette discipline *avant* 1609.

² Paul Couderc, *Histoire de l'astronomie classique* [1945], Paris, Presses universitaires de France, 1982, p. 13.

³ Christopher B. Walker, *Astronomy Before the Telescope*, Londres, British Museum Press, 1999.

également eu recours aux observations astronomiques dans le cadre de leurs rites sacrés. Cette proto-astronomie a en outre eu un but pratique, comme le relève Maurice Daumas : « L'observation du soleil et des astres a servi très tôt à mesurer l'écoulement du temps, aussi les premiers dispositifs imaginés pour faciliter cette observation et surtout pour la rendre comparative remontent-ils aux âges les plus reculés⁴ ».

Mais c'est avec les Grecs que la science des astres naît vraiment ; et, réciproquement, « les plus grandes réalisations de la science grecque à ses débuts ont eu pour cadre l'astronomie⁵ ». L'émergence du rationalisme et du « positivisme » de l'école de Millet contribua à autonomiser l'astronomie – de *ἀστρον*, *ástron* (« astre ») et *νόμος*, *nómos* (« loi ») –, la séparant notamment de l'astrologie et des autres pratiques ésotériques⁶. La volonté de se débarrasser de l'influence du mysticisme (Platon) et l'essor de la géométrie (Euclide) motivèrent la recherche de lois simples, basées sur les observations. Les opinions de Platon portant sur la portée de ces lois astronomiques ont notamment été recueillies par Eudème de Rhodes (IV^e siècle av J.-C.), un disciple d'Aristote :

Platon admet en principe que les corps célestes se meuvent d'un mouvement circulaire, uniforme et constamment régulier ; il pose alors aux mathématiciens ce problème : Quels sont les mouvements circulaires, uniformes et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse sauver les apparences présentées par les planètes⁷ ?

Le but de l'astronomie est donc de rendre compte des observations, de « sauver les phénomènes » (en grec *Σώζειν τα Φαινόμενα*, *Sozein ta Phainomena*), en élaborant des systèmes géométriques fondés sur un certain nombre de postulats esthétiques - dont le recours exclusif à des « mouvements circulaires, uniformes et parfaitement réguliers ». Un des premiers philosophes grecs à avoir tenté de répondre à ces questions fut Eudoxe de Cnide (IV^e siècle av J.-C.). De ce contemporain de Platon, nous est parvenu ce qui s'apparente au premier système cosmologique connu : la théorie des sphères homocentriques. Dans cette théorie, le cosmos s'apparente à un emboîtement de 27 sphères : trois pour le Soleil, trois pour la Lune, quatre pour chacune des cinq planètes⁸ et une dernière pour les « étoiles fixes ». Chacune de ces sphères est centrée sur la

⁴ Maurice Daumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, Éditions Jacques Gabay, 2003, p. 15.

⁵ Geoffrey E. R. Lloyd, *Une histoire de la science grecque*, Paris, Seuil, 1999, p. 100.

⁶ Les Grecs sont les premiers à mettre en relation l'observation des astres avec la géométrie, c'est-à-dire à étudier non seulement la position des astres (centrale en astrologie) mais aussi et surtout leur trajectoire.

⁷ Pierre Duhem, *Sauver les phénomènes. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Hermann, 1908, p. 3.

⁸ Les seules planètes observables depuis la Terre (en termes de magnitude et de sensibilité de l'œil humain) sont Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

Terre, immobile et au centre du cosmos, et c'est le mouvement de rotation combiné de chaque ensemble de sphères associées à un astre qui rend compte de son mouvement apparent. Le sens et la vitesse de rotation peuvent varier, mais l'injonction platonicienne est respectée : chacune de ces sphères homocentriques est animée d'un mouvement de rotation uniforme. Callippe de Cyzique puis Aristote reprirent ce modèle et le complexifièrent, faisant passer le nombre de sphères homocentriques à 34 puis 56. Pourquoi des systèmes aussi compliqués ? La raison réside dans la complexité du mouvement des planètes sur la sphère céleste (notamment le fameux problème du mouvement rétrograde), qu'il est difficile – impossible, en réalité – d'expliquer en ne recourant qu'à des mouvements circulaires uniformes. Nous touchons là aux limites du programme platonicien, et plus généralement à celles de la science grecque, bien trop attachée à certains postulats métaphysiques (perfection du mouvement circulaire uniforme) et principes de construction (à la règle et au compas)⁹.

Afin de mesurer la position des astres et d'en mieux déterminer les mouvements, les astronomes grecs développèrent et perfectionnèrent un certain nombre d'instruments, qui vinrent épauler la vision humaine et permirent une plus grande précision dans les mesures. L'un des tout premiers instruments employés à ces fins fut l'alidade, simple réglette matérialisant le rayon lumineux issu de l'étoile à son arrivée et permettant la mesure d'un angle. Son origine remonte au moins au III^e siècle avant notre ère. Plusieurs alidades peuvent aussi être utilisées conjointement et constituer ainsi de nouveaux instruments, comme le compas (assemblage de deux alidades essentiellement utilisé en navigation pour déterminer la déviation par rapport à une direction donnée) ou le *triquetrum*, aussi appelé « règle parallactique », permettant de mesurer la distance zénithale, ou altitude, d'un objet céleste. Les instruments à base de cercles ou de parties de cercle constituent l'autre grande famille d'instruments utilisés à partir de cette époque¹⁰. Les armilles (cercles gradués permettant de mesurer la position angulaire d'un astre) et les quadrants (quart de cercle réalisant la même fonction que le *triquetrum*) en sont les éléments constitutifs. Les premières utilisations attestées de ces instruments remontent à Ératosthène (III^e siècle av. J.-C.), célèbre pour être le premier dont la méthode de calcul de la circonférence terrestre nous soit connue. C'est aussi lui qui est crédité de l'invention de la sphère armillaire (appelée « astrolabe sphérique » par certains auteurs), assemblage complexe de plusieurs armilles et alidades permettant de modéliser la sphère céleste et de mesurer des angles sur 360° par rapport à plusieurs directions. Ces deux proto-familles instrumentales, que nous définissons structurellement (géométriquement) par la ligne et le cercle,

⁹ Paul Couderc, *op. cit.*, p. 72.

¹⁰ Ludwik M. Celnikier, *Histoire de l'astronomie occidentale*, Paris, Lavoisier, 1996.

constituent ce que Maurice Daumas a qualifié de « fonds des instruments classiques¹¹ », à partir duquel les instruments modernes ont pu se développer.

Ces différents instruments ont ensuite été repris et perfectionnés par Hipparque de Nicée (II^e siècle av J.-C.). Souvent considéré comme le plus grand observateur de l'Antiquité, il est l'inventeur de la pinnule (plaque de métal percée disposée à l'extrémité d'une alidade et faisant office de viseur), dispositif qui a grandement amélioré la qualité des mesures et lui a permis, en particulier, de constater la précession des équinoxes. Reprenant en outre les travaux d'Apollonios de Perga (III^e siècle av J.-C.), grand théoricien des coniques et probable inventeur de l'astrolabe planisphérique, Hipparque a proposé un nouveau modèle cosmologique basé sur le recours aux épicycles, dans lequel chaque planète est animée d'un mouvement circulaire uniforme autour d'un cercle (l'épicycle) dont le centre est lui-même en rotation autour d'un cercle plus grand (le déférent) centré sur la Terre. Afin d'expliquer les différences de taille apparente des planètes, Hipparque a avancé un second modèle, dans lequel le déférent n'est plus centré sur la Terre (l'hypothèse excentrique). Cette hypothèse constitue un premier déphasage de la centralité terrestre : si la Terre est toujours au centre du cosmos, elle n'est plus le centre de révolution des planètes. Pour les autres avancées théoriques, nous retiendrons les travaux d'Aristarque de Samos (III^e siècle av J.-C.), qui, reprenant en partie les idées d'Héraclide du Pont (IV^e siècle av J.-C.), fut le premier à suggérer un modèle héliocentrique, « dix-sept siècles en avance sur l'humanité¹² », mais qui, noyé parmi la multitude de modèles en cours à cette époque, ne rencontra pas un écho suffisant pour s'imposer.

À ces précurseurs succédèrent les astronomes de l'école d'Alexandrie, dont les travaux, aussi bien théoriques qu'observationnels, culminèrent avec l'œuvre de Claude Ptolémée¹³. Synthétisant plusieurs siècles de données astronomiques, l'*Almageste* (daté aux alentours de 150) reste connu dans l'histoire des sciences comme une œuvre majeure de l'Antiquité, notamment en astronomie, par la reprise et la formalisation de la théorie des épicycles, dont la version de Ptolémée perdurera jusqu'à la Renaissance et la révolution copernicienne¹⁴. L'apport de l'astronome grec réside dans l'introduction d'un nouveau point, l'équant, symétrique de la Terre par rapport au centre du déférent. Dans ce modèle, le centre de l'épicycle est animé d'un mouvement uniforme par rapport à ce nouveau point (et non plus par rapport au centre du déférent). Ce nouveau modèle constitue

¹¹ Maurice Daumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, *op. cit.*, p. 15-32.

¹² Paul Couderc, *op. cit.*, p. 56.

¹³ Geoffrey E. R. Lloyd, *op. cit.*, p. 307-331.

¹⁴ Yves Gingras, Peter Keating et Camille Limoges, *Du scribe au savant. Les porteurs du savoir de l'Antiquité à la révolution industrielle*, Paris, Presses universitaires de France, 2000.

ainsi une seconde émancipation par rapport à l'injonction antique, platonicienne et aristotélicienne, de recourir uniquement à des mouvements circulaires uniformes. La fin de l'âge d'or hellénique amorce une période de stagnation dans le développement de l'astronomie. Pendant plus d'un millénaire (de 530, date de la suppression de la dernière école néo-platonicienne par Justinien, à 1530, date de parution du *De revolutionibus orbium caelestium* de Copernic), les progrès observationnels et théoriques vont connaître un net ralentissement en Occident. Si jusqu'à présent notre histoire semble avoir oublié les autres grandes civilisations (Égypte, Inde, Chine, Mayas...), c'est que ces dernières ont évolué de façon relativement indépendante vis-à-vis de l'astronomie occidentale, et leurs observations, certaines particulièrement précises, ne sont rentrées que tardivement en contact avec l'Occident. N'ayant en outre pas contribué au développement du télescope, nous ne recroiserons plus ces différentes aires civilisationnelles dans notre étude¹⁵.

C'est au sein du monde arabe que le savoir issu de l'Antiquité va demeurer le plus vivace¹⁶. Conservant et traduisant les travaux des Anciens, les astronomes arabes vont en outre généraliser un certain nombre de leurs résultats, en s'appuyant notamment sur de nouveaux outils mathématiques, et apporter des progrès à l'astrométrie, avec la parution d'importants catalogues d'étoiles. Les instruments d'observation vont aussi connaître de nombreuses améliorations¹⁷, en raison de la nécessité de développer la navigation ou pour les besoins de la nouvelle religion islamique (détermination du début du mois du ramadan ou de l'est géographique, par exemple). Les astronomes arabes vont ainsi perfectionner l'astrolabe planisphérique (« the archetypal scientific instrument¹⁸ ») ainsi que les sphères armillaires et célestes, les anneaux équinoxiaux, les règles parallactiques, les quadrants et autres équatoires, tout en améliorant les cadrans solaires et les horloges (à eau ou à engrenages)¹⁹. Certains de ces instruments grandissent en taille et gagnent en précision, à tel point qu'aux observations isolées et à l'œil nu pratiquées par Ptolémée, succède la construction d'observatoires permettant la manipulation de ces gigantesques instruments et

¹⁵ Pour davantage d'informations au sujet de ces civilisations, nous conseillons Jean-Marc Bonnet-Bidaud, *4000 ans d'astronomie chinoise. Les officiers célestes*, Paris, Belin, 2017 ; Tony Aveni, *Stairways to the Stars. Skywatching in Three Ancient Cultures*, New-York, John Wiley & Sons, 1997 ; Subhash Kak, « Birth and early development of Indian astronomy », in Helaine Selin (ed.), *Astronomy across culture : the history of non-western astronomy*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000.

¹⁶ Pour plus de détails sur l'astronomie arabe, nous renvoyons à l'excellent ouvrage de Roshdi Rashed et Régis Morelon (dir.), *Histoire des sciences arabes, 1. Astronomie, théorique et appliquée*, Paris, Seuil, 1997.

¹⁷ Voir à ce titre « L'astronomie d'observation et ses instruments », dans Ahmed Djebbar, *Une histoire de la science arabe*, Paris, Seuil, 2001, p. 169-180.

¹⁸ Gerard L'E. Turner, *Scientific instruments (1500-1900): An Introduction*, Londres, Philip Wilson – Berkeley et Los Angeles, University of California Press, 1998, p. 12.

¹⁹ Francis Maddison, « Observatoires portatifs : les instruments arabes à usage pratique », in Roshdi Rashed et Régis Morelon (dir.), *op. cit.*, p. 140.

regroupant les mêmes composants que les observatoires modernes : bâtiments, instruments, programmes, équipes. Il est intéressant de noter que les savants arabes ont cherché en particulier à construire des dispositifs d'une taille de plus en plus importante afin d'obtenir une précision accrue²⁰, préfigurant la course au gigantisme du XX^e siècle. De même, ils « ont cherché à innover pour rendre en général plus utiles leurs différents instruments ou pour en créer d'entièrement nouveaux »²¹, pratiquant une recherche de généricité caractéristique de certaines pratiques d'innovation actuelles. Nous trouvons à la même époque les premières descriptions des tubes d'observation²² par Al-Biruni (973-1048), bien que les premières mentions d'un tel instrument soient à chercher au siècle précédent, notamment chez Al-Battani (856-929)²³. Apporté à l'historiographie occidentale par Rob Eisler en 1949²⁴, le « tube d'observation polaire » constitue pour certains le précurseur du télescope, dans la mesure où il permettait « de focaliser le regard sur un coin du ciel en éliminant la lumière parasite²⁵ ». Utilisé dans les grands observatoires arabes, ce simple tube, en bois ou en métal, permettant de viser un objet lointain ne reste à nos yeux qu'un élément *structurel*, précurseur *fonctionnel*, mais non *opérationnel*, du télescope.

Aux côtés de l'observatoire astronomique d'Ulugh Beg à Samarcande, l'observatoire de Maragha reste l'un des plus célèbres de l'astronomie arabe. Les astronomes qui y travaillaient proposèrent, entre autres, de nombreux nouveaux modèles cosmologiques permettant de concilier la physique d'Aristote et les problèmes soulevés par le modèle de Ptolémée. Les travaux de l'école de Maragha culminèrent avec l'ouvrage *Al-tadhkirah fi'ilm al-haya* (*Trésor de l'astronomie*) de Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274), directeur de l'observatoire, dont le modèle, basé sur le « couple d'al-Tusi » met en jeu un petit cercle roulant sur un plus grand, permet de rendre compte des trajectoires des planètes sans déroger au mouvement circulaire uniforme. Plus connu en Occident sous le nom de « théorème de La Hire », ce modèle apparaîtra dans l'œuvre de Copernic, pouvant faire d'al-Tusi le « chaînon manquant » entre Ptolémée et Copernic. Il en va de même pour les modèles planétaires mobilisés par Ibn al-Shâtir (1304-1375) dans sa théorie géocentrique. Cependant, en l'absence de preuves historiques permettant d'établir une transmission directe entre l'astronomie arabe et les travaux de Copernic, les travaux d'al-Tusi et d'al-Shâtir sont davantage à ranger au nombre des précurseurs *méthodologiques* possibles du modèle héliocentrique, qu'au nombre de ces ancêtres

²⁰ Régis Morelon, « Panorama général », in Roshdi Rashed et Régis Morelon (dir.), *op. cit.*, p. 24.

²¹ *Ibid.*

²² Henri Michel, « Les tubes optiques avant le télescope », *Ciel et Terre*, vol. 70, 1954, p. 175.

²³ Régis Morelon, art. cit., p. 25 : « Ce tube d'observation, dont l'utilisation est ainsi attestée dans le monde arabe au moins à partir de la fin du IX^e ou du début du X^e siècle. »

²⁴ Rob Eisler, « The Polar Sighting Tube », *Archives internationales d'histoire des sciences*, 1949, n° 6, p. 312-332.

²⁵ Régis Morelon, art. cit., p. 25.

ontologiques certains. Mais si les astronomes arabes sont souvent considérés dans l'historiographie traditionnelle comme de simples légataires de Ptolémée, et des savants grecs en général, ce n'est pas faire honneur à l'astronomie arabe qui, par ses nombreux commentaires et discussions de l'*Almageste*, appuyés parfois par de nouvelles observations, contribua à enrichir les connaissances astronomiques, de l'Orient comme de l'Occident. Les instruments et nouveaux modèles conçus sous les patronages abbassides (750-1250) permirent à l'astronomie de continuer à progresser, tandis que l'Europe latine s'en remettait, exclusivement et sans remise en question, à Ptolémée.

Les contacts avec l'Occident médiéval, en Sicile et en Andalousie notamment, permirent une diffusion des différents travaux des astronomes arabes, et notamment de leurs tables astronomiques, parmi les plus précises de l'époque, dont les *Tables de Tolède*, compilées vers 1080 (soit cinq ans avant que la ville ne soit reprise par les chrétiens), qui reposent sur des calculs issus du modèle ptoléméen. Poussé par le besoin de mettre à jour des tables désormais obsolètes, le roi Alphonse X de Castille ordonna à ses astronomes d'en compiler de nouvelles. Basées sur les positions observées des corps célestes à Tolède depuis le 1^{er} janvier 1252 (année du couronnement du roi Alphonse X), les *Tables alphonsines* s'appuient elles aussi sur le modèle ptoléméen, mais en améliorent la qualité des prédictions (notamment à des fins de navigation et d'astrologie). Ces tables serviront d'ailleurs directement à Copernic pour ses travaux. Notons qu'à la même période, Roger Bacon (1214-1294), après avoir donné la description du polissage d'une lentille, construisit les premiers instruments pour observer le Soleil, dont une chambre noire²⁶, ancêtre de l'appareil photographique. La *camera obscura* (« chambre noire » en latin) est à ce titre « le premier système, ou la première ruse, pour observer les éclipses sans se brûler les yeux », jetant les bases d'une « connexion optique/astronomie » qui « persistera, sous une forme complexifiée, avec l'apparition du télescope²⁷ ». Ce dispositif, dont le fonctionnement était connu dès l'Antiquité²⁸, généralise en un sens le principe du grand sextant²⁹ d'Al-Khujandi (940-1000) en agissant²⁹ comme un filtre et en écartant la lumière parasite, à l'instar du tube d'observation. Il trouva d'ailleurs lui aussi sa place au sein de l'Occident médiéval latin, où il devint « un instrument classique en astronomie³⁰ ».

²⁶ Il s'agissait, à l'origine, d'une pièce obscure munie d'une petite ouverture laissant entrer la lumière et permettant l'observation sur l'écran opposé.

²⁷ Martine Bubb, *La camera obscura. Philosophie d'un appareil*, Paris, L'Harmattan, 2010, p. 26.

²⁸ Les premières descriptions par le philosophe chinois Mo Di remontent au IV^e siècle av J.-C. et seront reprises par Aristote.

²⁹ Ses dimensions (20 mètres de long, 10 mètres de haut) autorisaient des observations relativement précises.

³⁰ Régis Morelon, art. cit., p. 25.

En Occident justement, si l'astronomie était enseignée à l'université dans le cadre du quadrivium dès le XII^e siècle, ce n'est qu'avec la discussion des travaux de Nicolas Copernic (1473-1543) qu'elle trouva un second souffle³¹. Même si, d'Isidore de Séville (~560-636) et Bède le Vénérable (672-735) à Buridan (~1295~1360) et Oresme (1320-1382), la figure de « celui qui étudie les astres » a peu à peu perdu son caractère religieux, elle reste trop fortement marquée par la scolastique, se bornant à reprendre les travaux de Ptolémée sans remise en cause des systèmes théoriques, ni tentative de nouvelles observations. Copernic se base lui aussi sur les travaux de ses prédécesseurs, mais pour mieux les dépasser : il cite expressément Philolaos (mouvement de la Terre) et Aristarque (hypothèse géocentrique), connaît les écrits théoriques de Nicolas de Cues (1401-1464) et de Regiomontanus (1436-1476) et est soupçonné de connaître les travaux des savants de Maragha³². Son ouvrage le plus célèbre est le *De revolutionibus orbium caelestium* (*Des révolutions des orbés célestes*), dans lequel, bien qu'avançant masqué, il défend vigoureusement le système héliocentrique. Cependant, il ne fonde sa théorie ni sur de nouvelles observations, ni sur des avancées théoriques, et ses arguments sont avant tout d'ordre « esthétique ». Il affirme non seulement que tous les phénomènes célestes observés et connus sont compatibles avec un système héliocentrique, mais encore que, de la sorte, ils s'expliquent aussi plus simplement. Si l'histoire a retenu le nom de Copernic, ce n'est donc ni en tant qu'observateur, ni en tant que théoricien, mais plutôt comme défenseur d'un nouveau modèle qui bouleversa la conception que l'homme avait de sa place dans l'Univers³³.

Né quelques années après la mort de Copernic, Tycho Brahe (1546-1601) est l'autre grand astronome du XVI^e siècle. S'il marque une rupture dans l'histoire de l'astronomie, et plus généralement dans l'histoire des sciences, c'est parce qu'à une époque où prévaut encore le respect de la tradition et des Anciens, il donne la priorité à l'observation, position que défendra avec force son contemporain Francis Bacon (1561-1626). Il soigne la fabrication et la mise au point de ses instruments, qui lui permettent de recueillir un nombre considérable de données. Bien qu'effectuées à l'œil nu, ses mesures sont dix fois plus précises que celles de ses prédécesseurs en Europe, et il est généralement considéré comme le plus grand observateur de l'histoire de l'astronomie. Sous le patronage du roi Frédéric II de Danemark, il fait construire le palais d'Uraniborg sur l'île de Hven, qui deviendra rapidement le plus grand et le plus prestigieux des observatoires européens. Avec l'aide de ses assistants, dont certains le dépasseront en renommée,

³¹ Yves Gingras, *Histoire des sciences*, Paris, Presses universitaires de France, 2018.

³² Michal Kokowski, « Copernicus, Arabic Science, and the Scientific (R)evolution », in Arun Bala (ed.) *Asia, Europe, and the Emergence of Modern Science*, New York, Palgrave Macmillan, 2012.

³³ Alexandre Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, Paris, Presses universitaires de France, 1962.

il conçoit et réalise de nouveaux instruments d'observation particulièrement imposants³⁴ et extrêmement précis, capables de mesurer la déclinaison des astres à quelques secondes d'arc près - certains auteurs y verront d'ailleurs les précurseurs des grands télescopes modernes³⁵. Les observations de Tycho Brahe étaient si précises, qu'elles permirent à Johannes Kepler (1571-1630) d'établir les lois qui portent son nom : à partir des différences minimales entre les positions théoriques et les observations³⁶, il remarqua notamment que les planètes ne se déplaçaient pas selon des cercles mais suivant des ellipses, le Soleil occupant un des deux foyers, formulant ainsi la première des trois « lois de Kepler ». Contemporain de Galilée³⁷, Kepler peut ainsi être considéré comme le dernier des astronomes pré-télescopiques, dans la mesure où il établit ses lois à partir d'observations réalisées avant l'invention du télescope. Mathématicien génial, premier théoricien de la lunette astronomique, fondateur d'une nouvelle science (la dioptrique) et précurseur d'une seconde (l'astrophysique), nous terminons notre brève histoire de l'astronomie pré-télescopique avec cet homme qui fut aussi un des premiers partisans et défenseurs du système héliocentrique.

³⁴ Notamment un quadrant mural d'un rayon de deux mètres et des sphères armillaires pouvant atteindre les trois mètres de diamètre.

³⁵ Fred Watson, *Stargazer. The Life and Times of the Telescope*, Boston, Da Capo Press, 2004, p. 37: « Truly, the ancestral line of today's great telescopes goes back right through the observing facilities of Hven ».

³⁶ Jürgen Hamel, « Kepler, Galileo, the telescope and its consequences », *Astronomische Nachrichten*, n°330, 2009, p. 526-535.

³⁷ Coïncidence de l'histoire, l'ouvrage *Astronomia Nova* (« La nouvelle astronomie ») dans lequel Képler énonce ses deux premières lois, paraît en 1609.

Introduction

The unaided eye does not see very far or deep [...] One way in which to extend the senses is by the use of ever more imaginative telescopes and microscopes.

Ian HACKING, *Representing and Intervening*

1. Les spécificités de l'astronomie

Un des aspects remarquables de l'astronomie, et qui la distingue des autres sciences naturelles, est l'impossibilité d'effectuer, aussi bien des expériences, que des observations *in situ*.

Bien sûr, d'un certain point de vue, toute science de la nature est une science d'observation, mais ce mot ne prend son véritable sens qu'en astronomie : dans l'étude des cieux, l'observation, c'est-à-dire l'investigation et la mesure excluant toute action sur les phénomènes étudiés, donc toute expérimentation, reste la source quasiment unique de nos connaissances, ou plus exactement de la collecte de données qui font progresser nos connaissances³⁸.

C'est cette spécificité de l'astronomie qui en fait la science positive par excellence : « Aucune science ne peut mieux manifester que l'astronomie cette manière relative de toutes nos connaissances réelles, puisque l'investigation des phénomènes ne peut s'y opérer que par un seul sens³⁹ ». Même si aujourd'hui cette assertion est à nuancer, notamment en ce qui concerne les « nouvelles » disciplines que sont l'astrophysique et la planétologie, l'astronomie, en tant qu'étude de la position et du mouvement des astres est une science qui, par définition, ne peut s'opérer qu'à distance. L'absence d'expérimentation renforce le schéma positiviste *observation - modélisation - validation* et conduit à une survalorisation des étapes observationnelles : « Pour l'instant, et pour longtemps, les astronomes se contentent d'observer, d'échafauder des modèles, d'en déduire des effets observables et de retourner les chercher dans le ciel⁴⁰ ».

³⁸ Jean-Pierre Verdet, *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, 1990, p. 237.

³⁹ Auguste Comte, *Discours sur l'esprit positif*, Paris, Vrin, 1995, p. 68.

⁴⁰ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 237.

Dans une démarche rappelant l'injonction platonicienne à « sauver les phénomènes », Auguste Comte a lui aussi cherché à penser l'adéquation aux observations comme étant l'ultime et unique objectif de la science : « Quel que ce soit le mode, rationnel ou expérimental, de procéder à leur découverte, c'est toujours de leur conformité directe ou indirecte avec les phénomènes observés que résulte exclusivement leur efficacité scientifique⁴¹ ». La démarche des astronomes est cependant différente. Si Galilée, citant Aristote, considérait effectivement que les observations (« ces expériences sensibles ») devaient « avoir la préséance sur tout raisonnement humain⁴² », la recherche des causes du mouvement des astres, et non pas simplement des lois, a toujours fait partie intégrante de l'astronomie. Intervenant au début et à la fin du travail de l'astronome, l'observation revêt donc un caractère central pour l'astronomie. L'ambition rationaliste d'expliquer les phénomènes demeure sous-jacente à la discipline positiviste de « coller aux observations » (version moderne du « sauver les phénomènes » platonicien), le progrès des instruments constituant le principal facteur d'amélioration de la précision de ces observations, il conditionne aussi le renouvellement des hypothèses théoriques.

C'est la raison pour laquelle « historiquement, l'origine des mesures de précision, tellement importante pour toute activité scientifique, se situe dans les premières observations astronomiques⁴³ ». Mais afin d'accomplir ces mesures de précision, il a fallu concevoir des instruments. Car si l'œil humain, cette « merveille de l'évolution⁴⁴ », est un formidable photo-détecteur, il possède un faible pouvoir de résolution et une piètre capacité de visée. C'est pourquoi les instruments d'observation sont apparus très tôt dans l'histoire de l'astronomie⁴⁵ et ont joué un rôle capital dans son développement, ouvrant la voie et montrant l'exemple aux autres sciences de la nature. Comme le souligne Jean-Pierre Sérís : « Jusqu'aux alentours de 1600, l'astronomie était l'unique science utilisant des instruments. En 1700, aucune science ne pouvait prétendre s'en passer⁴⁶ ». Cependant,

Pendant près de deux mille ans, le matériel d'observation sera extrêmement réduit et restera pratiquement le même, comme resteront les mêmes les pratiques de construction de ces instruments, leurs dimensions, et leurs performances⁴⁷.

⁴¹ Auguste Comte, *op. cit.*, p. 66.

⁴² Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* [1632], Paris, Seuil, 1992, p. 78.

⁴³ Francis Maddison, art. cit., p. 139.

⁴⁴ Pierre Léna, *Une histoire de flou. Miroirs, trous noirs et autres mondes*, Paris, Le Pommier, 2019, p. 28.

⁴⁵ Gerard L'E Turner, *op. cit.*, p. 11: « Astronomy is thus the most ancient of the sciences, and from earliest times has required the use of instruments for measurement and observation ».

⁴⁶ Jean-Pierre Sérís, *La Technique*, Paris, Presses universitaires de France, 2013, p. 208.

⁴⁷ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 52.

En effet, nous avons eu l'occasion de voir au cours de l'avant-propos que, des premières alidades et autres armilles à la lunette de Galilée, si les instruments astronomiques *changèrent* (dans leurs formes, leur dimensions...), ils n'*évoluèrent* que très peu. Ces deux proto-familles instrumentales, que nous avons rencontrées au chapitre précédent et que nous avons définies géométriquement par la ligne droite ou le quart de cercle, dont la fonction principale est de mesurer des angles, partagent la caractéristique d'*assister* les sens de l'astronome mais non de les *augmenter*. De fait, la précision atteignable par les différents instruments pré-télescopiques est toujours restée limitée par les capacités de l'œil humain. Astrolabes, alidades, avec ou sans pinnules, compas et sextants, guident, accompagnent l'opérateur humain mais ne produisent pas de changement d'échelle des observations, qui restent limitées à l'échelle humaine. Or, « que serait une science dont l'échelle d'observation resterait l'échelle humaine⁴⁸ » ?

2. Du rôle des télescopes en astronomie

Les historiens de l'astronomie distinguent généralement l'astronomie pré-télescopique de l'astronomie telle que nous la connaissons aujourd'hui⁴⁹. De fait, « l'invention »⁵⁰ de la lunette de Galilée en 1609 – première occurrence du télescope dans l'histoire – constitue un profond bouleversement en ceci que, désormais, l'homme possède un instrument lui permettant d'acquérir une information fiable sur des structures dont l'échelle caractéristique dépasse largement l'échelle humaine. Si certaines observations pré-télescopiques pouvaient être d'une précision remarquable (comme celles effectuées par Tycho Brahe quelques années avant l'apparition de la lunette), celles-ci ne pourront rivaliser avec les mesures effectuées grâce au télescope. Le télescope a donc révolutionné l'astronomie par l'importance et la précision des observations réalisables, mais aussi parce qu'il a opéré un premier déphasage au sein des échelles d'observation. À la modification des pratiques scientifiques s'est donc ajoutée une modification de la vision que l'homme se fait de sa place dans le cosmos, et ce changement épistémologique et ontologique a été caractérisé comme une triple révolution scientifique⁵¹, astronomique⁵² et copernicienne⁵³.

⁴⁸ Gilbert Simondon, « Psychosociologie de la technicité », *Bulletin de l'École pratique de psychologie et de pédagogie de Lyon*, n° 3, 1961, p. 237.

⁴⁹ Christopher B. Walker, *op. cit.*

⁵⁰ Nous reviendrons sur l'emploi de ce terme au chapitre 5.

⁵¹ Thomas Khun, *La Structure des révolutions scientifiques* [1962], Paris, Flammarion, 2008.

⁵² Alexandre Koyré, *La Révolution astronomique* [1961], Paris, Les Belles Lettres, 2016.

⁵³ Thomas Khun, *La Révolution copernicienne* [1973], Paris, Les Belles Lettres, 2016.

Telescopes revealed for Humans distant stars, and transported humanity to the infinite boundaries of the universe. Telescopes have undermined the foundation of religions and the image of our world as a limited space. Utilization of the telescope stimulated a great deal of scientific development⁵⁴.

Almost immediately after its invention, the telescope evolved from a mere optical toy into a “scientific instrument”, an instrument of a new type which at the time was called “philosophical”: the manipulation of such instruments allowed scholars to attain natural philosophical truth. In this way, the telescope paved the way for other scientific instruments which also emerged in the course of the seventeenth century, such as the air pump, the barometer, and the microscope. The emergence of the telescope was an important episode in the history of science and technology not only because it marks the invention of a new device, or because it changed man’s image of the universe, but also because it helped change the ways in which natural philosophy was practiced and what counted as “science”⁵⁵.

Le début de la phase instrumentale⁵⁶ de l’histoire des sciences a parfaitement été saisi par son initiateur : « Grâce au télescope, nous sommes de 30 à 40 fois plus proches [des choses du ciel] qu’Aristote, nous pouvons y observer cent choses qu’il ne pouvait voir ; nous pouvons donc traiter du ciel et du Soleil avec plus de sûreté qu’Aristote⁵⁷ ». Pour le philosophe José Ortega y Gasset, il s’agit d’ailleurs plus largement de l’apparition de la « technique de l’*actio in distans*, fondement de la technique actuelle⁵⁸ ». Le télescope permet de voir plus de choses mais il permet aussi et surtout de mieux voir : « Les nouveaux événements rendus possibles par la lunette ne sont pas seulement quantitativement, mais aussi qualitativement différents⁵⁹ ». Précisons que cela n’a pas été le cas dès l’apparition des premières lunettes (ou des premiers télescopes), du fait de la piètre qualité des premières lentilles (et des premiers miroirs). Cependant, les arguments avancés par les adversaires du télescope, et plus généralement des instruments scientifiques, reposaient sur le postulat que « la nature doit être observée sans intermédiaire, sous peine de n’en recevoir qu’une image déformée et trompeuse⁶⁰ ». Galilée raille cette posture de la scolastique dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* :

⁵⁴ Genrich Altshuller, *The Innovation Algorithm: TRIZ, Systematic Innovation, and Technical Creativity*, Worcester, Technical Innovation Center, 2007, p. 70.

⁵⁵ Albert Van Helden, Sven Dupré, Rob Van Gent et Huib Zuidervaart (éd.), *The Origins of the Telescope*, Amsterdam, Knao Press, 2010, p. 2.

⁵⁶ Alexandre Koyré, *Du monde clos à l’univers infini*, op. cit.

⁵⁷ Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, op. cit., p. 89.

⁵⁸ José Ortega y Gasset, *Méditation sur la technique* [1933], Paris, Allia, 2017, p. 95.

⁵⁹ Fernand Hallyn, « Introduction », dans Galileo Galilei, *Le Messager des étoiles* [1610], Paris, Seuil, 1992, p. 90.

⁶⁰ Maurice Daumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, op. cit., p. 57.

Simplicio — L'auteur refusera tout cela [les observations réalisées via le télescope], n'y voyant qu'illusion de la vue dues aux lentilles du télescope.

Sagredo — Oh ! De sa part c'est trop demander : il veut que l'œil soit incapable de se tromper quand, nu, il juge du mouvement droit des corps lourds qui tombent, mais qu'il se trompe quand il s'agit d'apercevoir ces autres mouvements alors que sa vertu est perfectionnée et accrue de 30 fois⁶¹.

Cette situation est l'exemple type d'un « obstacle épistémologique » qu'il s'agit de franchir. Elle illustre la nécessité, défendue par A. Comte un siècle avant G. Bachelard, de passer par un bouleversement des pratiques, « une grande opération révolutionnaire », afin de s'affranchir des principes et concepts contemporains qui, après avoir été des moteurs, peuvent devenir des freins à la connaissance lorsqu'ils se sclérosent. Or :

Pour entreprendre de mieux observer à travers une lentille, il faut renoncer à connaître par les autres sens ou par le oui-dire. Un changement d'échelle au niveau du regard doit avoir plus de valeur que les corrélations entre les divers témoignages que peuvent apporter les impressions, les lectures ou les leçons⁶².

L'instrumentation, au sens de l'augmentation des capacités d'investigation de la nature, ne va mettre qu'un petit siècle à s'imposer. De l'idée que l'observation est au cœur des pratiques scientifiques, on passe à l'idée qu'« un élargissement et un approfondissement de la science ne peuvent souvent se produire que par un approfondissement des moyens d'observation⁶³ », d'où le qualificatif d'*epistemic enhancer*⁶⁴ pour désigner le nouveau rôle des instruments scientifiques. Les trois modalités selon lesquelles se déploie cette augmentation sont, pour Paul Humphreys, l'*extrapolation*, la *conversion* et l'*augmentation*. Les instruments de l'astronomie peuvent se rattacher à chacune de ces modalités : les télescopes optiques permettent d'augmenter nos capacités d'observation, les antennes peuvent convertir des ondes radio en signal électrique et les détecteurs de neutrinos peuvent étendre les possibilités d'observation à des entités inaccessibles autrement.

⁶¹ Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, *op. cit.*, p. 271.

⁶² Michel Foucault, *Les Mots et les Choses. Une archéologie des sciences humaines* [1966], Paris, Gallimard, 1990, p. 145.

⁶³ Werner Heisenberg, *La Nature dans la physique contemporaine*, Paris, Gallimard, 2000, p. 128.

⁶⁴ Paul Humphreys, *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism and Scientific Method*, New York, Oxford University Press, 2004, p. 4.

Les instruments scientifiques, dont les télescopes, sont ainsi des médiateurs entre l'homme et son environnement, entre le scientifique et les lois de la nature qu'il cherche à mettre au jour. À ce titre, on y retrouve « les trois aspects fondamentaux de la médiation⁶⁵ » que sont, pour G. Simondon, le *prolongement*, la *transformation* et l'*isolement*. Nous ne discuterons pas plus en détail le rapprochement possible des caractéristiques que G. Simondon et P. Humphreys confèrent aux instruments. Notons toutefois qu'on retrouve chez ces deux auteurs l'idée que les instruments permettent l'*extension* des sens humains (au sens d'une extension de l'existant) et qu'ils permettent la *création* d'un nouveau sens, comme pouvait le souhaiter A. Comte en son temps⁶⁶.

Le télescope est un instrument scientifique, mais il est aussi un instrument philosophique : « a philosophical instrument that can be defined as a means for knowledge-producing ends, enabling researchers to extend their reach to remote regions through the production of artifacts⁶⁷ ». Le télescope est l'emblème d'une nouvelle façon de faire de la science, qui n'est plus passive vis-à-vis du monde extérieur mais bel et bien active : « L'œil de l'observateur impose, grâce à l'instrument, sa propre lumière aux objets, et non le contraire⁶⁸ ». Cette idée d'une portée philosophique du télescope, qui substitue un modèle actif de la science à un modèle contemplatif, est également présente chez Descartes, pour qui les instruments tels que le télescope permettent au savant de « plier et détourner les rayons de la lumière en toutes les façons qui peuvent servir à son dessein⁶⁹ ». Moins que d'un *arraisonnement*⁷⁰ heideggerien, il s'agit, à nos yeux, des premiers pas d'une *phénoménotechnique* bachelardienne pour laquelle, « s'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir de connaissance scientifique. Rien n'est donné. Tout est construit⁷¹ ». « Construit » au sens d'une interrogation systématique de la nature ; la nouvelle science instrumentale ne repose plus simplement sur des observations passives, mais bien sur une interrogation active de la nature, d'où l'importance de la médiation technique des instruments. Les noumènes mathématiques se combinent aux phénomènes techniques ; ainsi, « l'instrument scientifique est à la jointure du monde matériel et du monde mathématiquement conçu : il produit réellement celui-ci⁷² ».

⁶⁵ Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, Paris, Seuil, 2005, p. 90.

⁶⁶ Auguste Comte, *op. cit.*, p. 68 : « Il y a tout lieu de penser [...] que l'acquisition d'un sens nouveau dévoilera une classe de faits dont nous n'avons maintenant aucune idée. »

⁶⁷ Daniel Rothbart, *Philosophical Instruments. Minds and Tools at Work*, Chicago, University of Illinois Press, 2007.

⁶⁸ Timothy Reiss, « Espace de la pensée discursive : le cas Galilée et la science classique », *Revue de synthèse*, n° 98, 1977, p. 5-47.

⁶⁹ René Descartes, « Dioptrique », dans *Œuvres complètes*, édition de Charles Adam et Paul Tannery, Paris, Léopold Cerf, 1902, p. 165.

⁷⁰ Martin Heidegger, « La question de la technique », dans *Essais et Conférences*, Paris, Gallimard, 1958.

⁷¹ Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1990, p. 4.

⁷² Jean-Pierre Sérès, *op. cit.*, p. 208.

Si les télescopes « encapsulent⁷³ » une connaissance théorique dans leur fonctionnement, ils ne se réduisent pas pour autant à une simple application de la géométrie. Comme tous les instruments phénoménotecniques opérant une rupture d'échelle, ils « se distinguent des instruments mathématiques par leur usage, souvent extérieur aux mathématiques, mais aussi par leur fonctionnement, qui s'appuie également sur des effets physiques⁷⁴ ». L'instrument ne permet plus seulement l'observation, il interagit avec les phénomènes, il actualise certaines potentialités de la nature :

L'instrument scientifique constitue ainsi l'exemple même de l'objet *concret* : ouvert aux échanges d'informations avec l'opérateur, il représente, à la fois, un objet de très haute technicité et de technicité pure, c'est-à-dire *a priori* sans impératif économique, ni finalité utilitaire. Sa fonction coïncide avec l'opération : le dispositif d'expérimentation constitue une matérialisation de la science d'autant plus raffinée qu'il est de plus haute précision. Il n'est pas seulement une application de principes antérieurs : son fonctionnement prouve l'existence de certaines structures naturelles⁷⁵.

La rupture d'échelle, le changement d'ordre de grandeur dans les observations, que ce soit en matière de distance, de résolution, de longueur d'onde, etc., constitue la caractéristique primordiale du télescope qui le distingue de tous les proto-instruments antérieurs, qui n'étaient que des auxiliaires de la perception. Si la conception passive de l'observation a longtemps subsisté dans l'esprit des philosophes des sciences, c'est sans doute parce que la médiation entre les échelles est une opération qui dépasse les schèmes de la perception et de l'action humaines :

C'est sans doute en partie ce rôle intermédiaire de l'instrument qui le fait si peu apparaître alors qu'il joue un rôle capital ; la perception, le savoir et l'action se situent aux niveaux bien définis des différents ordres de grandeur, alors que les instruments, ces intermédiaires ou ces adaptateurs, disparaissent du champ du savoir et de l'action, si bien que cette sorte d'objets ou de prolongement de l'opérateur sont rarement étudiés pour eux-mêmes⁷⁶.

⁷³ Davis Baird, *op. cit.*, p. 68.

⁷⁴ Évelyne Barbin, « Préface », dans Élisabeth Hébert (dir.), *Instruments scientifiques à travers l'Histoire*, Paris, Ellipse, 2004.

⁷⁵ Vincent Bontems, « Actualité d'une philosophie des machines. Gilbert Simondon, les hadrons et les nanotechnologies », *Revue de synthèse*, Tome 130, 6^e série, n°1, 2009, p. 45.

⁷⁶ Gilbert Simondon, « L'homme et l'objet », dans *La Résolution des problèmes*, Paris, Presses universitaires de France, 2018, p. 55.

La seconde moitié du XX^e siècle a remédié à cet effacement des instruments scientifiques au sein de l'épistémologie⁷⁷. Aujourd'hui plus encore qu'au siècle précédent, « l'évolution nécessairement conjointe des instruments et de la science légitime une étude détaillée des instruments pour aborder avec précision les changements opérés au sein des savoirs scientifiques »⁷⁸. Notre thèse s'inscrit précisément dans cette dynamique : d'un objet *producteur* de connaissances, nous souhaitons faire du télescope un objet *de* connaissance.

3. Mécanologie génétique et étude de cas

Pour cela, il nous faut adopter une démarche robuste et systématique d'appréhension des instruments scientifiques. C'est d'ailleurs un des objectifs de cette thèse que de développer une méthode d'appréhension des objets techniques, à la fois de leur fonctionnement et de leurs évolutions. Les fondations théoriques de cette méthode seront à chercher au sein de la *mécanologie génétique*⁷⁹ : « mécanologie » en tant qu'étude scientifique des machines et « génétique » parce que cette étude se fonde sur la genèse de ces machines⁸⁰. Depuis plusieurs années, s'observe « une tendance au rapprochement et à la fertilisation croisée entre les théoriciens et les modélisateurs de ce que l'on peut appeler les “lois” de structuration et d'évolution des systèmes techniques (approche C-K⁸¹, théorie évolutionniste, systémique technologique, TRIZ⁸², etc.)⁸³ ». Nous commencerons donc par proposer une synthèse entre les différents penseurs qui ont cherché à caractériser les objets techniques pour ce qu'ils *sont*, et non pas uniquement pour ce à quoi ils *servent*. Cette synthèse ne se contentera pas d'être purement descriptive mais se voudra cohérente, et cherchera à déceler des invariants entre leurs différents travaux. Les concepts mobilisés pourront

⁷⁷ Davis Baird, *Thing Knowledge. A Philosophy of Scientific Instruments*, Berkeley, University of California Press, 2004, p. 89 : « By the middle of the twentieth century, the epistemic centrality of instruments, the fact that they are bearers of scientific knowledge, had become a matter of scientific self-awareness. »

⁷⁸ Muriel Guedj, *Itinéraire en histoire des sciences : des concepts et des objets pour des questions nouvelles*, manuscrit HDR, 2016, p. 45.

⁷⁹ Nous reprenons cette expression à Vincent Minier et Vincent Bontems. Le terme de « mécanologie » renvoie aux travaux de Jacques Lafitte, quand celui de « génétique » évoque l'approche de Gilbert Simondon. On peut étendre cette tradition de recherche à la technologie génétique d'Yves Deforge.

⁸⁰ Vincent Minier et al., *Inventing a space mission. The story of the Herschel Space Observatory*, Cham, Springer, 2017, p. 130-131.

⁸¹ Pour « Concept-Knowledge ». Il s'agit d'une méthodologie de la conception développée à l'École des Mines. Voir à ce sujet Pascal Le Masson, Benoît Weil, Armand Hatchuel, *Théorie, méthodes et organisations de la conception*, Paris, Presses des Mines, 2014.

⁸² « Théorie de résolution de problèmes inventifs ». Voir chapitre 2 pour une présentation, et une discussion, de cette théorie.

⁸³ Smail Aït-El-Hadj et Vincent Boly (dir.), *Les Systèmes techniques. Lois d'évolution et méthodologies de conception*, Paris, Lavoisier, 2009, p. 15.

provenir de divers disciplines, et en particulier de la biologie dans la mesure où objets techniques et entités biologiques partagent un certain nombre de propriétés communes⁸⁴

Cet état de l'art et cette synthèse théorique, de par leurs caractères cumulatifs, se veulent aussi une façon d'instituer la *mécanologie* comme discipline en voie de constitution. L'historiographie des techniques constituera un des matériaux sur lesquels reposeront nos analyses, mais il ne s'agit pas pour autant d'une thèse en histoire des techniques. Il existe entre notre approche mécanologique et l'histoire des techniques la même distance que Bachelard décelait entre l'épistémologue et l'historien des sciences : le second a, et doit avoir, un regard davantage normatif ; il propose une reconstruction, non pas arbitraire, mais qui fait sens. En réalité, plutôt qu'une discipline au sens universitaire du terme, nous cherchons à promouvoir et développer une certaine approche, combinant pratiques d'enquête et réflexion théorique, se situant au croisement de plusieurs champs disciplinaires : l'histoire et la philosophie des sciences et des techniques, l'ingénierie des instruments, les méthodes de conception et la gestion des connaissances.

Une telle constitution de la mécanologie génétique à l'articulation des sciences de la nature et des sciences sociales qui les prennent pour objet ne peut pas être postulée, elle doit être réalisée, car « arguer d'une articulation générale entre une pratique empirique et une recherche théorique est insuffisant. Il faut le démontrer pour ce faire⁸⁵ ». La confrontation avec l'étude de cas – les télescopes – sera nécessaire pour valider, ou infirmer, nos hypothèses et rendre *opératoire*⁸⁶ notre méthodologie. L'inscription de ces travaux au sein d'une école doctorale d'astrophysique et d'astronomie trouve ainsi sa justification dans la synthèse des connaissances mobilisées mais aussi du bénéfice qui peut en résulter pour certaines de ses composantes. Plus que la simple exposition d'un programme de recherche, nos travaux se veulent une mise en pratique par des études de cas qui, « lorsqu'elles sont mobilisées en sciences sociales, [...] sont très souvent associées à une série d'interrogations sur la place du théorique dans l'exposition des singularités⁸⁷ ». Il s'agira de *faire*⁸⁸ de la mécanologie génétique, comme Lucien Febvre appelait à *faire* l'histoire des techniques. Pour

⁸⁴ Paul Dumouchel, « Gilbert Simondon's plea for a philosophy of technology », *Inquiry*, n°35, 1992, p. 408 : « properties which, like adaptation or self-organization, are objective determinations of existent realities ».

⁸⁵ Jérôme Lamy, *Faire de la sociologie historique des sciences et des techniques*, Paris, Hermann, 2018, p. 22.

⁸⁶ Jean Piaget donne de la « pensée opératoire » la définition suivante : « Stade auquel l'enfant est devenu capable de processus mentaux réversibles. » Le *Dictionnaire de la langue philosophique* (Paul Foulquié, 1962), propose pour sa part celle du « schème opératoire » : « D'ordre concret, c'est un groupement de schèmes intuitifs, promu, par le fait de leur groupement même, au rang d'opérations réversibles. » Pour notre propos, nous emploierons « opératoire » comme « concernant une opération méthodiquement ordonnée ».

⁸⁷ Jérôme Lamy, *op. cit.*, p. 20.

⁸⁸ Pour une discussion détaillée du sens de ce verbe « faire », nous renvoyons à Jérôme Lamy, *op. cit.*, p. 9-22.

certains, « la mécanologie est une science sociale⁸⁹ », pour d'autres, la science des machines doit être du ressort des disciplines mathématiques⁹⁰. Les objets techniques étant éminemment humains et rationnels, la possibilité d'un discours scientifique prenant la genèse des instruments scientifiques pour objet doit être possible ; elle est même éminemment souhaitable.

Cependant, nous ne choisirons pas n'importe quel objet d'étude, mais un qui soit « un véritable concentré d'histoire technique, scientifique, sociale, institutionnelle et culturelle⁹¹ ». Le choix du télescope comme cas d'étude particulier répond à cette motivation. En tant qu'instrument scientifique, les surdéterminations socioculturelles sont probablement moins prégnantes dans son évolution – contrairement à l'automobile, par exemple, « objet technique chargé d'inférences psychiques et sociales [qui] ne convient pas au progrès technique⁹² ». De plus, avec une histoire largement documentée et s'étendant sur plus de quatre siècles, nous pensons disposer d'une plage temporelle suffisamment étendue pour tester, de façon robuste, notre méthode. En retour, au cours de la mise en pratique, notre méthode pourra se voir modifiée et enrichie : « cette tension permanente entre les aspects théoriques et empiriques est au cœur de la mise en récit des cas⁹³ ».

C'est en particulier l'intégration des spécificités d'un processus d'évolution technique étudié sur le long terme qui est productrice de concepts. Comme G. Simondon l'avait lui-même relevé, l'évolution technique ne se limite pas à la seule concrétisation d'une seule lignée d'individus technique ; elle met en jeu l'évolution à d'autres échelles de la technique (celles des éléments et des ensembles) ainsi que la succession de plusieurs lignées techniques. Pour se repérer dans cette complexité, il était nécessaire de développer des outils, dont un certain nombre de diagrammes et de matrices, permettant de capturer et de synthétiser la connaissance sur les divers niveaux et aspects de l'objet technique⁹⁴. Cette outillage diagrammatique, préconisée par la méthode IDID de Bontems et Minier, et inspirée des méthodes de conception et de gestion des connaissances

⁸⁹ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines* [1932], Paris, Vrin, 1972.

⁹⁰ Pensons aux travaux de Gaspard Monge et Louis Couffignal.

⁹¹ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », dans Anne-Lise Rey (dir.), *Méthode et histoire. Quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?*, Paris, Classiques Garnier, 2003, p. 209.

⁹² Gilbert Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques* [1958], Paris, Aubier, 2012, p. 31. Cet ouvrage sera nommé MEOT dans les notes.

⁹³ Jean-Claude Passeron et Jacques Revel, « Penser par cas. Raisonner à partir de singularités », dans *Penser par cas*, Paris, Éditions de l'EHESS, 2005, p. 19.

⁹⁴ Ce recours aux diagrammes rappelle d'ailleurs les pratiques de conception des ingénieurs, dans la mesure où « through diagrammatic reasoning, engineers establish a design space for simulating a machine's operation » (Daniel Rothbart, *op. cit.*, p. 37).

(notamment de la MASK⁹⁵) est précisément ce qui rend la mécanologie génétique opératoire. Saisir le fonctionnement et les dynamiques évolutives des instruments nécessite de se placer « entre l'anthropologie des techniques de Marcel Mauss et l'histoire longue de la matérialité défendue par les Annales », entre la micro-histoire des pratiques inventives et le temps long d'une histoire sans sujet⁹⁶.

L'étude mécanologique doit aussi permettre de réaffirmer ce qui fait la spécificité du télescope. Elle doit en outre permettre de réaffirmer ce qui fait la spécificité du progrès technique de l'instrumentation scientifique et aboutir à une certaine éthique technique, ne restreignant plus l'objet technique à sa dimension utilitaire, fonctionnaliste. Par simplification rhétorique, qu'ils soient issus des sciences naturelles ou des sciences humaines et sociales, beaucoup d'auteurs considèrent que « the telescopes are simply capable of gathering more light than our unaided eyes⁹⁷ ». Ceci est, à nos yeux, erroné ; un télescope est beaucoup plus que cela, et vouloir le réduire simplement à l'une de ses dimensions empêche de saisir et de comprendre pleinement son fonctionnement. Cette compréhension est pourtant indispensable, si l'on souhaite retracer les dynamiques évolutives de cet instrument scientifique. Lesquelles présentent un intérêt majeur, aussi bien pour les concepteurs que les utilisateurs du télescope : elles permettent non seulement d'avoir un regard rétrospectif, permettant de comprendre *a posteriori* les choix techniques effectués, mais aussi d'avoir un regard prospectif, pouvant déboucher sur des tentatives d'anticipation.

4. Contenu et plan du manuscrit

Dans cette thèse, nous proposerons notre propre méthodologie d'investigation des objets techniques, reposant sur la mécanologie génétique, et faisant appel à des diagrammes que nous développerons pour l'occasion. La mobilisation de ces derniers, à des fins de synthèse et de restitution de l'information, doit aboutir à une véritable gestion *diagrammatique* des connaissances. En outre, l'application de notre méthode aux lignées techniques de télescopes permettra d'en fournir une relecture inédite et instructive, tout en permettant de renouveler un certain nombre de débats en évolutionnisme technique. Cette thèse se veut aussi la démonstration de tous les bénéfices qu'auraient les astronomes à s'emparer de certains outils et concepts issus des sciences

⁹⁵ « Méthode d'Analyse et de Structuration des (K)Connaissances ». Nous reviendrons sur cette méthodologie de gestion des connaissances au chapitre 1.

⁹⁶ Une étude approfondie de l'opposition apparente entre ces deux échelles d'analyse – quoique sur un sujet totalement différent – se trouve dans Norbert Elias, *La Société des individus*, Paris, Pocket, 2008, p. 37-109.

⁹⁷ Paul Humphreys, *op. cit.*, p. 4.

humaines et sociales, que ce soit dans une perspective rétrospective (se réapproprier leurs instruments) ou prospective (aide à la décision).

Notre thèse se déploiera ainsi en trois temps. Dans une première partie, nous tenterons une synthèse, théorique et opératoire, entre les approches mécanologique et génétique. Nous proposerons un état de l'art ainsi qu'une synthèse raisonnée des principes et notions issus des travaux de Jacques Lafitte, André Leroi-Gourhan, Gilbert Simondon, Genrich Altshuller et Yves Deforge. Nous en profiterons pour avancer nos propres catégories, ontologiques et méthodologiques, et développer un certain nombre d'outils diagrammatiques. Cette première partie a aussi vocation à devenir un socle de référence pour toute étude mécanologique ultérieure. Si nous reprendrons et prolongerons des travaux déjà entamés, notamment ceux de Vincent Bontems & Vincent Minier, tout en suivant les conseils programmatiques de certains penseurs *mécanologiques* (Michel Cotte, Smaïl Aït-el-Hadj, Jean-Claude Boldrini), la construction de principes et outils qui nous sont propres tendra à nous éloigner des concepts initiaux de Lafitte et Simondon – ou tout du moins à en proposer une relecture et une réactualisation.

La seconde partie sera le temps de la mise à l'épreuve par l'étude de cas. Il s'agira de définir précisément, et à l'aune de nos catégories, notre objet d'étude – le télescope –, avant de lui appliquer les outils et concepts issus de notre réflexion théorique de la première partie. L'enquête mécanologique sur le télescope sera l'occasion d'en effectuer une quadri-analyse structurale, opérationnelle, historique et génétique, se voulant inédite et novatrice. Cette mise à l'épreuve de notre méthodologie, à travers l'étude d'un objet technique particulier, se veut essentiellement heuristique, et, sans perdre en généralité, nous centrerons notre étude sur les télescopes optiques. Il ne s'agit de toutes façons pas de prétendre à l'exhaustivité mais de proposer un exemple d'application de la mécanologie génétique qui en retour doit aboutir à un nouveau regard sur l'évolution des télescopes. Nous terminerons par une brève extension de l'enquête mécanologique aux autres échelles techniques relatives au télescope que sont les miroirs et les observatoires astronomiques. Ce changement d'échelle dans l'analyse mécanologique est nécessaire, à la fois pour comprendre les spécificités du télescope, mais aussi pour commencer à identifier les possibilités d'extension de nos travaux.

Enfin, la troisième partie s'ouvrira sur une discussion des différentes positions en évolutionnisme technique, enrichie des considérations génétiques issues de l'application de notre méthode. Nous proposerons une synthèse des différentes pensées évolutionnistes avant de formuler un certain

nombre de tendances évolutives propres aux instruments scientifiques et, en particulier, aux télescopes. Là encore, la formulation de ces tendances résultera d'un va-et-vient entre des positions théoriques et les résultats empiriques issus du travail effectué sur les télescopes. Prolonger ces lignes d'analyse doit permettre d'identifier les potentialités d'évolution des futurs instruments astronomiques. L'application de notre méthode à la prospective technique constitue en effet un prolongement naturel, mais aussi prometteur, à nos travaux, et nous concluons notre manuscrit en en présentant quelques pistes.

PREMIÈRE PARTIE

MÉCANOLOGIE ET GÉNÉTIQUE TECHNIQUE

Chapitre 1

Le projet d'une analyse génétique

L'objet technique est soumis à une genèse, mais il est difficile de définir la genèse de chaque objet technique, car l'individualité des objets techniques se modifie au cours de la genèse.

Gilbert SIMONDON, *Du mode d'existence des objets techniques*

Dans son célèbre article de 1935⁹⁸, Lucien Febvre indiquait les trois dimensions dans lesquelles devait se déployer toute tentative de « faire l'histoire des techniques ». Il est bien question de faire et non pas de définir ce que peut être l'histoire des techniques – et encore moins de tenter de cerner une éventuelle « essence de la technique⁹⁹ ». Le projet de Lucien Febvre se veut avant tout opératoire et les pistes qu'il indique vont dans ce sens : il s'agira ainsi de faire « l'histoire technique de la technique », d'étudier « l'insertion de l'invention technique dans la série des faits scientifiques » et de rattacher cette activité au sein « des autres activités humaines ». L'approche génétique que nous allons développer cherche précisément à traiter ces trois dimensions conjointement, permettant ainsi de dépasser les oppositions entre approches internalistes et externalistes, tout en apportant des pistes de réflexion en gestion des connaissances. Si la mécanologie génétique n'a pas vocation à se substituer aux disciplines historiques, et notamment à l'histoire des techniques, ses résultats peuvent néanmoins permettre de porter un nouveau regard sur l'évolution des dispositifs techniques.

⁹⁸ Lucien Febvre, « Réflexions sur l'histoire des techniques », *Annales d'histoire économique et sociale*, n° 36, 1935, p. 531-535.

⁹⁹ Martin Heidegger, « La question de la technique », art. cit. C'est au cours de cette conférence, prononcée devant une école d'ingénieurs, que M. Heidegger affirme notamment que « l'essence de la technique n'est rien de technique ».

1. Le programme des Annales

1.1. Science et technique ; histoire des sciences et histoire des techniques

Les questionnements sur la nature de l'histoire des techniques sont, en partie, la traduction de débats plus anciens ayant pu exister au sein de l'histoire des sciences. Dans cette discipline constituée bien avant l'histoire des techniques, la problématique a pu parfois être évacuée en disant « de quoi » nous souhaitons faire l'histoire. Est-ce une histoire des concepts scientifiques ? Une histoire des théories ? Une histoire des disciplines ? Ou bien encore une histoire des institutions ? Ou peut-être l'histoire d'une zone géographique (ville, pays, continent) ou temporelle (année, période) particulière ? Mais en opérant de la sorte, c'est la question de la définition de la *science* qui est mise au premier plan, au détriment de ce que peut être l'histoire des sciences¹⁰⁰. Par un transfert analogique, ces questionnements ont rapidement émergé lors de la constitution de l'histoire des techniques en tant que discipline autonome. S'agit-il de faire l'histoire des concepts techniques ? Des artefacts ? Des usages de la technique ? Ou bien, encore une fois, une histoire des institutions ? Ou peut-être l'histoire d'une invention particulière ? Ces interrogations s'attachent là encore davantage à tenter de définir ce qu'est la technique plutôt que d'en faire l'histoire. Il est intéressant de noter qu'un certain nombre de considérations s'appliquent aussi bien à l'histoire des sciences qu'à l'histoire des techniques, et il pourra être pertinent d'étudier les concepts transversaux qu'il est possible d'importer en histoire des techniques.

Bien que classique, le rapport entre science et technique est depuis longtemps problématique. Dans l'imaginaire collectif, la technique possède souvent le simple statut de science appliquée. Mais il faut bien voir que « cette vue traditionnelle est radicalement fautive... : elle n'est vraie que pour les sciences physiques et que pour le XIX^e siècle¹⁰¹ ». Si depuis cette affirmation il est largement admis que la technique ne découle pas de la science, qu'en est-il dans le champ historique ? Maurice Daumas apporte une réponse explicite, et à laquelle nous souscrivons, en affirmant que l'histoire des sciences « a plutôt contribué à donner du crédit à cette notion généralement répandue que le progrès des techniques a toujours été commandé au cours des siècles par celui des sciences, ce qui est une contrevérité¹⁰² ». S'il faut reconnaître que « les historiens des sciences ont apporté au

¹⁰⁰ Bruno J. Strasser & Michael Bürgi, « L'histoire des sciences, une histoire à part entière ? », *Revue suisse d'histoire*, n° 55, 2005.

¹⁰¹ Jacques Ellul, *La Technique ou l'Enjeu du siècle*, Paris, Economica, 1990, p. 5.

¹⁰² Maurice Daumas, « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, t. 22, n° 1, 1969, p. 5-32.

cours des trente dernières années une contribution précieuse à l'histoire des techniques contemporaines¹⁰³ », il faut relativiser et admettre que ces contributions traitent de « ces techniques dont le développement (ou l'évolution) est étroitement dépendant de leur contenu scientifique¹⁰⁴ », techniques que l'on qualifiera par la suite de hautement technicisées et dont le mode de production se rattache d'une manière plus générale à la problématique des « technosciences¹⁰⁵ ».

Ainsi l'histoire des sciences ne peut expliquer qu'un pan restreint de l'histoire des techniques (en l'occurrence les plus technicisées, par exemple, les lasers), et sera inapplicable, voire préjudiciable, dans d'autres (par exemple, la thermodynamique)¹⁰⁶. Il faudra donc faire preuve de précaution lorsque l'on voudra convoquer l'histoire des sciences pour parler de l'invention et du développement technique car, et nous rejoignons encore une fois Maurice Daumas sur ce point, « jusqu'au milieu du XIX^e siècle, l'histoire des sciences a été d'une faible utilité à l'histoire des techniques, si elle ne lui a pas été défavorable¹⁰⁷ ». À partir de cette date et aujourd'hui encore, la technicité des dispositifs employés par l'homme est telle que science et technique doivent fonctionner de concert pour permettre des améliorations, contribuant à rendre moins nette la frontière existant entre ces deux domaines. Si cette démarcation entre science et technique peut parfois revêtir un caractère arbitraire, il est cependant nécessaire de bien délimiter l'objet que l'on choisira d'étudier afin d'en fournir une analyse historique rigoureuse. Il ne s'agit donc pas de subordonner l'histoire des techniques à l'histoire des sciences, que ce soit dans ses objets ou dans ses méthodes, mais bel et bien d'interroger leurs liens et de questionner la « part de la science dans l'invention technique », ainsi que l'« insertion de l'invention technique dans la série des faits scientifiques¹⁰⁸ ».

Pour notre étude, la question du « problème de la science¹⁰⁹ » se résume ainsi : dans quelle mesure l'évolution des dispositifs techniques dépend-elle de l'action « déterminante » d'un progrès « proprement » scientifique ? Encore une fois, il ne s'agit pas de faire dépendre l'histoire des techniques de l'histoire des sciences, et encore moins d'adopter un point de vue scientiste, mais de

¹⁰³ *Ibid.*, p. 9.

¹⁰⁴ *Ibid.*, p. 9.

¹⁰⁵ Gilbert Hottois, *Philosophies des sciences, philosophies des techniques*, Paris, Odile Jacob, 2004. Cette notion sera discutée plus en détails au chapitre 9.

¹⁰⁶ Notre thèse se voulant centrée sur les dispositifs techniques, nous n'étudierons d'ailleurs les liens entre Science et Technique qu'au dernier chapitre.

¹⁰⁷ Maurice Daumas, « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », art. cit., p. 9.

¹⁰⁸ Lucien Febvre, art. cit., p. 532.

¹⁰⁹ *Ibid.*, p. 532.

s'interroger sur les apports des théories scientifiques dans l'évolution des objets techniques. Même si, « historiquement, la technique a précédé la science », il est vrai que « la technique ne [prend] son essor historique que du moment où la science [intervient]¹¹⁰ ». Au même titre que d'autres activités humaines (l'économie, les arts, la guerre...), la science s'est nourrie de la technique, mais à la différence de ces autres activités, la science a en retour directement contribué au développement de la technique. L'instauration d'un deuxième sens au sein de la relation explique pourquoi Lucien Febvre la traite à part, et il nous faudra consacrer aux liens existant entre avancées scientifiques et inventions techniques un traitement particulier.

1.2. L'internalisme, ou l'histoire technique des techniques

L'histoire des techniques, en tant que discipline autonome, est relativement récente au regard d'autres domaines des études historiques comme l'histoire des sciences ou l'histoire de l'art. Sans chercher à faire une histoire de l'histoire des techniques, nous retiendrons que sa constitution remonte à la période de l'entre-deux-guerres, et plus particulièrement la décennie des années 1930 avec la publication d'un certain nombre de manifestes (dont celui des Annales), la tenue de conférences (notamment celles de Marcel Mauss¹¹¹ et de José Ortega y Gasset¹¹²), mais aussi la diffusion d'ouvrages marquants comme ceux d'Oswald Spengler¹¹³, Lewis Mumford¹¹⁴ et, bien sûr, Jacques Lafitte¹¹⁵. Cependant, il est possible de voir dans certains travaux de la fin du XVIII^e siècle, s'inscrivant à la suite du projet encyclopédique des Lumières (1751-1772)¹¹⁶, les premières tentatives de réflexivité sur la technique. Bertrand Gille ira d'ailleurs jusqu'à qualifier l'ouvrage de l'Allemand Johann Beckmann, *Beiträge zur Geschichte der Erfindungen (Contributions à l'histoire des inventions)*, publié entre 1780 et 1805, de « plus ancien ouvrage d'histoire des techniques¹¹⁷ ». Si cette première tentative est tombée dans un relatif oubli, un certain nombre d'auteurs ont tenté eux aussi de tenir un discours sur la technique, jetant les bases d'une techno-logie. Nous retiendrons en particulier les travaux des mathématiciens Jean Nicolas Pierre Hachette (*Traité élémentaire des machines*, 1811) et Charles Babbage (*On the Economy of Machinery and Manufactures*, 1835), qui ont tenté, chacun à son

¹¹⁰ Jacques Ellul, *La Technique ou l'Enjeu du siècle*, *op. cit.*, p. 5.

¹¹¹ Marcel Mauss, « Les techniques du corps », *Journal de psychologie*, vol. 32, n° 3-4, 1936.

¹¹² José Ortega y Gasset, *op. cit.* Il s'agit de la retranscription des six leçons données par l'auteur en 1933 à l'université d'été de Santander.

¹¹³ Oswald Spengler, *L'Homme et la Technique* [1931], Paris, Gallimard, 1969.

¹¹⁴ Lewis Mumford, *Technique et civilisation* [1934], Paris, Parenthèses, 2016.

¹¹⁵ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*

¹¹⁶ Bertrand Gille, « L'Encyclopédie, dictionnaire technique », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, t. 5, n° 1, 1952, p. 26-53.

¹¹⁷ Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard, La Pléiade, 1978, p. 5.

tour, de proposer une véritable théorie des machines. Mais c'est surtout l'ingénieur et technologue allemand Franz Reuleaux qui, dans son ouvrage de 1875 (*The Kinematics of Machinery. Outlines of a Theory of Machines*), a cherché à approfondir le projet technologique en tentant de fonder une science des mécanismes. Aussi différents soient-ils, ces premiers mouvements de conceptualisation des techniques ont ceci de commun qu'ils fondent leur approche sur une dimension classificatrice. Cette dimension classificatrice va de pair avec une dimension historique : les principes classificateurs qui permettent le discours réflexif sur la technique s'accompagnent d'un ordonnancement chronologique. Les tentatives de constitution d'une science des machines peuvent donc être vues comme les précurseurs de l'histoire des techniques. C'est pourquoi, historiquement, les approches internalistes sont apparues en premier. Ajoutons qu'un certain nombre de ces auteurs étant des ingénieurs, ils étaient les plus à même de réaliser cette histoire technique des techniques qui, pour être rigoureuse, se doit d'être l'« œuvre de techniciens¹¹⁸ ». De plus, les approches internalistes permettent une application des méthodes générales de l'histoire plus immédiate, autorisant ainsi les historiens à s'emparer de la discipline et apportant un contrepois aux regards « indigènes ».

Qu'elles soient l'œuvre de techniciens soucieux de leurs propres pratiques ou d'historiens curieux d'une discipline peu explorée, les différentes pratiques internalistes ont en commun de prendre racine dans le champ même des techniques et, par l'étude des réalisations et de leurs évolutions, d'en retracer une histoire raisonnée. Ces pratiques ont culminé avec les ouvrages de Maurice Daumas¹¹⁹ et Charles Singer¹²⁰, qui, malgré un caractère parfois trop encyclopédique, restent encore aujourd'hui des références. Historiquement, ce sont ces approches internalistes, dont la figure tutélaire est ce « technicien qui devient historien¹²¹ », qui se sont développées en premier, avec le risque propre à toute démarche autodidacte : « faire preuve d'une certaine naïveté dans la connaissance des faits historiques¹²² » et, en fin de compte, ne faire que sa propre histoire. Elles ont été rapidement critiquées, notamment par l'histoire économique et sociale, qui les jugeait insuffisantes, car manquant tout un pan de l'analyse, et considérait que « l'histoire technique des techniques souffrait de la technicité et souvent de la nationalité de ses auteurs¹²³ ». Cet enfermement disciplinaire et géographique sur ses propres travaux s'est retrouvé aussi bien dans les études

¹¹⁸ Lucien Febvre, art. cit., p. 531.

¹¹⁹ Maurice Daumas, *Histoire générale des techniques* (5 tomes), Paris, Presses universitaires de France, 1962-1979.

¹²⁰ Charles J. Singer, *A History of Technology* (8 tomes), Oxford, Clarendon Press, 1954-1984.

¹²¹ Maurice Daumas, « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », art. cit., p. 7.

¹²² *Ibid.*, p. 7.

¹²³ *Ibid.*, p. 6.

historiques des ingénieurs, caractérisées par une méticulosité des descriptions techniques, que dans celles des historiens cherchant à atteindre l'exhaustivité au niveau des sources. Mais s'il ne s'agit là que de critiques portant sur le formalisme des analyses, des reproches portant sur les fondements même de ces approches ont aussi été avancés.

1.3. L'externalisme, l'histoire globale et l'histoire économique

L'autre grand reproche adressé aux approches internalistes est le trop grand déterminisme qui ressort des analyses et suggère une inéluctabilité de l'évolution technique. Ainsi, selon Jean-Louis Maunoury¹²⁴, pour faire de l'histoire des techniques, « il n'est bien entendu pas question de conférer à la technique une autonomie par laquelle elle progresserait selon des tendances inéluctables et prédéterminées¹²⁵ ». Le risque serait de réhabiliter une certaine notion de progrès, notion fortement critiquée, notamment dans la deuxième moitié du XX^e siècle. Et même si le Progrès – avec une majuscule – n'a jamais été l'objet de l'histoire des techniques, son surgissement dans le débat et son rattachement aux écoles internalistes ont jeté un premier discrédit sur ces approches. La principale critique concerne toutefois l'absence apparente de prise en compte des facteurs externes dans l'apparition et le développement des techniques. Toujours d'après Maunoury, l'évolution de celles-ci « ne peut être totalement comprise qu'en regard des besoins, inscrits dans l'histoire, et des visées techniques qui en sont les médiatrices¹²⁶ ». L'histoire des techniques se retrouverait ainsi « en infériorité » par rapport à l'histoire globale, et la prise en compte des facteurs socio-économiques, qui caractérise les approches externalistes, permettrait de faire une histoire des techniques plus « complète ». Ces reproches ne sont pas sans lien avec le développement des approches sociologiques, voire constructivistes, en histoire et philosophie des sciences, dont les considérations ont pu alimenter les controverses en histoire des techniques.

Tout comme le terme d'« internalisme », celui d'« externalisme » recoupe une grande diversité d'approches qui ont cependant comme point commun d'inclure le « phénomène technique » au sein d'un ensemble plus vaste, approche que résume parfaitement Jacques Ellul à la fin de son avertissement : « Nous avons essayé de seulement transcrire, de traduire, de transmettre au moyen d'une analyse globale une prise de conscience, à la fois concrète et fondamentale, du phénomène

¹²⁴ Jean-Louis Maunoury, *La Genèse des innovations. La création technique dans l'activité de la firme*, Paris, Presses universitaires de France, 1968.

¹²⁵ Jean-Louis Maunoury cité dans Maurice Daumas, « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », art. cit., p. 17.

¹²⁶ *Ibid.*

technique dans son ensemble¹²⁷ ». Mais alors que Lucien Febvre enjoignait d'étudier aussi bien l'action des techniques sur « l'histoire générale » que l'influence de cette histoire sur ces mêmes techniques (« tout s'enchaîne, et s'interfère¹²⁸ »), la démarche dans laquelle s'inscrit J. Ellul cherche quant à elle à intégrer l'histoire des techniques au sein de l'histoire globale, instituant une relation de supériorité qui n'a pas lieu d'être. Cette démarche globalisante prolonge des travaux comme ceux de Lewis Mumford, exposés dans son ouvrage *Technics and Civilization*, qui fut publié en même temps que le manifeste des Annales (1934). Ces deux auteurs, particulièrement connus dans le monde anglo-saxon, ont en commun de fonder leur histoire des techniques sur des bases globalisantes : la technique n'apparaît alors que comme un épiphénomène¹²⁹ de processus civilisationnel sous-jacent. L'économie, la sociologie, voire la psychologie, seraient dès lors plus à même de proposer une histoire des techniques pertinente.

Ces approches ont en retour été critiquées par les tenants des approches internalistes, qui soulignaient notamment leurs insuffisances en ce qui concerne la compréhension des mécanismes de l'invention et admettaient qu'il fallait « souligner que l'analyse économique ne suffit pas à faire comprendre seule l'évolution des techniques¹³⁰ ». Vouloir inféoder l'histoire des techniques à l'histoire économique risque d'être dangereusement réducteur quand on connaît l'impact que les analyses marxistes ont pu avoir sur cette dernière ; alors que, dans le même temps, l'histoire des objets techniques regorge de contre-exemples à l'assertion maintes fois commentée : « L'Humanité ne se pose jamais que les problèmes qu'elle peut résoudre¹³¹ ». L'approche *systémique* proposée par Bertrand Gille dans son *Histoire des techniques* s'inscrit dans cette dynamique totalisante (les dix premiers chapitres sont à ce titre regroupés sous le titre « Technique et Civilisation »). L'idée derrière la notion de « système technique » est que les techniques forment un système cohérent et unifié, c'est-à-dire que pour une société ou une époque donnée, les différentes techniques existantes sont dépendantes les unes des autres, et fortement tributaires des autres constituants de la société : système social, système économique, système politique, système juridique, etc. Le concept de système technique peut d'ailleurs être considéré comme une extension de celui de « complexe technique¹³² » de Maurice Daumas, auquel on aurait ajouté des connexions avec l'environnement

¹²⁷ Jacques Ellul, *La Technique ou l'Enjeu du siècle*, *op. cit.*, p. VI. C'est l'auteur qui souligne.

¹²⁸ Lucien Febvre, *art. cit.*, p. 533.

¹²⁹ Au sens d'une « manifestation particulière d'un phénomène sous-jacent n'exerçant aucune rétroaction sur le phénomène qui lui a donné naissance ».

¹³⁰ Maurice Daumas, « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », *art. cit.*, p. 18.

¹³¹ Karl Marx, *Contribution à la critique de l'économie politique*, traduction de Laura Lafargue, Paris, Giard et Brière, 1909, p. 7.

¹³² Maurice Daumas utilise cette expression pour parler de l'interdépendance des différentes techniques.

socio-économique. Ce nouveau système sociotechnique étant rapidement devenu un des outils les plus utilisés et les plus discutés en histoire des techniques, les controverses entre écoles internalistes et externalistes ont souvent été réduites, en France tout au moins, à l'opposition entre B. Gille et M. Daumas.

2. Les ambitions de l'approche génétique

2.1. La complémentarité des approches internalistes et externalistes

Ces oppositions résultent le plus souvent d'une simplification de la pensée des auteurs originaux et de la sanctuarisation de certains concepts conduisant à l'émergence de traditions de pensée, que les héritiers, pour des raisons la plupart du temps politiques, aiment à présenter comme adversaires. En réalité, les différents auteurs n'hésitent pas à se rendre mutuellement hommage, ayant conscience que leurs travaux sont avant tout complémentaires : « Quoi qu'il en soit, l'essai de B. Gille est très significatif et, s'il est développé, il contribuera à affermir les méthodes d'analyse en histoire des sciences¹³³ », dira par exemple Maurice Daumas au sujet d'un article de Bertrand Gille¹³⁴. Conformément au programme initié par Lucien Febvre, il ne s'agit pas de choisir entre l'une ou l'autre des approches mais bien de les faire dialoguer afin d'en tirer le meilleur parti.

D'ailleurs, aussi bien B. Gille que M. Daumas ont conscience du caractère parcellaire de leur approche. Le second n'hésite pas à reconnaître « qu'il n'est pas question de nier que l'évolution des techniques ne peut se comprendre que si elle est replacée dans son contexte historique général » et « qu'il reste [à étudier] l'influence des sciences économiques actuelles sur l'histoire des techniques »¹³⁵. Le fait est que M. Daumas revendique une position internaliste mais ne juge pas qu'elle est absolue et définitive : il assume parfaitement le fait d'avoir « choisi de traiter l'histoire technique des techniques en passant à peu près sous silence les facteurs exogènes aux domaines techniques, pourtant essentiels pour une grande part à son développement¹³⁶ ». De même, B. Gille admet volontiers qu'« une étude historique digne de ce nom doit tenir compte et étudier les mécanismes du progrès technique et les introduire dans les autres disciplines qui s'occupent de

¹³³ *Ibid.*, p. 21-22.

¹³⁴ Bertrand Gille, « Note sur le progrès technique », *Revue d'histoire de la sidérurgie*, t. 7, n° 3, 1966.

¹³⁵ Maurice Daumas, « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », art. cit., p. 18.

¹³⁶ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 58.

l'activité humaine¹³⁷ ». Le système technique doit s'enrichir d'une « analyse dynamique proprement dite qui paraît, au moins pour cette période de début de la recherche, la plus fructueuse¹³⁸ ». Le concept de système technique a été repris et prolongé par François Russo, qui le définit comme « un ensemble d'éléments fortement interdépendants, présentant une assez nette unité, et aussi une assez nette autonomie par rapport au milieu où il est intégré¹³⁹ ». Cet auteur a cherché lui aussi à en penser les évolutions et les successions. « L'histoire des techniques se présente en état de révolution¹⁴⁰ » ; c'est cette révolution, ce passage d'un système technique à l'autre, qu'il va falloir penser et caractériser.

Plus que la complémentarité des approches internalistes et externalistes, c'est peut-être leur successivité qu'il est important de mettre en avant. Le fait est qu'avant de prolonger et d'appliquer les conclusions issues des analyses en histoire des techniques aux autres domaines que peuvent être les arts, les sciences, l'économie, etc., il est nécessaire de disposer d'un socle robuste : « Une explication purement internaliste de l'évolution technique [...] est la matière première indispensable d'où les autres étapes doivent tirer leur source¹⁴¹ ». C'est en tout cas l'approche que nous adopterons, rejoignant en cela l'approche génétique¹⁴² de Michel Cotte, qui considère lui aussi que « la filière technique et la compréhension internaliste de ses évolutions sont prises comme support du raisonnement, sur lequel les éléments sociaux, économiques, institutionnels et culturels viennent se greffer, tout autant causes que conséquences, sans a priori de hiérarchies¹⁴³ ». Internalisme et externalisme constituent, en histoire des techniques comme ailleurs, les deux faces d'une même pièce. En revanche, dans l'optique d'une mise en œuvre pratique, il convient de partir des études techniques, enrichies dans un second temps d'apports socio-économiques, afin de tenir un discours rigoureux qui, dans ses ambitions tout au moins, opérera une synthèse entre les deux approches.

¹³⁷ *Ibid.*, p. 62.

¹³⁸ Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques*, *op. cit.*, p. 35.

¹³⁹ François Russo, *Introduction à l'histoire des techniques*, Paris, Albert Blanchard, 1986, p. 440.

¹⁴⁰ *Ibid.*, p. 442.

¹⁴¹ Alexandre Herléa, « Deux histoires des techniques », *Revue d'histoire des sciences*, t. 35, n° 1, 1982, p. 57-63.

¹⁴² Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 201-213.

¹⁴³ *Ibid.*, p. 205.

2.2. La génétique technique de Michel Cotte

La génétique technique telle que la propose Michel Cotte se veut ainsi une tentative de dépassement de l'opposition ancienne, quoique encore actuelle¹⁴⁴, entre les approches internalistes et externalistes ; elle « se risque à proposer une étude convergente, où les deux domaines sont en interaction, un peu dans l'esprit d'une histoire globale prônée naguère par l'école des Annales¹⁴⁵ ». Mais la « convergence » envisagée doit être plus qu'une simple juxtaposition de deux approches. Il s'agit véritablement de replacer au centre de l'analyse « l'interdépendance entre le temps long de l'évolution technique et la prégnance de l'environnement sociotechnique de l'objet¹⁴⁶ ». Ce faisant, elle cherche à accomplir le programme de Lucien Febvre (« faire l'histoire technique des techniques » et la rattacher « aux autres activités humaines ») tout en adoptant une vision holiste, qui devrait permettre de le prolonger. Plus qu'« une recherche des corrélations entre des champs disciplinaires différents », la génétique technique vise à produire une « écriture synthétique des résultats¹⁴⁷ ».

Afin de réaliser ce programme, M. Cotte indique les quatre étapes successives à suivre¹⁴⁸ :

1. Un premier travail d'archives, où il s'agit de s'attaquer à la « recollection systématique des faits techniques à propos d'une famille d'objets ».
2. Doit s'ensuivre une mise en forme historique passant par « l'établissement de la chronologie et la mise en perspective sur le temps long ».
3. Ce travail doit être complété par des éléments externalistes, notamment le « repérage des éléments socio-économiques, intellectuels et culturels en lien avec la conception, les usages et les représentations de l'objet ».
4. Enfin, l'analyse doit conduire à la « rédaction d'une synthèse systémique commentée ». Cette étape est l'occasion de proposer une véritable synthèse génétique via « l'identification des changements majeurs et de leurs facteurs ».

En résumé, « la génétique vise à étaler la complexité de l'objet technique suivant l'axe des temps, en essayant de ne négliger aucun domaine d'appartenance¹⁴⁹ ». Aucun de ces domaines ne doit avoir

¹⁴⁴ Alexandre Herléa, art. cit., p. 57.

¹⁴⁵ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 204.

¹⁴⁶ *Ibid.*, p. 205.

¹⁴⁷ *Ibid.*, p. 205.

¹⁴⁸ *Ibid.*, p. 206.

¹⁴⁹ *Ibid.*, p. 207.

la préséance sur les autres, sous peine de retomber dans une hiérarchisation des approches. Cependant, tout comme les sciences naturelles partent de l'observation des phénomènes naturels, un discours technologique doit partir des phénomènes techniques. C'est pourquoi la génétique technique débute avec un travail d'enquête nettement teinté d'internalisme.

2.3. De l'origine du terme « génétique »

Nous aurons l'occasion de revenir plus longuement sur le recours aux analogies biologiques en histoire des techniques dans la troisième partie de cette étude, mais il nous faut dire dès maintenant un mot sur le choix du terme « génétique ». On trouve les premières esquisses d'une approche évolutionniste chez Jacques Lafitte : « Ainsi, des faits bien reconnus montrent que l'ensemble des machines se présente à nos yeux sous l'aspect d'une série évolutive et que chacun des individus peut et doit, simultanément, se considérer comme une somme, comme un héritage du passé, et comme une promesse d'avenir¹⁵⁰ ». Et d'ajouter : « La distribution généalogique, dans les machines, reproduit l'ordre même suivi par l'homme dans ses créations¹⁵¹ ». Mais si Jacques Lafitte a bien identifié la problématique de l'évolutionnisme technique, il y recourt avant tout dans une visée classificatrice.

C'est la raison pour laquelle la paternité de l'approche génétique est souvent attribuée à Gilbert Simondon - la première partie de MEOT s'intitule en effet « Genèse et évolution des objets techniques ». G. Simondon commence par y définir ce qu'est l'objet technique ; pour lui, « l'objet technique individuel n'est pas telle ou telle chose donnée *hic et nunc*, mais ce dont il y a genèse¹⁵² ». Toute tentative d'histoire – et de philosophie – des techniques ne doit donc pas s'attacher à étudier telle ou telle génération d'objets mais leur genèse, c'est-à-dire le processus qui fait passer d'une génération à la suivante, d'où le qualificatif de « génétique » pour désigner une telle méthode¹⁵³. Cette genèse procède selon des modalités propres au domaine technique et se distingue en cela de l'étude d'autres types d'artefacts (objets esthétiques, objets sacrés...). En outre, et c'est là un des points cruciaux de la pensée simondonienne, « ces modalités spécifiques de la genèse doivent être distinguées d'une spécificité statique que l'on pourrait établir après la genèse en considérant les

¹⁵⁰ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 67.

¹⁵¹ *Ibid.*, p. 63.

¹⁵² Gilbert Simondon, MEOT, *op. cit.*, p. 22.

¹⁵³ Du grec γενετικός, *genetikós*, « relatif à la genèse ».

caractères des divers types d'objets ; l'emploi de la méthode génétique a précisément pour objet d'éviter l'usage d'une pensée classificatrice¹⁵⁴ ».

G. Simondon poursuit son analyse et applique certains des concepts développés dans *L'Individu et sa genèse physico-biologique*, notamment le concept d'individuation, aux objets techniques. Bernard Stiegler en propose une interprétation qui nous semble judicieuse : « L'individuation des objets techniques, dont l'individualité se modifie par renforcements au cours de la genèse, est l'histoire de ces modifications que l'on ne peut appréhender que dans la série des individus, et non depuis la spécificité de tel ou tel individu¹⁵⁵ ». L'idée centrale que nous retiendrons pour notre propos est que « la genèse de l'objet technique fait partie de son être¹⁵⁶ ». Tout discours véritablement technologique se doit d'être génétique. Malgré les hésitations de L. Febvre¹⁵⁷, c'est bien cette histoire évolutive, cette génétique de l'objet technique, qu'il nous faut retracer afin de satisfaire aux exigences du programme des Annales et de la génétique technique : « L'objet technique étant défini par sa genèse, il est possible d'étudier les rapports entre l'objet technique et les autres réalités¹⁵⁸ ». L'approche génétique en histoire des techniques est donc essentiellement dynamique. Elle ne donne la priorité ni aux particularités micro-historiques (telle technique, tel inventeur...) ni aux macrostructures (le système sociotechnique, le contexte socio-économique...), et s'affranchit des distinctions objet/sujet en affirmant la centralité du processus de genèse de l'objet technique. À l'instar de l'*épistémologie historique* prônée par un certain courant de la philosophie des sciences, mettant l'accent sur « l'histoire dynamique de la pensée¹⁵⁹ », la génétique technique s'inscrit dans un projet que l'on pourrait qualifier de *technologie historique*.

3. Le concept de lignée technique

3.1. L'étude des objets techniques

La génétique, tout comme un certain nombre d'études internalistes et externalistes avant elle, place au centre de son projet non plus la technique, ou les techniques, mais l'objet technique. Ce

¹⁵⁴ Gilbert Simondon, MEOT, p. 22.

¹⁵⁵ Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », *Intellectica. Revue de l'Association pour la recherche cognitive*, n° 26-27, 1998, p. 243.

¹⁵⁶ Gilbert Simondon, MEOT, p. 22.

¹⁵⁷ Lucien Febvre, art. cit., p. 531 : « Toute restitution technique de cette sorte ; toute histoire – j'hésite à dire évolutive... »

¹⁵⁸ Gilbert Simondon, MEOT, p. 17.

¹⁵⁹ Gaston Bachelard, *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, Presses universitaires de France, 2008, p. 55.

glissement n'est en rien une perte de généralité dans la mesure où l'objet technique est l'inscription dans une certaine matérialité d'un « geste technique » humain, pour reprendre l'expression d'André Leroi-Gourhan¹⁶⁰. La distinction entre techniques matérielles et immatérielles, au-delà d'un recours à des catégories mal définies – recours que G. Simondon critique en soi – nous semble peu pertinente. Le fait est que :

Le point de départ de la pensée dans *Du mode d'existence des objets techniques* est une “phénoménologie” de la technique, qui cherche à saisir fondamentalement la technique dans son apparition sous forme d'objets : c'est dans la description de leur “mode d'existence” que l'on entreprendra de définir l'essence de la technicité¹⁶¹.

L'étude des objets techniques doit ainsi nous permettre de cerner, non pas une « essence de la technique », mais une définition de la technicité, soit encore la spécificité du geste technique humain incarné dans des objets qui fonctionnent. Dans *Entretien sur la mécanologie*, Jean Le Moyne demande explicitement à G. Simondon ce qui l'a poussé à s'intéresser précisément aux objets techniques. Celui-ci répond en deux temps :

1 - Un objet technique existe, se constitue, d'abord comme une unité, une unité solide, un intermédiaire entre le monde et l'homme, un intermédiaire peut-être entre deux autres objets techniques, et [...] la première phase de son développement, c'est, avant tout, une phase de constitution de l'unité, une phase de constitution de la solidité¹⁶².

2 - Prenez un outil ; qu'est-ce qui fait l'essentiel d'un outil ? – c'est qu'il est un rapport, un intermédiaire entre le corps de l'opérateur et les choses sur lesquelles il agit, mais c'est aussi qu'il doit d'abord, pour être un bon outil, être indémanchable, être bien constitué¹⁶³.

Ainsi, non seulement l'objet technique (en l'occurrence, l'outil) possède un impact sur le monde, mais il possède en outre une existence propre, une unité, qui elle-même repose sur la robustesse de sa constitution, directement tributaire de la technique qui lui a donné naissance.

¹⁶⁰ André Leroi-Gourhan, *Le Geste et la Parole* (2 vol.), Paris, Albin Michel, 1964.

¹⁶¹ Jean-Yves Château, « La technique. Genèse et concrétisation des objets techniques dans *Du mode d'existence des objets techniques* de Gilbert Simondon », *Philopsis : revue numérique*, 2010, p. 4.

¹⁶² Gilbert Simondon et Jean Le Moyne, « Entretien sur la mécanologie », *Revue de synthèse*, t. 130, n° 1, 2009, p. 106.

¹⁶³ *Ibid.*, p. 106.

L'ancrage dans la matérialité possède en outre l'avantage de laisser des traces historiques plus facilement exploitables, et en tout cas plus fournies, que dans le cas de techniques sans support. La multiplication de ces sources est importante, car comme le soulignait B. Gille, « il faudrait des recherches systématiques sur tous les outils pour arriver à une analyse aussi fine que possible¹⁶⁴ ». À l'instar des sciences expérimentales, nous espérons renforcer la robustesse de notre analyse en augmentant la quantité de données auxquelles nous aurons recours. Les ethnologues vont aussi dans ce sens, eux qui considèrent que « la collecte des faits (qu'il est indispensable de rassembler très nombreux pour qu'ils soient continus)¹⁶⁵ » permet de limiter le risque pris par les reconstructions historiques, lesquelles ne peuvent « acquérir la valeur d'une vérité sans que d'autres spécialistes, sur des séries très différentes, aient abouti aux mêmes conclusions¹⁶⁶ ». La reconstitution de la généalogie de l'objet technique, objectif au cœur de la méthode génétique, s'appuiera en particulier sur le concept de lignée technique. Avant de voir la définition qu'en donne Simondon, et sur laquelle nous nous basons, faisons un bref historique du concept.

3.2. Rapide généalogie du concept

La première trace d'une classification évolutive d'un ensemble d'artefacts est l'œuvre d'Augustus Henry Lane-Fox Pitt Rivers, archéologue, ethnologue et officier britannique, qui, ayant amassé plusieurs dizaines de milliers d'objets du monde entier, en proposa une classification typologique plutôt que chronologique : « Pour un musée à visée éducative, les spécimens doivent être sélectionnés en vue d'exposer une séquence. Ils doivent être arrangés de manière à montrer comment une forme a conduit à une autre¹⁶⁷ ». Influencé par les écrits évolutionnistes de Charles Darwin et Herbert Spencer, il souhaitait montrer en quoi ces séquences typologiques traduisaient une forme d'évolutionnisme culturel¹⁶⁸. Ce proto-concept de lignée technique, basé sur l'examen externe des différences entre les artefacts, est révolutionnaire en ceci que, pour la première fois, la classification purement chronologique est remise en question (Fig. 1).

¹⁶⁴ Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques*, op. cit., p. 15.

¹⁶⁵ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 1 : *L'Homme et la Matière* [1943], Paris, Albin Michel, 2017, p. 29.

¹⁶⁶ *Ibid.*, p. 29.

¹⁶⁷ Augustus Henry Lane-Fox Pitt Rivers, « Typological Museums, as exemplified by the Pitt Rivers Museum in Oxford and his provincial museum in Farnham Dorset », *Journal of the Society of Arts*, n° 40, 1891, p. 117.

¹⁶⁸ Mark Bowden, *Pitt Rivers: The Life and Archaeological Work of Lieutenant General Augustus Henry Lane-Fox Pitt Rivers*, Cambridge, Cambridge University Press, 1991, p. 65.

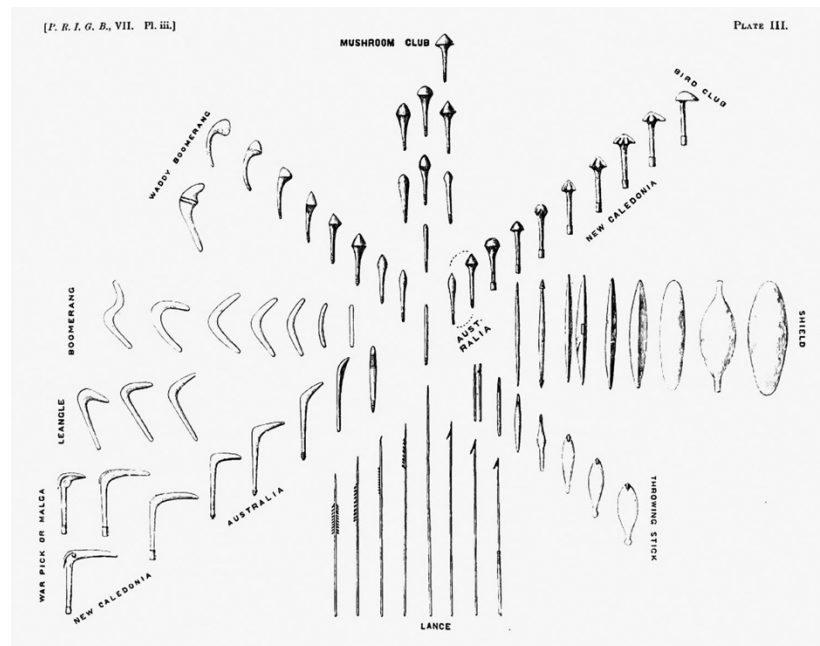


Figure 1 - Évolution des armes primitives à partir du bâton.

(source : Lane-Fox, « On the principles of classification adopted in the arrangement of his anthropological collection, now exhibited in the Bethnal Green Museum », *Journal of the Anthropological Institute*, n°4, 1875, p. 293-308.)

J. Lafitte oscille, quant à lui, entre les expressions « séries évolutives¹⁶⁹ » et « lignées mécaniques¹⁷⁰ ». S'il ne donne pas de définitions explicites de ces deux concepts, il est néanmoins clair qu'à l'examen morphologique avancé par Pitt Rivers, il préfère une analyse de la structure et du fonctionnement interne, de l'« organisation même des machines¹⁷¹ », pour reprendre ses termes. Encore fortement marquée par des visées classificatoires, sa méthodologie s'enrichit néanmoins d'un certain point de vue évolutionniste : « Si je considère, dans la série mécanologique, une lignée particulière aboutissant à un type bien défini, j'observe que cette lignée présente, dans son ensemble, l'ordre montré dans la série entière¹⁷² ». Cet ordre n'est autre que le passage des machines passives (architecture) aux machines actives (moteurs) puis réflexes (c'est-à-dire à *feedback*), selon les catégories que J. Lafitte introduit et sur lesquelles nous reviendrons.

André Leroi-Gourhan, lui aussi archéologue et ethnologue, s'inscrit dans cette démarche évolutionniste : « Chaque forme d'outil, de période en période, se présente comme si elle avait eu

¹⁶⁹ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 67.

¹⁷⁰ *Ibid*, p. 58.

¹⁷¹ *Ibid*, p. 51.

¹⁷² *Ibid*, p. 94.

pour ascendant la forme qui la précède. Les outils s'enchaînent sur l'échelle du temps dans un ordre qui apparaît, en gros, comme à la fois logique et chronologique¹⁷³» (Fig.2). Cet ordre logique et chronologique est ce que A. Leroi-Gourhan appelle la « tendance technique », laquelle forme, avec le « fait technique », « les deux faces (l'une abstraite, l'autre concrète) du même phénomène de déterminisme évolutif¹⁷⁴ ». A. Leroi-Gourhan dessine ainsi une troisième voie après Pitt Rivers et J. Lafitte : c'est désormais le geste technique qui devient objet du discours technologique et principe classificateur/évolutionniste. Les artefacts ne sont plus classés par ressemblance morphologique ni par proximité fonctionnelle, mais selon le procédé qui leur a donné naissance et qui est responsable de leur genèse (Fig. 2).

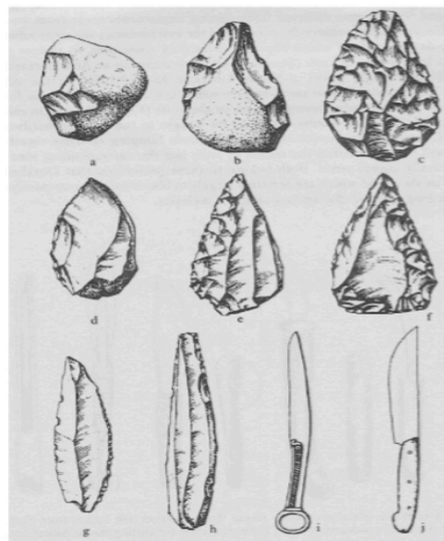


Figure 2 - Évolution des outils tranchants (ie. qui ont « tendance à trancher »), du silex au couteau.

(source : Leroi-Gourhan, *L'homme et la matière*, op. cit., p. 28.)

Le dernier avatar, peu référencé par l'historiographie traditionnelle mais qui mérite d'être mentionné, est le concept de lignes technologiques de B. Gille. Selon l'interprétation qu'en donne Pierre Lemonnier, ces lignes technologiques sont « les techniques qui découlent les unes des autres, traduisant les perfectionnements ou les développements successifs d'un même principe technique¹⁷⁵ ». Il est intéressant de relever que, même au sein de l'école externaliste, l'idée d'une filiation entre les techniques a pu émerger.

¹⁷³ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 1 : *L'Homme et la Matière*, op. cit., p. 24.

¹⁷⁴ *Ibid.*, p. 28.

¹⁷⁵ Pierre Lemonnier, « À propos de Bertrand Gille : la notion de "système technique" », *L'Homme*, t. 23, n° 2, 1983, p. 112.

3.3. Les lignées techniques chez et après Simondon

Au moment de rédiger sa thèse complémentaire, G. Simondon n'avait connaissance que des travaux de A. Leroi-Gourhan et ignorait ceux de Pitt-Rivers comme ceux de J. Lafitte¹⁷⁶. Il introduit son propre concept de lignée technique dès les premières pages de *Du mode d'existence des objets techniques* : « Comme dans une série phylogénétique, un stade défini d'évolution contient en lui des structures et des schémas qui sont au principe d'une évolution des formes¹⁷⁷ ». Cette définition sera précisée dans la quatrième partie du premier chapitre, intitulée « Origines absolues d'une lignée technique » : « Le début d'une lignée d'objets techniques est marqué par cet acte synthétique d'invention constitutif d'une *essence technique* ». De plus, cette essence technique « se reconnaît au fait qu'elle reste stable à travers la lignée évolutive, et non seulement stable, mais encore productrice de structures et de fonctions par développement interne et saturation progressive¹⁷⁸ ». Chaque génération d'objets au sein d'une même lignée technique sera l'incarnation de l'essence technique dans un type structurel particulier et possédera ainsi son propre schème technique. Ces différents schèmes techniques auront en commun de découler d'un même « ancêtre » et de partager par conséquent une même essence technique, dont la progressivité, nous y reviendrons dans un prochain chapitre, s'explique par le processus de concrétisation. Aux statiques classifications morphologiques et structurelles, Simondon préfère une nouvelle façon dynamique – génétique, devrait-on dire – d'envisager les liens entre objets techniques.

Élève de Gilbert Simondon, Yves Deforge a explicitement repris une partie de ses concepts, mais l'orientation industrielle¹⁷⁹ prise par ses travaux l'a amené à en amender certains. Il définit ainsi une lignée génétique comme « constituée d'objets ayant la même fonction d'usage et mettant en œuvre le même principe¹⁸⁰ ». Ce qui fait l'unité de la lignée, ce n'est plus l'essence technique simondonienne mais l'intersection d'un principe de fonctionnement (« généralement rattaché au principal phénomène physico-chimique mis en jeu dans l'objet¹⁸¹ ») et d'une fonction d'usage (le « à quoi ça sert » d'Abraham Moles¹⁸²). À nos yeux, en réalité, il n'y a pas discontinuité entre les pensées de G. Simondon et Y. Deforge. Le premier avait déjà saisi cette dualité de l'objet technique, qui « n'existe pas seulement par le résultat de son fonctionnement dans les dispositifs extérieurs

¹⁷⁶ Comme le souligne Vincent Bontems, « Le progrès des lignées techniques », *Implications philosophiques*, 2016.

¹⁷⁷ Gilbert Simondon, MEOT, p. 23.

¹⁷⁸ *Ibid.*, p. 53.

¹⁷⁹ Yves Deforge, *Technologie et génétique de l'objet industriel*, Paris, Maloine, 1985. Noté TGOI dans la suite des notes.

¹⁸⁰ *Ibid.*, p. 72.

¹⁸¹ *Ibid.*, p. 97.

¹⁸² *Ibid.*, p. 96.

[fonction d'usage], mais par les phénomènes dont il est le siège en lui-même [le principe]¹⁸³ ». C'est pourquoi, au-dessus du schème technique de l'objet particulier et au-dessus de l'essence technique de la lignée, il introduit le schème technique pur qui « définit un type d'existence de l'objet technique, saisi dans sa fonction idéale, qui est différent de la réalité de type historique¹⁸⁴ ». Selon nous, la définition que donne Y. Deforge des lignées techniques précise celle de G. Simondon. Pour reprendre l'exemple classique de ce dernier, il y a certes « plus d'analogie entre un moteur à ressort et un arc ou une arbalète qu'entre ce même moteur et un moteur à vapeur¹⁸⁵ », mais cette analogie ne concerne que le principe de fonctionnement. Or, jamais dans une lignée nous ne présenterions l'arc ou l'arbalète comme l'ancêtre du moteur à ressort. Voilà pourquoi, au risque de retomber dans une vision utilitariste de la technique, nous souhaitons réhabiliter cette *fonction d'usage idéale* (pour concaténer les termes du maître et de l'élève) dans notre définition des lignées techniques.

4. De l'utilité des diagrammes pour la gestion des connaissances

4.1. Le rôle des diagrammes

Autant, pour Michel Cotte, « le point de départ d'une étude génétique est l'identification et la documentation des objets appartenant à une lignée technique au cours du temps¹⁸⁶ », autant le point d'arrivée réside dans « la tentative de reconstitution graphique de la lignée technique ou tableau génétique¹⁸⁷ ». Afin de désigner cette restitution graphique du travail d'enquête génétique, nous parlerons de « diagrammes de lignées ». Les principes de construction de ces diagrammes seront exposés dans un chapitre ultérieur. Ces diagrammes de lignées seront l'un des aboutissements de notre méthode génétique, et les principes constitutifs de cette dernière se retrouvent dans leur construction :

¹⁸³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 52.

¹⁸⁴ *Ibid.*, p. 51.

¹⁸⁵ *Ibid.*, p. 21.

¹⁸⁶ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 208.

¹⁸⁷ *Ibid.*, p. 209.

Le diagramme combine à la fois une interprétation des signes figurés dans un schéma, et la façon dont ces signes fonctionnent entre eux par connexion structurale des actes intentionnels spécifiques qui les ont engendrés¹⁸⁸.

Nos diagrammes de lignées traduiront graphiquement les principes génétiques que nous aurons mobilisés afin de les réaliser et, à l'instar de l'objet technique qui cristallise un certain geste, ils cristalliseront un certain aspect de notre pensée. Michel Cotte avance plusieurs principes pour la construction de tels diagrammes. Le premier, que nous rejoignons, est de placer en abscisse un axe temporel¹⁸⁹, car même si le déroulé génétique n'est pas réductible au déroulé chronologique, il ne peut s'en affranchir totalement. L'idée est de profiter ensuite des possibilités offertes par « le positionnement dans l'espace 2D¹⁹⁰ » pour représenter simultanément plusieurs paramètres et ainsi proposer une synthèse de l'évolution au cours du temps d'un objet technique. Pour l'évolution d'un objet technique (en l'occurrence celle de la chaise entre le Moyen Âge et la Renaissance), Michel Cotte propose le tableau génétique suivant (Fig. 3) :

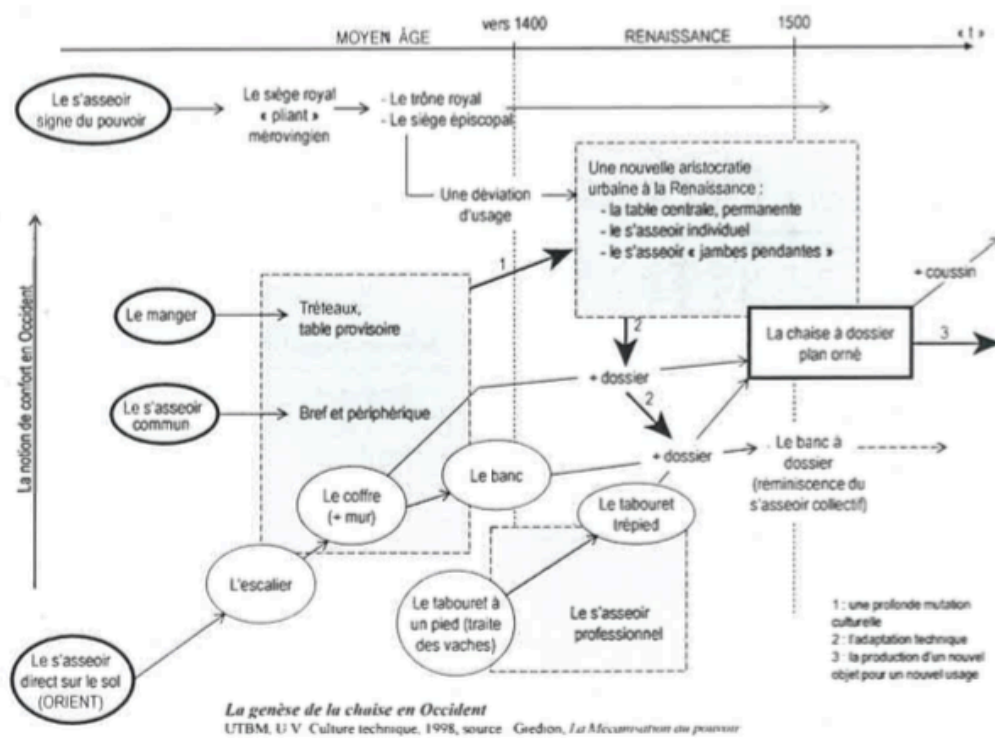


Figure 3 – La redécouverte de la chaise du Moyen Âge à la Renaissance.
(Source : Michel Cotte, art. cit., p. 214)

¹⁸⁸ Charles Alunni, « Des enjeux du mobile à l'enchantement du virtuel – et retour », dans Gilles Châtelet, *L'Enchantement du virtuel. Mathématique, physique, philosophie*, Paris, Éditions Rue d'Ulm, 2010, p. 51.

¹⁸⁹ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 209.

¹⁹⁰ *Ibid.*, p. 209.

Si ce genre de diagramme permet de représenter l'évolution de l'objet technique que constitue la chaise (mur, banc, tabouret...) conjointement à celle des concepts attenants (« le manger », « le s'asseoir commun »...), il ne constitue pas à nos yeux un véritable diagramme génétique dans la mesure où il reste dépendant 1) d'une vision utilitariste de l'objet, et 2) se confond avec l'évolution historique (comme l'indique la découpe Moyen Âge/Renaissance mobilisée en abscisse).

Un second exemple de diagramme génétique avancé par Michel Cotte (Fig. 4) présente l'évolution d'une technique (le rivetage) plutôt que d'un objet (le rivet) :

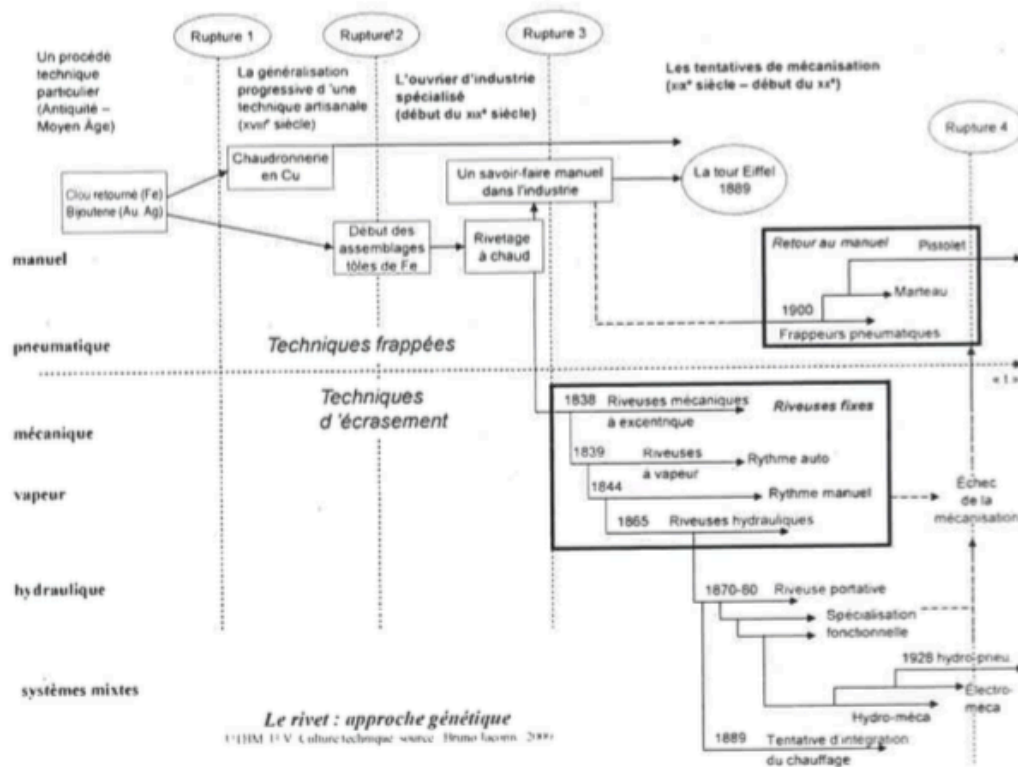


Figure 4 – Le rivetage.

(Source : Michel Cotte, art. cit., p. 216)

L'idée de retracer l'évolution d'une technique fait immédiatement écho aux travaux de A. Leroi-Gourhan. Cependant, le diagramme proposé est bien plus complexe - et par certains aspects bien moins lisible - que ceux proposés par A. Leroi-Gourhan. Toutefois, nous reprendrons l'idée d'une structuration en 2D via des démarcations horizontales (indiquant des différences de procédé) et verticales (marquant les ruptures évolutives).

D'une manière générale, le recours à des diagrammes permet de synthétiser l'information et nous pousse à nous interroger sur la pertinence des résultats sélectionnés et représentés. La construction même d'un diagramme s'inscrit dans une démarche réflexive, qui permet un premier contrôle de la méthode productrice des résultats. Comme « le diagramme ignore superbement toutes les vieilles oppositions “abstrait-concret”, “local-global”, “réel-possible”¹⁹¹ », il peut être un moyen de questionner les principes *a priori* qui lui ont donné naissance. Il est un aboutissement, mais aussi un point de départ pour de futures réflexions : « Les diagrammes contiennent une grande quantité d'informations. Leur utilisation permet de réaliser d'importantes économies d'espace et d'effort mental¹⁹² ».

Au-delà de cela, le diagramme est aussi objet de connaissance en soi dans la mesure où il « ne se contente pas de visualiser des algorithmes ou de coder et de compactifier l'information pour la restituer sous forme de modèles ou de paradigmes. Le diagramme est bien ce grouillement de gestes virtuels : pointer, boucler, prolonger, strier le continuum. Une simple accolade, un bout de flèche et le diagramme saute par-dessus les figures et contraint à créer de nouveaux individus¹⁹³ ». Un des principaux mérites du programme de Michel Cotte est ce recours aux diagrammes, aux « tableaux génétiques » qui, à travers l'exercice même de leur construction, permettent de dépasser les querelles rhétoriques dans un cadre plus opératoire.

4.2. La valeur prospective des diagrammes

La dernière extension en date au concept de lignée est celle proposée dans la théorie MASK. Cette méthode « d'ingénierie des connaissances », extension de la méthode MKSM développée par Jean-Louis Ermine au CEA (donc dans un contexte scientifico-industriel), se propose de répondre à deux des interrogations principales de la gestion des connaissances : « Quelle est la nature de la connaissance ? » et « Comment capter et partager cette connaissance ?¹⁹⁴ ». La réponse à ces questions passe par le développement d'un certain nombre de modèles, dont :

¹⁹¹ Gilles Châtelet, « Intuition géométrique - Intuition physique », dans Richard R. Clément, Pierre Lauginie et Élisabeth de Turckheim (éd.), *Selected Papers on the Teaching of Mathematics as a Service Subject* (CISM courses and lectures, IV, n° 305), Vienne, Springer Verlag, 1988, p. 111-112.

¹⁹² Samuel Eilenberg et Norman Steenrod, *Foundations of Algebraic Topology*, Princeton University Press, 1952, p. 236 [traduction personnelle].

¹⁹³ Gilles Châtelet, « Intuition géométrique - Intuition physique », art. cit., p. 111-112.

¹⁹⁴ Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, « MASK : une méthode d'ingénierie des connaissances pour l'analyse et la structuration des connaissances », dans Jean-Louis Ermine (dir.), *Management et ingénierie des connaissances, modèles et méthodes*, Paris, Lavoisier, Hermes sciences, 2008, p. 153. Noté MASK dans la suite des notes.

[...] le modèle de lignées, qui s'attache aux objets et/ou aux concepts autour desquels s'est bâti le système de connaissances. Il en propose une lecture temporelle générale, reconstruite à partir d'une analyse *a posteriori* et qui a pour but de donner une image pertinente des évolutions des objets/concepts principaux du système, avec une argumentation raisonnée¹⁹⁵.

Ce modèle de lignées possède une puissance méthodologique indéniable, car il permet de synthétiser les connaissances obtenues sur les objets étudiés tout en autorisant une lecture temporelle permettant de traiter des évolutions et de leurs causes.

Ermine incorpore au projet génétique le recours aux diagrammes, proposant de représenter ce modèle de lignées par « un arbre généalogique [...] dont les branches sont des lignées qui décrivent des successions dans le temps de concepts ou d'objets dans un ordre évolutif, traduisant les changements successifs (améliorations, modifications, adaptations, mutations...), décrivant ainsi des "tendances lourdes" ou des "lois d'évolution" qui pour l'instant doivent être prises dans un sens assez vague¹⁹⁶ ». Il affirme ainsi l'importance de l'utilisation des diagrammes, aussi bien pour la méthode génétique que pour la gestion de la connaissance. J.-L. Ermine est bien conscient que le diagramme est lui-même producteur de nouvelles connaissances, et est « en mesure de compacter un ou plusieurs gestes, tout en rendant visible des opérations jusque-là restées muettes. Libérant l'implicite opératoire, le diagramme suggère des connexions nouvelles, à la fois structurales et ontologiques¹⁹⁷ ».

Le tracé d'un diagramme de lignée permet de prendre conscience de dynamiques sous-jacentes, de processus invisibles que l'on ne faisait que deviner, mais dont le dévoilement graphique constitue une avancée, et les « diagrammes du modèle de lignées » (Fig. 5) intègrent ces considérations. Cette approche n'est pas sans rappeler celle développée par V. Minier et V. Bontems pour qui le diagramme « permet d'encapsuler la connaissance des experts, techniciens, ingénieurs, scientifiques et gestionnaires et de la partager avec la communauté astronomique et scientifique, en utilisant des bases de données et en extrayant des informations prospectives afin de préparer les futures activités de R&D¹⁹⁸ ».

¹⁹⁵ *Ibid.*, p. 168.

¹⁹⁶ *Ibid.*, p. 168.

¹⁹⁷ Gilles Châtelet, « Intuition géométrique - Intuition physique », art. cit., p. 111.

¹⁹⁸ Vincent Minier et al., *Inventing a space mission, op. cit.*, p. 6. C'est nous qui traduisons

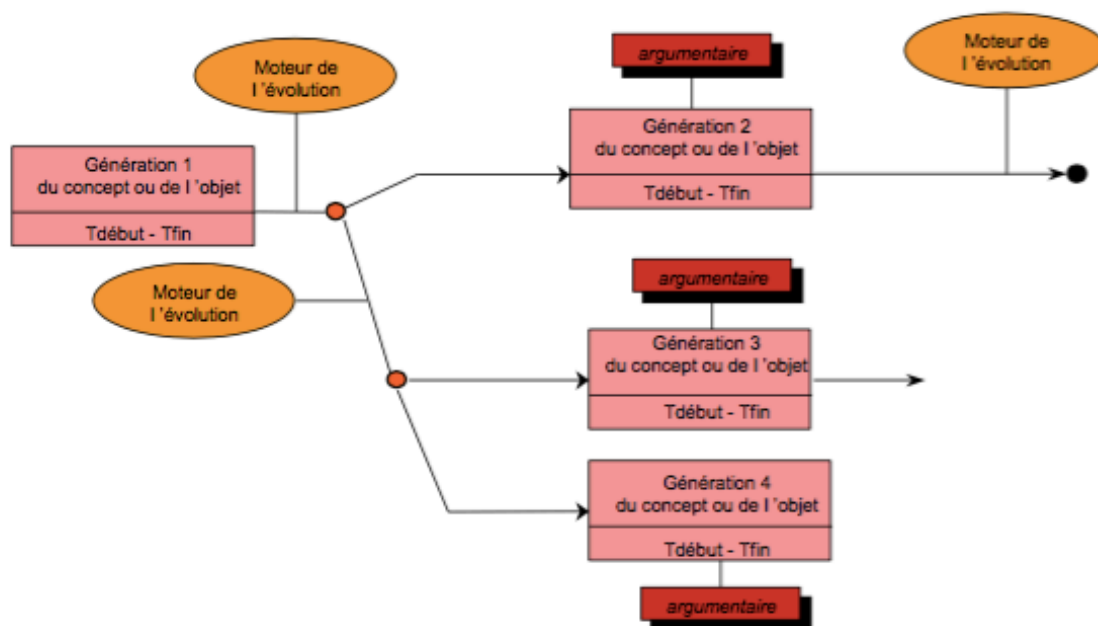


Figure 5 – Diagramme du modèle de lignées.

(Source : Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, MASK, art. cit., p. 168)

Une lignée, qu'elle soit d'objets ou de concepts, se présente donc simplement comme la succession temporelle de *générations* « caractéristiques d'une période donnée que l'on perçoit comme présentant une unité conceptuelle dans le temps, permettant de nommer ces générations ». À chaque génération s'ajoute une *argumentation* chargée de « retracer l'objectif ou les objectifs remarquables qui ont prédestiné à l'existence de cette génération »¹⁹⁹ et des *moteurs de l'évolution* permettant d'explicitier le passage d'une génération à la suivante (il peut s'agir d'impératifs techniques comme de motivations économiques). La génétique technique et la gestion des connaissances, ainsi que le recours aux diagrammes, s'inscrivent assez naturellement dans une démarche commune, le diagramme faisant office de médiateur, car « non seulement le diagramme épouse une réalité déjà là, déjà donnée, mais il est en outre capable de s'adapter, par l'anticipation que lui donne toute sa puissance de feu virtuelle, à une réalité encore à venir qui sera celle d'un savoir ou d'un problème inédit²⁰⁰ ».

¹⁹⁹ Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, MASK, p. 168.

²⁰⁰ Charles Alunni, « Une preuve par l'image : le diagramme ou l'écriture mathématique comme technogramme », séminaire ESNT, p. 51.

La possibilité d'une prospective diagrammatique n'est donc pas à exclure dans la mesure où ces diagrammes de lignées permettent non seulement de restituer des résultats d'enquête génétique (passés), mais aussi de se projeter vers le futur via l'exploration des potentialités suggérées graphiquement. Ces études génétiques devraient permettre au minimum une certaine « veille technologique de longue durée et à grande focale » apportant des « éclairages sur les stratégies de certains acteurs²⁰¹ ». D'où, encore une fois, la pertinence de mobiliser la génétique technique à des fins de gestion des connaissances via une mobilisation diagrammatique : la compréhension de l'histoire évolutive d'un objet technique, une fois retranscrite graphiquement, doit fournir un apport conceptuel concernant les choix technologiques, actuels et futurs. Malgré la puissance méthodologique indéniable des diagrammes, de lignées notamment, il faut garder à l'esprit qu'il s'agit avant tout d'« outils de compréhension *a posteriori*²⁰² ». Leur accorder un statut ontologique trop marqué ne serait pas forcément pertinent :

Un résultat de génétique, sous forme de tableau systématique, reste une grille de lecture faite par un analyste. Il exprime la synthèse d'une étude, mais ce n'est pas un résultat scientifique au caractère exclusif et d'une valeur normative²⁰³.

Conclusion de chapitre

Pour comprendre un objet technique, il est nécessaire d'en connaître la genèse. D'où à nos yeux l'intérêt, récemment réaffirmé par Michel Cotte, de la génétique technique, centrant son discours sur la genèse et l'évolution, des objets techniques. Notre thèse n'est pas une thèse en histoire des techniques. Si l'historiographie des techniques peut constituer le matériau à partir duquel nous pouvons mettre en œuvre notre méthodologie, il nous faut parfois nous en écarter afin de rester cohérent avec notre approche. Car au-delà d'opérer un simple dépassement de l'opposition entre différentes pratiques historiennes, l'approche génétique propose un nouveau regard sur la Technique, en affirmant la centralité des processus évolutifs. Les lignées techniques sont au cœur de la génétique technique telle que nous souhaitons la pratiquer et leur reconstitution doit passer

²⁰¹ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 212.

²⁰² Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, MASK, p. 168 (les auteurs soulignent). On trouve la même expression sous la plume d'Yves Deforge pour qualifier les lois d'évolution.

²⁰³ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 212.

par une enquête qui nécessite de faire des choix : l'inclusion, ou l'exclusion, de certains objets techniques est alors justifiée par la possibilité, ou non, d'une identification à l'essence technique de la lignée considérée. En définitive, un tableau génétique n'est pas une classification exhaustive des dispositifs techniques, mais un outil de modélisation, permettant de jeter un regard rétrospectif sur leurs évolutions. En retour, une fois les processus évolutifs dégagés, il semble envisageable d'émettre des pistes de prospective concernant les futurs développements de l'objet technique. Le recours aux diagrammes se révèle alors une aide précieuse, aussi bien pour extraire les informations et formaliser les connaissances que pour modéliser rétrospectivement les processus, voire développer des éléments de prospective.

Chapitre 2

État de l'art en mécanologie

Sans homme pas de machine ; pas d'homme sans machine.

Jacques LAFITTE, *Réflexions sur la science des machines*

La mécanologie est, pour reprendre l'expression de Ronan Le Roux, l'une des premières tentatives de « constitution d'une théorie générale des machines²⁰⁴ ». Si le terme fut introduit par Jacques Lafitte pour désigner « la science des machines », il fait aujourd'hui référence à « une tradition de recherche cohérente et persistante²⁰⁵ » prenant comme objet d'étude la machine et ses lois d'évolution. À cette tradition de recherche se rattachent plusieurs auteurs dont nous souhaitons présenter les concepts : Jacques Lafitte, Gilbert Simondon, Yves Deforge et Genrich Altshuller. Suite aux travaux de ces deux premiers penseurs de la technique, les expressions « machines » et « objets techniques » seront employées indifféremment. A nos yeux, c'est d'ailleurs une des grandes réalisations de la mécanologie que d'avoir unifié sous un vocabulaire commun des catégories conceptuelles autrefois présentées comme différentes. Afin de prévenir les controverses lexicales, précisons que dans la suite « machines » et « objets techniques » désigneront les avatars de la réalité matérielle qu'Herbert Simon qualifiait d'« artefacts » et dont les deux caractéristiques principales sont l'artificialité et l'utilité.

²⁰⁴ Ronan Le Roux, « L'impossible constitution d'une théorie générale des machines ? », *Revue de synthèse*, t. 130, 6^e série, n° 1, 2009, p. 5-36.

²⁰⁵ Yohann Guffroy et Vincent Bontems, « La mécanologie : une lignée technologique francophone ? », *Artefact*, n° 8, 2018, p. 257.

1. De la technologie à la mécanologie

1.1. La machine comme objet d'étude

Si Johann Beckmann est considéré comme le père de l'histoire des techniques, il est aussi un penseur incontournable de la philosophie des techniques, notamment à travers son projet de technologie générale²⁰⁶, qui constitue une des premières tentatives de systématisation des techniques. Son but, nous dit-il, est de « dresser un catalogue de tous les buts poursuivis par les artisans et les artistes au cours de leurs diverses opérations, ainsi qu'un catalogue de tous les moyens par lesquels ils savent atteindre chacun de ces objectifs²⁰⁷ ». C'est ce catalogue qui sera qualifié de technologie *générale* – la technologie *spéciale* s'attachant à la description des métiers particuliers. La technologie générale de Beckmann « se rapprocherait plus de ce qui deviendra plus tard la tradition du génie des procédés²⁰⁸ », et plusieurs décennies s'écoulèrent avant qu'elle ne trouve des prolongements (le successeur le plus représentatif de cette démarche de classification des gestes techniques restant A. Leroi-Gourhan). En Allemagne, « la majorité des théoriciens allemands va comprendre la technique comme une application de la rationalité abstraite et du calcul²⁰⁹ », tandis qu'en France, les travaux des penseurs de la technique vont se recentrer autour de la problématique de la *machine* (c'est le cas d'André Ampère, de Gaspard Monge, de Jean Hachette (Fig. 6), pour ne citer que les plus connus²¹⁰).

²⁰⁶ Guillaume Carnino, Liliane Hilaire-Pérez et Jochen Hoock (dir.), *La Technologie générale. Johann Beckmann, Entwurf der Allgemeinen Technologie / Projet de technologie générale (1806)*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2017.

²⁰⁷ *Ibid.*, p. 68.

²⁰⁸ Smail Aït-el-Hadj, *Systèmes technologiques et innovation. Itinéraire théorique*, Paris, L'Harmattan, 2002, p. 49.

²⁰⁹ Vincent Bontems, « Actualité d'une philosophie des machines », *Revue de synthèse*, t. 130, 6^e série, n° 1, p. 47.

²¹⁰ Notons toutefois qu'en Allemagne, les travaux de Franz Reuleaux s'inscrivent dans cette tradition de pensée. Ces auteurs sont tous connus, et cités, par Jacques Lafitte.

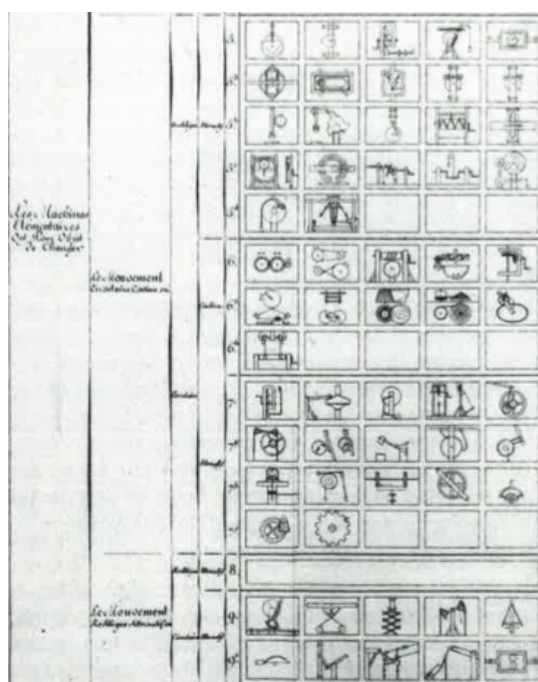


Figure 6 – « Tableau des machines élémentaires ».

(source : Jean Nicolas Pierre Hachette, *Traité de géométrie descriptive*, 1822.)

Il ne faut y voir aucune contradiction, puisque « ce qui réside dans les machines, c'est de la réalité humaine, du geste humain fixé et cristallisé en structures qui fonctionnent²¹¹ ». Étudier les machines, c'est aussi étudier les techniques, et même *la* technique tant la machine, plus qu'une production parmi d'autres, en est paradigmatique. La machine « encapsule²¹² » un certain savoir technique humain. De la même façon que l'artisan mobilise un savoir-faire, la machine met en jeu un certain procédé inscrit dans son principe de fonctionnement ; étudier un « ouvrier, en chair et en os, ou bien en bois et en métal²¹³ », devrait nous fournir autant de renseignements sur ce qu'est la technicité. Et peut-être même plus de renseignements, car « la machine est d'abord le prolongement de l'outil, qui lui-même prolonge la main²¹⁴ ». Si la technique est le premier temps de l'émancipation de l'homme vis-à-vis de la nature²¹⁵, la machine en constitue le second temps. Elle se détache de l'homme au même titre que l'outil se détache de la nature. Il y a donc une sur-technicité inhérente à la machine. De plus, la machine réunit au sein d'un dispositif unique les deux aspects présents dans toute technique : « D'un côté, l'invention d'un plan d'activité, d'une

²¹¹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 13.

²¹² Voir Davis Baird, *op. cit.*, chap. 4 ("Encapsulating knowledge") pour une discussion sur le sens du verbe "encapsuler".

²¹³ Lucien Febvre, art. cit., p. 531.

²¹⁴ Pierre Ducassé, *Histoire des techniques* [1945], Paris, Pesses universitaires de France, 1958, p. 125.

²¹⁵ José Ortega y Gasset, *op. cit.*, p. 32.

méthode, d'un procédé – *mékhané* disaient les Grecs – et de l'autre, l'exécution de ce plan²¹⁶ ». L'étude des machines²¹⁷, si elle est menée d'une façon rigoureuse et va au-delà de la fascination pour la matérialité, permet donc de saisir ce qui fait la spécificité de la technique humaine : la mise en œuvre pratique, au sein de dispositifs stables, de procédés théoriques ; et « cette *dynamique des objets*, comme technologie industrielle, est une science des machines, et à ce titre, on la nommera *mécanologie*²¹⁸ ».

1.2. De la mécano-graphie...

La mécanographie est, selon la définition qu'en donne Jacques Lafitte, la « science descriptive générale des machines²¹⁹ ». J. Lafitte précise qu'historiquement mais aussi nécessairement, la mécanographie succède à « l'art de construire les machines²²⁰ », qui est du ressort des techniciens et des ingénieurs au contact des machines, et se voit comme un premier mouvement réflexif sur la discipline technique. En effet, tout discours réflexif sur la discipline technique doit commencer par la connaissance du savoir-faire de ceux qui vivent la technique et qui construisent les machines, qu'ils soient artisans, techniciens ou ingénieurs. Ce geste technique qui « traduit, plastiquement, dans les machines, les aspirations créatrices de l'homme²²¹ », sert de point de départ aux recherches historiques, descriptives et classificatrices qui sont les trois modalités selon lesquelles la mécanographie doit se déployer. Le mécanographe est donc là pour étudier les machines, tandis que les artisans, techniciens et ingénieurs sont là pour les construire.

Cette première distinction opérée par J. Lafitte entre technicien et mécanographe rappelle celle opérée en philosophie des sciences entre le scientifique et l'épistémologue, laquelle, à défaut d'être plus évidente, est plus ancienne. Si l'ensemble des mécanographes et celui des techniciens possèdent une intersection non vide, il importe qu'ils ne soient pas confondus. J. Lafitte, comme M. Dumas après lui, affirme donc la primauté d'une vision internaliste dans l'étude des techniques, pour reprendre une dernière fois la bipartition introduite plus tôt. Plus encore, il affirme l'importance des travaux de classification, charnière et passage obligé entre le travail de celui qui *fait* la technique et le travail de celui qui *pense* la technique.

²¹⁶ *Ibid.*, p. 106.

²¹⁷ Rappelons qu'étymologiquement, « machine » vient du latin *machina*, lui-même issu du grec *mékhané* signifiant « engin », « dispositif », « procédé ingénieux ».

²¹⁸ Bernard Stiegler, *La Technique et le Temps*, Paris, Fayard, 2018. p. 94. C'est l'auteur qui souligne.

²¹⁹ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 33.

²²⁰ *Ibid.*, p. 34.

²²¹ *Ibid.*, p. 34.

Le travail de J. Lafitte « s'inscrit explicitement dans une tradition de recherche par la capitalisation à partir d'un certain corpus, et une critique des classifications et définitions existantes²²² ». Revendiquant un empirisme radical, J. Lafitte souhaite fonder sa science des machines sur l'observation de faits techniques et non sur des concepts *a priori*. La mécanographie reste donc une science essentiellement descriptive, selon la partition que fait Lafitte des « deux types généraux de sciences²²³ », se cantonnant à la description rigoureuse des phénomènes, en l'occurrence techniques, observés.

1.3. ... à la mécano-logie

Tout comme les sciences naturelles partent de la description et de la classification des phénomènes physiques observés pour en donner des explications sous forme de lois, une science des machines doit s'émanciper de sa visée purement classificatrice pour devenir normative. Le résultat de ce second mouvement réflexif, J. Lafitte propose de l'appeler « mécanologie », littéralement « la science des machines ». J. Lafitte emploie ce terme pour désigner ce que devrait être la « science normative et véritable science des machines²²⁴ », dont le but ne doit être autre que l'étude et l'explication des différences qui s'observent entre elles. Il y a ainsi passage d'une simple description mécanographique à une étude des différences de structures et de fonctionnements, préalable à tout discours mécanologique, permettant une explicitation et une explication des lois qui régissent le monde des machines. La disjonction entre mécanographie et mécanologie reste cependant arbitraire dans la mesure où, pour s'élaborer, toute classification a besoin de principes classificateurs qui ne peuvent venir que d'une réflexion d'un autre ordre, de la même façon que tout travail génétique doit s'appuyer sur un corpus de connaissances afin d'acquérir une certaine consistance.

J. Lafitte précise enfin que l'objet de la mécanologie doit être l'explication des machines réellement existantes : « Elle doit laisser de côté tous les produits imaginaires dont la construction et l'usage n'ont pas consacré l'existence²²⁵ ». Par là, il affirme et revendique le caractère empirique de la mécanologie. Tout comme le sera G. Simondon, il reste prudent, voire critique, vis-à-vis des définitions, considérant qu'« aucune définition de machine ne peut se former, dans l'abstrait, sur

²²² Ronan Le Roux, art. cit., p. 10.

²²³ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 31.

²²⁴ *Ibid.*, p. 34.

²²⁵ *Ibid.*, p. 32.

des concepts *a priori*²²⁶ ». Cependant, pour les besoins de sa méthode, il élabore sa propre classification et ne respecte pas l'empirisme qu'il revendique, à cause notamment du « prisme biologique qu'il emprunte pour structurer ses observations²²⁷ ». Autre point faible de sa méthode, l'absence d'outils réellement opératoires : « C'est notamment le cas des formalismes : il serait étonnant qu'en tant que dessinateur et architecte en particulier, J. Lafitte n'ait cherché aucun moyen de représentation graphique²²⁸ ». Voilà pourquoi le recours aux diagrammes, tel qu'il a été présenté dans le chapitre précédent, nous semble être un enrichissement de la méthode mécanologique originelle.

2. Naissance et premiers développements mécanologiques

2.1. Les travaux de Jacques Lafitte

Dans son introduction, J. Lafitte indique les raisons qui l'ont amené à fonder la mécanologie. Il rapporte, entre autres, que, lors d'une conférence donnée en 1911, « les techniciens qui [l]'écoutaient marquaient une sorte de détachement pour des vues dans lesquelles ils ne voyaient qu'un jeu d'esprit sans aucune application immédiate à leur labeur quotidien de création²²⁹ ». Pour J. Lafitte, ce désintérêt de la part de ceux qui sont en contact avec la technique à l'égard de ses travaux provient d'un « manque d'esprit de synthèse²³⁰ ». La mécanologie est donc avant tout là pour combler un vide : « Les ingénieurs ne sachant concilier la conception de la machine et la réflexion sur leur travail, la mécanologie doit assumer cette fonction réflexive²³¹ ». Ce travail réflexif que ne savent pas faire, ou refusent de faire, les ingénieurs, de peur de se voir confisquer leur objet, doit être accompli par ce tiers qu'est le mécanologue. Celui-ci n'est ni ingénieur, ni philosophe, ni technicien, ni historien, mais doit pouvoir mobiliser une connaissance en provenance de chacun de ces domaines. Son rapport distancié à la technique lui autorise une plus grande objectivité, et d'une nature différente de celle des techniciens.

La deuxième motivation de J. Lafitte est la volonté de répondre à ses contemporains, qui lui font ce reproche : « Avec votre science, vos progrès, vos machines, vous allez détruisant, un peu plus

²²⁶ *Ibid.*, p. 30.

²²⁷ Ronan Le Roux, art. cit., p. 9.

²²⁸ *Ibid.*, p. 7.

²²⁹ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 18.

²³⁰ Jacques Lafitte, « Sur la science des machines », *Revue de synthèse*, t. 6, n° 10, 1933, p. 143-158.

²³¹ Yohann Guffroy et Vincent Bontems, art. cit., p. 261.

chaque jour, de ce qu'il reste de simplicité dans le monde²³² ». La mécanologie a ainsi pour but de lutter contre « une technophobie reposant sur l'incompréhension de la technique par la société, mais aussi par les ingénieurs eux-mêmes²³³ ». J. Lafitte souhaite aussi répondre à l'un de ses amis, qui lui déclare passionnément que « soumis à la machine, nous subissons l'étroit assujettissement aux produits de notre propre création. Ilotes ivres déjà, pour beaucoup d'entre nous, au dire de Duhamel, tous nous finirons dans l'esclavage²³⁴ ». Cet « ami » fait directement écho aux vues des technophobes de la post-révolution industrielle, dont l'un des manifestes les plus célèbres reste l'article de Samuel Butler. Écrit en 1863, ce court texte s'attaque à la double thématique d'une évolution darwinienne des machines et de notre subordination à elles :

 Jour après jour, cependant, les machines gagnent du terrain sur nous ; jour après jour, nous leur devenons de plus en plus subordonnés ; de plus en plus d'hommes deviennent leurs esclaves, plus d'hommes consacrent quotidiennement les énergies de toute leur vie au développement de la vie mécanique²³⁵.

Cette crainte vient, en partie, du manque d'intégration de la technique à la culture et tient au fait que :

 [...] notre connaissance tant de l'histoire naturelle que des machines soit trop petite pour nous permettre d'entreprendre la tâche gigantesque de classer les machines en genres et sous-genres, espèces, variétés et sous-variétés, et d'établir des liens de connexion entre des machines de caractères très différents²³⁶.

Cette lacune dans la connaissance sera comblée soixante-dix ans plus tard, précisément par J. Lafitte et la mécanologie, qui cherchera à établir « ces liens de connexion » entre les machines. Comme G. Simondon après lui, J. Lafitte défend la nécessité d'une culture technique ; la lutte contre la peur des machines passe par l'élaboration d'une théorie permettant de leur redonner une place dans la culture.

²³² Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 11.

²³³ Johann Guffroy et Vincent Bontems, *art. cit.*, p. 261.

²³⁴ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 11.

²³⁵ Samuel Butler, « Darwin among the Machines », *The Press*, 13 juin 1863.

²³⁶ *Ibid.*

2.2. Le statut de la mécanologie

Cette théorie, on l'a dit, s'intéresse à « l'étude et l'explication des différences qui s'observent entre les machines », c'est-à-dire aux processus qui président à leur existence et à leur évolution. Il s'agit d'étudier la machine pour elle-même et non pas comme une application ou un épiphénomène. J. Lafitte, bien qu'ingénieur, considère en effet que :

[...] sous l'influence des progrès des sciences mécaniques et physiques, [...] la machine, d'abord considérée comme un transformateur de mouvement, s'est trouvée successivement considérée comme un transformateur de forces, puis d'énergie. Il est aisé de voir que ces définitions différentes reposent toutes sur la considération de certains phénomènes dont la machine est le siège, et non sur la considération de la machine elle-même en tant que phénomène²³⁷.

Si la mécanologie doit « beaucoup aux démarches nécessaires de la mécanique et de la physico-chimie », ne serait-ce que pour appréhender le fonctionnement de la machine, elle « n'est cependant pas une partie de ces sciences²³⁸ » ; et d'insister : « La mécanologie est une science sociale²³⁹ ».

Les inspirations biologiques sont très présentes sous la plume de J. Lafitte. Mais il ne s'agit que d'un prisme, d'une grille de lecture : « Les sciences naturelles apportent à la mécanologie, et tel qu'elles l'ont forgé, l'instrument de mesure qui lui est nécessaire²⁴⁰ ». Au-delà de la lutte contre la technophobie et la promotion d'une « véritable culture technique²⁴¹ », le projet de J. Lafitte est aussi et avant tout de fonder une nouvelle discipline qui prendrait comme objet d'étude l'être artificiel, tout comme la biologie prend pour objet d'étude l'être vivant. J. Lafitte, dans un dernier mouvement original, appelle d'ailleurs à la constitution d'une organologie²⁴² qui engloberait biologie et mécanologie :

Ensuite, puisque chaque machine s'offre à nous comme un complexe organique, susceptible de fonctionnement et sujet aux contraintes du temps, chacune d'elles et l'ensemble qu'elles forment peuvent susciter, et suscitent en effet, l'application de disciplines de recherche et

²³⁷ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 30.

²³⁸ *Ibid.*, p. 54.

²³⁹ *Ibid.*, p. 109.

²⁴⁰ Jacques Lafitte, « Sur la science des machines », art. cit., p. 145.

²⁴¹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 102.

²⁴² Science de « tout ce qui est organisé ». Le terme sera repris dans un sens similaire par Bernard Stiegler.

d'explication qui sont propres à tout ce qui est organisé. Que l'on veuille ou non que la biologie se porte un jour à s'intégrer dans une organologie, science plus vaste et connaissant tout ce qui fonctionne, il reste, cependant, que l'étude des machines relève, encore, de disciplines étroitement comparables aux disciplines biologiques²⁴³.

2.3. La classification des machines

Avant de proposer sa classification, J. Lafitte indique très lucidement que « définir la machine, c'est faire un premier acte, arbitraire, de nomenclature²⁴⁴ ». La définition qu'il propose reste très générale puisqu'est qualifié de machine « tout corps organisé construit par l'Homme ». Elle se rapproche de l'étymologie et s'éloigne du sens commun, qui refuse le nom de « machine » aux corps dénués de mouvement. Elle désigne « le vaste ensemble des engins, instruments, appareils, outils, jouets, constructions architecturales ». En fin de compte, J. Lafitte emploie le terme de « machine » pour qualifier tout objet artificiel – ce que Herbert Simon qualifie d'« artefact » dans son étude de l'artificialité²⁴⁵.

Réside ici la première originalité de la classification de mécanologie : les ponts, routes, bâtiments, rentrent dans la catégorie des machines *passives* dont le trait distinctif est d'être « organiquement indépendantes des flux d'énergie extérieurs ». Le second type d'organisation proposé par J. Lafitte regroupe les machines *actives*, c'est-à-dire celles qui « jouissent de la propriété d'avoir un fonctionnement déterminé par un flux d'énergie ». Enfin, dernier type identifié par J. Lafitte, l'ensemble des machines qu'il qualifie de machines *réflexes*, qui sont capables de modifier leur fonctionnement « selon les indications qu'elles perçoivent elles-mêmes ». Nous réinterprétons en langage moderne, et selon notre propre point de vue, la classification de J. Lafitte. Les types primaires se rattachent à nos yeux au triptyque classique matière – énergie - information. Les machines passives ont pour spécificité l'organisation et la structuration de la *matière*. Les machines actives sont basées sur la réception, la transformation et la transmission de l'*énergie*. Les machines réflexes enfin ont pour trait particulier la manipulation de l'*information*.

Lafitte introduit en outre un second axe de classification selon la complexité, le « degré de composition » des machines étudiées. Il parle de composition ou dégradation « organique »,

²⁴³ Jacques Lafitte, « Sur la science des machines », art. cit., p. 146.

²⁴⁴ Sauf mention contraire, les citations qui suivent sont tirées du chapitre III de *Réflexions sur la science des machines*.

²⁴⁵ Herbert Simon, *The Science of the Artificial*, Cambridge, The MIT Press, 1969.

indiquant que cette complexité est à chercher dans la composition, la structure des machines (les organes qui les composent) et non dans leur fonctionnement. On trouve aussi les termes de machines « simples » ou « supérieures » pour désigner, mais d'une manière moins précise, les différences de complexité entre les machines. La classification de J. Lafitte, que nous résumons dans le tableau 1, se veut systématique et tout à fait générale et, malgré des notions à expliciter, elle permet de réunir les catégories traditionnelles (outils, instruments, machines...) sous des concepts identiques.

Tableau 1 - Classification des machines selon leur type et leur degré chez Jacques Lafitte.
(© Thomas Guy, adapté de J. Lafitte)

Type \ Degré	1	2	3
Passif	Machines primitives	Machines réticulaires ²⁴⁶	Machines vasculaires ²⁴⁷
Actif	Outils	Machines-outils	Machines-outils réglables
Réflexe	Machines à déclencheur	Instruments	Machines autorégulées

La seconde originalité de cette classification réside dans l'usage de degrés de complexification, qui renverse le point de vue classique et interroge :

Que des objets techniques simples apparaissent comme des machines rudimentaires, au lieu que ce soit les machines qui soient définies plus typiquement comme des outils perfectionnés, peut surprendre et n'est pas sans poser problème : si c'est en effet la forme la plus composée, la plus perfectionnée, qui sert de référence pour l'ensemble des objets par élimination régressive des propriétés, on risque une explication téléologique de l'évolution des lignées²⁴⁸.

Pourtant, cette inversion du simple et du complexe n'est pas sans rappeler la méthode épistémologique « non cartésienne » de Gaston Bachelard, qui considère qu'il faut d'emblée

²⁴⁶ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 86 : « Les constructions réticulaires ne [présentent] plus de tige cellulaire différenciée, mais uniquement un système de circulation, ou de stationnement, étroitement adapté à son support ».

²⁴⁷ *Ibid.*, p. 86 : « Les constructions vasculaires [présentent] un corps cellulaire formant tige, un système différencié de circulation interne, un système différencié de contact avec le milieu qui les supporte ».

²⁴⁸ Ronan Le Roux, art. cit., p. 9.

commencer par le complexe plutôt que par le simple – en opposition avec le troisième précepte de la méthode cartésienne²⁴⁹. En effet, le danger de commencer par le simple puis de monter en complexité est que le concept initial est alors implicitement tenu pour acquis, et qu'il sera d'autant plus difficile de le remettre en question par la suite. On risque alors de faire face à des obstacles : obstacles *épistémologiques* si l'on se trouve dans le champ scientifique, obstacles *mécanologiques* dans le champ technique.

3. Les travaux de Gilbert Simondon

3.1. Ontologie et classification chez Simondon

La première partie de *Du mode d'existence des objets techniques* débute par la critique de la classification usuelle des objets techniques en genres et espèces :

On ne peut que difficilement définir les objets techniques par leur appartenance à une espèce technique ; les espèces sont faciles à distinguer sommairement, pour l'usage pratique [...] mais il s'agit d'une spécificité illusoire, car aucune structure fixe ne correspond à un usage défini²⁵⁰.

G. Simondon donne l'exemple du moteur : le sens commun range sous ce vocable toute machine productrice de mouvement, que ce soit un moteur électrique, thermique, magnétique. Mais ces objets reposant sur des principes de fonctionnement tout à fait différents, il est vain, dans une optique mécanologique, de vouloir les ranger dans une même case et d'en comparer les performances. Les objets techniques ne sont pas que des moyens au service d'une fin ; ils doivent être connus selon leur essence technique, afin « d'éviter l'usage d'une pensée classificatrice intervenant après la genèse pour répartir la totalité des objets en genres et en espèces convenant au discours²⁵¹ ». Au critère utilitaire, G. Simondon propose donc de substituer l'étude du fonctionnement interne. C'est par l'explicitation et la compréhension du schème technique à la base des opérations réalisées à l'intérieur de l'objet que celui-ci révèle sa véritable technicité. Dans

²⁴⁹ René Descartes, *Discours de la méthode* : « Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés ; et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres. »

²⁵⁰ Gilbert Simondon, MEOT, p. 21.

²⁵¹ *Ibid.*, p. 22.

une certaine mesure, Simondon se démarque de la mécanologie de J. Lafitte, qui classe les machines par structures et degrés de complexité. Mais surtout :

Il s'oppose à la classification fonctionnelle du sens commun, mais aussi au marxisme, qui réduit les objets techniques à des moyens de production, à Heidegger, dont la pensée réduit le sens de la technique à la *Zubandenbei*²⁵² et fait des objets techniques des *utilia*, des ustensiles, n'ayant d'autre nature que de répondre à des fins pratiques, à un besoin humain²⁵³.

Dans *La Question de la Technique*, M. Heidegger affirme en effet que « l'essence de la Technique n'est rien de technique » ; appréhender la technique passe par sa sujétion à d'autres domaines de la pensée (dont la métaphysique). Cette conception utilitaire fait de la technique « un dispositif (*Einrichtung*), en latin un *instrumentum* ». L'autre grande conception de la technique à laquelle s'attaque G. Simondon est le « schème hylémorphique » initié par la tradition aristotélicienne : l'essence de l'objet technique réside en ce qu'il est une matière à laquelle un agent humain a imposé une forme de l'extérieur. Ces deux traditions définissent ainsi l'essence de la technique en négatif et, par là, l'excluent de la culture. Pour G. Simondon, qui cherche précisément à redonner à la technique une place dans la culture, c'est problématique. Il adopte donc une démarche positive, étudiant les objets techniques et leur fonctionnement pour eux-mêmes, c'est-à-dire pour ce qu'ils sont, davantage que pour ce à quoi ils servent.

Cette centralité du fonctionnement interne dans l'appréhension de l'objet technique illustre le caractère génétique de la méthode simondonienne. En effet, ce fonctionnement interne est directement tributaire du schème technique sur lequel repose l'objet, qui lui-même découle de l'essence technique à l'origine de la lignée dans laquelle il s'inscrit. Le schème technique doit être l'objet de la philosophie des techniques. En cela résident l'originalité et la force de la pensée de G. Simondon : ce qui compte, ce n'est pas tel ou tel moteur ; ce n'est pas non plus le système sociotechnique qui lui a donné naissance, ni l'utilitarisme sous-jacent. Ce qui compte, c'est qu'il existe un concept de moteur stable dans le temps et qui s'incarne en des structures stables et qui fonctionnent. On retrouve cette volonté de dépasser les vieilles oppositions entre sujet et objet, externalisme et internalisme. Ces oppositions, qui résultent d'un recours à des grilles d'analyse statiques, se dissolvent lorsque l'on replace l'étude dynamique de l'évolution des schèmes techniques au centre de l'étude des objets techniques.

²⁵² Gilbert Simondon, « Psychosociologie de la technicité », *Sur la technique* [1961], Paris, Presses universitaires de France, 2014, p. 74.

²⁵³ Vincent Bontems, « Sur la classification des objets techniques selon Simondon », *Artefact*, n° 3, 2015, p. 187.

3.2. Une approche mécanologique

Dès la première page de *Du mode d'existence des objets techniques*, G. Simondon annonce son intention : tout comme Lafitte avant lui, il souhaite « montrer que la culture ignore dans la réalité technique une réalité humaine, et que, pour jouer son rôle complet, la culture doit incorporer les êtres techniques sous forme de connaissance et de sens des valeurs²⁵⁴ ». Pour ce faire, il entend réaliser une étude des objets techniques qui s'émancipe des catégories traditionnelles. Sa définition de l'objet technique est à ce titre intéressante : « d'une part un médiateur entre organisme et milieu, d'autre part une réalité intérieurement organique²⁵⁵ », l'objet technique se trouve rattaché à la culture humaine tout en conservant un mode d'existence qui lui est propre. Aux similitudes de ce programme simondonien avec celui de J. Lafitte, s'ajoutent des similitudes de vocabulaire. Ainsi, G. Simondon emploie les termes de « mécanologue²⁵⁶ », « mécanologie²⁵⁷ » et « organologie », et a massivement recours au concept de lignée technique – bien que dans un sens différent de celui employé par J. Lafitte. Pourtant, en 1958, au moment de rédiger son essai, Simondon n'a pas connaissance des travaux de J. Lafitte²⁵⁸. C'est par l'intermédiaire de l'écrivain canadien Jean Le Moyne que G. Simondon, à l'occasion d'un entretien filmé en août 1968²⁵⁹, prend connaissance de l'ouvrage de J. Lafitte. Il semblerait que G. Simondon ait estimé cet ouvrage car, dès 1969, il en intègre des éléments dans le cours qu'il donne à la Sorbonne. Il serait donc tentant d'établir une filiation entre ces deux auteurs. À l'occasion du premier colloque sur la mécanologie, le professeur John F. Hart déclare d'ailleurs que « seul Gilbert Simondon, qui ne connaissait pas l'auteur des *Réflexions* au moment où il écrivait *Du mode d'existence des objets techniques*, a traité le problème machinique avec la même profondeur que Lafitte²⁶⁰ ». Plus qu'un prolongement, il s'agit, à ses yeux, d'un « pas important dans l'accomplissement des ambitions de la mécanologie en tant que discipline²⁶¹ ». De plus, les considérations de J. Lafitte sur l'ordre général de la série mécanologique trouvent un écho chez G. Simondon, lorsque celui-ci affirme que « la génétique du

²⁵⁴ Gilbert Simondon, MEOT, p. 9.

²⁵⁵ Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences, op. cit.*, p. 101.

²⁵⁶ Gilbert Simondon, MEOT, p. 15.

²⁵⁷ *Ibid.*, p. 81. La mécanologie est, pour Simondon, la sous-discipline de la technologie chargée d'étudier « les individus techniques complets », aux côtés de l'« organologie générale », ayant pour objet les éléments techniques. Les sens sont donc différents de ceux avancés par Lafitte.

²⁵⁸ Giovanni Carrozzini, « Gilbert Simondon et Jacques Lafitte : les deux discours de la "culture technique" », dans Jean-Hugues Barthélémy (dir.), *Cahiers de Simondon*, n° 1, Paris, L'Harmattan, 2009, p. 31.

²⁵⁹ Gilbert Simondon et Jean Le Moyne, « Entretien sur la mécanologie », art. cit.

²⁶⁰ *La Mécanologie*, actes de colloque, 18-20 mars 1971, Les Cahiers du Centre culturel canadien, n° 2, Paris, 1973, p. 8-9.

²⁶¹ Yohann Guffroy et Vincent Bontems, art. cit., p. 268.

fonctionnement résulte d'un transfert des compétences de l'individu ouvrier manipulateur d'outils vers l'individu que devient [...] le nouveau foyer du processus d'individuation technique²⁶² ».

G. Simondon n'a jamais revendiqué cette filiation. Pourtant, même s'il a préféré le terme d'« objet technique », la machine apparaît à de nombreuses reprises dans ses travaux, « étant entre l'homme et le monde²⁶³ » et s'apparente à un *médiateur*, au même titre que l'objet technique. En affirmant que « la machine est la forme la plus générale de l'individu technique²⁶⁴ », il établit en outre un lien assez fort entre ses travaux et ceux de son prédécesseur. Les considérations de G. Simondon à propos des machines relèvent à la fois de vues théoriques (« la machine remplace l'homme porteur d'outils²⁶⁵ ») et opératoires (« le logos de la machine est le transfert en chaîne, la multiplication des éléments de médiation entre l'opérateur et la chose, ces éléments agissant l'un sur l'autre, en ordre sériel²⁶⁶ »). Par rapport à J. Lafitte, la définition de la machine s'est donc affirmée et affinée.

Le principal élément que G. Simondon va intégrer à son cours sur l'invention et le développement des techniques est la distinction proposée par J. Lafitte entre les trois types de machines : passif, actif et réflexe (que G. Simondon requalifie d'« informationnel »). G. Simondon distingue lui aussi trois niveaux de complexité dans cette première typologie :

Ceux-ci ne correspondent pas à la distinction antérieure élément-individu-ensemble. Simondon ne donne pas la brique, la voûte et l'édifice entier comme les trois degrés possibles d'une machine passive. À chaque degré des machines correspond *un type de relation* déterminé par *les ordres de grandeur* mis en relation²⁶⁷.

Ainsi, le degré élémentaire correspond à la mise en relation d'un seul ordre de grandeur, le degré moyen, à la mise en relation de la microstructure de l'objet et de l'opération qu'il réalise, et le degré supérieur, à la mise en relation des deux précédentes échelles avec les ordres supérieurs. Moins systématique que celle proposée par J. Lafitte, la classification de G. Simondon n'en reste pas moins originale. Nous résumons la classification simondonienne sous le tableau 2, en indiquant entre parenthèses les catégories *antérieures* de J. Lafitte :

²⁶² Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », art. cit., p. 241-256.

²⁶³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 97.

²⁶⁴ *Ibid.*, p. 96.

²⁶⁵ *Ibid.*, p. 96.

²⁶⁶ Gilbert Simondon, « Naissance de la technologie », *Sur la technique, op. cit.*, p. 132.

²⁶⁷ Vincent Bontems, « Sur la classification des objets techniques selon Simondon », art. cit., p. 191. C'est l'auteur qui souligne.

Tableau 2 : Classification des machines chez G. Simondon (et J. Lafitte).
 (© Thomas Guy, adapté de Gilbert Simondon, *L'invention dans les techniques*, op. cit.)

Degré Type	Élémentaire	Moyen	Supérieur
Passif	Outils (Machines primitives)	Assemblages (Machines réticulaires)	Construction (Machines vasculaires)
Actif	Ustensiles (outils)	Machines simples (Machines-outils)	Machines-outils (Machines-outils réglables)
Informationnel	Machines à calculer (Machines à déclencheur)	Amplificateurs/ Régulateurs (Instruments)	Machines à interpréter (Machines autorégulées)

3.3. Les échelles de la technique

Bien que critique vis-à-vis du recours aux catégories classificatoires, G. Simondon ne peut que constater l'extrême diversité des objets techniques présents dans le monde, notamment la diversité de leur complexité. Afin de pouvoir appréhender cet aspect du problème que pose l'objet technique, il distingue et propose trois *échelles* de la technique : les *éléments*, les *individus* et les *ensembles* techniques (Fig. 7). Là encore, G. Simondon réalise une « rupture épistémologique²⁶⁸ » avec le sens commun : ces échelles ne se distinguent pas selon des critères de taille ou de complexité mais selon la relation qu'entretient l'objet avec son *milieu associé* :

- Les éléments n'ont pas de milieu associé déterminé : « Les objets techniques infra-individuels peuvent être nommés éléments techniques ; ils se distinguent des véritables individus en ce sens qu'ils ne possèdent pas de milieu associé ; ils peuvent s'intégrer dans un individu²⁶⁹ ».
- Pour l'individu, « le milieu associé existe comme condition *sine qua non* de fonctionnement²⁷⁰ ».

²⁶⁸ Gaston Bachelard, *Le Rationalisme appliqué*, Paris, Presses universitaires de France, p. 102-105.

²⁶⁹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 80.

²⁷⁰ *Ibid.*, p. 75.

- Enfin, « l'ensemble de degré supérieur qui comprend tous ces sous-ensembles [et qui] se définit par la capacité de réaliser telle ou telle mise en relation de façon libre, sans détruire l'autonomie des sous-ensembles individualisés²⁷¹ »

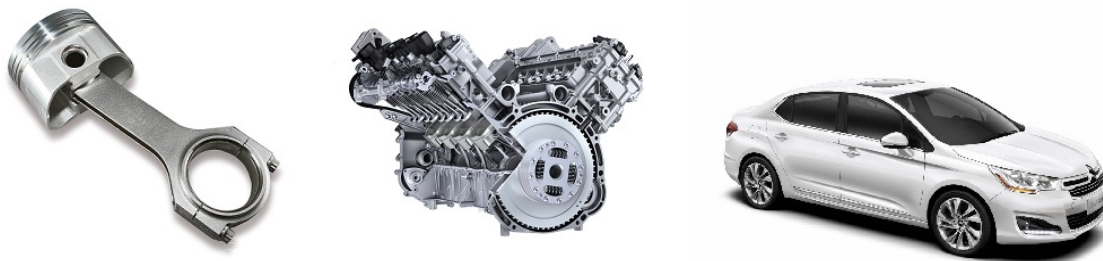


Figure 7 – Illustration des échelles de la technique chez G. Simondon : l'élément (le piston), l'individu (le moteur) et l'ensemble technique (l'automobile).

(© Thomas Guy)

Nous souhaitons mettre en relation ces trois niveaux d'organisation avec les considérations établies précédemment. Le fait est que la notion de milieu associé telle qu'employée par G. Simondon, si elle possède une indéniable valeur sur le plan théorique, n'est en l'état que difficilement mobilisable d'un point de vue opératoire. Nous proposons la redéfinition suivante :

- Les éléments techniques ne possèdent pas de schème technique. Ils peuvent s'intégrer dans différents individus et donc intervenir dans la réalisation de différents schèmes techniques.
- L'individu technique est l'objet technique porteur d'un schème : il y a identification du schème technique à la structure qui le réalise.
- Enfin, les ensembles techniques sont la réunion de plusieurs schèmes, que ceux-ci fonctionnent en série ou en parallèle.

En réalité, il ne s'agit pas d'une véritable redéfinition dans la mesure où les « catégories » définies par G. Simondon et les nôtres coïncident. Cela vient du fait que dans notre acception du schème technique se retrouvent les conditions imposées par le milieu associé techno-géographique²⁷². Enfin, il existe une échelle supérieure de la technique incarnée dans ce que G. Simondon appelle « le réseau », réalité technique située au-delà de l'individu et de l'ensemble :

²⁷¹ *Ibid.*, p. 78.

²⁷² Gilbert Simondon, MEOT, p. 64 : « Ce double rapport qu'entretient l'objet technique, d'une part avec le milieu géographique, d'autre part avec le milieu technique... »

On change d'outils et d'instruments, on peut réparer soi-même un outil, mais on ne change pas de réseau, on ne construit pas soi-même un réseau : on ne peut que se raccorder au réseau, s'adapter à lui, participer à lui ; le réseau domine et enserme l'action de l'être individuel, domine même chaque ensemble technique²⁷³.

Pour G. Simondon, le réseau s'apparente à l'aboutissement de la technique, vue comme possibilité de *détacher*²⁷⁴ du monde des schèmes opératoires, et il « représente la forme achevée de la médiation entre l'homme et la nature²⁷⁵ ». Symétriquement, nous distinguerons une échelle infra-élémentaire de la technique, définie par la composition atomique des matériaux employés pour l'individu technique. Cette échelle *atomique* n'a pas été investiguée en détail par G. Simondon, pour qui l'échelle microtechnique correspond aux éléments. L'importance que peuvent revêtir les matériaux employés dans la fabrication de l'objet technique n'apparaît que dans son analyse des catégories de J. Lafitte, et notamment des machines passives. Cependant, « les textures et structures microphysiques, l'étirement plastique des cristaux, la relation des couches moléculaires entre elles²⁷⁶ » apparaissent tout autant comme un ensemble de contraintes que comme une échelle de la technique soumise à ses propres lois. Ces cinq échelles de la technique ont chacune leur logique de progrès. Mais si elles suivent des lois d'évolution qui leur sont propres, il est notable qu'elles communiquent entre elles. G. Simondon avait noté ce point et tenté de le saisir à travers une loi de relaxation. Nous préférons relâcher l'hypothèse cyclique et simplement constater une corrélation de la progressivité des différentes échelles dont les lois d'évolution seront abordées lors de la troisième et dernière partie de ce manuscrit.

3.4. Génétique et concrétisation

Le point de départ de la pensée dans *Du mode d'existence des objets techniques* est une « phénoménologie de la technique²⁷⁷ », qui cherche à saisir la technique à travers ses réalisations matérielles. Pourtant, G. Simondon se garde bien de proposer une définition de l'objet technique. Le fait est qu'il cherche à éviter l'écueil consistant à retomber dans des représentations et des catégories statiques.

²⁷³ *Ibid.*, p. 301.

²⁷⁴ Et non pas d'*arraisonner*.

²⁷⁵ Vincent Bontems, « Sur la classification des objets techniques selon Simondon », art. cit., p. 188.

²⁷⁶ Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, op. cit., p. 173.

²⁷⁷ Jean-Yves Château, art. cit., p. 3.

Au lieu de partir de l'individualité de l'objet technique, ou même de sa spécificité, qui est très instable, pour essayer de définir les lois de sa genèse dans le cadre de cette individualité ou de cette spécificité, il est préférable de renverser le problème : c'est à partir des critères de la genèse que l'on peut définir l'individualité et la spécificité de l'objet technique²⁷⁸.

L'approche simondonienne de la technique *est* génétique. Ce n'est pas en définissant l'objet technique puis en étudiant son évolution que l'on pourra saisir « l'essence de la technicité » ; c'est le processus génétique qui définit l'objet technique et qui est le plus à même de cerner cette essence²⁷⁹. Cette « technologie génétique²⁸⁰ » lui est inspirée par les recherches d'André Leroi-Gourhan, qui dégagait une « tendance technique » au sein de l'évolution des outils préhistoriques²⁸¹, mais aussi, probablement, par l'*épistémologie génétique* de Jean Piaget²⁸².

Les travaux de G. Simondon sur la technique doivent cependant se lire à la lumière des concepts qu'il développe dans sa thèse principale²⁸³, et notamment ceux d'*individuation* et de *transduction*. L'individuation désigne le processus par lequel un individu s'individualise et se construit à partir de sa réalité pré-individuelle en se différenciant au sein de son milieu associé (qui peut inclure d'autres individus de la même espèce). Il s'agit d'un concept que l'on retrouve, avec des nuances dans l'acception, aussi bien en biologie qu'en psychologie, philosophie et même linguistique ; l'originalité de G. Simondon est d'avoir mobilisé ce concept dans le champ des techniques. La transduction est un concept originaire des sciences physiques où il est utilisé comme synonyme de conversion (d'un signal en un autre). Le terme est apparu en génétique en 1952 pour désigner le transfert de gènes d'une bactérie à une autre, avant que J. Piaget ne s'en empare en psychologie pour caractériser le type de raisonnement de l'enfant, qui va « du particulier au particulier sans s'élever au général²⁸⁴ ». G. Simondon mobilise quant à lui ce concept pour désigner « l'opération par laquelle deux ou

²⁷⁸ Gilbert Simondon, MEOT, p. 22.

²⁷⁹ Jean-Yves Château, art. cit., p. 6 : « La décision apparente de prendre les objets techniques comme point de départ d'une réflexion sur la technique, loin d'être un parti pris dogmatique qui engage la pensée en la précédant, consiste, ici, à poser le problème de la nature et du mode d'être de l'objet technique, mais, plus radicalement encore, du moyen de l'étudier, et même de le localiser et de l'identifier. »

²⁸⁰ Gilbert Simondon, *Sur la technique*, op. cit., p. 45.

²⁸¹ *Ibid.*, p. 33 : « La genèse des objets d'usage et des techniques de production a été très particulièrement étudiée, en France, par Leroi-Gourhan. » Les deux volumes d'*Évolution et techniques* figurent d'ailleurs dans la bibliographie – particulièrement succincte – de MEOT.

²⁸² Jean Piaget, *Introduction à l'épistémologie génétique*, Paris, Presses universitaires de France, 1950, p. 13 : « L'épistémologie génétique [est] la théorie de la connaissance scientifique fondée sur l'analyse du développement même de cette connaissance. »

²⁸³ Gilbert Simondon, *L'Individuation à la lumière des notions de formes et d'information*, Grenoble, Jérôme Millon, 2013. Noté ILFI dans la suite des notes.

²⁸⁴ Christian Godin, *Encyclopédie conceptuelle et thématique de la philosophie*, Paris, Champ Vallon, 2018.

plusieurs ordres de réalité incommensurables entrent en résonance et deviennent commensurables par l'invention d'une dimension qui les articule et par passage à un ordre plus riche en structures²⁸⁵ ». Ce faisant, la spécificité de la pensée de G. Simondon acquiert une nouvelle portée :

C'est en tant qu'elle est appréhendée comme individu, et telle que sa genèse est analysée à partir du processus d'individuation mis en évidence par la critique de l'opposition de la forme et de la matière (schème hylémorphique), que la machine a sa propre dynamique. La spécificité de cette individuation, caractérisée comme processus de concrétisation, tient à ce que la machine, objet technique industriel (émancipé, dans sa morphogenèse, des contraintes anthropologiques et contingentes liées à l'usage commandant une production d'objets sur mesure), est un objet qui fonctionne²⁸⁶.

La genèse de l'objet technique est un cas particulier de processus d'individuation que G. Simondon choisit d'appeler « concrétisation », au sens d'un passage de l'*abstrait* au *concret*, et dont une illustration est fournie par la figure 8, extraite d'une planche de MEOT :

L'objet technique existe donc comme type spécifique obtenu au terme d'une série convergente. Cette série va du mode abstrait au mode concret : elle tend vers un état qui ferait de l'être technique un système entièrement cohérent avec lui-même, entièrement unifié²⁸⁷



Figure 8 – Illustration du processus de concrétisation : évolution du tube électronique de 1924 à 1952.

(source : Gilbert Simondon, MEOT, *op. cit.*, p. 108).

²⁸⁵ *Ibid.*

²⁸⁶ Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », art. cit., p. 245.

²⁸⁷ Gilbert Simondon, MEOT, p. 23.

Contrairement à l'objet primitif abstrait dans lequel subsistent des « problèmes de compatibilité²⁸⁸ », « l'objet technique concret est celui qui n'est plus en lutte avec lui-même²⁸⁹ ». C'est pourquoi la concrétisation peut se voir comme une augmentation des synergies et résonances internes, qui résulte en un objet au sein duquel « chaque structure remplit plusieurs fonctions²⁹⁰ » et où « toutes les fonctions sont positives²⁹¹ ». La concrétisation de l'objet technique est « l'intégration de ses fonctions par surdétermination fonctionnelle²⁹² ». Il s'agit donc d'une opération transductive au sens où « les termes de la relation n'existent pas hors de cette relation²⁹³ » : l'objet technique est défini par sa genèse et cette genèse est une concrétisation. La méthode génétique a ainsi pour objet d'étude le processus de concrétisation. Processus qui ne nie pas pour autant la dimension humaine de la technique :

L'objet technique est toujours la concrétisation d'un abstrait ; c'est son essence même. C'est de cette idée évidente et toute simple que Simondon tire parti en un sens : toute réalité technique est la concrétisation d'une idée qui en est le projet (qui comprend et intègre en général l'état d'un ou de plusieurs objets techniques plus abstraits déjà réalisés, à titre de parties ou d'organes) ; si l'objet technique se caractérise essentiellement par une genèse, son devenir concrétisant, c'est, d'abord, qu'il doit être premièrement conçu puis réalisé pour exister²⁹⁴.

Le processus de concrétisation opère au sein d'une lignée technique, définie par la persistance d'une essence technique. Chaque génération de la lignée est une étape de la concrétisation de cette essence technique qui se réalise dans des structures de plus en plus synergiques : « L'être technique évolue par convergence et par adaptation à soi ; il s'unifie intérieurement selon un principe de résonance interne²⁹⁵ ».

Enfin, G. Simondon avance quelques pistes pour rendre opératoires ses idées. Il indique ainsi que « les objets techniques doivent être étudiés dans leur évolution pour qu'on puisse en dégager le processus de concrétisation en tant que tendance²⁹⁶ », et que pour ce faire, « il faut suivre les

²⁸⁸ *Ibid.*, p. 24.

²⁸⁹ *Ibid.*, p. 41.

²⁹⁰ *Ibid.*, p. 41.

²⁹¹ *Ibid.*, p. 41.

²⁹² Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », art. cit., p. 243.

²⁹³ *Ibid.*, p. 244.

²⁹⁴ Jean-Yves Château, art. cit., p. 18.

²⁹⁵ Gilbert Simondon, MEOT, p. 23.

²⁹⁶ *Ibid.*, p. 60.

lignes de concrétisation à travers l'évolution temporelle des objets techniques²⁹⁷ ». Retracer la généalogie d'un objet technique en étudiant les étapes de sa concrétisation (les gains de synergies internes) doit ainsi nous permettre de saisir l'essence de la technicité.

4. La technologie génétique d'Yves Deforge

4.1. L'objet industriel plutôt que l'objet technique

Chargé de cours à l'université de Technologie de Compiègne (UTC), Yves Deforge est l'élève et le continuateur des travaux de G. Simondon, dont il reprend un certain nombre de concepts. *Technologie et génétique de l'objet industriel*, ouvrage qui résume ses travaux, fait d'ailleurs explicitement référence aux traditions mécanologique²⁹⁸ et génétique. Pourtant, le but de Y. Deforge « n'est pas d'exposer une théorie générale et raffinée mais de donner à des étudiants-ingénieurs les moyens de regarder les objets autrement qu'à travers le seul prisme de leurs savoirs technologiques²⁹⁹ », et « de leur montrer que les productions de la technique sont non seulement des objets de consommation mais aussi des objets de culture³⁰⁰ », indiquant de nouveau une convergence de programme avec J. Lafitte et G. Simondon. Enseignant, son approche se veut plus opératoire que celles des deux auteurs, et même si « elle se réduit le plus souvent à la juxtaposition d'outils plutôt qu'à une synthèse aboutie³⁰¹ », sa méthode n'en demeure pas moins riche en concepts. Pour notre propos, nous retiendrons en particulier l'importance que Y. Deforge accorde aux diagrammes, schémas et dessins industriels, considérant que, « dans les dessins d'ensemble, l'objet est représenté en position d'utilisation dans son environnement immédiat. Ces mises en relation étoffent les descriptions mécaniques et technologiques³⁰² ».

Dans la première partie de *Technologie et génétique de l'objet industriel*, Y. Deforge s'attache à définir ce qu'est un objet technique, contrastant avec l'approche de G. Simondon pour qui aucune définition ne devrait intervenir en amont de l'étude génétique. En réalité, Y. Deforge discute différentes dénominations et nomenclatures sans jamais vraiment proposer la sienne. Tout comme G. Simondon, il met en garde contre la dichotomie outils/instruments, présente les analyses

²⁹⁷ *Ibid.*, p. 60.

²⁹⁸ Tout comme Simondon avant lui, Deforge semble hésiter entre les termes « technologie » et « mécanologie ».

²⁹⁹ Yves Deforge, TGOI, p. 74.

³⁰⁰ Jean-Claude Boldrini, « Le rythme implacable de l'innovation est-il gouverné par des lois d'évolution internes aux objets ? », *Revue française de gestion industrielle*, vol. 31, n° 1, 2012, p. 107-131.

³⁰¹ Yohann Guffroy et Vincent Bontems, art. cit., p. 279.

³⁰² Yves Deforge, TGOI, p. 18.

morphologiques, fonctionnelles et structurales (en insistant sur leur complémentarité plus que sur la préséance d'une d'entre elle) et mentionne les théories de ses prédécesseurs (J. Hachette, F. Reuleaux, A. Moles), mais ne définit pas précisément son objet d'étude. En revanche, il indique sa méthode ; il s'agira d'appréhender :

[...] tout le système de représentations et de besoins socialisés ou inconscients, culturels ou pratiques, qui réagissent sur le système de production et donnent à l'objet, surtout avec le temps, un statut différent du statut que lui donnait sa fonction d'usage³⁰³.

C'est aussi la raison pour laquelle Y. Deforge choisit de s'intéresser à l'*objet industriel*, et non pas à la machine ou à l'objet technique, catégories abstraites et trop générales à ses yeux. L'objet produit industriellement se rattache plus solidairement au système qui lui a donné naissance. Son étude se veut en outre davantage rattachée à la dimension humaine de la technique, ce qui n'est pas contradictoire avec la volonté d'étudier la technique pour elle-même :

On objecte souvent à cette théorie que les objets industriels soumis à la loi consumériste ne sont justement pas concrets. C'est ne pas comprendre que le processus de concrétisation est une tendance qui rencontre les résistances de tendances opposées ou du moins divergentes – et, dans le cas du consumérisme, il s'agit de la résistance du milieu humain lui-même à la nécessité technologique³⁰⁴.

Ainsi, plutôt que de définir explicitement l'objet industriel, Y. Deforge indique les différents « regards » qu'il s'agira de porter sur lui au cours de son étude. Regards qui s'apparentent finalement à autant d'aspects de l'objet³⁰⁵, et qui consistent à le considérer successivement comme :

- Un produit d'un système de production.
- Un objet dans un système de consommation.
- Une machine dans un système d'utilisation.
- Un être en soi dans un système d'objets.

La filiation avec G. Simondon est sensible. « La compréhension de l'objet industriel passe par une appropriation de la dimension évolutive dont nous faisons la condition *sine qua non* d'une

³⁰³ *Ibid.*, p. 19.

³⁰⁴ Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », art. cit., p. 245.

³⁰⁵ Yves Deforge, TGOI, p. 74.

réflexion sur les techniques industrielles et leur produit³⁰⁶ ». En plus des quatre « regards », Y. Deforge propose donc trois outils méthodologiques³⁰⁷ permettant d'intégrer les considérations évolutionnistes aux réflexions technologiques :

- La lignée technique.
- Les lois d'évolution.
- Le système technique.

Nous reviendrons sur les concepts de système technique³⁰⁸ et de lois d'évolution au chapitre 7 ; en revanche, nous présentons dès à présent l'usage que fait Y. Deforge du concept de lignée technique.

4.2. Les lignées, classes et familles techniques chez Yves Deforge

Chez Y. Deforge, une lignée est constituée par des objets ayant la même fonction d'usage et le même principe. Déjà présent chez J. Lafitte, ce concept apparaît ainsi comme le « noyau théorique³⁰⁹ » de la mécanologie. Bien que la définition de Y. Deforge diffère de celle avancée par G. Simondon, son emploi indique une volonté de cumulativité. Souhaitant rendre plus opératoire le concept de lignée technique, Y. Deforge en vient à l'enrichir en introduisant de nombreuses modalités d'évolution des lignées (Fig. 9), qui sont complémentaires au processus de concrétisation :

³⁰⁶ *Ibid.*, p. 71.

³⁰⁷ *Ibid.*, p. 72-74.

³⁰⁸ Qui n'est pas celui de Bertrand Gille mais plutôt l'ensemble des relations que l'objet entretient avec les quatre systèmes identifiés par Deforge.

³⁰⁹ Johann Guffroy et Vincent Bontems, art. cit., p. 274.

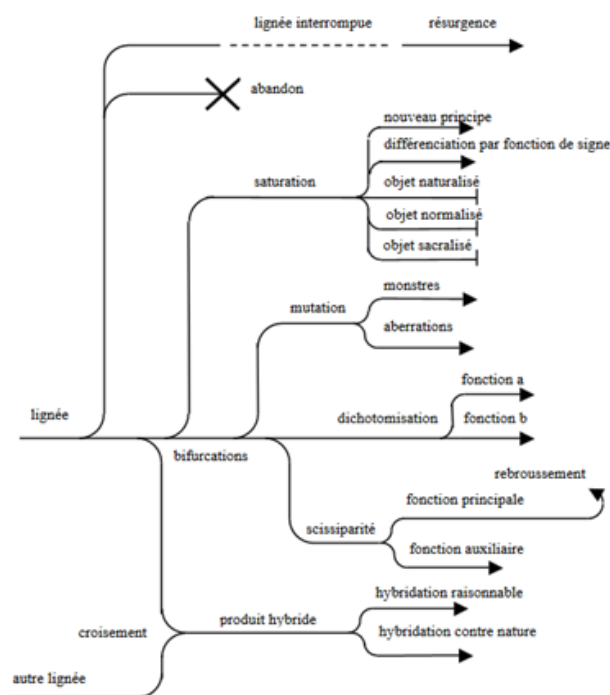


Figure 9 – L'évolution des lignées techniques et ses possibles avatars.

(Source : Jean-Claude Boldrini, « Le rythme implacable de l'innovation est-il gouverné par des lois d'évolution internes aux objets ? », *Revue française de gestion industrielle*, vol. 31, n° 1, 2012, p. 117)

Afin de cerner plus précisément le « principe », Y. Deforge avance plusieurs tentatives de définitions. La première (« le principe constitutif d'une lignée est généralement donné par un brevet d'invention³¹⁰ ») présente trop d'ambiguïtés et est trop *positive* pour pouvoir dire quelque chose de la technicité de l'objet. La seconde définition envisagée (« essence technologique qui se manifeste par des solutions technologiques et des formes qui le font situer entre l'expression du problème et sa solution achevée³¹¹ ») semble quant à elle trop imprécise pour pouvoir fonder une catégorie ou être mobilisable pratiquement. Finalement, Y. Deforge choisit de rattacher la notion de principe au « principal phénomène physico-chimique mis en jeu dans l'objet³¹² ». La notion de fonction est tout aussi complexe à traiter. Possédant des acceptions extrêmement différentes suivant les domaines (mathématiques, biologie, psychologie...), Y. Deforge choisit de l'identifier, en première approximation, au « à quoi ça sert » d'Abraham Moles.

Ces notions de principe et de fonction sont complémentaires et c'est leur intersection qui définit une lignée. Cependant, elles définissent aussi elles-mêmes leur propre catégorie³¹³ : la famille étant

³¹⁰ Yves Deforge, TGOI, p. 72.

³¹¹ *Ibid.*, p. 101.

³¹² *Ibid.*, p. 97.

³¹³ *Ibid.*, p. 100-101.

l'ensemble des objets ayant la même fonction d'usage et le type, l'ensemble des objets ayant le même principe ; ce dernier pouvant se manifester à son tour dans différentes technologies et différentes formes. Le recours aux catégories peut apparaître comme une régression par rapport à la méthode génétique de G. Simondon. En réalité, la dimension génétique est toujours présente – et assumée – chez Y. Deforge, et les catégories ne sont là que pour préciser le discours.

5. L'apport de la TRIZ

5.1. Résolution de problème et contradiction technique

La « théorie de résolution des problèmes inventifs » ou TRIZ³¹⁴ (acronyme, en russe, de *Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch*) peut être vue à la fois comme une méthode d'innovation heuristique destinée à résoudre des problèmes d'innovation technique et une tentative de comprendre les processus d'invention³¹⁵. Par « problèmes inventifs », il faut entendre des problèmes sans solution connue ou des problèmes dont la solution génère d'autres problèmes. La TRIZ a été élaborée en Russie au cours des années 1950-1960 par l'ingénieur soviétique Genrich Altshuller à partir de l'analyse de plus de 40 000 brevets. De cette analyse, il est ressorti que les problèmes inventifs pouvaient être codifiés, classés et résolus méthodiquement. G. Altshuller a alors élaboré un processus systématique permettant de guider la résolution d'un problème technique en s'appuyant sur plusieurs outils. Cette méthode, qui a pour but d'orienter les ingénieurs-concepteurs dans leur démarche innovante, découle elle-même de la *théorie* avancée par G. Altshuller et qui repose sur un certain nombre de notions et concepts³¹⁶.

La notion de *contradiction principale* est la notion essentielle de la TRIZ. G. Altshuller avait coutume de dire que « tout problème, pour être résolu avec la TRIZ, [devait] être formulé de telle sorte qu'il énonce une contradiction ». Car tout problème d'innovation présente la même difficulté majeure : il semble insoluble par les méthodes d'optimisation ordinaires du fait de la présence d'un certain nombre de contradictions. Analogie physique de l'optimum de Pareto, une contradiction au sens de G. Altshuller traduit une situation où la résolution du problème inventif selon une direction

³¹⁴ Pour une présentation complète et détaillée de la TRIZ, voir Denis Cavallucci, « TRIZ : l'approche altshullerienne de la créativité », *Techniques de l'ingénieur*, 10 janvier 1999. Sauf mention contraire, les citations de cette partie en sont tirées.

³¹⁵ Genrich Altshuller, *The innovation algorithm*, *op. cit.*

³¹⁶ Nous nous bornerons à présenter les concepts à la base de la TRIZ et ne reviendrons pas sur la mise en place opératoire des outils. De même, nous laissons de côté pour le moment la discussion sur les lois d'évolution ; nous aurons l'occasion d'y revenir dans un prochain chapitre.

entraîne une aggravation du problème selon une autre direction. Les contradictions peuvent être de trois types, que nous présentons par ordre chronologique (ordre d'apparition lors de la résolution du problème) mais aussi critique (difficulté à résoudre la contradiction) :

- *Organisationnelle*. La contradiction organisationnelle est liée à la nature même du problème à résoudre, qui est généralement mal formulé ; il peut donc y avoir contradiction entre les souhaits de l'inventeur et le fonctionnement même de l'objet.
- *Technique*. Il y a contradiction technique lorsqu'il n'est pas possible d'améliorer l'une des performances de l'objet sans en dégrader une autre de façon « inacceptable ».
- *Physique*. La contradiction physique apparaît lorsqu'un objet doit présenter « deux modalités contradictoires en même temps » (par exemple : dur et mou, lisse et rugueux, chaud et froid...).

L'étude d'un problème technique doit mettre au premier plan ces contradictions à résoudre. « Dans la majorité des cas, les ingénieurs ont tendance à privilégier une solution qui est un compromis entre les différents paramètres plutôt qu'une solution résolvant ces contradictions ». Or, pour qu'un système existant puisse passer à un niveau supérieur, pour qu'un objet technique progresse, il est nécessaire de surmonter ces contradictions en les supprimant : « Le problème technique est donc plutôt celui de la convergence des fonctions dans une unité structurale que celui d'une recherche de compromis entre des exigences en conflit³¹⁷ ». Les contradictions techniques indiquent donc la direction dans laquelle résoudre le problème technique ; c'est pourquoi leur identification constitue la première chose à faire.

Ces notions de contradiction sont à rapprocher des vues de Simondon sur le concept de saturation. Une structure est dite « saturée » quand aucune amélioration partielle n'est possible sans entraîner une détérioration d'autre part : « C'est dans les incompatibilités naissant de la saturation progressive du système de sous-ensemble que réside le jeu de limites dont le franchissement constitue un progrès³¹⁸ ». Ce franchissement ne peut s'opérer que par une réorganisation structurale globale de l'objet technique, et non pas à travers des améliorations partielles. J. Lafitte avait déjà relevé « le fait que, dans les machines, lorsqu'elles sont parvenues à une unité organique suffisante, leur emploi soutenu entraîne des modifications structurales, soit dans les positions relatives des organes, soit dans l'importance de ces organes relativement à l'ensemble³¹⁹ ». De même, A. Leroi-

³¹⁷ Gilbert Simondon, MEOT, p. 26.

³¹⁸ *Ibid*, p. 28.

³¹⁹ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 108.

Gourhan avait remarqué que « certains groupes humains, incapables d'atteindre cet idéal, "tournent en spirale plate", accumulant les modifications de détail sans parvenir à passer au stade supérieur³²⁰ ». Là encore, il est intéressant de noter les points de convergence entre différents auteurs qui, indépendamment les uns des autres, sont parvenus, et ce, par des moyens différents, à des conclusions similaires sur la notion de saturation/contradiction.

5.2. La notion d'idéalité

L'objectif final de la TRIZ est d'aboutir à un objet technique idéal, soit un objet pour lequel toutes les fonctions nuisibles ont été éliminées, les dépenses pour fonctionner, réduites au minimum, et sa fonction principale, conservée. Cet objet idéalisé, ce résultat, est appelé « résultat final idéal » (RFI). Ce RFI est ce que tout concepteur doit garder à l'esprit comme unique objectif à atteindre lors de ses recherches, même s'il sait que c'est impossible : « Alors que la contradiction montre les obstacles à surmonter, le RFI aide à déterminer la direction de la recherche³²¹ ». Cependant, il faut comprendre que « le RFI est une fantaisie de l'esprit, un rêve. Il est inaccessible, mais il ouvre la voie vers la résolution du problème³²² ». Il constitue le point à atteindre jamais atteint vers lequel tend chaque développement de générations successives d'objets techniques. Afin de saisir la progressivité vers le RFI, G. Altshuller introduit une quantité qu'il appelle « idéalité », et qui se présente sous la forme du rapport entre la somme des fonctions utiles et la somme des fonctions nuisibles plus la somme des coûts nécessaires à sa réalisation, soit la formule

$$\text{suivante : } I = \frac{\Sigma Fu}{\Sigma Fn + \Sigma Fc}$$

L'augmentation de l'idéalité se traduit par une solution qui accroît l'effet utile du système tout en diminuant les effets indésirables et les coûts. Poussé à l'extrême, l'objet idéal est un objet qui n'a pas de coût de fonctionnement, pas de surface, ni volume, ni poids, pas de consommation d'énergie, n'a pas d'effets néfastes et maximise la fonction pour laquelle il a été conçu. L'augmentation de l'idéalité, la progression vers le RFI, se traduit donc par une perte de matérialité de l'objet, et une asymptotisation vers sa fonction idéalisée.

³²⁰ André Leroi-Gourhan cité par Yves Deforge, TGOI, p. 83.

³²¹ Genrich Altshuller, dans Dalia Ragab-Zouaoua, *Lois d'évolution de TRIZ pour la conception des futures générations des produits: proposition d'un modèle*, manuscrit de thèse, 2012, p. 40.

³²² *Ibid.*, p. 40.

Encore une fois, il est tentant d'opérer un rapprochement entre les vues d'Altshuller sur l'idéalité et celles de G. Simondon sur ce qu'il appelle le « schème technique pur » : « Le schème technique pur définit un type d'existence de l'objet technique, saisi dans sa fonction idéale, qui est différent de la réalité historique³²³ ». Au même titre que le RFI, le schème technique pur définit un objet idéal, au sens où la fonction qu'il remplit ne présume pas des structures ni même des procédés employés. On retrouve aussi l'idée d'une asymptotisation de la fonction idéale. Celle-ci ne préexiste pas aux objets techniques dans lesquels elle s'incarne, mais constitue au contraire l'horizon auquel tendent les générations successives. De même, l'objet technique « n'est jamais non plus complètement concret³²⁴ », il possède des « aspects d'abstraction résiduelle³²⁵ ». La concrétisation (ou augmentation de la concrétude) chez Simondon et l'augmentation de l'idéalité chez Altshuller possèdent donc le même statut ontologique. L'objet totalement concret (réalisation aboutie du schème technique pur) tout comme l'objet idéal de la TRIZ sont des cas limites jamais atteints. L'important, ce n'est pas les objets en tant que tels, mais les processus qui leur donnent naissance.

5.3. Inertie psychologique et obstacle mécanologique

Le troisième concept présent dans la TRIZ, et qui nous intéresse ici, est celui du blocage psychologique présent lors de la confrontation à un problème technique. Tout se passe comme si « les habitudes de pensée, les compétences trop pointues dans un domaine particulier et les inerties générées par le jargon du spécialiste³²⁶ » constituaient autant de freins à la résolution de la contradiction technique. Cette « inertie psychologique », comme la désigne G. Altshuller, peut être vue comme la transposition à l'échelle individuelle de l'inertie, telle que proposée par A. Leroi-Gourhan, qui advient lorsque « le groupe se refuse à assimiler une nouvelle technique³²⁷ ». Tout comme le groupe humain qui, par paresse, habitude ou routine, peut faire preuve de traditionalisme dans l'usage des techniques, l'inventeur tend à se retrouver dans un état psychologique tel qu'il n'arrive pas à envisager de solutions en dehors de son cadre de pensée.

Nous opterons quant à nous pour l'expression d'*obstacle mécanologique*, en référence au concept d'obstacle épistémologique introduit par G. Bachelard dans *La Formation de l'esprit scientifique*. L'obstacle mécanologique survient lorsque, confronté à une contradiction technique profonde

³²³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 51.

³²⁴ *Ibid.*, p. 42.

³²⁵ *Ibid.*, p. 60.

³²⁶ Denis Cavallucci, art. cit., p. 6.

³²⁷ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 2 : *Milieu et techniques* [1945], Paris, Albin Michel, 1992, p. 425.

nécessitant la résolution d'un « problème inventif », le concepteur, mais aussi le penseur de la technique, n'arrive pas à dépasser son horizon de pensée actuel. Jean-Pierre Astolfi avance un certain nombre de caractéristiques pour l'obstacle épistémologique : « son intériorité, sa facilité, sa positivité, son ambiguïté et sa récursivité³²⁸ ». De manière immédiate, nous pouvons transposer ces vues à l'obstacle mécanologique. Celui-ci résulte lui aussi d'un problème psychologique, lié à une certaine inertie psychologique. Son ambiguïté réside dans le fait que les tentatives de franchissement de l'obstacle peuvent conduire à des améliorations comme à des dégradations. Enfin, sa récursivité est condition de son dépassement ; pour reprendre l'exemple de G. Simondon sur la turbine Guimbal : « La concrétisation est conditionnée par une invention qui suppose le problème résolu³²⁹ ».

6. Synthèse mécanologique des notions

6.1. La convergence des notions

Si réduire l'œuvre de G. Simondon à la mécanologie serait une erreur (« le machinisme n'est pas toute la technique³³⁰ ») et s'il ne s'est jamais revendiqué comme appartenant à cette discipline, il n'en demeure pas moins un des penseurs incontournables. Chez J. Lafitte, l'étude des différences qui s'observent dans « les formes, les structures, les fonctionnements et l'organisation générale » doit culminer avec l'explication de la « genèse de chaque type » ; d'où le fait que John Hart qualifie la méthode de J. Lafitte de génétique³³¹. Bien qu'il n'en n'affirme pas la centralité dans ses travaux, J. Lafitte peut donc être considéré comme le fondateur de l'approche génétique. Cette symétrie nous pousse à nous interroger sur la « contemporanéité relative³³² » des vues de J. Lafitte et G. Simondon, c'est-à-dire la coïncidence conceptuelle mais non chronologique de leurs systèmes de pensée. Aux deux pères fondateurs, il est tentant d'adjoindre A. Leroi-Gourhan, vu comme un précurseur de la méthode génétique, Yves Deforge, en tant que continuateur, et Genrich Altshuller, qui, malgré une approche totalement différente, en est venu lui aussi à développer des concepts similaires.

³²⁸ Jean-Pierre Astolfi, *L'Erreur, un outil pour enseigner*, Paris, ESF Sciences Humaines, 1997, p. 58.

³²⁹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 68.

³³⁰ Gilbert Simondon, *Sur la technique, op. cit.*, p. 170.

³³¹ Par définition, « qui suit un processus d'évolution à partir d'une genèse ».

³³² La notion est introduite par Erwin Panofsky, « Le problème du temps historique », dans *La Perspective comme forme symbolique*, Paris, Les Éditions de Minuit, 1976, p. 231, puis développée et appliquée à l'histoire des sciences et des techniques par Vincent Bontems, « Causalité historique et contemporanéité relative. De la relativité einsteinienne aux sciences historiques », *Revue de synthèse*, n° 1, 2014, p. 71-89.

« Il est très réconfortant [...] que plusieurs personnes de pays différents, de cultures variées, ayant étudié les mêmes objets et leur histoire identique, arrivent finalement à des conclusions convergentes³³³ ». Ces convergences, si elles ne sont pas une preuve de la validité des théories et méthodes sous-jacentes, constituent néanmoins un bon indicateur de leur pertinence. Afin de désigner cette tradition de recherche (essentiellement francophone), nous parlerons de « mécanologie génétique »³³⁴. La mise en œuvre pratique d'une telle discipline est-elle pour autant envisageable ?

L'objection de principe selon laquelle la technologie ne saurait jamais se constituer en une méthode opératoire en raison de l'impossibilité d'élaborer un formalisme transhistorique qui résiste à l'évolution rapide des objets techniques qu'il doit représenter ne nous semble pas rédhitoire dans la mesure où, d'une part, il ne s'agit justement pas, dans une perspective génétique, de représenter un état synchronique de la technique mais d'analyser son évolution³³⁵.

La mise en œuvre opératoire de la mécanologie génétique, qui passe par l'analyse de l'évolution de la technique à travers l'étude du processus de concrétisation des lignées, a été envisagée à travers le développement de la méthode IDID, qui en constitue, à ce jour et à notre connaissance, l'unique occurrence.

6.2. La mécanologie génétique et IDID

La méthode IDID développée au CEA-LARSIM par Vincent Minier et Vincent Bontems dans le cadre du projet ExplorNova se veut une tentative de synthèse opératoire de la mécanologie génétique de G. Simondon et J. Lafitte, enrichie de la MASK et de la TRIZ, ainsi que de la C-K³³⁶. Selon ses auteurs, « IDID étudie le rythme des innovations (identifiées à des seuils de concrétisation) au sein des lignées techniques présentes dans les grands systèmes techniques³³⁷ ».

³³³ Gilbert Simondon et Jean Le Moyne, « Entretien sur la mécanologie », art. cit., p. 108.

³³⁴ Vincent Bontems, « Actualité d'une philosophie des machines », art. cit., p. 37-66.

³³⁵ Yohann Guffroy et Vincent Bontems, art. cit., p. 280.

³³⁶ Vincent Minier et Vincent Bontems, « Investiguer / Diagrammatiser / Inventer / Digitaliser », *ExplorNova : inventer le futur*, Nantes, ExplorNova Studio, 2016.

³³⁷ Vincent Bontems, « Le progrès des lignées techniques », art. cit., p. 7.

Mise en œuvre sur les instruments de l'astronomie spatiale, cette méthode de gestion des connaissances procède en quatre étapes³³⁸ :

- *Investigation*. Il s'agit d'extraire les informations sur les innovations à partir d'archives et d'entretiens avec les experts ;
- *Diagrammatisation*. Une fois l'information extraite, il est nécessaire de la formaliser sous forme de diagrammes afin d'en faciliter la compréhension et la transmission ;
- *Invention*. Ces diagrammes ne sont pas qu'une information figée, ils doivent produire de nouvelles connaissances en dévoilant les relations, souvent implicites, entre les différentes étapes du processus d'innovation ;
- *Digitalisation*. Cette modélisation n'est possible que grâce aux outils informatiques qui en retour s'incarnent dans un serveur de connaissances.

Cette recherche a pour objectif de produire des outils d'analyse de la R&D, de veille technologique et d'aide à la décision, en gardant toutefois à l'esprit que :

La modélisation des lignées techniques reste avant tout un instrument de gestion des connaissances permettant d'extraire et de capitaliser une mémoire de l'inventivité sous une forme compacte et facilement transmissible³³⁹.

Cette approche s'inspire de la MASK pour ce qui a trait à la « capitalisation des connaissances [...] ici entendue, selon MASK, comme l'action d'extraire et formaliser la connaissance d'une ou plusieurs personnes³⁴⁰ », qui doit déboucher sur une modélisation de cette connaissance. Il en va de même pour certains des outils, par exemple les modèles de lignées qui « décrivent l'évolution, d'abord dans son contexte, puis en reprenant une modélisation génétique (les lignées)³⁴¹ ». Mais là où ces deux méthodes divergent, c'est sur les objectifs poursuivis et le statut ontologique accordé aux outils diagrammatiques. Dans IDID, les diagrammes de lignées délivrent un véritable discours sur l'évolution génétique des objets techniques, tandis que les diagrammes MASK ne sont que des outils pratiques de modélisation. Dans le même ordre d'idée, IDID a pour vocation d'étudier le processus de concrétisation afin de retracer une histoire des inventions ayant abouti aux objets actuels., et pour ce faire, V. Minier et V. Bontems ont développé leurs propres outils

³³⁸ Vincent Bontems et Vincent Minier, *op. cit.*, p. 33-50.

³³⁹ Vincent Bontems, « Le progrès des lignées techniques », art. cit., p. 7.

³⁴⁰ Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, MASK, p. 168.

³⁴¹ *Ibid.*, p. 156.

diagrammatiques³⁴², synthétisant et prolongeant les conceptions issues de la MASK, de la C-K et, bien entendu, de la mécanologie génétique. L'étude des lois d'évolution peut en outre déboucher sur de la prospective, là où les ambitions de la MASK s'arrêtent à un travail de capitalisation des connaissances passées.

Conclusion de chapitre

De par un certain nombre de proximités conceptuelles, la mécanologie se combine naturellement avec l'approche génétique pour constituer le fond théorique d'une méthodologie d'appréhension et d'étude des machines qui se veut robuste et systématique. Notons qu'à ce stade le processus de concrétisation apparaît comme un outil prometteur, d'une part parce qu'il rompt avec les conceptions purement utilitaristes de la technique, d'autre part parce qu'il fournit de précieux renseignements sur l'évolution du fonctionnement interne des objets techniques. Plus qu'un simple état de l'art, cette synthèse, inédite, entre les travaux de J. Lafitte, A. Leroi-Gourhan, G. Simondon, Y. Deforge et G. Altshuller, se veut un jalon dans l'édification théorique de la mécanologie génétique. D'autres auteurs auraient pu être inclus à cette liste, notamment en provenance des sciences de la gestion et des méthodologies de la conception (C-K par exemple) mais nous nous sommes limités aux auteurs dont les pensées nous ont semblé les plus compatibles. Reprenant les travaux de Bontems et Minier, nous avons souhaité enrichir la *lignée mécanologique francophone* d'apports extérieurs (TRIZ) et en provenance de la gestion des connaissances (MASK) afin de définir un premier cadre méthodologique, dont nous présentons les outils opératoires dans le chapitre suivant.

³⁴² Minier et al., *Inventing a space mission, op. cit.*, p. 153.

Chapitre 3

Présentation des outils opératoires

Tel objet industriel prétend se suffire de sa fonction d'usage. Mais le temps, ce grand révélateur, dévoile ce qui se présentait comme strictement fonctionnaliste.

Yves Deforge, *Technologie et génétique de l'objet industriel*

Après avoir brièvement retracé la généalogie des approches génétiques et effectué une synthèse des travaux en mécanologie, nous souhaitons désormais *faire* de la mécanologie génétique, c'est-à-dire mettre à l'épreuve la dimension opératoire de notre méthodologie. Si notre démarche s'inscrit dans une certaine volonté de cumulativité propre à consolider la mécanologie génétique comme tradition de recherche, notre objectif est avant tout de proposer une méthode qui soit applicable. Il s'agit de dépasser les propositions purement programmatiques en proposant des outils opératoires qui, s'ils dérivent de positions théoriques, trouvent leur pleine expression dans la mise en pratique. Dans cette optique, nous avons développé plusieurs diagrammes et matrices, dont nous présentons les principes de constructions ainsi que les concepts sur lesquels ils reposent. Leur mise à l'épreuve sur un objet technique d'intérêt sera l'objet de la partie suivante.

1. Niveaux de classification

1.1. Un champ lexical d'inspiration biologique

J. Lafitte distingue trois « ensembles de corps organisés³⁴³ » : les corps bruts, les corps organisés vivants et les corps organisés artificiels. C'est l'objectif de la mécanologie que d'étudier ces derniers, quand les premiers sont l'apanage des sciences naturelles et les seconds, de la biologie. Or, à partir du XX^e siècle, ces disciplines vont s'influencer mutuellement et la philosophie des techniques va se trouver profondément impactée par la biologie, notamment du fait de la diffusion et de l'acceptation des écrits de Charles Darwin. En plus de nombreuses expressions propres à cette discipline (« caractères acquis », « croissance », « organisme », « généalogie »...), J. Lafitte reprend de nombreux termes issus de la taxonomie, parlant notamment de « règne » des machines et de « lignées mécaniques ». Le prisme de la biologie intervient donc en deux temps : le premier porte sur la distribution et la classification des machines³⁴⁴, le second sur l'évolution de la série mécanologique³⁴⁵. Un des apports majeurs de Simondon est précisément d'avoir aboli cette disjonction dans l'appréhension des objets techniques.

Pour notre propos, retenons toutefois que le recours aux taxons biologiques est persistant chez les auteurs de la mécanologie. Que ce soit pour les critiquer (« une connaissance qui procède par genre et espèce ne convient pas³⁴⁶ ») ou pour se les réapproprier (« l'objet technique évolue en engendrant une famille³⁴⁷ »), G. Simondon lui-même y a recours, tout comme Y. Deforge qui, lui aussi, parle de « familles », de « lignées » et d'« espèces ». Malgré la critique qu'en fait G. Simondon, le recours à des catégories nous semble inévitable si nous souhaitons rendre notre méthode opératoire et, par souci de cohérence, nous emploierons les taxons issus de la biologie³⁴⁸ pour les désigner. Nous proposons ainsi une synthèse entre les travaux de G. Simondon et ceux de Y. Deforge, qui emprunte au premier une rigueur dans l'analyse et au second, une volonté d'opérabilité.

³⁴³ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 15.

³⁴⁴ Objet de la deuxième partie de l'ouvrage de Jacques Lafitte.

³⁴⁵ Objet de la troisième partie du même ouvrage.

³⁴⁶ Gilbert Simondon, MEOT, p. 22.

³⁴⁷ *Ibid.*, p. 52.

³⁴⁸ Plus précisément, nous emploierons des termes issus de la *classification classique*, lointaine héritière de la classification de Linné, qui classe les espèces par (dans l'ordre décroissant) : règnes, embranchements, classes, ordres, familles, genres.

1.2. Classe, groupe et lignée

Nous partageons les vues de G. Simondon quand il critique une vision purement utilitariste des techniques. Cependant, dans une perspective opératoire, il nous semble radical, et illusoire, de vouloir faire disparaître cette dimension du problème que pose la technique. Si « à aucune structure fixe ne correspond un usage défini³⁴⁹ », une même fonction d'usage peut, réciproquement, être accomplie par différentes structures. L'approche utilitariste des techniques met l'accent sur la fonction de l'objet technique au détriment de l'étude de son fonctionnement interne. Dans une perspective génétique, G. Simondon renverse le problème et affirme la primauté de ce dernier sur tout point de vue instrumental. Dans notre perspective mécanologique *et* génétique, nous affirmons l'égale importance de ces deux notions, chacune ayant un statut ontologique *et* méthodologique particulier. Nous proposons ainsi les définitions suivantes :

L'ensemble des objets ayant la même *fonction d'usage* définit une *classe technique*. La classe technique traduit la vision utilitaire et naïve des techniques. Le langage courant y a souvent recours dans la désignation des objets techniques : on parle ainsi de machine *à écrire*, de machine *à laver*, de machines *à coudre*... D'une manière générale, la fonction répond à la question « à quoi ça sert ? » et peut s'exprimer comme un verbe venant qualifier l'objet technique. Le concept de fonction est particulièrement discuté en philosophie, mais il l'est aussi bien en biologie et en technologie. Une définition intéressante est proposée par Davis Baird, pour qui le concept même de fonction d'un objet technique justifie le fait que ces derniers soient des objets de connaissance :

Roughly speaking, then, I claim that an artifact bears knowledge when it successfully accomplishes a function. This claim requires elaboration, most particularly with respect to the concept of function itself. The concept I employ is relatively thin, stripped of any heavy load of intentional baggage and focused on the reliable, regular, predictable performance of the artifact. It might best be characterized in terms of mathematical functions rather than biological or more broadly teleological functions. A function, for me, is a crafted and controlled phenomenon³⁵⁰.

En réalité, cette définition rejoint notre propre définition de la *fonction*, car elle prend en compte l'intentionnalité constructrice et les performances objectives de l'objet technique, mais elle s'y mêle

³⁴⁹ Gilbert Simondon, MEOT p. 21.

³⁵⁰ Davis Baird, *op. cit.*, p. 122.

à celle du *principe* dans la mesure où la fonction de Baird est aussi un phénomène fabriqué et contrôlé. Les notions d'opération et d'intention technique, que nous définissons par la suite, nous semblent plus précises et permettent de lever l'ambiguïté du concept bairdien de fonction. Du point de vue utilitariste, l'objet technique se comporte comme une boîte noire, c'est-à-dire comme un modèle entrée-sortie qui ne se préoccupe pas du fonctionnement interne mais qui n'est qu'une « boîte fonctionnelle comportant une entrée, à laquelle on applique une grandeur du monde physique, [...] et qui exprime les variations de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée³⁵¹ ». Issue de la cybernétique³⁵², le concept de boîte noire « néglige dans l'objet sa structure spécifique et son organisation propre pour privilégier des relations de l'objet avec son environnement indépendamment de la nature physique des organes qui le constituent », faisant de la cybernétique « une science de l'action orientée vers l'efficacité »³⁵³ et lui attirant notamment les critiques de G. Simondon.

Nous appelons « groupe technique » l'ensemble des objets techniques partageant le même *principe de fonctionnement interne*, c'est-à-dire le même « phénomène physico-chimique »³⁵⁴. Le groupe technique regroupe des objets d'une grande diversité d'usages et de fonctions. Pour reprendre l'exemple de G. Simondon, on pourra regrouper au sein d'un même groupe, un moteur à ressort et une arbalète mais aussi une montre à ressort. Le fonctionnement interne s'identifie généralement en répondant au « comment ça marche ? » d'Abraham Moles, et vient parfois qualifier le nom de l'objet technique (*cf.* le « à ressort »).

De l'intersection d'une classe et d'un groupe techniques résulte la *lignée technique*. Celle-ci est caractérisée par la persistance d'une *essence technique* qui se définit comme la mobilisation d'un principe de fonctionnement en vue de réaliser une certaine fonction. Aux yeux de la mécanologie génétique, cette essence technique doit être le véritable objet du discours technologique. En effet, elle renferme l'origine mais aussi les potentialités d'évolution des objets techniques affiliés. « Le moteur à essence n'est pas tel ou tel moteur donné dans le temps et l'espace³⁵⁵ » : ce qui compte,

³⁵¹ Abraham Moles, « Cybernétique, information et structures économiques », *Les Cahiers de la publicité*, n° 19 : *La Révolution informatique*, 1968, p. 48.

³⁵² Norbert Wiener, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Paris, Hermann, 1948.

³⁵³ Smail Aït-el-Hadj, *op. cit.*, p. 81.

³⁵⁴ Nous ne partageons pas les vues de Deforge concernant l'éventuelle ambiguïté de cette notion de principe appliquée aux objets complexes. Pour reprendre l'exemple qu'il donne du bateau, le principe d'Archimède définit à nos yeux tout un groupe technique d'objets flottants, en concurrence par exemple avec celui basé sur le principe de Bernoulli et qui a recours à des foils plutôt qu'à une coque porteuse.

³⁵⁵ Gilbert Simondon, *MEOT*, p. 21.

c'est le concept, l'essence technique du moteur thermique, qui au cours de son évolution s'est incarnée en structures de plus en plus concrètes.

1.3. Famille, opération et intention techniques

Le *schème technique pur* de G. Simondon s'identifie pour nous à *l'opération* que réalise l'objet et caractérise la façon dont l'objet technique intervient et transforme le monde. Il définit une *famille technique*. Par exemple, on pourra parler de la famille des détecteurs de particules à ionisation : il s'agit de l'ensemble des objets basés sur le principe d'ionisation en vue de détecter des particules. La famille se situe *en dessous* de la classe des détecteurs de particules (dont la fonction est de détecter des particules) mais *au-dessus* de la lignée (plusieurs essences pouvant réaliser la même opération). Tout comme la technique est ce qui permet à l'homme d'agir sur le monde, l'objet technique agit sur le monde. Il est transformateur du monde et le résultat de cette transformation est cette « opération » caractéristique de la famille technique.

La machine est indissociable de la notion d'opération. En tant qu'objet technique, elle est définie par son schème de fonctionnement, c'est-à-dire par son opération interne³⁵⁶. En tant que dispositif d'action sur le monde, elle est caractérisée par l'opération qu'elle réalise. Le langage courant a tendance à confondre les concepts d'opération et de fonction parce que, parfois, elles sont effectivement confondues : par exemple, un sabre *sert à trancher*, et *trancher* est aussi une opération en soi. Mais ce n'est pas toujours le cas et une fonction peut-être la résultante d'opérations différentes. Il y a une sorte de chaîne de causalité technologique : du principe de fonctionnement interne de l'objet technique résulte une certaine opération, à son tour mobilisée pour remplir une certaine fonction. Notre approche prolonge, en un sens, les travaux de H. Simon pour qui l'objet artificiel possède les caractéristiques suivantes :

- Fabriqué par l'homme.
- Caractérisé en termes de fonctions et de buts.
- Considéré en termes impératifs tout autant qu'en termes descriptifs.

La mécanologie, science de la machine, de l'objet technique, apparaît ainsi comme « un sous-ensemble du champ de l'artificiel consistant dans les activités de réalisation d'artefacts conçus pour

³⁵⁶ La machine n'est pas seulement le siège d'un phénomène physico-chimique : ce principe fait partie de sa définition même.

réaliser une finalité, au moyen de combinaisons de moyens physiques et de forces naturelles³⁵⁷ ». L'artefact, en tant que catégorie conceptuelle, est marqué par une dialectique entre ce pour quoi il est fait et ce qu'il est ; entre sa fonction et son fonctionnement :

Le premier avantage d'une distinction entre les environnements interne et externe dans l'étude d'un système adaptatif ou artificiel est de nous permettre de prédire son comportement à partir d'une connaissance de ses buts et de son environnement externe, et de quelques hypothèses minimales sur son environnement interne³⁵⁸.

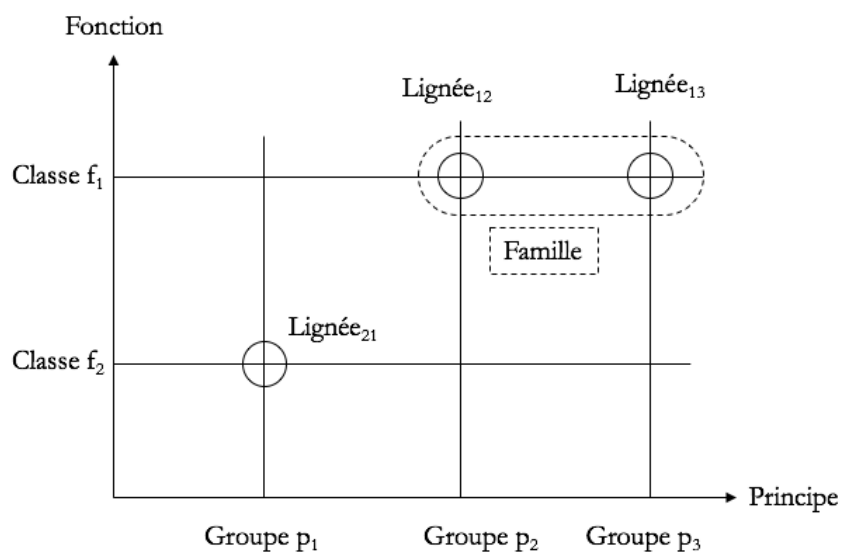


Figure 10 – Schématisation des liens entre classe, groupe, lignée et famille.
(© Thomas Guy)

Cette approche des objets techniques tend à faire d'eux la matérialisation d'une « intention technique », selon la définition qu'en donne l'économiste J.-L. Maunoury dans *La Genèse des innovations. La création technique dans l'activité de la firme*. Cet auteur analyse le processus d'innovation en tant que *transduction* réalisant une intention technique en résorbant la distance entre un « horizon de faisabilité » (les fonctionnements disponibles) et un « horizon de créativité » (les fonctions imaginables). La réalisation de l'intention technique passe par deux tendances symétriques : la *rectitude* (partant d'une fonction déterminée, recherche des schèmes permettant de la réaliser) et l'*épanouissement* (partant d'un fonctionnement disponible, recherche de nouvelles fonctions). Les

³⁵⁷ Smaïl Aït-el-Hadj, *op. cit.*, p. 127.

³⁵⁸ Simon, *op. cit.*, p. 36.

pensées de J.-L. Maunoury et de G. Simondon se rejoignent si l'on considère que c'est l'articulation de l'intention technique avec le processus de concrétisation qui tend à modeler l'allure du progrès technique.

1.4. Générations, espèces, sous-lignées, genres

Chaque étape de la concrétisation de l'essence technique donne naissance à un *schème technique* particulier définissant une *génération* de la lignée, réalisation de l'essence technique dans une certaine configuration structurale. De même, chaque génération se décline selon un ensemble de solutions techniques à l'origine *d'espèces* techniques différentes – le monde industriel utilise le désignatif de « modèle ». Les espèces techniques ont en commun un même schème technique mais varient selon l'agencement des pièces ou le choix des matériaux retenus.

L'essence technique est à l'origine d'une lignée technique marquée par la concrétisation progressive des générations successives. La concrétisation est le plus souvent la réponse à une contradiction technique, vue comme franchissement d'une situation de saturation. Mais face à une contradiction technique, il se peut que plusieurs solutions soient possibles : la lignée présente alors une bifurcation dans son évolution, donnant naissance à deux *sous-lignées*. Les bifurcations ont été largement investiguées par Y. Deforge³⁵⁹ et par A. Leroi-Gourhan qui, pour sa part, préférerait parler de « divergences ». Enfin, nous parlerons d'*hybridation*³⁶⁰ pour qualifier la situation où deux lignées voient leurs essences se mélanger pour donner naissance à une nouvelle essence technique, non réductible à l'un ou l'autre de ses parents³⁶¹.

Le dernier concept que nous souhaitons emprunter à G. Simondon est celui de *modulation*, « interaction entre une énergie et une information³⁶² ». Le fait est que pour fonctionner de manière optimale, si ce n'est durable, un objet technique doit opérer dans une gamme d'énergie donnée. La modulation du schème technique suivant la gamme d'énergie définit alors ce qu'on qualifie de *genre technique*. La notion de genre n'est pas orthogonale avec celles de classes, groupes et lignées ; une

³⁵⁹ Yves Deforge, TGOI, p. 119-124.

³⁶⁰ Deforge préfère quant à lui parler de « croisement » pour désigner la situation inverse où « deux lignées distinctes se marient pour donner un produit nouveau » (TGOI, p. 119). Le terme de « croisement » nous semble trop faible, et, ne nous intéressant pas aux « produits », la définition ne nous convient pas non plus.

³⁶¹ Bifurcation et hybridation : une fois encore, il est « rassurant » de constater la convergence de nos vues avec celles de nos prédécesseurs. Si les termes employés et les définitions diffèrent, l'unité conceptuelle persiste.

³⁶² Gilbert Simondon, *Communication et information. Cours et conférences*, Chatou, Éditions de la transparence, 2010, p. 191.

même lignée peut s'épanouir à travers des genres différents : par exemple, un détecteur à ionisation peut détecter des particules d'énergie très différentes. Mais, si le genre n'est pas directement rattaché à la technicité de l'objet, il possède néanmoins un rôle déterminant dans les solutions techniques retenues (pour reprendre notre exemple, pour détecter des particules de faible énergie, il faudra des champs ionisants très élevés, alors que de faibles champs suffiront pour des particules hautement énergétiques).

2. Les diagrammes de fonctionnement

2.1. De l'utilité des représentations graphiques

Afin de préciser et de rendre opératoires les différentes notions de principe, d'opération, de schème et d'essence technique, nous ferons appel à un certain nombre de diagrammes. La pensée diagrammatique a toujours fait partie de l'histoire de la mécanique. Bien que son œuvre en soit dépourvue, J. Lafitte était ingénieur mais aussi dessinateur et architecte. Les travaux de G. Simondon sont accompagnés de nombreuses « planches » présentant schémas et diagrammes, tout comme ceux de A. Leroi-Gourhan. Dans le domaine technique, le recours aux diagrammes et schémas permet une montée en généralisation, et donc en abstraction dans la mesure où « le schème de fonctionnement est le même, à tel point que sur un schéma théorique on peut indiquer une diode par un signe (conductance asymétrique) qui ne préjuge pas du type de diode employé³⁶³ ». Y. Deforge partage ce point de vue, lui qui considère que « ce que les techniciens expriment graphiquement par le “schéma de principe” est une représentation simplifiée qui participe d'une idée de réduction graphique à l'essentiel³⁶⁴ ».

Malheureusement, ces travaux ne sont restés qu'à l'état d'ébauche, notamment en raison d'un manque de systématisation. Il nous faut donc nous tourner vers la MASK et son *modèle de phénomène* pour trouver une tentative aboutie de modalisation des « phénomènes » (pris dans un sens très large) :

Un phénomène prend sa source dans un système qu'on identifie et qui s'appelle donc système source, dans ce système se produit un phénomène (ou plusieurs), qu'on appelle donc phénomène source (ou action source). Ce phénomène source est à l'origine d'un flux, ce flux

³⁶³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 51.

³⁶⁴ Yves Deforge, TGOI, p. 101.

est un flux de matière, d'énergie, d'information ou encore un flux cognitif, émotionnel, un flux financier, etc. Dans une activité, un métier donné, on regarde l'interaction de ce flux avec un autre système qu'on appelle le système cible, cette interaction est révélée par un phénomène (ou plusieurs) qui se produit au sein de ce système, qu'on appelle donc phénomène cible. Le phénomène à décrire est donc caractérisé par une interaction, via un flux, entre deux sous-systèmes. Pour rendre la description complète, on rajoute ce qu'on appelle le champ actif. Il est constitué des objets qui ne font pas, à proprement parler, partie du phénomène considéré mais qui agissent sur lui³⁶⁵.

Ces considérations se traduisent graphiquement par le « diagramme du modèle de phénomène » de la figure 11 :

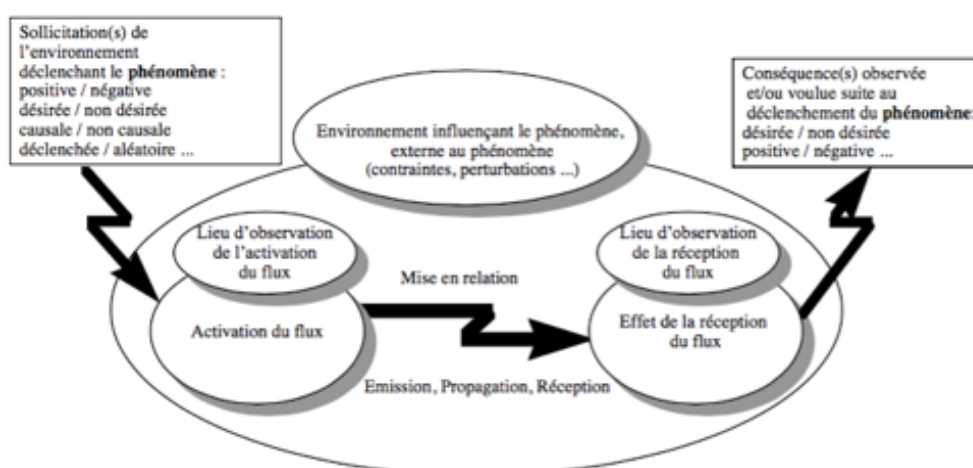


Figure 11 – Diagramme du modèle de phénomène.

(Source : Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, MASK, p. 162.)

Ces diagrammes présentent une grande généralité. Élaborés pour la gestion des connaissances, ils sont transposables aussi bien à la biologie qu'à la physique ou la chimie. Pour notre part, nous souhaitons les importer dans le domaine technique et mobiliser leur puissance opératoire afin d'essayer de saisir schèmes et essences techniques.

³⁶⁵ Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, MASK, p. 162.

2.2. Principes de construction des diagrammes

Notre objectif est de construire un outil diagrammatique commun aux différents niveaux de classification établis précédemment. Saisir sous un même formalisme ce qui fait l'unité d'une classe, d'un groupe ou d'une lignée, est nécessaire afin de rester cohérent avec nos définitions. Ancêtre de la MASK, la MKSM³⁶⁶ s'est attaquée à cette problématique en proposant une modélisation des « processus » (là encore, pris dans un sens très large) qui s'inspire de la théorie du système général³⁶⁷, basée sur deux dualités fondamentales :

- Dualité flux/champ. Tout processus émet un flux propre qui le caractérise ; on stipule en général un flux de matière, d'énergie ou d'information. [...] Le champ est vu comme « une capacité d'influence ». C'est l'ensemble des éléments qui influent sur le processus sans en faire partie ;
- Dualité source/cible. Le flux dans un processus est vu comme écoulement entre une source et un puits, entre deux réservoirs. Il relie donc deux sous-systèmes, qu'on appellera source et cible, qui caractérisent le processus au même titre que le flux et le champ³⁶⁸.

Ces considérations ont donnée naissance à la modélisation SCFC (Source-Cible-Flux-Champ), dont une représentation sous forme de diagramme est avancée par Ermine (Fig. 12) :

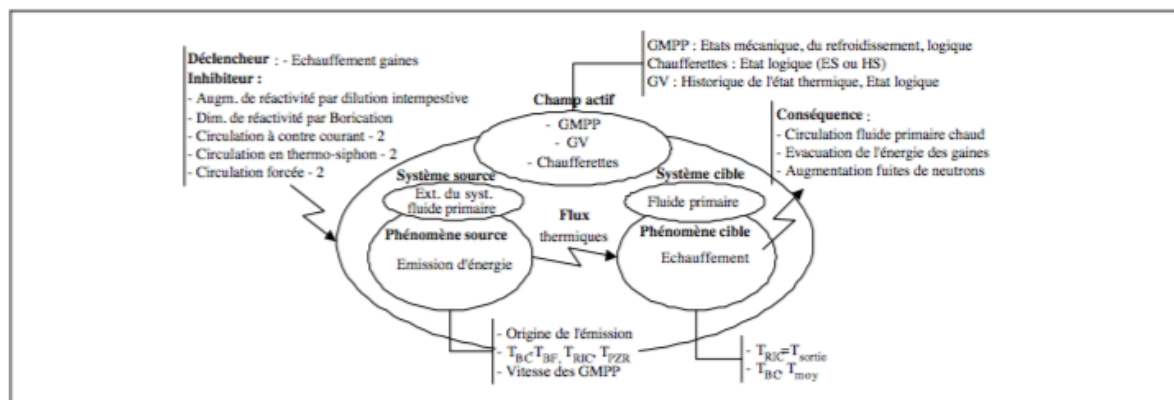


Figure 12 – Modèle SCFC d'un processus intervenant dans la conduite de centrale.

(Source : Jean-Louis Ermine et al., « MKSM : méthode pour la gestion des connaissances », art. cit., p. 543.)

³⁶⁶ Jean-Louis Ermine *et al.*, « MKSM : méthode pour la gestion des connaissances », AFCET-Hermès, 1996, vol. 4, n° 4, p. 541-575.

³⁶⁷ Jean-Louis Le Moigne, *La Théorie du système général : théorie de la modélisation*, Paris, Presses universitaires de France, 1977.

³⁶⁸ Jean-Louis Ermine *et al.*, « MKSM : méthode pour la gestion des connaissances », art. cit., p. 543.

Nous réinterprétons les dualités établies par la théorie du système général selon les considérations mécanologiques de G. Simondon : le *flux* (qu'il soit de matière, d'énergie ou d'information, selon une tripartition déjà rencontrée) peut s'interpréter la résultante de l'opération interne liant les phénomènes source et cible quand le *champ actif* peut se voir comme le milieu associé nécessaire au bon fonctionnement de l'objet technique. La structuration de tout système technique en quatre organes, issue de la TRIZ³⁶⁹, ainsi que le modèle de la boîte noire issu notamment des travaux de Norbert Wiener³⁷⁰, complètent nos sources d'inspiration et nous amènent à proposer notre propre diagramme de fonctionnement (Fig. 13) :

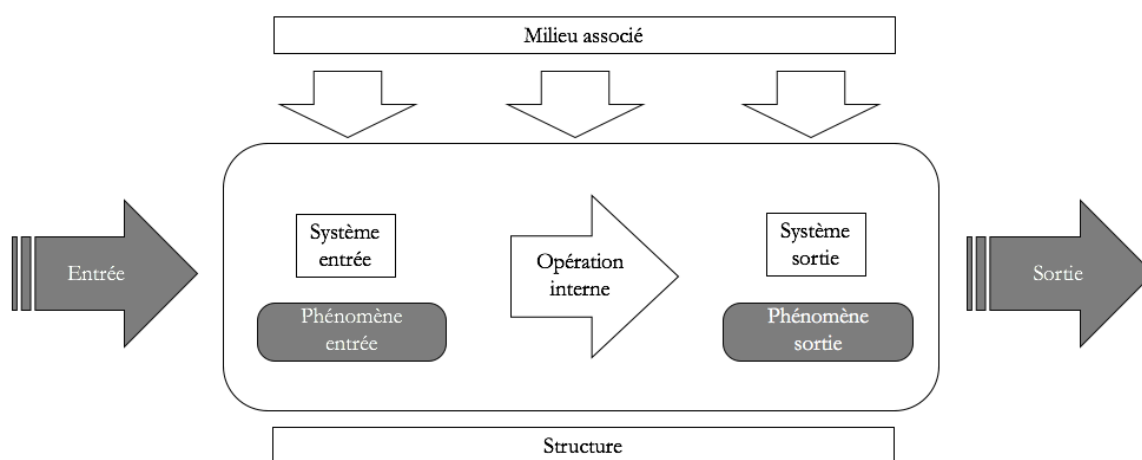


Figure 13 – Diagramme de fonctionnement.
Représentation diagrammatique du schème technique relatif à un individu technique.
(© Thomas Guy)

Une machine est un dispositif matériel mobilisant un certain principe interne en vue de produire une opération, transformant une entrée en une sortie. L'opération interne intervient entre deux sous-systèmes, eux-mêmes sièges de phénomènes servant d'intermédiaire entre le monde extérieur et l'intériorité de la machine. En tant qu'individu technique, la machine dispose d'un milieu associé, ensemble des conditions externes nécessaires à son bon fonctionnement. L'opération interne ne préjugant pas des solutions techniques retenues, le schème technique peut s'incarner en différentes structures qui s'apparentent à des degrés de liberté sur les éléments techniques ainsi que leur disposition.

³⁶⁹ Denis Cavallucci, art. cit., p. 8 : Loi d'évolution n° 1, dite de l'intégralité des parties d'un système technique : « Chaque système technique doit comprendre quatre parties principales, à savoir : un élément moteur, un organe de transmission, un organe de travail et un organe de contrôle. »

³⁷⁰ Norbert Wiener, *Cybernétique et société* [1950], Paris, Seuil, 2014.

La figure 14 donne un exemple concret de ce genre de diagramme ; Il s'agit du diagramme de fonctionnement des Micromegas, une espèce de détecteur de particules à ionisation, utilisée au CEA³⁷¹ :

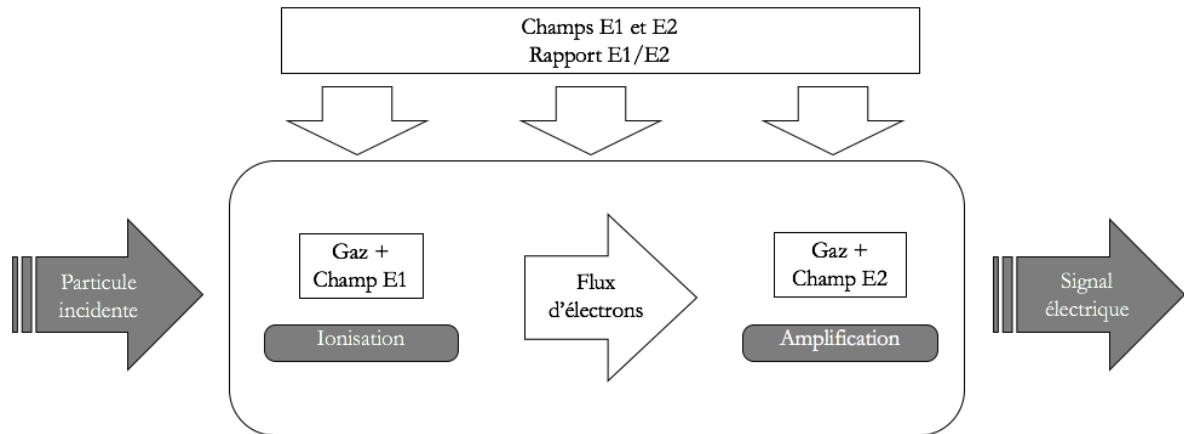


Figure 14 : Diagramme de fonctionnement des Micromegas.
(© Thomas Guy)

2.3. Diagrammes et niveaux de la technique

L'intérêt du diagramme de fonctionnement que nous proposons est qu'il permet de porter, sous un même formalisme, différents regards sur l'objet technique. Les différents niveaux de la technique identifiés précédemment peuvent ainsi être représentés sous le même type de diagramme, selon les éléments graphiques qui y sont précisés.

À titre d'illustration, nous reprenons l'exemple des Micromegas. La classe technique, traduction de la dimension instrumentale de l'objet technique, réduit celui-ci à sa fonction, à savoir, « détecter » une particule (Fig. 15) :

³⁷¹ Voir annexe B.1. pour plus de détails sur le fonctionnement et l'histoire des Micromegas.

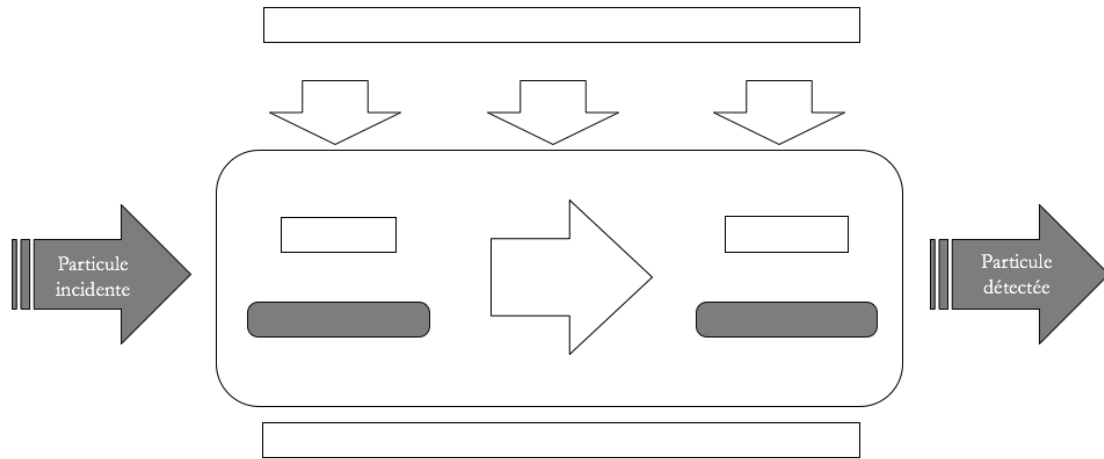


Figure 15 – Représentation diagrammatique de la fonction (classe technique).
(© Thomas Guy)

Adopter le point de vue de la famille technique conduit à s'intéresser à l'opération réalisée (Fig. 16) :

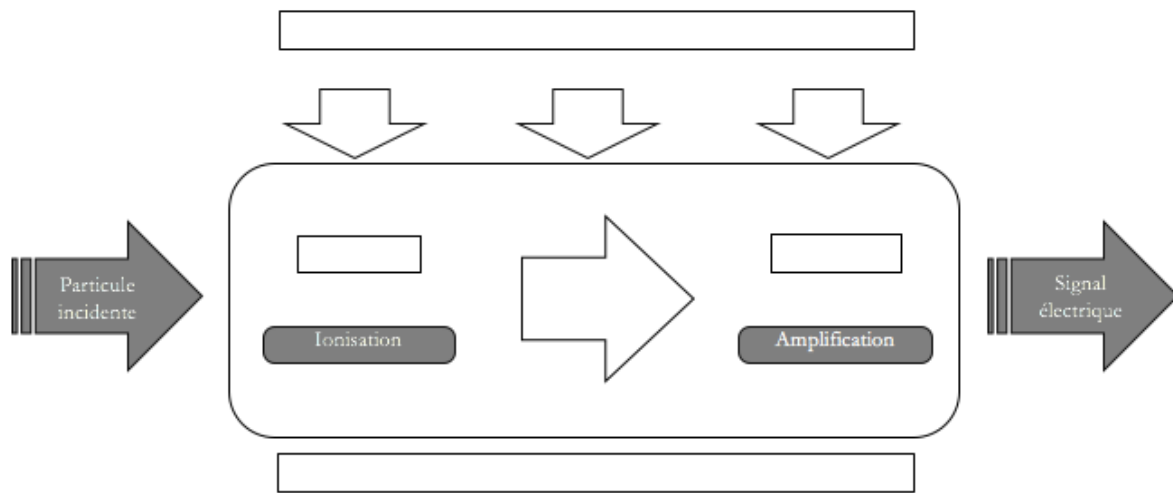


Figure 16 – Représentation diagrammatique de l'opération (famille technique).
(© Thomas Guy)

Envisagée sous l'optique du groupe technique, la machine ne se voit que comme la réalisation d'une opération interne (Fig. 17). Ici l'opération consiste en la « conversion » d'une particule incidente en un signal électrique et peut aussi se voir aussi comme le flux (d'électron) des diagrammes SCFC.

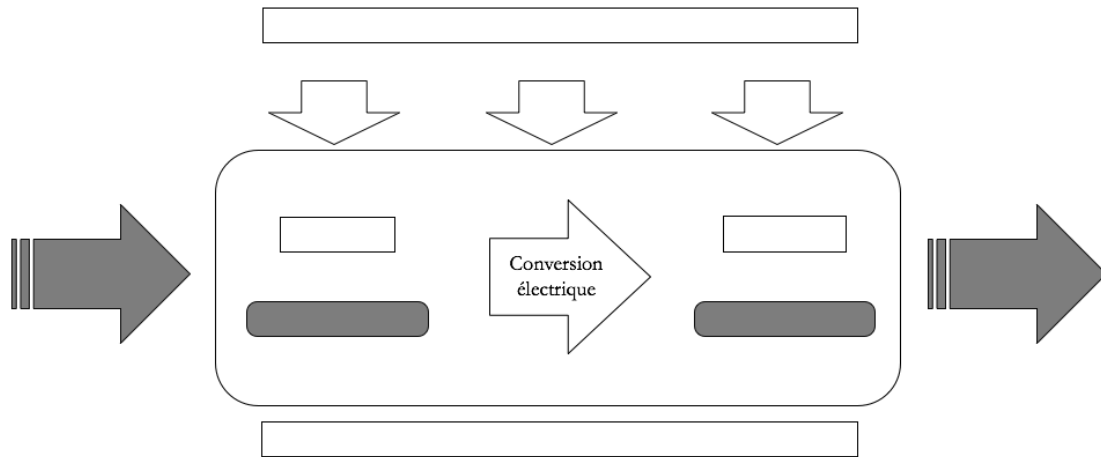


Figure 17 – Représentation diagrammatique de l'opération interne (groupe technique).
(© Thomas Guy)

Enfin, à l'intersection de la classe et du groupe se trouve la lignée technique, définie par son essence technique, qui est, pour rappel, la mobilisation d'une opération interne en vue de produire une certaine opération. Une lignée technique est donc marquée par l'unité et la persistance d'une essence dont la représentation diagrammatique est donnée par la figure 18 :

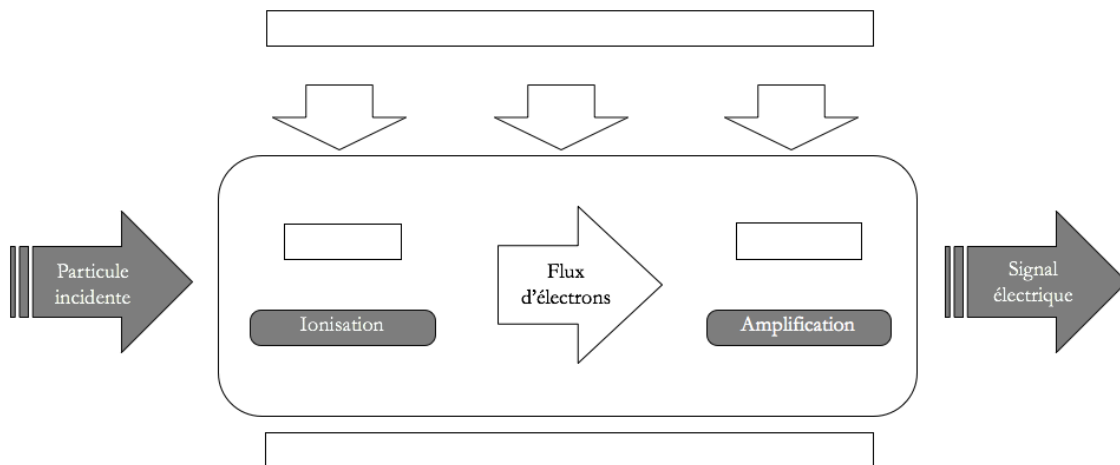


Figure 18 – Représentation diagrammatique de l'essence technique (lignée technique).
(© Thomas Guy)

Les diagrammes associés à chaque génération de la lignée sont des cas particuliers du diagramme de l'essence technique. Leurs différences proviennent des conditions d'actualisation de l'essence en différentes structures et sous-systèmes mobilisant des phénomènes différents ou nécessitant un milieu associé différent.

3. Les diagrammes de lignées

3.1. Regards croisés d'Yves Deforge et Michel Cotte

Le concept de lignée technique a été repris par Y. Deforge, qui en a proposé une définition plus opératoire. Afin de prolonger ce projet, il a en outre eu recours à différents diagrammes, que ce soit pour expliciter les « principes » techniques ou pour représenter l'évolution des « objets industriels ». L'application de ces concepts au cas des machines à laver est un bon exemple de ce à quoi peut aboutir une enquête génétique :

Les recherches documentaires permettent de rassembler tout ce qui s'est fait et se fait en matière de machines à laver le linge et de distribuer ces machines en lignées d'après les principes technologiques et les dates d'apparition³⁷².

Aboutissement d'un travail d'enquête historique, le diagramme de lignées présente une famille d'objets répartis selon différentes lignées, chacune marquée par l'unicité et la persistance de leur essence technique. Ainsi, un objet peut en suivre un autre chronologiquement sans lui être génétiquement relié. L'ordre génétique suit l'ordre chronologique mais ne s'y réduit pas, et il lui est même « préférable » :

Jean-Louis Le Moyne — Est-ce qu'un point de vue historique serait préférable ou, encore, préférablement, un point de vue génétique ?

Gilbert Simondon — Génétique³⁷³ !

Le diagramme de lignées présenté par Y. Deforge (Fig. 19) rend compte des quatre sous-lignées dont il a exposé les principes. Il se présente sous la forme d'un arbre généalogique dont l'unité conceptuelle se trouve dans la désignation même de l'objet : la machine *à laver* désigne la classe des machines dont la fonction est de laver le linge. Cette fonction peut être remplie à travers la mise en œuvre de différents principes donnant naissance à des lignées qui peuvent bifurquer, s'hybrider, s'éteindre...

³⁷² Yves Deforge, TGOI, p. 112.

³⁷³ Gilbert Simondon et Jean Le Moyne, « Entretien sur la mécanologie », art. cit., p. 117.

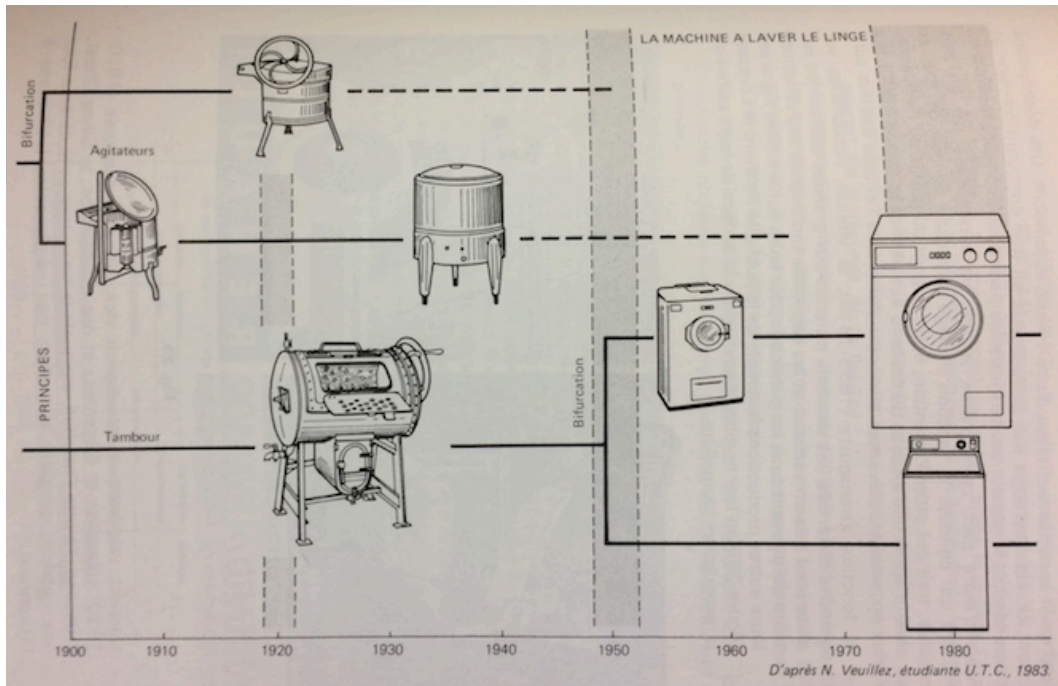


Figure 19 – La machine à laver le linge.
 (Source : Yves Deforge, *op. cit.*, p. 113)

Convergence calculée ou fortuite, Michel Cotte a lui aussi proposé une modélisation génétique, sous forme de diagramme, de l'évolution des machines à laver, qui reprend ses propres préconisations en la matière (Fig. 20). Les diagrammes de lignées de M. Cotte semblent reposer sur un concept de lignée technique proche de celui de Y. Deforge : les objets techniques sont classés selon un principe de fonctionnement (manuel, combustion, vapeur, électrique...) mobilisé dans l'optique de réaliser une certaine fonction (savonnage, lessiveuse, essorage...). Des lignes et flèches de relation sont mobilisées afin de représenter les liens conceptuels et génétiques entre les différentes générations.

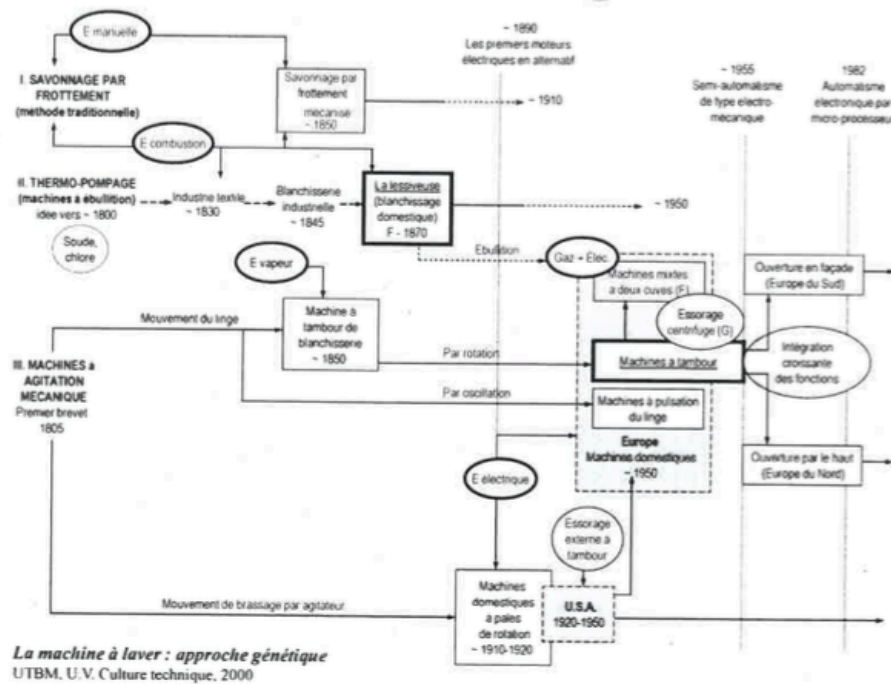


Figure 20 – Approche génétique de la machine à laver le linge chez Michel Cotte.
(Source : Michel Cotte, art. cit., p. 215)

On retrouve chez Y. Deforge comme chez M. Cotte un certain nombre d'éléments communs, que ce soit dans la structuration du diagramme (un axe temporel, des séparations principales, des bifurcations...) ou dans son contenu (quatre principes identifiés, différentes sources d'énergie, ouverture « à façade » vs « par le haut »...). Cependant, il manque deux choses essentielles aux diagrammes de ces auteurs : une genericité et des principes de construction. En effet, à chaque nouvel objet étudié, un nouveau diagramme est proposé, ce qui ne permet pas l'établissement d'une méthodologie robuste et générique.

3.2. Principes de construction

Bien que très éloignés conceptuellement du modèle de lignées de la MASK, nos propres diagrammes de lignées en reprennent une part du formalisme tout en veillant à conserver les recommandations de M. Cotte. Ils sont ainsi mis sous la forme d'un arbre généalogique dont les branches sont les différentes lignées identifiées au cours de l'enquête génétique (Fig. 21). La cohérence de l'arbre généalogique est marquée par l'unité de la famille technique. Quant aux différentes générations, elles présentent une unité conceptuelle saisie par l'essence technique à l'origine de la lignée dont le nom est précisé à côté des premières générations. Nous faisons en

outre apparaître pour chaque génération la date d'apparition ainsi que l'invention ayant permis sa réalisation. Chaque nœud peut-être l'occasion d'indiquer le choix technologique opéré lors du franchissement de la situation de saturation qui bloquait le développement de la lignée³⁷⁴. Enfin, les lignées suivent leur mode d'évolution propre : bifurcation, hybridation, arrêt, saturation.

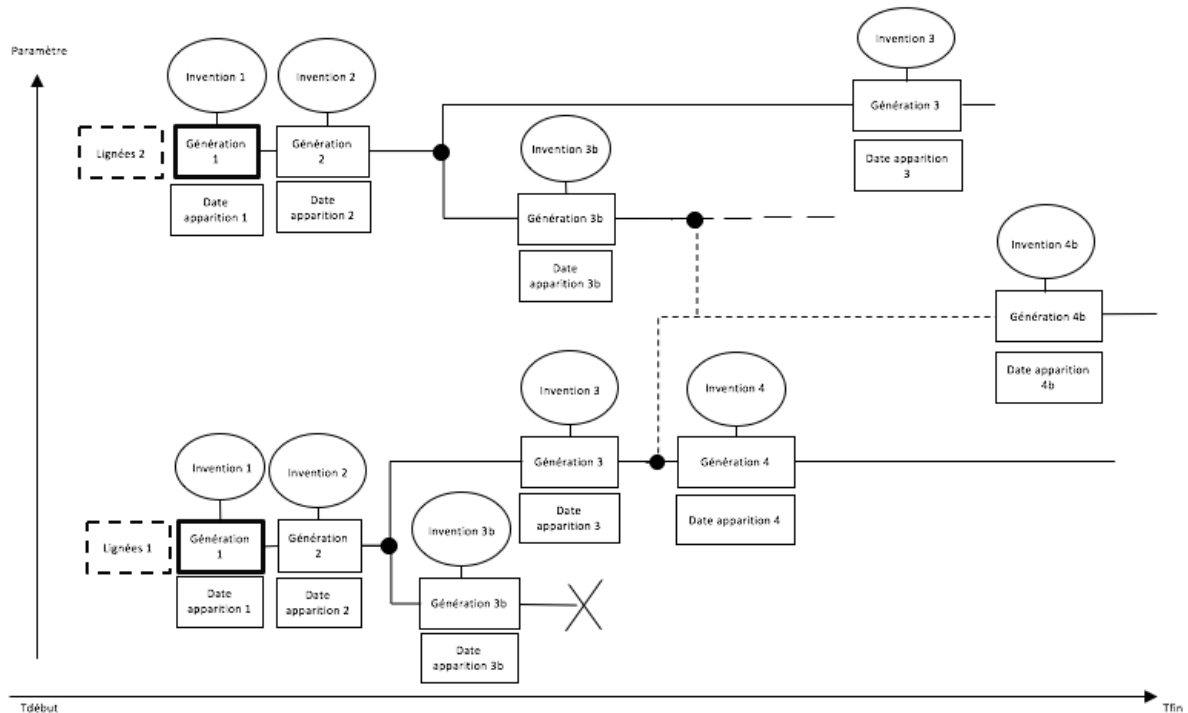


Figure 21 – Diagramme de lignées.

(© Thomas Guy)

4. L'invention et l'innovation dans les processus de conception

4.1. La technique comme optimisation

La conception utilitariste³⁷⁵ de la technique, qui ramène l'objet technique à sa fonction d'utilité, conduit généralement à réduire le processus de conception à un problème d'optimisation. À ce titre, nous retranscrivons tel quel un paragraphe de l'entrée « Philosophy of technology » de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* :

³⁷⁴ Voir annexe A.3. pour l'application de ces principes à un objet industriel.

³⁷⁵ On parlera aussi de conception instrumentale de la technique, l'objet technique n'étant plus vu que comme un *instrumentum*.

When engineering design is conceived as a process of decision making, governed by considerations of practical rationality, the next step is to specify these considerations [...] The desires or goals are represented by their value or utility for the decision maker, and the decision maker's problem is to choose an action that realizes a situation that, ideally, has maximal value or utility among all the situations that could be realized [...] Now the instrumental perspective on technology implies that the value that is at issue in the design process viewed as a process of rational decision making is not the value of the artifacts that are created. Those values are the domain of the users of the technology so created [...] It is in this sense that engineers share an overall perspective on engineering design as an exercise in optimization. But although optimization is a value-orientated notion, it is not itself perceived as a value driving engineering design³⁷⁶.

Vu sous cet angle, le travail de l'ingénieur se réduit à un problème de prise de décision entre plusieurs choix techniques préexistants, et cette prise de décision doit aller dans le sens de la maximisation d'un critère utilitaire. Ce point de vue nous semble extrêmement limité, si ce n'est problématique. En effet, il nie non seulement le travail de ceux qui font la technique, mais aussi ce qui fait la valeur de l'objet technique. L'article poursuit :

Most important of these is that the engineer is facing a multi-criteria decision problem. The various requirements come with their own operationalizations in terms of design parameters and measurement procedures for assessing their performance. This results in a number of rank orders or quantitative scales which represent the various options out of which a choice is to be made. The task is to come up with a final score in which all these results are 'adequately' represented, such that the option that scores best can be considered the optimal solution to the design problem. Engineers describe this situation as one where trade-offs have to be made: in judging the merit of one option relative to other options, a relative bad performance on one criterion can be balanced by a relatively good performance on another criterion³⁷⁷.

Le premier paragraphe présente une vision *monocritère* quand le second parle d'une approche *multicritère* de la technique. Cependant, l'un comme l'autre partent du parti pris que le processus de conception – et donc la technique – s'apparente à un problème d'optimisation. Cette approche instrumentale ne dit rien sur la technicité de l'objet et la réduit à la mesure de sa valeur/utilité pour

³⁷⁶ Maarten Franssen, Gert-Jan Lokhorst et Ibo van de Poel, « Philosophy of Technology », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (édition de l'automne 2018).

[URL : <https://plato.stanford.edu/archives/fall2018/entries/technology/>].

³⁷⁷ *Ibid.*

l'utilisateur. Il s'agit d'une vision naïve de la technique, largement partagée par ceux qui l'utilisent, mais pas forcément par ceux qui la produisent. C'est notamment le cas des scientifiques qui utilisent ou développent des instruments se devant d'être performants. Afin d'appuyer leur discours, ils se munissent d'une figure de mérite (ou FoM, de l'anglais, *figure of merit*), critère simple ou agrégé censé évaluer objectivement la performance de l'objet technique³⁷⁸.

Deux types d'analyse sont alors possibles. Les analyses diachroniques permettent de mesurer l'évolution d'une FoM dans le temps (Fig. 22). Elles autorisent la comparaison de la génération actuelle avec les générations précédentes, et apparaissent comme une illustration du progrès, ou tout au moins de l'évolution, des lignées :

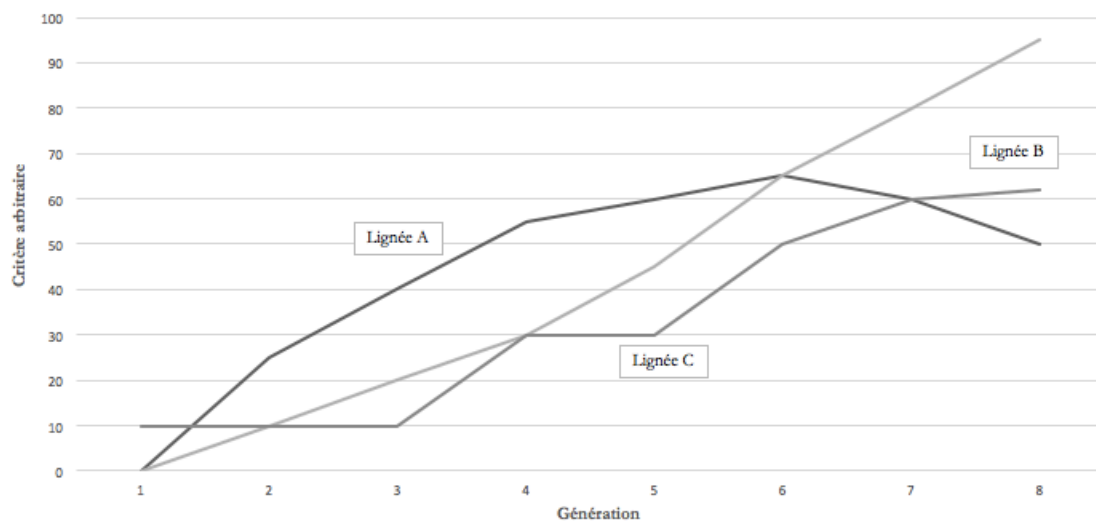


Figure 22 – Exemple générique d'analyse diachronique illustrant les modes d'évolution de trois lignées.
(© Thomas Guy)

Les analyses synchroniques, quant à elles, comparent à un même instant différents objets, selon un ou plusieurs critères (Fig. 23). La disposition relative de ces objets sur un graphique à deux axes permet de lire immédiatement leur performance : les objets situés aux extrémités sont ceux qui présentent les meilleures performances (selon que l'on souhaite minimiser ou maximiser le critère) :

³⁷⁸ Minier et al., *Inventing a space mission, op. cit.*, p. 154.

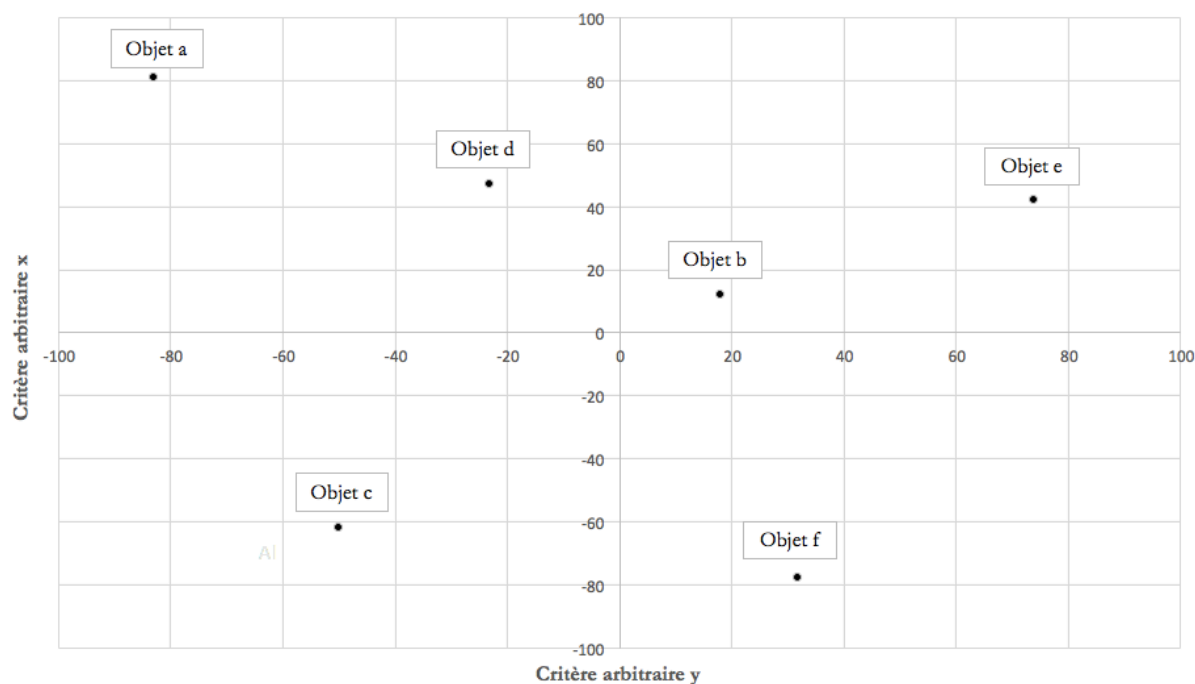


Figure 23 – Exemple générique d'analyse synchronique selon deux critères « arbitraires » x et y .
(© Thomas Guy)

Le projet d'une évaluation quantitative de la technicité possède un caractère rassurant, car saisissable à travers des nombres³⁷⁹. Un tel projet séduit en outre par la facilité de sa mise en œuvre, sa rapidité et son efficacité. Mais, ramenant l'objet technique aux effets qu'il produit, cette approche ne dit rien sur l'essence de la technicité, car à aucun moment elle ne prend en compte le fonctionnement interne de l'objet. Il s'agit donc d'ajouter à cette analyse performative purement quantitative une dimension davantage qualitative.

4.2. La matrice des performances

Ceci est d'autant plus nécessaire que « les avantages d'une innovation sont toujours relatifs, car il n'existe pas de critère unique permettant de mesurer les performances d'un objet technique. En effet, le choix du critère pertinent dépend de la fonctionnalité considérée³⁸⁰ ». Afin d'établir ces « critères pertinents », IDID réinterprète les types passif, actif et informationnel de la classification

³⁷⁹ Alain Supiot, *La Gouvernance par les nombres*, Paris, Fayard, 2015.

³⁸⁰ Vincent Minier *et al.*, *Inventing a Space Mission*, *op. cit.*, p. 135 : « It should be noted that the benefits of an innovation are always relative because there is no single criterion to measure the performance of a technical object. Indeed, the choice of the relevant criterion depends on the functionality considered. »

des machines de G. Simondon comme les trois dimensions selon lesquelles toute évaluation des performances d'une machine doit se déployer :

En fin de compte, toutes les machines sont passives puisqu'elles ont une structure qui doit conserver une certaine intégrité. Les machines actives en sacrifient une part par l'usure qu'entraîne leur fonctionnement cyclique. Les machines informationnelles sont passives et souvent actives, mais ces aspects sont subordonnés à l'amplification, au transfert et au traitement de l'information. Selon la machine, ce sont les performances passives, actives ou informationnelles qui importent le plus et qui conditionnent les autres³⁸¹.

Chacune des neuf catégories de cette classification donne naissance à un critère évaluant conjointement le traitement qui est fait d'un certain type de flux (de matière, d'énergie ou d'information) et la mise en relation de différentes échelles.

À la tripartition en degrés élémentaire, moyen et supérieur, nous préférons une vision plus symétrique et proposons la classification suivante : le degré médian correspond à une mise en relation mono-échelle entre l'entrée et la sortie, le degré inférieur plonge aux échelles inférieures et le degré supérieur s'intéresse à la mise en relation avec les grandes échelles. Nous proposons alors notre propre matrice des performances (Tab. 3) dont les critères sont les suivants :

- Le critère du degré médian passif est simplement la solidité de l'assemblage. Le degré inférieur passif tient à la résistance, relation entre la structure microphysique de l'objet et l'opération qu'il réalise. Enfin, la qualité du degré supérieur est la stabilité, capacité que possède le système à amortir les perturbations.
- Le degré médian d'une machine active correspond à un objet qui n'amplifie pas l'énergie : son critère est celui du rendement, rapport entre l'efficacité énergétique réelle d'une machine et son efficacité théorique maximale. La puissance marque le degré inférieur passif, quand le critère du degré supérieur est celui de l'efficacité, rapport entre l'énergie utile en sortie de la machine et l'énergie dépensée en entrée.
- De même, le degré médian des dispositifs informationnels se compose de machines opérant simplement un transfert de l'information : le critère retenu sera donc celui de la fidélité. Le critère du degré inférieur de la machine informationnelle est celui de la sensibilité, mesure des capacités de la machine à réagir à de faibles quantités de données. Symétriquement, les

³⁸¹ Vincent Bontems, « Sur la classification des objets techniques selon Simondon », art. cit., p. 191.

machines informationnelles de degré supérieur traitent de grandes quantités de données et sont évaluées par leur capacité à gérer la complexité.

Tableau 3 – Matrice des performances.
 (© Thomas Guy ; adapté de Bontems & Minier)

Degré Type	Inférieur	Médian	Supérieur
Passif	Résistance	Solidité	Stabilité
Actif	Puissance	Rendement	Efficacité
Informationnel	Sensibilité	Fidélité	Complexité

4.3. La typologie des inventions

Suite à son étude des processus de conception, G. Altshuller en vient à distinguer différents degrés d'inventivité selon l'importance de la solution apportée par le brevet (Tab. 4), et qui va de la solution apparente à la découverte majeure :

Tableau 4 – Tableau des degrés d'inventivité de la TRIZ.
 (Source : Cavallucci, art. cit., p. 7 ; adapté d'Altshuller)

Niveau	Degré d'inventivité	Pourcentage de solutions	Origine des connaissances
1	Solution apparente	32 %	Connaissance d'un individu
2	Amélioration mineure	45 %	Connaissance de l'entreprise
3	Amélioration majeure	18 %	Connaissance de l'industrie

4	Nouveau concept	4 %	Connaissances toutes industries confondues
5	Découverte	< 1 %	Ensemble des savoirs

On peut réinterpréter les niveaux d'inventivité comme autant de types de perfectionnement des objets techniques. Bien que la TRIZ n'utilise pas le concept de lignée technique³⁸², les degrés d'inventivité peuvent être mobilisés au cours de l'étude de l'évolution des objets :

- Les solutions apparentes et améliorations mineures caractérisent les déclinaisons d'un même schème technique selon différents matériaux et structures.
- Une amélioration majeure ou un nouveau concept permettent le passage d'une génération à la suivante au sein de la lignée (gain de concrétisation).
- Une découverte donne naissance à une nouvelle lignée (nouveau principe).

L'idée d'une gradation dans les perfectionnements des objets techniques ainsi que le vocabulaire employé font directement écho aux vues de G. Simondon, qui distingue quant à lui deux types de perfectionnement des objets techniques :

- Les perfectionnements mineurs, « qui, sans modifier cette répartition, diminuent les conséquences néfastes des antagonismes résiduels³⁸³ » en jouant par exemple sur la qualité des matériaux (niveaux 1 et 2 de la TRIZ).
 - Les perfectionnements majeurs, « qui modifient la répartition des fonctions, augmentant de manière essentielle la synergie du fonctionnement³⁸⁴ » (niveaux 3 et 4 de la TRIZ).
- (-) Le niveau 5 de la TRIZ, que G. Simondon a perçu mais pas traité, est le cas de la découverte d'un nouveau principe donnant naissance à une nouvelle lignée.

Les perfectionnements mineurs sont, le plus souvent, la conséquence d'un « perfectionnement de détail résultant de l'expérience de l'usage³⁸⁵ » alors que les perfectionnements majeurs sont le résultat d'une réflexion sur la nature du dispositif technique. Les seconds s'effectuent donc dans le sens de la concrétisation de l'objet, tandis que les perfectionnements mineurs « nuisent aux perfectionnements majeurs, car ils peuvent masquer les véritables imperfections d'un objet

³⁸² On trouve parfois l'expression « ligne d'évolution technique » mais dans un sens relativement différent.

³⁸³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 46.

³⁸⁴ Gilbert Simondon, MEOT, p. 46.

³⁸⁵ *Ibid.*, p. 31.

technique³⁸⁶ ». Dans le pire des cas, ils peuvent même conduire à des situations que G. Simondon qualifie d'hypertéliques, par analogie avec la biologie³⁸⁷ : « L'évolution des objets techniques manifeste des phénomènes d'hypertélie qui donnent à chaque objet technique une spécialisation exagérée et le désadaptent³⁸⁸ » par rapport à son milieu associé. Les cas d'hypertélie se rencontrent lorsque, au cours de l'évolution d'un objet technique, les perfectionnements mineurs se sont accumulés au point que l'objet est devenu sur-adapté à des conditions d'utilisation particulières. Un autre type d'hypertélie correspond au cas de l'objet *sur mesure*, pour lequel les conditions de conception elles-mêmes font de l'objet technique un objet sur-adapté. Les perfectionnements majeurs sont, aux yeux de G. Simondon, la marque de l'invention technique rendue nécessaire par « l'interruption par un obstacle, par une discontinuité jouant le rôle d'un barrage » au cours de l'évolution technique ; les perfectionnements mineurs, eux, s'apparentent à « la conduite élémentaire du détour³⁸⁹ ». La première stratégie consiste à franchir « l'obstacle » (la contradiction technique, la situation de saturation) quand la seconde vise à le contourner sans l'affronter, c'est-à-dire sans le résoudre.

Enfin, G. Simondon distingue deux types de causes jouant sur l'évolution des objets techniques, et qui influent donc directement sur les processus de conception. Il s'agit des causes extrinsèques que sont les causes, ou contraintes, économiques et des causes intrinsèques qui traduisent une certaine nécessité technique interne. Plus précisément, aux premières correspond « la cohérence du système des besoins³⁹⁰ » ; les secondes traduisent « la cohérence du travail technique³⁹¹ ». Les causes extrinsèques pèsent sur l'opération que réalise l'objet technique et interviennent par conséquent au niveau de la classe technique ; les causes intrinsèques jouent sur le fonctionnement interne de l'objet, et sont donc l'apanage du groupe technique.

Nous proposons de croiser les considérations de G. Simondon sur les causes du progrès des objets techniques avec les deux types de perfectionnement identifiés plus haut, en reprenant en

³⁸⁶ *Ibid.*, p. 47.

³⁸⁷ Au sens du développement exagéré d'un organe (au-delà de son utilité fonctionnelle) pouvant aller jusqu'à mettre en péril la vie de l'individu.

³⁸⁸ Gilbert Simondon, MEOT, p. 61.

³⁸⁹ *Id.*, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences, op. cit.*, p. 276.

³⁹⁰ *Id.*, MEOT, p. 27.

³⁹¹ *Ibid.*

partie le vocabulaire consacré et la présentation matricielle de Clark et Henderson³⁹² afin d'obtenir notre propre représentation matricielle des types d'évolution technique (Fig. 24) :

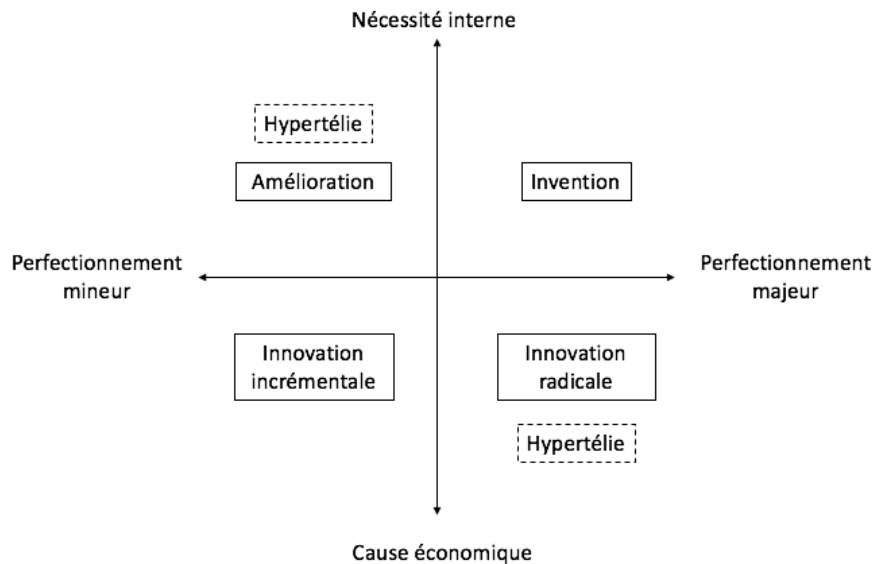


Figure 24 – Typologie des évolutions techniques selon leur cause et leur degré de perfectionnement.
(© Thomas Guy)

Des causes économiques résultent des innovations, incrémentales si les transformations de l'objet technique sont mineures, radicales si ces dernières sont majeures. Symétriquement, des nécessités internes découlent des améliorations de l'objet technique donnant naissance à différentes espèces au sein d'une même génération, ou des inventions donnant naissance à une nouvelle génération au sein de la lignée. Nous rajoutons au graphique les deux cas d'hypertélie identifiés précédemment : celle issue de l'accumulation de correctifs techniques (cas en haut à gauche) et celle découlant d'un processus de conception sur mesure (en bas à droite).

Pour notre étude mécanologique, nous nous en tiendrons aux progrès techniques issus des causes et motivations techniques. Nous distinguerons ainsi trois types d'évolution selon l'échelle où nous nous trouverons :

- Les améliorations, passage d'une espèce à la suivante au sein d'une même génération ;
- Les inventions, passage d'une génération à la suivante au sein d'une même lignée ;
- Les découvertes, passage d'une lignée à la suivante au sein d'une même famille.

³⁹² Rebecca Henderson et Kim Clark, « Architectural Innovation : The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms », *Administrative Science Quarterly*, n° 35, 1990, p. 9-30.

4.4. La matrice coûts/performances

Le dernier outil que nous souhaitons introduire nous a été inspiré par le concept d'argumentation utilisé dans la MASK, et a été appliqué lors de la cartographie de lignées techniques industrielles³⁹³ :

À chaque génération est attachée une argumentation. Celle-ci retrace l'objectif ou les objectifs remarquables qui ont prédestiné à l'existence de cette génération. L'argumentation retrace aussi les éléments positifs et négatifs qui ont été apportés par la génération, tels qu'on peut les analyser dans l'état actuel de l'évolution³⁹⁴.

L'idée est de comparer deux générations successives afin de déterminer où se trouvent les gains et éventuellement les pertes de performance. Nous complétons cette analyse par un point de vue « écologique » inspiré de G. Simondon : la technicité d'un objet technique se mesure aussi à sa capacité à produire des effets importants pour un coût en ressources limité (une voiture qui va deux fois plus vite pour une consommation trois fois plus importante est le contraire d'un progrès). Notre outil se présente donc sous la forme d'une matrice coûts/performances (Tab. 5) : lors du passage d'une génération à la suivante, il s'agira de déterminer simultanément si les coûts *et* les performances ont diminué, augmenté ou sont restés stables :

Tableau 5 – Matrice coûts/performances
(© Thomas Guy)

Performances Coûts	-	=	+
-	1	4	6
=	X	2	5
+	X	X	3

Les cases marquées d'un X correspondent à une perte de performance à ressources égales, ou une conservation des performances pour un coût supérieur : il s'agit de situations de *régression* technique, qui sont le plus souvent le fait de causes économiques. D'un point de vue mécanologique, l'objet technique étant défini par sa genèse concrétisante, il semble impensable

³⁹³ En l'occurrence les centrales inertielles de navigation (cf. annexe A.3.).

³⁹⁴ Serge Aries, Benoît Le Blanc et Jean-Louis Ermine, MASK, p. 168.

qu'une nouvelle génération présente un rapport coûts/performances défavorable. Les six cases restantes correspondent quant à elles à autant de types d'innovation/d'invention, qui peuvent se répartir selon trois classes d'équivalence en lien avec les catégories identifiées précédemment :

- Les cases 1, 2 et 3 correspondent à des situations où les performances évoluent conjointement aux coûts. Il s'agit de phénomènes de *diversification* : obtenir des performances moindres (respectivement meilleures), à un coût moindre, (respectivement plus élevé), répond généralement à des impératifs économiques mais ne constitue pas pour autant un progrès technique. Les innovations incrémentales et radicales tombent dans cette catégorie.
- Les cases 4 et 5 en revanche sont le signe de réelles *améliorations*. Obtenir de meilleures performances à moindre coût ou les augmenter à ressources constantes correspond à un gain d'efficacité au niveau de l'objet, qui ne peut résulter que d'impératifs techniques.
- Enfin, la case 6 correspond au plus haut degré de l'invention technoscientifique : un objet plus performant et qui consomme moins ne peut être que le résultat d'une *invention*.

Conclusion de chapitre

Ce chapitre concentre les principaux apports novateurs de cette thèse. La synthèse effectuée aux deux précédents chapitres a établi la mécanologie génétique comme le fondement théorique des catégories conceptuelles que nous employons. Dans le cadre de notre travail, nous avons souhaité aller plus loin qu'une justification théorique et rendre ces catégories conceptuelles opératoires. A cette fin, nous avons développé des outils diagrammatiques et matriciels qui s'appuient sur des recommandations émises par nos prédécesseurs, mais s'avèrent originaux. Certains choix effectués semblent apparaître comme des concessions au point de vue fonctionnaliste, et donc comme un recul par rapport aux travaux de Simondon, notamment en ce qui concerne la définition d'une lignée technique, et la construction de la matrice des performances. Le fait est que, malgré l'importance décisive de cet auteur pour nos travaux, les catégories de Simondon sont difficilement mobilisables en pratique, et si lui-même appelle à la mise en œuvre de son programme génétique, celle-ci n'est que partiellement amorcée dans ses derniers écrits. De notre côté, si nous avons opté pour une approche réhabilitant la *fonction* dans l'étude mécanologique, c'est avant tout afin de garantir l'opérationnalisation de notre méthode. La mise à l'épreuve de celle-ci à travers l'investigation d'un objet technique particulier, le télescope, constitue donc une autre forme de légitimation de nos catégories conceptuelles.

Conclusion de partie

Reprenant les travaux de R. Lester et M. Piore, Joëlle Forest rappelle que :

L'innovation est le résultat de deux processus à la fois complémentaires et en grande partie antinomiques, à savoir : un processus analytique, qui relève de la résolution de problème, et un processus interprétatif, qui relève de la créativité³⁹⁵.

Cette distinction n'est pas sans faire écho à celle de Maunoury, qui, lui aussi analysant le processus d'innovation, distinguait un horizon de faisabilité (les fonctionnements disponibles) et un horizon de créativité (les fonctions possibles). Notre thèse ne porte pas sur l'innovation - encore que l'étude de ce processus constitue une extension possible de la mécanologie génétique³⁹⁶ - et l'apport de la TRIZ fait par ailleurs explicitement référence à la « résolution de problème », ce qui tendrait à circonscrire notre méthodologie à l'étude de la phase analytique, ou, dit autrement, à l'analyse internaliste de la technique. A nos yeux cependant il n'en est rien : la construction de nos concepts, ainsi que des outils qui en découle, s'est faite avec comme objectif de concilier, au sein même de l'objet d'étude, les considérations portant sur la fonction et celles portant sur le fonctionnement. Dans la mesure où les premières sont là pour répondre à un usage extérieur à la réalité de l'objet technique, et les secondes s'attachent à décrire son intériorité, nous intégrons en outre la tension entre internalisme et externalisme au sein même de notre méthodologie. Le diagramme de fonctionnement (Fig. 13), qui permet de saisir l'essence technique, et le diagramme de lignée (Fig. 21), qui diagrammatise le processus de concrétisation, deviennent les deux outils principaux de notre méthode ; le premier amorce l'enquête mécanologique en fixant le fonctionnement, le second intervient au moment de la restitution génétique finale en conjuguant les informations sur ce fonctionnement avec celles sur sa fonction. Entre ces deux moments, c'est l'application des matrices que nous avons développées qui doit guider le(s) regard(s) porté(s) sur les performances, mais aussi les évolutions, de l'objet technique rattaché à la lignée étudiée. Et si nous avons repris le vocabulaire de nos prédécesseurs (lignée technique, famille, classe...), c'est avant tout parce que « leurs concepts peuvent être réactivés dans nos problèmes et inspirer ces concepts qu'il faut créer³⁹⁷ ».

³⁹⁵ Joëlle Forest et Michel Faucheux, « Expliquer l'inexplicable : Sciences de la conception et créativité », *Cahiers de RECITS*, 2007.

³⁹⁶ Voir à ce sujet Vincent Bontems, *La Recherche au nom de l'Innovation : « Faster! Better! Cheaper! »*, Manuscrit HDR, 2019.

³⁹⁷ Gilles Deleuze et Félix Guattari, *Qu'est ce que la philosophie ?*, Paris, Les éditions de Minuit, 2005 (1991), p. 32

DEUXIÈME PARTIE

**HISTOIRE GÉNÉTIQUE
DES LIGNÉES DE TÉLESCOPES**

Chapitre 4

Construction de l'objet d'étude

C'est la nature en fuite à jamais dans la nuit.

Le télescope au fond du ciel noir la poursuit.

Victor HUGO, *La Légende des siècles*

Après une première partie en forme d'état de l'art, de synthèse et de présentation théorique des outils, il s'agit à présent de passer à la mise en œuvre opératoire de la méthode. La première étape consiste à définir précisément l'instrument qui nous servira d'objet d'étude, à savoir le télescope. La documentation sur les télescopes est abondante et variée, aussi, plutôt que d'avoir une approche visant à l'exhaustivité – et qui serait peu originale –, nous souhaiterions mettre l'accent sur trois aspects particuliers du télescope : l'apport de l'analogie avec l'œil, l'importance du traitement des aberrations dans la compréhension de l'objet technique et le conditionnement du dispositif par le choix de la longueur d'onde d'étude. Notre construction de l'objet d'étude nous conduira à laisser de côté certains aspects traditionnellement inclus dans l'étude du télescope. Encore une fois, il ne s'agit pas de prétendre à l'exhaustivité mais de préciser la définition des termes employés, afin d'apporter un nouveau point de vue sur le télescope.

1. L'analogie biologique

1.1. L'œil et la vision

Pendant plus de deux mille ans, l'homme a observé à l'œil nu une seule partie du rayonnement que l'on appelle, pour cette raison, le visible. L'œil, associé au cerveau, est un merveilleux instrument d'optique : il collecte les photons à travers le cristallin et forme une image sur la rétine qui est un photodétecteur naturel³⁹⁸.

Sensible à la partie visible du rayonnement électromagnétique, comprise entre 400 et 750 nanomètres de longueur d'onde, l'œil humain est capable de produire une réponse dès qu'il reçoit quelques photons dans un intervalle de 100 millisecondes. Il se compose de collecteurs de lumière ainsi que d'un ensemble de photodétecteurs. Le système de traitement de l'information optique que constituent le nerf optique, les neurones et le cerveau ne sera pas abordé ; en revanche, nous présentons une brève anatomie de l'œil humain.

L'œil humain possède deux lentilles convergentes naturelles permettant de collecter et de focaliser la lumière incidente vers la rétine (Fig. 25). Il s'agit de la cornée, située à l'entrée de l'œil, et du cristallin, dont la particularité est de pouvoir modifier son rayon de courbure (permettant ainsi l'accommodation). Entre ces deux lentilles se trouve l'iris, membrane circulaire dont le trou central, la pupille, agit comme un diaphragme permettant de sélectionner la quantité de lumière à transmettre à la rétine. Située au fond de l'œil, la rétine est une fine membrane composée entre autres de deux types de photodétecteurs : les cônes et les bâtonnets. Répartis en trois types, les cônes assurent à l'œil humain la vision des couleurs via la décomposition trichromatique de la lumière incidente. Peu nombreux (environ quatre millions par œil), ils sont concentrés au centre de la rétine (la fovéa) et sont responsables de l'acuité visuelle. Les bâtonnets se trouvent à l'extérieur de la partie centrale de la rétine et sont surtout responsables de notre vision périphérique. Très nombreux (environ 100 millions par œil) et très sensibles à la lumière (un unique photon produit une réponse), ils permettent la vision nocturne mais deviennent complètement aveugles face à de fortes intensités lumineuses.

³⁹⁸ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 238.

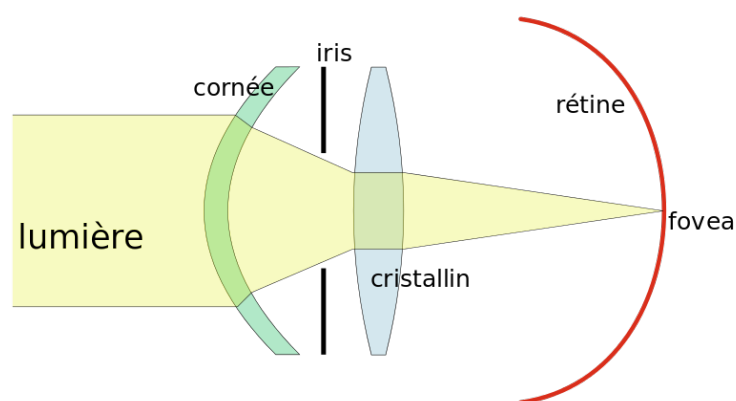


Figure 25 – Modèle optique de l'œil humain.
(Source : Wikipédia. © Yann Gavet)

La zone de collecte, quant à elle, est très limitée : le diaphragme que constitue la pupille, l'ouverture au milieu de l'iris, et qui conditionne la quantité de lumière transmise à la rétine, varie entre 2 et 8 mm). Par conséquent, seule une faible partie de la lumière incidente peut être collectée, et l'œil ne dispose que d'une faible sensibilité. Comme en outre la séparation entre les cellules photosensibles de l'œil est de 2,5 mm, on estime la résolution angulaire de l'œil d'environ 1 arcmin³⁹⁹ : « Nous venons de toucher aux deux faiblesses de l'œil : une sensibilité spectrale limitée et une faible capacité d'absorption des photons. Tous les efforts des astronomes vont tendre à pallier ces faiblesses⁴⁰⁰ ».

1.2. L'œil et le télescope

Si nous avons pris le temps de nous pencher sur le mécanisme de la vision chez l'homme, c'est que son étude permet de mieux comprendre le statut du télescope. Sans tomber dans la facilité des métaphores et analogie biologiques – dont nous discuterons la pertinence au chapitre 7–, il est certain que l'analyse structurale et fonctionnelle de l'œil humain vient enrichir la compréhension des dispositifs astronomiques.

³⁹⁹ Une minute d'arc (1' ou 1 arcmin) correspond à $1^\circ/60$. À titre de comparaison, la taille apparente de la pleine lune est de 30'.

⁴⁰⁰ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 239.

Généralement, le télescope est considéré comme une extension de l'œil. Le fait est qu'il « augmente la portée utile de l'observation visuelle⁴⁰¹ » et, à ce titre, est qualifié d'instrument. Comme tout objet technique qui « prolonge et adapte les organes des sens », « il est un capteur⁴⁰² ». « L'instrument équipe le système sensoriel, il sert à prélever de l'information⁴⁰³ », mais dans le cas du télescope, le qualificatif de « capteur » nous semble douteux. En effet, si « la collecte de la lumière et la formation de l'image constituent le rôle du *télescope*, l'analyse de l'image est réalisée par les *instruments*⁴⁰⁴ ». Nous préférons donc introduire une distinction et parler d'instruments *d'observation* pour les instruments, tels les télescopes, qui ne traitent pas l'information mais se contentent de l'amplifier. Les instruments *de mesure*, tels les détecteurs, sont quant à eux assimilés à des récepteurs de l'information dont « la réalité locale [...] est modifiée en son devenir par la réalité incidente et c'est cette modification de la réalité locale par la réalité incidente qui est la fonction d'information⁴⁰⁵ ». C'est le cas, par exemple, d'un détecteur de particules à ionisation : la « réalité locale » que constitue le gaz est ionisée, donc modifiée, par la « réalité incidente » qu'est la particule à détecter. En revanche, un télescope n'est en rien transformé par les rayonnements incidents.

Un télescope ne produit pas d'image ; c'est l'œil, et plus exactement les photodétecteurs présents sur la rétine, qui la produisent. Le mécanisme de production d'une image nécessite trois opérations, chacune étant associée à un sous-système (nous précisons, par analogie, leur équivalent chez l'être humain) :

- La concentration des rayons lumineux, permettant la perception de la direction, est dévolue au dioptré oculaire (cornée et cristallin).
- La détection des photons, permettant la perception de l'intensité lumineuse et des couleurs le cas échéant, est opérée par les photodétecteurs de la rétine.
- L'intégration des signaux électriques, permettant l'adaptation de la vision aux conditions environnantes, est réalisée par le cerveau.

⁴⁰¹ Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences, op. cit.*, p. 90.

⁴⁰² *Ibid.*, p. 88.

⁴⁰³ *Ibid.*, p. 88-89.

⁴⁰⁴ Pierre-Yves Bely (dir.), *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*, New York, Springer, 2003, p. 41 :
« Collecting the light and forming the image is the role of the telescope. The analysis of the image is carried out by the *instruments*. »

⁴⁰⁵ Gilbert Simondon, *Communication et information. Cours et conférences, op. cit.*, p. 160.

C'est ici que l'analogie structurale avec la biologie apporte un nouvel éclairage sur le rôle du télescope. En effet, un observatoire moderne se compose lui aussi de trois grands sous-systèmes principaux, qui sont :

- Le télescope, chargé de collecter et de focaliser les rayons lumineux issus des astres vers les instruments de mesure.
- Les instruments, qui détectent les photons et leurs propriétés (intensité, longueur d'onde, polarisation...).
- Le système de traitement des données, dont le rôle est d'analyser les signaux en sortie des instruments.

Ainsi, il serait plus judicieux de qualifier le télescope de prolongement ou d'extension du cristallin. Poursuivre l'analogie conduit à assimiler les instruments à la rétine, les systèmes informatiques au cerveau et le système de la vision dans son ensemble à l'observatoire. Cette analogie ne fait pas sens en soi, mais elle a le mérite de clarifier le statut de chacun des sous-systèmes, qu'ils soient techniques ou biologiques.

Au cours de l'évolution, le monde animal a développé de nombreuses stratégies afin de réaliser l'opération consistant à concentrer les rayons lumineux issus d'une direction donnée. On les regroupe sous deux grands ensembles structurels, les yeux simples et les yeux composés ; nous donnons la classification anglo-saxonne à titre de curiosité⁴⁰⁶ :

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Simple eyes⁴⁰⁷ <ol style="list-style-type: none"> 1. Pit eyes 2. Pinholes 3. Spherical lenses 4. Multiples lenses 5. Corneal refraction 6. Concave reflectors | <ul style="list-style-type: none"> - Compound eyes <ol style="list-style-type: none"> 7. Apposition eyes 8. Neural superposition eyes 9. Afocal apposition 10. Superposition eyes <ul style="list-style-type: none"> - Refracting superposition eyes - Reflecting superposition eyes - Parabolic superposition eyes |
|---|---|

⁴⁰⁶ Michael F. Land et Russell D. Fernald, « The Evolution of eyes », *Annual review of neuroscience*, vol. 15, 1992, p. 25.

⁴⁰⁷ La différenciation structurale entre yeux « simples » et yeux « composés » sera aussi rencontrée lors de l'étude génétique des télescopes à « miroir monolithique (simple) » et à « miroir segmenté (composé) ».

Dans le cas du télescope, le lieu commun consistant à dire que « la technique s'inspire de la nature » semble relativement vérifié dans la mesure où ces différentes architectures biologiques se retrouvent dans le domaine technique :

These include nearly all those known from optical technology (the Fresnel lens and the zoom lens are two of the few exceptions that come to mind), plus several solutions involving array optics that have not really been invented⁴⁰⁸.

Aussi différentes soient-elles, on peut en outre regrouper les différentes stratégies en trois grandes catégories⁴⁰⁹, la première reposant sur la *sélection*, et les deux dernières sur l'opération de *focalisation* :

- Les rayons lumineux ne provenant pas de la bonne direction sont éliminés par *ombrage* d'une autre structure de l'œil sur la rétine.
- Les rayons d'une même direction sont incurvés et orientés vers un même point de la rétine par *réfraction*.
- Les rayons sont dirigés sur les photorécepteurs par *réflexion* sur un miroir concave disposé derrière la rétine.

Interrogeons-nous à présent sur la pertinence des analogies entre l'œil et le télescope que nous avons mobilisées jusque-là. Pour ce faire, reprenons la classification de Bontems des quatre types de rapports analogiques rencontrés dans les techniques⁴¹⁰ :

- Analogies *génétiques* « entre des objets produits à partir des mêmes actes intellectuels, par la même invention, ou par les mêmes gestes et procédés » ;
- Analogies *opératoires* « entre des objets réalisant la même opération, c'est-à-dire ayant le même fonctionnement. Ces analogies opératoires doivent intégrer la relation de l'objet à son milieu associé » ;
- Analogies *structurelles* « entre des objets possédant la même structure. Ces analogies structurelles s'observent entre des objets techniques ou entre ces objets et des organismes vivants. Elles peuvent porter sur la forme extérieure comme sur la structure interne » ;

⁴⁰⁸ Michael F. Land et Russell D. Fernald, art. cit., p. 7.

⁴⁰⁹ Il est intéressant de noter que cette tripartition trouve son prolongement dans l'étude des lignées techniques de télescopes.

⁴¹⁰ Vincent Bontems, « Analogies techniques et raisonnement analogique (une lecture simondonienne) », dans Sophie A. de Beaune, Liliane Hilaire-Pérez et Koen Vermeir (dir.), *L'Analogie dans les techniques*, Paris, CNRS éditions, 2018, p. 273-289.

- Analogies *fonctionnelles* « entre des objets ayant la même fonction, la même finalité ».

Nous pourrions ajouter à cette liste les analogies *énergétiques* entre des objets fonctionnant dans la même gamme d'énergie (que celle-ci soit thermique, électrique, lumineuse...). Ce faisant, chacune des analogies présentées ici se rattacherait à une de nos catégories (lignée, famille, espèce, classe, genre). L'analogie entre l'œil et le télescope est à la fois structurale et opératoire – même si, encore une fois, l'analogie vaut pour l'œil et l'observatoire. Cette convergence de structure et d'opération s'explique par le fait que les organes biologiques sont contraints par les potentialités évolutives de la nature. Contraintes qui existent aussi pour les artefacts et « qui font qu'une fin ne sera atteinte qu'au moyen de telle ou telle opération réalisée par un ensemble déterminé de structures issues d'un nombre limité d'inventions et de fabrications⁴¹¹ ».

2. Approche opératoire du télescope

2.1. Une première définition de l'objet d'étude

Étymologiquement, le nom « télescope » vient du latin *telescopium*, terme popularisé suite aux travaux de Galilée, formé des racines grecques *τῆλε* (« loin, au loin ») et *σκοπέω* (« voir, observer »). Le télescope serait donc un instrument destiné à observer les objets lointains – en particulier les astres. Il s'agit là d'une définition fonctionnaliste de l'objet technique. Pour reprendre les termes de notre classification, le désignatif « voir loin » définit une classe technique mais ne permet pas de définir précisément le télescope en tant qu'individu technique. Cette définition reste aujourd'hui encore la plus répandue et la plus partagée par les experts du domaine. Qu'il s'agisse des ingénieurs en charge de la construction ou des astronomes qui s'en servent, tous considèrent que le télescope « est un appareil dont la fonction technique de base est très simple : il doit fournir une image de haute qualité d'objets distants⁴¹² ». Cette conception est la conséquence du rapport *fonctionnel* que les scientifiques entretiennent avec leurs instruments, c'est-à-dire de la prise en compte de leur seule dimension utilitaire. Pour nous en revanche, une telle définition ne dit rien sur ce qui constitue l'essence technique du télescope.

⁴¹¹ *Ibid.*, p. 276.

⁴¹² Raymond Wilson, *Reflecting Telescope Optics*, New York, Springer, 2003, p. 21: « A telescope is a device whose basic technical purpose is very simple: it should provide a high quality image of distant objects ».

L'*Encyclopédie* rappelle pour sa part que la définition originelle du télescope était une définition structurale : « Télescope signifioit uniquement dans son origine, un instrument formé de différens verres ou lentilles ajustés dans un tube, au-travers desquels on voyoit les objets fort distans⁴¹³ ». Mais l'invention du télescope de Newton, qui recourt à des miroirs, a contraint à un élargissement de la définition :

Aujourd'hui, il se dit en général de tout instrument d'optique, qui sert à découvrir & voir des objets très-éloignés, soit que ce soit directement à-travers de plusieurs verres, ou par réflexion au moyen de plusieurs miroirs⁴¹⁴.

La nouvelle définition avancée par l'*Encyclopédie* est intéressante dans la mesure où elle mêle considérations structurales (verres, miroirs) et fonctionnalistes (découvrir et voir des objets très éloignés) tout en mentionnant le principe physique à l'origine du fonctionnement interne de l'objet (phénomène de réflexion lumineuse). Elle en dit donc davantage sur ce qui fait la technicité du télescope que les définitions purement fonctionnalistes. Pris séparément, chacun de ses aspects ne suffit pas à caractériser de manière assez précise l'individu technique qu'est le télescope. En effet, la *classe* des objets permettant de « voir loin » est plus large que le télescope : elle contient par exemple tous les dispositifs de télétransmission. De même, le *groupe* technique des instruments basés sur le principe de réflexion – ou de réfraction – lumineuse ne se restreint pas aux télescopes : il inclut par exemple les microscopes.

Notons que dans le cas du télescope, et contrairement à d'autres objets techniques, il existe une certaine bijection entre principes de fonctionnement et éléments structuraux. Le phénomène de réfraction lumineuse, par exemple, se produit au niveau de la surface séparant deux milieux transparents d'indices de réfraction différents (on parle de « dioptre », et la discipline associée, connue depuis les Grecs, est la dioptrique), dont un cas particulier est la lentille. Il y a donc une certaine équivalence entre les qualificatifs télescopes « à lentilles » et télescope « à réfraction ». De même, le phénomène de réflexion lumineuse (étudié par la catoptrique, une des disciplines de l'optique géométrique) se produit à la surface de miroirs : télescopes « à miroir » et télescopes « à réflexion » désignent donc *in fine* le même type d'objet. Pour reprendre les termes consacrés, on pourra donc parler indifféremment de télescope réfracteur ou de télescope dioptrique pour

⁴¹³ Jean-Baptiste Le Roy, « Télescope », *L'Encyclopédie*, tome 16, 1751 (1^{re} édition), p. 36.

[URL: https://fr.wikisource.org/wiki/L'Encyclopédie/1re_édition/TÉLESCOPE]

⁴¹⁴ *Ibid.*, p. 36.

désigner ce que le français désigne sous le nom de lunette astronomique, et de télescope réflecteur ou de télescope catoptrique pour parler des télescopes (au sens usuel du français). De son côté, le terme lunette signifie étymologiquement « en forme de lune » ; les lunettes du XIII^e siècle, date d'apparition du terme, ayant en effet cette forme⁴¹⁵. Par métonymie, le terme en est venu à désigner tout instrument « destiné à améliorer la vue »⁴¹⁶.

Dans la suite de notre étude, nous considérerons que le schème technique pur, l'opération fondamentale à l'origine de la famille technique, définit le télescope comme un dispositif permettant de focaliser la lumière. Cette définition est cohérente avec notre volonté de placer l'opération interne (famille) au cœur du discours mécanologique. Son utilisation en astronomie permet à ses utilisateurs d'observer des sources lointaines (classe). Quant à son fonctionnement interne (groupe), il s'apparente à celui d'un concentrateur de photons dont les différentes mises en œuvre sont autant de lignées. « S'apparente » seulement, car le concentrateur de lumière est du ressort de l'optique anidolique, ou optique non imageante, branche de l'optique qui cherche à optimiser l'éclairage produit par une source sur une cible sans se préoccuper de former une image nette. La focalisation est une sous-opération de la concentration dans la mesure où elle consiste à concentrer des photons au même foyer⁴¹⁷. Le terme « focalisation » est donc plus approprié pour qualifier l'opération que réalise le télescope, car l'image formée en sortie a précisément vocation à être la plus nette possible.

2.2. Focalisation par réfraction et réflexion

Quel est l'intérêt de focaliser des photons ? Les objets diffusent la lumière qu'ils reçoivent (on parle de « sources secondaires »), c'est-à-dire que chaque point de leur surface renvoie la lumière dans toutes les directions. En l'absence de dispositif, les faisceaux de lumière issus des différents points de l'objet observé se mélangent et l'objet paraît flou. La première solution, afin de retrouver une certaine netteté, consiste à ne sélectionner que les rayons issus d'une même direction. C'est le principe de la chambre noire (Fig. 26) : l'observateur se place dans une chambre entièrement noire et perce un trou (sténopé) dans l'une des faces. Si la taille du trou est importante, l'image projetée sur le mur opposé sera entièrement blanche, du fait des interférences destructives entre les rayons

⁴¹⁵ Il s'agit donc là aussi d'une approche structurale de l'objet.

⁴¹⁶ Entrée « lunette », du Centre National de Ressource Textuelles et Lexicales.

[En ligne] URL : <https://www.cnrtl.fr/etymologie/lunette>.

⁴¹⁷ « Focaliser » et « foyer » dérivent d'ailleurs tous deux de la même racine latine, *focus*.

issus des différents points de l'objet que l'on souhaite observer. Mais en diminuant la taille de l'ouverture, on en vient à ne sélectionner que certaines directions privilégiées (celles qui passent exactement par le trou) et on est alors en mesure de reconstituer l'objet source.

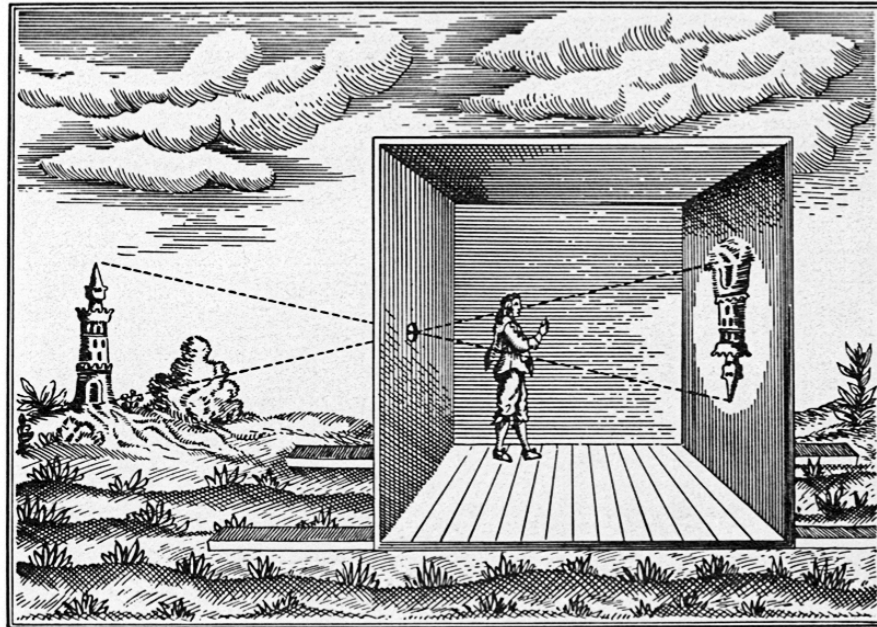


Figure 26 – Illustration du principe de la chambre noire.

(Source : Athanasius Kircher, *Ars Magna lucis et umbra*, 1646)

Ce principe a donné naissance dans le monde animal à l'œil à trou d'épingle (*pinhole eye*) du nautille par exemple, et, dans le monde des techniques, au tube d'observation dont nous avons parlé dans l'introduction. Si maintenant plusieurs trous sont percés dans la chambre noire, et que des dispositifs (lentilles ou miroirs) sont utilisés pour regrouper les rayons issus d'un même point de l'objet vers un même point du mur, l'image obtenue sera plus nette et surtout bien plus lumineuse. Si les trous sont continus, il faut recourir à un dispositif unique et continu pour focaliser les rayons utiles. À ce jour, il n'existe que deux principes physiques permettant de focaliser des photons : il s'agit des phénomènes de réfraction et de réflexion lumineuses. Ces deux phénomènes sont des cas particuliers des phénomènes de réfraction et de réflexion ondulatoires qui se produisent à l'interface entre deux milieux pour lesquels les vitesses de phase de l'onde considérée (onde lumineuse, onde acoustique, onde mécanique...) sont différentes.

L'optique est la discipline qui étudie les ondes électromagnétiques ; dans le cas de l'optique géométrique, la propagation de l'onde est modélisée par le trajet de rayons lumineux⁴¹⁸. Le phénomène de réfraction se produit au niveau du dioptré, surface séparant deux milieux d'indices de réfraction différents, tandis que le phénomène de réflexion est réduit à la réflexion spéculaire (la réflexion diffuse est négligée). Cette première approximation aboutit aux célèbres lois de Snell-Descartes⁴¹⁹, qui stipulent (en notant n_1 et n_2 les indices de réfraction et θ_1 et θ_2 les angles) :

- Pour la réflexion : $\theta_1 = -\theta_2$
- Pour la réfraction : $n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2)$

Le principe de réflexion lumineuse a donné naissance dans le monde animal à l'œil miroir (*concave reflector eye*) de la coquille Saint-Jacques notamment, et, dans le monde des techniques, aux différents types de miroir. Quant au principe de réfraction, il est à la base de l'œil des vertébrés⁴²⁰ (*spherical lense* ou *corneal refraction eye*) aussi bien que des lentilles optiques.

Le principe de la chambre noire est basé sur la *sélectivité* tandis que les dispositifs focalisateurs à base de miroirs ou de lentilles apportent une *amplification* du signal incident. Cela tient au fait que dans le premier cas, une seule direction est sélectionnée alors que dans le second, plusieurs sont regroupées, ce qui conduit à davantage d'intensité et plus de netteté. Voilà pourquoi le tube d'observation constitue un précurseur, mais non un ancêtre direct, des lignées de télescopes actuelles que sont :

- La lignée des télescopes *réfracteurs*, ou dioptriques, pour lesquels la focalisation de la lumière est réalisée par réfraction à travers un ensemble de lentilles.
- La lignée des télescopes *réflecteurs*, ou catoptriques, pour lesquels la focalisation de la lumière est réalisée par réflexion sur des miroirs.
- La lignée des télescopes *catadioptriques*, hybridation des deux lignées précédentes.

⁴¹⁸ Pour plus de détails, voir Agnès Maurel, *Optique géométrique : cours*, Paris, Belin, 2002.

⁴¹⁹ Des noms de Willebrord Snell (1621) et René Descartes (1637), qui ont, chacun de son côté, découvert ces lois au XVII^e siècle (on notera que Thomas Harriot est suspecté de les avoir découvertes, sans toutefois les publier, dès 1601).

⁴²⁰ Chez l'être humain, c'est le dioptré oculaire qui permet de focaliser les différents rayons issus d'un même point de l'objet en un même point de la rétine, et d'ainsi fournir une image nette de l'objet ; on parle alors de « stigmatisme ».

Certains auteurs vont même plus loin et considèrent qu'un « télescope astronomique moderne est simplement un appareil photo avec une ouverture et une longueur focale énormes⁴²¹ ». Vue sous cet angle, « l'utilisation du télescope dans ce mode de base était connue sous la forme de la chambre noire⁴²² ». Ce point de vue nous semble cependant trop radical. Il nie à la fois la réalité technique historique du développement du télescope, antérieur de plusieurs siècles aux dispositifs photographiques, et sa réalité fonctionnelle actuelle, un télescope pouvant servir à d'autres choses que la photographie (photométrie, spectroscopie...). En résumé, le télescope est un dispositif technique dont l'opération est de focaliser la lumière. Il appartient à la classe technique des instruments permettant l'observation à distance et met en jeu les principes de fonctionnement de réfraction et/ou de réflexion. S'incarnant en différentes structures au gré du processus de concrétisation, il se déploie en outre selon plusieurs gammes d'énergie qui sont autant de genres.

3. Première caractérisation du télescope

3.1. Quelques notions d'optique⁴²³

L'optique est la discipline qui étudie les ondes électromagnétiques, dont la lumière visible ne constitue qu'un cas très particulier. Historiquement, c'est le modèle du rayon lumineux, pierre angulaire de l'optique géométrique, qui a guidé le développement de l'optique et de ses sous-disciplines que sont la dioptrique et la catoptrique. Euclide, Héron d'Alexandrie et Ptolémée sont les premiers à avoir élaboré une théorie optique, dont un des postulats est que la lumière se propage en ligne droite. Rétrospectivement, les travaux de ces penseurs s'apparentent à une conception mécaniste de la lumière. Cette école de pensée atteint son apogée avec la théorie corpusculaire de Newton (*Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, 1704) s'opposant aux travaux de Christiaan Huygens (*Traité de la lumière*, 1690) pour qui, au contraire, la lumière était de nature ondulatoire. Si le XVIII^e siècle a vu s'affronter ces deux théories, les travaux de Thomas Young et d'Augustin Fresnel au début du XIX^e siècle ont semblé trancher définitivement

⁴²¹ Raymond Wilson, *op. cit.*, p. 21 : « A modern astronomical telescope is simply a photographic camera with huge aperture and focal length. »

⁴²² *Ibid.* : « The use of the telescope in this basic mode was known in the form of the camera obscura. »

⁴²³ Les notions abordées dans ce paragraphe sont traitées plus en détail dans Frank L. Pedrotti, Leno M. Pedrotti et Leno S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, Cambridge, Cambridge University Press, 2018 (3^e édition).

en faveur de la théorie ondulatoire⁴²⁴. Suite notamment aux travaux d'Einstein⁴²⁵ au début du XX^e siècle, la théorie quantique de la lumière a permis une réinterprétation de la « dualité onde-corpuscule », et s'est finalement imposée comme *la* théorie permettant de décrire la lumière.

L'optique géométrique, l'optique ondulatoire et l'optique quantique peuvent se réinterpréter comme trois niveaux d'approximation, de plus en plus fins, dans l'étude des ondes électromagnétiques⁴²⁶. L'optique géométrique n'est plus valide dès lors que la taille des objets en interaction avec la lumière est de l'ordre de sa longueur d'onde. Il faut alors recourir à l'optique ondulatoire, elle-même supplantée par l'optique quantique lorsque le nombre de photons devient trop faible. Dans un premier temps, nous nous restreindrons à l'optique géométrique pour décrire le fonctionnement interne du télescope. À plusieurs reprises nous avons employé le terme « focalisation », qui renvoie directement au concept de foyer. En optique géométrique, un foyer est un point vers lequel convergent les rayons lumineux issus d'un point particulier. Le concept de foyer nécessite d'avoir un système stigmatique, au moins de manière approchée, c'est-à-dire un système qui fait converger l'ensemble des rayons issus d'un même point en entrée du système vers un même point en sortie. En optique géométrique, dans le cas d'un système centré (c'est-à-dire possédant un axe de symétrie de révolution), il existe deux foyers principaux : le foyer objet et le foyer image.

- Les rayons issus du foyer objet sont focalisés à l'infini en sortie du système.
- Les rayons en provenance de l'infini en entrée du système sont focalisés au foyer image.

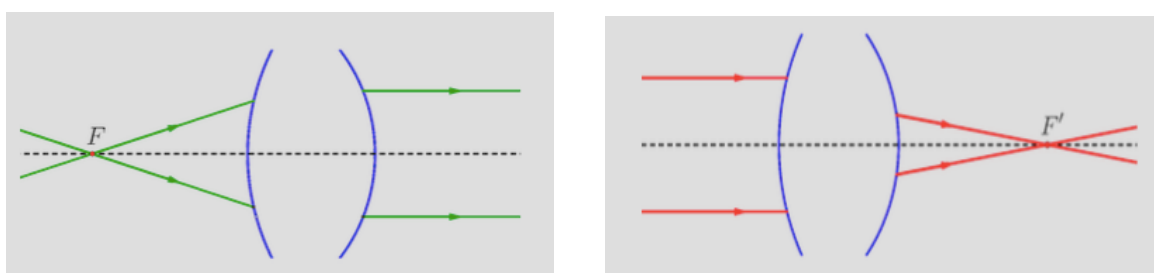


Figure 27 – Construction des foyers objet (à gauche) et image (à droite) pour un système optique convergent.

⁴²⁴ Ces affrontements résultent, en partie, de ce que Willard Van Orman Quine a appelé la « sous-détermination des théories par l'expérience ».

⁴²⁵ Prix Nobel de physique 1921, « notamment pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique » faisant appel, pour la première fois, à la notion de photon.

⁴²⁶ Gaston Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 1969 (3^e édition), p. 218 : « L'approximation peut recevoir un rythme qui nous permet de juger de l'amélioration de la connaissance qui la suit. »

Un système optique sera dit « convergent » si le foyer objet est situé avant le foyer image ; il sera dit « divergent » dans le cas inverse (Fig. 27). Notons qu'à ce stade, la nature du système optique (dioptrique ou catoptrique) n'est pas signalée. Un système optique convergent peut être réalisé aussi bien avec des lentilles convexes qu'avec des miroirs concaves, tout comme un système optique divergent peut être construit avec des lentilles concaves ou des miroirs convexes. Comme un écho aux considérations simondoniennes, ces schémas illustrent l'ambiguïté qui résulte d'une définition structurale des objets techniques, des éléments totalement différents pouvant réaliser les mêmes fonctions.

Si nous nous en tenons à son essence technique, un télescope est un instrument qui focalise un rayonnement électromagnétique et, pour ce faire, il utilise les phénomènes de réflexion et de réfraction lumineuses pour manipuler la lumière issue de sources lointaines. Tout comme l'œil, le télescope possède trois fonctions distinctes et complémentaires : il agit à la fois comme collecteur de lumière, comme instrument grossissant et comme dispositif séparateur. Les performances de ces différentes fonctions peuvent être mesurées à travers les caractéristiques que sont la sensibilité, le grossissement et la résolution :

- La *sensibilité*, aussi appelé clarté, puissance ou pouvoir de collecte, mesure la capacité du télescope à détecter des sources peu lumineuses, et donc lointaines. Elle est directement proportionnelle à la surface collectrice du télescope D^2 .
- Le *grossissement*, aussi appelé grandissement ou magnification, désigne le rapport entre l'angle sous-tendu par l'image de sortie et l'angle sous-tendu par l'objet d'entrée (aussi égal au rapport entre la distance focale de l'objectif et celle de l'oculaire).
- Le *pouvoir de résolution*, ou tout simplement la résolution, traduit la capacité du télescope à résoudre des détails fins, et se mesure par l'angle minimal qu'est capable de résoudre, théoriquement, le télescope. Le calcul du pouvoir de résolution sera donné au paragraphe 3.4.

Il est intéressant de noter que ces différentes caractéristiques peuvent entrer en contradiction. Dépasser un certain grossissement entraîne une diminution de la performance globale du télescope, car à la réduction du champ de vue s'ajoute une baisse de la luminosité et du contraste. De même, une résolution trop fine joue sur la sensibilité du télescope dans la mesure où la zone émettrice de photons observée est plus restreinte. La raison d'être du télescope étant d'effectuer un changement d'échelle dans les observations, c'est la résolution angulaire qui est, en définitive, le critère décisif. Celle-ci est déterminée par trois facteurs principaux que

sont les aberrations du système optique, la diffraction de l'ouverture et la turbulence atmosphérique.

3.2. Les aberrations géométriques et chromatiques

En optique, on appelle « aberrations » les imperfections des images produites par le système optique, autres que la diffraction. Il convient de distinguer les aberrations géométriques, dues au fait que les systèmes optiques réels ne sont jamais rigoureusement stigmatiques⁴²⁷, et les aberrations d'origine physique, liées à la nature de la lumière. On parle de « stigmatisme approché » lorsque le système optique fonctionne dans les conditions de Gauss. Pour cela, il faut que les angles d'incidence des rayons par rapport à l'axe optique du système soient faibles et que le point d'incidence soit proche de l'axe optique (rayons paraxiaux).

Un système optique idéal est dénué d'aberration ; en optique géométrique, les aberrations géométriques décrivent la différence, géométrique, entre une image réelle et l'image idéale correspondante. Lorsqu'on travaille dans les conditions de Gauss, il est possible d'appliquer l'approximation de Gauss, aussi appelée « approximation des petits angles ». Il s'agit de l'approximation linéaire de l'optique géométrique qui consiste, dans les formules optiques, à réaliser un développement limité à l'ordre 1 et donc à remplacer les sinus par les angles correspondants⁴²⁸. Dans la pratique, les conditions sont rarement remplies et les images projetées par des systèmes non corrigés sont généralement mal définies, voire complètement floues si l'ouverture ou le champ de vision dépassent certaines limites. Les travaux d'Ernst Abbe ont montré que ces aberrations géométriques ne sont pas *des effets secondaires*, liés à l'imperfection des systèmes optiques, mais qu'elles sont intrinsèques au fait de recourir à la réflexion ou à la réfraction. La théorie gaussienne ne fournit donc qu'une méthode commode d'approximation et les systèmes optiques présenteront toujours des aberrations.

Les aberrations géométriques sont classées en deux grandes familles, selon l'abandon d'une des deux hypothèses de Gauss :

⁴²⁷ On dit d'un système optique qu'il fonctionne dans des conditions de stigmatisme rigoureux lorsque tout rayon issu d'un point A converge en un point unique A' en sortie du système. Le seul système optique rigoureusement stigmatique est le miroir plan.

⁴²⁸ En notant α l'angle en question, l'erreur commise est alors de l'ordre de $\alpha^2/2$.

- Les défauts d'ouverture surviennent lorsque l'instrument reçoit des faisceaux de large ouverture angulaire, mais dont le rayon moyen est confondu avec l'axe ou très peu incliné sur l'axe.
- Les défauts de champ se produisent lorsque l'instrument reçoit des faisceaux de faible ouverture, mais qui peuvent être très inclinés sur l'axe.

Les défauts d'ouverture sont :

- L'aberration de sphéricité. Causée par une focalisation plus importante des rayons marginaux par rapport aux rayons paraxiaux, elle entraîne une image déformée : l'image d'une source ponctuelle est moins nette, même si elle se trouve dans l'axe optique.
- La coma. Causée par les rayons non parallèles à l'axe optique, elle rend compte de l'aberration sphérique hors axe, et tend à allonger l'image, la dotant d'une sorte de queue (à l'instar d'une comète, *coma* en latin).

Si les défauts d'ouverture sont négligeables, les aberrations de champ apparaissent pour un objet très éloigné de l'axe :

- L'astigmatisme, causé par l'imperfection de symétrie des systèmes optiques réels (la distance focale de l'objectif n'est pas constante autour de l'axe optique), entraîne une différence de focalisation suivant le plan tangentiel ou méridional considéré.
- La courbure de champ est l'analogue de l'aberration sphérique en 2D. Considérant non plus une source ponctuelle mais une source plane, les rayons au bord convergent plus fortement, entraînant la formation d'une image courbée.
- La distorsion, causée par la variation du grandissement transversal en fonction de la distance à l'axe dans la combinaison optique, fait que deux points objets situés à des distances différentes de l'axe optique traversent le système optique en des endroits différents et sont donc focalisés en des points différents.

Présentées ainsi, les aberrations géométriques résultent d'un « compromis entre qualité d'image et champ [qui] se traduit par le fait que l'image d'un point géométrique de la source n'est pas un point⁴²⁹ ». Si l'on s'en tient aux objets proches de l'axe, le télescope aura une bonne qualité d'image mais un faible champ ; s'il est capable de développer un champ de vue important, la qualité des

⁴²⁹ Pierre Léna et Daniel Rouan, *L'Observation en astrophysique*, Paris, CNRS éditions, 2008 (3^e édition), p. 190.

images s'en ressentira. Cette notion de compromis renvoie directement à la notion de contradiction de la TRIZ.

Historiquement, les aberrations géométriques ont été étudiées et classifiées par le mathématicien allemand Ludwig von Seidel, et on parle d'ailleurs d'« aberrations de Seidel ». À ces cinq aberrations principales s'ajoutent :

- Le piston, qui représente le décalage en hauteur par rapport à la référence.
- Les tilts, selon les directions arbitraires X et Y, qui représentent un désaxage.
- La défocalisation, qui fait que l'image se forme en aval ou en amont de la position considérée.

Dans la mesure où ces trois dernières aberrations peuvent être corrigées simplement par un meilleur positionnement du plan image vis-à-vis du plan foyer, elles ne font pas à proprement parler partie des aberrations. Là encore il faut bien garder à l'esprit qu'il ne s'agit que d'une approximation. Bien que supérieure à l'approximation de Gauss, l'approximation du troisième ordre⁴³⁰ que nous venons de présenter peut-être complétée par des approximations d'ordre supérieur. Cependant, en pratique, celle-ci est suffisante pour garantir la qualité des images en sortie du télescope :

Snell's laws of refraction reduce to a linear law in the Gaussian region. This gives, then, the theory of centered systems to the first order. If the next term is considered, we have third order theory. This is concerned with the lowest terms which affect the quality of the image, whereas Gaussian optics is only concerned with its positions and size. The aberrations affecting image quality are generally most important in the third order approximation, so the aberration theory of telescopes is mainly concerned with this approximation. The theory of higher order aberration is extremely complex. It has not played any appreciable role in the telescope development, since the exact total effect of all orders can be easily calculated by ray tracing using modern computers. But this in no way reduces the value of third order theory which remains essential for a correct understanding of the properties of different telescope forms⁴³¹.

⁴³⁰ On parle d'« aberration du troisième ordre » car le développement limité de la fonction sinus (fonction impaire ne présentant que des exposants impairs) commence par $\sin x = x - x^3/3 + x^5/5 - \dots$. S'arrêter à l'ordre 1 conduit à l'approximation de Gauss (approximation du premier ordre), quand la prise en compte des termes en x^3 conduit à l'approximation de Seidel (approximation du troisième ordre).

⁴³¹ Raymond Wilson, *op. cit.*, p. 55. Pour un traitement plus complet des aberrations des télescopes, voir Raymond Wilson, *op. cit.*, « Aberration theory of telescopes », p. 57-140.

En optique moderne, ces aberrations sont interprétées comme les différents degrés d'un polynôme de Zernike : la surface idéale d'un front d'onde plan passé au travers d'un instrument convergent est une sphère centrée sur le point focal mais, à cause des aberrations, cette sphère n'est pas parfaite (Fig. 28).

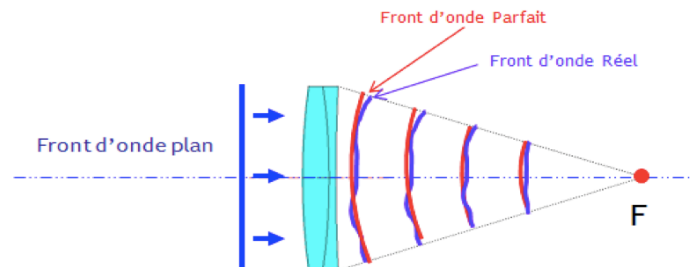


Figure 28 – Illustration de la déformation d'un front d'onde plan à travers un système optique.

(Source : AiryLab. [URL : <http://airylab.fr/services-pour-les-entreprises-et-la-recherche/introduction-a-loptipedia/polynome-de-zernike/>])

Développé dans les années 1930, le modèle de Fritz Zernike fait correspondre à chaque coefficient du développement du polynôme modélisateur de la courbe-surface un type d'aberration. La puissance et l'ordre de ces coefficients mesurent en quelque sorte l'écart du système optique aux conditions idéales, ce qui permet de hiérarchiser les aberrations. Ces coefficients de Zernike étant linéairement indépendants, il est possible de les isoler et de quantifier indépendamment chacune des aberrations individuelles associées au front d'onde global.

Voici le développement à l'ordre 10 du polynôme de Zernike⁴³²:

$$Z(r,\theta) = Z_0 + Z_1.r.\cos(\theta) + Z_2.r.\sin(\theta) + Z_3(2r^2-1) + Z_4.r^2.\cos(2\theta) + Z_5.r^2.\sin(2\theta) + Z_6.(3r^2-2).r.\cos(\theta) + Z_7.(3r^2-2).r.\sin(\theta) + Z_8.r^3.\cos(3\theta) + Z_9.r^3.\sin(3\theta) + Z_{10}.(6r^4-6r^2+1) + \dots$$

Où r représente la distance à l'axe optique et les Z_n sont les coefficients de Zernike qui pondèrent chacun des termes, l'ensemble étant exprimé en coordonnées polaires (r,θ) . On réinterprète les différentes aberrations géométriques comme les coefficients d'un tel polynôme :

- Z_0 : Piston
- Z_1 et Z_2 : Tilts
- Z_3 : Défocalisation

⁴³² Le polynôme est la somme d'un nombre infini de termes ; en pratique, il est nécessaire de s'arrêter à un certain ordre.

- Z_4 et Z_5 : Astigmatisme
- Z_6 et Z_7 : Coma
- Z_8 et Z_9 : Tréfoil
- Z_{10} : Aberration de sphéricité

Contrairement aux pistons, tilts et défocalisation, la courbure de champ n'est pas une aberration optique, en ce nouveau sens, car elle ne rentre pas dans le polynôme de Zernike : elle concerne le positionnement relatif des points qui composent l'ensemble du champ de l'instrument et n'est donc pas intrinsèque au système optique. Le passage de considérations qualitatives sur les aberrations optiques à leur mathématisation via les polynômes de Zernike vient illustrer le fait que les instruments scientifiques hautement technicisés, comme les télescopes, progressent conjointement aux progrès scientifiques – et mathématiques. Une plus grande rationalisation dans le fonctionnement de l'objet technique permet une meilleure compréhension du schème technique et de meilleures performances. C'est notamment la modélisation des aberrations par ces polynômes qui sera employée dans le développement de l'optique active, permettant une redynamisation de la lignée des réflecteurs, comme nous le verrons par la suite.

Aux aberrations géométriques il faut ajouter celles, négligées jusqu'à présent, qui découlent de la nature physique de la lumière, dont font partie notamment les aberrations chromatiques. Celles-ci ne se produisent que pour des sources polychromatiques – comme c'est le cas des sources étudiées en astronomie. Les aberrations chromatiques sont dues à la variation de l'indice de réfraction du verre composant les lentilles, qui dépend de la longueur d'onde de la lumière qui les traverse⁴³³. Toutes les couleurs du spectre ne sont pas déviées avec la même intensité et sont donc focalisées à des distances différentes (Fig. 29). Si, par exemple, la mise au point est effectuée pour le rouge, le bleu est flou, et inversement : on note alors la présence d'irisations qui viennent nuire à la qualité de l'image en sortie du système optique.

⁴³³ Principe à la base de la décomposition (dispersion) de la lumière par un prisme.

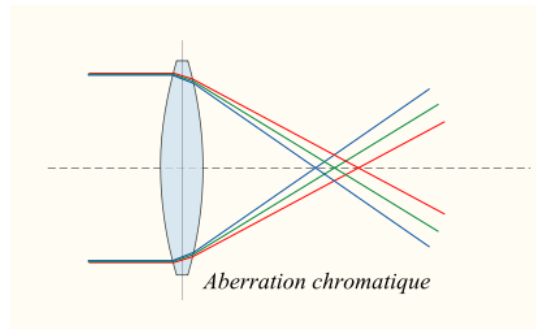


Figure 29 – Illustration du phénomène d'aberration chromatique.
 La déviation diminue lorsque la longueur d'onde augmente (le rouge est moins dévié que le bleu).
 (Source : Wikipédia. © Éric Bajart)

Il est important de noter que les aberrations chromatiques ne concernent que les télescopes réfracteurs : les télescopes réflecteurs ayant recours à des miroirs, la lumière n'est pas impactée par l'éventuelle traversée d'un matériau réfringent. En revanche, tout comme les optiques à base de lentilles, celles à base de miroirs doivent être d'une qualité suffisamment élevée pour que la réflexion à la surface ne se traduise pas par une trop grande perte d'informations. Le critère retenu s'exprime en « $\lambda/$ », c'est-à-dire que la taille maximale des défauts de surface du miroir ne doit pas excéder une certaine fraction de la longueur d'onde étudiée⁴³⁴. Il s'agira soit de « l'écart P-V » (*Peak-to-Valley*), soit de l'écart RMS (*Root Mean Square*). La précision minimale acceptable est de $\lambda/10$. Au passage, notons que, à défaut égal, les erreurs par réflexion dues à la qualité des optiques sont quatre fois plus importantes que celles par transmission : si les systèmes optiques à base de lentilles possèdent l'inconvénient de présenter des aberrations chromatiques, ils sont en revanche plus facile à usiner (à précision égale). Ces critères expliquent que plus les longueurs d'onde sont faibles, plus les miroirs doivent être de bonne qualité, et inversement, plus les longueurs d'onde sont importantes, moins la qualité des miroirs est déterminante. À titre d'illustration, pour l'astronomie visible, les défauts acceptables sont de l'ordre de la dizaine de micromètres, alors que les radiotélescopes peuvent tolérer des défauts de l'ordre de la dizaine de centimètres (d'où le recours à des grilles, moins coûteuses que des miroirs traditionnels). Cette exigence de qualité pour les miroirs provient là encore de la nature ondulatoire de la lumière : si les défauts sont de l'ordre de la longueur d'onde étudiée, il risque d'y avoir diffraction à la surface du miroir, laquelle entraîne une profonde diminution de la qualité des images formées.

⁴³⁴ Par exemple, les miroirs de 8,20 mètres des télescopes Keck présentent un polissage de surface précis à 12 nanomètres, soit, en prenant une longueur d'onde de 480 nanomètre (violet/bleu), une erreur de « $\lambda/40$ ».

3.3. La limite de diffraction

Le phénomène de diffraction se produit aussi sur les bords de l'objectif du télescope. En optique ondulatoire, l'image d'une source ponctuelle n'est plus un point image ponctuel comme en optique géométrique mais une figure de diffraction (Fig. 26). Cette figure de diffraction, ou tache d'Airy, est donnée par la formule : $E(x) = E_0 [2 \cdot J_1(\pi \cdot x) / \pi \cdot x]$, avec :

- $x = D \cdot \sin(\theta) / \lambda$.
- E_0 , l'éclairement au centre de la figure.
- J_1 , la fonction de Bessel de première espèce du premier ordre.
- D , le diamètre de l'ouverture.
- θ , l'angle entre l'axe optique et la direction de la source.
- λ , la longueur d'onde de travail.

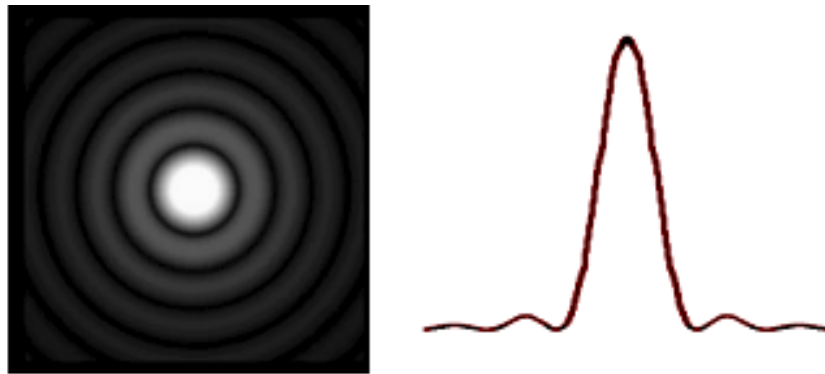


Figure 30 – Figure de diffraction (tache d'Airy) et intensité lumineuse selon un axe donné.

Il faut alors donner un nouveau sens à la résolution angulaire, car il ne s'agit plus de séparer deux points mais deux taches d'Airy, et pour se faire, il faut se munir d'un critère permettant de dire à partir de quel moment les deux taches sont effectivement résolues. Le critère le plus communément utilisé est le critère de Rayleigh : on considère que les taches de diffraction sont distinctes (et donc, les objets résolus) lorsque le maximum de l'une correspond au premier minimum de l'autre (Fig. 31).

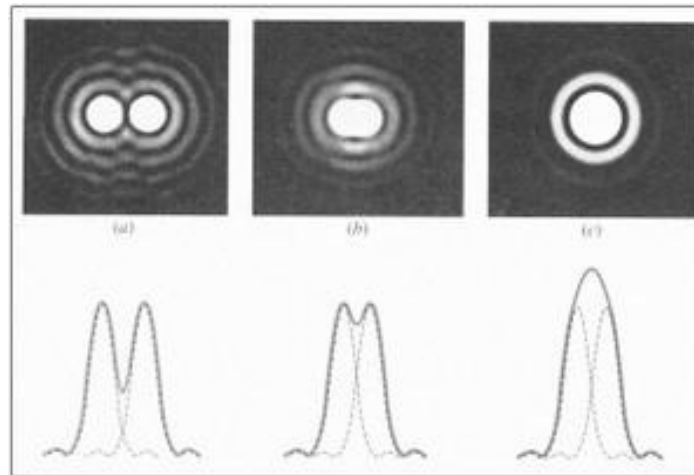


Figure 31 – Illustration du critère de Rayleigh.

Dans le cas d'une optique parfaite ayant un rapport de Strehl⁴³⁵ égal à 1, 83 % de la lumière transmise est concentrée dans le premier pic tandis que le premier minimum a lieu pour $x = 1,22^{436}$, soit $\sin(\theta) = 1,22 \lambda / D$. Selon le critère de Rayleigh, le pouvoir de résolution d'un télescope de diamètre D est donc donné par : $p = 1,22 \lambda / D$.

Cette formule est fondamentale pour l'astronomie observationnelle et extrêmement féconde d'un point de vue technologique. En effet, elle lie les potentialités scientifiques (pouvoir de séparation p) aux caractéristiques techniques (D) et au domaine d'observation (λ). Un télescope dont la résolution effective est donnée par cette formule sera dit « à la limite de diffraction ». « Limite », car il s'agit de la résolution théorique maximale que pourra atteindre un télescope dénué d'aberrations et fonctionnant dans des conditions optimales. Cependant, avant d'être à la limite de diffraction, le télescope doit s'affranchir des effets perturbatifs dus à l'atmosphère : on parle de « limite de visibilité ».

3.4. La limite de visibilité

L'effet de la turbulence atmosphérique (le *seeing*) possède deux composantes principales, l'agitation et la scintillation atmosphériques (Fig. 32). L'agitation atmosphérique cause un mouvement apparent de la source, quand la scintillation atmosphérique provoque de brusques

⁴³⁵ Rapport entre la quantité de lumière du disque d'Airy et celle des anneaux secondaires. En pratique, un rapport de Strehl de 0,8 est suffisant.

⁴³⁶ Plus précisément $x = 1,21966989\dots$ (premier zéro de la fonction J_1 divisé par π).

changements de luminosité de la source (expliquant pourquoi les étoiles donnent l'impression de clignoter). Ces deux types de turbulences trouvent leur origine dans la structuration en différentes couches de l'atmosphère terrestre, chacune dotée de températures différentes et donc d'indices de réfraction différents, et dans l'existence de mouvements convectifs de différentes fréquences venant exciter différentiellement ces couches. S'ajoute à ces deux principaux effets un étalement de l'image dont résulte une perte de cohérence spatiale du front d'onde en sortie des couches de l'atmosphère⁴³⁷. Ce dernier effet, peu gênant lorsqu'on observe le ciel à l'œil nu, s'avère catastrophique pour les observations scientifiques : il en résulte une perte de résolution de l'ordre de la seconde d'arc !

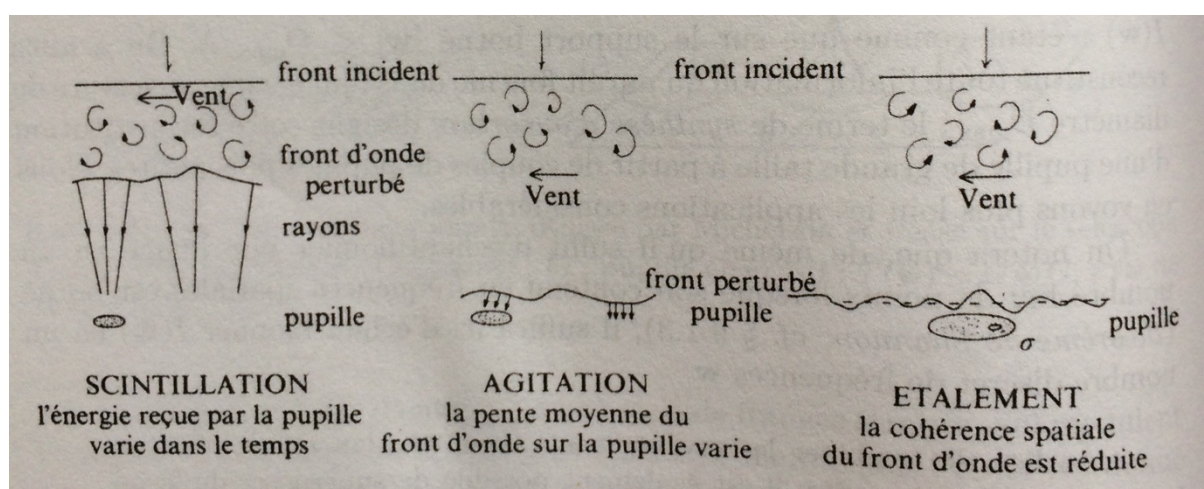


Figure 32 – Illustration des principaux effets de seeing.
(Source : Pierre Léna et Daniel Rouan, *op. cit.*, p. 240)

Pour un télescope optique de grande ouverture, le *seeing* représente la limitation la plus importante pour la résolution angulaire. À titre d'exemple, le télescope Hale de 5 mètres de l'observatoire Palomar possède une résolution angulaire théorique de 0,028 arcsec (à $\lambda = 550$ nm) alors que dans la pratique, celle-ci est de 1 arcsec (soit un facteur 40). Dépasser la limite de *seeing* est une problématique qui n'est apparue que tardivement dans l'histoire de l'astronomie. Si le choix du site a toujours été déterminant dans l'implantation des observatoires, il a fallu attendre les années 1990 pour que deux stratégies se proposent, non plus de simplement *compenser*, mais de *s'affranchir* des perturbations atmosphériques : l'optique adaptative et le recours aux observatoires spatiaux.

⁴³⁷ La cohérence spatiale peut se définir la capacité de chacun des points du front d'onde à interférer avec n'importe quel autre point. Plus la cohérence est faible, moins les observations interférométriques seront possibles.

La diminution des aberrations, géométriques comme chromatiques, permet de s'approcher du système optique idéal. Mais même un système gaussien ne pourra dépasser la limite de visibilité imposée par l'atmosphère. Il faut pour cela imaginer des dispositifs supplémentaires ou des stratégies différentes permettant d'atteindre la limite de diffraction qui, elle, constitue une barrière de performance infranchissable – dans le cadre conceptuel actuel.

4. Genre technique et domaines d'application

4.1. Spectre électromagnétique et observations astronomiques

L'astronomie constitue la science observationnelle par excellence. Mais « si l'observation est presque le seul procédé d'investigation des astronomes, le rayonnement électromagnétique est quasiment le seul messager de ces mondes lointains⁴³⁸ ». Toute observation nécessite un intermédiaire permettant le transport de l'information de la source à l'observateur. Pour ce qui est de l'astronomie, ce rôle est presque entièrement dévolu aux rayonnements électromagnétiques, ou, ce qui revient au même, aux photons. On sépare généralement les rayonnements électromagnétiques en différents domaines de longueur d'onde (λ), de fréquence (ν) et d'énergie (E) donnant naissance aux grandes régions du spectre électromagnétique (Tab. 6).

Tableau 6 : Décomposition du rayonnement électromagnétique en domaines de longueur d'onde, de fréquence et d'énergie.
(©Thomas Guy)

Domaine	Longueur d'onde (m)	Fréquence (Hz)	Énergie (eV)
Gamma	< 0.01 nm	> 10 EHZ	> 100 keV
X	0.01 - 10 nm	30 EHz – 30 PHZ	120 eV - 120 keV
UV	10 nm - 400 nm	30 PHZ – 790 THz	3 eV - 124 eV
Visible	390 nm - 750 nm	790 THz – 405 THz	1.7 eV - 3.3 eV
Infrarouge	750 nm - 1 mm	405 THz – 300 GHz	1.24 meV - 1.7 eV
Micro-onde	1 mm - 1 m	300 GHz – 300 MHz	1.24 μ eV - 1.24 meV
Radio	> 1 m	< 300 MHz	< 1.24 μ eV

⁴³⁸ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 237.

Longueur d'onde, fréquence et énergie sont trois quantités parfaitement équivalentes, étant reliées par les formules $E = h \cdot \nu$ et $\lambda = c/\nu$. Il est néanmoins intéressant de noter que les scientifiques et instrumentalistes travaillant dans les grandes longueurs d'onde s'expriment généralement en hertz, quand ceux travaillant dans les basses longueurs d'onde ont recours à l'énergie. Même si tous travaillent sur le même objet (le rayonnement électromagnétique), la gamme d'énergie de travail vient moduler leurs discours : aux hautes énergies, le lexique particulière (« particules ionisantes ») ; aux basses énergies, le lexique ondulatoire (« micro-ondes », « ondes radio »...). Dans le langage courant, le terme « lumière » désigne généralement la partie visible du spectre électromagnétique. Symptomatiques des ambiguïtés du langage ordinaire, les expressions du type « lumière UV » ou « lumière infrarouge » apparaissent donc comme des oxymores quand « lumière visible » apparaît de son côté comme un pléonasme. De même, le qualificatif « optique », qui désigne généralement un instrument dont la gamme de fonctionnement est située dans le domaine visible, devrait servir à qualifier tout instrument manipulant des photons, quelle que soit leur énergie. Ainsi, il ne faudrait pas parler de « télescope optique » mais de « télescope en lumière visible ». Nous garderons néanmoins l'expression « télescope optique » pour désigner le genre des télescopes fonctionnant du proche infrarouge au proche UV – et incluant, bien sûr, le domaine visible.

La modulation en longueur d'onde du médium d'information conditionne la définition de l'objet technique et son insertion au sein du milieu techno-géographique associé. Défini par les ordres de grandeur de l'énergie des photons porteurs de l'information incidente, le choix d'un domaine de fonctionnement, caractéristique d'un genre technique, rejaillit sur les choix techniques du télescope. En plus du choix des matériaux utilisés, le fait d'opérer dans un certain domaine de longueurs d'onde a un impact sur la structure de l'objet technique. Par exemple, si l'utilisation de réflexions en incidence normale est optimale dans le domaine du visible, leur emploi pour des observations en rayons X serait non avenu : la faible longueur d'onde de ce rayonnement fait qu'il traverse purement et simplement le matériau du miroir ; il faut donc travailler en incidence rasante et imaginer de nouvelles architectures pour l'objet technique. Le domaine de fonctionnement conditionne par conséquent le choix des éléments et la façon dont ceux-ci se combinent au sein de l'objet technique. Il conditionne aussi le milieu géographique de l'objet technique, dimension essentielle du *milieu associé*.

Le choix de la longueur d'onde d'étude a aussi un impact sur les modalités de l'insertion de l'objet technique au sein du milieu géographique. En effet, si l'atmosphère a permis l'émergence et le développement de la vie, en bloquant les rayonnements trop énergétiques notamment, son opacité

vis-à-vis de certaines longueurs d'onde est un problème pour les astronomes, comme le montre la figure 33 :

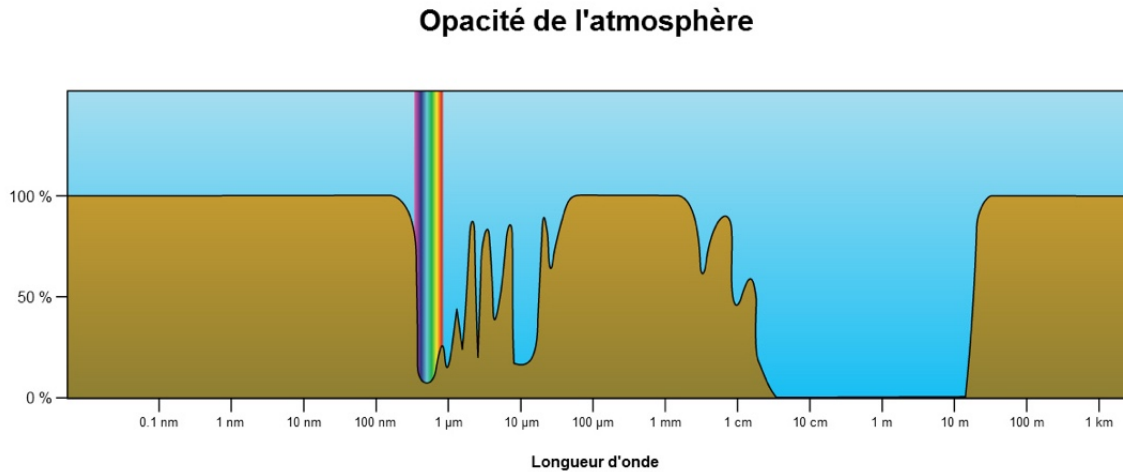


Figure 33 – Opacité de l'atmosphère au rayonnement électromagnétique en fonction de la longueur d'onde.
(© NASA)

Il est à noter que trois grandes plages de longueur d'onde sont totalement coupées :

- Aux faibles longueurs d'onde ($\lambda < 300$ nm), les rayons X et les rayons gamma sont totalement absorbés par les molécules de dihydrogène et d'ozone.
- Aux longueurs d'onde intermédiaires, les infrarouges et les micro-ondes sont absorbés par les molécules d'eau et autres molécules gazeuses.
- Aux grandes longueurs d'onde ($\lambda > 10$ m), les ondes radio sont totalement réfléchies par les couches supérieures de l'ionosphère.

Ainsi, il existe trois fenêtres d'observation :

- La « fenêtre optique » (c'est-à-dire visible), qui présente des turbulences liées aux différentes couches de l'atmosphère.
- La « fenêtre infrarouge », pour certaines fréquences bien choisies de l'infrarouge (notamment aux alentours de $10 \mu\text{m}$).
- La « fenêtre radio » ($1 \text{ cm} < \lambda < 10 \text{ m}$), qui présente l'avantage d'être totalement transparente.

Ces trois fenêtres d'observation correspondent aux domaines de l'astronomie qu'il est possible d'étudier directement depuis la Terre. La figure 34 revient sur l'ouverture des autres fenêtres astronomiques au cours des 100 dernières années.

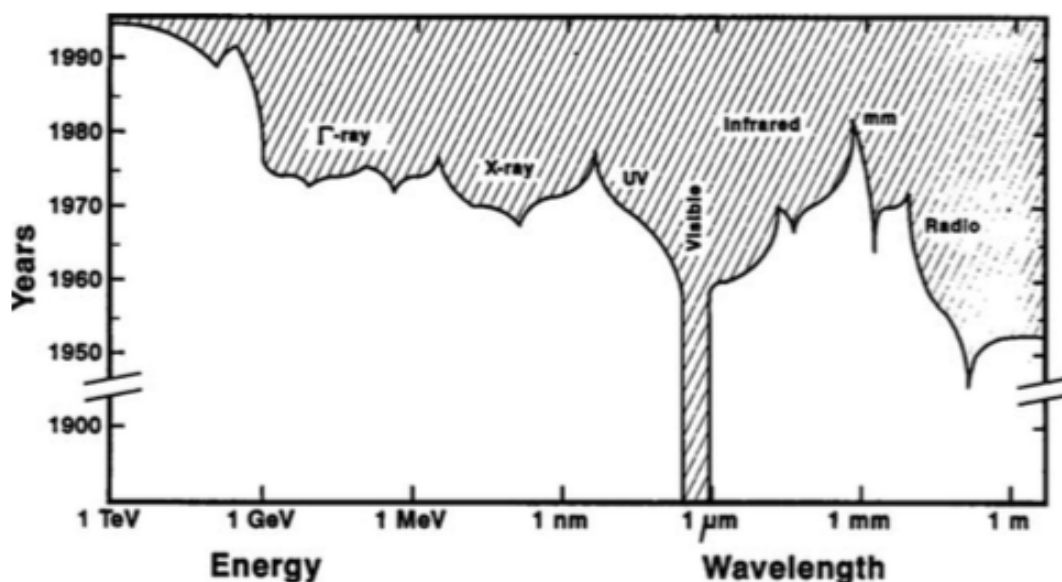


Figure 34 - L'ouverture des fenêtres astronomiques.

(Source : J. Cheng, *op. cit.*, p. 591)

A chaque domaine de longueur d'onde correspond un ensemble de phénomènes observables :

- La radioastronomie permet d'observer les zones de l'univers à « basses températures », que sont l'espace interstellaire, les nuages moléculaires (en particulier d'hydrogène), la formation des planètes, ainsi que des événements extrêmes mais lointains (comme le fond diffus cosmologique).
- L'astronomie IR s'intéresse aux nuages de gaz et de poussières, aux étoiles relativement froides, à la formation planétaire et aux exoplanètes.
- On observe en UV les étoiles dites « bleues » (car chaudes), les nébuleuses planétaires, les rémanents de supernovæ ou les noyaux de galaxie actifs.
- La bande X révèle tous les phénomènes énergétiques tels que les étoiles massives (de type O, de Wolf-Rayet) ou encore les interactions entre deux objets massifs comme une étoile massive et une étoile à neutron par exemple.
- Les objets d'intérêt pour l'astronomie gamma sont les objets *extrêmes* de l'univers : les trous noirs, les supernovæ, les quasars, les sursauts gamma.

Une même source peut être observée par le biais de différentes longueurs d'onde, permettant de mieux caractériser la source en question⁴³⁹ ou conditionnant le type de processus étudiés (Fig. 35). Il existe donc une complémentarité entre les longueurs d'onde messagères et celle-ci s'avère être un outil observationnel puissant⁴⁴⁰.



Figure 35 – Étude multi-longueurs d'onde de la galaxie M51.

Chaque image montre une bande étroite de longueurs d'onde du spectre électromagnétique.

(Source : Digital Library Project, University of Chicago

[URL : <http://ecuip.lib.uchicago.edu/multiwavelength-astronomy/astrophysics/05.html>]).

En résumé, le choix de la longueur d'onde d'étude a un impact sur :

- La limite de résolution du télescope.
- La qualité requise des miroirs.
- La nature des sources et processus étudiés.
- Le choix du milieu associé.

⁴³⁹ Sylvain Chaty, « Multi-wavelength study of High Mass X-ray Binaries », Binary Star Evolution : Mass Loss, Accretion and Mergers, June 2010, Mykonos, Greece.

⁴⁴⁰ Dont l'une des plus récentes et des plus brillantes réalisations concerne la fusion de deux étoiles à neutron ; voir Abbott et al., « Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *The Astrophysical Journal Letters*, n°848, 2017.

Le genre technique, défini par la gamme énergétique de fonctionnement de l'objet technique, apparaît donc comme déterminant dans la définition des objectifs scientifiques de la mission, mais conditionne aussi les performances et l'architecture du télescope ainsi que son insertion au sein du milieu associé. Le fait que certaines longueurs d'onde soient purement et simplement bloquées par l'atmosphère impose le recours à l'astronomie spatiale. C'est le cas de l'astronomie en EUV (*extreme ultraviolet radiation*), en rayons X et en gamma, qui, des premiers ballons ascensionnels jusqu'aux derniers observatoires spatiaux, a toujours cherché à ouvrir de nouvelles fenêtres d'observation en s'émancipant de l'atmosphère. À l'inverse, à l'autre extrémité du spectre, les radiotélescopes possèdent des contraintes plus lâches concernant la détermination du site d'implantation, l'atmosphère et les nuages étant parfaitement transparents pour les ondes radio.

Entre ces deux extrêmes se trouvent les « fenêtres » optiques et infrarouges, pour lesquelles l'opacité de l'atmosphère est quasi nulle et qui, pour certaines longueurs d'onde correspondant aux raies d'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère, est presque totale. Pour ces deux fenêtres, le recours à l'astronomie spatiale constitue la solution la plus prometteuse⁴⁴¹. L'astronomie spatiale permet de s'affranchir totalement des problèmes observationnels liés à l'atmosphère et autorise les télescopes spatiaux à fonctionner à la limite de diffraction tout en permettant de nouvelles observations : « The rationale for developing such expensive and ambitious endeavours is mainly scientific, justified by curiosity and the quest for new discoveries »⁴⁴². Cependant, la taille des miroirs requise étant beaucoup plus importante que pour l'astronomie extrême (EUV, X et gamma), en pratique, elle s'avère complexe à mettre en œuvre en raison de la charge utile limitée des lanceurs. C'est pourquoi, en parallèle, d'autres stratégies ont émergé concernant le choix du site : celui-ci doit ainsi être le plus sec, le moins nuageux, le plus en altitude et le plus isolé possible, raisons pour lesquelles les plateaux désertiques andins ont les faveurs des astronomes actuels.

Les différents domaines du spectre électromagnétique servent généralement à qualifier les différents genres de télescopes. Aux télescopes en lumière visible s'ajoutent les radiotélescopes⁴⁴³, les télescopes millimétriques, les télescopes infrarouges, les télescopes UV, les télescopes à rayons X et les télescopes gamma. Les trois premiers genres permettent d'étudier les basses énergies quand les trois derniers sont dévolus aux hautes énergies. Il y aurait donc sept genres de télescopes,

⁴⁴¹ Voir Minier et al., *Inventing a space mission, op. cit.*, p. 2-5, pour une analyse plus détaillée de l'astronomie spatiale.

⁴⁴² *Ibid.*, p. 2.

⁴⁴³ On trouve parfois le désignatif métonymique « antennes ».

auxquels il faudrait ajouter les télescopes à neutrinos⁴⁴⁴ et les télescopes à ondes gravitationnelles⁴⁴⁵. Le problème de cette classification est qu'elle reste bien trop tributaire de la fonction. Présentés ainsi, ces télescopes *ont pour fonction* d'étudier telle ou telle longueur d'onde. Il faudrait plutôt croiser les lignées techniques avec le genre, c'est-à-dire la gamme d'énergie pour laquelle le dispositif technique a été pensé, car, en réalité, toutes les longueurs d'onde arrivent sur le télescope.

4.2. Les « non-télescopes »

Si l'on se tient à notre définition du télescope comme dispositif focalisateur, en découle un certain nombre de discriminations. Les « télescopes à neutrinos », ainsi que les « télescopes à ondes gravitationnelles », apparaissent alors comme des désignations abusives dans la mesure où l'opération de focalisation n'intervient pas. Les premiers sont à rattacher aux détecteurs de particules quand les derniers s'apparentent aux lignées d'interféromètres. Il serait donc plus judicieux de parler d'« observatoire » – à neutrinos ou à ondes gravitationnelles – étant des ensembles techniques dont la fonction est l'observation à travers un autre fonctionnement (la détection) que celui du télescope (la focalisation).

Le cas de l'astronomie gamma est plus ambiguë. Comme nous avons pu le voir sur la figure 30, les rayons X et les rayons gamma sont totalement absorbés par les molécules de l'atmosphère : aucune observation directe n'est donc possible depuis la Terre. Deux stratégies ont alors émergé. La première est apparue dans les années 1960 avec l'essor de l'astronomie spatiale. Le satellite Explorer 11, qui embarquait un empilement de scintillateurs et de compteurs Cherenkov, en fut un des pionniers. L'intérêt d'envoyer des « télescopes gamma » dans l'espace réside dans la possibilité de s'affranchir de l'absorption de l'atmosphère. En revanche, les instruments sont contraints en taille et volume. Ceci est d'autant plus problématique pour l'astronomie extrême que la très haute énergie des photons en question leur confère un très grand pouvoir de pénétration dans la matière, ce qui empêche leur focalisation à l'aide d'instruments d'optique conventionnels⁴⁴⁶. En réalité, les techniques mobilisées à bord des observatoires gamma sont à rattacher à la physique des particules : scintillateurs, calorimètres et photomultiplicateurs permettent la détection des particules

⁴⁴⁴ Par exemple, ANTARES, *Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch*.

⁴⁴⁵ Par exemple, KAGRA, *Kamioka Gravitational Wave Detector*, anciennement LCGT, *Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope*.

⁴⁴⁶ Raison pour laquelle non ne parlerons plus de *télescope* mais d'*observatoires* à rayon gamma.

secondaires créées lors de l'interaction du photon gamma incident avec le volume de détection⁴⁴⁷. L'autre principe de détection mobilisé à bord des observatoires gamma spatiaux⁴⁴⁸ est le masque codé. Un télescope avec un masque codé fonctionne comme une caméra à sténopé (voir figure 26), dans laquelle un unique petit trou est remplacé par un arrangement spécial de trous plus grands, comme illustré par la figure 36.



Figure 36 - Exemple de masque codé.

(© x-ray-optics.eu)

Chaque trou dans le masque codé produit - comme avec la *camera obscura* - une image dans le plan du détecteur. Comme il y a beaucoup de trous, il y a autant d'images qui se chevauchent dans le plan du détecteur. Le masque est fait d'un matériau très absorbant. Les photons qui viennent frapper le détecteur projettent donc une ombre portée de ce masque. Pour une source donnée, l'ombre créée présente un décalage horizontal sur le détecteur qui permet de remonter à la position de la source dans le ciel.

L'autre stratégie mobilisée par les observatoires gamma se déroule au sol. Lorsqu'un photon de très haute énergie (>50 GeV) frappe l'atmosphère, il y a production d'une cascade de particules

⁴⁴⁷ C'est le cas des observatoire CGRO (*Compton Gamma-Ray Observatory*) lancé en 1991 et qui observe entre 20 keV et 30 MeV, ou bien encore de Fermi (anciennement GLAST, *Gamma-ray Large Area Space Telescope*) lancé en 2008 et qui observe entre 20 MeV et 300 GeV.

⁴⁴⁸ Notamment l'observatoire INTEGRAL (*INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*), lancé en 2002 et dont la gamme d'observation s'étend de 20 keV à 100 MeV.

chargées dont la vitesse est supérieure à celle de la lumière dans l'atmosphère, ce qui provoque un rayonnement dit de Cherenkov (responsable de la couleur bleutée des cuves de réacteurs nucléaires). L'idée est de focaliser cette lumière de Cherenkov vers des photomultiplicateurs qui vont amplifier, détecter et numériser la forme de la gerbe de particules, qui, une fois traitée, permet de remonter aux informations du photon incident (énergie, direction...). Ces observatoires sont qualifiés d'IACT pour *Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope*. Il s'agit de la combinaison astucieuse des principes de focalisation et de détection ; astucieuse car le volume de détection mobilisé par le détecteur est l'atmosphère toute entière. Les IACT sont d'origine récente ; les principaux observatoires en activité sont :

- H.E.S.S. (*High Energy Stereoscopic System*) mis en service en 2002 et composé de quatre télescopes de 12m auquel l'ajout d'un cinquième télescope de 28m en a fait le plus grand observatoire gamma en activité (et renommé pour l'occasion H.E.S.S. II) ;
- MAGIC (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes*) mis en service en 2004 et composé d'un télescope de 17m (puis à partir de 2009 d'un second télescope de 17m) ;
- VERITAS (*Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System*) mis en service en 2007 et composé de quatre télescopes de 12m.



Figure 37 - Les 5 télescopes de l'observatoire H.E.S.S. II.

(© HESS Observatory)

Si les télescopes mentionnés ci-dessus possèdent des ouvertures aussi importantes, c'est parce que les contraintes sur la qualité des surfaces sont moins importantes que pour l'imagerie en

astronomie optique (pour MAGIC par exemple, la surface collectrice est composée de 956 carrés de 50 cm² d'aluminium). Les IACT mobilisent donc dès leur origine les techniques les plus avancées en provenance de l'astronomie optique, que ce soit en termes de segmentation des miroirs ou de fragmentation de l'observatoire en un réseau de télescopes. Le projet majeur en astronomie gamma au sol pour les prochaines décennies reprend d'ailleurs ces principes et en repoussant les limites : le *Cherenkov Telescope Array* (CTA) dont la première lumière doit avoir lieu en 2025, sera composé de 128 télescopes (8 télescopes de 23m, 40 télescopes de 11m5 et 80 télescopes de 4m3) et le spectre observable s'étendra de quelques GeV à plusieurs centaines de TeV⁴⁴⁹. La complémentarité sol/espace n'a pas tant lieu ici sur les performances des observatoires que sur la gamme d'observation : au sol, les très hautes énergies (> GeV), dans l'espace les énergies moindres (100 keV<...< GeV).

4.3. Autres genres de télescopes

Le cas de l'astronomie X (gamme d'énergie comprise entre quelques eV et 100 keV) est lui aussi particulier. Trop énergétiques pour être détectés directement depuis la Terre, mais pas suffisamment pour déclencher des gerbes atmosphériques, les photons de l'astronomie X ne peuvent être traqués qu'à partir de l'environnement spatial. Les premières détections de sources X depuis l'espace remontent à 1948 (il s'agissait de simples compteurs Geiger embarqués à bord de fusées et de ballons-sondes) mais le premier *télescope* à rayon X date de 1978 avec le *High Energy Astrophysical Observatory* (HEAO-2, renommé Einstein après son lancement). En effet, ce dernier est le premier dispositif spatial permettant de fournir une image des sources étudiées, quand le HEAO-1, lancé en 1977, ne permettait que des détections et des mesures.

Si à l'instar du rayonnement gamma le rayonnement X est trop énergétique pour être détecté depuis la Terre, en revanche, son pouvoir de pénétration (capacité des photons à pénétrer profondément dans la matière) est moindre ce qui laisse entrevoir la possibilité d'une focalisation, notamment à l'aide d'optiques réfléchissantes. Néanmoins, afin d'éviter que le rayonnement ne traverse le miroir, la réflexion doit se faire selon un angle d'incidence particulier, que l'on qualifie d'incidence rasante (Fig. 38) :

⁴⁴⁹ Source: <https://www.cta-observatory.org>.

Du fait que l'indice de réfraction est légèrement inférieur à 1, la réflexion spéculaire par un miroir homogène ne peut se faire efficacement que dans les conditions de réflexion totale externe (RTE) pour un angle d'incidence supérieur à l'angle critique, c'est-à-dire en pratique sous incidence rasante⁴⁵⁰.

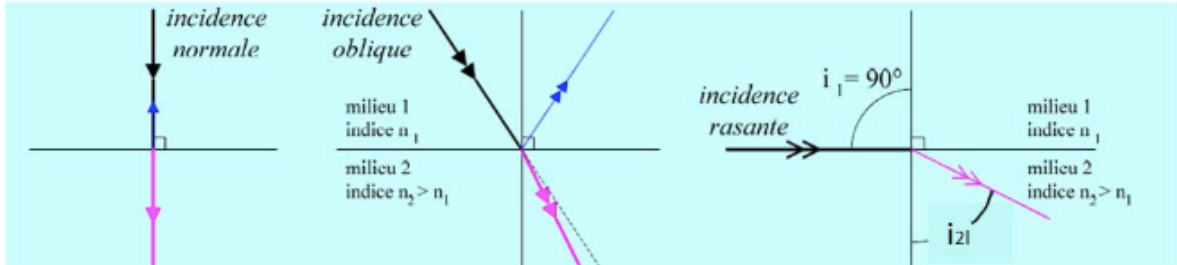


Figure 38 - Incidence normale (à gauche), oblique (au milieu) et rasante (à droite).

(© Jacqueline Villeneuve)

Il existe un certain nombre d'architecture permettant de mobiliser la réflexion en incidence rasante à des fins de focalisation :

- Les architectures selon deux plans (Montel, Kirkpatrick-Baez...);
- Les architectures cylindriques (optiques de Schwarzschild, Wolter type I, type II et type III);
- Les architectures en réseaux (plaques à micro-canaux, *lobster eye-optic* ...).

⁴⁵⁰ Jean-Michel André & Philippe Jonnard, « Instrumentation pour l'optique du rayonnement X », *Photonique*, n°59, 2012, p. 33.

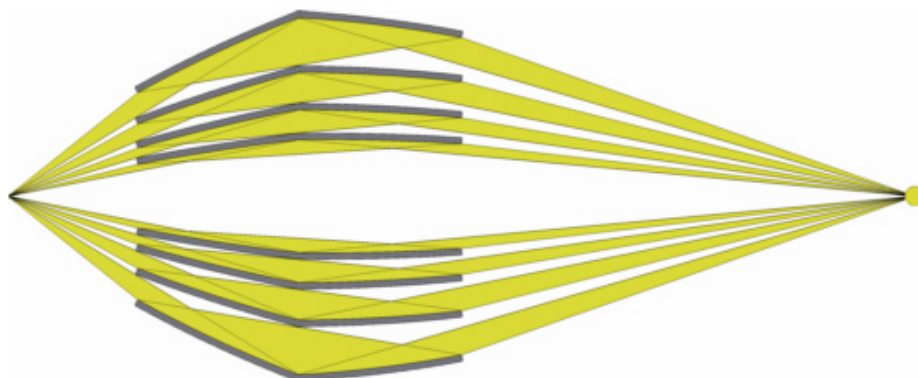


Figure 39 - Trajectoire des rayons lumineux au sein d'un télescope de Wolter type I. Les architectures Wolter (en particulier de type I) mises au point dans les années 1950 sont de loin les plus employées en astronomie X⁴⁵¹.

(© x-ray-optics.eu)

La classification proposée est structurale mais l'opération réalisée est la même (focalisation par réflexion) et ses modalités également (incidence rasante). Les matériaux employés pour les miroirs doivent également répondre à un certain nombre de critères, afin de réfléchir au mieux les rayons X. Notons que d'autres principes peuvent être mobilisés pour l'optique dans le domaine des X⁴⁵² :

- La réfraction, basée sur le recours aux CRL (*Compound Refractive Lenses*) ;
- La diffraction, par des optiques de Bragg, des réseaux ou des lentilles de Fresnel ;
- L'absorption, pas des masques codés ou des sténopés.

Mais la plupart de ces techniques ne mettent pas en jeu une opération de focalisation et, quand bien même c'est le cas, sa mobilisation ne se fait que pour des observations à faible distance. Nous ne rattacherons donc pas ces différentes lignées à celles des télescopes optiques.

Le dernier genre dont il nous faut parler est celui des radiotélescopes, opérant aux grandes longueurs d'onde (>cm) ou, dit autrement, et bien que ce vocabulaire particulière soit bien moins employé, aux photons de très basse énergie (<meV). Mais c'est le vocabulaire hertzien qui est le plus largement utilisé par la communauté radio, le spectre d'étude s'étendant alors de 3 MHz à 300 MHz (en dessous, les ondes radio sont réfléchies par les hautes couches de l'atmosphères et aux

⁴⁵¹ Notamment au sein des observatoires les plus importants tels que XMM-Newton, Chandra, Swift et NuSTAR.

⁴⁵² Pour un état de l'art détaillé, nous renvoyons à Jean-Michel André & Philippe Jonnard, art. cit., p. 33-37.

fréquences plus élevées, la vapeur d'eau atmosphériques fait perdre en transparence)⁴⁵³. Heinrich Hertz et Karl Jansky sont les deux grands fondateurs de la radioastronomie⁴⁵⁴ : le premier ayant découvert les ondes radios (1889), le second, que celles-ci pouvaient provenir de l'espace (1932). La radioastronomie, bien que plus ancienne que ses homologues des hautes énergies, est une discipline relativement jeune comparée à l'astronomie ; son développement ne prit véritablement son essor qu'après la seconde guerre mondiale, les recherches militaires sur les radars ayant largement contribué à ce nouveau champ disciplinaire⁴⁵⁵.

Génériquement, un radiotélescope est la réunion d'un « collecteur », d'un réflecteur secondaire et d'une antenne – bien que de manière abusive, le collecteur soit lui aussi parfois qualifié d'antenne. Parfois le réflecteur secondaire est absent et l'onde radio est directement focalisée vers l'antenne. Le diagramme de fonctionnement du radiotélescope (Fig. 40) est donc identique à celui du télescope optique (Fig. 43), seuls les termes employés changent :

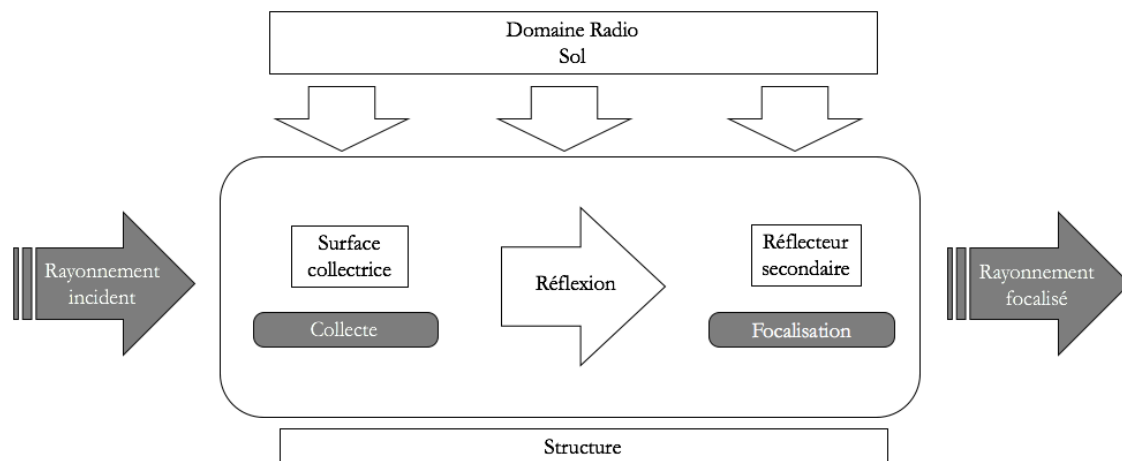


Figure 40 – Diagramme de fonctionnement d'un radiotélescope.

(© Thomas Guy)

Le rayonnement focalisé est ensuite dirigé vers une antenne, dont la théorie fut précisément élaborée par H. Hertz, chargée de convertir le signal électromagnétique incident (l'onde radio) en

⁴⁵³ Le cas des micro-ondes, très étudié en cosmologie - notamment par les observatoires COBE, WMAP puis Planck - est un cas intermédiaire entre les ondes radios et l'astronomie IR. Si l'observatoire Planck par exemple possède un télescope, de type grégorien, de 1m75, ce sont surtout les bolomètres et le système de refroidissement qui assurent la qualité des observations, réalisées entre 30 GHz et 850 GHz.

⁴⁵⁴ Le Hertz, unité de mesure de la fréquence des ondes ($1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$) et le Jansky, unité de mesure de la densité de flux ($1\text{Jy}=10^{-26}\text{W m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) ont d'ailleurs été nommés en leur honneur.

⁴⁵⁵ W. T. Sullivan, *The early years of radio astronomy*, Cambridge, Cambridge university press, 2005.

signal électrique, qu'il sera alors possible d'amplifier, d'enregistrer, de traiter etc. Encore une fois, nous insistons sur la nécessité distinguer les opérations réalisées afin de préciser les individus et les lignées techniques mobilisés. Les radiotélescopes opèrent aux (très) grandes longueurs d'onde. En vertu de la formule donnant le pouvoir de résolution, cela implique de travailler avec de (très) grandes ouvertures. A titre d'exemple, une des longueurs d'onde les plus étudiées en radioastronomie est la raie à 21cm de l'hydrogène⁴⁵⁶ ; un radiotélescope de 100m d'ouverture opérant à cette longueur d'onde aura une résolution spatiale de 7 minutes d'arc, là où l'œil humain possède une résolution d'une minute d'arc. Afin d'obtenir des résolutions plus importantes, les surfaces collectrices doivent donc significativement gagner en taille. Les radiotélescopes sont ainsi caractérisés par des surfaces collectrices de taille parfois gigantesque⁴⁵⁷ et d'autant plus importante que la fréquence de l'onde étudiée est basse. En contrepartie, les exigences portant sur la qualité des optiques réfléchissantes étant bien moins importantes (de l'ordre du centimètre pour la raie de l'hydrogène par exemple), il est d'autant plus facile d'usiner des surfaces de très grandes tailles. Celles-ci sont donc le plus souvent constituées de grilles dont le maillage doit être inférieur à la longueur d'onde étudiée⁴⁵⁸.

Le fait de devoir recourir à d'aussi grands collecteurs a rendu la problématique de la maniabilité bien plus importante que pour les télescopes optiques. De fait, avec un collecteur de 100m de diamètre, le télescope de l'observatoire de Green Bank possède la plus grande « antenne » orientable en activité. Pour obtenir des surfaces collectrices plus importantes, la stratégie consiste à disposer d'un collecteur primaire fixe, parfois enclavé dans une cavité naturelle comme pour Arecibo (Fig. 41) et FAST, parfois plan comme pour le télescope de type Krauss utilisé à Nançay, et d'un collecteur secondaire mobile qui permet d'orienter l'observation vers une portion du ciel particulière. La surface collectrice primaire mobilisée n'est qu'une portion de la surface totale mais elle reste suffisamment importante pour que la stratégie soit rentable. Notons que ces dispositifs s'apparentent fortement aux hypertélieles telles que définies par Simondon dans la mesure où l'accroissement de la taille, motivé par la demande des radioastronomes, en est venu à compromettre la maniabilité du dispositif.

⁴⁵⁶ Élément le plus abondant dans l'univers, l'hydrogène neutre présente une raie d'émission liée à la première transition hyperfine située à 1,42 GHz, soit 21cm.

⁴⁵⁷ Les plus grands collecteurs à surface simple (*single dish*) sont FAST (500m), Arecibo (305m), Nançay (200m) Green Bank (100m) et Effelsberg (100m).

⁴⁵⁸ Thomas L. Wilson, Kristen Rohlf, Susanne Hüttemeister, *Tools of radio astronomy*, Berlin, Springer, 2013 (6ème édition).



Figure 41 – Radiotélescope de l'observatoire d'Arecibo (Porto Rico). Le collecteur primaire sphérique est construit dans l'enceinte d'une dépression naturelle et le receveur secondaire, sur lequel se situent les réflecteurs secondaire et tertiaire ainsi que les antennes receveuses, est suspendu à 150 mètres au dessus.

(© Arecibo Observatory)

Le développement des techniques d'interférométrie dans les années 1950s a permis une rupture d'échelle dans les surfaces collectrices atteignables. L'interférométrie, sur laquelle nous reviendrons plus en détails au chapitre 6, consiste à combiner les signaux de différents radiotélescopes, plus ou moins espacés, afin de simuler un seul collecteur dont le diamètre est égal à l'espacement des antennes les plus éloignées (la plus grande « ligne de base »)⁴⁵⁹. Les observatoires interférométriques sont constitués soit de matrices (*arrays*) d'antennes paraboliques (comme l'*Atacama Large Millimeter Array*), soit directement de matrices d'antennes (comme le futur *Square Kilometer Array*). Les différents éléments de l'interféromètres sont physiquement connectés, généralement par des câbles coaxiaux, des guides d'ondes, ou des fibres optiques. L'interférométrie permet alors de simuler, du moins en ce qui concerne la résolution du radiotélescope équivalent, les performances de très grands collecteurs, d'une surface allant jusqu'à plusieurs kilomètres, comme pour le *Very Large Array* (Fig. 42).

⁴⁵⁹ A. Richard Thompson, James M. Moran, George W. Swenson Jr., *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, Springer, 2017 (3ème édition).



Figure 42 - Quelques radiotélescopes du VLA.

(© NRAO.edu)

Cependant, les progrès en enregistrement de données ont permis de franchir un nouveau palier quant à la résolution atteignable grâce au recours à l'interférométrie à très grande base (VLBI, pour *Very Long Baseline Interferometry*). Grâce à cette technique, les radiotélescopes composants l'interféromètre n'ont même plus besoin d'être reliés physiquement : les signaux captés sont enregistrés très précisément, puis interférés *a posteriori*. Les ouvertures simulables, encore une fois, pour ce qui est de la résolution, peuvent théoriquement atteindre, comme cela est le cas pour l'*Event Horizon Telescope* (EHT), le diamètre de la Terre⁴⁶⁰. Notons que la dénomination de « télescope » pour ce dispositif renvoie à des considérations fonctionnalistes : son principe de fonctionnement en fait davantage un interféromètre. La coexistence de différents schèmes techniques peut nous pousser à le qualifier d'observatoire, mais ce terme désigne habituellement un ensemble technique alors que l'architecture de l'EHT, aussi bien que son insertion dans le milieu technico-géographique en fait réellement un *réseau*, au sens usuel mais aussi et surtout simondonien.

⁴⁶⁰ The Event Horizon Collaboration, « First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation », *The Astrophysical Journal Letters*, n°875, 2019.

Conclusion de chapitre

Les principes à l'origine des télescopes visibles sont mobilisés presque identiquement dans le proche infrarouge et le proche ultraviolet, faisant déborder le télescope visible, ou optique, hors de ses frontières classiques. De plus, si celui-ci constitue le genre le plus ancien, il est aussi le plus contraint par les spécificités du milieu associé et les principes sous-tendant sa construction comme le rappelle Pierre-Yves Bely :

We have limited our treatment to optical telescopes, that is to say, those covering the optical wavelength domain, defined not just as the visible region but also including the adjoining spectral regions: the ultraviolet and the infrared up to about 500um. In the X-ray domain, optical systems are driven only by geometric effects (diffraction is negligible), whereas in the radio domain diffraction is dominant (antenna beam theory applies). But from 100nm to the submillimetric, the laws of geometrics optics (reflection, refraction) apply and diffraction effects are neither negligible nor dominant⁴⁶¹.

Instrument collecteur et focalisateur de lumière, le télescope sert à observer des objets qui échappent aux simples sens de l'Homme. La focalisation, *ancestralement* réalisée par l'élimination de la lumière parasite, s'opère au sein des différentes lignées actuelles par réfraction et/ou par réflexion – bien que le principe de sélectivité subsiste au sein des « télescopes » à maques codés. Si le télescope se décline également aujourd'hui en plusieurs genres, selon la gamme de longueurs d'onde étudiée, le genre visible présente l'intérêt de devoir faire face à des aberrations aussi bien géométriques qu'ondulatoires (chromatisme et diffraction) : son étude mécanologique sera donc, *a priori*, la plus générique. Le bref panorama des autres genres de télescope que nous avons proposé ne prétend pas à l'exhaustivité. L'objectif est de montrer ce que peuvent apporter les outils et concepts de la mécanologie génétique en termes de relecture de l'histoire des dispositifs techniques. Une analyse plus poussée de ces autres genres de « télescopes » (X, Gamma et Radio) aurait été intéressante, et riche en enseignements aussi bien pour l'astronomie que pour l'histoire des techniques. En effet, l'historiographie de ces autres genres de télescopes est moins abondante que celle du télescope optique, et croiser les résultats issus de différents domaines de fonctionnement aurait pu faire émerger de nouveaux résultats. Cependant, essentiellement par manque de temps, nous nous restreindrons par la suite aux lignées de télescopes optiques, choix qui, bien que regrettable en

⁴⁶¹ Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 3-

termes d'exhaustivité, ne sera pas préjudiciable quant à sa généralité. Nous retrouverons certaines des dynamiques évolutives entre-aperçues lors de cette rapide étude des genres X et radio (accroissement de la taille, complexification, intégration forte des détecteurs, recours aux numériques...) lors de l'analyse des lignées de télescopes optiques, objet des deux prochains chapitres.

Chapitre 5

Analyse mécanologique des télescopes optiques

J'en suis arrivé à me construire un Instrument d'une qualité si grande que les choses vues à travers apparaissent presque mille fois plus grandes.

GALILEE, *Le Messager des étoiles*

Maintenant que notre objet d'étude est défini, tâchons de lui appliquer notre méthode d'analyse. Notre étude mécanologique du télescope doit se déployer suivant plusieurs lignes d'analyse : l'analyse structurale doit permettre d'identifier les éléments propres à l'individu technique qu'est le télescope, quand l'analyse opérationnelle doit permettre d'identifier schèmes et essences techniques. Enfin, la « relecture mécanologique » de l'histoire des télescopes doit se coupler à une étude performative afin de parvenir à une analyse génétique permettant de retracer le diagramme des lignées de télescopes optiques. Ce chapitre constitue la mise en œuvre opératoire de notre méthodologie destinée à produire un nouvel éclairage sur le dispositif technique qu'est le télescope⁴⁶².

⁴⁶² Le caractère novateur de cette méthodologie a donné lieu à une publication auprès des historiens des techniques : Thomas Guy et Vincent Bontems, « Relecture mécanologique des lignées de télescopes », *Artefact*, 2019. Voir Annexe B.4.

1. Analyse structurale⁴⁶³

1.1. Les éléments techniques constitutifs du télescope

Les télescopes réfracteurs, tout comme les télescopes réflecteurs, sont nés de la rencontre entre trois éléments techniques : un objectif, un oculaire et un tube optique. Pour tout système optique, l'objectif est défini comme l'élément en entrée, chargé de collecter la lumière et de la focaliser. Dans le cas du télescope, les rayons lumineux étant en provenance de l'infini, cette focalisation se fait au point foyer image et tout se passe comme si les rayons collectés par l'objectif, d'un certain diamètre, étaient concentrés en un unique point. C'est le rôle de l'oculaire que d'agrandir l'image produite au plan focal de l'objectif. Un oculaire est en fait une loupe perfectionnée, chargée de fournir une image à l'infini en sortie du système optique. Le tube optique, quant à lui, permet de maintenir l'alignement de l'objectif et de l'oculaire tout en exerçant une certaine sélection sur la direction des rayons collectés. Si l'oculaire est nécessairement une lentille, l'objectif, porteur de l'opération de focalisation, peut indifféremment être un miroir ou une lentille. Les tubes d'observation sont l'ancêtre structurel du tube optique. Quant aux miroirs et lentilles, leurs propriétés de focalisation sont connues depuis l'Antiquité, notamment dans le but de concentrer les rayons du soleil afin d'enflammer un objet. Par la combinaison ingénieuse de ces trois éléments, une essence technique a été inventée, donnant naissance à une lignée technique. Si le principe technique mis en œuvre par l'objectif est la réfraction (par une lentille), le télescope sera qualifié de réfracteur, et si le principe retenu est la réflexion (sur un miroir), il s'agira d'un télescope réflecteur.

Nous souhaitons insister sur cette notion d'invention. En effet, un large courant en histoire des techniques tend à affirmer que le télescope n'a pas été inventé « in the sense that it was not invented in a single place by one single inventor⁴⁶⁴ ». Albert Van Helden ajoute d'ailleurs : « The telescope was not invented, so to speak, *ex nihilo*⁴⁶⁵ ». Mais le fait que des éléments constitutifs aient préexisté n'infirme pas, à nos yeux, l'invention que constitue leur association au sein d'un même dispositif, quand bien même celui-ci aurait été inventé par plusieurs personnes. En effet, même pour un objet technique aussi novateur que le télescope :

⁴⁶³ Pour plus de détails concernant les télescopes, notamment réflecteurs, nous renvoyons à Jingquan Cheng, *The Principles of Astronomical Telescope Design*, New York, Springer, 2009.

⁴⁶⁴ Albert Van Helden, Sven Dupré, Rob Van Gent et Huib Zuidervaat (éd.), *op. cit.*, p. 5.

⁴⁶⁵ Albert Van Helden, *The Invention of the Telescope, Transactions of the American Philosophical Society*, vol. LXVII, partie 4, 1977, p. 24.

Les techniques anciennes, réactivées, ont ainsi toujours une résonance ; elles conservent leur capacité d'appui pour de nouvelles inventions. Nous sommes donc loin de la table rase... L'invention est nourrie d'héritages constamment relus et réinterprétés⁴⁶⁶.

De même que les très nombreux cas de découvertes scientifiques simultanées n'invalident pas la catégorie de découverte, la multiplicité des inventeurs comme des lieux d'émergence ne disqualifie pas la notion d'invention. L'apparition d'une nouvelle essence technique correspond ici à la première réalisation d'une intention technique originale qui met en relation un fonctionnement, basé sur des principes physiques connus depuis longtemps, et une fonction, elle aussi connue depuis des siècles. La préexistence du principe de fonctionnement et de l'utilité reconnue de la fonction n'enlève rien à l'originalité de l'invention. Nous affirmons même que l'invention du télescope est une triple invention : invention structurelle par la combinaison d'éléments techniques, invention opératoire par l'association des principes de focalisation et de sélection, et invention fonctionnelle par l'usage qui en sera fait en astronomie.

Historiquement, les télescopes sont apparus dans le contexte de la préexistence de la pratique de l'observation à l'œil nu. Cela implique une double contrainte, à la fois sur le genre du télescope (visible) et sur sa fonction (former une image réelle). C'est cette dernière qui impose le recours à un oculaire, afin de rendre l'image formée en sortie de l'objectif propice à son étude par l'œil humain. Dans les grands observatoires modernes, le plan focal image de l'objectif n'est plus occupé par l'oculaire mais par les différents instruments de l'observatoire : spectroscopes, imageurs, photomètres. L'oculaire, qui n'apparaît plus que comme un dispositif annexe dans la phénoménotechnique contemporaine, fait partie de l'essence technique historique du télescope bien que sa présence se soit effacée à mesure de l'évolution des lignées. Les oculaires sont interchangeables, ce qui permet de modifier les caractéristiques de l'instrument, et surtout nous fait dire qu'il s'agit sans aucun doute d'éléments techniques, au sens simondonien du terme. Ils peuvent subsister comme éléments au sein de certains télescopes amateurs (ceux dont le but premier reste l'observation directe) et servent à la mise au point, qui se fait en réglant la distance entre l'objectif et l'oculaire. En faisant coïncider le foyer image du miroir primaire avec le foyer objet de l'oculaire, on obtient un télescope afocal permettant une observation sans accommodation.

⁴⁶⁶ Guillaume Carnino et Jérôme Lamy, « “L'histoire des techniques a longtemps été la discipline la plus simplificatrice.” Entretien avec Liliane Hilaire-Pérez », *Zilsel*, n° 5, 2019, p. 258.

Les télescopes réflecteurs sont historiquement apparus constitués de deux miroirs. Au cours de leur évolution, ce nombre est passé à trois puis quatre, et aujourd'hui, certains grands observatoires en possèdent même cinq. Par « objectif » nous entendons l'ensemble de ces N miroirs. En effet, si la collecte est assurée uniquement par le miroir primaire (M1), c'est l'ensemble des miroirs qui est chargé de la focalisation. Nous aurons l'occasion d'en reparler, mais l'accroissement du nombre de miroirs ne résulte pas d'une nécessité d'ordre mécanologique ; il répond davantage à des problématiques d'encombrement. En effet, afin d'augmenter les performances d'un télescope, il est souhaitable d'augmenter la taille de M1. Mais, ce faisant, on augmente aussi sa distance focale. Augmenter le nombre de miroirs permet de réduire d'autant la taille du télescope en multipliant le nombre de réflexions intermédiaires et en repliant le trajet de la lumière incidente. Ainsi, plus le nombre de miroirs est important, plus le télescope est compact.

Dernier élément constitutif du télescope, le tube a lui aussi connu un certain nombre d'évolutions. Chargé de maintenir un alignement entre les différents sous-systèmes optiques, sa taille, de l'ordre de la focale du télescope, et donc son poids, en font un élément critique, du point de vue de la maniabilité et du maintien de la forme optimale. C'est pourquoi les tubes actuels adoptent une structure en treillis, permettant une diminution de la masse au détriment de la fonction de sélection, désormais externalisée au profit de la coupole (ou dôme). Cette coupole, caractéristique des grands télescopes optiques (réfracteurs comme réflecteurs), permet en outre à l'objet technique d'augmenter son insertion au sein du milieu associé, en ajoutant à l'élimination des lumières parasites un meilleur contrôle des conditions météorologiques locales.

Un autre élément dont il nous faut parler est la monture du télescope. Si, historiquement, les instruments étaient tenus à la main, il est très vite apparu qu'assurer la stabilité du dispositif améliorerait de beaucoup la précision des mesures. Avec le développement de l'astrophotographie, un nouveau besoin est apparu : celui de pouvoir suivre les étoiles dans leur trajectoire nocturne. En effet, à cause de la rotation de la Terre sur elle-même, les étoiles semblent tourner autour de l'axe de rotation de la Terre. Ainsi, les montures ont vocation à compenser, ou tout au moins gérer, ce mouvement diurne. On distingue trois types de montures (le premier étant davantage un ancêtre qu'une monture dans l'acception actuelle du terme) :

- Les trépieds, simples dispositifs statiques permettant de poser l'instrument et donc de s'affranchir des mouvements de l'opérateur.
- Les montures azimutales, ou altazimutales, permettant de mouvoir le télescope selon deux axes perpendiculaires, l'un vertical et l'autre horizontal. La rotation autour de l'axe

vertical varie l'*azimut* de la direction de pointage du télescope tandis que la rotation autour de l'axe horizontal fait varier l'*altitude*.

- La monture équatoriale, qui possède un axe de rotation parallèle à l'axe de rotation terrestre (axe polaire) permettant une partie du mouvement diurne. L'opérateur ne manipule le télescope qu'autour d'un axe unique, dit « de déclinaison ».

La monture, comme un certain nombre d'autres éléments apparus au cours de l'évolution des télescopes, ne fait pas partie de l'essence de l'objet technique dans la mesure où elle n'est apparue qu'après l'invention et l'apparition des lignées en question. Historiquement, les montures *altaz* sont apparues les premières, avant d'être supplantées par les montures équatoriales, plus simples à manipuler. Mais les progrès de l'informatique, qui permet de piloter automatiquement le déplacement du télescope, ont entraîné un phénomène de *régression* technique et le réemploi préférentiel des montures « altaz », moins volumineuses que leurs homologues équatoriales.

1.2. Caractéristiques techniques structurales

Un nombre limité de caractéristiques techniques permet d'appréhender le télescope en tant que dispositif technique chargé de collecter et focaliser la lumière. La première d'entre elles est le diamètre D de l'objectif. Ce diamètre d'ouverture, ou tout simplement ouverture, est peut-être la caractéristique la plus importante, car de lui dépendent la plupart des propriétés du télescope. Nous avons déjà eu l'occasion de mentionner que le pouvoir de résolution du télescope varie comme l'inverse de l'ouverture. Le pouvoir de collecte dépend lui aussi de la surface de collecte, qui dépend elle-même du diamètre de l'objectif D . Plus le diamètre d'ouverture est important, plus le télescope est en mesure de collecter un nombre important de photons, et donc de détecter des objets de faible magnitude.

Du diamètre D de l'objectif dépend en outre le coût de la mission⁴⁶⁷ : une loi empirique, généralement connue et citée par les astronomes, veut que le coût d'un observatoire au sol varie comme $D^{2,7}$ (loi justifiée *a posteriori* par le fait que le volume du dôme varie comme D^3 , minoré d'éventuelles économies). En fait, et nous touchons ici au troisième aspect de l'importance du diamètre d'ouverture dans les discussions sur les télescopes, c'est la difficulté à usiner un objectif

⁴⁶⁷ Pour une discussion détaillée des modèles de coûts des télescopes, voir les travaux de Philip Stahl ; en particulier : Philip Stahl *et al.*, « Multivariable Parametric Cost Model for Ground Optical Telescope Assembly », *Optical Engineering*, vol. 44, n° 8, 2005, et Philip Stahl *et al.*, « Preliminary Cost Model for Space Telescopes », *SPIE optical engineering proceedings*, vol. 7436, 2009.

de grande taille et d'une qualité suffisante qui explique cette loi. En résumé, le diamètre D du miroir primaire $M1$ a un impact sur :

- Les performances du dispositif (pouvoir de collecte et de résolution).
- Les contraintes économiques.
- Les contraintes techniques.

La seconde caractéristique technique est la longueur focale f du télescope. Aussi appelée « distance focale » ou tout simplement « focale », elle est donnée par la distance entre l'objectif et le foyer image. Dans le cas du télescope, il est important de préciser si l'on parle de la focale de l'objectif, de l'oculaire ou de l'ensemble du dispositif (c'est-à-dire de l'objectif, des miroirs secondaires et de l'oculaire). L'inverse de la focale est appelé « puissance optique » et mesure la capacité du système optique à faire converger, ou diverger, la lumière ; dans le cas convergent, plus la focale est faible, plus la puissance est importante et plus les rayons convergent fortement. Ayant qualifié le télescope de dispositif focalisateur de lumière, nous pourrions nous attendre à ce que la distance focale soit le paramètre le plus important. Il n'en est rien. En dehors de son influence sur les observations photographiques, la focale n'a qu'un rôle marginal dans les performances de l'objet technique. Si elle impacte le grossissement du dispositif, son influence se fait surtout sentir au niveau des aberrations, une focale importante entraînant des aberrations géométriques, et chromatiques le cas échéant, bien plus marquées. Notons enfin que la focale peut donner une bonne indication de la taille du télescope, même s'il faut garder à l'esprit que les deux notions ne sont pas confondues : par exemple, le télescope spatial Hubble, d'une taille de 15,9 m, possède une longueur focale de 56,7 m⁴⁶⁸ (il s'agit bien évidemment de la focale du $M1$; dans le cas du dispositif global, la focale repliée est de 6,3 m).

La troisième caractéristique d'un télescope, mise en avant aussi bien par les constructeurs que par les utilisateurs, est le rapport f/D . Appelé « rapport focal », et plus rarement « ouverture relative », il permet de mesurer l'éclat de l'image en sortie du télescope : à diamètre égal, une source observée par un télescope à faible rapport focal apparaîtra plus lumineuse. Ce rapport sert avant tout en astrophotographie et en astronomie amateur : il permet de mesurer la facilité de collimation et la vitesse de prise des photos. Le rapport focal est directement relié au champ de vue du télescope (FOV, *field of view*). Celui-ci s'exprime en degrés (ou minutes) carrés, et mesure l'angle solide que le télescope est capable d'embrasser en une exposition. À titre d'exemple, *UK Schmidt Telescope* possède

⁴⁶⁸ Buddy Nelson *et al.*, « Hubble Space Telescope: Servicing Mission 4 Media Reference Guide », Lockheed Martin for the NASA, 2009, p. 1-3.

le plus grand champ d'observation avec 36 degrés carrés, quand celui de VISTA n'est que de 0,6 degré carré (à titre de comparaison, la Lune a un diamètre apparent de 0,5 degré carré). Les télescopes à petit rapport focal, qualifiés de rapides, possèdent un champ de vue important et sont donc utilisés pour réaliser des *surveys* ; en revanche, ils sont moins propices à l'étude détaillée de sources peu étendues. Pour notre propos, retenons que le rapport focal est un indicateur de performances intéressant dans la mesure où il relie les deux caractéristiques techniques principales que sont l'ouverture et la focale.

Les deux dernières caractéristiques purement mécaniques qu'il est nécessaire de prendre en compte dans l'évaluation d'un télescope sont sa taille et son poids, ces deux critères rejaillissant sur la maniabilité du dispositif ainsi que sur sa stabilité. Néanmoins, comme ces caractéristiques ne sont pas spécifiques aux télescopes, nous n'en parlerons que quand cela s'avérera nécessaire.

1.3. Propriétés optiques opérationnelles

Après les caractéristiques techniques du télescope, considérations d'ordre essentiellement structurel et mécanique, nous souhaiterions revenir plus en détails sur les propriétés optiques du télescope. La citation en exergue du chapitre traite de la première d'entre elles : il s'agit du grossissement, qui mesure l'augmentation de la taille apparente de l'objet observé. Le grossissement est à l'origine du terme *telescopium*, forgé dès 1612 par Girolamo Sirtori : les objets vus à travers un télescope paraissent plus gros, donc plus proches. Historiquement, il s'agit de la caractéristique la plus importante du télescope, mais en pratique, aujourd'hui, c'est l'un des facteurs les moins pris en considération, aussi bien par les astronomes professionnels que par les amateurs. Le fait est que le grossissement peut être artificiellement augmenté en choisissant un oculaire de plus faible focale ou un objectif de plus longue focale. Nous employons le terme « artificiellement » pour souligner le fait que ce gain de performance a lieu sans réelle réflexion sur le plan théorique ni réelle modification du fonctionnement du dispositif technique. De plus, de la même façon que la qualité d'une image dépend de sa résolution, une observation astronomique dépend de la résolution du télescope qui l'a réalisée. Intuitivement, nous pourrions penser que le grossissement est le paramètre le plus important pour un télescope, censé permettre l'observation d'objets très lointains et donc très petits. Mais de la même façon que la qualité d'une photographie dépend de la résolution de l'appareil, une observation astronomique dépend de la résolution du télescope qui l'a réalisée. Il existe en effet un grossissement maximum utile, de la même façon que zoomer sur une image de mauvaise qualité ne permet pas de voir plus de détails. Au-delà de ce grossissement, il n'y a rien à

gagner et on parle alors de « grossissement vide » et la raison fondamentale de cette limitation tient à la nature ondulatoire de la lumière.

Seconde propriété optique du télescope que nous présentons, la sensibilité du télescope est directement proportionnelle à la surface collectrice du télescope, c'est-à-dire la surface de l'objectif. D'autres paramètres influent sur ce pouvoir de collecte : l'efficacité et le temps d'intégration⁴⁶⁹. Mais le premier paramètre intervient au niveau de l'élément et mesure le pourcentage de lumière perdue lors de la traversée du système optique. Le second intervient au niveau de l'ensemble qu'est l'observatoire (et passe par le développement de capteurs photographiques). Ces deux paramètres interviennent à d'autres échelles que celle du télescope ; le seul facteur qui influence le pouvoir de collecte dans le cadre des télescopes réflecteurs est l'obstruction du miroir primaire par le miroir secondaire. En définitive, la sensibilité du télescope est directement proportionnelle à D^2 .

Nous avons déjà évoqué le pouvoir de résolution d'un télescope au chapitre précédent, lorsque nous avons présenté la limite de diffraction. Le pouvoir de résolution $p = 1,22 \lambda / D$ constitue la caractéristique la plus importante du télescope. En effet, le télescope observe à *l'infini* et ne fait pas la mise au point sur telle ou telle distance. La possibilité de zoomer sur l'image formée et de tirer des informations exploitables ne dépend pas du grossissement mais de la capacité à séparer des points proches, et donc, des détails fins, raison pour laquelle on parle aussi de « pouvoir séparateur » du télescope. Celui-ci ne dépend que de la longueur d'onde d'observation et, surtout, du diamètre du miroir primaire ; il ne dépend ni de la focale du miroir primaire, ni d'aucune propriété de l'oculaire. Il faut garder à l'esprit qu'il s'agit d'une formule théorique : un télescope ne fonctionne que très rarement à la limite de diffraction et son pouvoir de résolution effectif est, en général, bien inférieur à celui donné par cette formule, limité par le *seeing* notamment. De plus, il s'agit d'une limite infranchissable pour l'individu technique qu'est le télescope, due à la nature même du rayonnement électromagnétique dont les interférences lors de la traversée du système optique en limite les performances (raison pour laquelle la longueur d'onde d'étude apparaît dans le calcul du pouvoir de résolution). À diamètre égal, la résolution obtenue dans le domaine radio sera bien inférieure à celle obtenue dans les X ; pour le dire autrement, les astronomes souhaitant une même résolution avec les ondes radio qu'avec les rayons X doivent construire des télescopes dont le diamètre d'ouverture est bien plus important. Cependant, les « miroirs » des radiotélescopes (en l'occurrence des gilles) pouvant tolérer des défauts de l'ordre de la dizaine de centimètres (voir

⁴⁶⁹ Nous reviendrons sur ce point au chapitre 6.

chapitre 4, paragraphe 3.2), il reste plus facile de construire des radiotélescopes de très grands diamètres (le plus grand d'entre eux, FAST⁴⁷⁰, atteignant les 500 mètres d'ouverture).

2. Analyse opérationnelle

2.1. Le diagramme de fonctionnement du télescope

Maintenant que nous avons décrit brièvement l'individu qu'est le télescope, et spécifié certaines de ses propriétés optiques, tachons d'en fournir une analyse opérationnelle en appliquant notre méthodologie. D'après notre classification, nous rattachons le télescope à la famille des dispositifs focalisateurs de lumière (opération) et à la classe des instruments qui servent à voir loin (fonction). Suivant le principe physique mobilisé, nous le rattacherons soit au groupe des objets techniques réfracteurs, soit à celui des objets réflecteurs. Enfin, le genre technique sera décliné selon la longueur d'onde d'étude (dans le cas du télescope optique, il s'agira de la gamme visible étendue), tout comme le choix de l'architecture dépendra des éléments ainsi que de la configuration retenue. Ces informations sont synthétisées dans le diagramme de fonctionnement de la figure 43 :

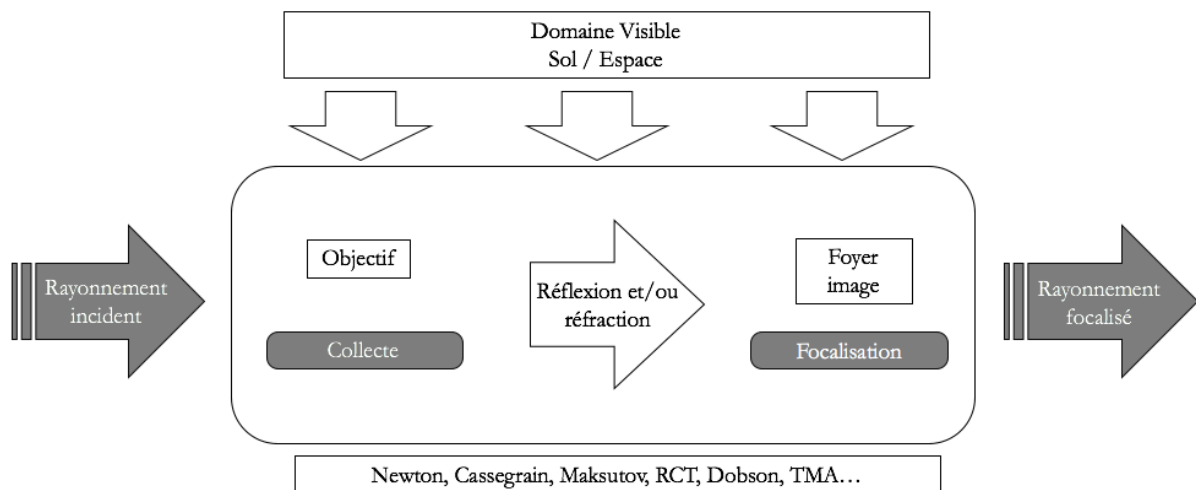


Figure 43 – Diagramme de fonctionnement du télescope optique.
(© Thomas Guy)

⁴⁷⁰ Pour *Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope* ; il s'agit du plus grand radiotélescope *monolithique*.

Rappelons que pour le sens commun, et étymologiquement, un télescope est un dispositif qui sert « à voir loin » ou, ce qui est équivalent, à voir plus gros. Cette vue fonctionnaliste se résume par le diagramme de fonctionnement suivant (Fig. 44), diagramme que l'on a mis sous la forme d'une boîte noire :

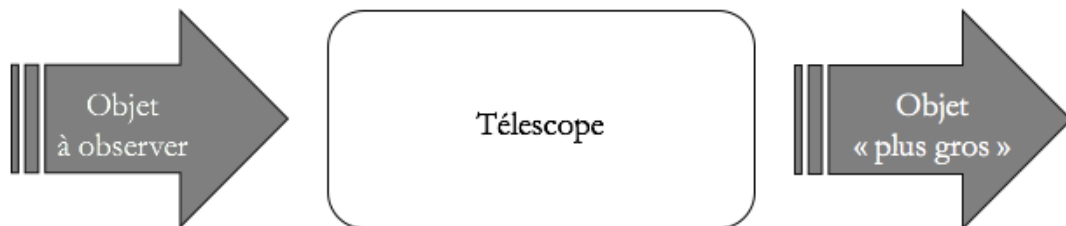


Figure 44 – Nous rattachons le télescope à la classe des objets permettant de voir plus gros - ou plus loin.
(© Thomas Guy)

Au contraire, adopter un point de vue centré uniquement sur le fonctionnement interne du télescope nous conduit à le rattacher aux groupes des objets basés sur les principes de réflexion ou de réfraction lumineuse (Fig. 45).

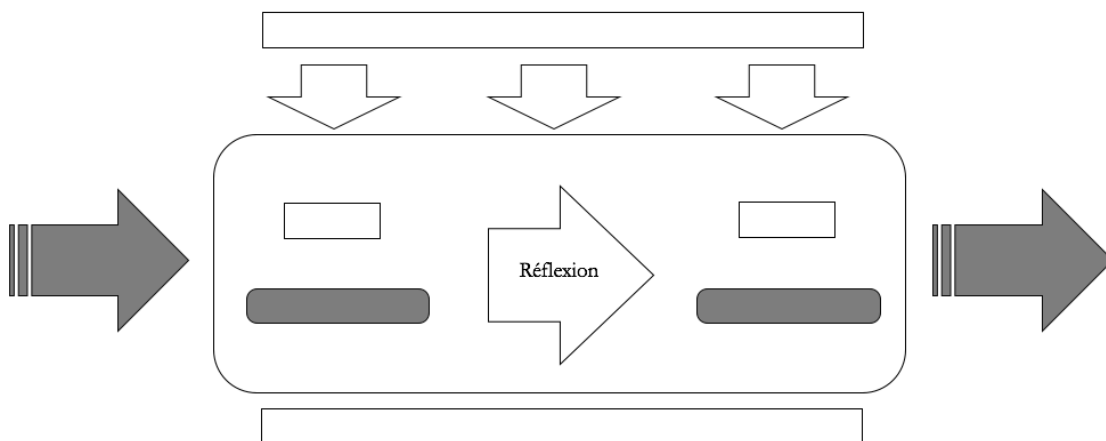


Figure 45 – Nous rattachons le télescope réflecteur au groupe des objets basés sur le principe de réflexion.
(© Thomas Guy)

Selon notre définition, le télescope est caractérisé par la double opération de collecte et de focalisation de la lumière. La figure 46 est une représentation diagrammatique du schème technique

pur à l'origine de la famille de rattachement des télescopes (que ceux-ci soient réfracteurs, réflecteurs ou catadioptriques) :

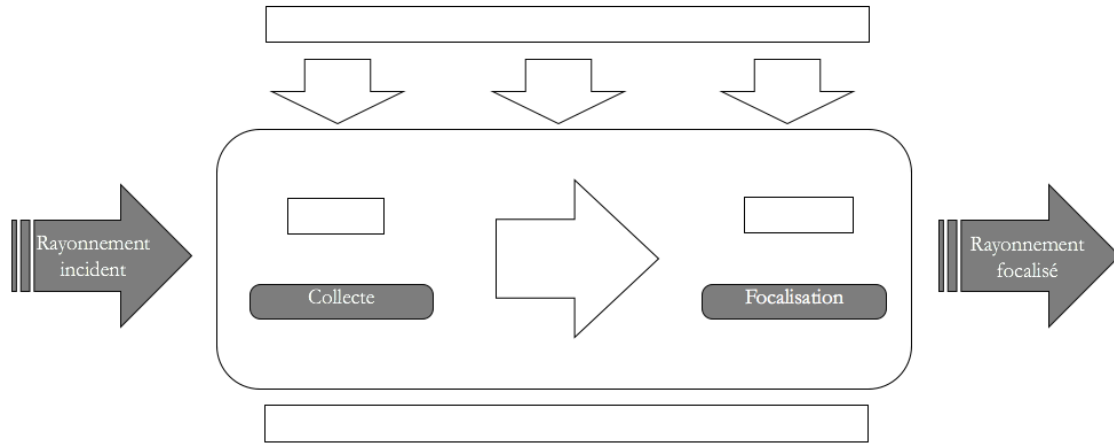


Figure 46 – Famille technique du télescope.
(© Thomas Guy)

Enfin, à titre d'exemple, l'essence technique des télescopes réflecteurs se présente sous la forme suivante (Fig. 47) :

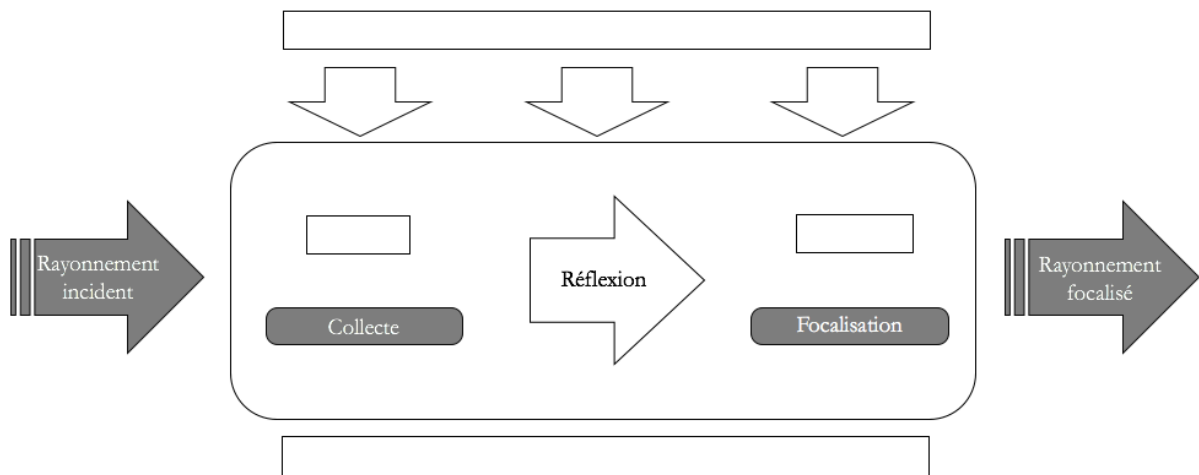


Figure 47 – Représentation de l'essence technique à l'origine de la lignée des télescopes réflecteurs.
(© Thomas Guy)

2.2. Application de la matrice des critères de performance

Nous souhaitons maintenant projeter les différentes caractéristiques et propriétés du télescope selon les trois axes de la classification mécanologique : passif, actif, informationnel (Tab. 7). Pour

qu'un télescope soit susceptible de fournir de bonnes observations, il doit avant tout être capable de conserver sa forme optimale. Un télescope dont les miroirs ne sont plus alignés comme ils le devraient ne permettra pas la mise en œuvre du schème technique sous-jacent, ce qui entraînera une perte, voire la disparition, de l'information en sortie. Identiquement, les miroirs et lentilles doivent maintenir leur forme théorique (hyperbolique, sphérique...) sous peine d'être inutilisables pratiquement. Enfin, au niveau de l'observatoire au sein duquel le télescope est intégré, la stabilité du dispositif doit être garantie : au cours des observations, le télescope est amené à bouger (afin de suivre une étoile dans sa course sur la voûte projetée par exemple) et ses déplacements entraînent des perturbations que l'observatoire doit amortir le plus rapidement possible.

Parce qu'il est un instrument scientifique, la dimension informationnelle est celle qui compte le plus pour le télescope. Afin de garantir les meilleures observations possibles, il est important que le télescope soit dénué d'aberrations, aussi bien chromatiques que géométriques. Il s'agit d'un critère de fidélité, qui mesure la capacité à transmettre de l'information sans la dénaturer. Aux petites échelles, en l'occurrence lumineuses, le télescope sera jugé selon sa capacité à détecter des sources de faible intensité, c'est-à-dire sa sensibilité. Symétriquement, aux grandes échelles, le paramètre important, sera mesuré par le pouvoir de résolution, renseignant sur la possibilité d'extraire des informations fines au sein d'une quantité importante de données.

Enfin, on pourra s'intéresser aux caractéristiques actives du télescope. Nous avançons par là l'idée que ce dernier peut s'appréhender comme un dispositif de transfert d'énergie. C'est le cas lorsque nous considérons les photons du rayonnement incident non plus comme des porteurs d'information mais comme des porteurs d'énergie. À notre échelle, il nous importe donc de savoir quel pourcentage de l'énergie incidente est effectivement transmis par le télescope. Une façon simple de le savoir est de se pencher sur la réflectance R , qui est le rapport entre la quantité de rayonnement en sortie sur celle en entrée. L'efficacité globale du télescope est un paramètre complexe, car devant aussi prendre en compte les limitations dues à l'atmosphère (milieu géographique) et aux instruments (milieu technique). Cependant, un paramètre largement utilisé en optique est l'*étendue*, qui spécifie la capacité du télescope à transmettre le rayonnement vers les instruments (vu comme débit d'information). C'est le produit du champ de vision et de l'ouverture $E = F^2 D^2$, que nous pouvons réinterpréter en termes d'*efficacité* du dispositif. Enfin, dernière caractéristique pertinente, le rapport f/D , peut s'apprécier, sous l'angle énergétique, comme la puissance du télescope, mesurant sa capacité à collecter plus de photons, et donc à produire plus d'informations, en un temps donné.

Tableau 7 – Matrice des performances du télescope.
(© Thomas Guy)

Degré Type	Inférieur	Médian	Supérieur
Passif	Masse surfacique	Maintien de la forme	Amortissement
Actif	f-ratio $\sim f/D$	Réfectance $\sim R$	Étendue $\sim F^2 D^2$
Informationnel	Sensibilité $\sim D^2$	Absence d'aberration	Pouvoir de résolution $\sim \lambda/D$

3. Analyse historique⁴⁷¹

3.1. La naissance des réfracteurs

Nous ferons débiter l'histoire du télescope en 1609, année où Thomas Harriot réalise les premiers dessins de la surface lunaire en utilisant une lunette (*dutch trunk*)⁴⁷², quelques mois avant que Galilée ne l'utilise à son tour pour observer le mouvement des astres. Si les pouvoirs grossissants des lentilles étaient connus depuis plusieurs siècles⁴⁷³, l'idée d'associer une lentille convexe et une lentille concave au sein d'un même dispositif afin d'obtenir un instrument permettant d'observer des objets éloignés ne fut formulée qu'en 1586, dans l'ouvrage *Magia naturalis* de l'italien Giambattista della Porta. La paternité de cette invention sera néanmoins disputée entre

⁴⁷¹ Pour plus de détails concernant l'histoire des télescopes, nous recommandons l'encyclopédie Henry C. King, *The History of the Telescope* [1955], New York, Dover Publications, 2003, ainsi que le plus moderne Fred Watson, *op. cit.* Nous nous sommes aussi appuyés sur Bernhard Brandl, *400 Years of Astronomical Telescopes. A Review of History, Science and Technology*, New York, Springer, 2010, et sur David Leverington, *Observatories and Telescopes of Modern Times*, Cambridge, Cambridge University Press, 2017.

⁴⁷² Henry C. King, *op. cit.*, p. 33.

⁴⁷³ Dans la pièce d'Aristophane *Les Nuées* (-423), on trouve notamment cet échange : « Strepsiade — N'as-tu jamais vu chez les droguistes cette pierre transparente avec laquelle ils allument le feu ? Socrate — Tu veux dire une lentille de cristal ? »

plusieurs opticiens hollandais⁴⁷⁴. Entre septembre et octobre 1608, Hans Lippershey, Jacob Metius et Zacharias Janssen déposeront chacun une demande de brevet pour un instrument permettant « de voir les choses lointaines comme si elles étaient proches⁴⁷⁵ », bientôt appelé « lunette d'approche ». Certains auteurs considèrent que :

The question of priority –who is the true inventor?– is not only the less interesting question; it is also the wrong question –because in the sense underlying this question, the telescope itself fails to be invented⁴⁷⁶.

Nous ne nous pencherons pas sur cette querelle de paternité, préférant la laisser aux historiens, plus compétents pour la trancher. Cependant, comme nous l'avons souligné précédemment, nous ne refuserons pas pour autant à l'apparition du télescope dans les sciences le statut d'*invention*, car cela reviendrait, à nos yeux, à se priver de tout un pan de l'analyse. À ce sujet, G. Altshuller propose une lecture qui nous semble bien plus riche :

Lenses and glasses were known 300 years before the telescope was invented. For 300 years nobody thought to take one lens and view it through another lens. Perhaps there was no need for telescopes; but, military leaders from ancient times needed spyglasses. Nevertheless, the first spyglass invention came 300 years later. Why? It was generally believed that lenses distort an image. Two consecutively placed lenses must, but “common sense” produce twice as much distortion. This “psychological barrier” prevented the development of the telescope for 300 years⁴⁷⁷.

La naissance de l'objet technique qu'est le télescope constitue ainsi une invention, ne serait-ce que dans le sens plus restreint de la TRIZ, de dépassement de l'inertie psychologique, ou, pour reprendre nos propres termes, de franchissement d'un obstacle mécanologique.

Dotée d'un facteur de grossissement de seulement trois et possédant d'importantes aberrations optiques et chromatiques, la lunette d'approche est considérée à ses débuts comme un objet

⁴⁷⁴ Pour une discussion détaillée des faits entourant l'invention de la lunette astronomique, voir Albert Van Helden, *op. cit.* L'auteur semble trancher en faveur de Janssen (p. 63) : « Sacharias Janssen is the true inventor of the telescope. »

⁴⁷⁵ Ascaso Puyuelo et Cristóbal Bescós, « The Casual Gaze of Hans Lippershey (Wesel 1570, Middelburg 1619) and the Brilliant Blindness of Galileo Galilei (Pisa 1564, Arcetri 1642) », *Archivos de la Sociedad española de Oftalmología*, vol. 78, n° 8, septembre 2003, p. 459-461.

⁴⁷⁶ Albert Van Helden, Sven Dupré, Rob Van Gent et Huib Zuidervaart (éd.), *op. cit.*, p. 6.

⁴⁷⁷ Genrich Altshuller, *op. cit.*, p. 70.

anecdotique⁴⁷⁸. Mais du fait de son adoption immédiate et généralisée par la marine, qui voit dans cet objet technique un formidable instrument de navigation, elle va rapidement se propager dans toute l'Europe, jusqu'à arriver dans les mains du mathématicien et astronome italien Galilée. Si son nom est aujourd'hui associé à l'invention de la lunette astronomique, aussi appelé « lunette de Galilée », première occurrence du télescope dans l'histoire, c'est parce qu'il est le premier à saisir le potentiel scientifique d'un tel dispositif et à voir en lui le moyen de faire entrer l'astronomie dans une nouvelle ère. Instrumentaliste brillant, il perfectionne la lunette hollandaise, diminuant les aberrations latérales et allant jusqu'à obtenir un facteur de grossissement de 20 puis de 30, lui permettant de réaliser, entre autres, les premières observations de Jupiter et de ses satellites. Galilée lui-même reconnaissait ne pas avoir inventé cet objet technique, mais il justifiait néanmoins sa réappropriation en affirmant : « La fabrication comme la théorie de cette lunette dépendent de la connaissance de la réfraction, qui fait partie des sciences mathématiques, mon occupation professionnelle à moi⁴⁷⁹ ». Cette justification *a posteriori* illustre à nos yeux le caractère hautement mathématisé du télescope.

Pourtant, plusieurs auteurs considèrent que la lunette d'approche, devenue lunette astronomique, est l'exemple même d'une « technique sans science », c'est-à-dire d'une invention majeure qui ne découle pas de l'application d'un principe scientifique qui l'aurait précédé. Dès les premières lignes de la *Dioptrique* (discours premier), Descartes parle ainsi de « ces merveilleuses lunettes qui, n'étant en usage que depuis peu, nous ont déjà découvert de nouveaux astres dans le ciel, et d'autres nouveaux objets dessus la Terre, en plus grand nombre que ne sont ceux que nous y avons vu auparavant », et d'ajouter : « Mais, à la honte de nos sciences, cette invention, si utile et si admirable, n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune⁴⁸⁰ ».

La lunette de Galilée va se diffuser rapidement et subir nombre d'améliorations, notamment par Kepler qui, en 1611, propose dans son ouvrage *Dioptricae* une étude mathématique de la théorie des dioptries et une nouvelle architecture pour la lunette⁴⁸¹. Désormais composée de deux lentilles convexes et d'un tube non plus télescopique mais fixe, la lunette de Kepler permet d'atteindre des grossissements plus importants au prix d'un allongement du tube et d'une image retournée. Dans la mesure où l'observation des astres lointains ne dépend pas d'une orientation préférentielle, ce

⁴⁷⁸ Paul Couderc, *op. cit.*, p. 95.

⁴⁷⁹ Galileo Galilei, « Lettre à Dini », 16 mai 1611, *Opere*, t. XI, p. 106.

⁴⁸⁰ René Descartes, *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*, Paris, Angot (source numérisée : BnF/Gallica), 1668, p. 65.

⁴⁸¹ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 162.

dernier point est peu problématique, au contraire de l'allongement du dispositif, comme on le verra par la suite. Aussi différents soient-ils, les types galiléen et képlérien de lunettes présentent le même inconvénient de recourir à des lentilles, et donc de présenter des aberrations chromatiques⁴⁸². La suppression de ces aberrations chromatiques a constitué le premier grand défi de l'instrumentation astronomique. Deux solutions principales ont alors émergé. La première, proposée par Christiaan Huygens, fut de diminuer le rayon de courbure et l'épaisseur des lentilles utilisées afin de diminuer l'épaisseur de verre à traverser et donc l'importance des aberrations chromatiques. Cette solution présente cependant l'inconvénient de conduire à une augmentation de la distance focale des lunettes et à des tubes toujours plus grands. En effet, la distance focale est d'autant plus grande que le rayon de courbure est faible (déviations des rayons lumineux moins importantes), et elle varie comme le carré du diamètre de l'objectif.

Or, les astronomes ont toujours besoin d'augmenter le diamètre d'ouverture – les Anglo-Saxons parlent à ce titre d'*aperture fever*⁴⁸³. Nous l'avons dit précédemment, l'ouverture d'un télescope, mesurée par la taille du diamètre de son miroir primaire, est dépositaire des objectifs scientifiques de la mission. L'augmentation du diamètre permet de recueillir plus de lumière et donc de détecter des sources plus faibles, d'où une augmentation de la quantité d'observations réalisées. En outre, le pouvoir de résolution augmente aussi, ce qui se traduit par l'augmentation de la qualité des observations. Dans leur quête de données à exploiter, les scientifiques ont par conséquent tendance à construire – ou faire construire – des télescopes toujours plus imposants : cette tendance au gigantisme est motivée par des facteurs externes, au sens où ceux-ci dérivent d'un souci de performance utilitaire et non de nécessités techniques, et vont rapidement se heurter aux contraintes techniques auxquelles doivent faire face les concepteurs des dispositifs.

Le double objectif de 1) diminuer la courbure des lentilles utilisées, et 2) augmenter le diamètre de l'objectif a conduit les lunettes à bientôt dépasser les 30 puis les 40 mètres de longueur, jusqu'à atteindre 46 mètres en 1641. La quête d'une ouverture toujours plus grande s'est ainsi changée en la mise au point de télescopes toujours plus longs, apportant au passage un second bénéfice : « The greatest advantage of long telescopes, apart from reduced chromatic effects, was undoubtedly the high magnification they provided with long-focus eyepieces⁴⁸⁴ ». Cependant, ayant besoin d'échafaudages, de longs mâts ou de grues pour les maintenir (Fig. 48), ces télescopes étaient très

⁴⁸² Fred Watson, *op. cit.*, p. 91-92.

⁴⁸³ *Ibid.*, p. 10.

⁴⁸⁴ Henry C. King, *op. cit.*, p. 50.

peu maniables et surtout, très fragiles : la moindre vibration, le moindre coup de vent risquait de détruire complètement le dispositif. Ces lunettes à très grande focale sont, pour reprendre le vocabulaire de la TRIZ, la manifestation d'une contradiction technique typique des phases de saturation : il s'agit d'un conflit entre deux effets qui ne peuvent être obtenus en même temps, car toute tentative d'améliorer l'un conduit à détériorer l'autre. L'amélioration d'une fonction utile conduit à amplifier un effet néfaste, ou, inversement, la réduction d'un effet néfaste s'accompagne d'une réduction d'une fonction utile. Dans le cas présent, l'augmentation de la distance focale permet de diminuer les aberrations chromatiques mais augmente la fragilité de l'objet technique : il y a donc contradiction entre la performance du dispositif et sa robustesse.

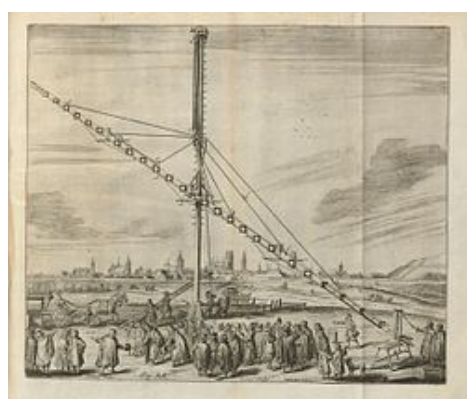


Figure 48 – Gravure sur bois de la lunette de Kepler de 46 mètres (150 pieds) construite par Johannes Hevelius en 1641.
(Source : Johannes Hevelius, *Machinae Coelestis*, 1673 ; numérisation université Carnegie-Mellon)

Une solution originale, bien qu'anecdotique, au problème de l'hypertrophie des tubes des lunettes fut proposée en 1675 par les frères Huygens, qui envisagèrent de se passer complètement de tube : ainsi naquit la sous-lignée des « télescopes aériens » (*tubeless aerial telescopes*)⁴⁸⁵ (Fig. 49). L'objectif était monté à l'intérieur d'un petit tube de fer fixé sur une rotule pivotante elle-même disposée sur un mât réglable. L'oculaire, lui, était monté dans un autre tube et les deux tubes étaient maintenus alignés par une corde.

⁴⁸⁵ *Ibid.*, p. 54.

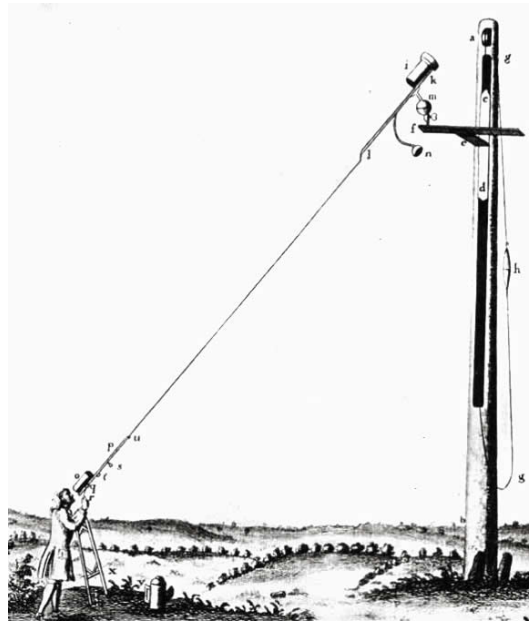


Figure 49 – Gravure du télescope aérien de 210 pieds de Christiaan Huygens.
(Source : Christiaan Huygens, *Astroscopia compendiaria*, 1683)

Cette idée, aussi élégante soit-elle, ne constitue toutefois pas une solution pérenne pour la lignée des télescopes réfracteurs dans la mesure où les problèmes de fragilité et de maniabilité demeurent : la contradiction principale n'étant pas dépassée, il serait plus judicieux de parler de détour⁴⁸⁶, d'une tentative de contournement, plutôt que d'une résolution du problème technique. Les télescopes réfracteurs à très long tube ainsi que les télescopes aériens peuvent être qualifiés de dispositifs hypertéliques, à la fois par analogie avec la biologie⁴⁸⁷ et au sens de Simondon⁴⁸⁸. En effet, l'allongement de la distance focale de l'instrument pour diminuer la courbure des lentilles afin de réduire – et non supprimer – les aberrations chromatiques relève d'une logique de conception trop dépendante du donné pour constituer un véritable progrès technique. Cette approche donne l'illusion d'un progrès par l'amélioration des performances rendue possible par l'hypertrophie de certaines caractéristiques (la distance focale) au détriment d'une réflexion sur une éventuelle évolution du fonctionnement du dispositif technique. Cette illusion finit tôt ou tard par s'évanouir, faisant s'éteindre les sous-lignées des réfracteurs à longue focale et des télescopes aériens, et, pour reprendre les termes de Nicolas Nosengo, reléguant ces derniers au rang de « technosaures⁴⁸⁹ ».

⁴⁸⁶ Gilbert Simondon, *Imagination et invention (1965-1966)*, Chatou, Éditions de la transparence, 2008, p. 139.

⁴⁸⁷ Développement exagéré d'un organe qui peut aller jusqu'à compromettre la vie de l'individu.

⁴⁸⁸ Suradaptation à un usage et/ou un milieu particulier.

⁴⁸⁹ Nicolas Nosengo, *L'Extinction des technosaures. Histoires de technologies oubliées*, Paris, Belin, 2010.

La deuxième solution au problème des aberrations chromatiques relève précisément d'une autre logique de conception et conduit à la mise au point de la lunette achromatique par Chester Moore Hall en 1729⁴⁹⁰. L'idée est de revenir au principe de fonctionnement de la lentille – la réfraction – et de s'en servir pour contrecarrer les problèmes liés au caractère dispersif du verre. Une lentille achromatique est une lentille composée de deux types de verre de dispersion différente (Fig. 50). Le premier élément est une lentille convexe en verre Crown, de dispersion relativement faible, tandis que le second est une lentille concave en verre Flint, de dispersion plus élevée. Les deux lentilles sont disposées l'une à côté de l'autre et conçues de sorte que l'aberration chromatique de l'une soit compensée par l'aberration chromatique de l'autre. La conjonction des deux forme un doublet achromatique permettant de focaliser deux longueurs d'onde différentes au même foyer et de réduire drastiquement les aberrations chromatiques.

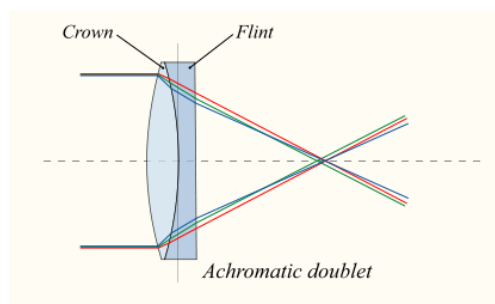


Figure 50 – Principe du doublet achromatique.
(Source : Wikipédia. © Éric Bajart)

Inventé indépendamment et breveté en 1758 par l'opticien anglais John Dollond⁴⁹¹ (ce qui déclencha une querelle de priorité avec Chester Moore Hall), le doublet achromatique voit son utilisation se généraliser dans la conception des lunettes⁴⁹². Si cette stratégie a mis aussi longtemps à émerger, c'est que la majorité des astronomes et instrumentalistes restaient marqués par les vues de Newton, lequel défendait l'impossibilité d'une lunette achromatique. Sa thèse reposait sur l'argument « de bon sens » que deux lentilles produiraient deux fois plus d'aberrations chromatiques qu'une seule. Or, le principe même du doublet achromatique repose sur le fait que « ce qui était

⁴⁹⁰ Henry C. King, *op. cit.*, p. 144.

⁴⁹¹ John Dollond, « An Account of Some Experiments Concerning the Different Refrangibility of Light », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 50, n° 2, 1758, p. 733-743.

⁴⁹² Solange Grillot, « Les instruments des observatoires français au 19^e siècle », *L'Astronomie*, vol. 100, juin 1986, p. 280.

obstacle devient moyen de réalisation⁴⁹³ ». Nous retrouvons ici le poids que peuvent avoir les obstacles mécanologiques dans l'évolution des objets techniques.

Une évolution naturelle du doublet achromatique fut la mise au point dès 1765 du triplet apochromatique permettant de réaliser des lunettes dites « apochromatiques⁴⁹⁴ ». L'idée était d'utiliser non plus deux mais trois éléments, afin de focaliser trois longueurs d'onde différentes au même foyer, ce qui contribuait à une nette diminution des aberrations chromatiques. Dans la mesure où l'œil humain ne dispose que de trois types de cônes (sensibles aux *lumières* bleue, verte et rouge), les lunettes apochromatiques peuvent être considérées comme l'aboutissement de la lignée des télescopes réfracteurs. Cependant, le développement du verre en fluorite dans les années 1960 a permis de réaliser des lunettes *superapochromatiques*, permettant de focaliser quatre longueurs d'onde au même point et améliorant d'autant la qualité des images produites (Fig. 51). Notons qu'ici le progrès n'a plus seulement lieu à l'échelle de l'individu, la lunette, mais aux échelles infra-individuelles, la lentille et le matériau qui la compose ; les liens entre les progrès aux différentes échelles seront à ce titre étudiés plus en détails au chapitre suivant.

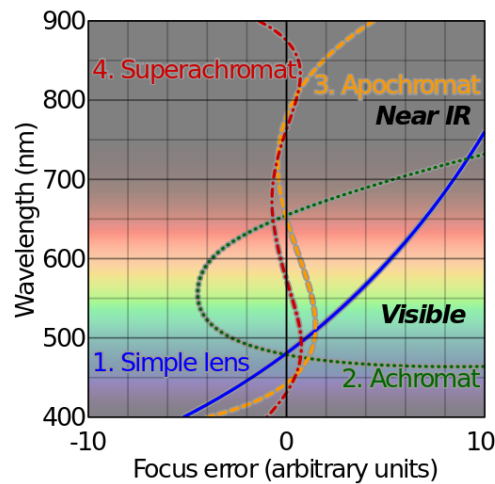


Figure 51 – Erreur de mise au point (en unités arbitraires) illustrant les propriétés des différentes espèces de la sous-lignée des lunettes achromatiques.

(Source : Wikipédia. © Cmglee)

La meilleure compréhension scientifique des principes sous-jacents et la volonté de contrôler le schème technique sont à l'origine de progrès au sein de la lignée qui, à la différence des évolutions hypertéliques, n'engendrent pas de contradictions. Le passage de la lunette classique à la lunette

⁴⁹³ Ludwik M. Celnikier, *op. cit.*, p. 139-141.

⁴⁹⁴ Fred Watson, *op. cit.*, p. 153.

achromatique puis apochromatique et enfin superachromatique traduit une logique d'évolution différente de la tendance au gigantisme : la complexification correctrice, qui désigne les modifications structurales par l'ajout ou la complexification d'éléments permettant de corriger les défauts de l'objet. Les deux logiques peuvent néanmoins se combiner. L'invention du doublet achromatique et de ses successeurs a rendu à nouveau possible l'emploi de lentilles plus épaisses, de distance focale moins importante, et a donc permis de réduire la taille des instruments de plusieurs ordres de grandeur.

Les évolutions ultérieures ont relancé la course au gigantisme : à partir du début du XIX^e siècle, la collaboration entre le verrier Pierre-Louis Guinand et l'instrumentaliste Joseph von Fraunhofer donna naissance à l'ère des « grands réfracteurs⁴⁹⁵ ». La découverte par le premier de nouveaux procédés de fabrication du verre Flint permit au second de réaliser une lunette achromatique de 24 centimètres d'ouverture pour une distance focale de « seulement » 4 mètres (à comparer avec la lunette d'Hevelius, qui possédait une ouverture de 12 centimètres pour une focale de 46 mètres). Au cours du XIX^e siècle, le diamètre de ces grandes lunettes va plus que quadrupler (Tab. 8), passant de 24 centimètres à 102 centimètres pour la lunette de l'observatoire Yerkes et culminant à 125 centimètres pour la lunette de démonstration de l'Exposition universelle de Paris en 1900 – cette dernière étant toutefois plus anecdotique dans la mesure où, figée en position horizontale, elle ne permettait que des observations limitées. Dispositif hypertélique par excellence, elle fut d'ailleurs démontée à la fin de l'exposition, faisant de l'observatoire Yerkes le détenteur de la plus grande lunette en activité (Tab. 8).

Cette lignée des grands réfracteurs finit elle aussi par rencontrer des contradictions techniques insurmontables, de véritables blocages technologiques. Tout d'abord, comme dans la lignée des réfracteurs non achromatiques, l'allongement du tube finit par être problématique. L'emploi de lentilles plus larges permit certes de réduire la distance focale, mais au prix d'une augmentation du poids de la structure : le seul tube de la lunette de Yerkes pèse plus de 75 tonnes, ce qui affecte grandement la maniabilité du dispositif.

⁴⁹⁵ Waaland J. Robert, « Fraunhofer and the Great Dorpat Refractor », *American Journal of Physics*, vol. 35, n° 4, 1967, p. 344-350.

Tableau 8 – Évolution du diamètre d'ouverture de quelques grands réfracteurs emblématiques⁴⁹⁶.
(© Thomas Guy)

Observatoire	Diamètre d'ouverture	Année	Fabricant
Dorpat	24 cm	1826	Fraunhofer
Kensington	30 cm	1829	Cauchois
Markree	34 cm	1834	Cauchois
Pulkovo	38 cm	1839	Merz and Mahler
Dearborn	47 cm	1862	Alvan Clark & Sons
Newall	64 cm	1871	Chance Brothers
Vienne	69 cm	1880	Grubb
Pulkovo	76 cm	1885	Alvan Clark & Sons
Nice	77 cm	1886	Gautier & Henry
Lick	91 cm	1888	Alvan Clark & Sons
Yerkes	102 cm	1897	Alvan Clark & Sons
Paris	125 cm	1900	Gautier & Mantois

En outre, l'utilisation de lentilles de grande taille présente, intrinsèquement, deux problèmes majeurs. Le premier réside dans la difficulté à usiner des verres homogènes d'un tel volume, conduisant à l'impossibilité d'obtenir des lentilles de bonne qualité de plus d'un mètre. Le second problème provient des déformations des lentilles dues à la gravité – on parle de « *lens sagging* » ; une lentille ne pouvant être supportée que par ses bords, un poids trop important provoque une distorsion de la forme de la lentille qui ne focalise plus correctement les rayons. Cette nouvelle contradiction technique entre la taille et la qualité de l'objectif est impossible à résoudre, car elle découle du principe même de la réfraction lumineuse ; elle entraîne une saturation définitive de la lignée des télescopes réfracteurs du fait de l'existence d'une limite objective du diamètre d'ouverture des lunettes (autour du mètre). La lignée des réfracteurs, saturée, va donc bientôt être supplantée par la lignée concurrente des réflecteurs⁴⁹⁷.

3.2. La concurrence des télescopes réflecteurs

Dès 1610, Galilée mentionnait la possibilité de remplacer les lentilles convexes par des miroirs concaves⁴⁹⁸, soulignant une fois de plus la préséance de l'opération sur la structure et de l'échelle individuelle sur l'échelle élémentaire. Proposé dès 1636 par Marin Mersenne⁴⁹⁹, théorisé en 1663 par James Gregory et réalisé en 1668 par Isaac Newton, le télescope réflecteur va peu à peu se

⁴⁹⁶ Voir annexe A.4 pour les sources.

⁴⁹⁷ Fred Watson, *op. cit.*, p. 181.

⁴⁹⁸ Raymond Wilson, *op. cit.*, p. 2.

⁴⁹⁹ Piero E. Ariotti, « Bonaventura Cavalieri, Marin Mersenne, and the Reflecting Telescope », *ISIS*, vol. 66, n° 3, septembre 1975, p. 302-321.

substituer au réfracteur pour devenir l'instrument majeur de l'astronomie. Si les aberrations chromatiques sont un problème inhérent à l'usage de lentilles et au phénomène de réfraction, les télescopes réflecteurs recourant à des miroirs et basés sur le principe de réflexion lumineuse en sont purement et simplement dénués⁵⁰⁰. C'est ce constat qui poussa Newton à abandonner les télescopes réfracteurs et à concevoir le premier télescope réflecteur de l'histoire. Composé d'un miroir primaire concave sphérique fait d'un alliage d'étain et de cuivre, et d'un miroir secondaire plan et oblique caractéristique des télescopes de « type Newton », ce télescope présentait l'avantage, outre l'absence d'aberrations chromatiques, d'être particulièrement compact. Deux autres types de design existent pour les télescopes composés de miroirs : le type grégorien (miroir primaire concave parabolique, miroir secondaire concave elliptique), théorisé en 1663, et le type Cassegrain (miroir primaire concave parabolique, miroir secondaire convexe hyperbolique), mis au point en 1672⁵⁰¹ (Fig. 52).

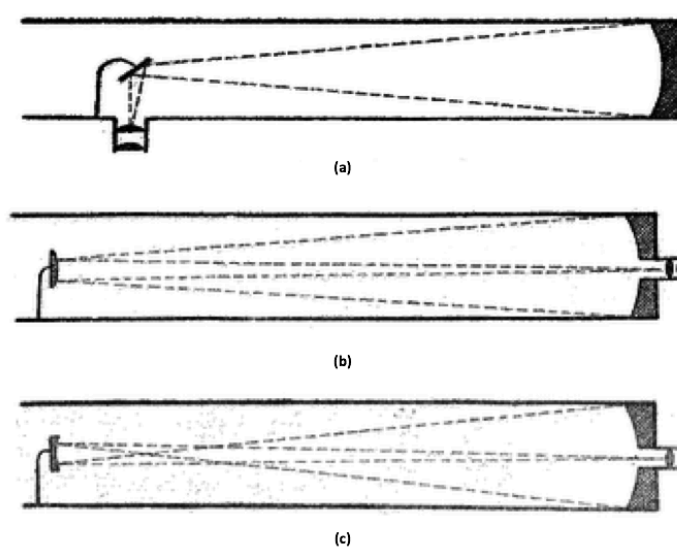


Figure 52 : Chemin optique au sein d'un télescope de type Newton (a), Cassegrain (b) et grégorien.

(Source : *La Nature, revue pour les sciences*, n° 18, 1873)

Cependant, la difficulté d'usiner des miroirs de la forme désirée est responsable d'aberrations géométriques qui limitent les diamètres d'ouverture par rapport à la lignée concurrente des réfracteurs. Ces limitations industrielles ont été des freins à la diffusion et à l'épanouissement de

⁵⁰⁰ Isaac Newton, *Traité d'optique*, Paris, Gauthier-Villars, 1955.

⁵⁰¹ Les trois architectures sont encore utilisées aujourd'hui : les télescopes de type Newton, sous la variante dobsonienne, sont très prisés en astronomie amateur tandis que la majorité des grands télescopes est de type Cassegrain ; le type grégorien est moins utilisé, si ce n'est en radioastronomie.

cette lignée. Les premiers télescopes réflecteurs utilisaient des miroirs métalliques en *speculum*⁵⁰². S'ils présentaient l'avantage d'être dénués d'aberrations chromatiques, ils possédaient l'inconvénient de ternir à l'usage (oxydation due à l'atmosphère) et possédaient un faible pouvoir réfléchissant (un tiers de la lumière incidente était perdue). Il fallait donc les polir relativement souvent, ce qui, à la longue, contribuait à éloigner les miroirs de leur forme optimale et donc à dégrader la qualité du télescope.

Pour ces raisons, les télescopes réfracteurs, notamment achromatiques, furent longtemps préférés aux réflecteurs. Plusieurs décennies s'écoulèrent avant que ces derniers ne s'imposent dans la communauté des astronomes : « Quelques télescopes furent fabriqués à partir de 1720, [...] il fallut attendre qu'Edward Scarlett [trouvât] la manière de réaliser de bons miroirs pour que la fabrication prît quelques extensions⁵⁰³ ». Puis, en 1856, Karl August von Steinheil et Jean Bernard Léon Foucault adaptèrent indépendamment le procédé Liebig d'argenture du verre, permettant de déposer une fine couche d'argent sur un miroir en verre⁵⁰⁴. Cette couche d'argent était non seulement beaucoup plus réfléchissante et durable que la surface des miroirs métalliques, mais elle avait aussi l'avantage de pouvoir être enlevée et redéposée sans changer la forme du substrat de verre. Ce nouveau procédé industriel réellement inventif rendait possible la réalisation de miroirs de grande taille et d'une qualité suffisante pour que la lignée des télescopes réflecteurs manifeste ses potentialités et vienne se substituer à la lignée jusque-là dominante des réfracteurs. Le début du XX^e siècle vit la construction de nombreux observatoires modernes, conçus pour l'imagerie photographique de précision et installés sur des sites particuliers (éloignés des villes, en altitude, ciel clair, etc.)⁵⁰⁵. Par la suite, la lignée des télescopes réflecteurs concentra l'essentiel des efforts de développement et connut nombre d'évolutions, non seulement selon la tendance au gigantisme, mais aussi selon la tendance de complexification correctrice. Il est intéressant de noter que, si dans le cas des télescopes réfracteurs, les progrès industriels ont toujours devancé les avancées théoriques, les télescopes réflecteurs ont rapidement connu d'importants développements théoriques mais ont souvent pâti d'un manque d'avancées industrielles. C'est dû d'une part à ce que la théorie des aberrations fut développée tardivement, et d'autre part à la plus grande exigence

⁵⁰² Alliage métallique composé de deux tiers de cuivre et d'un tiers d'étain formant une surface hautement réfléchissante une fois poli.

⁵⁰³ Maurice Daumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, *op. cit.*, p. 67.

⁵⁰⁴ Henry C. King, *op. cit.*, p. 262.

⁵⁰⁵ Solange Grillot, art. cit., p. 275 : « C'est au cours du 19^e siècle [...] qu'ont été créés les grands observatoires français autres que celui de Paris. »

requis par les surfaces catoptriques : « The precision required for the same performance of a reflecting telescope is about four times higher than that for a refracting telescope⁵⁰⁶ ».

Si les télescopes réflecteurs sont dénués d'aberrations chromatiques, ils possèdent en revanche un certain nombre d'aberrations géométriques. C'est la meilleure compréhension scientifique de ces aberrations et de leurs causes qui constitue le moteur du progrès de la lignée des réflecteurs : tout comme les progrès de la dioptrique avaient permis l'évolution des lentilles et des lunettes, une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu va induire l'évolution des miroirs et des télescopes réflecteurs. Le télescope Ritchey-Chrétien (RCT), inventé en 1910, constitue ainsi une avancée majeure au sein de la lignée. Un télescope constitué de miroirs sphériques souffrira d'aberrations sphériques. Si les miroirs sont rendus paraboliques pour corriger l'aberration sphérique, il souffrira alors de coma et d'astigmatisme. Avec deux miroirs hyperboliques, le Ritchey-Chrétien permet d'éliminer aberration sphérique et coma jusqu'à l'ordre 3. Cela offre notamment un plus grand champ de vision utile, bien que de tels télescopes souffrent encore d'aberrations d'ordre supérieur (coma 5 et astigmatisme). L'ajout d'un troisième miroir en 1935 permettra de remédier à ce problème et donnera naissance au *Three-Mirror Anastigmat* (TMA) qui, comme son nom l'indique, en plus des aberrations d'ordre inférieur, est dénué d'astigmatisme.

Il est à noter que, en concurrence avec les travaux de George Ritchey et d'Henri Chrétien, l'astronome et physicien allemand Karl Schwarzschild publia, en 1905, un article dans lequel il décrivait les caractéristiques d'un télescope à deux miroirs (primaire concave hyperbolique, secondaire concave elliptique) dénué d'« aigrette » (c'est-à-dire de coma). Cependant, dans la mesure où le point de convergence des rayons lumineux était situé entre les deux miroirs, ce dispositif ne vit jamais réellement le jour. Il s'agit en quelque sorte d'une lignée fantôme, simple curiosité théorique dont les applications pratiques ne sont guère envisageables.

3.3. L'exception catadioptrique

Parallèlement à ces développements, l'invention de la lame de Schmidt puis de la chambre de Schmidt en 1930 par l'opticien allemand Bernhard Schmidt donna naissance à une nouvelle lignée : la lignée des télescopes catadioptriques. Une lame de Schmidt (*Schmidt corrector plate*) est une lentille asphérique conçue pour que, une fois combinée avec un miroir sphérique, elle permette de

⁵⁰⁶ Raymond Wilson, *op. cit.*, p. 11.

supprimer les aberrations de coma tout en compensant l'astigmatisme du réflecteur. Indépendamment de ces travaux, en 1941, l'opticien soviétique Dmitry Maksutov mit au point son propre télescope catadioptrique. Là où B. Schmidt utilisait un correcteur asphérique, D. Maksutov recourt à une lentille sphérique fortement courbée (*meniscus corrector shell*). À propos de son compatriote, G. Altshuller écrit :

The inventor began with the idea of attaching optical lenses to the swim mask window. Then he surmised that he could eliminate the lenses altogether by making the window convex – transforming it into a meniscus. However, this meniscus could also perform another function. It could eliminate distortions produced by the parallel glass of the mask window. Thus, a new technical ideal was born. The most important idea contained in Maksutov's invention is to accept that which had been previously unacceptable – and then compensate for it⁵⁰⁷.

Deux idées majeures ressortent de cet extrait. D'une part, l'ajout d'une lentille au sein d'un dispositif réflecteur permet de réaliser ce que G. Simondon appelle la « convergence des fonctions » par la « surabondance des effets » d'une invention qui résout plusieurs problèmes en même temps. D'autre part, nous retrouvons l'idée que ce qui était obstacle doit devenir moyen de réalisation, idée déjà rencontrée lors de la naissance du télescope et du doublet achromatique. G. Altshuller poursuit :

We can confidently affirm that, among many unsolved problems, there are those that can be solved by this compensation method. However, this method is not widely known. Meniscus-lens telescopes were described a hundred times, but no papers said: "This is a successful method for solving different inventive problems. It can be used not only in the optical industry, but in other industries as well"⁵⁰⁸.

Mais là où G. Altshuller voit une méthode de créativité (*compensation method*), nous voyons une logique d'évolution des objets techniques que nous qualifions de *complexification correctrice*⁵⁰⁹. Le développement du RCT puis du TMA et l'invention de la lame de Schmidt relèvent de deux logiques différentes de conception pour corriger les aberrations de coma et d'astigmatisme. Si la première solution consiste essentiellement en des modifications structurales, la seconde

⁵⁰⁷ Genrich Altshuller, *op. cit.*, p. 34.

⁵⁰⁸ *Ibid.*, p. 34.

⁵⁰⁹ Voir chapitre 8 pour une discussion plus avancée sur ce sujet.

introduit un nouvel élément. Simondon nomme « recrutement⁵¹⁰ » cet ajout d'un élément au sein de l'individu au cours du processus de concrétisation. Cela correspond aussi à l'hybridation des opérations de réfraction et de réflexion pour former un nouveau schème technique, celui de la lignée des télescopes catadioptriques. L'évolution est analogue à celle rencontrée lors de l'étude des réfracteurs et relève de la même logique de complexification correctrice. La lignée des télescopes catadioptriques va à son tour connaître une bifurcation selon que le correcteur employé occupe l'intégralité de l'ouverture (*full-aperture corrector*) ou n'occupe qu'une portion choisie de celle-ci (*sub-aperture corrector*). Dans les deux cas, l'utilisation d'éléments dioptriques permet de corriger les aberrations, constituant ainsi un progrès sur le plan phénoménotechnique. Néanmoins, elle se heurte de nouveau aux limitations liées à l'impossibilité d'usiner de grandes lentilles ; par conséquent, si le télescope de Schmidt-Cassegrain est l'un des plus populaires parmi les astronomes amateurs, il ne peut constituer le cœur opérationnel des grands observatoires. Au sein de ces derniers, ce sont les Ritchey-Chrétien et, dans une moindre mesure, les TMA qui sont majoritairement employés :

The Ritchey-Chrétien solution has dominated the design of large optical telescopes for many decades. For a two-mirror telescope it is the natural solution for optimizing the image quality⁵¹¹.

Si pendant longtemps ces solutions ont constitué le *nec plus ultra* en termes d'architecture du télescope⁵¹², les exigences requises par le développement des ELT (*extremely large telescopes*) ont poussé à faire émerger des solutions à quatre et même cinq miroirs⁵¹³. Tout comme dans la lignée des lunettes, les efforts de développement ont ensuite porté sur les échelles infra et supra-individuelles. Nous avons vu précédemment que la problématique de l'augmentation du diamètre d'ouverture – la taille du miroir primaire vu comme élément technique – s'est posée dès l'apparition des premiers télescopes et demeure dans toutes les lignées. Cependant, d'un point de vue mécanologique, elle n'est que secondaire par rapport à la problématique de réduction des aberrations, qui a conduit à la diversification des schèmes et à leur complexification à l'intérieur de chaque lignée. Bien que ces lignées aient coexisté pendant une longue période, les télescopes basés sur des miroirs possèdent intrinsèquement certains avantages par rapport à ceux utilisant des

⁵¹⁰ Gilbert Simondon, *Imagination et invention*, *op. cit.*, p. 146.

⁵¹¹ Bernard Delabre, « Optical Design for an Adaptive Anastigmatic Five-Mirror Extremely Large Telescope », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 487, n° 1, août 2008, p. 389.

⁵¹² Jack B. Zirker, *An Acre of Glass: A History and Forecast of the Telescope*, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 2005, p. 317.

⁵¹³ Bernard Delabre, art. cit.

lentilles. À l'absence d'aberrations chromatiques s'ajoute la possibilité industrielle d'usiner des miroirs plus grands, les lentilles étant limitées à des diamètres d'un mètre tout au plus. Le passage des lentilles aux miroirs constitue ainsi la première innovation de rupture dans l'évolution au niveau élémentaire, permettant un gain en fidélité tout en ouvrant tout un champ de potentialités en ce qui concerne la sensibilité. Les deux évolutions majeures ultérieures de la lignée des télescopes réflecteurs joueront d'ailleurs sur ces deux dimensions : le passage des miroirs en *speculum* à ceux en aluminium puis à support en verre permettra un gain du coefficient de réflexion tout en étant plus facile à usiner et en autorisant de plus grandes tailles⁵¹⁴. Nous retrouvons ici les logiques sous-tendant l'évolution des lunettes. D'un côté une tendance au gigantisme, essentiellement motivée par des causes externes, de l'autre, une complexification croissante du dispositif (passage de deux à trois miroirs, utilisation de miroirs hyperboliques plutôt que sphériques, ajout d'un correcteur) résultant de nécessités techniques internes.

4. L'évolution des télescopes

4.1. L'aperture fever

Même lorsqu'ils ne sont pas réduits à leur fonction utilitaire et au critère correspondant, les objets techniques sont souvent appréhendés de manière réductrice quand la qualité de leur fonctionnement est mesurée à travers le prisme d'un critère performatif unique. Dans le cas des télescopes, ce critère est bien évidemment le diamètre d'ouverture du miroir primaire, car de lui dépendent la plupart des caractéristiques du télescope, et donc les objectifs scientifiques de la mission. Il y a aussi une dimension psychologique non négligeable dans la façon qu'ont les astronomes comme les industriels de mettre en avant le gigantisme de leur dispositif – dimension que l'on retrouve parfois dans les noms des observatoires, et qui a pu donner lieu à des caricatures (Fig. 53) :



⁵¹⁴ Solange Grillot, art. cit., p. 281.



Figure 53 – Caricature des possibles noms des futurs observatoires.
(© XKCD)

Adoptant la vision des astronomes nous avons voulu voir ce qu’une histoire de l’évolution des télescopes mise en perspective selon cet indicateur clé de performance (de l’anglais KPI, *Key Performance Indicator*) pouvait produire comme signification (Fig. 54) :

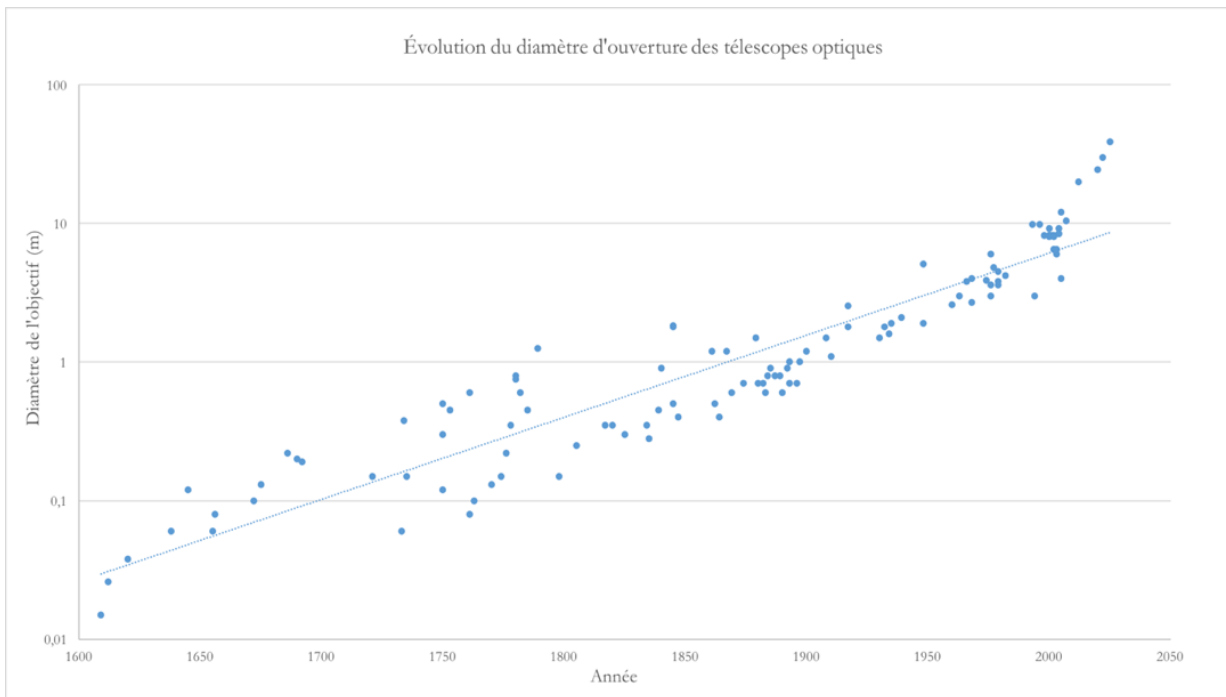


Figure 54 – Évolution du diamètre de l’objectif des télescopes optiques entre 1609 et 2019⁵¹⁵.
(© Thomas Guy)

Ce type de diagramme possède un caractère rassurant par son inexorabilité. Nous retrouvons l’analogie de la loi de Moore pour les télescopes, qui veut que « le diamètre du miroir primaire double tous les cinquante ans ». Face à une telle loi, il est toujours intéressant de se demander si

⁵¹⁵ Voir annexe A.4 pour les sources des données.

son énoncé se veut simplement *descriptif* ou davantage *prescriptif*, conférant alors à la loi un statut de *roadmap*, statut pour le moins ambigu, comme le note Sacha Loeve à propos de la loi de Moore :

Comme toute *roadmap*, elle fait converger une diversité d'acteurs et d'intérêts (investisseurs, politiques et consommateurs) dans un même horizon d'attentes. Mais contrairement aux *roadmaps* des technologies « émergentes », la Loi de Moore est naturalisée dans l'infrastructure de la technologie *existante*, si bien que nous faisons encore moins attention à sa construction. Devenue métaphore du progrès technique *en général*, la Loi de Moore délimite le périmètre de ce qui peut être interrogé et discuté [...] Les seules questions posées à son sujet sont “est-ce que ça va continuer ?”, “comment faire pour que ça continue ?” et “où cela va-t-il nous mener ?”⁵¹⁶

Dans le cas des objectifs des télescopes, il est légitime de se poser les mêmes questions et de s'interroger sur la normativité du rythme d'évolution du diamètre d'ouverture. Dans la mesure où ce sont des industriels, et non pas directement les scientifiques, qui fournissent les miroirs utilisés en astronomie, ce rythme peut être dicté, en majeure partie, par des impératifs davantage économiques que techniques. En sélectionnant dans le diagramme précédent les points formant l'enveloppe supérieure du nuage de points, nous obtenons un nouveau diagramme riche de sens (Fig. 55) :

⁵¹⁶ Sacha Loeve, « La Loi de Moore : enquête critique sur l'économie d'une promesse », dans Marc Audétat (dir.), *Sciences et technologies émergentes : pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Hermann, 2015, p. 91. Voir aussi Ikka Tuomi, « The Lives and Death of Moore's Law », *First Monday*, vol. 7, n° 11, 2002.

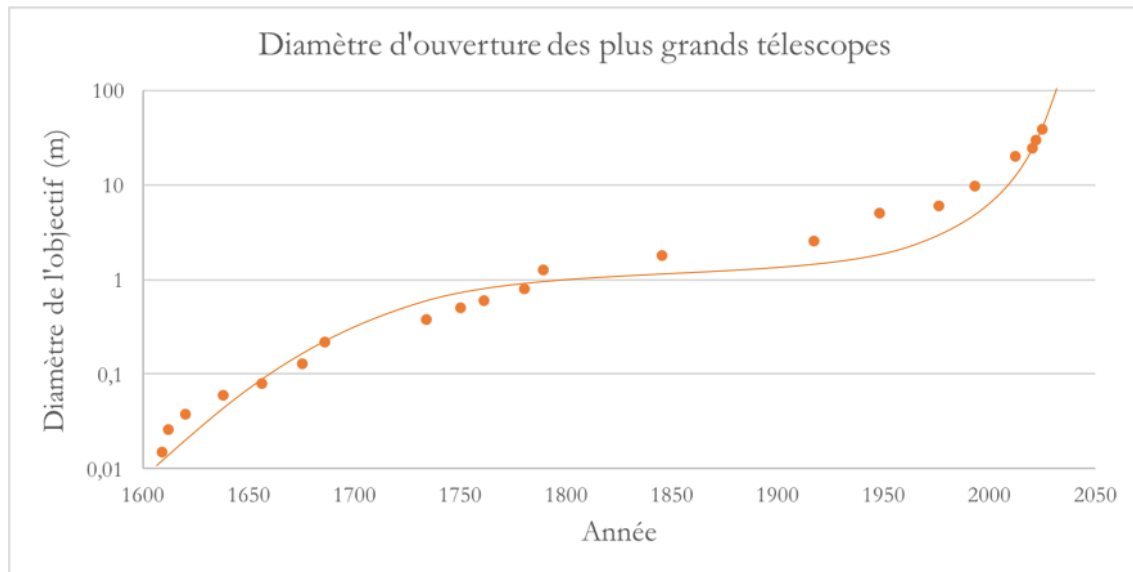


Figure 55 – Évolution du diamètre de l'objectif des plus grands télescopes optiques. La courbe de « modélisation » est qualitative et donnée à titre d'illustration.
(© Thomas Guy)

Dans son ouvrage de 1962⁵¹⁷, Everett Rogers, reprenant une idée de Foster, a popularisé l'idée que la diffusion et l'adoption cumulative d'un nouveau produit suivaient une courbe en S (Fig. 56) :

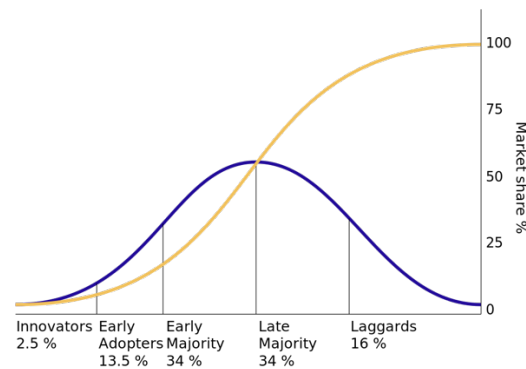


Figure 56 – La diffusion des innovations selon Rogers
Avec les groupes successifs de consommateurs adoptant la nouvelle technologie (en bleu), sa part de marché (en jaune) évolue en suivant une courbe en S, ou sigmoïde, et finit par atteindre un niveau de saturation.
(Source : FonctionInnovation.com, adapté de Everett Rogers).

Initialement développées dans le cadre de l'économie, les courbes en S sont aussi mobilisées en technologie afin d'illustrer l'alternance des phases d'explosion et de saturation des performances,

⁵¹⁷ Everett Rogers, *Diffusion of Innovations*, New York, Free Press, 2003 (5^e édition).

bien que cet usage soit à questionner⁵¹⁸. Davantage qu'à une courbe en S, notre diagramme s'apparente à l'enchaînement de deux courbes en S reliées par un plateau. Il s'agirait donc plutôt, pour reprendre l'expression de Smaïl Aït-el-Hadj, d'une situation de « substitution après saturation » s'expliquant par le fait que :

Une technologie ayant atteint ses limites peut voir celles-ci se déplacer et connaître une nouvelle jeunesse parce que des percées technologiques dans d'autres domaines du système auront changé certaines de ses conditions centrales d'évolution⁵¹⁹.

L'existence de ce plateau de performance serait quant à elle expliquée par une autre théorie économique : la dépendance de sentier (*path dependency*). Introduite par Paul David dans les années 1980, cette théorie explique que « sub-optimal or inefficient technologies can be locked in as industry standards, and in instances where there are significant network effects, these inefficiencies may persist for extended periods of time⁵²⁰ ».

À la vue de l'allure du diagramme précédent, il semblerait que le télescope soit apparu dans sa phase de maturité avant de stagner pendant plusieurs décennies, et que des nouvelles techniques innovantes viennent redynamiser l'allure de son évolution. Un moyen de mettre à l'épreuve notre hypothèse qu'une dynamique proprement technologique se dissimule derrière l'allure de ce diagramme est de coupler l'information historique sur la taille des miroirs aux conclusions génétiques issues de l'analyse historique. En précisant pour chacun des points à quelle lignée, ou sous-lignée, de télescope il appartient, nous obtenons un diagramme offrant un nouveau regard sur l'historique des performances des télescopes optiques (Fig. 57) :

⁵¹⁸ Dmitry Kucharavy et Roland De Guio, « Application of S-Shaped Curves », dans Carsten Gundlach, Udo Lindemann et Horst Ried (éd.), *Current Scientific and Industrial Reality. TRIZ Future 07*, Kassel, Kassel University Press, 2007, p. 81-88.

⁵¹⁹ Smaïl Aït-el-Hadj, *op. cit.*, p. 148.

⁵²⁰ Martin Stack et Myles P. Gartland, « Path Creation, Path Dependency, and Alternative Theories of the Firm », *Journal of Economic Issues*, vol. 37, n° 2, 2003, p. 487-494.

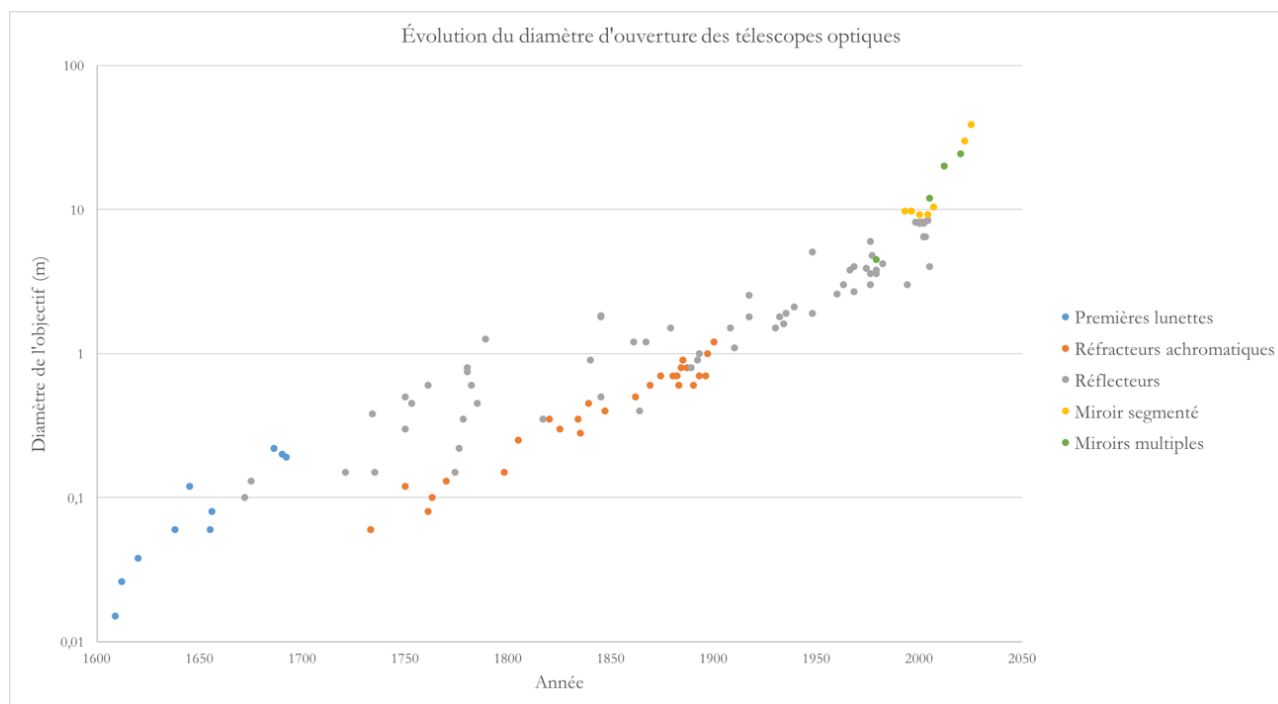


Figure 57 – Évolution du diamètre d'ouverture des télescopes optiques entre 1609 et 2019 suivant la lignée à laquelle ils se rattachent.
(© Thomas Guy)

L'analyse génétique se superpose à l'analyse historique dans ce diagramme performatif.

- De 1600 à 1700, nous remarquons l'apparition des premiers télescopes réfracteurs achromatiques.
- De 1700 à 1900 se retrouve la compétition entre les télescopes réflecteurs et les réfracteurs achromatiques.
 - Aux alentours de 1900, nous observons la saturation de ces derniers aux alentours de 1 mètre, due à l'impossibilité d'usiner des lentilles plus grandes.
- De 1900 à 2000 s'illustre l'essor des « grands réflecteurs ».
 - Aux alentours de 5 ou 6 mètres, nous notons une mini-saturation des télescopes à miroir à support de verre, nécessitant le passage à de nouveaux matériaux (miroirs fins, SiC, CFRP...).
 - Aux alentours de 10 mètres se retrouve le même phénomène de saturation que pour les lentilles, avec l'impossibilité d'usiner des miroirs monolithiques plus grands.
- À partir de 2000 débute la redynamisation du rythme via l'essor des NTTs (*New Technology Telescopes*) à base de miroirs multiples et/ou segmentés.

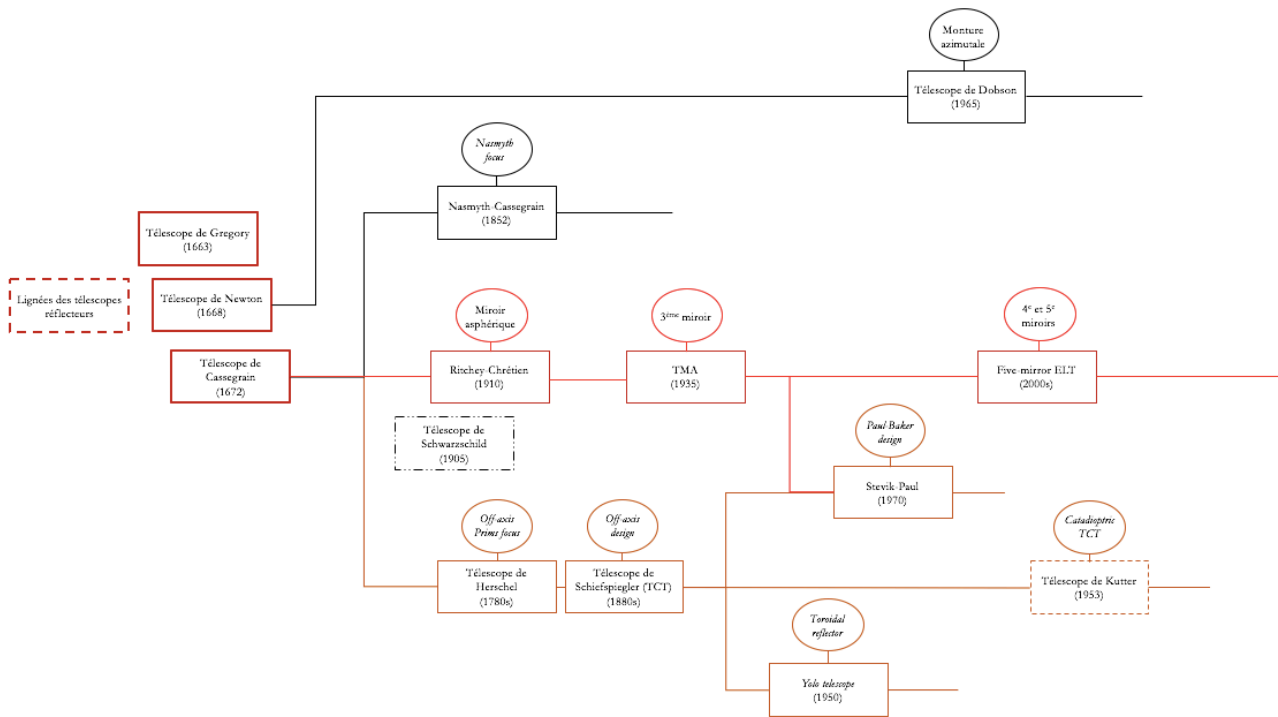


Figure 59 – Diagramme de lignées des télescopes réflecteurs.
(© Thomas Guy)

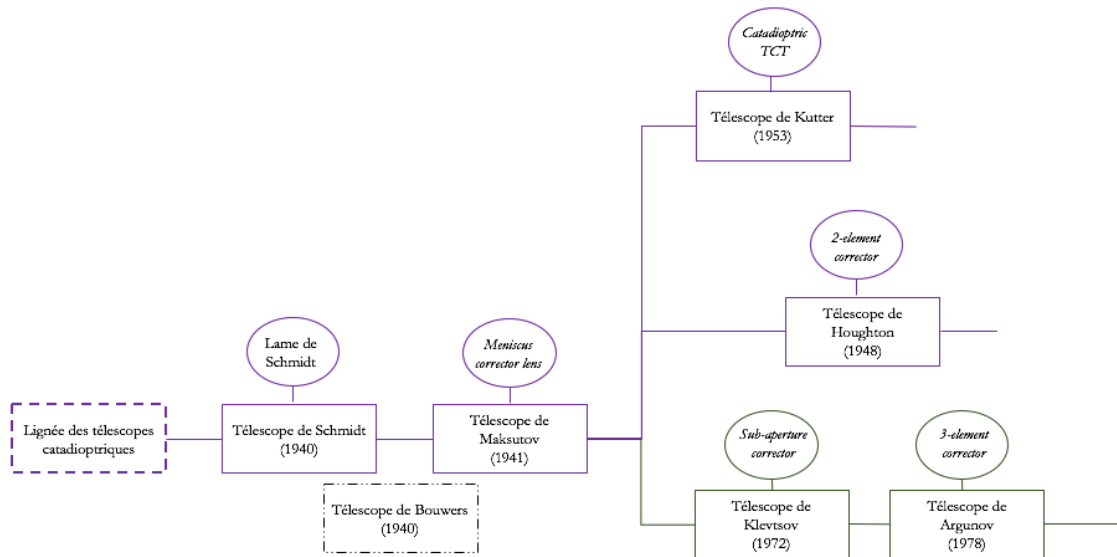


Figure 60 – Diagramme de lignées des télescopes catadioptriques.
(© Thomas Guy)

Finalement, nous réunissons sur un même diagramme les trois lignées identifiées au cours de l'enquête génétique, afin d'aboutir à une classification diagrammatique des différentes lignées et espèces de télescopes (Fig. 61). Remarquons que le diagramme génétique auquel nous aboutissons, s'ils s'apparentent à des cladogrammes issus de la biologie, sont plus complexes dans la mesure où ils présentent des croisements inter-espèces. Dans cette classification, du fait que nous n'avons pas évoqué chacun des éléments du graphique au cours de notre étude historique, certains types célèbres télescopes n'apparaissent pas (télescopes de Mersenne, de Herschel, de Dall-Kirkham ou de Wynne-Rosin notamment). En revanche, nous indiquons, à titre d'information, les lignées éteintes, comme celle des télescopes aériens, mais aussi les « lignées fantômes » qu'auraient pu initier les télescopes de Schwartzschild et de Bouwers, qui sont des concepts non exploités de manière concrète.

L'objectif de diminuer les aberrations chromatiques a conduit la lignée des télescopes réfracteurs (en bleu) à se séparer en deux sous-lignées : celle des réfracteurs achromatiques et celle des réfracteurs à très longue focale – dont est issue à son tour la sous-lignée des télescopes aériens. Concernant la lignée des télescopes réflecteurs (en rouge), les choix techniques opérés ont toujours visé la réduction des aberrations géométriques. La lignée « principale » est donc constituée de l'enchaînement Cassegrain - RCT - TMA, dont une généralisation est le Korsch. Cependant, une des particularités des télescopes réflecteurs étant l'obstruction du miroir primaire par le miroir secondaire, d'autres choix structuraux ont pu être effectués dans le but d'accéder ingénieusement au foyer image, donnant naissance notamment à la sous-lignée des télescopes « hors axe » (aussi appelés TCT pour *tilt compound telescopes*). Le Nasmyth-Cassegrain et le Dobson (en noir) ne sont pas à proprement parler des sous-lignées, mais ils sont indiqués à titre d'information. Enfin, la lignée des télescopes catadioptriques se décompose quant à elle en deux sous-lignées suivant que l'ensemble de lentilles correctrices occupe l'intégralité de l'ouverture (*full-aperture corrector* [en violet]) ou seulement une partie (*sub-aperture corrector* [en vert]). Il est en outre intéressant de noter les phénomènes d'hybridation qui se sont produits entre la lignée des télescopes réfracteurs et celle des télescopes réflecteurs, ainsi que celui ayant eu lieu via le recrutement du doublet, puis du triplet, achromatique par la lignée des TCT. Il est cependant difficile d'inclure sur ce genre de diagramme des informations sur les performances des dispositifs (point de vue fonctionnaliste) et sur le milieu associé du dispositif (qui sera davantage abordé au niveau de l'ensemble technique qu'est l'observatoire).

télescopes. La mise en œuvre opératoire de notre méthode dépasse le stade des propositions programmatiques. Cette mise à l'épreuve, nous a conduit, au cours de ces trois années de thèse, à affiner et préciser les concepts et outils. Ce va-et-vient entre développements conceptuels et confrontation aux faits permet une certaine réflexivité. L'étude mécanologique offre un nouveau regard, et même *des* nouveaux regards, sur le télescope. Nos travaux ne prétendent pas à l'exhaustivité ; il ne s'agit pas d'imposer une vérité dogmatique mais de proposer *une* relecture, génétique et novatrice, du télescope. En effet, tout comme l'analyse performative et l'analyse historique avant elle, l'analyse génétique suggère de prendre en considération les transitions entre différentes échelles de la technique, les efforts de développement des lignées n'ayant aujourd'hui plus lieu en priorité au niveau de l'individu (télescope) mais bien au niveau des éléments (miroirs et matériaux) et des ensembles (observatoires et réseaux).

Chapitre 6

Extension de l'analyse aux autres échelles de la technique

De nos jours, les ruptures d'échelle n'ont fait que s'accroître. Mais le problème philosophique s'est toujours révélé le même : obliger l'homme à faire abstraction des grandeurs communes, de ses grandeurs propres.

Gaston BACHELARD, *La Formation de l'esprit scientifique*

Après avoir analysé en détail l'évolution du télescope en tant qu'individu, nous souhaitons étendre l'analyse aux autres échelles de la technique. Le fait est que l'analyse mécanologique réalisée au chapitre précédent, dans ses dimensions historique, performative et génétique, nous a suggéré l'hypothèse que ce sont désormais ces autres échelles qui sont aujourd'hui dépositaires de la technicité des dispositifs astronomiques. De plus, une des hypothèses de Simondon porte sur le fait que le progrès repérable au niveau de l'organisation interne des individus techniques est *surdéterminé* par les progrès de la technicité aux niveaux d'organisation inférieurs (éléments et matériaux) et supérieurs (ensembles et réseaux). Nous nous intéresserons donc à l'évolution des miroirs (élément critique des télescopes réflecteurs) et de leurs matériaux avant de nous pencher sur l'insertion du télescope au sein de l'observatoire, puis du réseau d'observation. Ce sera l'occasion d'interroger la pertinence de l'application des concepts et outils développés pour l'étude des individus techniques aux autres échelles de la technique – application qui ne va pas de soi, tant la mécanologie, tant lafittienne que simondonienne, a été pensée avant tout pour saisir les dynamiques évolutives à l'échelle individuelle.

1. Le progrès à l'échelle élémentaire

1.1. L'évolution des miroirs et des lentilles

Des différents éléments constitutifs du télescope, l'objectif est le plus déterminant. Non seulement dépendent de lui la plupart des propriétés optiques de l'individu, mais il est aussi le plus complexe à produire. L'étude historique des lentilles et des miroirs utilisés en astronomie oblige à combiner les approches internalistes et externalistes, les besoins des scientifiques et les capacités des artisans, puis des industriels, étant profondément intriqués, et ce, dès l'apparition des premières lunettes :

Le milieu technique avait atteint un niveau de qualité suffisant pour que les problèmes nouveaux de fabrication, posés par les récentes découvertes [les lunettes astronomiques], puissent recevoir une solution ; mais encore fallait-il qu'une demande se manifeste pour que les ateliers cherchent à résoudre ces problèmes. C'est ainsi qu'apparut le besoin d'une spécialisation plus poussée et que l'art des constructeurs s'étendit à des domaines insoupçonnés de leurs prédécesseurs. Le nombre des ateliers s'accrut en même temps qu'évoluaient les conditions économiques de leurs activités professionnelles⁵²¹.

La nouvelle demande, des militaires puis des scientifiques, pour des lunettes de qualité a stimulé le développement d'une nouvelle industrie. La qualité des lentilles a fortement progressé au cours des XVII^e et XVIII^e siècles alors que, dans le même temps, « les progrès de l'optique théorique furent assez lents⁵²² ». Inversement, « la fabrication des télescopes à réflexion est restée jusqu'à la fin du XVIII^e siècle assez languissante⁵²³ » mais les progrès théoriques furent bien plus importants, comme en témoigne la diversité des architectures proposées au niveau de l'individu. Comment expliquer ces deux trajectoires inverses ? À titre d'hypothèse, nous suggérons que cette situation découle de l'asymétrie existant entre les deux lignées par rapport aux aberrations chromatiques. Leur absence au sein des réflecteurs a permis aux scientifiques de se concentrer sur le traitement théorique des aberrations d'ordre supérieur, tandis que leur présence au sein des réfracteurs, due à la qualité des optiques confectionnées, y compris après l'invention du doublet achromatique, a fait de l'artisan le principal moteur du progrès.

⁵²¹ Maurice Daumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, *op. cit.*, p. 41.

⁵²² *Ibid.*, p. 45.

⁵²³ *Ibid.*, p. 222.

L'adaptation de l'argenture chimique aux miroirs de télescope marque un tournant dans l'histoire de cet instrument. Si l'utilisation de miroirs à support de verre était connue depuis le XV^e siècle, leur utilisation en astronomie restait limitée par le fait que le matériau réfléchissant employé était du mercure (métal toxique, s'oxydant rapidement et peu maniable), et surtout par le fait qu'il s'agissait de miroirs étamés : la surface réfléchissante était située derrière la couche de verre. Suite aux travaux de Liebig, Steinheil et Foucault, le procédé d'argenture, qui consiste à déposer une fine couche d'argent (matériau malléable, très réfléchissant et peu oxydant) sur un support de verre, fut adapté aux miroirs de télescope. À partir de 1857, les fabricants de miroirs purent donc adapter les connaissances en verrerie issues du travail des lentilles ; en effet, « les différentes étapes de la confection des miroirs rappellent assez celles de la fabrication des lentilles⁵²⁴ ». Le recours aux miroirs à support de verre permit ainsi une redynamisation du progrès de la lignée des télescopes réflecteurs via l'adaptation d'un procédé chimique et la récupération du savoir-faire des maîtres verriers.

Parallèlement aux travaux sur les matériaux employés, les objectifs des télescopes ont aussi vu leur géométrie grandement évoluer. Les lentilles comme les miroirs peuvent être schématiquement répartis en quatre familles de *complexité*⁵²⁵ croissante :

1. Les objectifs plans (dont l'unique représentant est le miroir plan).
2. Les objectifs sphériques (lentille biconvexe, plano-convexe ou *meniscus* ; miroir sphérique), dont les surfaces sont des sphères ou des portions de sphère.
3. Les objectifs coniques :
 - a. Paraboliques.
 - b. Hyperboliques.
 - c. Elliptiques.
4. Les objectifs toroïdaux, combinant les propriétés des objectifs sphériques et cylindriques (sous-catégorie des objectifs sphériques, étendus selon une dimension).

Les miroirs plans ne permettant pas la focalisation, ils ne jouent qu'un rôle « annexe » en astronomie (au sein des Newton ou des Nasmyth par exemple) ; ils ne peuvent servir de miroir primaire pour les grands télescopes. Les objectifs sphériques présentent le double avantage d'être

⁵²⁴ *Ibid.*, p. 224.

⁵²⁵ Cette complexité de l'élément est d'ordre avant tout structural, mais traduit aussi la complexité de deux opérations : celle réalisée par l'individu correspondant et celle de l'ensemble requis pour produire ce type de miroir.

facilement usinables et, ne présentant pas d'axe préférentiel, ils sont plus facilement centrables⁵²⁶ ; en revanche, ils présentent davantage d'aberrations, que l'on peut éliminer en utilisant des objectifs, ou des combinaisons d'objectifs, plus complexes. Si les propriétés des objectifs coniques étaient connues depuis longtemps, la difficulté pour les polisseurs de lentilles comme de miroirs à obtenir la forme désirée a retardé leur adoption en astronomie. En effet, ce type d'objectifs présente une caractéristique très particulière :

The property of conics that is the foundation of reflecting telescopes: the normal at any point of a conic bisects the two radii issuing from that point (Apollonius theorem) [...] This means that all optical rays issuing from a source located at one of the foci will converge at the other focus and thus form a perfect image of the source⁵²⁷.

Cette façon de considérer l'élément technique comme la matérialisation des propriétés mathématiques des coniques indique d'emblée une haute *technicité* de l'élément, que l'on pourrait qualifier de *mathématisée*. Cette façon de se le représenter montre à nouveau la primauté de l'opération de focalisation sur les considérations structurales matérielles.

1.2. La diminution de la masse surfacique

Dès l'apparition de la lunette, le problème de la qualité des optiques et, à travers elle, de celle des matériaux, s'est posé : « La première difficulté à surmonter, et la plus grande, était d'abord pour l'opticien de se procurer du verre de qualité convenable⁵²⁸ ». Depuis, cette difficulté n'a fait que s'aggraver, en raison de la quête éperdue des astronomes des grandes ouvertures. Obtenir des objectifs de grande taille n'est en effet pas sans poser un certain nombre de problèmes, à commencer par les déformations causées par la gravité. Usiner un objectif de la forme désirée peut déjà être un défi en soi, notamment lorsque la taille, tout comme la précision sur la surface, devient importante. Mais la situation s'aggrave lorsque l'objectif en question doit conserver sa forme au cours de son utilisation : lentilles et miroirs ont tendance à se déformer sous l'effet de leur propre poids, entraînant un écart par rapport à la forme optimale et dégradant les performances du télescope. Dans le cas des lentilles, ce phénomène est aggravé par le fait que celles-ci ne peuvent être tenues que par les bords et qu'il est impossible de descendre sous une certaine masse volumique

⁵²⁶ David R. Shafer, « Four-mirror unobscured anastigmatic telescopes with all-spherical surfaces », *Applied Optics*, vol. 17, n° 7, 1978, p. 1072.

⁵²⁷ Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 106-107.

⁵²⁸ Maurice Daumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, *op. cit.*, p. 47.

pour les verres employés. C'est aussi une des raisons pour lesquelles les télescopes réflecteurs ont triomphé des réfracteurs : la possibilité de lutter plus efficacement contre les problèmes de *sagging* permet d'atteindre plus facilement des ouvertures importantes.

The primary mirror is the most important component of an optical telescope. Its surface should maintain high accuracy under the telescope operating conditions. The weight and cost of the mirror are determining factors for the telescope total weight and total cost⁵²⁹.

Les miroirs à support de verre ont progressé jusqu'à atteindre une taille de 5 à 6 mètres⁵³⁰. Au-delà, leur trop grande masse entrave de manière rédhibitoire la maniabilité du dispositif global. Plusieurs solutions s'offrent alors, qui passent par le développement de nouveaux types de miroirs, de nouvelles structures de miroir ou de nouveaux matériaux. Cependant, cet amincissement des miroirs fait qu'il devient impossible de maintenir leur forme idéale. Ils se déforment sous leur propre poids et on retombe sur les problèmes de *sagging*, dont on aurait pu penser s'être débarrassé. En revanche, la minceur de ces nouveaux miroirs autorise le contrôle et la correction en temps réel de leur forme : « Instead of relying on passive means to compensate for gravity and thermal effects, it becomes advantageous to use an "active system" to control the optical quality⁵³¹ ».

On parlera ainsi d'« optique active » pour désigner cette nouvelle technique, qui passe par l'ajout de nouveaux éléments techniques. Couplés au système informatique, les *actuateurs*⁵³², ou actionneurs, permettent la détection de l'écart à la forme optimale et, en retour, le maintien de celle-ci, ce qui introduit une boucle de rétroaction au sein du fonctionnement du dispositif. Sans nous étendre sur le sujet, notons que l'actuateur illustre parfaitement la possibilité de *réversibilité* entre les fonctions d'effecteur et de senseur :

[II] est outil en tant qu'[il] permet au sujet d'agir sur l'objet, et instrument en tant qu'[il] apporte au sujet des signaux venus de l'objet ; [il] véhicule, amplifie, transforme, traduit et conduit dans un sens une action et en sens inverse une information⁵³³.

⁵²⁹ Jingquan Cheng, *op. cit.*, p. 120.

⁵³⁰ Le télescope Hale, mis en service en 1949, et le BTA-6 de 1975, sont, avec respectivement 5 et 6 mètres d'ouverture, les plus grands télescopes à support de verre classique.

⁵³¹ Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 311.

⁵³² Jingquan Cheng, *op. cit.*, p. 237.

⁵³³ Gilbert Simondon, ILFI, p. 523.

Le principe de l'optique active pour corriger et maintenir la forme des miroirs fins remonte aux années 1970⁵³⁴ mais il a fallu attendre 1989 et la mise en service du *New Technology Telescope* (NTT) de l'ESO pour que soit implémenté de manière effective le premier système d'optique active. Nous qualifierons cette technique d'optique active *monolithique* (OAc¹) pour souligner le fait que les actuateurs sont là pour corriger la forme d'un unique miroir.

Parallèlement à ces développements, la volonté de diminuer la masse des miroirs employés, combinée au besoin d'augmenter la surface collectrice du télescope, a entraîné une recherche de diminution de la masse surfacique du miroir primaire. Pour illustrer cette tendance, restreignons-nous au cas de l'astronomie spatiale. Il existe, certes, plusieurs facteurs économiques qui interviennent dans l'évolution des lignées techniques, mais si l'on veut comprendre le progrès des techniques, en général, « ce sont surtout les domaines où les conditions techniques l'emportent sur les conditions économiques (aviation, matériel de guerre) qui sont les lieux des progrès les plus actifs⁵³⁵ ». À ce titre, l'astronomie spatiale apparaît extrêmement contrainte, notamment par les limites du lanceur en ce qui concerne le volume et le poids de la charge utile⁵³⁶. La figure 62 illustre la diminution de la masse surfacique des miroirs mobilisés au sein des observatoires spatiaux :

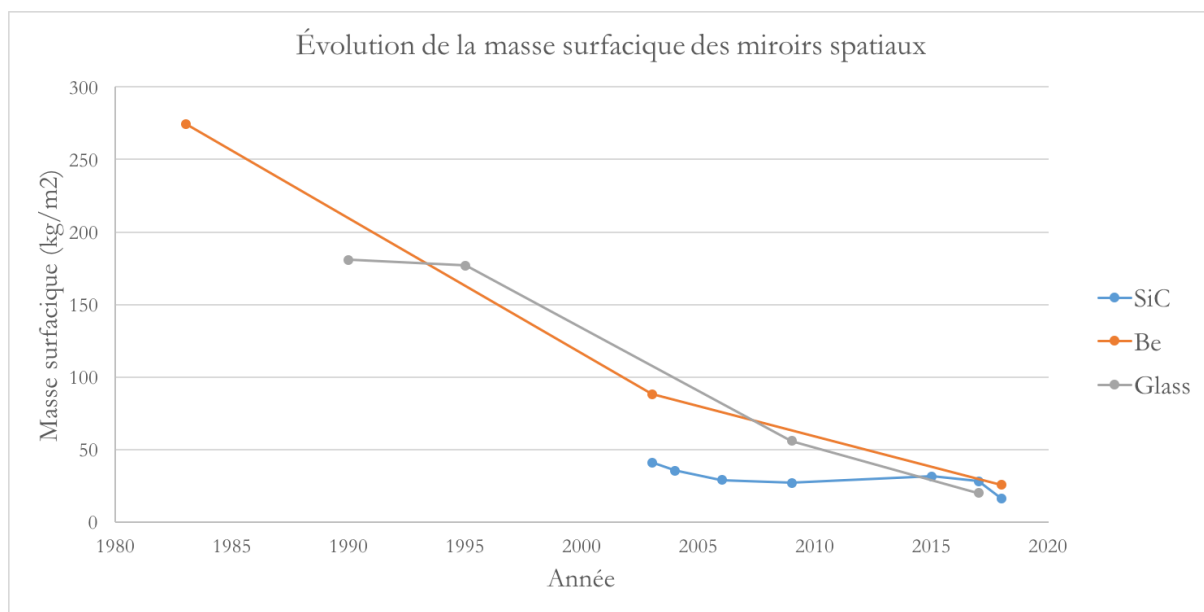


Figure 62 – Évolution de la masse surfacique des miroirs spatiaux.
(© Thomas Guy, adapté en partie de Minier et al., *op. cit.*, p. 155)

⁵³⁴ John W. Hardy, « Active Optics: A New Technology for the Control of Light », *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, juin 1977.

⁵³⁵ Gilbert Simondon, MEOT, p. 30.

⁵³⁶ Vincent Minier et al., *Inventing a space mission, op. cit.*, p. 3.

Nous avons distingué l'évolution selon les trois principaux matériaux utilisés comme substrat, à savoir le(s) verre(s) (Glass), le béryllium (Be) et le carbure de silicium (SiC). Après une forte diminution⁵³⁷, on constate une stagnation dans l'évolution de la masse surfacique aux alentours de 5-10 kg/m², et ce, quel que soit le matériau employé. Pour reprendre un terme déjà utilisé, nous sommes en présence d'une situation de *saturation*. Pour un matériau donné, il est en effet impossible de descendre sous une certaine masse surfacique ; pour diminuer encore celle-ci, il est nécessaire de changer de matériau (tout comme il faut changer d'architecture quand l'individu technique se trouve dans une situation de saturation). Néanmoins, il existe un second niveau de saturation qui limite les masses surfaciques atteignables. Franchir ce second niveau de saturation nécessite d'effectuer une *rupture technologique*, qui passe par une nouvelle façon d'appréhender et de concevoir l'élément technique, désormais assimilé à un individu technique.

1.3. La segmentation et le passage à l'optique active

Si la construction des miroirs à support de verre classique n'est plus envisageable au-delà des 5 à 6 mètres de diamètre, la réalisation de miroirs monolithiques – quels que soient leur finesse, leur structure ou le matériau employé – ne l'est pas davantage dès qu'est franchi le cap des 8 à 9 mètres⁵³⁸. Plusieurs raisons à cela⁵³⁹ :

- Disponibilité réduite de matériau vierge pour le miroir.
- Trop grandes déviations optiques.
- Risque élevé de bris dus à une mauvaise manipulation.
- Déformations plus importantes dues aux changements thermiques.
- Chambre à vide pour les revêtements du miroir qui devient trop grande, et donc trop coûteuse.

Pour toutes ces raisons, à la fois techniques, économiques et logistiques, le principe des *miroirs segmentés* a émergé⁵⁴⁰. L'idée est de prolonger la logique de conception de l'optique active et de réaliser un grand miroir à partir de segments plus petits et juxtaposés. L'alignement des segments, réalisé là encore par des actionneurs, doit être de l'ordre de la longueur d'onde du rayonnement

⁵³⁷ Pour prendre l'exemple des miroirs à support de verre, la masse surfacique est passée de 180 kg/m² à 5 kg/m² pour les NGST (*next generation space telescopes*).

⁵³⁸ Les plus grands miroirs monolithiques sont les deux miroirs du Large Binocular Telescope, de 8,4 mètres de diamètre chacun.

⁵³⁹ Jerry Nelson, « Segmented Mirror Telescopes », dans Renaud Foy et Françoise Claude Foy (dir.), *Optics in Astrophysics*, Dordrecht, Springer, 2006, p. 62-63.

⁵⁴⁰ Il est intéressant de noter que la segmentation constitue le premier principe mobilisable de la TRIZ.

incident, et cette précision nanométrique n'a été possible que grâce aux développements de l'informatique. Proposé la même année (1977) que l'OAc¹ et pour la réalisation des télescopes du W. M. Keck Observatory, il a fallu attendre 1990 pour que le concept des miroirs segmentés voie effectivement le jour. Nous parlerons d'optique active « polyolithique » (OAc²) pour désigner ce nouvel usage de l'optique active, qui se différencie par le fait que les actionneurs sont là pour aligner *plusieurs* miroirs afin d'obtenir un objectif de la géométrie désirée. Si les termes « optique active » et « actionneurs » sont communs aux deux technologies, il faut cependant garder à l'esprit que celles-ci sont différentes dans leur essence :

There are two major active optic systems for optical telescopes: one for a monolithic mirror with force and moment actuators and the other for a segmented mirror with displacement actuators⁵⁴¹.

OAc¹ et OAc² s'inscrivent toutes deux dans la logique de complexification identifiée au chapitre précédent, dans la mesure où elles nécessitent l'ajout de nouveaux éléments (les actionneurs mais aussi le système informatique sous-jacent) afin d'être effectives. Cette double tendance du passage à l'actif et à la *segmentation* intervient non plus au niveau de l'individu qu'est le télescope, mais au niveau du miroir primaire, vu comme élément technique. Comme Simondon le postulait, « l'évolution des éléments techniques peut retentir sur celle des individus techniques⁵⁴² ». Il est ainsi à noter que le développement de l'optique active a profondément bouleversé l'histoire du télescope en redynamisant la *course à l'ouverture*, conduisant à des dispositifs techniques toujours plus grands (Fig. 63) :

⁵⁴¹ Jingquan Cheng, *op. cit.*, p. 244.

⁵⁴² Gilbert Simondon, MEOT, p. 81.

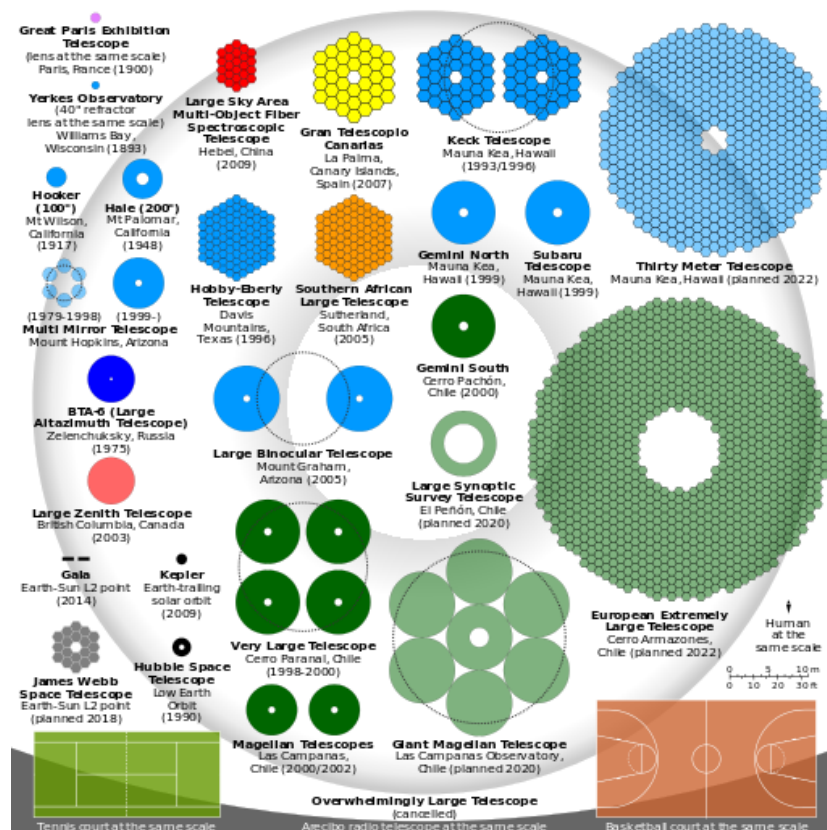


Figure 63 – Représentation des plus grands miroirs de télescope.

(Source : Wikipédia. © Cmglee)

On le voit sur cette remarquable illustration, la plupart des plus grands télescopes en activité possèdent des miroirs segmentés, ou multiples, et les ELT programmés y auront aussi recours :

- *Giant Magellan Telescope* (GMT) : sept miroirs de 8,4 mètres pour une ouverture équivalente de 24,5 mètres.
- *Thirty Meter Telescope* (TMT) : 492 segments hexagonaux de 1,4 mètre pour une ouverture équivalente de 30 mètres.
- *European Extremely Large Telescope* (E-ELT) : 798 segments hexagonaux de 1,45 mètre pour une ouverture équivalente de 39 mètres.

Avec les miroirs segmentés, la saturation des ouvertures autour de la dizaine de mètres est donc largement dépassée. Il ne s'agit pas d'un détour, mais bien du franchissement d'une contradiction technique caractéristique d'une invention majeure

2. L'échelle infra-élémentaire

2.1. Les propriétés des matériaux

Il est possible de définir une échelle de la technique qui se situe en dessous de celle des éléments en s'intéressant à la composition chimique et la microstructure des matériaux les composant. Cette échelle n'a été que peu investiguée par G. Simondon et encore aujourd'hui, les travaux à son sujet restent trop parcellaires pour constituer un tout cohérent. Pourtant, les matériaux ont toujours été au centre des préoccupations de ceux qui font la technique, car de la même façon que n'importe quelle structure ne permet pas d'implémenter n'importe quelle opération, n'importe quel matériau ne permet pas de réaliser n'importe quelle structure ; si un avion en or pourrait être désirable pour certains, il est peu probable qu'un tel dispositif soit viable.

En astronomie, les problèmes posés par l'amélioration de la qualité des matériaux sont apparus très tôt et, « jusqu'au milieu du XIX^e siècle, l'industrie des instruments d'optique fut constamment entravée par le problème de la matière première et même plus tard, ce problème ne fut jamais complètement résolu⁵⁴³ ». Pour les télescopes réfracteurs, le *progrès* des lentilles suit celui de l'industrie du verre. Jusqu'au début du XIX^e siècle, face à l'absence d'ouvriers spécialisés, faute d'un marché et d'une demande suffisants, les astronomes devaient se fournir « dans la fabrication courante de verres pour miroitiers et lunetiers⁵⁴⁴ », avant de réaliser eux-mêmes le polissage et la fabrication de leurs objectifs. Les XIX^e et XX^e siècles ont ensuite vu se constituer une industrie du verre plus spécialisée, permettant de répondre aux nouvelles exigences de l'astronomie observationnelle, notamment sous l'impulsion des industriels allemands Carl Zeiss, Ernst Abbe et Otto Schott⁵⁴⁵. Si l'histoire des lentilles épouse grandement celle du verre, c'est parce que celui-ci est le plus ancien matériau, mais aussi le plus efficace, pour réaliser l'opération de réfraction. Le développement des verres dits « organiques » (en réalité des plastiques, de ceux qui constituent les visières des casques des astronautes, par exemple) n'est pas venu entamer cette prédominance du verre dit « naturel », car malgré une plus grande fragilité, le verre naturel disperse beaucoup moins les couleurs que le verre organique (à indice de réfraction égal).

⁵⁴³ Maurice Daumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, *op. cit.*, p. 47.

⁵⁴⁴ *Ibid.*, p. 48.

⁵⁴⁵ Pour plus de détails sur l'histoire de l'industrie du verre, nous renvoyons à Charles R. Kurkjian et William R. Prindle, « Perspectives on the History of Glass Composition », *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 81, n° 4, janvier 2005, p. 795-813.

La situation pour les télescopes réflecteurs est légèrement différente. En effet, la diversité des matériaux réfléchissants est bien plus grande et la découverte du procédé de revêtement par les verriers vénitiens au XV^e siècle a compliqué les choses en séparant les propriétés du support des propriétés du revêtement⁵⁴⁶. Historiquement, les miroirs, notamment ceux utilisés en astronomie dans les premiers télescopes réflecteurs, étaient en métal. Possédant un faible pouvoir réfléchissant, s'oxydant rapidement et nécessitant des repolissages périodiques qui venaient altérer leur forme, ils furent rapidement supplantés une fois le procédé d'argenture découvert. De plus, ces premiers miroirs étaient souvent étamés et recouraient au mercure. Ils présentaient par conséquent le double inconvénient d'employer un métal toxique pour l'être humain, et de présenter la surface réfléchissante derrière le support de verre, ne supprimant donc pas les aberrations chromatiques comme souhaité. L'argenture chimique, mise au point par Liebig en 1835 et perfectionnée par Steinhel en 1856 et Foucault en 1857, permit de remédier à ces deux défauts et devint le procédé employé dans la réalisation des miroirs de grande taille, avant d'être à son tour abandonnée au profit de l'aluminure, bien plus complexe et mise au point dans les années 1930.

Le vrai défi technique reste cependant, pour la lignée des grands télescopes réflecteurs, la réalisation du disque brut du miroir (*mirror blank*). En effet, le support sur lequel est déposée la surface réfléchissante doit répondre à un ensemble de contraintes thermiques et mécaniques très strictes : le télescope doit pouvoir opérer dans de larges gammes de température et supporter des manipulations mécaniques sans que les déviations du miroir par rapport à sa forme idéale n'excèdent la fraction de nanomètre. Historiquement, le matériau employé était le verre, famille qui possède de nombreuses ramifications (à ce stade, nous préférons ne pas employer le terme de « lignées » pour les matériaux) : les sodocalciques (espèce historique), les borosilicates, les verres de silice, de quartz, et enfin les vitrocéramiques. Ces différentes sortes de verre furent à leur tour concurrencées au cours du XX^e siècle par de nouveaux matériaux : l'aluminium, le carbure de silicium, le béryllium et les polymères de carbone (*carbon fiber reinforced polymer* ou CFRP).

Afin de comparer les avantages et les inconvénients de ces différents matériaux, les industriels comme les astronomes ont souvent recours à des tableaux d'analyse synchronique (voir chapitre 3). Ces derniers permettent de comparer visuellement les différentes FoM de ces matériaux suivant des critères agrégés. Dans le cas des matériaux utilisés pour les miroirs des télescopes, on s'intéresse

⁵⁴⁶ Le principe du revêtement existe aussi pour les lentilles, qu'il soit antireflet ou filtrant certaines longueurs d'onde, mais son impact sur l'histoire des télescopes réfracteurs est bien moins déterminant.

généralement à la *stabilité thermique*⁵⁴⁷ et à la *rigidité spécifique*⁵⁴⁸, critères à maximiser et permettant de rendre respectivement compte des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux considérés. En compilant les données issues de publications scientifiques⁵⁴⁹ et industrielles⁵⁵⁰, nous avons obtenu le graphique suivant (Fig. 64) :

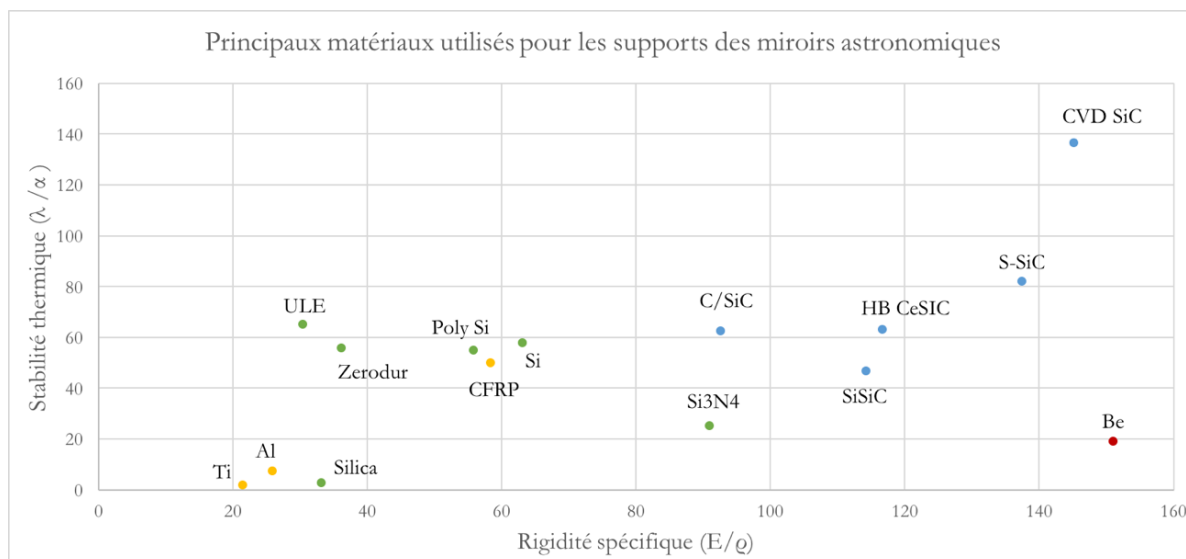


Figure 64 – Figures de mérite des principaux matériaux utilisés pour les miroirs de télescope.

(© Thomas Guy)

Nous avons discriminé les matériaux suivant la « famille » à laquelle ils se rattachent : verre (en verre), carbure de silicium (en bleu), béryllium (en rouge) et autres matériaux (en jaune). Ce type de diagramme *synchronique* permet d'appréhender rapidement les avantages respectifs de chaque matériau : les deux critères étant à maximiser, les matériaux en haut à droite doivent être préférés. On comprend ainsi pourquoi le carbure de silicium est apparu comme un matériau miracle, dans la mesure où, à stabilité thermique comparable (voire meilleure), il présente des garanties mécaniques bien plus importantes. En revanche, il est délicat de trancher, par exemple, entre les performances du béryllium et celles du CVD SiC, ces deux points étant Pareto-optimaux⁵⁵¹. Les décideurs sont couramment confrontés à ce genre de problèmes, qui renvoient directement aux problématiques de l'optimisation multicritère. Généralement, les solutions adoptées résultent de

⁵⁴⁷ Rapport entre la conductivité thermique λ et le coefficient de dilation thermique α .

⁵⁴⁸ Rapport entre le module de Young E et la densité ρ .

⁵⁴⁹ Stanley J. Kishner *et al.*, « Large Stable Mirrors: A Comparison of Glass, Beryllium, and Silicon Carbide », *SPIE Proceedings*, vol. 1335, novembre 1990 ; Lawrence E. Matson *et al.*, « Silicon Carbide Technologies for Lightweighted Aerospace Mirrors », septembre 2008.

⁵⁵⁰ Informations en provenance de Mersen Boostec et d'EADS Astrium.

⁵⁵¹ C'est-à-dire optimal uniquement selon *un* axe, et non globalement.

trade-offs entre performances, impératifs économiques et maturité technologique, et elles le sont à l'issue de processus qualitatifs. À titre d'hypothèse de travail, nous mentionnons la possibilité d'utiliser les outils issus de l'AMCD (aide multicritère à la décision), et notamment ceux issus de la méthodologie PROMETHEE-GAIA⁵⁵². En effet, le tableau de données (Tab. 9) à l'origine de la figure 53 s'apparente à un tableau multicritère « action-critère » tel qu'étudié par ces méthodes :

Tableau 9 – Propriétés des différents matériaux utilisés pour les miroirs de télescope.

(Source : Stanley J. Kishner et al., art. cit. ; Lawrence E. Matson et al., art. cit. ; Mersen Boostec.
© Thomas Guy)

	Module d'Young E (GPa)	Densité ρ (kg/dm ³)	CTE α (E ⁻⁶ m/mK)	Conductivité thermique λ (W/mK)	Rigidité spécifique E/ ρ	Stabilité thermique λ/α
S-SiC	440	3,2	2,2	180	137,5	81,89
Béryllium	287	1,9	11,3	216	151,05	19,12
Zerodur	92	2,54	0,03	1,67	36,22	55,67
HB CeSiC	350	3	2,3	145	116,67	63,04
Si ₃ N ₄	300	3,3	1	25	90,91	25
Aluminium	70	2,7	23	167	25,93	7,26
Silicon (Si)	147	2,33	2,6	150	63,09	57,69
Poly Si	130	2,33	2,74	150	55,79	54,75
CVD SiC	466	3,21	2,2	300	145,17	136,36
Carbon/SiC	250	2,7	2	125	92,59	62,5
Si-SiC	320	2,8	4,5	210	114,29	46,67
Fused Silica	73	2,2	0,55	1,5	33,18	2,72
ULE	67	2,2	0,02	1,3	30,45	65
Titane	100	4,65	12	21,9	21,50	1,83
CFRP	105	1,8	0,2	10	58,33	50

⁵⁵² Voir à ce sujet Alena Kocmanová, Marie Dočekalová, Jiří Luňáček, « PROMETHEE-GAIA Method as a Support of the Decision-Making Process in Evaluating Technical Facilities », *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 413, 2013, p. 44-53 ; Jean-Pierre Brans, « L'Ingénierie de la décision : élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE », dans Maurice Landry et Raymond Nadeau, *L'aide à la décision : nature, instruments et perspectives d'avenir*, Québec, Presses de l'Université Laval, 1986, p. 183-213.

Il pourrait être intéressant de faire du *retro-engineering* afin de retrouver les pondérations choisies consciemment ou inconsciemment par les décideurs, et de comprendre ainsi les logiques de décision.

2.2. La pertinence du concept de lignée de matériaux

Reprenant la figure 64, nous nous rendons compte qu'il est possible de regrouper les différents matériaux au sein de zones d'autant plus cohérentes que les matériaux en question appartiennent aux mêmes *familles*. Nous retrouvons en outre l'analogie du phénomène d'hybridation, rencontré au niveau des télescopes, par exemple, entre la famille des verres et celle des céramiques, donnant naissance à la famille des vitrocéramiques.

Nous avons également eu l'occasion de parler du concept de Pareto-optimalité, directement relié à des concepts déjà rencontrés lors de l'étude des individus techniques : la contradiction et la saturation. En effet, les matériaux des miroirs spatiaux doivent avoir un certain nombre de caractéristiques parfois contradictoires (densité et résistance, par exemple). De plus, il n'est parfois plus possible de faire progresser les performances d'un matériau – à travers les procédés de fabrication notamment (pressage, frittage, dopage, etc.) : un nouveau gain de performance doit passer par l'introduction d'un nouveau matériau permettant de résoudre et dépasser la contradiction/saturation.

Pour autant, peut-on parler de lignées techniques de matériaux ? Prenons le cas du carbure de silicium. Cette céramique, presque inexistante à l'état naturel mais que l'on peut trouver dans le milieu circumstellaire, est produite industriellement depuis le début du XX^e siècle, mais son emploi dans la réalisation des miroirs astronomiques commence seulement avec le XXI^e siècle⁵⁵³. La grande rigidité et l'importante stabilité thermique du carbure de silicium en font un matériau tout désigné pour l'astronomie spatiale, les miroirs des télescopes devant résister aux secousses et vibrations du décollage et ne pas trop se déformer lors du passage de l'environnement terrestre à l'espace. Par ailleurs, le SiC peut aussi être employé dans la réalisation des autres éléments du télescope, notamment le tube et la monture, permettant de réaliser des télescopes *tout-SiC*⁵⁵⁴. Certains auteurs considèrent ainsi que l'introduction des miroirs en carbure de silicium, et plus généralement des

⁵⁵³ Avec son miroir de 3,5 mètres en carbure de silicium, l'observatoire *Herschel* possède le plus grand télescope en orbite. Les miroirs des télescopes de *Gaia* constituent les autres représentants emblématiques des miroirs en SiC, et devraient être rejoints par ceux de l'observatoire Euclid en 2020.

⁵⁵⁴ Michel Bougoïn, « All-SiC Telescope Technology at EADS-Astrium ».

télescopes en carbure de silicium, marque le passage d'un seuil de concrétisation dans l'évolution des télescopes spatiaux :

The SiC telescope defines a novel concretised stage in the development of space telescopes. This radical innovation or invention of a technical lineage has managed to become the European prime technology for space telescopes⁵⁵⁵.

Mais « l'innovation radicale » que constitue le télescope SiC est peut-être davantage à prendre au sens schumpétérien :

The SiC telescope for Herschel is a true invention leading to a radical innovation in space industries in the sense of Schumpeter, i.e. a new combination of production means, which increases the value of production and, as a result, profit⁵⁵⁶.

Car l'adoption de cette technologie est aussi le résultat d'une lutte politique, et économique, entre la filière européenne, partisane du SiC à travers son soutien à EADS et Boostec, et la filière américaine, favorable au béryllium, dont les plus grands gisements sont situés aux États-Unis. Dans les deux cas, il est possible de parler d'« invention » et de « lignée » pour le SiC en étudiant le rejaillissement sur les performances aux échelles supérieures, à savoir le miroir, le télescope et l'observatoire. L'autre tentative de réponse aux problèmes soulevés par le concept de lignée de matériaux se trouve à la croisée de G. Simondon et de B. Gille. Au fond, la mesure de la technicité du matériau n'est peut-être que celle de l'ensemble, voire du système technique, qui lui a donné naissance. Étudier l'évolution des matériaux reviendrait alors à étudier l'évolution des systèmes techniques :

C'est en définitive l'analyse dynamique proprement dite qui paraît, au moins pour cette période de début de la recherche, la plus fructueuse. Non seulement elle permet de déceler structure et systèmes, mais elle met en évidence des limites structurelles qui contraignent à l'invention, qui conduisent aux mutations du système⁵⁵⁷.

L'augmentation de la technicité des individus techniques (concrétisation) rejaillit sur celle des éléments puis, en fin de compte, sur celle des matériaux. Il doit donc être possible de montrer des

⁵⁵⁵ Vincent Minier et al., *Inventing a space mission*, *op. cit.*, p. 152.

⁵⁵⁶ *Ibid.*, p. 156.

⁵⁵⁷ Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques*, *op. cit.*, p. 35.

dynamiques d'évolution propres à cette échelle de la technique. Celle-ci mériterait d'ailleurs d'être étudiée pour elle-même et pas uniquement en fonction de la surdétermination qu'elle exerce sur les performances aux échelles supérieures. Toutefois, dans la perspective de l'étude des lignées techniques, il faut garder à l'esprit que « la substitution d'un matériau traditionnel par un autre stimule l'art de l'ingénieur en lui ouvrant de nouvelles perspectives⁵⁵⁸ » et permet la réalisation de solutions techniques qui n'existaient alors qu'à l'état de potentialités⁵⁵⁹.

2.3. Aparté : les étranges miroirs liquides

Pour finir, nous souhaitons mentionner l'expérience des télescopes à miroirs liquides. Le principe repose sur la mise en rotation d'un liquide réfléchissant, en l'occurrence du mercure, métal liquide à température ambiante et d'une réflectivité relativement élevée (80 %). La surface épouse alors une parabole parfaite, et la distance focale du miroir parabolique ainsi réalisé est directement dépendante de la vitesse de rotation (plus celle-ci est élevée, plus la courbure du miroir sera importante). L'histoire des miroirs liquides est relativement récente, et assez peu documentée. Un de ses cas les plus représentatifs⁵⁶⁰ est le *Large Zenith Telescope* (LZT) de 6 mètres de diamètre de l'université de Colombie-Britannique, dont la vitesse de rotation est de 8,5 tour/s et dont l'épaisseur du mercure n'est que de 1 millimètre. Ce type de miroir présente cependant un certain nombre d'inconvénients :

- Son emplacement doit être éloigné de toute source de vibrations afin de conserver une surface la plus lisse possible ;
- La vitesse de rotation doit être parfaitement uniforme afin d'éviter les changements de focalisation ;
- Le miroir ne peut être utilisé qu'en position zénithale ;
- La taille de l'ouverture est limitée par la faible viscosité du mercure ;
- Il y a vaporisation progressive du mercure à température ambiante.

⁵⁵⁸ Michel Cotte, « Les matériaux et les structures au départ de la première industrialisation (début XIX^e) », dans Jean Rosmorduc, *Chronologie des sciences et des techniques*, Brest, CRDP de Bretagne, 1997, p. 264.

⁵⁵⁹ Voir Annexe B.3 : l'adoption du Nd:KGW a permis la réalisation d'un nouvel individu technique en rejaillissant sur les modalités d'insertion dans le milieu.

⁵⁶⁰ L'université de Colombie-Britannique est impliquée dans le projet LAMA (Large Aperture Mirror Array), réseau de 66 télescopes à miroir liquide de 6,15 mètres de diamètre chacun ? qui opéreront ensemble de façon à simuler un télescope de 50 mètres de diamètre.

Malgré son évidente élégance, ces considérations nous poussent à qualifier le télescope à miroir liquide de dispositif hypertélique, sans parler du fait qu'un télescope spatial à miroir liquide est inenvisageable du fait de l'absence de gravité. Cela ne l'empêche pas de disposer de plusieurs avantages. Moins coûteux que leurs homologues en verre, les miroirs liquides ne peuvent pas se casser et ne présentent pas de problème de *sagging*. De plus, la forme paraboloidale est assurée par les lois de la physique et les défauts de surface liés au polissage sont absents. Un pas important vers la concrétisation sera franchi le jour où le mercure pourra être remplacé par des liquides ferromagnétiques qui, grâce à un champ magnétique, pourront implémenter l'optique adaptative directement au niveau du miroir primaire tout en permettant un fonctionnement en dehors de la position zénithale.

3. L'insertion du télescope au sein de l'observatoire astronomique

3.1. La coopération avec les instruments

L'ensemble technique de degré supérieur dans lequel le télescope est inclus est l'observatoire. On l'a vu, des observatoires existaient avant l'avènement du télescope et, même une fois celui-ci apparu, il a fallu du temps pour que se généralise son intégration dans les observatoires. Un observatoire astronomique est constitué de plusieurs individus techniques : les bâtiments, les instruments et, bien sûr, le télescope. Pour fonctionner, il nécessite l'intervention d'individus humains (les astronomes), dévolus à la réalisation d'un programme de recherche. Au-delà de l'augmentation de la qualité des observations, l'intérêt du télescope réside aussi dans sa grande généricité, qui lui permet de réunir au sein d'un même dispositif plusieurs fonctions auparavant dévolues à des individus techniques distincts (la monture équatoriale, par exemple, reprend les principes de la grande sphère armillaire de Tycho Brahe⁵⁶¹ et les incorpore au télescope). La généricité du télescope se traduit en retour par la diversité des usages qu'il est possible d'en faire : les observatoires modernes l'utilisent ainsi à des fins d'imagerie mais aussi de spectrométrie, de photométrie, de polarimétrie...

La confusion existe parfois entre télescope et observatoire, notamment en astronomie spatiale ; le nom officiel de Hubble est HST, pour *Hubble Space Telescope*. Or, il ne s'agit pas d'un télescope mais bel et bien d'un observatoire, et cette appellation métonymique prolonge une confusion qui remonte aux conditions d'apparition du télescope, historiquement utilisé à l'œil nu. Si le télescope

⁵⁶¹ Fred Watson, *op. cit.*, p. 189.

est certes le dispositif central de l'observatoire, ce dernier regroupe de nombreux autres individus techniques ayant des milieux associés variés et mettant en jeu des opérations différentes. C'est d'ailleurs le rôle même de l'ensemble technique que de coordonner ces opérations techniques différentes tout en séparant leurs milieux associés respectifs afin de réaliser la fonction à laquelle l'observatoire est destiné. S'il n'est plus possible d'identifier une opération unique pour caractériser un ensemble technique, l'observatoire, en revanche, est défini par la fonction réalisée par un fonctionnement reposant sur un enchaînement complexe de plusieurs opérations. L'intention technique, qui est la mise en relation de ce fonctionnement complexe et de la fonction dévolue à l'ensemble, devient donc le prisme d'analyse principal. On peut alors distinguer plusieurs intentions selon la fonction et suivant les instruments installés au foyer du télescope : si le télescope fournit à l'observatoire les performances sur le plan de la résolution et du champ de vue (entre autres), les instruments caractérisent la fonction de l'observatoire (le type d'information recueilli). Pour reprendre le cas du pouvoir de collecte :

In astronomical observations, the light collected by an optical telescope observing a celestial object can be expressed as : $N(t) = 1/4 \cdot Q \cdot A \cdot t \cdot \Delta l \cdot n_p$; where A is the aperture area of the telescope, t the integration time, Δl the bandwidth, and n_p the number of photons per unit time, unit area and unit bandwidth from the celestial object which arrive on the Earth. The function Q represents the combined quantum efficiency of the telescope and detector⁵⁶².

On l'a vu, la sensibilité du télescope est proportionnelle à l'aire de collecte, mais une fois intégrée à l'ensemble de degré supérieur qu'est l'observatoire, deux autres paramètres doivent être pris en compte : le temps d'intégration t et l'efficacité quantique des détecteurs (ou de l'ensemble télescope-détecteurs). Là où l'usage de l'œil humain ne permet pas une cumulativité du nombre de photons incidents (de par le fonctionnement de la rétine), le recours à des détecteurs permet d'amplifier les possibilités observationnelles en ajoutant à l'intégration *spatiale* (surface collectrice) une intégration *temporelle* (temps de pose). Il ne s'agit pas d'une hybridation, dans la mesure où les opérations réalisées par les différents individus techniques restent distinctes, mais on pourrait qualifier cette situation de fonctionnement *symbiotique*. Une deuxième lecture consisterait à voir dans le recours aux dispositifs instrumentaux (photographiques notamment) une extériorisation de la fonction collectrice du télescope. En définitive, l'étude des performances, et de l'évolution des performances, de l'ensemble technique doit prendre en compte les synergies existant entre les différents individus techniques mobilisés, en gardant à l'esprit que « la cohérence d'un ensemble

⁵⁶² Fred Watson, *op. cit.*, p. 15.

technique est maximum lorsque cet ensemble est constitué par des sous-ensembles possédant le même niveau d'individualisation relative⁵⁶³ ».

3.2. L'affranchissement vis-à-vis du milieu associé

La principale limitation aux résolutions atteignables par les grands observatoires modernes provient du *seeing* atmosphérique. Si le problème s'est posé dès les premiers télescopes, il s'est amplifié avec l'augmentation des diamètres d'ouverture, transformant un faible déplacement et un léger scintillement en un étalement et un floutage⁵⁶⁴ des objets observés. Le premier à s'être attaqué à ce problème fut l'astronome Horace Babcock, directeur de l'observatoire Palomar, qui, en 1953, déplorait le fait que :

The seriousness of [the seeing] is evident when one realizes that ideally the 200-inch Hale telescope is capable of giving diffraction images of stars about of 1/40 a second of arc in diameter, yet the size of the "seeing image" produced is in the range 1/3 second⁵⁶⁵.

Le *seeing* limite donc les performances des observatoires au dixième de leurs possibilités théoriques (Fig. 65), et cette limitation ne dépend pas de l'architecture choisie pour le télescope ou des performances des instruments ; il s'agit d'une limitation imposée par le milieu associé : « The size of apertures which can be used and hence the faintness of the source which can be observed is limited by the atmosphere and not the technology⁵⁶⁶ ».

⁵⁶³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 77.

⁵⁶⁴ Pour reprendre l'expression de Pierre Léna (Pierre Léna, *Une histoire de flou. Miroirs, trous noirs et autres mondes*, op. cit.).

⁵⁶⁵ Horace W. Babcock, « The Possibility of Compensating Astronomical Seeing », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 65, n° 386, 1953, p. 229.

⁵⁶⁶ David F. Buscher, *Practical Optical Interferometry*, Cambridge, Cambridge University Press, 2015, p. 76.

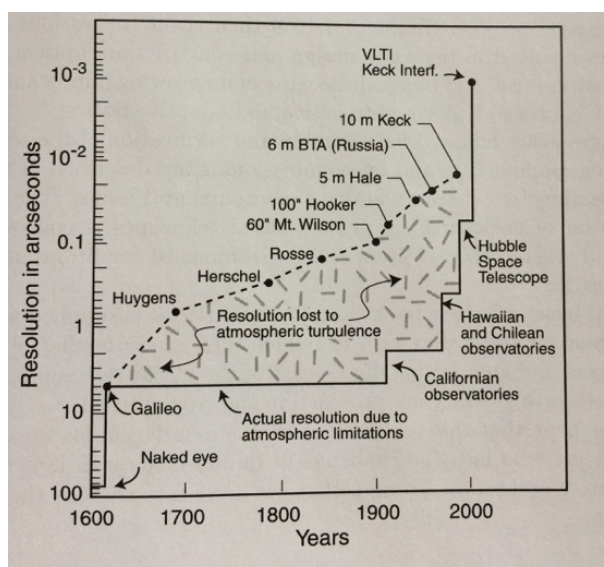


Figure 65 – Évolution de la résolution angulaire, théorique et effective, des télescopes optiques.
(Source : Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 3)

C'est dans ce contexte qu'Horace Babcock proposa de corriger le front d'onde en provenance des étoiles, déformé par l'atmosphère, à l'aide d'une couche d'huile dont l'épaisseur serait contrôlée électriquement. La technologie n'était malheureusement pas assez mature, et l'idée fut abandonnée avant d'être reprise vingt ans plus tard par le département de la défense américain (DoD) pour son programme de satellites d'observation terrestre⁵⁶⁷. L'idée est de prolonger la logique sous-tendant le développement de l'optique active et des miroirs fins, à des fréquences plus élevées et des épaisseurs plus fines :

Active optics can be used for correcting defects within a telescope at frequencies up to a few Hertz. Expanding the active concept to a higher frequency range, wind and atmospheric influences can also be corrected. These devices are known as adaptive optics which can achieve diffraction limited image quality⁵⁶⁸.

L'optique adaptative (OAd) permet de corriger en temps réel les déformations du front d'onde en provenance du miroir primaire grâce à un miroir déformable ultra-fin (Fig. 66). Ces corrections sont rendues possibles par la mise en place d'une boucle de rétroaction qui, à partir d'une analyse du front d'onde déformé, compense les aberrations induites par l'atmosphère.

⁵⁶⁷ Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 339.

⁵⁶⁸ Jingquan Cheng, *op. cit.*, p. 224.

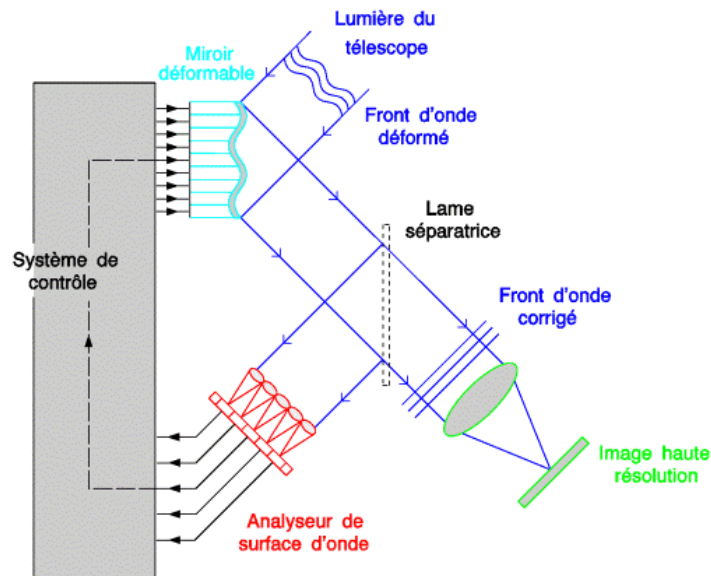


Figure 66 – Principe de l'optique adaptative.
(© Observatoire de Paris)

L'un des premiers télescopes à avoir implémenté l'optique adaptative est le télescope de 3,6 mètres de l'ESO, à travers l'instrument ADONIS (*adaptive optics near infrared system*), système optique de seconde génération faisant suite à divers prototypes testés au cours des années 1980⁵⁶⁹. Afin de fonctionner de façon optimale, un système d'optique adaptative nécessite une « étoile guide » qui sert de source de lumière de référence pour l'analyse du front d'onde. Les étoiles naturelles peuvent servir de sources ponctuelles à cette fin, mais elles ne sont pas disponibles pour toutes les parties du ciel, ce qui limite considérablement la couverture de ce dernier. Pour remédier à ce problème, il faut recourir à une étoile artificielle (*laser guide star*). Consistant en l'excitation par un puissant laser⁵⁷⁰ des hautes couches de l'atmosphère, cette étoile artificielle peut être générée dans n'importe quelle région du ciel, ce qui augmente considérablement le champ d'observation⁵⁷¹. Une fois de plus, les premiers prototypes furent réalisés par le Département de la défense américain dès 1982, mais le concept fut découvert indépendamment par R. Foy et A. Labeyrie en 1985⁵⁷². Les étoiles guides artificielles marquent une étape supplémentaire dans la maîtrise d'un des milieux associés à l'observatoire : l'OAD permet une compensation des effets perturbatifs de l'atmosphère quand le recours à des étoiles artificielles permet de gérer l'absence d'étoiles guides naturelles.

⁵⁶⁹ Jack B. Zirker, *op. cit.*, p. 204.

⁵⁷⁰ Voir annexe B.3 pour une étude génétique des lasers.

⁵⁷¹ Jingquan Cheng, *op. cit.*, p. 226.

⁵⁷² Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 339.

La seconde stratégie s'attaquant au problème du *seeing* consiste à déployer les observatoires au-delà de l'atmosphère, c'est-à-dire dans l'espace⁵⁷³. L'histoire de l'astronomie spatiale, dans le domaine optique, commence par la mise en orbite du *Hubble Space Telescope* en 1990 mais s'enracine dans les années d'après-guerre⁵⁷⁴. Le choix du site d'implantation d'un observatoire a toujours été, et demeure, une étape cruciale. La possibilité d'utiliser le milieu spatial ajoute à la complexité de la décision : « The selection of the site for a ground-based observatory or the orbit for a space mission is one of the most important decisions in the development of an astronomical facility⁵⁷⁵ ». D'un point de vue mécanologique, les deux solutions au problème posé par le *seeing* astronomique relèvent de deux logiques différentes. L'optique adaptative passe par une complexification du dispositif, nécessitant le recours à la technicité à d'autres échelles (miroir ultra-fin au niveau de l'élément, système informatique performant au sein de l'ensemble) pour fonctionner. Le déphasage vers l'espace, quant à lui, repose sur un changement de milieu associé, et implique de nouvelles contraintes techniques ainsi que le développement d'un réseau technique. Cette seconde solution, si elle est aujourd'hui limitée par les possibilités offertes par les lanceurs, possède l'avantage de s'affranchir totalement des aberrations induites par l'atmosphère, contrairement à l'OAd qui se contente de les compenser.

L'environnement spatial, s'il présente de nombreux inconvénients, possède en revanche l'avantage décisif d'autoriser les télescopes à fonctionner à la limite de diffraction, débarrassés des déformations dues à l'atmosphère. Parmi les inconvénients, on trouve, d'une part, les contraintes logistiques liées à la mise en orbite (par exemple, charge utile, donc taille du M1, réduite), et d'autre part, celles liées au nouveau milieu associé (comme l'absence de protection contre les rayonnements ionisants), ainsi que celles liées à la distance avec l'opérateur (notamment la difficulté, sinon l'impossibilité, de procéder à des réglages ou des réparations). Dans la course à la résolution, il y a donc compétition entre, d'un côté, les télescopes à très large ouverture mais limités dans leurs performances par les perturbations de l'atmosphère, et de l'autre, les observatoires spatiaux d'ouverture nécessairement plus limitée mais fonctionnant à la limite de diffraction. Si ces derniers ont pu apparaître comme les grands gagnants de la compétition, le développement de l'OAc combinée à l'OAd, qui permet d'atteindre des ouvertures extrêmement grandes, tend à nuancer

⁵⁷³ Voir à ce sujet Johan A. M. Bleeker, Johannes Geiss et Martin C. E. Huber (éd.), *The Century of Space Science*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001.

⁵⁷⁴ Robert W. Smith, « The History of Space Astronomy: Reflections on the Last Three Decades », dans Wayne Orchiston, (éd.), *The New Astronomy: Opening the Electromagnetic Window and Expanding our View of Planet Earth*, Dordrecht, Springer, p. 215-228.

⁵⁷⁵ Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 389.

cette affirmation. On assiste de plus en plus à une convergence des performances ainsi que des coûts entre ces deux solutions : « The performance of ground observatories equipped with adaptive optics approaching that obtainable in space and the costs of space observatories converge with those of the largest ground-based facilities⁵⁷⁶ ».

Plus qu'une compétition, il existe en réalité une complémentarité entre l'astronomie spatiale et l'astronomie au sol. De la même façon que les observations réalisées aux différentes longueurs d'onde permettent d'obtenir des informations différentes à propos des sources étudiées, les *surveys* (relevés astronomiques) réalisés au sol et dans l'espace sont complémentaires : schématiquement, les observatoires spatiaux effectuent le repérage des sources d'intérêt quand les observatoires au sol réalisent des observations de précision. Car autant les télescopes embarqués dans l'espace possèdent des ouvertures, et donc des résolutions, peu élevées⁵⁷⁷, autant l'absence d'atmosphère leur permet de fonctionner à la limite de résolution. Ils possèdent également de grands champs de vue, leur permettant ainsi un balayage du ciel plus rapide et plus efficace. A l'opposé, les observatoires au sol doivent composer avec l'atmosphère terrestre (parfois en implémentant de l'OAD) et disposent en général de champs de vue plus restreints. En revanche, leurs grandes ouvertures leur permettent d'atteindre des résolutions autorisant l'étude détaillée et précise des sources détectées par leurs homologues spatiaux. La complémentarité sol/espace est l'une des pierres angulaires de l'astronomie du XXI^e siècle, permettant une optimisation des temps d'utilisation des observatoires. Elle repose sur l'insertion différenciée au sein du milieu associé et va dans le sens d'une spécialisation : il est en effet devenu trop coûteux, et en réalité presque impossible, de construire des observatoires présentant les avantages liés aux environnements spatiaux *et* terrestres. Mais ce changement d'environnement, s'il implique également une certaine hétéronomie de fonctionnement, s'inscrit dans le déphasage vers les échelles supérieures de la technique, tendant à donner au réseau des observatoires astronomiques, les propriétés du réseau simondonien.

3.3. La segmentation et la virtualisation

La logique de conception sous-tendant le développement des télescopes à miroirs segmentés est aussi présente à l'échelle supérieure, et on peut voir dans le MMTO (*Multiple Mirror Telescope*)

⁵⁷⁶ Pierre-Yves Bely (dir.), *op. cit.*, p. 389.

⁵⁷⁷ Quoique cette assertion ne sera probablement plus vraie dans un futur proche : avec un diamètre de 6,5 mètre et un lancement prévu en 2021, le *James Webb Space Telescope* (JWST) marquera une rupture dans la taille des observatoires spatiaux.

Observatory) un de ses précurseurs. Mis en service en 1979, ce télescope était constitué de six petits télescopes individuels montés sur la même structure, permettant d'obtenir le même pointage (Fig. 67). Chacun des six télescopes avait un miroir primaire d'un diamètre de 1,8 mètre et son propre miroir secondaire, qui, une fois combinés via un combinateur de faisceau, réalisaient les performances d'un télescope de 4,5 mètres.

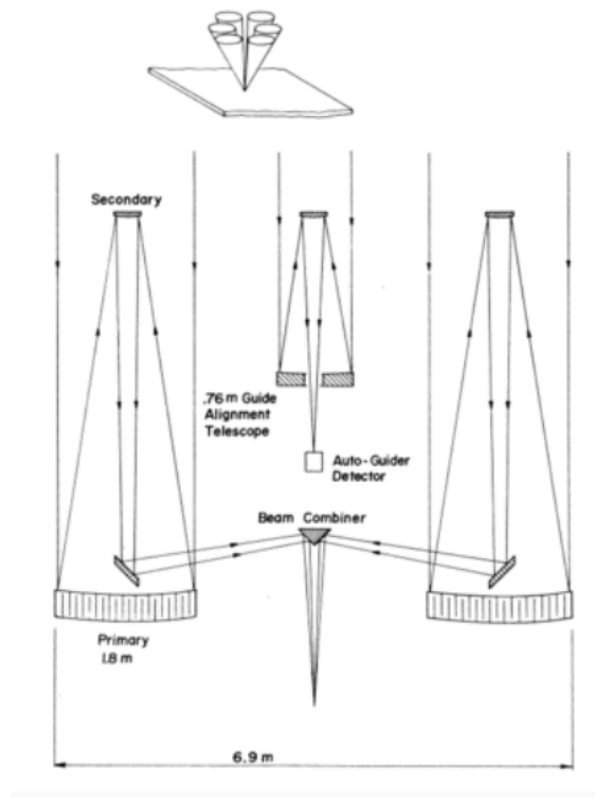


Figure 67 – Vue en coupe de deux des « télescopes » du MMTO.
(© Smithsonian Astrophysical Observatory)

Les progrès dans la conception des miroirs firent qu'en 1998 il devint plus avantageux de remplacer les six miroirs par un miroir monolithique de 6,5 mètres (Fig. 68). Cette conversion permit de doubler le pouvoir de collecte et de grandement augmenter le champ de vue du télescope. Le nouveau télescope fut mis en service en 1998 et renommé MMT – d'où une certaine confusion dans l'étude de cet observatoire, central dans l'histoire de l'astronomie.

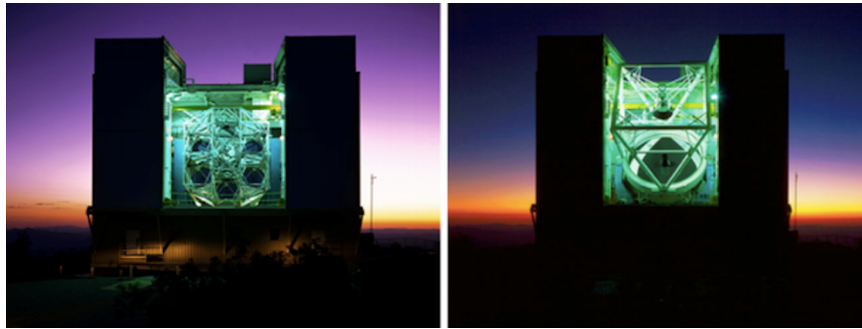


Figure 68 – Le MMT avant et après sa « conversion ».
(© MMTO.org)

À nos yeux de mécanologue, le qualificatif de « miroir multiple » est abusif, ou tout au moins mal choisi. En effet, contrairement aux télescopes à miroirs segmentés étudiés précédemment, la présence de miroirs secondaires pour chacun des six miroirs primaires ainsi que la présence d'un nouvel élément technique tendent à conférer à ces miroirs le statut d'individu technique. Il serait donc plus judicieux de parler d'« observatoire à télescopes multiples ».

L'apparition des télescopes à miroirs multiples a été rendue possible par les progrès en traitement du signal et par la possibilité d'utiliser l'interférométrie aux longueurs d'onde visibles (Fig. 69) : « Optical interferometry uses the combination of light from multiple telescopes to allow imaging on angular scales much smaller than with conventional single telescopes⁵⁷⁸ ».

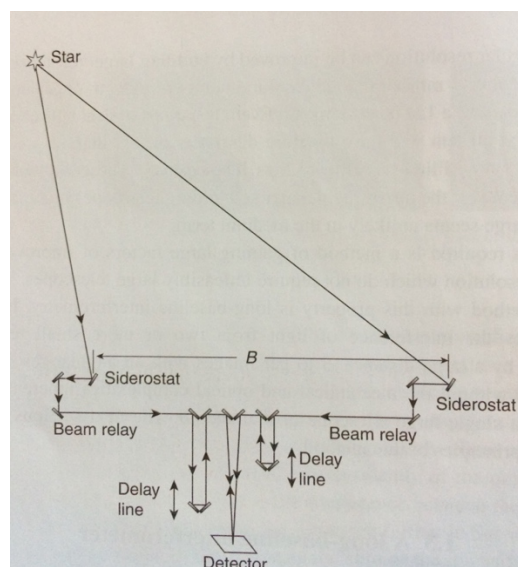


Figure 69 – Principe de l'interférométrie astronomique.
(Source : David F. Buscher, *op. cit.*)

⁵⁷⁸ David F. Buscher, *op. cit.*, p. XV.

Le principe de base de l'interférométrie « stellaire » a été proposé pour la première fois par Hippolyte Fizeau en 1862 avant d'être utilisé en 1920 par Albert Michelson et Francis Pease⁵⁷⁹. L'idée est d'utiliser les propriétés des interférences constructives pour augmenter le contraste et donc la qualité des observations. Parmi les autres techniques d'interférométrie utilisant un unique télescope se trouvent l'interférométrie par division d'amplitude, ainsi que la mal nommée interférométrie des tavelures (*speckle interferometry*), qui se rattache davantage aux méthodes d'imagerie (*lucky imaging*) que d'interférométrie⁵⁸⁰. Des interféromètres de Michelson et des interféromètres de Fizeau mobilisant plusieurs télescopes séparés ont ensuite été réalisés, pour la première fois dans le domaine radio en 1945 par Martin Ryle, puis dans le domaine optique en 1976 par A. Labeyrie⁵⁸¹. L'avantage de ce type d'interféromètre à ouvertures multiples est d'obtenir un pouvoir de résolution équivalent à celui d'un télescope dont la taille serait équivalente à la distance séparant les différents télescopes utilisés⁵⁸².

Les réalisations les plus récentes incluent le *Keck Interferometer*, le VLTI, le LBT et le futur GTC. Il est à noter que dans ces observatoires, un fonctionnement non interférométrique classique est possible pour chacun des télescopes, faisant de l'interférométrie une fonction, et un fonctionnement, de l'ensemble technique et non de l'individu. Les techniques de VLBI (voir chapitre 4) peuvent même être rattachées au fonctionnement du réseau dans la mesure où la combinaison des signaux se fait *a posteriori* et nécessite donc des canaux de communication entre les différents observatoires. Le fait que les techniques d'interférométrie ont émergé en premier dans le domaine radio tient à deux raisons. La première est liée au contexte historique : développée au cours de la Seconde Guerre mondiale et immédiatement après, la radioastronomie s'est nourrie des travaux des militaires américains pour qui les techniques de transmission radio présentaient davantage d'intérêt que celles d'imagerie optique. La seconde est d'ordre purement technique – voire physique – et tient à la difficulté de maintenir la cohérence temporelle et spatiale de la lumière pour de faibles longueurs d'onde.

L'interférométrie optique à plusieurs télescopes permet d'atteindre des résolutions plusieurs centaines de fois plus importantes que celles des télescopes isolés⁵⁸³. Tout comme les avancées au

⁵⁷⁹ Albert A. Michelson et Francis G. Pease, « Measurement of the diameter of a Orionis with the interferometer », *Astrophysical Journal*, 1921, n° 53, p. 249-259.

⁵⁸⁰ Jingquan Cheng, *op. cit.*, p. 300.

⁵⁸¹ *Ibid.*, p. 286.

⁵⁸² En revanche, la sensibilité reste limitée à celle du télescope de plus petite ouverture mobilisé.

⁵⁸³ David F. Buscher, *op. cit.*, p. I.

niveau des éléments via le développement de miroirs segmentés, ces avancées au niveau de l'observatoire permettent de franchir un palier dans la course à l'ouverture. Par ailleurs, le recours aux techniques interférométriques résulte d'une meilleure compréhension de l'objet manipulé (la lumière et ses propriétés attenantes), ainsi que du développement de systèmes de traitement de données. Ces deux dynamiques rejouent au niveau de l'individu par ce qu'on pourrait qualifier de dématérialisation de l'objet technique : d'un observatoire mobilisant un unique télescope à miroir primaire monolithique, on est passé au tournant du XXI^e siècle à des observatoires constitués de plusieurs télescopes disposant eux-mêmes de miroirs segmentés. L'interférométrie optique présente en outre l'avantage de pouvoir se passer d'optique adaptative, ce qui traduit une compréhension plus fine du phénomène de *seeing* :

The application of interference methods to astronomical measurements is not seriously affected by atmospheric disturbances, and indeed observations by these methods have proved feasible even when the seeing was very poor⁵⁸⁴.

Enfin, dernier avatar de la tendance à la dématérialisation, mentionnons le développement de télescopes à miroir annulaire. Là encore inspiré de ce qui a pu se faire dans le domaine radio et aujourd'hui essentiellement motivé par l'astronomie spatiale, le concept de télescope annulaire combine le principe de l'interférométrie avec la facilité de collimation liée à l'unicité du miroir :

A highly obscured annular primary can be considered: for example, a 94% obscured 30m aperture having the same total mirror area as a 10m unobscured telescope, can achieve 3X higher limiting resolution performance⁵⁸⁵.

À surface égale, il est en effet plus avantageux, du point de vue de la résolution angulaire, d'avoir le diamètre le plus grand possible. Un des moyens d'augmenter le diamètre du miroir, et donc la résolution du télescope, en conservant la même surface totale passe donc par le recours à des techniques de *sparsing*⁵⁸⁶ (de *sparse*, « clairsemé » en anglais). Mais le télescope annulaire, tout comme les interféromètres optiques, ne possède un avantage compétitif qu'en matière de résolution. Le pouvoir de collecte notamment n'est pas amélioré, ce qui pousse les astronomes à voir dans les télescopes annulaires et les interféromètres des instruments très spécialisés. En effet, ces derniers

⁵⁸⁴ Albert A. Michelson et Francis G. Pease, art. cit., p. 250.

⁵⁸⁵ Justin J. Rey *et al.*, « A Deployable, Annular, 30m Telescope, Space-Based Observatory », NGAS, 14-1062, 2014, p. 1.

⁵⁸⁶ Nicholas J. Miller, Matthew P. Dierking, and Bradley D. Duncan, « Optical sparse aperture imaging, *Applied Optics*, vol. 46, Issue 23, 2007, p. 5933-5943.

ne sont employés que pour réaliser des observations nécessitant une (très) grande résolution angulaire mais ne requérant pas une grande sensibilité.

4. L'échelle supérieure de la technique

4.1. Les réseaux d'observatoires

G. Simondon fait appel à la notion de réseau pour désigner la réalité technique qui permet à l'homme de structurer le monde qui l'entoure⁵⁸⁷. Dans *Du mode d'existence des objets techniques*, le réseau n'apparaît pas comme une échelle de la technique, au même titre que les éléments et les ensembles ; cependant, il est possible de le réinterpréter comme tel. Dans son « Entretien sur la mécanologie », en revanche, G. Simondon pointe l'importance de la réticulation de la technique à l'échelle du monde sous la forme de réseaux de circulation, d'alimentation énergétique et d'information. Cette dernière caractérisation du réseau technique d'information s'applique à la superstructure reliant les différents observatoires participant du même objectif. Le réseau mis en place par l'astronomie dépasse l'échelle individuelle, aussi bien celle des machines que celle des opérateurs, et devient le support d'une médiation technique entre l'Homme et l'Univers. Les relations entre les objets techniques, mais aussi entre les sujets humains, sont redéfinies en fonction des points de ce réseau :

Le réseau est donc aussi une réalité technique, mais elle est située au-delà de l'individualité. Il représente la forme achevée de la médiation entre l'homme et la nature. Il devient le support par excellence de la *transindividualité*, c'est-à-dire des relations psychosociales entre les sujets humains, car il structure un monde qui est à la fois naturel et humain⁵⁸⁸.

Dans notre étude, nous retrouvons cette double structuration, si par réseau s'entend la réalité technique, abstraite, qui englobe l'ensemble des observatoires astronomiques. G. Simondon rappelle que la « structure primitive de réticulation du monde magique⁵⁸⁹ » s'effectuait autour de points clés de la nature (grottes, sommets de montagne, clairières et autres lieux particuliers), et que certains de ces lieux sont retrouvés par la réticulation technique, ce qui transparait en particulier dans le choix des sites d'implantation des observatoires. La réticulation technique peut également faire émerger des structures inédites. La structuration de la réalité humaine passe ainsi, par exemple, par l'organisation de la communauté scientifique à travers le développement des observatoires

⁵⁸⁷ Nous renvoyons à la troisième partie de MEOT pour plus de détails.

⁵⁸⁸ Vincent Bontems, « Sur la classification des objets techniques selon Simondon », art. cit., p. 190.

⁵⁸⁹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 236.

virtuels, notamment le *Global Virtual Observatory*⁵⁹⁰. La structuration de la réalité technique passe enfin par la mise en réseau de centres de calcul et le partage de données, les observatoires virtuels opérant un changement d'échelle dans l'utilisation qui est faite des télescopes, à la fois pour ce qui est des possibilités techniques (plus de puissance de calcul) et des potentialités humaines (davantage de chercheurs impliqués).

En parallèle de ces réseaux d'observatoires, des réseaux de télescopes, souvent à visée éducative, émergent et permettent une ouverture et un élargissement de la communauté d'utilisation⁵⁹¹. À nos yeux, il s'agit là d'un prolongement de la logique lancée par l'interférométrie : la dématérialisation et la virtualisation agissent de concert pour faire franchir un cap à l'astronomie, aussi bien pour la quantité que la qualité des données. Ces nouvelles logiques d'évolution prennent petit à petit le pas sur celles concentrées au niveau de l'individu technique. Le déphasage du progrès vers la macro-échelle technique, idée présente aussi bien chez G. Simondon que dans la TRIZ, passe par une diminution de l'importance accordée aux propriétés matérielles de l'individu et de l'ensemble techniques pour développer les possibilités offertes par le numérique. Il est à noter que « la notion simondonienne de réseau ne recouvre pas ce que les sociologues appellent macro-système technique⁵⁹² » qui s'apparente davantage au système technique au sens de B. Gille, c'est-à-dire à l'ensemble des techniques cohérentes à une époque donnée, ainsi que leur moyen de production. Notre vision du réseau technique quant à elle désigne la réalité technique d'ordre supérieur, qui affecte aussi bien les conditions d'évolution des objets techniques, que leurs modalités de fonctionnement.

4.2. L'observatoire comme terminal

Le développement des réseaux tend à réduire les observatoires à un rôle de terminal. Inséré au sein du réseau mettant en relation les différents observatoires, et allant des instruments scientifiques aux systèmes de traitement de données, l'observatoire joue avant tout le rôle de point d'entrée de l'information et de point de sortie de l'action, vers lequel convergent les commandes transmises par les utilisateurs. Cette situation est d'autant plus vraie pour les observatoires spatiaux, pour lesquels le développement du segment sol a pris une importance prépondérante dans la conception

⁵⁹⁰ Fred Watson, *op. cit.*, p. 279.

⁵⁹¹ Edward L. Gomez et Haley L. Gomez, « The World's First Global Telescope Network at your Fingertips », dans David Valls-Gabaut et Alexander Boksenberg, *The Role of Astronomy in Society and Culture*, Proceedings of the International Astronomical Union, vol. 5, n° S260, Cambridge, Cambridge University Press, 2011.

⁵⁹² Xavier Guchet, *Les Sens de l'évolution technique*, Paris, Léo Scheer, 2005, p. 188.

des missions. Pourtant, l'accentuation des possibilités de virtualisation numérique ne devrait pas se faire au détriment des potentialités techniques mécaniques des dispositifs. Sinon, le risque est que :

La montée en puissance de la notion de réseau se [fasse] au détriment de celle d'ensemble (et notamment d'ensemble informationnel) pourtant pertinente pour préciser les conditions de l'individuation psychosociale en fonction de l'artificialisation des milieux associés⁵⁹³.

Ce constat ne doit pas conduire à un fatalisme condamnant les possibilités d'évolution au niveau de l'individu ou de l'ensemble. Mais il faut pour cela que l'objet technique ne soit pas aliéné au fonctionnement du réseau, et que son insertion au sein des échelles supérieures de la technique ne se fasse pas au détriment de ses spécificités :

Le nouvel objet technique, caractérisé par une technicité d'un type nouveau, ne peut se développer que s'il constitue son propre réseau, doté de ses voies de communication et de ses installations propres⁵⁹⁴.

4.3. La synchronicité du progrès aux différentes échelles

L'évolution de la technique semble répondre à des injonctions contradictoires. D'une part, un déphasage du progrès, initialement porté par l'individu technique, se produit en direction des échelles microscopiques (éléments puis matériaux) et macroscopiques (ensembles puis réseaux) ; d'autre part, il existe toujours le risque d'un décalage entre les niveaux de concrétisation des différentes échelles, pouvant conduire à une aliénation, aussi bien sur le plan technique qu'humain :

L'aliénation de surhistoricité se produit au niveau humain et se concentre à ce niveau en libérant l'ordre microtechnique des pièces détachées, véritables éléments, et l'ordre macrotechnique des réseaux de distribution et d'échange, véritable étalement spatial du milieu technique de production, restant en contact avec l'espace d'utilisation⁵⁹⁵.

En réalité, il n'y a là rien de contradictoire ; G. Simondon envisage en effet, dans l'évolution des dispositifs produits industriellement comme peuvent l'être les télescopes, un modèle d'évolution technique cyclique :

⁵⁹³ Vincent Bontems, « Sur la classification des objets techniques selon Simondon », art. cit., p. 196.

⁵⁹⁴ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 189.

⁵⁹⁵ Gilbert Simondon, *Sur la technique, op. cit.*, p. 236.

Dans l'évolution des objets techniques, on assiste à un passage de causalité qui va des ensembles antérieurs aux éléments postérieurs ; ces éléments introduits dans un individu dont ils modifient les caractéristiques permettent à la causalité technique de remonter du niveau des éléments au niveau des individus, puis de celui des individus à celui des ensembles ; de là dans un nouveau cycle, la causalité technique redescend par un processus de fabrication au niveau des éléments où elle se réincarne en de nouveaux individus, puis dans de nouveaux ensembles⁵⁹⁶.

Bien qu'elle puisse paraître artificielle, une des illustrations de cette tendance réside dans la poursuite des logiques de conception des échelles inférieures aux échelles supérieures : le besoin de diminuer le poids des miroirs a conduit au développement de l'OAc¹ et des miroirs fins, qui se sont prolongés dans l'OAd (vue comme de l'OAc¹ à haute fréquence) et les miroirs ultra-fins. De même, le recours à l'OAc² et aux miroirs segmentés a préfiguré les télescopes à miroirs multiples, puis les observatoires à télescopes multiples, et enfin l'interférométrie. La figure 70 illustre schématiquement les liens entre ces techniques intervenant à des échelles différentes :

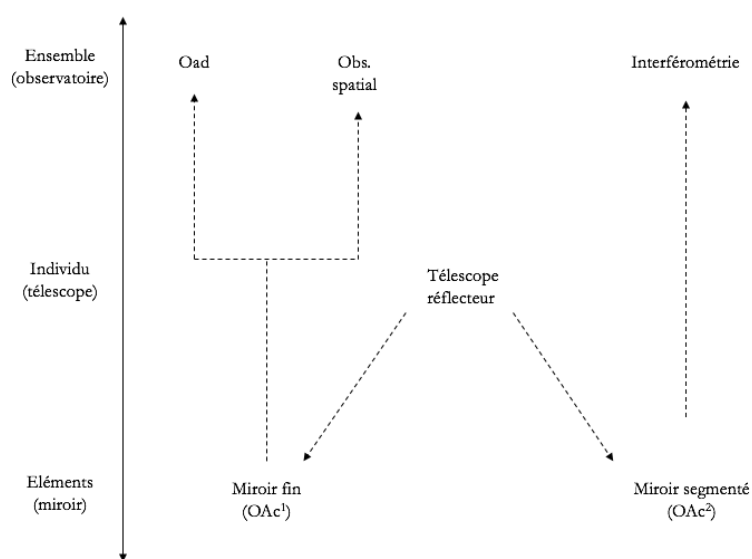


Figure 70 – Déphasage et synchronicité du progrès aux différentes échelles de la technique.
(© Thomas Guy)

Optique active et miroirs segmentés, ainsi qu'optique adaptative et interférométrie, peuvent être vues comme le prolongement aux autres échelles de la technique des deux logiques de progrès

⁵⁹⁶ Gilbert Simondon, MEOT, p. 82.

identifiées au niveau de l'individu, à savoir le *gigantisme* et la *complexification correctrice*. En outre, elles introduisent deux nouvelles tendances, la segmentation et la dématérialisation, cette dernière s'accompagnant d'une virtualisation dans la mesure où le recours à des supplétifs numériques est nécessaire pour pallier la perte de matérialité de l'individu technique. Cette virtualisation marque aussi le passage à l'échelle macrotechnique du réseau, ce qui confirme, à nos yeux, la solidarité du progrès aux différentes échelles de la technique.

Conclusion de chapitre

Solidarité et *synchronicité* vont de pair, notamment lorsqu'un dispositif technique incorpore, au sein même de sa conception, les avancées techniques en provenance des autres échelles. Le cas le plus exemplaire de cette situation reste le développement des futurs ELT, dont l'architecture à cinq miroirs reprend le principe du TMA (évolution du schème technique individuel) en incluant un miroir primaire segmenté (progrès des éléments) et implémentant l'optique adaptative (progrès de l'ensemble). Supportés par des systèmes de traitement de données particulièrement avancés, les futurs ELT font converger les techniques les plus récentes en provenance des différentes échelles. Cependant, les concepts de *lignées techniques d'éléments* et de *lignées techniques d'ensembles*, si tant est que ces concepts puissent faire sens, restent à développer. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux niveaux d'organisation inférieur et supérieur de la technique *relativement* à l'échelle individuelle. Il nous a semblé pertinent d'étudier l'évolution des miroirs et des observatoires dans la mesure où les progrès à ces échelles ont eu un impact sur l'évolution des télescopes. De plus, si la synchronicité du progrès aux différentes échelles était déjà postulée par Simondon, ce n'est que depuis la seconde moitié du XX^e siècle que le déphasage du progrès s'est mis en place. Cette dynamique n'a fait que se renforcer et aujourd'hui force est de constater que les efforts de développement se concentrent préférentiellement aux échelles des matériaux et des réseaux d'observation. Raisons pour lesquelles, il serait intéressant d'étudier ces autres échelles *pour elles mêmes*, en développant de nouveaux concepts mécanologiques robustes – travail qui constituerait un prolongement naturel de nos propres travaux.

Conclusion de partie

L'analyse mécanologique des lignées de télescopes réalisée au cours de cette partie peut apparaître comme essentiellement internaliste, se concentrant sur les évolutions techniques internes du télescope. Si elle reste néanmoins compatible avec une analyse externaliste au sens classique, force est de reconnaître que cette partie sociologique n'a pas été traitée au cours de cette thèse. Mais notre enquête mécanologique est à nos yeux complémentaire de travaux comme ceux réalisés par Sven Dupré et Albert van Helden⁵⁹⁷, ainsi que de Mario Biagioli⁵⁹⁸. Ceci étant, nous considérons que l'originalité de nos travaux réside en définitive dans l'approche génétique mise en œuvre, plus que dans les propositions de dépassement théoriques. Le prolongement sociologique de la mécanologique a déjà été abordé plus en détails par Minier & Bontems⁵⁹⁹ et l'annexe A.1. présente une ébauche de ce que pourrait être le pendant sociologique d'une analyse à grande échelle. Cependant, la tension internalisme-externalisme, aussi bien dans l'approche historique que dans l'étude de l'objet technique, se retrouve, en partie, à l'intérieur même de l'analyse mécanologique. En effet, un des postulats en est que « lorsque les exigences techniques (endogènes) l'emportent sur les exigences sociales (exogènes), l'objet réalise sa cohérence interne et se concrétise⁶⁰⁰ ». À l'inverse, lorsque la seule demande sociale pilote l'évolution de l'objet technique, celui devient « très voire excessivement adapté⁶⁰¹ », réalisant ce que Simondon, et Dumouchel après lui, nomment un « développement hypertélique ». Plus généralement, il s'agit maintenant de s'attaquer aux dynamiques évolutives des télescopes, afin de fournir une explication rétrospective des choix techniques effectués mais aussi, en prolongeant ces lignes d'analyse aux temps futurs, de fournir des recommandations prospectives.

⁵⁹⁷ Albert Van Helden, Sven Dupré, Rob Van Gent et Huib Zuidervaart (éd.), *The Origins of the Telescope*, *op. cit.*

⁵⁹⁸ Mario Biagioli, *Galileo courtier : the practice of science in the culture of absolutism*, Chicago, University of Chicago Press, 1993.

⁵⁹⁹ Vincent Minier et al., *Inventing a space mission*, *op. cit.* En particulier le chapitre 5, « Innovation in technology and management ».

⁶⁰⁰ Philippe Durance, « Le futur dans la philosophie de la technique de Gilbert Simondon », in Vincent Bontems (dir.), *Gilbert Simondon ou l'invention du futur*, Colloque de Cerisy (actes), Langres, Klincksieck, 2016, p. 305.

⁶⁰¹ Paul Dumouchel, « Gilbert Simondon's plea for a philosophy of technology », *Inquiry*, n°35, 1992, p. 418. Nous traduisons.

TROISIÈME PARTIE

ÉTUDE DES DYNAMIQUES TECHNIQUES

Chapitre 7

Les dynamiques de l'évolution technique

L'objet technique n'est donc pas dans le temps. L'individuation technique n'est pas ce qui arrive à l'objet technique, quand il évolue dans le bon sens ; l'individuation technique est l'objet technique, connue selon son dynamisme évolutif.

Xavier GUCHET, *Les Sens de l'évolution technique*

Si en biologie, les théories transformistes se sont finalement imposées, les débats autour de l'évolutionnisme technique restent vifs. Les critiques les plus virulentes adressées aux évolutionnistes techniques ont majoritairement été formulées par les sociologues et les ethnologues, et, d'une manière générale, par ceux voyant dans les thèses évolutionnistes des « reconstructions sans aucun contenu de connaissance⁶⁰² ». De notre côté, nous pensons, pour reprendre les mots de Maurice Daumas à propos de l'histoire des techniques, que l'objectif de la mécanologie « consiste justement à mettre en évidence la logique propre de l'évolution des techniques⁶⁰³ », qui n'est pas un épiphénomène au sein du monde des techniques mais bien une de ses pierres angulaires – considération d'ailleurs partagées par Laffite et Simondon avant lui. En définitive, les débats entre évolutionnistes et antiévolutionnistes devraient, à nos yeux, davantage porter sur la délimitation du périmètre de la discussion afin de dépasser ces oppositions de principe, et c'est précisément la réalisation partielle de cette tâche qui est l'objet de ce chapitre.

⁶⁰² Xavier Guchet, « Évolution technique et objectivité technique chez Leroi-Gourhan et Simondon », *Appareil*, 2, 2008 [URL : <https://journals.openedition.org/appareil/580>].

⁶⁰³ Maurice Daumas, « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », art cit., p. 19.

1. Évolutionnisme et déterminisme technique

1.1. Les lois d'évolution et l'autonomie de la technique

Le programme de recherche de la mécanologie, tel que formulé par J. Lafitte, mentionne explicitement la « recherche des causes et des lois⁶⁰⁴ » qui régissent les différences entre les machines comme faisant partie de ses objectifs. Plus qu'une méthodologie classificatrice, la mécanologie se veut, depuis ses débuts, une tentative d'explication des moteurs de l'évolution technique. Mais autant la diversité des machines est un constat solidement établi, permettant l'établissement de principes classificateurs, autant l'idée d'un évolutionnisme technique passe par un acte de foi :

Les corps organisés dont je m'occupe, construits par l'homme pour satisfaire des besoins toujours croissants et toujours plus complexes, forment un ensemble *apparemment* isolable et distingué par des caractères essentiels. Mais cet ensemble, à supposer qu'il ait une existence réelle et bien tranchée, je *pense* qu'il ne résulte pas de la volonté délibérée de l'homme lui-même. Je *pense* au contraire qu'il est soumis, dans sa lente formation, à des causes et à des lois qui échappent jusqu'alors à la connaissance et à la volonté déterminante de l'homme et qu'il importe à la science de rechercher, à l'art de mettre en application⁶⁰⁵.

Il existerait donc des « lois technologiques » qui attendent que l'Humanité, grâce à sa science, les découvre ? Pris dans ce sens, le concept de lois d'évolution technique nécessite une autonomie relative du monde de la technique vis-à-vis de l'homme, sans quoi ces lois se résumeraient à la volonté des concepteurs, ingénieurs et techniciens. Dans son livre sur l'autonomie des techniques⁶⁰⁶, Langdon Winner n'affirme d'ailleurs rien d'autre que l'équivalence entre évolutionnisme technique et autonomie de la technique. Nous reviendrons sur cette assertion, mais notons d'ores et déjà que cette croyance en une autonomie de la technique se retrouve chez un certain nombre d'auteurs :

Les machines qui nous entourent vivent d'une sorte d'existence autonome. Comme toutes les productions de la vie, celles-ci nous proposent à la fois des problèmes de structure et des problèmes d'évolution. Leurs familles offrent peut-être plus de complexité que celles des êtres

⁶⁰⁴ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 33.

⁶⁰⁵ *Ibid.*, p. 16. C'est nous qui soulignons.

⁶⁰⁶ Langdon Winner, *Autonomous Technology. Technics-out-of-Control as a Theme in Political Thought*, Cambridge, The MIT Press, 1977.

vivants, et leur classification est en devenir. Les machines se produisent et se reproduisent selon des lois générales qui nous échappent, et dont la logique dépasse peut-être nos vieilles habitudes de pensée⁶⁰⁷.

C'est cette croyance en une certaine autonomie de la technique qui justifie l'emploi d'expressions comme « logique propre » (Daumas), « logique interne » (Maunoury) ou « nécessité interne » (Simondon) pour qualifier l'évolution des techniques. Réciproquement, certains auteurs considèrent que l'autonomie de la technique résulte de ses lois de structuration et d'évolution interne :

Qu'il s'agisse de l'évolution d'un type technique à travers les formes successives d'une même « lignée » d'outils ou des relations qui solidarisent objets matériels, recettes, normes de fabrication ou d'usage, conscience des besoins, etc., la sphère technique est partout porteuse de pressions évolutives et de régulations internes qui lui confèrent une large autonomie⁶⁰⁸.

Nous nous retrouvons par suite en présence d'un dilemme : est-ce l'autonomie de la technique qui lui confère ses dynamiques d'évolution interne, ou bien sont-ce ses contraintes internes qui lui confèrent une autonomie ? La réponse, génétique, que nous proposons est d'affirmer l'équivalence entre technique et lois technologiques, c'est-à-dire la circularité entre la définition de la technique comme objet d'étude et l'identification de lois technologiques. Comme souligné en exergue de ce chapitre, l'objet technique est évolutif par nature, sa genèse et son évolution ne font pas partie de son être par accident mais en sont l'essence même. Une technique qui évoluerait de façon erratique ou dont les lois d'évolution ne dépendraient que de facteurs externes ne pourrait être l'objet d'une analyse génétique. Approche génétique et évolutionnisme technique se confondent donc, à la fois dans leur objet d'étude (les processus d'évolution) et dans leur but (la caractérisation des lois d'évolution).

L'évolutionnisme se double parfois d'un déterminisme implicite chez certains auteurs, pour qui les processus d'évolution technique échappent aux logiques contingentes, comme cela peut être le cas chez B. Gille, qui considère qu'« on ne peut expliquer le changement technique qu'en insérant le fait technique dans un ordre technologique autonome, indépendant des contextes de

⁶⁰⁷ Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 131.

⁶⁰⁸ Franck Tinland, « La technique comme médiation et comme système », dans Philippe Breton, Alain-Marc Rieu et Franck Tinland, *La Techno-science en question. Éléments pour une archéologie du XX^e siècle*, Seyssel, Champ Vallon, 1993, p. 106.

l'innovation⁶⁰⁹ ». Pourtant, au nom de la lutte contre le fatalisme qui semble attaché au déterminisme technique, la notion de lois technologiques a été fortement critiquée, et l'idée d'une autonomie de la technique présentée comme une hypothèse pernicieuse.

1.2. Critique du déterminisme technique et remise en cause de l'évolutionnisme

« On n'arrête pas le progrès », dit le proverbe, suggérant par là que l'avancée des techniques ne peut être stoppée et que celles-ci, dans leur essence comme dans leur évolution, échappent à l'homme. Ces interrogations autour de l'autonomisation de la technique remontent au XVIII^e siècle et sont généralement le résultat des pensées technophobes⁶¹⁰. Une des illustrations les plus fameuses de ces peurs et fantasmes est le mythe de Frankenstein qui manifeste la crainte que, de l'alliance entre la science et la technique, il résulte des forces échappant au contrôle de leurs créateurs. Si le roman de Mary Schelley, écrit en 1818, constitue une des premières occurrences de ce thème au sein de la culture populaire, son explicitation a été formulée en 1863 par Samuel Butler :

The upshot is simply a question of time, but that the time will come when the machines will hold the real supremacy over the world and its inhabitants is what no person of a truly philosophic mind can for a moment question⁶¹¹.

La littérature et le cinéma de la seconde moitié du XX^e siècle ont d'ailleurs exploité plus avant cette thématique⁶¹², dont le regain d'intensité est à chercher dans l'impact qu'ont pu avoir les bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki, et plus généralement dans le développement des techniques nucléaires, aussi bien civiles que militaires⁶¹³. La tradition *technocritique* allemande, dont les origines se trouvent chez M. Heidegger, s'est aussi largement emparée de la thématique du déterminisme technique, autant dans une perspective politique⁶¹⁴ qu'économique⁶¹⁵. Un des fondements de ces critiques est la crainte d'une émancipation de la technique « devenue autonome, et [formant] un monde dévorant qui obéit à ses propres lois⁶¹⁶ ».

⁶⁰⁹ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 21.

⁶¹⁰ François Jarrige, *Technocritiques. Du refus des machines à la contestation des technosciences*, Paris, La Découverte, 2014.

⁶¹¹ Samuel Butler, art. cit.

⁶¹² Citons les œuvres de Philip K. Dick et de Frank Herbert pour ce qui est de la littérature et, plus récemment, les franchises Terminator et Matrix pour ce qui est du cinéma.

⁶¹³ Günther Anders, *Hiroshima est partout*, Paris, Seuil, 2008.

⁶¹⁴ Hannah Arendt, *Condition de l'homme moderne* [1958], Paris, Pocket, 2002.

⁶¹⁵ Herbert Marcuse, *L'Homme unidimensionnel. Études sur l'idéologie de la société industrielle*, Paris, Les Éditions de Minuit, 1968.

⁶¹⁶ Jacques Ellul, *La Technique ou l'Enjeu du siècle*, *op. cit.*, p. 12.

Les critiques les plus fortes vis-à-vis de l'évolutionnisme technique sont justement passées par la remise en cause de l'idée d'une autonomie de la technique. En reprochant aux évolutionnistes « de se couper de la description concrète et fine du processus d'innovation⁶¹⁷ », dont l'acteur est précisément le sujet humain, les antiévolutionnistes s'attaquent à l'idée d'un monde de la technique autonome, dont les lois d'évolution échapperaient à tout contrôle. Derrière ces critiques transparait la volonté de réaffirmer le libre arbitre de l'*Homo faber*, et de subordonner l'usage, ainsi que le développement des techniques, à sa volonté. Il s'agirait donc de recentrer l'analyse sur les processus d'innovation, au temps plus court que les analyses à grande échelle, car « la source de l'innovation perpétuelle se trouve dans l'homme⁶¹⁸ ». Cependant, ce déplacement de l'échelle d'analyse laisse encore une place aux approches évolutionnistes. Le reproche de fond qui est fait à ces théories est qu'elles procèdent à des constructions *a posteriori*, sous forme de systèmes, de lignées ou de séries, vides de sens et plaquant sur l'histoire des techniques un déterminisme imité des sciences de la nature, qu'il soit d'inspiration biologique ou physique⁶¹⁹. En définitive, « l'évolutionnisme est accusé de dissoudre les singularités historiques dans de grandes lignées évolutives lissées, de dissoudre le singulier dans l'universel, le contingent dans le nécessaire⁶²⁰ ».

À ces critiques en provenance des philosophes et, surtout, des historiens, se sont ajoutées celles émises par les sociologues et les économistes. Les théories sociologiques de l'innovation s'en prennent à l'idée même d'une évolution des techniques, ramenant le changement à sa dimension contingente. Car le changement dans les techniques est un constat partagé aussi bien par les évolutionnistes que par leurs adversaires. Certaines théories de l'invention partagent même l'idée d'un changement sans sujet. C'est le cas de la théorie de l'acteur-réseau⁶²¹, qui cherche à penser le changement en termes de production d'énoncés, l'ancrant ainsi dans ses surdéterminations sociales et culturelles. Enfin, notons que les théoriciens de l'évolutionnisme technique ont dû aussi lutter contre des économistes néoclassiques, pour qui les dynamiques d'optimisation et d'équilibre du marché suffisent à expliquer les changements techniques⁶²². Ce qui donne l'illusion d'une évolution technique linéaire et d'un déterminisme proviendrait de dynamiques purement économiques,

⁶¹⁷ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 73.

⁶¹⁸ Bernadette Bensaude-Vincent, *Éloge du mixte. Matériaux nouveaux et philosophie ancienne*, Paris, Hachette, 1998, p. 90.

⁶¹⁹ Jean-Claude Beaune, *La Technologie introuvable*, Paris, Vrin, 1980.

⁶²⁰ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 99.

⁶²¹ Bruno Latour, *Aramis ou l'Amour des techniques*, Paris, La Découverte, 1992.

⁶²² Pour une discussion plus approfondie sur l'évolutionnisme technique et l'économie, nous renvoyons à Joel Mokyr, « Evolution and Technological Change: A New Metaphor for Economic History? », dans Robert Fox (éd.), *Technological Change. Methods and Themes in the History of Technology*, Amsterdam, Harwood Academic Publishers, 1996.

comme peut l'être la *path dependency* (« un pas conditionne les pas suivants, et certains conditionnent tous ceux qui suivent de façon quasiment irréversible⁶²³ ») ou le *momentum*, défini comme « l'inertie acquise par le système technique de par sa complexification et qui ne contredit pas la doctrine de la construction sociale de la technologie et ne doit pas constituer un support pour la croyance erronée du déterminisme technologique⁶²⁴ ».

Ce bref panorama de la pensée antiévolutionniste montre que l'évolutionnisme et la question de l'autonomie de la technique (et plus généralement, les approches non subjectivistes) ne sont pas nécessairement corrélés. C'est, de notre point de vue, ce qu'il conviendra de développer : une théorie de l'évolution technique capable d'intégrer les actes du sujet. De plus, notre approche se voudra davantage descriptive qu'ontologique, la mise en œuvre pratique de notre méthode primant sur les considérations théoriques mentionnées précédemment. L'objectif est de dépasser le dogmatisme de l'évolutionnisme fort (postulant l'existence de lois technologiques absolues) comme le scepticisme des constructivistes (récusant toute autonomie relative de la technique) :

Refus du dogmatisme : le fait technique n'est pas déterminé en soi indépendamment de l'observateur (l'aporie est alors indépassable) ; refus du scepticisme : il n'est pas non plus rendu inaccessible à la connaissance objective, au seul prétexte que nous n'avons accès à lui qu'à travers notre subjectivité, c'est-à-dire nos catégories⁶²⁵.

1.3. Les différentes échelles du progrès technique

Les lois technologiques ne sont pas des entités métaphysiques *a priori* mais traduisent les contraintes fortes qui pèsent sur les processus d'innovation :

Autonomie des techniques ne signifie pas qu'il y a un *deus ex machina* qui détermine le cours du changement : la notion d'autonomie n'a pas ici un sens métaphysique, mais technologique ; on ne peut pas inventer n'importe quoi, n'importe où, n'importe quand et n'importe comment : la matière impose ses contraintes, il y a une forte cohérence interne du système technique, une inertie qui verrouille les possibilités du développement technique⁶²⁶.

⁶²³ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 30.

⁶²⁴ Thomas P. Hughes, « The Evolution of Large Technological Systems », dans Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes et Trevor Pinch, *The Social Construction of Technological System*, Cambridge, The MIT Press, 1987, p. 80.

⁶²⁵ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 198-199.

⁶²⁶ *Ibid.*, p. 107.

Ce développement, dont le sujet est l'Homme, doit être étudié, mais ce n'est pas l'objet d'étude de l'évolutionnisme technique, car le but de l'approche génétique de la technique est d'élaborer une approche descriptive cherchant à « montrer des lois objectives d'organisation et de transformation des systèmes techniques⁶²⁷ ». Les théories de l'innovation, les approches sociologiques ou culturalistes du changement technique, proposent une lecture de l'histoire des techniques à plus petite échelle, aussi bien temporelle que spatiale. On retrouve d'ailleurs dans ces oppositions des traces du débat entre internalistes et externalistes, les premiers expliquant le changement technique par les processus d'innovation et les seconds, par le jeu des contraintes techniques.

Il y aurait ainsi deux déterminismes, ou plus exactement un déterminisme et un jeu d'interactions, celui global et finalement abstrait de la génération de formes communes par les grandes contraintes matérielles, et, par ailleurs, l'interaction plus fine de l'objet technique avec ses conditions plus spécifiques, non seulement matérielles mais aussi du système technique local, de ses traditions et des significations symboliques dont l'objet technique est porteur⁶²⁸.

L'étude des dynamiques d'évolution se propose d'effectuer une synthèse forte entre internalisme et externalisme, à condition de réussir à prendre en compte les deux échelles. La disjonction opérée par A. Leroi-Gourhan entre *tendance technique* et *faits techniques* s'inscrit dans cette optique :

Les tendances générales peuvent donner naissance à des techniques identiques mais sans lien de parenté matérielle et les faits, quelle que soit leur proximité géographique, sont individuels et uniques⁶²⁹.

Une lecture plus attentive d'André Leroi-Gourhan tend en réalité à rapprocher la tendance technique de l'opération réalisée par l'objet technique : il y a une tendance « charrue », une tendance « à couper n'importe quoi »... Le terme de « tendance » reste néanmoins approprié dans la mesure où il apparaît comme moins rigide, moins déterministe que celui de « loi ». Une autre proposition sémantique a été faite par Alain Gras qui, reprenant Nathan Rosenberg⁶³⁰, parle de « trajectoire technologique⁶³¹ ». L'idée commune sous-jacente à ces expressions est qu'il existe un déterminisme à grande échelle, imposé par les contraintes techniques, elles-mêmes soumises aux « lois de la nature », au sein duquel *Homo faber* est contraint, mais aussi capable, d'opérer des choix :

⁶²⁷ *Ibid.*, p. 80.

⁶²⁸ Smaïl Aït-el-Hadj, *op. cit.*, p. 106.

⁶²⁹ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 1 : *L'Homme et la Matière*, *op. cit.*, p. 15.

⁶³⁰ Nathan Rosenberg, *Inside the Black Box: Technology and Economics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1982.

⁶³¹ Alain Gras, *Fragilité de la puissance. Se libérer de l'emprise technologique*, Paris, Fayard, 2003.

Cette tendance de la matière qui invente sa forme dans le processus de transduction en quoi consiste le fonctionnement n'est pas la « tendance technique » de Leroi-Gourhan dans la mesure où elle se passe de toute provenance anthropologique. Si le milieu anthropologique est à la fois moteur et utilisateur de la genèse, il n'en est pas le principe organisateur (que Leroi-Gourhan voyait encore du côté de l'homme et qualifiait d'intentionnel) : il n'en est que l'opérateur. La genèse technique a besoin de lui parce que lui seul anticipe⁶³².

En définitive, « la liberté de choix et l'intervention des sujets ne sont possibles qu'à l'intérieur des limites fixées par le processus historique qui, lui, est autonome⁶³³ ». Le propre de la mécanologie génétique est ainsi d'exhiber les « tendances lourdes » (selon l'expression d'Yves Deforge) qui structurent l'évolution technique à grande échelle, tout en conservant la possibilité de faire valoir la liberté du sujet et la contingence de l'innovation à petite échelle. Il s'agit aussi d'éviter de retomber dans une *psychologisation* du sujet qui invente, l'autonomie de la technique et le libre arbitre de l'*Homo faber* n'étant en réalité pas incompatibles :

Le technologue n'est pas concerné par le problème de la liberté humaine et par les conditions d'exercice de cette liberté. On peut décrire les lois objectives de l'évolution technique, en technologue, sans nier pour autant que l'homme est un sujet libre⁶³⁴.

Le terme de « loi » est à prendre comme une formalisation de la tendance et des régularités d'évolution, et non dans son acceptation causale. L'autonomie du monde des techniques n'est pas absolue, elle ne suppose pas un domaine ontologique isolé ; elle traduit simplement l'idée que des contraintes structurent le monde matériel, lui conférant des conditions précises d'évolution à l'intérieur desquelles peut s'exercer la créativité d'un sujet transindividuel, intégrant les ressources et les contraintes d'une culture et d'une histoire, et non pas seulement la psychologie individuelle :

Comme l'être vivant a une histoire collective au sens d'une génétique instruite et inscrite dans un phylum – une phylogénèse –, et une histoire individuelle – une épigénèse – réglée par son indétermination confrontée à un milieu singulier et réglant à son tour sa morphogénèse, l'objet technique, inscrit dans une lignée phylétique, met en jeu des lois d'évolution qui lui sont immanentes, même si, à l'instar de l'être vivant, elles ne s'effectuent que sous les conditions

⁶³² Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », art. cit., p. 243.

⁶³³ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 20.

⁶³⁴ *Ibid.*, p. 22.

d'un environnement – le milieu géographique, l'homme et les autres objets techniques, qui peuvent évidemment résister au processus de concrétisation⁶³⁵.

2. Les enjeux du concept de progrès technique

2.1. Quelques arguments antiévolutionnistes

Tenant pour acquise l'hypothèse de l'évolution technique, il nous faut désormais discuter de sa caractérisation en tant que progrès. En effet, « il faut soigneusement distinguer ces deux notions, évolution et progrès, et les évolutionnistes eux-mêmes, J. Lafitte, A. Leroi-Gourhan, G. Simondon, G. Basalla par exemple, n'ont cessé de rappeler cette distinction⁶³⁶ ». Le progrès technique apparaît comme un cas particulier, orienté, de l'évolution technique : non seulement les techniques évoluent, mais elles évoluent tendanciellement vers le mieux. L'autre distinction qui s'impose est celle entre le « Progrès », « mouvement de la civilisation lié aux avancées de la pensée, des sciences et des techniques⁶³⁷ », et le « progrès », « évolution vers un état meilleur⁶³⁸ ». Il n'entre pas dans notre propos de discuter la thématique, chère aux Lumières, du progrès de la civilisation, de l'Humanité dans son ensemble, et nous nous en tiendrons à la problématique du *progrès technique*. Les deux notions sont bien évidemment liées, mais afin d'étudier de façon rigoureuse la seconde, il est nécessaire de les « décorrélérer ». G. Basalla propose une caractérisation du progrès technique reposant sur six postulats :

The concept of technological progress, which has shaped thinking about the nature and influence of technology since the Renaissance, is based on six assumptions.

- First, technological innovation invariably brings about a marked improvement in the artifact undergoing change;
- Second, advancements in technology directly contribute to the betterment of our material, social, cultural, and spiritual lives thereby accelerating the growth of civilization;
- Third, the progress made in technology, and hence in civilization, can be unambiguously gauged by reference to speed, efficiency, power, or some other quantitative measure;
- Fourth, the origins, direction, and influence of technological change are under complete human control;

⁶³⁵ Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », art. cit., p. 244.

⁶³⁶ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 104.

⁶³⁷ *Dictionnaire de l'Académie française*, 9^e édition.

⁶³⁸ *Ibid.*

- Fifth, technology has conquered nature and force it to serve human goals;
- Sixth, technology and civilization reached their highest forms in the Western industrialized nations⁶³⁹.

Ces six points sont en réalité des réponses à des questions censées être ouvertes en histoire et en philosophie des techniques. L'innovation technique est-elle nécessairement une amélioration ? Le progrès technique amène-t-il le progrès civilisationnel ? Peut-on mesurer de manière quantifiable le progrès (technique), et donc le Progrès ? L'homme contrôle-t-il le progrès technique ? Autant de questions auxquelles les partisans de la notion de progrès technique répondent positivement d'après G. Basalla. Les deux derniers points sont davantage « idéologiques que théoriques⁶⁴⁰ », pour reprendre l'expression de V. Bontems : en effet, le sixième point est tout à fait contingent quand le cinquième point, hérité de la vision cartésienne de domination de la nature, est, à l'heure du péril écologique, largement questionné. Nous avons nous-même discuté le quatrième point au paragraphe précédent et vu que la maîtrise par l'homme du processus de progrès technique est à relativiser, et en tout cas à préciser. Quant au deuxième point, interrogeant l'impact du progrès technique sur la civilisation, il est davantage dépendant du type de société, et nous préférons le laisser hors du périmètre de la discussion.

Les premier et troisième points fournissent en revanche une définition précise et opératoire du progrès technique : celui-ci se définirait comme l'amélioration quantifiable de critères techniques. Cette définition conduit, à nos yeux, à un retour en force de l'approche utilitariste des techniques, et ne peut constituer une définition du progrès mobilisable en mécanologie génétique. Pour rappel, l'introduction de la matrice des performances avait justement vocation à illustrer la multiplicité des points de vue que le technologue peut porter sur l'objet technique. Qui plus est, les différents critères envisagés ne sont pas toujours quantifiables, d'où la remise en cause, presque immédiate, du troisième point avancé par G. Basalla. Le point qui cristallise les débats est, cependant, le premier, qui pose l'égalité entre l'innovation technique et l'amélioration de l'objet technique. Tout le débat porte précisément sur le sens à donner au terme « amélioration ». Autant les discussions académiques sur la notion d'évolution peuvent se résumer à l'acceptation, ou non, d'une *direction* commune au sein des changements techniques, autant les débats sur le progrès technique reviennent à discuter l'idée d'un *sens* particulier pour cette direction. C'est cet aspect que les

⁶³⁹ George Basalla, *The Evolution of Technology*, Cambridge, Cambridge University Press, 1988, p. 210-211.

⁶⁴⁰ Vincent Bontems, « Simondon, le progrès et l'évolution des lignées techniques », dans Daniel Parrochia et Valentina Tirloni (dir.), *Formes, systèmes et milieux techniques après Simondon*, Lyon, Jacques André éditeur, 2012, p. 86.

pourfendeurs de la notion de progrès technique ont le plus critiqué. En effet, défini ainsi, le progrès nécessiterait une anhistoricité du critère d'évaluation de la technique : l'homme aurait toujours les mêmes envies et les mêmes besoins ; or, « c'est avant tout l'attitude humaine qui détermine l'historicité de l'objet, en dehors des critères stricts des performances d'usage⁶⁴¹ ». Si G. Basalla est partisan d'un certain évolutionnisme technique, il conteste en revanche largement la conception linéaire et orientée que tend à lui attribuer la notion de progrès technique. Considérant au contraire, par analogie avec le darwinisme, que l'évolution technique est basée sur un processus de variation aléatoire / sélection culturelle, il réfute l'idée d'une direction privilégiée, d'un « vecteur unique et connu d'avance »⁶⁴², dans l'évolution des objets techniques à grande échelle.

Plus généralement, la critique de la notion de progrès technique a été le fait du relativisme culturel. Ce relativisme est double, portant à la fois sur la dimension spatiale et sur la dimension temporelle de la diversité des techniques. Dans le premier chapitre de son ouvrage⁶⁴³, G. Basalla montre que l'absence de véhicules à roues au sein des civilisations andines n'est en rien une preuve du retard de celles-ci par rapport à leurs contemporaines d'Europe. Le principe de la roue était connu des Incas et des Aztèques, mais le recours à de tels véhicules n'apportait aucun gain dans le contexte andin (forêts denses, sols escarpés...) : « Dans leur horizon culturel, la roue ne constituait nullement un progrès⁶⁴⁴ ». La diversité des contextes d'apparition des objets techniques interdirait donc de les comparer entre eux. De cette incommensurabilité découle l'impossibilité d'établir une hiérarchie, et, à plus forte raison, de parler de progrès à grande échelle : « Modes of land transportation, like any other technology, must be evaluated in terms of the cultures in which they were conceived and used⁶⁴⁵ ». Des ethnologues comme Claude Lévi-Strauss ont radicalisé l'idée d'une incommensurabilité des sociétés humaines et son corrélat, à savoir l'impossibilité de comparer des artefacts issus d'aires civilisationnelles éloignées aussi bien spatialement que temporellement, en niant toute possibilité de cumulativité à toutes les échelles, et donc la notion de progrès au sein de l'évolution technique :

[Le progrès] procède par sauts, par bonds, ou, comme diraient les biologistes, par mutations. Ces sauts et ces bonds ne consistent pas à aller toujours plus loin dans la même direction ; ils s'accompagnent de changements d'orientation, un peu à la manière du cavalier des échecs qui

⁶⁴¹ Gilbert Simondon, *Sur la technique*, *op. cit.*, p. 54.

⁶⁴² José Ortega y Gasset, *op. cit.*, p. 40.

⁶⁴³ George Basalla, « Diversity, Necessity and Evolution », in *The Evolution of Technology*, *op. cit.*, p. 1-25.

⁶⁴⁴ Vincent Bontems, « Simondon, le progrès et l'évolution des lignées techniques », *art. cit.*, p. 86.

⁶⁴⁵ George Basalla, *op. cit.*, p. 212.

a toujours à sa disposition plusieurs progressions mais jamais dans le même sens. L'humanité en progrès ne ressemble guère à un personnage gravissant un escalier, ajoutant par chacun de ses mouvements une marche nouvelle à toutes celles dont la conquête lui est acquise⁶⁴⁶.

Ce relativisme temporel se double généralement d'une accusation de présentisme – et d'impérialisme – à l'encontre des défenseurs du progrès. L'idée du progrès nécessite, sous une forme ou une autre, le recours à un processus de cumulativité ; toute illustration du progrès d'un dispositif technique reviendrait, dès lors, à refaire l'histoire de l'artefact en question en partant de son point d'arrivée. Ce « whiggisme technique » ignorerait les tentatives ratées, les lignées éteintes et les technologies oubliées pour effectuer une relecture orientée, et biaisée, de l'évolution technique, conduisant à une vision téléologique du progrès technique.

Enfin, les penseurs les plus pessimistes à l'égard de la technique ont accusé le progrès de n'être qu'un mythe conduisant à l'aliénation de la nature, ainsi qu'à celle de l'homme. À nos yeux, cette critique du progrès technique, que l'on retrouve chez un certain nombre de penseurs allemands (M. Heidegger, H. Marcuse, H. Rosa) mais aussi francophones (J. Ellul), se trompe de cible ; le problème n'est pas celui de la technique, ni de son progrès, mais de son emploi dans la société technicienne⁶⁴⁷ : « Le problème du progrès humain ne peut être posé que si l'on fait intervenir le système complet d'activité et d'existence constitué par ce que l'Homme *produit* et par ce que l'Homme *est*⁶⁴⁸ ». Les condamnations morales du progrès technique sont donc toujours à rattacher à une étape historique de la condition humaine. Restreindre la discussion au seul progrès des artefacts devrait nous éviter ces critiques. Il ne s'agit pas de retomber dans cette « croyance générale au progrès technique⁶⁴⁹ », ni de défendre « l'idée du progrès, funeste sous toutes ses formes lorsque relayée sans critiques⁶⁵⁰ ». Afin d'échapper aux diverses accusations (d'impérialisme, de finalisme, etc.), il nous faut délimiter un cadre méthodologique robuste au sein duquel nous pourrions être habilités à parler de progrès technique, sans faire le jeu, ni des utopies technocratiques, ni des replis technophobes. Comme le résume parfaitement Xavier Guchet :

⁶⁴⁶ Claude Lévi-Strauss, *Race et histoire*, Paris, Gonthier, 1952, p. 38.

⁶⁴⁷ Jacques Ellul, *Le Système technicien*, Paris, Cherche midi, 2012.

⁶⁴⁸ Gilbert Simondon, *Sur la technique*, *op. cit.*, p. 269. C'est l'auteur qui souligne.

⁶⁴⁹ *Ibid.*, p. 54.

⁶⁵⁰ José Ortega y Gasset, *op. cit.*, p. 41.

Ce qui fait le meilleur d'un évolutionnisme technique, c'est donc son intention de délimiter les conditions sous lesquelles un discours sur le changement technique est valide, en délimitant les conditions d'application du concept d'évolution⁶⁵¹.

2.2. Progrès et lignées techniques

Même un penseur sceptique comme G. Basalla reconnaît la possibilité de parler de progrès technique, à condition de bien spécifier le sens de cette notion ainsi que son horizon de validité :

A workable theory of technological evolution requires there be no technological progress in the traditional sense of the term but accepts the possibility of limited progress toward a carefully selected goal within a restricted framework⁶⁵².

Après avoir distingué les notions d'évolution et de progrès, après avoir désambiguïsé les termes de « progrès » et de « Progrès », il nous reste donc à préciser le « cadre restreint » qui nous autorisera à parler du progrès technique. Ce cadre nous est fourni naturellement par la mécanologie. Conscient de la relativité des critères de performance d'une machine, comme de la variabilité des besoins humains, J. Lafitte propose, dès 1933, que « dans les machines, le progrès peut et doit se définir par la seule considération des caractères d'organisation⁶⁵³ ». Afin d'éviter les objections des relativistes culturalistes, J. Lafitte propose, dans un premier temps, d'évacuer les considérations utilitaristes portant sur les machines. Ses vues seront, bien entendu, partagées par G. Simondon, pour qui le progrès des objets techniques ne peut se comprendre qu'à travers leur genèse, et à travers la concrétisation de leur schème technique. En réalité, le concept même de lignée technique suppose implicitement la notion de progrès technique. Certes, la méthode génétique implique d'extraire les objets techniques de leur contexte socioculturel d'invention. Néanmoins, en ne comparant que des objets partageant le même principe de fonctionnement et en les évaluant sous le prisme de leur organisation interne, une réhabilitation de la notion de progrès technique semble possible :

Ainsi, on ne peut parler d'un changement, et même d'un progrès, dit Simondon, que du moteur à combustion interne de 1910 à celui de 1956, c'est-à-dire à l'intérieur de ce que

⁶⁵¹ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 164.

⁶⁵² George Basalla, *op. cit.*, p. 218.

⁶⁵³ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines, op. cit.*, p. 18.

Simondon appelle une même essence technique. En aucun cas il n'est légitime de parler du progrès du moteur à ressort ou à poids au moteur à combustion interne⁶⁵⁴.

G. Basalla indique en outre que la notion limitée de progrès qu'il propose doit être dirigée vers un « objectif soigneusement sélectionné ». Or la définition des lignées techniques que nous avons proposée englobe précisément la dimension fonctionnaliste. Non seulement cela confère une plus grande robustesse à la catégorie conceptuelle de lignée technique, mais cela nous permet aussi d'évacuer les accusations téléologiques. Nous sommes donc autorisés à parler de progrès technique au sein d'une lignée dans la mesure où, celle-ci garantissant une continuité du principe de fonctionnement mais aussi de la fonction, une cumulativité devient possible. Autant pour C. Lévi-Strauss, « c'est seulement de temps à autre que l'Histoire est cumulative, c'est-à-dire que les comptes s'additionnent pour former une combinaison favorable⁶⁵⁵ », autant pour le mécanologue qui étudie des lignées techniques, cette situation se rencontre presque tout le temps.

Il ne serait donc légitime de parler de progrès technique que dans le cadre restreint d'une lignée technique. Pourtant, tout comme leurs homologues biologiques, les lignées techniques peuvent s'éteindre et se voir supplantées par une nouvelle lignée. Comment dès lors comparer ces deux lignées, basées sur des principes ou sur des usages différents, et parler du progrès dans le passage de l'une à l'autre ? X. Guchet nous dit qu'il « est possible de parler d'un changement, et même d'un progrès, à l'intérieur d'une série technologique unifiée par une tendance, par exemple la série des tranchants jusqu'au couteau moderne⁶⁵⁶ ». À la lumière des catégories mécanologiques, nous réinterprétons la série technologique dont il est question comme la famille technique, et la tendance technique d'André Leroi-Gourhan comme l'opération propre à cette famille. En effet, « les tendances générales peuvent donner naissance à des techniques identiques⁶⁵⁷ », tout comme nous avons vu qu'une même famille peut comporter différentes lignées : la « tendance à trancher n'importe quoi » est en réalité une opération de transformation du monde physique. La notion de schème technique pur introduite par G. Simondon, tout comme la tendance technique, ainsi que notre propre notion d'opération, cherchent toutes à penser le progrès au-delà du cadre de la lignée technique, et cela est possible dès lors que l'on compare des objets qui « ont au plan technologique le même mode d'existence⁶⁵⁸ », défini par la persistance d'un invariant.

⁶⁵⁴ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 164.

⁶⁵⁵ Claude Lévi-Strauss, *op. cit.*, p. 39.

⁶⁵⁶ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 164.

⁶⁵⁷ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 1 : *L'Homme et la Matière*, *op. cit.*, p. 15.

⁶⁵⁸ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 164.

Nous distinguons donc deux cadres d'analyse dans l'étude du progrès technique. Le premier, au sein d'une même lignée, permet de discuter le gain de technicité offert par le passage d'une génération à la suivante. Le second autorise une étude à plus grande échelle et permet de formaliser l'enchaînement des lignées techniques, ainsi que la possible hiérarchisation des schèmes techniques subsumés sous le même schème technique pur.

2.3. Évolution convergente et téléonomie

Une part de l'apparent déterminisme technique qui émerge lors de l'étude des lignées techniques vient des contraintes imposées par le monde physique sur la conception des objets techniques. Or, ces contraintes portent aussi bien sur la matière inerte que sur la matière vivante, et pourtant, on ne trouve nulle accusation de déterminisme à l'égard de l'évolutionnisme en biologie : « Qu'on ne s'y trompe pas, ces lignes [d'évolution] rendent simplement un aspect de la vie, celui du choix inévitable et limité que le milieu propose à la matière vivante⁶⁵⁹ ». La mise en garde d'A. Leroi-Gourhan pourrait être transposée telle quelle aux objets techniques, tout comme pourrait l'être la remarque de M. Land à propos de l'évolution de l'œil : « Because the number of physical solutions to the problem of forming an image is finite, convergent evolution has been very common⁶⁶⁰ ». Le choix limité de solutions, dû aux propriétés de la matière et aux lois de la nature, conduit à une évolution des formes, structures et opérations, qui converge vers des types particuliers. G. Simondon abonde d'ailleurs dans ce sens quand il affirme que « les besoins humains se diversifient à l'infini, mais les directions de convergence des espèces techniques sont en nombre fini⁶⁶¹ ».

L'idée d'une évolution qui convergerait vers certaines solutions particulières a été mobilisée dans l'étude des artefacts, consciemment ou non, par A. Leroi-Gourhan et, plus récemment, par Sophie de Beaune :

Mais, dans les faits, cette tendance, quoique partout présente, ne s'exerce jamais qu'à un certain degré car les rapports entre la forme et la fonction laissent place à une certaine liberté, à un certain « jeu ». Si les outils tendent vers une forme idéalement adaptée à leur fonction, de sorte que ceux qui sont destinés à une certaine fonction ont tous un air de parenté de par le monde, ils présentent aussi des différences tenant aux aléas de l'histoire et de la culture. La

⁶⁵⁹ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 1 : *L'Homme et la Matière*, *op. cit.*, p. 14.

⁶⁶⁰ Michael F. Land et Russell D. Fernald, art. cit., p. 3.

⁶⁶¹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 26.

tendance vers l'adéquation de la forme à la fonction, tout comme l'arbitraire relatif que semblent introduire les contingences culturelles, sont l'une et l'autre sources d'une beauté, l'une liée au souci de perfection technique, l'autre recherchée pour elle-même⁶⁶².

L'évolution des outils, et plus largement des objets techniques, se ferait dans le sens d'une adéquation toujours plus fine vis-à-vis de leur fonction idéale. D'où une convergence des formes faisant fi des différences culturelles, les possibilités techniques étant limitées par les possibilités offertes par la matière⁶⁶³. Le phénomène d'évolution convergente, initialement développé en biologie, peut se transposer dans le champ technologique et ainsi expliquer, d'une part, pourquoi des aires culturelles séparées ont pu inventer des dispositifs techniques analogues, d'autre part, pourquoi les objets techniques évoluent selon des lois partagées. Nulle téléologie ici. L'évolution (et le progrès) des techniques n'est pas dictée par la mise en œuvre de causes finales mais résulte de processus de conception. Cependant, les contraintes imposées par la matérialité même des artefacts conduisent à des lignes d'évolution limitées, faisant émerger des lois générales qui sont autant d'illustrations du caractère téléonomique du progrès technique, selon la définition qu'en donne Henri Atlan, reprenant Jean Monod :

Un processus téléonomique ne fonctionne pas en vertu de causes finales alors même qu'il en a l'air, alors même qu'il semble orienté vers la réalisation de formes qui n'apparaîtront qu'à la fin du processus. Ce qui le détermine en fait ce ne sont pas ces formes comme causes finales, mais la réalisation d'un programme, dans une machine programmée dont le fonctionnement semble orienté vers la réalisation d'un état futur, alors qu'il est en fait déterminé causalement par la séquence d'états où le programme préétabli l'a fait passer⁶⁶⁴.

Nous pouvons trouver une origine cybernétique – technologique, donc – au concept de téléonomie⁶⁶⁵ et la considérer comme une téléologie émergente. Récupéré par les biologistes, le concept de téléonomie jette en retour un nouvel éclairage sur le progrès technique. Celui-ci semble orienté vers un but particulier mais en réalité, il est déterminé par les actions de l'Homme et les réponses de son environnement et de sa culture : le sujet actif de l'invention technique intègre toujours une série de boucles de rétroaction à son acte inventif. De ses actions peuvent alors

⁶⁶² Sophie A. de Beaune, « De la beauté du geste technique en préhistoire », *Gradhiva*, n° 17, 2013, p. 26-49.

⁶⁶³ Voir à ce titre l'analyse des différents emmanchements dans Gilbert Simondon et Jean Le Moynes, « Entretien sur la mécanologie », art. cit.

⁶⁶⁴ Henri Atlan, *Entre le cristal et la fumée. Essai sur l'organisation du vivant*, Paris, Seuil, 1979, p. 14.

⁶⁶⁵ Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow, « Behavior, purpose and teleology », *Philosophy of science*, n° 10, 1943, p. 18-24.

émerger des lois qu'il n'a pas formulées explicitement ; voilà pourquoi « tout progrès apparaît donc, non pas comme strictement déterminé, mais comme intentionnel⁶⁶⁶ », ou, dit autrement à propos d'un des processus émergents rencontrés au cours de notre étude, « concretization is the result of human actions but not necessarily of human design⁶⁶⁷ ».

3. Technoévolution et bioévolution

3.1. L'inspiration biologique de la mécanologie

Le concept de téléonomie rejoint ainsi la longue liste des concepts issus de la biologie et mobilisés dans le champ de la technologie. La mécanologie a elle aussi eu largement recours aux métaphores et analogies biologiques⁶⁶⁸, et ce, dès ses origines :

Ensuite, puisque chaque machine s'offre à nous comme un complexe organique, susceptible de fonctionnement et sujet aux contraintes du temps, chacune d'elles et l'ensemble qu'elles forment peuvent susciter, et suscitent en effet, l'application de disciplines de recherche et d'explication qui sont propres à tout ce qui est organisé. Que l'on veuille ou non que la biologie se porte un jour à s'intégrer dans une organologie, science plus vaste et connaissant tout ce qui fonctionne, il reste, cependant, que l'étude des machines relève, encore, de disciplines étroitement comparables aux disciplines biologiques⁶⁶⁹.

Objets artificiels et êtres vivants partagent un certain nombre de caractéristiques : ils sont organisés, présentent à la fois diversité et unité, et évoluent d'une manière relativement autonome qui semble échapper en partie à « la connaissance et la volonté déterminante de l'Homme⁶⁷⁰ ». L'organologie appelée par J. Lafitte – le terme est aussi utilisé dans des acceptions différentes par Simondon (pour qui elle ne concerne que les éléments) et B. Stiegler (pour qui elle englobe aussi

⁶⁶⁶ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 2 : *Milieu et techniques*, *op. cit.*, p. 412.

⁶⁶⁷ Paul Dumouchel, *art. cit.*, p. 413.

⁶⁶⁸ Symétriquement, on peut considérer que les sciences du vivant se sont en partie fondées sur la base du mécanisme cartésien. L'article de Canguilhem « Machine et organisme » insiste sur la complexité du chassé-croisé entre biologie et mécanologie, et montre la difficulté à établir quel est le concept d'origine et d'où vient la métaphore. Plutôt que de chercher à établir une priorité, notons que cela témoigne d'une « homologie » : biologie et mécanologie héritent d'un « ancêtre commun », l'histoire naturelle, qui propose un mode d'explication « génétique », c'est-à-dire partant de l'origine du phénomène, par opposition à une explication analytique (physico-mathématique) ou contingente (historique).

⁶⁶⁹ Jacques Lafitte, « Sur la science des machines », *art. cit.*, p. 145.

⁶⁷⁰ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 16.

les organisations sociales⁶⁷¹) – souligne la potentielle fécondité des concepts biologiques pour la mécanologie. Cette « assimilation organologique⁶⁷² » peut s'envisager selon deux modalités. Soit nous considérons, avec J. Lafitte, que l'objet technique est un organisme composé d'organes, soit nous assimilons l'objet technique lui-même à un organe, et nous retombons sur la conception de l'outil comme prolongement du corps. G. Simondon opte pour la première solution. S'il mobilise un vocabulaire issu de la biologie, il le fait davantage pour illustrer ce qui fait la spécificité de l'objet technique, car il s'agit pour lui de penser les techniques *sui generis* :

Transposée en termes biologiques, l'évolution [technique] consisterait en ce fait qu'une espèce biologique produirait un organe qui serait donné à un individu, devenant par là le premier terme d'une lignée spécifique qui à son tour produirait un organe nouveau. Dans le domaine de la vie, l'organe n'est pas détachable de l'espèce ; dans le domaine technique, l'élément, précisément parce qu'il est fabriqué, est détachable de l'ensemble qui l'a produit ; là est la différence entre l'engendré et le produit⁶⁷³.

Une organologie indifférenciée englobant à la fois la biologie et la mécanologie risquerait de gommer l'une des spécificités, et une des forces, de l'organisme technique : le caractère détachable et transductif des éléments techniques.

La seconde solution, celle qui consiste à considérer toutes les machines comme des outils, des prolongements du corps, est plus proche des thèses de A. Leroi-Gourhan sur l'extériorisation et est à rapprocher de la *loi de Geblen* qui stipule que « l'espèce humaine a projeté l'un après l'autre sous la forme de moyens techniques objectivés les éléments des différentes fonctions pratiques de l'organisme humain⁶⁷⁴ ». On retrouve cette conception aussi bien chez des philosophes de la technique, comme Ernst Kapp) que chez des scientifiques comme Werner Heisenberg. Elle confère à l'objet technique un statut ambigu, ni tout à fait artificiel, ni tout à fait naturel :

⁶⁷¹ Nous trouvons la définition suivante : « L'organologie générale est une méthode d'analyse conjointe de l'histoire et du devenir des organes physiologiques, des organes artificiels et des organisations sociales. Elle décrit une relation transductive entre trois types d'organes physiologiques, techniques et sociaux ». Source Art Industrialis, [URL = <http://arsindustrialis.org/organologie-générale>].

⁶⁷² Xavier Guchet, « Évolution technique et objectivité technique chez Leroi-Gourhan et Simondon », art. cit., p. 5.

⁶⁷³ Gilbert Simondon, *L'Individuation psychique et collective*, Paris, Aubier, 2007, p. 66-67.

⁶⁷⁴ Jean-Pierre Sérís, *op. cit.*, p. 172. On retrouve une formulation proche chez W. Heisenberg, *op. cit.*, p. 130 : [La Technique] apparaît plutôt comme un événement biologique à grande échelle au cours duquel les structures internes de l'organisme humain sont transportées de plus en plus dans le monde environnant l'homme ».

Dans l'avenir, les nombreux appareils techniques seront peut-être aussi inséparables de l'homme que la coquille, de l'escargot ou la toile, de l'araignée. *Mais même en ce cas ces appareils seraient des parties de l'organisme humain*, plutôt que des parties de la nature environnante⁶⁷⁵.

Cette conception a été fortement critiquée, en particulier par Hannah Arendt, qui dénonce le « délabrement du monde des objets⁶⁷⁶ ». Identifié à un organe, l'objet technique perd la spécificité de son organisation et sa relative autonomie. L'évolution de la technique semble dépouiller l'homme de ses organes et provoquer un amoindrissement de la condition humaine. Le vivant et l'artificiel, s'ils possèdent des aspects communs, appartiennent néanmoins à deux ordres d'intelligibilité distincts de l'organisme : la matière organique et la matière organisée. La naturalisation de la technique est à l'opposé des objectifs de la mécanologie, qui cherche, entre autres choses, à penser ce qui fait la spécificité des objets techniques. Il ne faut donc pas verser dans l'assimilation naïve de la technique et de la biologie et faire d'elle « un processus biologique qui par sa nature même se trouve soustrait au contrôle de l'homme⁶⁷⁷ ».

À l'opposé, nous trouvons chez certains auteurs l'idée que la technique est fondamentalement anti-biologique dans la mesure où elle est « le contraire de l'adaptation du sujet au milieu, vu qu'elle est l'adaptation du milieu au sujet⁶⁷⁸ ». Plus qu'une confrontation entre, d'un côté, le sujet humain et ses artefacts et, de l'autre, le milieu naturel et ses organismes, il s'agit, selon Herbert Simon, « d'envisager le phénomène artificiel comme étant le fruit de la rencontre entre un environnement interne et un environnement externe. L'environnement interne désigne à la fois l'organisation de l'artefact et sa substance ; l'environnement externe comprend le milieu⁶⁷⁹ ». Cette caractéristique forte, celle de la structure topologique qui intègre un « milieu intérieur » permettant une auto-régulation par rapport aux variations du milieu extérieur, est partagée par le vivant et certains organismes artificiels. Elle permet de penser l'analogie entre les deux sans tomber dans la réduction de l'un à l'autre, et suggère même que le sujet humain, dont la conscience constitue un milieu intérieur psychique, dispose d'un mode d'appréhension analogique intuitif de ces deux types d'organismes parce qu'il est lui-même capable d'auto-conditionnement et d'invention au cours de son évolution :

⁶⁷⁵ Werner Heisenberg, *op. cit.*, p. 130. C'est l'auteur qui souligne.

⁶⁷⁶ Hannah Arendt citée dans Xavier Guchet, *art. cit.*, p. 5.

⁶⁷⁷ Werner Heisenberg, *op. cit.*, p. 132.

⁶⁷⁸ José Ortega y Gasset, *op. cit.*, p. 32.

⁶⁷⁹ Catherine Quinet, « Herbert Simon et la rationalité », *Revue française d'économie*, vol. 9, n° 1, 1994, p. 158.

L'analogie de l'être technique avec l'être vivant prend ici son sens le plus profond. De même que l'être vivant échappe à la connaissance d'entendement, et appelle un mode de connaissance spécifique (l'intuition bergsonienne par exemple), de même l'être technique qui se concrétise appelle aussi un mode de connaissance spécifique, qui n'est pas, dit Simondon, une connaissance par concept⁶⁸⁰.

3.2. Darwinisme et lamarckisme techniques

L'autre grand champ lexical issu de la biologie et importé en technologie est celui de l'évolutionnisme. Si les termes « famille », « classe », « espèce » et « genre » sont directement hérités de la classification classique, ceux de « lignée technique » et d'« évolutionnisme » découlent de la systématique phylogénétique, ou cladisme. Ce système de classification des êtres vivants est apparu aux alentours de 1950, alors que la génétique était une notion à la mode :

Il faut par ailleurs noter le succès culturel et intellectuel de la notion de génétique dans de nombreux domaines, dans le second XX^e siècle, à commencer par la biologie, son lieu d'origine, puis les sciences du développement de l'homme⁶⁸¹.

L'épistémologie génétique de Jean Piaget, bien qu'inspirée des travaux antérieurs d'Herbert Spencer et de William James en épistémologie évolutionniste, s'inscrit dans cette tendance du XX^e siècle à mobiliser les concepts de la biologie génétique au sein d'autres disciplines. L'idée qu'il faut considérer, « par méthode, toute connaissance sous l'angle de son développement dans le temps⁶⁸² » est d'ailleurs un des fondements de la philosophie de G. Simondon concernant les objets techniques⁶⁸³. Plus récemment, le recours aux cladogrammes a été mobilisé par Niles Eldredge dans sa reconstruction historique de l'évolution des cornets⁶⁸⁴, tout en gardant à l'esprit que les transferts conceptuels entre biologie et technologie ne doivent pas aboutir à la réduction de l'une à l'autre :

Problems in reconstructing the history of material cultural evolution with biological methods have allowed us to pinpoint some essential differences between evolutionary

⁶⁸⁰ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 178.

⁶⁸¹ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences ? », art. cit., p. 204.

⁶⁸² Jean Piaget, *Introduction à l'épistémologie génétique*, *op. cit.*, p. 18.

⁶⁸³ Piaget et Simondon ont d'ailleurs ceci en commun qu'ils ont tous deux été professeurs de psychologie.

⁶⁸⁴ Niles Eldredge, « Paleontology and cornets: thoughts on material cultural evolution », *Evolution, education and outreach*, vol. 4, septembre 2011, p. 364-373.

processes in culture and nature that have largely been overlooked in studies otherwise focusing on the apparent similarities between the two systems⁶⁸⁵.

Pour certains, les rapports entre progrès techniques et progrès biologiques permettent de penser ce qui fait la spécificité de ces deux ordres⁶⁸⁶. Pour d'autres, l'analogie entre technoévolution et bioévolution se justifie par l'existence d'un courant profond de « créativité cosmique⁶⁸⁷ », sorte de niveau métaphysique atteignable à travers ses manifestations empiriques : évolution biologique, évolution technique, évolution des connaissances... Cette « intuition » se justifie réciproquement par l'existence de nombreuses similitudes (présence concomitante de diversité et d'unité, de changements qui semblent orientés...) que seule une théorie de l'évolution permettrait d'expliquer⁶⁸⁸. Le statut du processus de concrétisation possède en outre un statut proche des lois d'évolution biologiques :

[Concretization] is more like natural selection or genetic drift in biological evolution, not evolution itself but an evolutionary force the effect of which can be reduced or increased by the presence of other forces⁶⁸⁹.

Nous considérons que c'est avant tout à la faveur des nouvelles connaissances produites que l'usage de l'analogie se justifie. Ainsi, les réflexions menées dans le cadre de la biologie peuvent apporter un nouvel éclairage en mécanologie et conduire à la production de nouvelles connaissances. Deux systèmes conceptuels se sont longtemps affrontés en biologie évolutionniste : le lamarckisme et le darwinisme. En mécanologie, l'usage analogique assez relâché (c'est-à-dire ne conservant que partiellement la structure du concept d'origine et non l'ensemble de ses relations avec d'autres concepts) que nous faisons des concepts biologiques nous autorise à sélectionner certaines notions et à en délaisser d'autres, sans avoir à accepter l'entièreté des implications du système d'origine. Il ne sera ainsi pas question de proposer un darwinisme ou un lamarckisme technologique strict, mais de sélectionner les concepts à importer.

⁶⁸⁵ Ilya Tëmkin et Niles Eldredge, « Phylogenetics and material cultural evolution », *Current anthropology*, n° 48, 2007, p. 148.

⁶⁸⁶ Silvia De Cesare, « Disentangling organic and technological progress : an epistemological clarification introducing a key distinction between two levels of axiology », *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, vol. 73, Issy-les-Moulineaux, Elsevier, 2019, p. 44-53.

⁶⁸⁷ L'expression est de Gilbert Hottois.

⁶⁸⁸ Theodosius Dobzhansky, « Nothing in biology makes sense except in the light of evolution », *The American Biology Teacher*, n° 35, 1973, p. 125-129.

⁶⁸⁹ Paul Dumouchel, « Gilbert Simondon's plea for a philosophy of technology », *Inquiry*, n° 35, 1992, p. 414.

Ainsi, en adoptant le point de vue du darwinisme, nous utiliserons la notion de mutation pour éclairer celle d'invention : si « les perfectionnements mineurs s'accomplissent dans une certaine mesure au hasard », les « perfectionnements majeurs [...] introduisent une discontinuité dans la genèse concrétisante, une “mutation”⁶⁹⁰ ». De même, la notion, centrale, de sélection fournira une nouvelle compréhension des causes de l'évolution : « “Les causes extrinsèques” sont bien la cause de la sélection de telle ou telle sorte d'objet sans être celle de son ontogenèse proprement technique⁶⁹¹ ». Mais autant en biologie il s'agit de parler de mutation aléatoire et de sélection naturelle, autant en mécanologie nous parlerons de « mutation orientée⁶⁹² » et de sélection artificielle. Le lamarckisme intervient donc de manière déterminante : les couples mutation orientée / sélection artificielle et mutation aléatoire / sélection naturelle diffèrent en ceci que dans le premier cas, il existe un gradient qui oriente les inventions dans le même sens, fondant par là même la possibilité d'un progrès cumulatif (qui ne se retrouve pas en biologie).

L'invention, assimilée à une mutation de l'objet technique au sein d'un système technique donné, peut passer par la détachabilité des éléments techniques, donnant une impression de continuité sur laquelle nous reviendrons au paragraphe 5.2. :

Le génie inventif est combinatoire, proche d'une “logique du vivant” : l'évolution, même technique, doit être pensée en termes de *reproduction*. C'est aussi ce que signifie la continuité, qui est ici diachronique autant que synchronique, même si des effets de rupture se manifestent à notre échelle comme phénomènes les plus apparents de l'évolution technique. Car l'idée de continuité n'exclut pas celle de mutation. Une mutation est un phénomène catastrophique à l'intérieur de la continuité essentielle qui, combinatoire, la rend possible⁶⁹³.

Il en découle un *arbre de l'évolution technique* radicalement différent de l'arbre de la vie, dont une illustration est donnée par la figure 71 :

⁶⁹⁰ Jean-Yves Château, art. cit., p. 27.

⁶⁹¹ *Ibid.*, p. 26.

⁶⁹² L'expression est de Jean-Yves Château.

⁶⁹³ Bernard Stiegler, *La technique et le temps*, op. cit., p. 88.

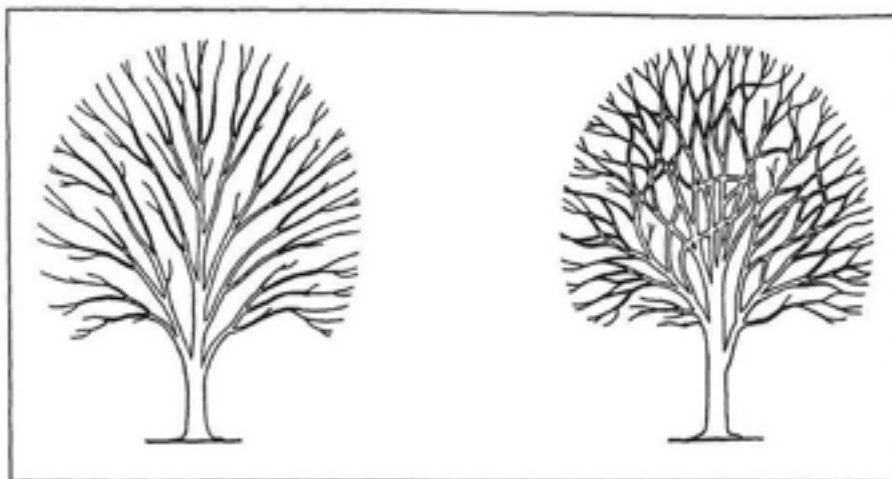


Figure 71 – « Arbre de l'évolution biologique » (à gauche) et « arbre de l'évolution culturelle » (à droite).

Nous réinterprétons ce dernier comme « arbre de l'évolution technique ».

(Source : Alfred Louis Kroeber, *Anthropology : culture patterns and processes*, 1923)

Il n'y a pas d'indépendance pure de l'objet technique vis-à-vis de son environnement socio-économique, comme il n'y pas d'indépendance de l'être vivant vis-à-vis de son milieu naturel, mais il y a des logiques propres qui s'en émancipent tendanciellement. « L'analogie entre la bioévolution et la technoévolution ne repose donc pas sur une assimilation pure et simple entre organisation biologique et organisation technique⁶⁹⁴ ». La nécessité de penser à la fois la variabilité des techniques et leurs tendances évolutives conduit à proposer une synthèse *lamarcko-darwinienne* en évolutionnisme technique.

3.3. Le caractère méthodologique de l'analogie

Cette proposition de synthèse, qui n'aurait aucun sens dans le champ biologique, est là pour rappeler l'usage avant tout métaphorique (analogie relâchée) qui est fait de la bioévolution pour penser la technoévolution. Les critiques en provenance des socioconstructivistes manquent complètement cet aspect. Ainsi en va-t-il de la critique que fait B. Latour de l'évolutionnisme technique « naïf » de la RATP : face à une affiche présentant une succession d'autobus soulignée du message « Darwin avait raison », le professeur Norbert H. rappelle que les autobus n'ont pas d'organes sexuels et qu'il semble douteux qu'un autobus puisse descendre d'un autre⁶⁹⁵. Or, la force de l'analogie entre techno et bioévolution réside avant tout dans son caractère méthodologique, et

⁶⁹⁴ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 96.

⁶⁹⁵ Bruno Latour, *op. cit.*, p. 10-11.

il semble malhonnête de la critiquer d'un point de vue ontologique. Les évolutionnistes techniques en ont toujours eu conscience et les mécanologues ont dès le début considéré que :

Si quelque jour les machines jouissent de la propriété de croître et de se reproduire suivant des lois identiques à celles qui régissent la croissance et la reproduction des êtres vivants, elles se rangeront alors parmi ceux-ci, commenceront d'échapper au contrôle de l'homme créateur et cesseront d'être des machines véritables⁶⁹⁶.

Les machines diffèrent donc radicalement des êtres vivants en ceci qu'elles ne possèdent pas « l'essentielle propriété de pouvoir croître et se reproduire, par leur activité propre⁶⁹⁷ ». Dans notre étude, nous mobilisons les analogies entre évolution biologique et technique à des fins avant tout métaphoriques, afin d'apporter un nouvel éclairage sur des processus particulièrement complexes, tout en gardant à l'esprit qu'il s'agit de deux ordres de compréhension distincts. G. Simondon a, quant à lui, justifié par sa notion de transduction les analogies usant des concepts d'autres disciplines :

Je crois légitimer l'analogie, je crois légitimer le paradigmatisme, et je crois aussi légitimer l'emploi d'une analogie par la notion de transduction. Il y a en quelque manière identité entre la méthode que j'emploie, qui est une méthode analogique, et l'ontologie que je suppose, qui est une ontologie de l'opération transductive de prise de forme⁶⁹⁸.

Mais chez G. Simondon, l'analogie se veut davantage que simplement méthodologique. Sa méthode génétique est certes inspirée de la biologie, mais sa conception de l'objet technique aussi, via la notion de prise de forme. Rien d'étonnant dans la mesure où cette dernière a aussi été largement étudiée par une de ses grandes sources d'inspiration : A. Leroi-Gourhan. Celui-ci considère en effet que, les techniques accompagnant le développement de l'homme, il y a une évolution conjointe de l'entité biologique humaine et de ses artefacts – nous pourrions à ce titre parler d'un *évolutionnisme psychobiotecnologique*. Cette coévolution se lit d'ailleurs plus dans les sociétés préindustrielles et suggère une explication à la présence de techniques identiques au sein d'ères géographiques distinctes. Une fois dépassé le stade de l'industrialisation, la technique s'affranchit de ses limitations culturelles, et ses schèmes s'universalisent et se rapprochent du vivant. Ces

⁶⁹⁶ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 26.

⁶⁹⁷ *Ibid.*, p. 26.

⁶⁹⁸ Gilbert Simondon, « Forme, information et potentiel », *Bulletin de la société française de philosophie*, n° 4, 1960, p. 87.

arguments font partie de la rhétorique des partisans du biomimétisme. Sans tomber dans une assimilation ontologique, relevons, pour finir, que la notion transductive de prise de forme permet d'en éclairer les succès tout en justifiant l'usage métaphorique des analogies entre bioévolution et technoévolution.

4. L'évolutionnisme technique vu par la mécanologie génétique

4.1. L'évolution des machines chez Jacques Lafitte

Une première lecture des *Réflexions* tend à ranger J. Lafitte parmi les auteurs cherchant à voir la machine comme résultant de l'extériorisation d'organes et de fonctions propres à l'homme : « Nos machines, c'est nous-mêmes, parce qu'elles sont une partie de nos fonctions propres, extériorisées par une sorte de débordement de notre propre vie⁶⁹⁹ ». D'où sa formulation d'une loi s'apparentant à la loi de Gehlen :

Sous l'influence des progrès des sciences mécaniques et physiques, d'une application si généralisée dans la construction, la machine d'abord considérée comme un transformateur de mouvement s'est trouvée successivement considérée comme un transformateur de forces puis d'énergie⁷⁰⁰.

En réalité, une lecture plus attentive nous montre que J. Lafitte, comme A. Leroi-Gourhan après lui, a conscience que l'évolution technique des machines accompagne le développement biologique de l'espèce humaine, d'où, pour les machines, « un perfectionnement simultané de l'organisation générale, de la structure, des formes extérieures, fort analogue au perfectionnement qui s'observe chez les êtres vivants⁷⁰¹ ». Nulle réduction de l'un à l'autre, on l'a dit, J. Lafitte utilisant le langage de l'organisation et de l'hérédité à des fins avant tout métaphoriques.

De plus, nous retrouvons à plusieurs endroits l'idée que les machines « traduisent, tour à tour, dans leurs formes différentes, le même lent progrès de notre connaissance de la nature et de ses lois⁷⁰² ». Nulle part chez J. Lafitte, nous ne trouvons l'expression « lois d'évolution » ; en revanche, et en conformité avec ses principes classificateurs, est affirmée à plusieurs reprises l'existence d'un

⁶⁹⁹ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 13.

⁷⁰⁰ *Ibid.*, p. 30.

⁷⁰¹ *Ibid.*, p. 107.

⁷⁰² *Ibid.*, p. 93.

ordre dans le perfectionnement de la série mécanologique, comme dans celui des lignées, et cet ordre fait que :

Prenant successivement conscience des formes, puis des forces, puis enfin des variations dans les forces elles-mêmes, l'homme a, dans le même temps, et à mesure de ces progrès, conçu puis créé les machines passives, puis les actives, et les réflexes enfin⁷⁰³.

Plus qu'une loi de Gehlen déguisée, il s'agit ici de considérations ontologiques sur l'évolution et le progrès des machines : « La distribution généalogique, dans les machines, reproduit l'ordre même suivi par l'homme dans ses créations⁷⁰⁴ ». L'ontogenèse reproduit la phylogenèse ; l'évolution des individus reproduit l'ordre de la série entière, qui fait passer les machines du type passif au type actif puis au type réflexe⁷⁰⁵. Bien que cherchant à rattacher l'évolution des techniques à des processus darwiniens, J. Laffite fait à plusieurs reprises montre d'un lamarckisme implicite, comme c'est le cas ici, à travers l'établissement d'une loi de complexification des machines. Mais cette complexification concerne l'évolution du type des machines au sein de la série mécanologique ; elle diffère de la tendance à la complexification observée au sein d'une même ligne de machines, qui est le pendant du processus de simplification organique. J. Lafitte souligne :

La constatation dans les machines, tantôt d'une différenciation de fonctions s'isolant en des organes spéciaux et qui entraîne une complexité augmentée de l'organisation ; tantôt de la dégradation, de la disparition, du déplacement de certains organes, entraînant des variations correspondantes dans les fonctions et modifiant aussi l'organisation dans un sens de simplification⁷⁰⁶.

Cette alternance entre des complexifications et des simplifications structurelles résulte elle-même d'un double processus de différenciation et de simplification fonctionnelles. Pour J. Lafitte, la compréhension des machines passe par la prise en compte de cette complémentarité entre considérations structurelles et fonctionnelles, complémentarité à la base de l'évolution des machines : « Les machines évoluent par une dialectique constante entre l'évolution fonctionnelle, l'architecture générale de leur organisation, et les composantes que cette architecture organise et

⁷⁰³ *Ibid.*, p. 85.

⁷⁰⁴ *Ibid.*, p. 63.

⁷⁰⁵ Notons que le passage de l'optique *passive* à l'optique *active* puis à l'optique *adaptative* et à l'*interférométrie* semble aller dans le sens des vues de Jacques Lafitte.

⁷⁰⁶ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 107.

donc recompose⁷⁰⁷ ». Le moteur de l'évolution des machines est donc à chercher dans la dialectique entre les besoins utilitaires humains et les contraintes techniques structurelles. Constatant que « certaines lignées, plus vigoureuses, si l'on peut dire, parce que répondant mieux aux besoins les plus profonds de l'humanité, poussent des rameaux plus étendus⁷⁰⁸ », J. Lafitte semble donner la priorité aux considérations utilitaires, ce qui s'explique par sa volonté de rattacher la mécanologie aux sciences sociales.

4.2. Le statut du progrès en génétique technique

Grâce à G. Simondon s'opère la jonction entre la mécanologie et un évolutionnisme technique plus conforme à ce que nous avons défini comme étant l'approche génétique. En affirmant la nécessité de placer la genèse des objets techniques au centre de toute étude technologique, G. Simondon définit l'objet technique comme étant par nature en évolution, en genèse permanente : « L'objet de la technologie, c'est le processus de concrétisation, la genèse technique, et non l'objet lui-même⁷⁰⁹ ». Le processus de concrétisation, à l'œuvre au sein de la lignée technique, fait passer l'objet technique du stade abstrait au stade concret. Dans l'objet primitif abstrait, chaque sous-système fonctionnel fonctionne en autarcie, et des problèmes de compatibilité peuvent nuire au fonctionnement global de l'objet. Au contraire, « l'objet technique concret est celui qui n'est plus en lutte avec lui-même⁷¹⁰ », il est entièrement unifié et les différents sous-systèmes agissent de concert dans la réalisation du schème technique. La concrétisation s'entend comme un gain de synergies internes, une certaine « résonance interne » de ses parties fonctionnelles au cours de son fonctionnement, « la convergence des fonctions dans une unité structurale⁷¹¹ », une « surdétermination plurifonctionnelle qui est l'auto-corrélation des différents composants⁷¹² ».

C'est la redistribution fonctionnelle, correspondant aux réorganisations structurales globales qui jalonnent l'évolution de l'objet technique, qui sous-tend le processus de concrétisation. Mais contrairement à J. Lafitte, G. Simondon précise qu'il ne s'agit pas d'un processus dialectique, la négativité n'étant motrice que parce qu'elle pousse l'homme à inventer de nouveaux principes d'organisation. Le schème technique simondonien, vue en première approximation comme

⁷⁰⁷ Smail Aït-el-Hadj, *op. cit.*, p. 77.

⁷⁰⁸ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines, op. cit.*, p. 80.

⁷⁰⁹ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 196.

⁷¹⁰ Gilbert Simondon, MEOT, p. 41.

⁷¹¹ Gilbert Simondon, *L'Individu et sa genèse physico-biologique*, Paris, Presses universitaires de France, 1964, p. 3.

⁷¹² Gilbert Simondon, *Cours sur l'invention*, p. 3.

l'opération interne réalisée par l'objet technique, peut se voir comme un *tertium quid* entre la structure et la fonction, entre intériorité et extériorité de l'objet. Il fonde la possibilité du progrès technique en permettant une mise en relation dynamique :

La nécessité de l'adaptation non à un milieu défini à titre exclusif, mais à la fonction de mise en relation de deux milieux l'un et l'autre en évolution, limite l'adaptation et la précise dans le sens de l'autonomie et de la concrétisation. Là est le véritable progrès technique⁷¹³.

La concrétisation se double, comme chez Lafitte du reste, d'un processus de différenciation⁷¹⁴, mais G. Simondon rappelle que l'« on ne doit pas confondre une augmentation du caractère concret de l'objet technique avec un élargissement des possibilités de l'objet technique par complication de sa structure⁷¹⁵ ». La concrétisation ne consiste pas nécessairement en une complexification ; la complexification structurale, telle que nous l'avons mise en évidence dans l'évolution de la lignée des télescopes, résulte de la nécessaire intégration de sous-systèmes correctifs venant compenser les résidus d'abstraction. Pour qu'il y ait concrétisation, il faudrait une reconfiguration structurale globale qui dépasse les incompatibilités des différents sous-systèmes pour engendrer un système plus synergique : « C'est dans les incompatibilités naissant de la saturation progressive du système de sous-ensembles que réside le jeu des limites dont le franchissement constitue un progrès⁷¹⁶ ». Le progrès technique passe par le franchissement des contradictions internes qui caractérisent les phases de saturation technique. Il s'agit davantage d'une simplification du plan d'organisation de l'objet, qui « tend vers la cohérence interne⁷¹⁷ ».

Nous pouvons trouver les prémisses de ces considérations dans le lamarckisme de J. Lafitte, lorsque celui-ci énonce que « l'unité organique de l'individu se précise et s'affirme à mesure que son organisation s'emploie d'une manière plus soutenue⁷¹⁸ ». La fonction crée l'organe et, surtout, pousse l'individu technique à l'unité organique. Or le paradigme de l'individu unifié est l'être vivant. Voilà pourquoi « les objets techniques tendent vers la concrétisation, tandis que les objets naturels tels que les êtres vivants sont concrets dès le départ⁷¹⁹ ». Loin de tomber dans l'assimilation de l'objet technique au vivant, G. Simondon fait du vivant l'asymptote évolutive des objets techniques.

⁷¹³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 65.

⁷¹⁴ *Ibid.*, p. 37.

⁷¹⁵ *Ibid.*, p. 36.

⁷¹⁶ *Ibid.*, p. 32.

⁷¹⁷ *Ibid.*, p. 56.

⁷¹⁸ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines, op. cit.*, p. 108.

⁷¹⁹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 59.

L'autre différence fondamentale qui existe entre les règnes biologique et artificiel réside dans la détachabilité des éléments techniques. Loin d'être anodine, cette spécificité propre aux objets techniques s'articule avec le processus de concrétisation dans la mesure où « les organes, dans le devenir-organique de l'inorganique, fonctionnent de plus en plus comme les parties d'un tout⁷²⁰ ». Par ailleurs, aux yeux de G. Simondon, les éléments, ces organes artificiels des artefacts humains, sont les véritables porteurs de la technicité définie comme « plus qu'une qualité d'usage ; elle est ce qui, en lui, s'ajoute à une première détermination donnée par un rapport de forme et de matière ; elle est comme l'intermédiaire entre forme et matière⁷²¹ ». La technicité est différente de la perfection technique, qui, elle, est une « qualité pratique⁷²² » ; « la technicité est le degré de concrétisation de l'objet⁷²³ ». De plus, la « transmission de la technicité par les éléments fonde la possibilité du progrès technique⁷²⁴ » : détachables et transmissibles, les éléments techniques produits par les ensembles techniques d'une certaine génération peuvent s'intégrer dans les individus techniques de la génération suivante, permettant un transfert et une cumulativité de la technicité, à la base du progrès technique. La pensée de G. Simondon est intrinsèquement évolutionniste. Les analogies entre bioévolution et technoévolution sont là pour produire de nouvelles connaissances, mais aussi pour souligner ce qui fait la spécificité des ordres naturels et artificiels. Le processus de concrétisation, vu comme l'accroissement de l'auto-corrélation de l'objet, émerge du franchissement des plans de saturation successifs – ou des contradictions techniques dans le langage dialectique de la TRIZ.

Élève de G. Simondon, Y. Deforge parle aussi de « lois d'évolution » mais il utilise l'expression avec des guillemets pour en marquer le caractère hypothétique et métaphorique. En revanche, lui aussi a identifié la tendance à l'accroissement des synergies fonctionnelles des objets, industriels en l'occurrence :

L'évolution des objets industriels par incorporation de fonctions élémentaires entraîne une évolution de l'organisation interne au cours de laquelle les fonctions, d'abord juxtaposées, entrent en relation entre elles, se complètent mutuellement, se fondent les unes dans les autres

⁷²⁰ Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », art. cit., p. 244.

⁷²¹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 89.

⁷²² *Ibid.*, p. 88.

⁷²³ *Ibid.*, p. 89.

⁷²⁴ *Ibid.*, p. 94.

pour donner ces synergies fonctionnelles propres aux objets dont l'évolution est arrivée à un point d'achèvement⁷²⁵.

L'accroissement des synergies fonctionnelles s'accompagne d'un double processus d'augmentation de l'« auto-régulation » (vis-à-vis du milieu extérieur) et de la « corrélation interne » de l'objet, auquel Y. Deforge adjoint trois autres « tendances générales » évolutives :

- L'évolution vers le concret⁷²⁶ ;
- L'évolution vers le simple⁷²⁷ ;
- L'évolution vers l'auto-suffisance⁷²⁸.

4.3. Les lois d'évolution de la TRIZ

Contrairement à Y. Deforge, qui en fait un usage hypothétique, le concept de lois d'évolution est – avec la notion de contradiction – l'un des piliers de la TRIZ⁷²⁹. Définies initialement comme « des tendances logiques du développement⁷³⁰ » des objets techniques, les lois d'évolution de la TRIZ sont au nombre de huit et permettent d'orienter les logiques de conception inventive, dans la mesure où le non-respect de ces lois entraîne l'apparition de contradictions techniques. Les trois premières lois de la TRIZ sont les lois *statiques*, c'est-à-dire celles que tout système technique doit respecter afin d'être viable :

- Loi n° 1, dite d'« intégrabilité des parties » : pour fonctionner, tout système technique doit comprendre quatre parties principales, à savoir l'élément moteur, l'organe de transmission, l'organe de travail et l'organe de contrôle ;
- Loi n° 2, dite de « conductivité énergétique » : pour fonctionner, tout système technique doit permettre le libre passage de l'énergie à travers toutes ses parties ;
- Loi n° 3, dite de la « coordination des rythmes des parties » : pour fonctionner, tout système technique doit assurer la coordination du rythme (fréquence, périodicité...) de ses parties⁷³¹.

⁷²⁵ Yves Deforge, TGOI, p. 135.

⁷²⁶ *Ibid.*, p. 143.

⁷²⁷ *Ibid.*, p. 145.

⁷²⁸ *Ibid.*, p. 146.

⁷²⁹ Denis Cavallucci et Roland D. Weill, « Integrating Altshuller's Development Laws for Technical Systems into the Design Process », *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 50, n° 1, Issy-les-Moulineaux, Elsevier, 2001, p. 115-120.

⁷³⁰ *Ibid.*, p. 116.

⁷³¹ Sans avoir eu connaissance des travaux d'Altshuller, Simondon avançait trois lois du même genre : la solidité, la non-autodestructivité et l'opérabilité (voir Gilbert Simondon et Jean Le Moyne, « Entretien sur la mécanologie », art. cit.).

Moins que des lois d'évolution, il s'agit de caractéristiques génériques garantissant l'intégrité et le bon fonctionnement de tout système technique, que l'on pourrait résumer en une unique loi de « viabilité » : tout système technique doit comporter quatre parties (moteur, transmission, travail et contrôle), et assurer la libre circulation de l'énergie entre elles, ainsi que la coordination de leurs rythmes. Plus intéressantes pour notre propos sont les lois suivantes, qualifiées de *dynamiques* pour ce qui est des lois n° 4, 5 et 6, et de *cinématiques* pour les lois n° 7 et n° 8 :

- Loi n° 4, dite de l'« accroissement de l'idéalité » : le développement d'un système technique se fait dans le sens de l'accroissement de son idéalité ;
- Loi n° 5, dite du « développement inégal des parties » : le développement d'un système technique s'effectue inégalement selon les parties (ce qui peut conduire à des contradictions) ;
- Loi n° 6, dite de la « transition vers le macro-système » : une fois épuisées ses potentialités de développement, le système technique poursuit son évolution en tant que partie d'un super-système ;
- Loi n° 7, dite de la « transition vers le micro-niveau » : le développement d'un système technique s'effectue d'abord à l'échelle macroscopique avant de se poursuivre aux échelles microscopiques ;
- Loi n° 8, dite de l'« augmentation du niveau de contrôlabilité » : le développement d'un système technique tend vers niveau plus élevé de contrôlabilité (donc d'une importance plus marquée de l'organe de contrôle).

Les lois n° 6 et 7 peuvent être regroupées au sein d'une même loi traduisant le *déphasage* du progrès aux autres échelles de la technique ; idée que nous retrouvons chez G. Simondon⁷³² et J. Lafitte (« certains types d'organisation organiquement individualisés sont amenés, par l'homme, à constituer, avec d'autres, certains ensembles complexes⁷³³ »). La loi n° 5 s'apparente au constat, aussi présent chez J. Lafitte et G. Simondon, d'une évolution technique pouvant procéder, nous venons de le voir, par divergence. Quant à la loi n° 8, elle peut être vue comme une tendance à la fermeture, tendance là aussi détectée par J. Lafitte et, dans une perspective critique⁷³⁴, par G. Simondon. Enfin, la loi n° 4 peut se voir comme une « méta-loi »⁷³⁵, plus fondamentale que les

⁷³² Gilbert Simondon, « Psychosociologie de la technicité », art. cit.

⁷³³ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 108.

⁷³⁴ G. Simondon regrette en effet que les objets commerciaux fermés interdisent toute relation technique entre l'objet et l'utilisateur.

⁷³⁵ L'expression est de Yuri Salamatov, un continuateur des travaux d'Altshuller.

autres car il est possible de la réinterpréter comme étant une tentative d'objectivation du processus de concrétisation, dans la mesure où l'objet totalement concret et le RFI de la TRIZ sont tous deux des abstractions idéales et, probablement pour cette raison, irréalisables. Ce bref panorama des lois d'évolution de la TRIZ a pour vocation de montrer les points de convergence pouvant exister avec les mécanologues français, et notre reformulation des lois d'Altshuller a précisément pour but de souligner cette convergence, afin d'aboutir à une synthèse méthodologique.

5. Mécanologie et dynamiques évolutives

5.1. Première synthèse

Depuis les années 2000, l'intérêt grandissant des milieux industriels vis-à-vis de l'innovation a entraîné un regain d'intérêt pour cette notion de la part du milieu académique. Les travaux de Jean-Claude Boldrini⁷³⁶, reprenant et prolongeant ceux de Denis Choulier⁷³⁷, qui proposent une première synthèse entre les travaux de G. Simondon, Y. Deforge et G. Altshuller, s'inscrivent dans cette perspective, tout comme ceux de V. Bontems. Nos propres recherches tendent à renforcer et préciser une telle synthèse, en insistant davantage sur les apports de J. Lafitte et A. Leroi-Gourhan, vus comme les pères respectifs des approches mécanologique et génétique. Plusieurs invariants structurent les travaux de ces auteurs : il s'agit des concepts de lignée technique, de blocage (ou d'inertie) notamment psychologique, de contradiction (technique, mais pas seulement), d'idéalité (au sens large) et de lois d'évolution. Nous avons déjà eu l'occasion de discuter des quatre premiers points dans la première partie de ce manuscrit, et nous souhaitons maintenant établir une rapide synthèse concernant les lois d'évolution.

Précisons tout d'abord que, dans l'élucidation des mécanismes objectifs sous-tendant l'évolution des dispositifs techniques, nous adopterons le terme de *tendance* plutôt que celui de *loi*. Les tendances techniques telles que nous les envisageons sont à prendre davantage au sens de Y. Deforge que de A. Leroi-Gourhan : elles traduisent des directions d'évolution à grande échelle, objectives, communes aux différents objets techniques. La synthèse méthodologique que nous proposons résulte de notre compréhension, et de notre reformulation, des « lois », « tendances », « processus »... avancés par les différents auteurs mentionnés. Des proximités sémantiques et

⁷³⁶ Jean-Claude Boldrini, art. cit., p. 107-131.

⁷³⁷ Denis Choulier, « Synthèse sur les lois d'évolution. Comparaison entre les vues de Simondon, Deforge et Altshuller », *Rapport interne n° 05, laboratoire M3M, Université de technologie de Belfort-Montbéliard*, 2000.

lexicales indéniables existent, le problème étant qu'elles ne se recoupent pas toujours : une même expression peut désigner des réalités différentes, tout comme des concepts identiques peuvent être capturés par des termes différents.

En guise de synthèse, nous proposons de distinguer les tendances suivantes, que nous présentons sous la forme d'oppositions, chaque direction d'évolution étant définie par deux pôles :

- Simplification / complexification ;
- Spécialisation / diversification ;
- Fermeture / ouverture ;
- Autonomie / hétéronomie.

Ces tendances interviennent au niveau de l'évolution d'un individu. La concrétisation, à travers un accroissement de l'auto-corrélation de l'objet ou un gain de synergie fonctionnelle, est un processus qui intervient pour sa part au niveau de la lignée technique. L'idéalisation, quant à elle, s'apparente à un méta-processus évolutif de la technique. Elle correspond à l'hypothèse qu'un progrès technique puisse être défini à grande échelle, et permet de comprendre l'enchaînement des lignées techniques réalisant le même schème technique pur – donc au sein de la famille.

5.2. Le(s) rythme(s) de l'évolution technique

La convergence des points de vue des penseurs évolutionnistes trouve son prolongement dans l'analyse du rythme auquel semble soumise l'évolution des dispositifs techniques. Là encore, loin d'être un rythme « implacable », pour reprendre l'expression de J.-C. Boldrini, il s'agit d'un marqueur temporel qui semble davantage accompagner le développement des objets techniques que le contraindre. Les débats sur le(s) rythme(s) de l'évolution technique s'apparentent, sans surprise, aux discussions en biologie entre gradualistes et saltationnistes (ou catastrophistes). Sans aller jusqu'à parler de consensus, il semble qu'en mécanologie, la préférence soit donnée aux approches discontinuistes. Même un auteur comme G. Basalla partage le constat d'une alternance entre des périodes de changement techniques rapides et des périodes de relatives stabilités⁷³⁸.

G. Simondon propose deux explications au rythme saccadé du progrès technique. D'une part, il postule l'existence d'une « loi de relaxation » traduisant la solidarité et le caractère cyclique du

⁷³⁸ George Basalla, *op. cit.*, p. 25.

progrès aux différentes échelles conduisant à l'existence « d'une ligne de causalité qui n'est pas rectiligne mais en dents de scie⁷³⁹ ». D'autre part, le fait que le processus de concrétisation procède par alternance de phases de perfectionnements mineurs et de progrès majeurs entraîne l'alternance de périodes de stabilité et de bouleversement pour les dispositifs techniques :

L'évolution spécifique des objets techniques ne se fait pas de manière absolument continue, ni non plus de manière complètement discontinue ; elle comporte des paliers qui sont définis par le fait qu'ils réalisent des systèmes successifs de cohérence ; entre les paliers qui marquent une réorganisation structurale, une évolution de type continu peut exister⁷⁴⁰.

Constat largement partagé par A. Leroi-Gourhan, qui lui aussi observait que « le phénomène d'invention apparaît caractérisé par de longues périodes de petites inventions entrecoupées de courtes phases qui instaurent un état technique nouveau ». Ces points de vue ne sont pas sans rappeler l'hypothèse de l'équilibre ponctué proposé par Stephen Jay Gould et Niles Eldredge pour décrire l'évolution du vivant⁷⁴¹. Un des arguments de ces auteurs est que le gradualisme de la théorie néodarwinienne ne permet pas d'expliquer la vitesse à laquelle s'effectuent certains changements survenus au cours de l'évolution des espèces. Cet argument est encore plus fort dans le champ technologique : le progrès des performances techniques, souvent exponentiel comme en témoigne les différentes « lois de Moore » rencontrées, nécessite l'existence de ruptures techniques et l'orientation des « mutations », des sauts technologiques que constituent les inventions.

En outre, détecter le rythme de l'évolution interne, l'évolution « spécifique » des objets techniques, nécessite de le distinguer du rythme d'apparition des innovations. Ces deux rythmes sont interdépendants mais il convient de redonner à chacun ce qui fait sa spécificité :

Les travaux des technologues et l'étude concrète des techniques nous montrent en effet qu'il y a une logique particulière de l'évolution technique, un rythme proprement technique d'enchaînement et d'apparition des nouveautés qu'il est au moins possible de reconstituer après coup, de « sortir » de l'ensemble des autres facteurs qui concourent, avec les facteurs techniques, à donner leur physionomie réelle, historique, aux processus d'émergence des nouveautés⁷⁴².

⁷³⁹ Gilbert Simondon, MEOT, p. 82.

⁷⁴⁰ *Ibid.*, p. 30.

⁷⁴¹ Stephen Jay Gould, *L'Équilibre ponctué*, Paris, Folio, 2012.

⁷⁴² Jean-Louis Maunoury, *op. cit.*, p. 123-124.

Les mécanologues sont d'accord sur deux points, à savoir l'existence d'un rythme propre à l'évolution technique, distinct du rythme de l'innovation, et la présence d'une allure discontinue, alternant périodes de stabilité et phases de rupture. Peut-être faut-il considérer avec Bertrand Gille qu'il y a une discontinuité du progrès technique malgré la continuité de l'activité de recherche. En tout état de cause, l'existence d'un rythme proprement technique ne dissout pas la possibilité de l'intervention de l'homme dans le cours du progrès technique :

Le processus du progrès technique s'analyse comme une suite d'inventions stratégiques qui synthétisent de nombreux éléments de nouveauté intermédiaire. Il y a donc un rythme de l'évolution technique très prononcé, mais cette discontinuité périodique ne supprime pas le fait que ce processus est social⁷⁴³.

5.3. Le statut des tendances évolutives

Une fois admises l'existence de tendances évolutives et la présence d'un rythme propre au progrès technique, certains auteurs ont tenté d'en modéliser les processus à l'aide de lois mathématiques⁷⁴⁴. Sans nous prononcer sur la validité des résultats obtenus, soulignons toutefois que cette démarche s'inscrit dans une tentative d'objectivation, sans doute trop ambitieuse, de l'évolutionnisme technique. Face à l'emploi d'outils numériques et de formules mathématiques, nous rappellerons les conseils de prudence de Norbert Elias :

... Dans la conscience de beaucoup de nos contemporains, la formulation de lois d'une portée générale est tenue pour une valeur en soi qui n'a pas le moindre rapport – du moins lorsqu'il s'agit de la science historique et sociologique – avec sa valeur comme instrument de connaissance : cette surestimation de la formule dessert souvent la recherche. Beaucoup de chercheurs s'imaginent que la tâche principale de la recherche consiste à expliquer les changements à partir d'éléments immuables. Mais cet idéal et cette échelle des valeurs ont leurs sources non pas dans la recherche comme telle, mais dans le désir des chercheurs de tout ramener à des valeurs éternelles. Des lois générales, qu'elles soient formulées en termes mathématiques ou non, [...], ne représentent pas l'objectif final ou le couronnement de la recherche historique-sociologique ; l'étude de ces lois est un moyen pour l'homme de mieux

⁷⁴³ Jean-Louis Maunoury, *op. cit.*, p. 131.

⁷⁴⁴ Nous renvoyons aux travaux d'Ivan Brissaud, en particulier Ivan Brissaud & Éric Baron, « La course des accélérateurs de particules vers les hautes énergies et la log périodicité », *Cybergeo*, 2007 [URL : <https://journals.openedition.org/cybergeo/14173>].

se connaître et de mieux connaître le monde dans lequel il vit. Leur valeur réside dans le fait qu'elles servent à décrypter les changements survenus au cours de l'histoire⁷⁴⁵.

N. Elias rappelle ainsi que l'objectivation ne passe pas nécessairement par la mathématisation et éclaire le statut des tendances formulées en mécanologie. Si pour J. Lafitte leur emploi est avant tout métaphorique, G. Simondon fait de la concrétisation un processus ontologique et laisse ouverte la porte à une modélisation, alors que A. Leroi-Gourhan reste prudent dans le recours au terme « loi ». Enfin, si la TRIZ fait des lois d'évolution un ensemble d'outils prospectifs, Y. Deforge use des guillemets et considère les « lois » d'évolution comme des « outils de compréhension *a posteriori* ». Nous considérons pour notre part que les différentes tendances que nous avons eu l'occasion de formuler permettent de nommer, sans forcément les dévoiler, les processus sous-tendant l'évolution des dispositifs techniques. Elles permettent également de caractériser les différentes directions possibles du progrès technique et d'envisager des recommandations prospectives.

Conclusion de chapitre

A nos yeux de mécanologue, la question centrale de l'évolutionnisme technique ne peut se réduire aux débats autour du déterminisme, ni aux critiques des analogies biologiques, mais doit porter sur les échelles auxquelles s'appliquent les tendances évolutives. Les tendances que nous avons exhibées accompagnent l'évolution des individus techniques : si elles entraînent des améliorations mineures au niveau des espèces techniques, nous verrons au chapitre suivant qu'elles donnent naissance, aux échelles de la lignée et de la famille, à de nouveaux processus évolutifs. Présentés de la sorte, nos travaux semblent retomber dans les travers du déterminisme technique, et c'est précisément pour tenter de parer aux accusations de *téléologie* que nous avons mobilisé le concept de *téléonomie*. En définitive, que l'on souscrive ou non à ce point de vue, les considérations sur le statut *ontologique* des tendances techniques formulées ne remettent pas en cause leur valeur *méthodologique*. Si nous avons insisté sur la délimitation de l'échelle de la discussion, il reste cependant à fournir l'articulation entre ces différentes échelles, en explicitant, par exemple, le rôle des acteurs de l'innovation dans l'émergence des processus évolutifs à grande échelle. Comme pour l'étude mécanologique proprement dite, nous n'aurons pas l'occasion de présenter ce genre de résultats

⁷⁴⁵ Norbert Elias, *La Dynamique de l'Occident* [1969], Paris, Pocket, 2001, p. 28.

sociologiques, préférant nous concentrer sur la confrontation de ces tendances, issues d'une synthèse théorique, avec l'étude des dynamiques évolutives des télescopes, objet du chapitre suivant.

Chapitre 8

Les tendances évolutives des télescopes

In a reversal of the trends towards miniaturization in everything technological, telescopes improve as they get bigger.

Fred WATSON, *Stargazer*

Pour l'ancien directeur de l'*Australian Astronomical Observatory*, la situation est claire : le progrès des télescopes va dans le sens d'un accroissement de leur taille ; mais que veut dire ici « s'améliorer » ? En tant que scientifique, Fred Watson a une vision avant tout utilitaire du télescope, vu comme moyen d'obtenir des informations sur les astres, galaxies et autres objets célestes. Un télescope est plus performant selon la quantité, mais aussi la qualité, des informations qu'il est capable d'acquérir. Or ces informations dépendent en premier lieu de la résolution angulaire du télescope et de la sensibilité, qui, si elles dépendent du diamètre d'ouverture, ne peuvent s'y réduire. Restreindre l'analyse des performances, et du progrès, des télescopes au seul critère de l'ouverture rate tout un pan de l'analyse. D'une manière générale, pour le mécanologue, l'évaluation d'un dispositif technique ne doit pas se faire via la prise en compte de critères performatifs mais par l'analyse des logiques d'évolution internes. S'illustre ici la nécessité de s'émanciper des évaluations performatives et quantitatives des objets techniques, et d'échapper à un point de vue trop positiviste en étudiant la pluralité des tendances évolutives qui traversent l'histoire des télescopes.

1. Les logiques d'évolution à l'échelle individuelle

1.1. La course au gigantisme

La « tendance » des télescopes à devenir toujours plus imposants se retrouve quels que soient la lignée, le domaine de fonctionnement ou le milieu d'insertion envisagés. Télescopes réfracteurs ou télescopes réflecteurs, radiotélescopes, télescopes visibles ou à rayons X, au sol ou dans l'espace, tous partagent une évolution marquée par l'augmentation de leur diamètre d'ouverture (voir chapitre 5). Ce constat va de soi pour les utilisateurs des télescopes, le progrès de l'astronomie passant par le progrès des observations. Or, « les progrès de l'observation se ramènent à ceux de la chasse aux photons⁷⁴⁶ ». Et si « jusqu'en décembre 1609, cette chasse aux photons n'a fait aucun progrès⁷⁴⁷ », l'introduction du télescope au sein des observatoires astronomiques va complètement la relancer. Dans cette conception, « the telescopes are simply capable of gathering more light than are our unaided eyes⁷⁴⁸ ». Or le télescope, on l'a vu, n'intervient pas uniquement comme dispositif collecteur de lumière, mais aussi comme dispositif focalisateur, et, pour cette seconde opération, il existe d'autres facteurs de progrès que le diamètre d'ouverture. Restreindre l'évaluation du progrès des télescopes à l'augmentation du diamètre d'ouverture revient à se priver de tout un pan de l'analyse, et ne permet pas d'expliquer l'émergence de la lignée des télescopes catadioptriques.

Il n'empêche que la *tendance au gigantisme* des télescopes est présentée comme allant de soi, et, partant, comme une « loi d'évolution » propre à ces instruments. Ce constat semble appuyé par le fait que cette tendance était déjà présente parmi les instruments de l'ère pré-télescopique : que l'on considère les observatoires de la période arabe ou bien Uraniborg, qui, au-delà des compétences de Tycho Brahe, était notamment réputé pour la taille de ses quadrants et de ses sphères armillaires. D'une manière générale, les observateurs pré-télescopiques cherchaient déjà à obtenir les instruments les plus grands possibles, car de leur taille dépendait la précision des mesures (de déclinaison, de parallaxe...) réalisables. Logique qui s'est propagée, quoique pour d'autres raisons, aux télescopes : d'abord pour augmenter le grossissement, puis, une fois la théorie élaborée, la résolution angulaire. En tout état de cause, la tendance au gigantisme des télescopes est le premier constat qui ressort de l'étude évolutive de ces dispositifs. C'est aussi le premier mis en avant par les concepteurs et utilisateurs de télescopes, et la positivité conférée par le recours à un critère

⁷⁴⁶ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 238.

⁷⁴⁷ Jean-Pierre Verdet, *op. cit.*, p. 238.

⁷⁴⁸ Paul Humphreys, *op. cit.*, p. 4.

univoque et quantitatif semble clore le débat quant à la réalité d'une telle « loi » d'accroissement du diamètre d'ouverture des télescopes.

Du point de vue mécanologique, il ne s'agit pourtant nullement d'une loi d'évolution *interne* à l'objet technique. Si généralement l'augmentation de la taille des télescopes est à entendre comme découlant de l'augmentation du diamètre d'ouverture, il faut n'y voir qu'une première explication. Rappelons en effet que, dans l'histoire des télescopes, réfracteurs notamment, l'augmentation de la taille a pu être à comprendre comme l'allongement de la distance focale :

Making the focal length of an objective very long in comparison with its diameter –so that the curvature of its surface would be shallow– reduced both aberrations to a level at which they were not noticeable. The long, spindly telescopes of the day were therefore simply the result of a pragmatic approach to fundamental optical problem⁷⁴⁹.

L'épisode des réfracteurs à très longue focale illustre parfaitement, à nos yeux, l'ambiguïté de la tendance au gigantisme érigée en tant que loi technologique. Il serait plus judicieux de rattacher l'histoire des télescopes à l'augmentation de leur pouvoir de résolution. Là encore, il s'agit d'une rationalisation intermédiaire, passant par l'élucidation d'un critère quantitatif. En réalité, ce qu'entendent par « amélioration » les astronomes et les industriels en charge de la conception des télescopes, c'est que l'évolution des télescopes va dans le sens de l'amélioration des observations réalisables, c'est-à-dire du résultat final, conformément à la conception fonctionnelle traditionnelle des instruments scientifiques.

Dans tous les cas, il s'agit bel et bien d'une « approche pragmatique », pratique, donc motivée par des facteurs utilitaires. Les moteurs du gigantisme sont donc à rattacher à ce que nous qualifions, avec G. Simondon, de causes extrinsèques du progrès. L'augmentation de la taille (au sens du diamètre d'ouverture comme de la distance focale) ne découle pas de nécessités internes et ne correspond pas à une amélioration du fonctionnement ; elle est uniquement motivée par des besoins externes d'amélioration des performances, en l'occurrence des motivations de type scientifique. Un télescope plus grand n'est pas plus évolué du point de vue mécanologique ; il est certes plus performant, plus utile, pour ses utilisateurs, mais ne présente en rien un degré de technicité plus élevé. Raison pour laquelle la tendance au gigantisme, si elle reste le constat le plus immédiatement réalisable dans l'étude de l'évolution des télescopes, n'est pas, au sens

⁷⁴⁹ Fred Watson, *op. cit.*, p. 92.

mécanologique, une loi d'évolution de la technique. Elle est bien plutôt un fait social : elle résulte de l'intégration de valeurs sociales dans l'objet technique et profite de la valorisation sociale de la course à la performance. Le gigantisme est ainsi le résultat d'une logique performative consciemment planifiée : nous parlerons de « logique d'évolution » pour marquer son caractère moins objectif que les tendances exhibées au chapitre précédent.

1.2. La complexification correctrice

Sans tomber dans une relecture whiggiste, présentiste et finaliste, l'histoire du télescope semble parfaitement illustrer la conjecture de Lafitte quant au fait que la succession des types passifs, actifs et réflexes de la « série mécanologique » se retrouve dans l'évolution des lignées techniques. Si, en tant qu'instrument, le télescope a dès son origine eu une finalité informationnelle, le passage à l'optique active puis à l'optique adaptative s'inscrit dans cette « régulière progression des formes du passif à l'actif, puis de l'actif au réflexe⁷⁵⁰ » que soulignait J. Lafitte. Le passage à l'optique active s'est en outre accompagné, dans un second temps, d'une *segmentation*, illustrant cette fois un principe de la TRIZ, selon lequel « rigid systems move towards segmentation while underlining a more efficient controllability via a transition in terms of control fields⁷⁵¹ ». Toutefois, c'est avant tout l'obtention d'une dynamique, pour une structure auparavant figée, qui permet de parler de progrès de la complexité de la machine au sens de J. Lafitte. L'optique adaptative, par l'introduction d'une boucle de rétroaction, et même d'une seconde dans le cas du recours aux étoiles guides lasers, rattache un peu plus le télescope aux machines réflexes, lesquelles possèdent :

[...] la propriété remarquable de voir leur fonctionnement [la forme du miroir] se modifier selon les indications, qu'elles perçoivent elles-mêmes [via l'analyseur du front d'onde], de variations déterminées dans certains de leurs rapports avec le milieu qui les entoure [les perturbations de l'atmosphère]⁷⁵².

Si la substitution entre lignées de télescopes confirme partiellement la conjecture de J. Lafitte, cette évolution de la complexité des machines, au sens du passage du type passif au type actif puis au type réflexe, ne désigne pas la même *complexification* que la tendance que nous avons observée au sein de l'évolution des télescopes. Une façon naïve d'appréhender cette notion, est inspirée de la physique, plus spécifiquement de la thermodynamique, et consiste à rattacher la complexité d'un

⁷⁵⁰ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 79.

⁷⁵¹ Denis Cavallucci et Roland D. Weill, art. cit., p. 118.

⁷⁵² Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, op. cit., p. 68. Nous ajoutons entre crochets les éléments illustrant les propos de l'auteur.

système au nombre de ses constituants (plus un dispositif technique comporte de pièces, plus il est complexe). L'avantage d'une telle approche est qu'elle permet une évaluation relativement objective, tout au moins quantitative ; en revanche, elle confère à la complexité une signification strictement structurale, relativement éloignée des considérations mécanologiques. Rappelons toutefois que dans le cas des télescopes, cette acception de la complexification est vérifiée, le nombre de composants et de sous-systèmes n'ayant fait qu'augmenter.

Un premier enrichissement de cette notion de complexification délaisse l'aspect quantitatif et passe par la prise en compte de la technicité des composants et de leur intégration. Cette complexité est donc duale : elle désigne à la fois l'augmentation de la technicité des éléments (c'est-à-dire de la technicité de leur fabrication et donc, en dernier ressort, de la technicité des ensembles producteurs) et celle de la technicité de leur agencement (ce qui rejoint la première acception de la complexité, mais selon une perspective génétique : celle de la technicité de l'intégration des divers éléments). Télescopes réfracteurs et télescopes réflecteurs sont ainsi passés d'une architecture mettant en jeu seulement deux éléments à des architectures plus élaborées, mobilisant trois puis quatre éléments (voire davantage pour ce qui est des réflecteurs). Dans le même temps, ces éléments ont aussi vu leur propre technicité augmenter, aussi bien dans leur forme que dans les matériaux employés : aux formes sphériques ont succédé les formes coniques (paraboliques, hyperboliques, ellipsoïdes) et aux métaux et verres traditionnels, des matériaux plus complexes (CFRP, SiC, verre fluorine).

Ces approches systémiques s'attachent à décrire la complexité structurale du dispositif technique. Elles peuvent être combinées avec la recherche d'une caractérisation des évolutions vers une plus grande complexité fonctionnelle⁷⁵³, qu'on peut rattacher à un accroissement de la généricité et du caractère ouvert de l'instrument. Dans le cas du télescope, ceci est parfaitement vérifié puisque les télescopes ont vu leurs usages se multiplier : imagerie, photométrie, spectrométrie... L'évolution conjointe vers la complexité structurale et la complexité fonctionnelle a poussé un certain nombre d'auteurs à s'intéresser aux liens entre les deux. Dans sa *Théorie des objets*, Abraham Moles propose ainsi une loi de complexification des objets industriels qui suivrait une « droite d'ophélimité » et qui s'énoncerait ainsi : « Dans le temps la complexité fonctionnelle tend à être proportionnelle à la complexité structurelle⁷⁵⁴ ». Dans sa propre démarche d'opérationnalisation de la mécanologie, Y.

⁷⁵³ Davis Baird, *op. cit.*, p. 63 : « I identify two related general characteristics to making an instrument, emulation and adaptation, and the movement from simple to complex. » L'émulation et l'adaptation traduisent la diversification fonctionnelle de l'instrument quand le mouvement du simple au complexe s'attache à son évolution structurelle.

⁷⁵⁴ Yves Deforge, TGOI, p. 139.

Deforge reprend à son compte cette conjecture et tente d'introduire un « indice de concrétisation⁷⁵⁵ », afin de donner à ce concept une dimension quantitative. Celle-ci s'apparenterait à la mesure d'« un coût structurel par fonction⁷⁵⁶ », traduisant l'idée que « chaque fonction élémentaire correspond à un organe élémentaire⁷⁵⁷ ».

Cette fois, l'étude des lignées de télescopes invite à relativiser la validité de ces conjectures développées initialement pour l'objet industriel et qui ne paraissent pas s'appliquer directement à l'instrument scientifique. En effet, nous préférons considérer, avec G. Simondon, que dans l'intention technique qui assigne une fonction à un fonctionnement, c'est la considération de l'évolution du fonctionnement qui est véritablement éclairante et robuste du point de vue technologique. Ce n'est pas la prolifération des finalités particulières et des adaptations structurales qui caractérise le progrès technique. Celui-ci réside plutôt dans l'augmentation de la généralité de l'objet technique, la « complexification fonctionnelle » consistant alors dans le fait qu'un seul fonctionnement permet de remplir une multiplicité de fonctions. Pour mesurer la complexité fonctionnelle, il faudrait considérer comment, pour une structure donnée et un nombre de composants fixé, la multiplicité des usages traduit, en partie, la diversité des fonctions du dispositif technique. En définitive, quelle que soit l'acception retenue, que ce soit par le nombre de ses sous-systèmes, par la technicité de ses éléments, par la complication de son architecture, ou par sa diversification fonctionnelle, l'évolution des télescopes est marquée par une tendance certaine à la complexification.

Nous parlerons donc de « complexification correctrice » pour caractériser cette deuxième logique évolutive décelée au cours de l'histoire des télescopes. Tout comme la tendance au gigantisme, la complexification correctrice est un cas particulier d'une tendance plus générale des objets techniques (en l'occurrence, la tendance à la complexification structurelle). Cependant, les motivations propres à cette seconde logique d'évolution relèvent bien plus de causes intrinsèques, propres au développement technique ; raison pour laquelle cette logique de complexification correctrice va généralement dans le sens de la concrétisation de la lignée. En effet, dans la lignée des télescopes réfracteurs, on constate que le passage des premières lunettes aux lunettes achromatiques, puis apochromatiques, et enfin super-apochromatiques, a toujours été motivé par la recherche d'une diminution, si ce n'est une suppression, des aberrations chromatiques. De même,

⁷⁵⁵ *Ibid.*, p. 140.

⁷⁵⁶ *Ibid.*, p. 140.

⁷⁵⁷ *Ibid.*, p. 141.

le passage du télescope de Cassegrain au RCT puis au TMA a été dicté par la suppression des différentes aberrations géométriques. Ces aberrations, chromatiques comme géométriques, résultent des imperfections du schème technique.

La correction de ces imperfections passe par l'adjonction de structures supplémentaires qui viennent complexifier l'architecture de l'objet technique et constituent *in fine* un progrès, car « l'adjonction d'une structure supplémentaire n'est un véritable progrès pour l'objet technique que si cette structure s'incorpore concrètement à l'ensemble des schèmes dynamiques de fonctionnement⁷⁵⁸ ». C'est précisément le cas des troisième et quatrième miroirs et lentilles : ces nouveaux éléments s'insèrent naturellement au sein du dispositif technique existant et permettent un gain de concrétisation, une meilleure réalisation du schème technique. Il ne s'agit pas de « la voie des perfectionnements mineurs [qui] est celle des détours, utiles dans certains cas pour l'utilisation pratique, mais ne faisant guère évoluer l'objet technique⁷⁵⁹ », mais bel et bien d'une évolution majeure dictée non par des considérations pratiques, mais par des nécessités techniques.

Les sous-systèmes introduits en vue de l'implémentation de l'optique active (actuateurs) puis de l'optique adaptative (miroirs ultra-fins, analyseurs du front d'onde) s'inscrivent eux aussi dans des logiques évolutives que l'on pourrait qualifier de correctives. En effet, l'optique active permet de compenser les déformations du miroir, causées notamment par la gravité, quand l'optique adaptative permet de corriger les effets perturbatifs causés par l'atmosphère. Dans les deux cas, il y a l'idée sous-jacente de corriger un écart entre une situation donnée et la situation idéale correspondante. Nous conservons le terme d'« aberration » et étendons son acception pour désigner toute situation présentant un écart par rapport à l'idéalité : les aberrations chromatiques et géométriques sont des aberrations liées au schème technique, nous parlerons donc d'aberrations techniques ; nous assimilerons le *sagging* à une aberration de type structurelle, et le *seeing* à une aberration environnementale (liée au milieu associé). L'histoire évolutive des télescopes peut se relire comme la lutte contre les aberrations, la correction de chacune de ces aberrations passant par l'adjonction de sous-système correctifs supplémentaires.

⁷⁵⁸ Gilbert Simondon, MEOT, p. 36.

⁷⁵⁹ *Ibid.*, p. 48.

1.3. Les risques d'hypertélie

La logique d'évolution sous-tendant la course au gigantisme que l'on observe au sein de l'histoire des télescopes est un cas particulier, le versant socialement motivé, de la tendance à la spécialisation que nous avons mise en lumière au chapitre précédent. Le moteur principal de cette logique d'évolution étant marqué par des motivations extrinsèques, à savoir la recherche de performance, le gigantisme va dans le sens d'une *hypertélisation*.

En effet, le gigantisme des télescopes, s'il permet d'impressionner les décideurs comme le grand public, s'accompagne de nombreux désagréments (coût, encombrement, *sagging*...) et s'apparente plus à une contrainte sociale qu'à un objectif technique. Pour reprendre un exemple déjà cité, « from today's perspective, looking back on the era of long telescopes is like looking back to the age of dinosaurs⁷⁶⁰ » ; l'existence des « très longs réfracteurs », ainsi que des télescopes aériens, interpelle : comment des instruments aussi massifs, aussi peu « technicisés », ont-ils pu exister et se développer ? Même s'il faut se garder d'émettre un jugement dépréciateur rétrospectif whiggiste (surdéterminé par la justification de l'état présent), le caractère hypertélique de ces dispositifs est, à nos yeux, validé par leur rapide disparition une fois le doublet achromatique mis au point. L'emploi de la métaphore des dinosaures pour qualifier de tels dispositifs semble pertinent dans la mesure où, au-delà d'une analogie structurelle fondée sur la taille, leurs disparitions respectives sont dues à des perturbations de leur milieu associé (milieu naturel pour les dinosaures, environnement sociotechnique pour les « technosaures⁷⁶¹ »).

L'expression « dinosaurisation » a aussi été avancée par B. Gille. Elle traduit l'idée d'une évolution technique qui a épuisé les potentialités évolutives d'un schème technique particulier mais qui persiste dans son développement. En effet, passé un certain stade, « aucun accroissement n'est possible : dimensions, rendements, coûts, les uns nécessairement liés aux autres, imposent une limite qu'il n'est pas pensable de franchir⁷⁶² ». Pas pensable ou tout au moins pas souhaitable ; car, comme le souligne D. Sahal, « il y a une limite à la croissance de tout système d'une forme donnée⁷⁶³ ». Prolonger une ligne évolutive au-delà de cette limite au nom de la poursuite de gains de performance conduit à des hypertélies. La réorganisation structurale – chère à G. Simondon –

⁷⁶⁰ Fred Watson, *op. cit.*, p. 106.

⁷⁶¹ Selon l'expression de Nicolas Nosengo.

⁷⁶² Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques, op. cit.*, p. 33.

⁷⁶³ Devendra Sahal, *Patterns of Technological Innovation*, Londres, Addison Wesley Longman Publishing, 1981, p. 63.

accompagnant le processus de concrétisation ne garantit pas seulement l'efficacité du dispositif, elle s'avère parfois nécessaire pour maintenir la viabilité, à long terme, du dispositif technique :

Ainsi le changement dans la taille du système est généralement accompagné par une croissance différentielle de ses composants par rapport à l'ensemble, par des changements dans les supports matériels de réalisation et un accroissement de la complexité de structure. Toutefois ces processus ne peuvent continuer indéfiniment sans dégénérer en absurdité⁷⁶⁴.

Ainsi en était-il des réfracteurs chromatiques à très longs tubes, supplantés par les réfracteurs achromatiques à longue focale, eux-mêmes remplacés par les télescopes réfracteurs. Aujourd'hui, grâce à la segmentation et à l'interférométrie, ces derniers ont retrouvé un second souffle évolutif ; l'enjeu de la prospective mécanologique étant de répondre à la question : pour combien de temps encore ?

Même si elle ne découle pas de considérations utilitaristes, la complexification correctrice peut elle aussi conduire à des hypertélies. La multiplication des sous-systèmes annexes afin de garantir le bon fonctionnement de l'objet technique entraîne une perte d'autonomie, caractéristique du second type d'hypertélie⁷⁶⁵. Le vrai progrès technique, on l'a dit, consiste à intégrer les sous-systèmes correctifs directement au sein du schème technique. Les corrections visent à résorber les aberrations qui résident dans l'imperfection de l'objet technique abstrait. En effet :

En raison de son caractère analytique, [l'objet abstrait] emploie plus de matière et demande plus de travail de construction ; logiquement plus simple, il est techniquement plus compliqué, car il est fait du rapprochement de plusieurs systèmes complets. Il est plus fragile que l'objet technique concret, car l'isolement relatif de chaque système constituant un sous-ensemble menace, en cas de non-fonctionnement de ce système, la conservation des autres systèmes⁷⁶⁶.

La complexification ne se fait dans le sens de la concrétisation que lorsqu'elle permet la mise en relation des différents sous-systèmes – dont les sous-systèmes correctifs. Dans le cas contraire, la fragilité d'un d'entre eux menace la viabilité de l'objet dans son ensemble, comme cela pouvait être le cas pour les télescopes aériens ou les télescopes à miroirs avant l'introduction de l'optique active. Un exemple plus contemporain nous est donné par le JWST (*James Webb Space Telescope*). Avec son

⁷⁶⁴ *Ibid.*, p. 62.

⁷⁶⁵ *Ibid.*, p. 62.

⁷⁶⁶ *Ibid.*, p. 29.

miroir primaire dépliable de 6,5 mètre, ce successeur de Hubble devait être lancé aux alentours de 2010 mais à ce jour [2019], son lancement est prévu au mieux pour 2021. Si des erreurs de pilotage de programme sont à pointer, l'extrême complexité du télescope est souvent mise en avant pour justifier ces retards. Mettant en péril l'existence même de la mission, ces problèmes techniques nous font dire que le miroir du JWST appartient à une certaine classe d'hypertélie.

2. Concrétisation et idéalisation des instruments scientifiques

2.1. Surabondance des effets et convergence fonctionnelle

Il nous semble pertinent de distinguer différentes modalités d'actualisation du processus de concrétisation. La concrétisation soit « se réalise surtout et essentiellement par *condensation de plusieurs fonctions sur une même partie structurelle* de la machine⁷⁶⁷ » – ce que G. Simondon qualifie de « convergence des fonctions » –, soit par l'ajout d'une nouvelle structure, qui permet au contraire la dissociation de certaines fonctions.

Il paraît contradictoire d'affirmer que l'évolution de l'objet technique obéit à la fois à un processus de différenciation et à un processus de concrétisation [...] ; mais en fait ces deux processus sont liés l'un à l'autre ; la différenciation est possible parce que cette différenciation permet d'intégrer au fonctionnement d'ensemble, de manière consciente et calculée en vue d'un résultat nécessaire, des effets corrélatifs du fonctionnement global et qui étaient tant bien que mal corrigés par des palliatifs séparés de l'accomplissement de la fonction principale⁷⁶⁸.

Le double processus de différenciation-convergence participe à une troisième modalité de la concrétisation, à savoir une réorganisation structurale globale correspondant à une redistribution des synergies au sein de l'objet. Dans tous les cas, la concrétisation s'accompagne souvent d'une « surabondance des effets » : une invention destinée à résoudre un problème s'avère en résoudre plusieurs en même temps. G. Altshuller s'est lui aussi penché sur cette problématique et cite D. Maksutov, l'inventeur du télescope du même nom, qui, à propos de son invention, écrivait : « Let's have an optical glass. If the glass has to be there, why not get additional advantages from it as compensation⁷⁶⁹ », et d'ajouter : « The high-cost of this glass can be compensated for by an

⁷⁶⁷ Jean-Yves Château, art. cit., p. 20.

⁷⁶⁸ Gilbert Simondon, MEOT, p. 37.

⁷⁶⁹ Genrich Altshuller, *op. cit.*, p. 31.

additional function the glass will provide⁷⁷⁰ ». La « surdétermination plurifonctionnelle » des lentilles part ainsi d'un constat pragmatique mais conduit à postuler l'existence d'une logique d'évolution consistant à récupérer les effets indésirables pour les mettre au service du fonctionnement (« compensate for the evil, and extract useful from it, instead of eliminating it⁷⁷¹ »). Le « mauvais » correspond à ce que nous avons appelé des aberrations : il s'agit des frictions internes au fonctionnement de l'objet technique abstrait pour lequel les sous-systèmes sont en lutte.

La deuxième caractérisation du processus de concrétisation concerne précisément la résolution de ce type de problèmes : la concrétisation passe par un gain de l'auto-corrélation de l'objet, donnant naissance à des « résonances internes » et, *in fine*, s'apparentant à un gain de synergie. Les sous-systèmes ne sont plus en lutte les uns contre les autres, l'objet technique n'est plus en lutte contre lui-même mais possède un fonctionnement unitaire. Les lignes de concrétisation des télescopes réfracteurs aussi bien que réflecteurs l'illustrent : les RCT et les lunettes apochromatiques sont des « descendants directs » des premiers Cassegrain et des lunettes chromatiques, car ils « réalisent le développement de [leur] schème technique interne par réduction des incompatibilités au moyen d'une redistribution des fonctions en sous-ensembles synergiques⁷⁷² ».

2.2. La concrétisation comme processus émergent

G. Simondon accorde au processus de concrétisation un caractère véritablement ontologique. On peut parler avec Jean-Yves Château d'« ontogenèse » pour qualifier ce processus durant duquel l'objet technique se conditionne au cours de sa genèse, « la concrétisation [étant] le processus de cette genèse au cours duquel l'objet technique acquiert sa consistance et sa spécificité⁷⁷³ ». Au cours de sa concrétisation, l'instrument scientifique gagne en synergie interne ; mais qu'en est-il des moteurs de ce processus évolutif ?

L'étude de l'évolution des lignées de télescopes nous pousse à réinterpréter le processus de concrétisation comme le résultat de la dialectique existant entre les deux logiques de conception identifiées précédemment. La complexification correctrice tend à augmenter le nombre de sous-systèmes de l'objet technique, et donc la probabilité de rencontrer des incompatibilités entre ces derniers, alors que la tendance au gigantisme tend à saturer l'objet selon une certaine direction.

⁷⁷⁰ *Ibid.*, p. 32.

⁷⁷¹ *Ibid.*, p. 32.

⁷⁷² Gilbert Simondon, MEOT, p. 56.

⁷⁷³ Jean-Yves Château, art. cit., p. 7.

Arrive un moment où l'objet technique se retrouve sur un point selle qu'il ne peut franchir qu'en se réinventant, en se concrétisant.

La tendance au gigantisme agit comme un gradient qui oriente l'évolution des télescopes. Pour reprendre une expression déjà employée, un certain nombre d'inventions qui jalonnent l'histoire des télescopes peuvent être considérées comme des mutations orientées, déterministes, dans la mesure où elles sont explicitement motivées par l'augmentation du diamètre d'ouverture. La complexification correctrice, elle, tend à pallier les imperfections du télescope. Ces aberrations sont par ailleurs accentuées par l'accroissement de la taille des dispositifs techniques, un défaut mineur au sein de l'instrument pouvant devenir rédhibitoire. Mais la multiplication du nombre de systèmes correctifs annexes, s'ils ne sont pas intégrés au sein du schème technique de l'objet, augmente aussi le risque d'aboutir à un fonctionnement contrarié, « frictionnel ».

La concrétisation intervient pour éviter d'aboutir à des situations hypertéliques et permet de franchir les « incompatibilités naissant de la saturation progressive du système en sous-ensembles⁷⁷⁴ » selon une des deux modalités exprimées précédemment. Il ne s'agit pas de conférer au processus de concrétisation un statut « magique ». À nos yeux, la concrétisation s'apparente davantage à un processus *émergent*, au sens d'un processus dont on peut repérer des causes objectives sans avoir pour autant à supposer des finalités subjectives. La concrétisation est un processus qui présente des régularités sans avoir nécessairement été planifié⁷⁷⁵. Pour être plus précis, dans le cas des télescopes, la concrétisation émerge de la dialectique entre les deux tendances que sont le gigantisme et la complexification correctrice. La première correspond à une motivation externe et la seconde à une motivation interne, mais toutes deux sont consciemment planifiées. Pourtant, de leur interaction émerge, à une autre échelle, un processus de concrétisation appartenant à un autre ordre de rationalité, dont les causes objectives n'ont pas nécessairement d'équivalents en termes de finalités subjectives. Ce processus dialectique entre deux évolutions des lignées est analogue à celui qui s'opère entre convergence et différenciation au sein de l'objet.

L'alternance de phases de divergence et de convergence fonctionnelles chez J. Lafitte et la dialectique entre la fonction et le fonctionnement chez H. Simon découlent de l'idée que l'évolution technique résulte, pour prendre une métaphore thermodynamique, d'un processus *ditherme*. Celui-

⁷⁷⁴ Gilbert Simondon, MEOT, p. 32.

⁷⁷⁵ Timothy O'Connor et Hong Yu Wong, « Emergent Properties », dans Edward N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édition de l'été 2015.
[URL : <https://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/properties-emergent/>].

ci s'exprime par la solidarité et l'influence mutuelles qu'exercent les deux tendances évolutives décelées : par exemple, l'optique active et l'optique adaptative, conçues en premier lieu à des fins correctives, ont permis une redynamisation de la tendance au gigantisme, qui en retour a nécessité la mise au point de nouveaux systèmes correcteurs. De notre point de vue, c'est la dialectique entre ces deux tendances qui est le véritable moteur du progrès des lignées de télescopes, et elle se traduit par l'émergence d'un processus de concrétisation au niveau des lignées de télescopes.

2.3. La substitution des lignées techniques et le processus d'idéalisation

Le processus de concrétisation œuvre au sein d'une même lignée technique, mais le fait que ce soit le même processus à l'œuvre dans toutes les lignées de la même famille amène à envisager la possibilité d'étendre la notion de concrétisation au passage entre les lignées. Nous avons accepté au chapitre précédent de circonscrire le périmètre de la discussion sur le progrès afin de parer à d'éventuelles critiques en provenance des antiévolutionnistes⁷⁷⁶. Pour autant, il est légitime de s'interroger sur la possibilité d'une extension de la notion de progrès à diverses échelles, par exemple sous la forme d'une hiérarchisation ou, au moins, d'une comparaison entre différentes lignées techniques. À titre d'exemple, Y. Deforge mentionne que « dans une famille de lignées il y a des principes "plus faciles" à mettre en œuvre que d'autres⁷⁷⁷ », mais sans donner plus de précisions sur le sens qu'il attribue à cette « facilité ».

De son côté, G. Simondon précise que « par la concrétisation technique, l'objet, primitivement artificiel, devient de plus en plus semblable à l'objet naturel⁷⁷⁸ ». La concrétisation s'accompagne donc d'une naturalisation de l'objet technique, mais sans jamais faire de l'objet technique un être parfaitement concret comme le sont des organismes vivants. Le schème technique du TMA est plus concret que celui du télescope de Newton, non seulement parce que son fonctionnement interne présente davantage de synergies, mais aussi parce que son schème se rapproche plus du phénomène naturel qui en est le principe, à savoir la réflexion. Cela invite à distinguer, comparer et ordonner les schèmes techniques en fonction de leur proximité avec l'opération physique qui en est le principe commun. Considérons la citation suivante de G. Bachelard :

⁷⁷⁶ Silvia De Cesare, art. cit., p. 2. La délimitation du périmètre constitue, avec l'établissement d'un critère d'évaluation et l'investigation des causes, un des trois points essentiels à toute discussion sur le progrès.

⁷⁷⁷ Yves Deforge, TGOI, p. 140. Les guillemets sont de Deforge.

⁷⁷⁸ Gilbert Simondon, MEOT, p. 57.

Comme l'application est soumise à des approximations successives, on peut dire que le concept scientifique correspondant à un phénomène particulier est le groupement des approximations successives bien ordonnées. La conceptualisation scientifique a besoin d'une série de concepts en voie de perfectionnement pour recevoir le dynamisme que nous visons, pour former un axe de pensées inventives⁷⁷⁹.

En remplaçant « concept scientifique » par « schème technique » et « conceptualisation scientifique » par « rationalisation technique », nous obtenons une méthodologie adéquate à une relecture cohérente de l'évolution de la technique, dans laquelle chaque étape de concrétisation s'apparente à un progrès dans l'approximation d'un principe physique. « No mechanism operates perfectly – its design must make up for imperfections⁷⁸⁰ » ; les imperfections, que nous avons qualifiées d'« aberrations », sont inévitables et, en considérant que tout schème technique est la traduction matérielle d'un principe physique, elles apparaissent du fait de l'écart entre le schème technique et le principe physique sous-jacent. La réduction des aberrations, même si elle ne peut probablement jamais être totale, constitue un moteur puissant dans l'évolution des instruments phénoménotecniques ; elles diminuent avec le progrès des sciences et des techniques, même si des évolutions dues à des causes extrinsèques, comme le gigantisme, peuvent les aggraver.

Un schème technique est plus évolué qu'un autre s'il présente une plus grande généricité et/ou s'il approxime plus finement la nature. Dans le premier cas, seule une évaluation réalisée *a posteriori* peut nous renseigner, dans la mesure où il n'y a *a priori* aucun moyen de connaître l'importance d'un tel stock de potentialités. En revanche, le deuxième cas de figure permet d'envisager ce que pourrait être une hiérarchisation des essences techniques à la base des lignées. L'essence technique de la lignée des réflecteurs peut ainsi être qualifiée de plus évoluée par rapport à celle des réfracteurs dans la mesure où les aberrations chromatiques y sont intrinsèquement absentes. En nous inspirant d'Altshuler, nous parlerons d'« idéalisation » pour qualifier un tel processus sous-tendant la substitution des lignées techniques. De même qu'au sein d'une lignée, les schèmes techniques deviennent de plus en plus concrets, au sein d'une famille, le schème technique pur réalisé par les divers schèmes techniques tend vers l'idéal : son degré d'approximation augmente et l'importance des aberrations diminue. La figure 61 illustre ce phénomène de substitution (il s'agit de la figure 72 pour laquelle nous avons distingué les télescopes selon la lignée à laquelle ils se rattachent) :

⁷⁷⁹ Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, *op. cit.*, p. 74.

⁷⁸⁰ Henry Rowland, cité dans Davis Baird, *op. cit.*, p. 145.

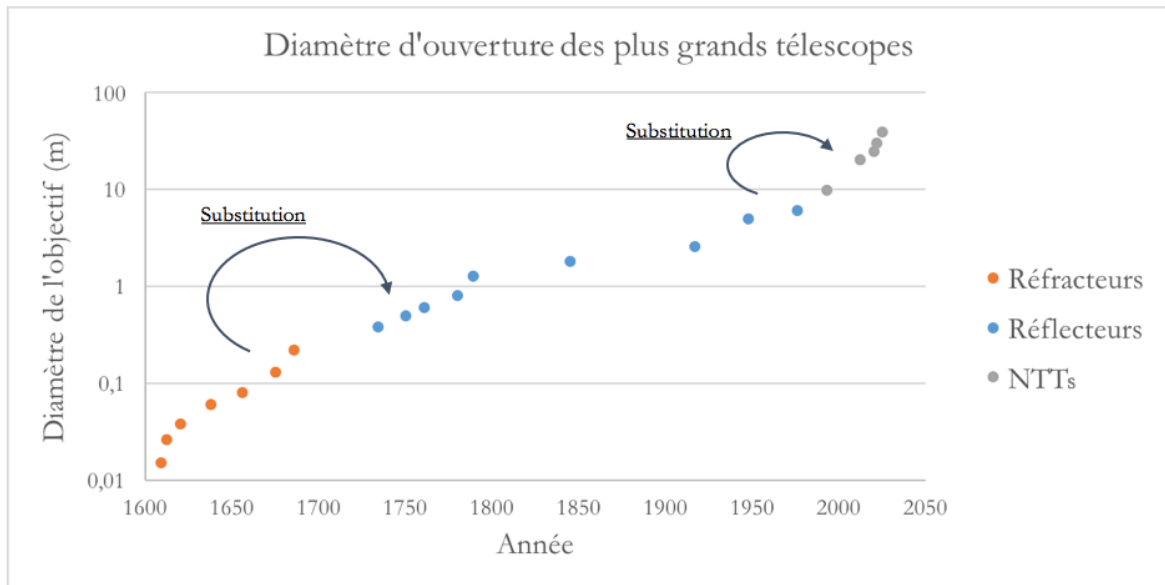


Figure 72 – Illustration du phénomène de substitution des lignées techniques. Les NTTs (New Technology Telescopes) désignent les dispositifs ayant recours à la segmentation (du miroir comme du télescope).
(© Thomas Guy)

L'extension de l'analyse au niveau supérieur de la technique permet de dégager un processus d'idéalisation dont le statut s'apparente au processus de concrétisation mais au niveau de la famille technique. De même, il peut être intéressant de prolonger les analyses, jusque-là circonscrites à l'échelle de l'individu technique, c'est-à-dire le télescope, aux autres échelles de la technique, et notamment aux observatoires.

3. Logiques évolutives des ensembles instrumentaux

3.1. La virtualisation des observatoires astronomiques

Au cours de l'histoire des télescopes, un certain nombre d'évolutions techniques ont été rendues possibles par le développement de l'électronique et de l'informatique. Prenons par exemple l'évolution des montures de télescope. Historiquement, ce sont les montures azimutales, plus simples de conception et d'installation, qui sont apparues, avant d'être supplantées par les montures équatoriales, plus complexes en principe, mais permettant un suivi plus simple des objets observés. Cependant, le développement de systèmes de motorisation asservis et pilotés automatiquement a remis les montures azimutales au goût du jour. Ce qui pourrait s'apparenter à un phénomène de *régression* technique s'explique ici par le fait que l'automatisation diminue la complexité d'utilisation et fait passer au second plan la simplicité de réalisation mécanique comme critère. Si la monture

équatoriale est préférable à la monture azimutale, le couple [monture azimutale + système de suivi automatique] est préféré à la monture équatoriale. L'introduction des sous-systèmes électro-informatiques intervient ici au niveau de l'observatoire mais rejaillit directement sur le mode de fonctionnement de l'individu technique qu'est le télescope.

Plus qu'une condition *suffisante*, le recours à de nouvelles interfaces techniques s'est souvent avéré *nécessaire* pour implémenter les inventions propres aux lignées de télescopes. C'est typiquement le cas du développement de l'optique active, dont le principe de fonctionnement repose sur l'utilisation d'un triptyque actuateurs - détecteur de qualité d'image - système informatique (à la fois pour analyser l'image en question et contrôler le pilotage des actuateurs). De même, l'optique adaptative nécessite le recours à un miroir déformable et à un calculateur pilotant les déformations en question. Dans les deux cas, c'est l'introduction d'une boucle d'asservissement⁷⁸¹ recourant à des sous-systèmes électroniques et numériques qui autorise l'emploi de ces nouvelles techniques, dont les fréquences de fonctionnement dépassent les capacités d'intervention humaine⁷⁸². En retour, ces nouveaux dispositifs techniques sont en mesure de produire bien plus de données, qui ne peuvent être traitées efficacement que par des systèmes ayant recours au numérique. Si les années 1950 ont vu l'émergence de ce qu'il est convenu d'appeler la « *Big Science* »⁷⁸³, il semblerait que, depuis les années 1980, nous soyons entrés dans l'ère de la *Big Data Science* ; la dimension « *Big* » n'ayant plus uniquement lieu en *amont* de la production de données (très grands ensembles instrumentaux), mais aussi et surtout en *aval* (grande quantité de données recueillies) – nous reviendrons sur ce point à la fin de ce chapitre.

Mais l'augmentation de la quantité de données disponible se double surtout d'une augmentation de leur complexité. Des observations de plus en plus complexes, permises par les nouveaux dispositifs instrumentaux, résultent des données portant sur des effets plus fins et donc plus difficilement détectables. Dans certains cas, les effets que les scientifiques souhaitent observer sont même inférieurs au bruit, et notamment au bruit instrumental. Cela signifie que malgré la haute technicité des dispositifs observationnels (télescopes et instruments), certains effets ne peuvent être directement observés. Leur « détection » n'est alors rendue possible que par les systèmes de

⁷⁸¹ La boucle d'asservissement, servant à la fois à analyser les données « en entrée » et à piloter les actuateurs « en sortie », illustre parfaitement ce que Simondon qualifie de « réversibilité des fonctions de senseur et d'effecteur ».

⁷⁸² Celles-ci étant de l'ordre du hertz, c'est-à-dire quelques déformations par seconde, dans le cas de l'optique active et de plusieurs centaines de hertz dans le cas de l'optique adaptative.

⁷⁸³ Alvin M. Weinberg, « *Impact of large-scale science on the United States* », *Science*, vol. 134, n° 3473, 1961, p. 161-164.

traitement de données mis en place en sortie du télescope et des instruments. Là encore, l'introduction de ces dispositifs intervient aux échelles *supérieures* de la technique (observatoires et même réseaux), mais éclaire le développement des individus. Nous qualifierons de *virtualisation* la tendance évolutive consistant à intégrer davantage de sous-systèmes électroniques et numériques, que ce soit en complément de l'individu technique ou directement au sein de son schéma technique en se substituant à des éléments matériels. La virtualisation accompagne le passage aux échelles macrotechniques de l'observatoire et du réseau, confirmation à nos yeux de la solidarité du progrès aux différentes échelles de la technique. Elle s'exprime selon les deux modalités établies précédemment, à savoir, 1. l'introduction de nouvelles techniques (OAc, OAd) ou la réutilisation d'anciennes (monture azimutale) ; 2. le développement des possibilités de traitement des données. La virtualisation permet aussi de compenser algorithmiquement certaines aberrations, et en cela, elle s'apparente à un prolongement de la logique de complexification correctrice aux autres échelles de la technique. Elle est également ce qui permet l'implémentation de techniques permettant de redynamiser le gigantisme (via l'optique active, monolithique comme polyolithique). À ce titre, la virtualisation est la combinaison et le prolongement à l'échelle supérieure des deux logiques identifiées au chapitre précédent.

3.2. La logique de segmentation

La virtualisation des instruments tend à s'accompagner d'une certaine *segmentation*. D'observatoires mobilisant un unique télescope à miroir primaire monolithique, on est passé au tournant du XXI^e siècle à des observatoires à plusieurs télescopes pouvant disposer de miroirs segmentés. Cette segmentation intervient donc au niveau de l'élément et de l'individu, et va dans le sens d'une diminution de la matérialité – un peu à la façon dont la TRIZ envisage l'absence de volume, masse et poids du RFI. La segmentation a tout autant vocation à corriger les aberrations liées au *sagging*, s'apparentant en cela à une complexification correctrice, qu'à prolonger la tendance au gigantisme par le recours aux techniques interférométriques. Tout comme la virtualisation, la tendance à la segmentation constatée à l'échelle de l'observatoire est donc un état mixte, une combinaison des deux logiques détectées à l'échelle inférieure.

L'obtention d'une ouverture supérieure à la centaine de mètres s'apparente à un changement d'ordre de grandeur, conduisant à une *rupture d'échelle*⁷⁸⁴ dans l'évolution des télescopes : de l'individu

⁷⁸⁴ Vincent Bontems, « Quelques éléments pour une épistémologie des relations d'échelle chez Gilbert Simondon », *Appareil*, n° 2, 2008.

intégré dans un ensemble (le télescope au sein d'un laboratoire), on passe à un réseau d'individus pour réaliser le schème technique. Ce transfert de l'opération vers un macrosystème est rendu possible par le développement des systèmes électroniques et informatiques de contrôle, mais aussi et surtout par un changement de paradigme dans la conception de l'instrument – rupture qui signale le franchissement d'un obstacle mécanologique. En effet, si la volonté d'atteindre des tailles toujours plus importantes persiste, elle implique désormais l'abandon de la continuité de l'objet technique. L'interférométrie repose sur la prise de conscience de la non-localité du schème technique, celui-ci étant *distribué* sur une zone de technicité où les composants de l'observatoire interférométrique sont séparés.

L'histoire de l'interférométrie astronomique est elle aussi marquée par les logiques de gigantisme et de complexification correctrice. La première se traduit à la fois par la multiplication du nombre d'ouvertures (on parle aussi de « pupilles ») et par l'augmentation des distances des lignes de base maximales ; la seconde est marquée par la complexification des techniques de synthèse des signaux. Les passages à l'interférométrie optique à longue base puis à très longue base ont notamment nécessité l'introduction de lignes de retard (complexification) puis d'horloges atomiques pour enregistrer les signaux avant de les recombinaer numériquement *a posteriori* (virtualisation). Cependant, la force de l'interférométrie réside dans sa capacité à *simuler* – terme employé par les astronomes pour désigner la virtualisation – les performances d'un télescope en matière de résolution angulaire uniquement, le pouvoir de collecte étant égal à celui de la plus petite des ouvertures composant l'interféromètre. Le recours aux techniques interférométriques résulte, entre autres choses, d'une meilleure compréhension du phénomène qu'est la lumière. Ainsi en va-t-il du télescope à miroir annulaire : à surface égale, il permet d'obtenir un diamètre plus grand (donc une meilleure résolution) tout en conservant le même pouvoir de collecte. Ces dispositifs, comme les réseaux d'interférences, sont le résultat d'une plus grande rationalisation dans la conception des instruments scientifiques, illustration, à nos yeux, du processus d'idéalisation à l'œuvre.

Les projets d'« hypertélescope⁷⁸⁵ » et de « télescope dilué⁷⁸⁶ » ont précisément vocation à résoudre la contradiction entre les deux critères de performance que sont la résolution et la sensibilité. Dotés d'un très grand nombre d'ouvertures d'une taille relativement faible (de l'ordre du mètre), ces

[URL : <https://journals.openedition.org/appareil/595>].

⁷⁸⁵ Antoine Labeyrie, « Resolved Imaging of Extra-Solar Planets with Future 10-100 km Optical Interferometric Arrays », *Astronomy & Astrophysics*, Suppl. Ser. 118, septembre 1996, p. 517-524.

⁷⁸⁶ Hervé Le Coroller *et al.*, « The Carlina-Type Diluted Telescope: Stellar Fringes on Deneb », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 573, janvier 2015.

prototypes se basent sur le concept de densification de pupille : plutôt que combiner les signaux par paire d'ouvertures (comme c'est le cas en interférométrie traditionnelle), l'idée est de combiner tous les signaux directement afin d'autoriser l'imagerie directe. Les deux logiques que sont l'augmentation du nombre de pupilles et la complexification des techniques de synthèse trouvent ici leur point de convergence.

3.3. La transition vers le réseau

La virtualisation et la segmentation agissent de concert pour faire franchir un cap à l'astronomie, en termes de quantité et de qualité des données. Ces nouvelles logiques d'évolution, mobilisant les échelles supérieures de la technique, prennent petit à petit le pas sur celles concentrées au niveau de l'individu technique. Le déphasage du progrès vers la macro-échelle technique, idée présente aussi bien chez G. Simondon que dans la TRIZ⁷⁸⁷, passe en outre par une diminution de l'importance accordée aux propriétés matérielles de l'individu technique pour développer les possibilités offertes par le numérique.

Davantage que d'un déphasage (qui, chez G. Simondon, désigne le transfert simultané de la technicité vers les réseaux et vers les éléments miniaturisés), il s'agit d'une tendance très générale des objets techniques à poursuivre leurs logiques d'évolution aux échelles supérieures : les éléments *deviennent* des individus, les individus *deviennent* des ensembles, les ensembles *deviennent* des réseaux. Le passage à l'optique active, via la déformation et la dynamisation des miroirs, illustre cette tendance, tout comme l'intégration toujours plus poussée du télescope au sein de l'observatoire. Mais c'est surtout à l'échelle de l'ensemble que cette tendance est perceptible :

Avec les objets techniques nés des découvertes scientifiques, on assiste à l'invention d'ensembles qui sont déjà en eux-mêmes de type composite, *mettant en jeu des phénomènes appartenant à des chapitres très différents du savoir* ; cette hétérogénéité fondamentale, remplaçant la relative homogénéité des machines industrielles, fait que chaque objet est lui-même en une certaine mesure un réseau⁷⁸⁸.

⁷⁸⁷ Pour rappel, la loi n° 6 de la TRIZ, dite « de la transition vers le macro-système », stipule « qu'une fois épuisées ses potentialités de développement, le système technique poursuit son évolution en tant que partie d'un super-système ».

⁷⁸⁸ Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences, op. cit.*, p. 261. (C'est Simondon qui souligne.)

Les observatoires interférométriques font partie de ces « objets techniques nés des découvertes scientifiques », et si jusqu'à présent nous les avons assimilés aux autres observatoires, c'est-à-dire à des ensembles techniques, force est de constater que leur fonctionnement est celui d'un réseau, dans la mesure où les phénomènes de réflexion et d'interférométrie se conjuguent aux technologies de transmission et de traitement de l'information pour faire franchir un palier de performance, en même temps que la zone de technicité dépasse l'échelle de l'objectalité. Il ne s'agit pas de l'hybridation de plusieurs schèmes techniques, dans laquelle deux schèmes techniques fusionnent pour n'en former plus qu'un (comme on a pu le voir avec l'apparition de la lignée des télescopes catadioptriques), mais bien plutôt d'une symbiose pour laquelle on constate la coexistence et la coévolution de plusieurs individus, basés sur des phénomènes très différents. De même, l'hétérogénéité des fréquences de fonctionnement à l'œuvre au sein des observatoires ayant recours à l'optique adaptative, tend à en faire des réseaux miniaturisés. En effet, leur fonctionnement repose sur la coordination de multiples miroirs segmentés (vu comme des terminaux de la taille d'un élément) et repose sur l'emploi massif de sous-systèmes électroniques et informatiques. Seul un fonctionnement de réseau permet « d'exécuter des calculs en temps, sans retard appréciable par rapport à l'action qui se déroule⁷⁸⁹ ». La tendance au déphasage vers les macro-échelles, que nous avons détectée au chapitre précédent, s'apparente donc davantage à une transition vers les échelles supérieures des logiques déjà à l'œuvre aux échelles inférieures.

Cela dit, ce n'est pas sans raison que G. Simondon établissait une solidarité entre le passage au niveau du réseau et la miniaturisation des éléments avec sa notion de déphasage. On peut constater la *synchronicité* entre les deux processus quand le passage aux échelles supérieures est conditionné par la virtualisation qui met en place le réseau électronique. Ce dernier suppose une miniaturisation, des lignées électroniques et des actuateurs, qui rend possible la segmentation du miroir et l'optique active. Autant les tendances à l'ouverture et à la fermeture de l'objet ne peuvent être concomitantes, autant la transition vers les échelles supérieures s'accompagne d'un développement de la technicité des échelles inférieures. La transition vers l'ensemble et le réseau s'intègre donc bien au sein d'un déphasage de la technicité. Pour désigner ce développement de la technicité à des échelles inférieures, nous recommandons de considérer la miniaturisation des éléments, ainsi que la technicisation, comme une conséquence de l'idéalisation : mieux on connaît les principes physiques sous-jacents, plus on est en mesure de concevoir finement l'objet technique.

⁷⁸⁹ Gilbert Simondon, *Sur la technique*, *op. cit.*, p. 271.

4. L'évolution des instruments scientifiques

4.1. Le progrès phénoménoteknique des instruments

Les objets techniques sont l'encapsulation et la mise à l'échelle humaine de phénomènes qui dépassent l'individu humain, d'où la nécessité, passé un certain seuil de développement, de recourir à la science afin de franchir un palier de performance. Mais dans la mesure où un schème technique repose sur un principe physique, il en partage les limitations, qui dépendent, en partie, de l'état des connaissances scientifiques à l'instant considéré. Il n'y a donc de progrès possible que par une causalité circulaire technologique. C'est pourquoi le domaine phénoménoteknique est celui qui donne la clef de toutes les évolutions que désigne confusément le terme « technoscience » : l'instrument scientifique exige et permet le progrès technologique. Comme l'a souligné Andrew Feenberg : « La technique est autant une application de la rationalité technoscientifique que l'arrière-plan du monde de l'expérience⁷⁹⁰ ». L'intérêt des instruments scientifiques réside en ce qu'ils instaurent une circularité directe dans la convergence technologique : la science nourrit la technique et en retour, elle l'utilise pour progresser dans ses expériences et théories. On peut étendre cette circularité technologique à plus grande échelle⁷⁹¹ en considérant que les instruments produits par la recherche phénoménoteknique trouvent leurs débouchés non seulement dans la science (élargissement de l'horizon de créativité), mais aussi dans l'industrie en fournissant de nouveaux principes et schèmes (élargissement de l'horizon de faisabilité) :

Ces instruments de la science sont la réalisation, la traduction matérielle des principes, des théories, des lois, des idées nouvelles inventés par les savants. Ils deviennent donc toujours plus délicats, plus compliqués, plus difficiles à construire. Mais ils produisent, et permettent d'utiliser, à chaque fois, des effets naturels de plus en plus surprenants – captent ou exploitent des formes d'énergie encore inutilisées⁷⁹².

Il est à noter que la naturalisation est le propre des instruments phénoménotekniques, qui « ne sont plus seulement des applications de certains principes scientifiques antérieurs. En tant qu'ils existent, ils prouvent la viabilité et la stabilité d'une certaine structure qui a le même statut qu'une

⁷⁹⁰ Andrew Feenberg, *Pour une théorie critique de la technique*, Montréal, Lux Éditeur, 2014.

⁷⁹¹ Vincent Bontems, « Le cycle de la technologie chez Simondon », dans Jean-Hugues Barthélémy (dir.), *Cahiers Simondon*, n° 6, Paris, L'Harmattan 2015.

⁷⁹² Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 101.

structure naturelle⁷⁹³ », ils actualisent des potentialités de la nature. Simondon pointe la concrétisation des lignées scientifiques comme constituant le meilleur terrain d'étude du progrès de la technicité. Si « la véritable activité technique est aujourd'hui dans le domaine de la recherche scientifique⁷⁹⁴ », c'est précisément parce qu'elle est recherche « orientée vers des objets ou des propriétés d'objets encore inconnus⁷⁹⁵ ». Aux côtés du système industriel, les centres de recherche concentrent les nouveaux progrès en technique, et font partie de ces domaines extrêmement contraints au sein desquels le progrès technique s'effectue plus rapidement.

Ce progrès passe par le franchissement d'obstacles mécanologiques et permet de s'affranchir de l'épuisement des potentialités évolutives, bien qu'il doive lutter contre une certaine inertie psychologique de la part du système technique. À ces concepts tout à fait bachelardiens, ajoutons la dimension proprement active des *instruments phénoménotechniques*. Que l'on souscrive ou non à l'universalité de l'affirmation « L'homme ne peut satisfaire l'ensemble de ses besoins en ayant une attitude passive ou de consommateur à l'égard de la nature⁷⁹⁶ », on ne peut que la valider dans le cas des activités scientifiques. En effet, la science moderne est « fondée sur l'expérience, et progressant sans cesse par des mesures rigoureuses⁷⁹⁷ », et, par conséquent, elle « exige des appareils d'observation, d'expérimentation et de mesure⁷⁹⁸ » sans cesse plus précis, plus performants, d'où « la transformation d'une science qui vise la représentation en une science active, opératoire⁷⁹⁹ ».

4.2. Une interprétation des processus de concrétisation et d'idéalisation

De fait, l'influence de la science sur le développement des objets techniques, et plus spécialement sur celui des instruments scientifiques, se fait selon deux modalités : la concrétisation et l'idéalisation. Il s'agit de deux processus évolutifs des instruments scientifiques, qui interviennent à des *niveaux* différents. D'une part, la science intervient en rationalisant le processus de conception, au niveau de la lignée, et en nourrissant le processus de concrétisation par la prise en compte de l'insertion de l'objet au sein du milieu extérieur et par la recherche de synergies internes.

⁷⁹³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 58.

⁷⁹⁴ Gilbert Simondon, ILFI, p. 512.

⁷⁹⁵ *Ibid.*, p. 512.

⁷⁹⁶ Joëlle Forest, « Théorie des objets techniques et rationalité », dans Smail Aït-el-Hadj et Vincent Boly, *op. cit.*, p. 42.

⁷⁹⁷ Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 101.

⁷⁹⁸ *Ibid.*, p. 101.

⁷⁹⁹ Gilbert Hottois, *op. cit.*, p. 143.

Le processus de concrétisation est une *tendance* qui rencontre les résistances de tendances opposées ou du moins divergentes – et dans le cas du consumérisme, il s’agit de la résistance du milieu humain lui-même à la nécessité technologique. Non seulement la tendance qui commande le devenir technique ne se réalise pas toujours, mais elle ne se réalise jamais totalement. Dès lors, les objets techniques effectifs résultent d’un compromis avec les milieux. La philosophie simondonienne est une pensée des forces – de forces qui s’opposent, mais qui par là même composent (transductivement) et ne peuvent être pensées qu’à la condition de dépasser les schèmes oppositionnels eux-mêmes⁸⁰⁰.

D’autre part, à l’échelle de la famille, la rationalité scientifique intervient en permettant la substitution d’une essence technique par une autre, plus proche de la nature, et en donnant naissance au processus d’idéalisation :

L’objet technique se concrétise comme une axiomatique précise sa nature. Son schème se stabilise quand un maximum de surdétermination fonctionnelle est atteint. Un progrès ultérieur nécessite une refonte du schème, c’est-à-dire une invention ; en certains cas, ce progrès ne peut s’opérer que grâce à un changement de niveau, produit, par exemple, par une nouvelle théorie scientifique qu’il a lui-même suscitée : les obstacles au perfectionnement indéfini, et pour ainsi dire linéaire, des techniques, sont un appel au savoir scientifique à se fonder sur le sens même de cet obstacle comme point d’accumulation, limite de convergence de tous les progrès réalisables sans changement d’axiomatique⁸⁰¹.

Qu’ils se nomment obstacles, contradictions, aberrations ou bien encore saturations, c’est le franchissement de ce qui entrave l’efficacité de la technique qui constitue le marqueur du progrès au sein des lignées techniques ou de la famille. On l’a vu, le processus de concrétisation émerge de la dialectique entre les deux logiques évolutives identifiées au niveau des individus ; le processus d’idéalisation, qui intervient au niveau de la famille, émerge quant à lui de la dialectique entre l’horizon effectif de la technique et l’horizon des potentialités offertes par la nature. C’est en cela que l’intention technique de J.-L. Maunoury, en tant que mise en relation de l’horizon de créativité et de l’horizon de faisabilité, s’apparente à la tendance de A. Leroi-Gourhan : dans les deux cas il s’agit de processus émergents, tout comme le sont les processus de concrétisation et d’idéalisation :

⁸⁰⁰ Bernard Stiegler, « Temps et individuations technique, psychique et collective dans l’œuvre de Simondon », art. cit., p. 245.

⁸⁰¹ Gilbert Simondon, *Sur la technique*, op. cit., p. 34.

La tendance ne vient pas simplement d'une force organisatrice que serait l'homme, elle n'appartient pas à une intention formatrice qui précéderait la fréquentation de la matière, et elle ne relève d'aucune maîtrise volontaire : elle s'opère, au fil du temps, par sélection de formes dans un rapport de l'être vivant humain à la matière qu'il organise et par laquelle il s'organise, où aucun des termes du rapport n'a le secret de l'autre⁸⁰².

La volonté créatrice de l'Homme intervient néanmoins comme gradient cumulatif permettant de légitimer un discours sur le progrès des lignées, et le concept de récurrence bachelardienne permet de donner un nouveau sens au progrès des instruments scientifiques. Une nouvelle génération d'instruments est capable de réaliser les mêmes observations que la génération précédente, plus d'autres choses, que ce soit un gain de vitesse, de résolution, de quantité de données... Mais ce gain de performance des instruments est une conséquence, et non une cause, de leur gain de technicité. L'implication ne va que dans un sens : il ne s'agit pas de dire que les instruments plus performants sont plus évolués, mais que les instruments sont plus évolués, donc plus performants. La cumulativité des sciences fonde en partie la cumulativité des techniques et autorise à parler de progrès des instruments scientifiques :

Si l'on prétend par exemple trouver la largeur d'une frange d'interférence et déterminer, par les mesures connexes, la longueur d'onde d'une radiation, alors il faut non seulement des appareils et des corps de métiers, mais encore une théorie et par conséquent toute une Académie des sciences⁸⁰³.

G. Bachelard établit la connexion entre la recherche scientifique, l'invention technique et l'innovation industrielle – les instruments phénoménotecniques sont à la pointe du progrès technologique et réclament le plus souvent la coopération du secteur de la recherche publique avec des industriels – et il insiste, à sa façon, sur la solidarité des progrès technique et scientifique. Le parallèle avec le cas du télescope est immédiat : l'œil humain possède une résolution angulaire de l'ordre de la minute d'arc (dans le visible) et celle des premières lunettes était de l'ordre de la dizaine de secondes d'arc. Mais afin d'atteindre des résolutions supérieures, un « corps de métier » puis une industrie ont dû se mettre en place (pour l'usinage et le polissage des optiques, par exemple). Les télescopes et observatoires les plus récents, qui atteignent le dixième, voire le centième, de seconde d'arc nécessitent quant à eux toute une « théorie » (de la diffraction, de l'interférométrie... bref, de

⁸⁰² Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 74.

⁸⁰³ Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique, op. cit.*, p. 242.

la lumière). Paraphrasant G. Bachelard, nous pouvons ainsi dire que le télescope est un prolongement de l'esprit plus que de l'œil – ou du cristallin.

4.3. Virtualisation et informatisation

L'apparition, au XVII^e siècle, des instruments *mathématiques* puis *philosophiques* résulte de la mathématisation des sciences, qui implique une transformation qualitative, donc des mesures, nécessitant des moyens techniques, et la phénoménoteknik bachelardienne traduit un peu plus l'importance accordée aux instruments dans la science moderne. Le rôle de « pourvoyeur de données » dévolu aux instruments tend à s'amplifier depuis le milieu du XX^e siècle, s'inscrivant dans la tendance mise au jour par G. Simondon, et dans une moindre mesure par J. Lafitte avant lui, à l'informatisation des objets techniques. La logique de virtualisation illustre parfaitement cette situation et passe par différentes modalités :

- Importance accordée aux propriétés informationnelles ;
- Compensation algorithmique d'imperfections mécaniques ;
- Diminution de l'importance accordée aux propriétés matérielles.

La virtualisation des instruments scientifiques tend, depuis une cinquantaine d'année, à faire de l'astronomie, une « science augmentée », mais aussi une discipline dont les instruments deviennent de plus en plus opaques, au regard de l'astronome comme du mécanologue. L'essor des possibilités offertes par les dispositifs électroniques et informatiques se traduit par la plus grande importance accordée au segment sol, au traitement du signal et à la gestion des données. La recherche d'effets toujours plus fins nécessite un appareillage théorique important, incorporé directement dans le design des pipelines de données : l'« observation » réalisée dans cette astronomie augmentée repose sur une « phénoméno-algorithmique » au sens où le traitement de l'information devient au moins aussi important que son acquisition. Si les progrès phénoménotekniks en astronomie ont historiquement porté sur les télescopes, puis sur les autres instruments, il semblerait qu'aujourd'hui l'accent soit mis sur les algorithmes de traitement de données. Nous soulignons l'importance de maintenir la synchronicité du développement de ces différents aspects du progrès technique, au risque sinon d'engendrer des « angles morts » théoriques, de laisser des possibilités inexploitées (à l'instar du grossissement vide) ou, pire, d'aboutir à des situations d'hypertélies.

La virtualisation de l'astronomie traduit aussi le fait que les quantités de données manipulées sont désormais telles qu'elles ne peuvent être manipulées « à la main⁸⁰⁴ ». En quoi cette situation est-elle nouvelle ? Après tout, la collecte de données a toujours fait partie de la science, du moins depuis l'affirmation de l'empirisme dans la démarche expérimentale. Sans tomber dans les écueils identifiés par Roy Amara⁸⁰⁵, il s'agit de questionner l'hypothèse d'un basculement vers un régime qui s'apparente à une *Big Data-Driven Science*. Et comme le rappelle Bruno Strasser, reprenant les remarques de Robert Darnton, ce questionnement n'est pas nouveau :

In particular, perceptions of an “information overload” (or a “data deluge”) have emerged repeatedly from the Renaissance through the early modern and modern periods and each time specific technologies were invented to deal with the perceived overload⁸⁰⁶.

Mais les *ruptures d'échelle*, en ce qui concerne la quantité de données recueillies (Tab. 10) mais aussi leur précision, nous poussent à voir dans le tournant pris par l'astronomie, les prémisses d'une *Big Revolution*, selon la caractérisation qu'en donne Ian Hacking : la création de consortiums chargés de piloter les missions (nouvelle institution sociale), et notamment les pipelines de données, l'avènement de la figure du codeur, à mi-chemin entre le théoricien et l'expérimentateur (nouvelle organisation sociale de la science et la société), ainsi que la nouvelle centralité du concept d'information (nouvelle façon de voir le monde), sont autant d'indices allant dans le sens d'une « révolution » au moins en ce qui concerne l'astronomie :

If there is any novelty to be found in today's data-driven science, perhaps it might derive from the amount and nature of the data. There is no early modern equivalent to the petabytes of digital data stored in computerized databases⁸⁰⁷.

⁸⁰⁴ Paul Humphreys, *op. cit.*, p. 7.

⁸⁰⁵ Ancien président de l'*Institute for the Future* », Roy Amara a formulé la *loi* qui porte désormais son nom et qui stipule que « nous avons tendance à surestimer l'effet d'une technologie à court terme mais à sous-estimer ses effets sur le long terme ».

⁸⁰⁶ Bruno J. Strasser, « Data-driven sciences: From wonder cabinets to electronic databases », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, n°43, 2012, p. 85-87.

⁸⁰⁷ Bruno Strasser, « Data-driven science », art. cit., p. 85.

Tableau 10 – Volume de données de quelques grand surveys, présents et futurs⁸⁰⁸.

Sky Survey Projects	Data Volume
DPOSS (The Palomar Digital Sky Survey)	3 TB
2MASS (The Two Micron All-Sky Survey)	10 TB
GBT (Green Bank Telescope)	20 PB
GALEX (The Galaxy Evolution Explorer)	30 TB
SDSS (The Sloan Digital Sky Survey)	40 TB
SkyMapper Southern Sky Survey	500 TB
PanSTARRS (The Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)	~ 40 PB expected
LSST (The Large Synoptic Survey Telescope)	~ 200 PB expected
SKA (The Square Kilometer Array)	~ 4.6 EB expected

Certains vont même jusqu'à affirmer que l'essor des méthodologies de type *machine learning* sonne « la fin de la théorie⁸⁰⁹ » - affirmation que B. Strasser qualifie toutefois de « *wild claim* ». Cette problématique dépasse le cadre de cette thèse. Néanmoins, notons que des travaux comme ceux menée par G. Longo et C. Calude⁸¹⁰ tendent à suggérer que les algorithmes seuls seront insuffisants pour faire de la science telle qu'on l'entend aujourd'hui. Le risque étant de ne voir que ce que l'on souhaite voir ou bien d'observer des corrélations fortuites, non significatives.

Conclusion de chapitre

Comme le souligne Fred Watson, la miniaturisation est une « loi » que l'on retrouve au sein de l'évolution de nombreux dispositifs techniques (et, tout comme le gigantisme, il s'agit selon nous généralement d'une tendance à l'hypertélisation). Dans le cas des télescopes, la miniaturisation peut affecter les éléments et néanmoins accompagner une augmentation de la taille de l'individu. En fait, les transitions vers la macro-échelle et vers la micro-échelle sont solidaires. Nous proposons par conséquent de regrouper les deux tendances duales évoquées au chapitre précédent et de considérer que la *transition vers les autres échelles* est un processus général sous-tendant l'évolution des objets techniques, au même titre que les processus de concrétisation et d'idéalisation. Ce processus

⁸⁰⁸ Yanxia Zhang & Yongheng Zhao, « Astronomy in the Big Data Era », *Data Science Journal*, n°14-11, p. 2.

⁸⁰⁹ Chris Andersson, « The end of theory: the data deluge makes the scientific method obsolete », *WIRED*, 23 juin 2008.

⁸¹⁰ Giuseppe Longo & Christian S. Calude, « The deluge of spurious correlations in big data », *Foundations of Science*, vol. 22, n°3, 2016, p. 595-612.

conduit les objets techniques à poursuivre leur développement aux autres échelles : supérieure, en acquérant les spécificités d'un ensemble, voire d'un réseau, et inférieure, à travers le développement de microcomposants (électroniques notamment). En outre, cette transition d'échelle prolonge et opère un mélange des logiques évolutives détectées à l'échelle de l'individu : en faisant passer l'individu technique à une autre échelle, la transition amplifie la dimension informative des télescopes en y intégrant un certain nombre de composants électroniques. L'étude des dynamiques évolutives des télescopes et des observatoires nous a ainsi permis de valider et de préciser certaines des considérations théoriques issues du chapitre précédent. Les logiques de gigantisme et de complexification correctrice sont les traductions respectives, au sein des télescopes optiques, des tendances à la simplification fonctionnelle et à la complexification structurelle. Autant les tendances identifiées au chapitre précédent apparaissent comme des dynamiques *objectives* à grande échelle, autant gigantisme et complexification correctrice s'apparentent à des logiques de conception, *subjectives*, dans la mesure où elles sont consciemment implémentées par les concepteurs de télescopes. Les logiques, tendances et processus mis au jour, éclairent l'évolution des dispositifs techniques à différentes échelles : leur interprétation rétrospective permet d'étudier « le problème de la science », quand leur extension prospective autorise la formulation de scénarios futurs – objets du chapitre suivant. Notre thèse porte ainsi avant tout sur l'évolution technique d'objets matériels. Mais l'exhibition d'une logique de virtualisation soulève des problématiques épistémologiques se rattachant à la valeur des connaissances produites par ces nouveaux dispositifs instrumentaux et aux nouvelles façons de faire de la science à l'heure du *Big Data*. Ces questionnements n'ont été qu'entraperçus au cours de ce travail mais ils constituent à nos yeux un prolongement possible extrêmement stimulant.

Chapitre 9

Perspectives évolutionnistes et prospective technique

S'il y a des convergences entre progrès technique et progrès scientifique, si la découverte scientifique peut engendrer une innovation technique, il y a, dans chaque cas, deux processus différents d'invention ou de découverte, éventuellement complémentaires, mais irréductibles l'un à l'autre.

Bernard STIEGLER, *La Technique et le Temps*

Dans les sociétés industrielles, l'idée que la technique découle de la science et qu'elle n'en constitue que le versant applicatif est solidement établie, alors qu'elle n'est que relativement récente, et pour le moins partielle. L'étude des liens entre les disciplines scientifiques et techniques est un passage incontournable de toute étude portant sur les dispositifs techniques - notamment pour qui étudie les instruments scientifiques - et ouvre cet ultime chapitre. Nous examinerons les processus de concrétisation et d'idéalisation, pour montrer que, loin de retomber dans une vision scientiste des techniques, ils permettent de repenser les liens, toujours féconds, entre la science et la technique. Une fois cette rétrospective effectuée, nous présenterons quelques outils de prospective. Le couplage de ces outils avec les logiques et tendances évolutives exhibées aux chapitres précédents permettra une dernière mise en œuvre de notre méthode, se traduisant par la formulation de scénarios mobilisables par les astronomes utilisateurs et concepteurs de télescopes.

1. Le système industriel à l'ère scientifique de la technique

1.1. Bref historique des rapports entre science et technique

On fait généralement remonter à l'Antiquité la disjonction entre science et technique. Que ce soit par l'opposition entre « *épistémé* contemplative, désintéressée, et *tekné* utilitaire, active⁸¹¹ » ou entre *théoria* et *praxis*, les philosophes grecs ont cherché à penser la distinction entre une activité humaine cherchant à comprendre le monde et une autre cherchant à le transformer. Ces deux activités sont socialement hiérarchisées (l'*épistémé* étant réservée aux hommes libres tandis que la *tekné* est distribuée plus égalitairement au sein de la société), mais elles ne sont généralement pas articulées et donc pas directement subordonnées : science et technique constituent deux modes de relation à la nature indépendants et s'appliquant à des domaines de validité disjoints. Cette disjonction perdure durant le Moyen Âge avec la « la distinction des arts en libéraux et en mécaniques, et la supériorité qu'on accorde aux premiers sur les seconds⁸¹² ». Mais cette supériorité ne se traduit toujours pas par une subordination des arts mécaniques aux arts libéraux, « le progrès des techniques [étant] surtout guidé par les besoins de la pratique, par l'expérience de chaque jour, en un mot par l'empirisme⁸¹³ », plutôt que par les avancées scientifiques. La Renaissance opère une première jonction entre les pratiques scientifiques et le développement des dispositifs techniques⁸¹⁴, notamment avec la promotion de la figure de l'*ingénieur*: « À partir de la Renaissance, et d'une façon de plus en plus nette dans les temps modernes, l'esprit devient l'animateur du progrès technique⁸¹⁵ ». Au début du XVII^e siècle, Galilée n'hésite pas à affirmer :

Nous sommes certain que le Hollandais, premier inventeur du télescope, était un simple lunetier qui, en maniant des verres de plusieurs sortes, se trouva par hasard regarder à travers deux verres à la fois, l'un convexe et l'autre concave [...] mais moi, sur la simple information de l'effet obtenu, je retrouvai la même chose par voie de raisonnement⁸¹⁶.

⁸¹¹ Jean-Pierre Sérís, *op. cit.*, p. 202.

⁸¹² Jean d'Alembert, *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, Paris, Vrin, 2000, p. 104.

⁸¹³ Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 99.

⁸¹⁴ On trouve dans les écrits et travaux des précurseurs Roger Bacon et Robert Grossetête l'affirmation des liens féconds pouvant exister entre le domaine contemplatif et le domaine expérimental.

⁸¹⁵ Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 99.

⁸¹⁶ Galileo Galilei, *L'Essayeur de Galilée (Il Saggiatore)* [1623], trad. Christiane Chauviré, Paris, Les Belles Lettres, 1980, p. 164.

Si cette affirmation de Galilée est à prendre avec précaution, elle traduit néanmoins l'idée que les découvertes techniques peuvent être rationalisées en faisant appel à la réflexion scientifique. Ainsi, à la fin de la Renaissance « prend fin le cloisonnement entre science et technique⁸¹⁷ » ; une première jonction est établie, qui se renforcera aux siècles suivants, tout en se doublant progressivement d'une relation de subordination. En effet, malgré les quelques tentatives de réhabilitation des arts mécaniques⁸¹⁸, le siècle des Lumières et la mathématisation progressive des disciplines scientifiques conduisent à « la convergence de l'esprit scientifique et de l'esprit pratique⁸¹⁹ ». Si jusque-là « la science en est encore à un niveau tel qu'elle ne peut, dans la plupart des cas, être initiatrice du progrès technique⁸²⁰ », la constitution de la science moderne au XVIII^e siècle fait de celle-ci la locomotive du progrès de la pensée, et donc, du progrès des techniques. Ces transformations successives des rapports entre science et technique font-elles partie d'une seule et même évolution ? Ce qui est certain, c'est que, rétrospectivement, « l'instinct pratique du XVII^e siècle préparait le triomphe de cette tendance – qui devait transformer le monde. Cette transformation se réalise sous nos yeux par l'action de la science⁸²¹ ». À compter de la fin du XVIII^e siècle, la mise sous tutelle de la technique par la science est actée. Le siècle de la thermodynamique et du positivisme parachève la conception de la technique en tant que science appliquée :

L'idée que la science précède la technique est une idée qui, en France tout au moins, se forge au XIX^e siècle, à un moment où les « grandes écoles » doivent trouver leur légitimité dans le système de formation académique des ingénieurs. C'est la formation en « sciences dures » qui a permis cette stabilisation, légitimant ainsi un discours plus général sur le primat de la science sur la technique⁸²².

Pourtant, réduire la technique à une science appliquée tend à effacer les spécificités de chacune de ces activités. Il serait plus judicieux de considérer que « la science [est] ce qui permet de connaître le Monde, la technique ce qui [permet] de le “fabriquer”, d'intervenir sur lui⁸²³ ». Alors on pourrait dire, avec Lewis Mumford :

⁸¹⁷ Jean-Pierre Sérès, *op. cit.*, p. 206.

⁸¹⁸ Jean d'Alembert, *op. cit.*, p. 104 : « Cette supériorité [des arts libéraux sur les arts mécaniques] est sans doute injuste à plusieurs égards. »

⁸¹⁹ Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 83.

⁸²⁰ Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques, op. cit.*, p. 666.

⁸²¹ Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 99.

⁸²² Jean-Louis Kerouanton, « Histoire des techniques », *Introduction : qu'est-ce que l'histoire des techniques ? Tentatives de définition*, cours de M2 HST, centre François-Viète, p. 5

[URL : http://foad-mooc.auf.org/IMG/pdf/uec3_histoire_des_techniques_1_intro_jlk.pdf].

⁸²³ *Ibid.*, p. 6.

La technique traduit, dans des formes concrètes, les vérités théoriques, implicites ou formulées, prévisibles ou inattendues, de la science. Science et technique constituent deux mondes indépendants bien qu'étroitement liés et dont les buts sont tantôt convergents, tantôt divergents.

Le primat de la science sur la technique et la réduction de cette dernière à une application est une représentation sociale si bien ancrée dans les esprits qu'elle se décline aujourd'hui en une série de croyances (relativement infondées) qui surdéterminent la formulation de toutes les interrogations sur les relations entre progrès scientifiques et progrès technique : en premier lieu, que toute nouveauté technique découle d'une découverte scientifique ; en second lieu, que « la science apporte l'idée, la méthode, le modèle et la première réalisation⁸²⁴ », autrement dit, qu'il suffit de disposer du savoir pour en déduire le savoir-faire ; en troisième lieu, que le progrès technique est guidé par la science, qui « opère en grand, perfectionne les procédés pratiques⁸²⁵ ». Aujourd'hui, si « l'exploitation technique des forces naturelles ne devient généralement possible que grâce à une connaissance approfondie dans le domaine de l'expérience concernée⁸²⁶ » c'est peut-être parce que la technique a atteint un tel niveau de technicité que la science doit intervenir. Face à ces considérations, il n'est pas inutile de rappeler ce que nous enseigne le recul historique :

Ce que nous appelons la science n'a pas toujours existé, n'existe même que depuis peu. Pas de société d'hommes, en revanche, qui ne repose sur l'exploitation de certaines techniques... Au commencement était la technique sans la science⁸²⁷.

Les exemples de « techniques sans science » abondent au cours de l'histoire des civilisations. José Ortega y Gasset ouvre d'ailleurs sa série de cours sur la technique en affirmant que : « Sans la technique, l'homme n'existerait pas et n'aurait jamais existé »⁸²⁸. Les techniques agricoles et la sélection artificielle des espèces n'ont pas attendu le développement de l'agronomie ou de la biologie génétique pour apparaître ; les constructions ont émergé bien avant la constitution des lois de la mécanique ; et, pour reprendre ce qui nous occupe, les premiers instruments scientifiques sont apparus presque indépendamment des disciplines scientifiques auxquelles ils ont pu se

⁸²⁴ Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 101.

⁸²⁵ *Ibid.*, p. 101.

⁸²⁶ Werner Heisenberg, *op. cit.*, p. 129.

⁸²⁷ Jean-Pierre Sérís, *op. cit.*, p. 217-218.

⁸²⁸ José Ortega y Gasset, *op. cit.*, p. 7.

rattacher par la suite (que l'on se souvienne de la citation de Descartes sur l'apparition de la lunette astronomique, par exemple). Ce n'est que dans un second temps que la rationalité scientifique s'empare des possibilités de développement technique, et « tôt ou tard, la technique tire parti des connaissances scientifiques, se les incorpore⁸²⁹ ».

Même aujourd'hui, « la découverte technique ne se résume pas en un simple développement et une simple mise en application d'une découverte scientifique⁸³⁰ » – mis à part peut-être les objets techniques hautement *scienticisés*, dont le schème technique colle presque parfaitement au principe physique sous-jacent⁸³¹. En fait, « le trait essentiel qui distingue de notre technologie les états antérieurs de la technique⁸³² » est, pour Jean Ladrière, leur « mode d'évolution ». La technique moderne est marquée par un rythme d'évolution bien plus soutenu que par le passé. Cela s'explique par le développement de nouveaux schèmes scientifiques à partir des découvertes accomplies par les chercheurs, ainsi que par l'introduction des méthodes de la recherche scientifique au sein des processus de conception technique. Réciproquement, comme nous l'avons indiqué dès l'introduction, la science moderne s'est développée grâce aux progrès de l'instrumentation phénoménotechnique. Il y a donc une logique de développement circulaire entre les inventions techniques et les découvertes scientifiques, qui tend à devenir le paradigme de l'évolution de la technique dans son ensemble. G. Simondon établit pour cette raison une tripartition entre l'époque artisanale, l'époque industrielle et l'époque scientifique du progrès technique.

En définitive, il ne s'agit pas d'établir une relation d'ordre entre la science et la technique. La technique est un moyen d'action sur le monde, la science en est un des moyens de compréhension. Chacune poursuit sa propre trajectoire, sans forcément que l'une précède ou domine l'autre ; il y a deux évolutions distinctes *en droit* même lorsqu'elles sont enchevêtrées *dans les faits*. Cependant, une fois qu'une science « a fécondé⁸³³ » une discipline technique, il y a accélération du rythme du progrès. En retour, ce « resserrement des liens entre science et technique, aspect essentiel de la technique moderne, transforme les conditions de la découverte scientifique elle-même⁸³⁴ ». Au lieu d'une subordination, il y a une solidarité entre les progrès scientifiques et techniques. Si l'empirisme

⁸²⁹ *Ibid.*, p. 233.

⁸³⁰ Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 56.

⁸³¹ A nos yeux, c'est le cas du laser, au sujet duquel Pierre Aigrain a pu dire : « Nous avons l'habitude d'avoir un problème et de chercher une solution ; là, nous avons une solution et nous cherchons un problème. » Thomas Guy, Vincent Bontems et Vincent Minier, « Quel laser pour Mars ? », *Nacelles*, 2019. [Annexe B.3.]

⁸³² Jean-Pierre Sérís, *op. cit.*, p. 222.

⁸³³ On trouve l'expression aussi bien sous la plume de P. Ducassé que de G. Simondon ou de J.-P. Sérís.

⁸³⁴ Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 63.

initial qui prévaut dans tout domaine technique se voit supplanté par une rationalisation supérieure, il est tout aussi vrai que l'identification de la science à une activité contemplative cède devant une conception constructive de la science, où l'on ne comprend que ce que l'on sait (re)produire. « Technology is not the servant of science⁸³⁵ » : au contraire, « la Science est devenue moyen de la Technique ». Ce célèbre retournement opéré par Jacques Ellul permet de prendre le contre-pied de l'idée commune de la technique comme science appliquée. Envisagé initialement dans une perspective relativement critique, cet aphorisme illustre notre propos si on l'envisage comme la manifestation de l'impact du progrès scientifique sur le progrès technique. En retour, « par la concrétisation technique, l'objet, primitivement artificiel, devient de plus en plus semblable à l'objet naturel⁸³⁶ » ; progrès technique et progrès scientifique sont donc deux vecteurs colinéaires du progrès des objets techniques.

1.2. La concrétisation phénoménoteknique

Le terme imprécis⁸³⁷ de « technoscience » est souvent utilisé pour désigner la convergence entre la technique et la science. Ce mot-valise est porteur d'une confusion entre leurs domaines de validité et d'application respectifs. Comme nous le rappelle la mise en garde de B. Stiegler en exergue de ce chapitre, il est fondamental de pouvoir penser ces deux phases de la culture indépendamment. Il y a en effet « une singularité de la logique de l'invention scientifique⁸³⁸ », tout comme il y a une singularité des inventions techniques, artistiques, spirituelles, etc. C'est précisément la singularité de l'invention technique que la mécanologie peut aider à penser, sans la ramener ni la réduire à l'activité scientifique :

Simondon évite trois écueils classiques de la philosophie sur ce sujet : affirmer que la science et la technique sont des univers entièrement séparés et aux relations difficiles, conflictuelles, antagonistes ; affirmer que la technique n'est qu'une « application » de la science ; affirmer que la science et la technique sont complètement assimilables (ainsi que le mouvement moderne et actuel de *scientifisation* de la technique et *technologisation* de la science peut conduire à le penser, par exemple sous l'idée de « techno-science »)⁸³⁹.

⁸³⁵ George Basalla, *op. cit.*, p. 27.

⁸³⁶ Gilbert Simondon, MEOT, p. 57.

⁸³⁷ Voir « Note critique sur le mot “technoscience” », *Zilsel* [URL : <https://zilsel.hypotheses.org/1938>].

⁸³⁸ Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 56.

⁸³⁹ Jean-Yves Château, art. cit., p. 24.

Le fait est que « [l'objet technique] n'est pas application (déductive) de la science puisque la science véritable (expérimentale et inductive) peut et doit s'appliquer à lui comme à toute autre réalité naturelle⁸⁴⁰ ». La possibilité de porter un regard scientifique sur l'objet technique et de l'étudier pour lui-même va dans le sens d'une irréductibilité de la technique à l'application d'une science. Mais si le terme de « technoscience » est porteur d'ambigüités, force est de constater que l'on assiste à une convergence de la science et de la technique au sein de la phénoménotechnique. Convergence mais non assimilation. Pour G. Altshuller comme pour G. Simondon, le progrès technique passe par « la résolution des contradictions internes de tout objet technique, dans l'adaptation la plus poussée à sa fonction principale⁸⁴¹ ». L'objet technique idéal de la TRIZ, le RFI, objet théorique totalement concret, s'apparente en définitive au principe d'Y. Deforge. Sous l'action de la concrétisation et de l'idéalisation, l'identification toujours plus fine du schème technique aux phénomènes physiques qui constituent le principe de l'opération qu'il réalise conduit à une certaine *convergence phénoménotechnique*.

La recherche scientifique s'apparente de plus en plus à une technique de production des phénomènes. Ce que le thème de la « technoscience » désigne imparfaitement, c'est que cette intrication de la science et de la technique tend à devenir le régime dominant, y compris au-delà des limites du champ scientifique, mais, le plus souvent, en relation avec lui. L'économiste Jean-Louis Maunoury signale ainsi qu'« au-delà d'un niveau de progrès obtenu sur un mode technique, on assiste à l'apparition d'un type de recherche beaucoup plus scientifique⁸⁴² ». Le processus de concrétisation, vu comme la recherche des synergies internes, implique dans tous les domaines une volonté d'organiser le plan de l'objet et ses évolutions. Cette pensée planificatrice et organisante n'est, à nos yeux, rien d'autre que l'intention technique de J.-L. Maunoury, qui « ne peut atteindre sa perfection dans la construction de l'objet que si elle s'identifie à la connaissance scientifique universelle⁸⁴³ ». Ou dit autrement : « la concrétisation peut s'amorcer lorsque les intentions techniques sont compatibles avec les connaissances scientifiques disponibles à un moment donné pour une finalité donnée⁸⁴⁴ ».

L'intervention de la science au sein des processus de conception technique découle du haut degré de concrétude des objets techniques modernes. Pour autant, le progrès technique n'est pas

⁸⁴⁰ *Ibid.*, p. 25.

⁸⁴¹ Smail Aït-el-Hadj, *op. cit.*, p. 109.

⁸⁴² Jean-Louis Maunoury, *op. cit.*, p. 55.

⁸⁴³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 42.

⁸⁴⁴ Philippe Durance, *art. cit.*, p. 305.

entièrement dicté par la science ; en effet « même si les sciences n’avançaient pas pendant un certain temps, le progrès de l’objet technique vers sa spécificité pourrait continuer à s’accomplir⁸⁴⁵ ». Il demeure une autonomie relative du progrès technique vis-à-vis du progrès scientifique. De même, il existe une rationalité d’ordre technique, qui ne se réduit pas à la rationalité scientifique, que ce soit par ses concepts ou par ses méthodes. Mais, tôt ou tard, la concrétisation de l’objet technique nécessite de recourir à la science, en particulier quand la lignée atteint un seuil de saturation tel qu’il faut l’application d’un nouveau principe physique pour progresser dans la réalisation du schème technique pur. De sorte qu’il est pertinent de distinguer entre des progrès purement techniques et des progrès que nous proposons d’appeler « technologiques », dans la mesure où ils sont seulement permis par l’avancée des disciplines scientifiques.

Y. Deforge considère que certains principes à l’origine de lignées sont « plus faciles » à mettre en œuvre que d’autres. J.-L. Maunoury parle quant à lui d’une « tendance générale à un approfondissement théorique presque constant des principes scientifiques qui fondent les lignées existantes⁸⁴⁶ ». Cette idée d’une hiérarchisation des principes physiques, et donc des essences techniques, est cohérente avec notre analyse du processus d’idéation et est due « au rétrécissement de l’intervalle qui sépare les sciences des techniques⁸⁴⁷ ». Il s’agit d’un rétrécissement, mais jamais d’une suppression : « l’objet technique n’est jamais complètement connu⁸⁴⁸ », et il n’est « jamais complètement concret⁸⁴⁹ ». L’intention technique n’est jamais parfaitement réalisée ; il existe systématiquement un écart entre l’opération physique réalisée par l’objet technique et le résultat idéal.

La distribution ultime des fonctions aux structures et le calcul exact des structures ne pourraient se faire que si la connaissance scientifique de tous les phénomènes susceptibles d’exister dans l’objet technique était complètement acquise ; comme ce n’est pas le cas, il subsiste une certaine différence entre le schème technique de l’objet et le tableau scientifique des phénomènes dont il est le siège⁸⁵⁰.

De notre connaissance imparfaite des processus naturels d’une part, et, d’autre part, de la difficulté, si ce n’est l’impossibilité, de les implémenter sans introduire d’imperfections, résultent

⁸⁴⁵ *Ibid.*, p. 33.

⁸⁴⁶ Jean-Louis Maunoury, *op. cit.*, p. 54.

⁸⁴⁷ Gilbert Simondon, MEOT, p. 43.

⁸⁴⁸ *Ibid.*, p. 43.

⁸⁴⁹ *Ibid.*, p. 43.

⁸⁵⁰ *Ibid.*, p. 43.

les aberrations dont nous avons parlé au chapitre précédent. Loin d'être source de découragement, ce constat est précisément ce qui autorise l'espérance en un progrès *infini* des objets techniques. Tout comme la marge d'indétermination de l'objet technique est une condition d'ouverture et de potentialité, la marge d'aberration est ce qui fonde le progrès en suggérant sans cesse la conception de nouveaux plans d'organisation et le recours à de nouveaux schèmes techniques.

1.3. Les trois stades de la technique

Si la révolution instrumentale du XVII^e siècle a opéré une première jonction entre science et technique, devenue une relation de domination au XVIII^e siècle avec la constitution et l'essor de la science moderne, la révolution industrielle du XIX^e siècle a fait basculer le domaine technique dans une nouvelle dimension proprement technologique. Tandis que, pour certains, cette affirmation est discutable – A. Leroi-Gourhan considère par exemple qu'il « n'y pas de coupure⁸⁵¹ » entre la technique pré-industrielle et la technique moderne –, pour d'autres en revanche, cette évolution était nécessaire : « Par elle-même d'ailleurs, la structure de la science moderne devait conduire à l'alliance finale des laboratoires et de l'usine⁸⁵² ». Sans entrer dans le débat entre *continuistes* et *discontinuistes*, notamment vis-à-vis de la notion hautement discutée de « révolution industrielle », on peut raisonnablement considérer que l'entrée dans l'ère industrielle s'est accompagnée de nouveaux moyens de production, associés à de nouvelles méthodes de gestion et d'organisation, mais aussi de nouveaux modes d'appréhension des objets techniques, aussi bien par les concepteurs que par le reste de la société :

The situation is different in modern societies, where we find the second approach to the design process – a *self-conscious* one in which the novice is presented with a great deal of theoretical knowledge, surrounded by very complex artifacts⁸⁵³.

Une plus grande complexité, une importance accrue des concepts théoriques sous-tendant l'objet technique et une approche rationalisée de la conception sont les trois points que G. Basalla distingue pour caractériser la technique moderne. En retour, la technique acquiert un nouveau statut au sein de la culture et son universalité dépasse l'échelle de sa culture d'origine :

⁸⁵¹ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 1 : *L'Homme et la Matière*, *op. cit.*, p. 316.

⁸⁵² Pierre Ducassé, *op. cit.*, p. 101.

⁸⁵³ George Basalla, *op. cit.*, p. 108. C'est l'auteur qui souligne

La *standardisation* possible traduit le processus de concrétisation du sous-ensemble technique. Or, d'un seul coup, le sous-ensemble concrétisé dépasse dans son pouvoir d'adaptation et de circulation la portée de l'objet d'usage : il entre dans des voies de distribution et d'échange qui couvrent la terre entière, il alimente des réseaux à la dimension du monde, et il peut participer à la construction par assemblage ou à la réparation de plusieurs types d'objets d'usage⁸⁵⁴.

B. Stiegler reprend le terme de « tendance » pour qualifier ce processus, ajoutant que « cette tendance à la standardisation, à la production de types de plus en plus intégrés, rend possible l'industrialisation, *et non l'inverse*⁸⁵⁵ ». Motivée aussi bien par des considérations techniques que par des logiques économiques, la standardisation est une tendance très générale de la technique, que l'on retrouve bien avant le stade industriel. Au sein de l'histoire des télescopes, elle accompagne les logiques de segmentation et de virtualisation : les miroirs segmentés, par exemple, présentent l'avantage de posséder des segments identiques, que l'on peut produire en série.

L'universalisation de la technique a précisément été rendue possible par la prise en compte des processus physiques sous-jacents et par le « changement d'échelle » opéré par l'industrialisation. Dans son cours de 1971⁸⁵⁶, Simondon indique que cette universalisation s'est opérée en trois étapes. Au schéma comtien théologique - métaphysique - positif, G. Simondon préfère les trois étapes qu'E. Renan proposait pour l'évolution de la science :

La connaissance humaine s'appliquant à un objet complexe se compose de trois actes :

- 1^o vue générale et confuse du tout ;
- 2^o vue distincte et analytique des parties ;
- 3^o recombinaison synthétique du tout avec la connaissance que l'on a des parties⁸⁵⁷.

Au fond, cette grande loi n'est pas seulement la loi de l'intelligence humaine. Évolution d'un germe primitif et syncrétique par l'analyse de ses membres, et nouvelle unité résultant de cette analyse, telle est la loi de tout ce qui vit⁸⁵⁸.

⁸⁵⁴ Gilbert Simondon, *Sur la technique*, *op. cit.*, p. 236. C'est l'auteur qui souligne.

⁸⁵⁵ Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 99.

⁸⁵⁶ Gilbert Simondon, « L'invention dans les techniques » [1971], dans *L'invention dans les techniques. Cours et conférences*, *op. cit.*, p. 227-272. Sauf mention contraire, les citations qui suivent en sont tirées.

⁸⁵⁷ Ernest Renan, *L'avenir de la science. Pensées de 1848*, Paris, Calmann-Lévy, 1890, p. 303.

⁸⁵⁸ *Ibid.*, p. 312.

G. Simondon ne cite pas explicitement E. Renan, mais son analyse des stades de l'invention technique s'en rapproche énormément – ce qui n'est pas surprenant, l'objet technique, ou la machine, étant justement un « objet complexe » susceptible d'être soumis à la « connaissance humaine ». G. Simondon distingue ainsi trois stades des techniques, caractérisés par des qualificatifs portant sur les types d'invention associés :

1. La phase syncrétique, marquée par les premières inventions « pré-scientifiques » ou « pré-industrielles » (stade artisanal) ;
2. La phase analytique, dont les inventions « industrielles » sont « faites ou complétées avec le secours des sciences » (stade industriel) ;
3. La phase synthétique, qui intervient après le déploiement des sciences, et dont les inventions « post-industrielles » sont « de type scientifique » (stade scientifique, ou technologique).

Le phasage qu'établit G. Simondon entre les phases *artisanale*, *industrielle* et *scientifique* recoupe la distinction, reprise à J. Lafitte, entre les machines passives, actives et informationnelles. Le passage entre chacune de ces phases se double d'un changement d'échelle : la standardisation accompagne le processus de transition dans la mesure où le développement des éléments et des ensembles techniques producteurs conditionne la production en série caractéristique de la révolution industrielle. La miniaturisation, qui passe par l'intervention technique sur la structure même des matériaux, et le développement des réseaux semblent pareillement soutenir le passage à une production technologique où la qualité de l'information l'emporte sur la quantité de matière ou d'énergie.

Au cours de la phase syncrétique initiale, l'objet technique est réalisé sans réflexion préalable sur les interactions entre les différentes sous-parties qui le constituent. Ce stade est marqué par le « primat de l'adaptation », à la chose ou à l'opérateur, et le critère pertinent à considérer est la stabilité du dispositif. Au stade industriel, la phase analytique procède par réflexion sur les rôles respectifs des sous-systèmes ; l'accent est mis sur l'auto-corrélation et le critère retenu concerne le « rendement des transformations de l'énergie ». Enfin, au cours de la phase synthétique s'actualise le processus de concrétisation : l'invention de type scientifique permet l'intégration des synergies internes ; l'objet nouvellement conçu est caractérisé par « l'équilibre métastable » de son fonctionnement et la valeur décisive a trait à la « fidélité du transfert d'information⁸⁵⁹ ».

⁸⁵⁹ Au passage, notons que Simondon parle d'un « sens général de l'évolution des techniques » (p. 271), qui n'est pas sans rappeler « l'ordre de la série mécanologique » de Jacques Lafitte. Le fait est qu'entre MEOT et le

Les trois stades, ou phases, concernent l'évolution générale des machines. Mais il nous semble possible d'appliquer cette grille d'analyse à des lignées techniques particulières. Dans le cas des télescopes réfracteurs par exemple, la phase syncrétique correspond aux premières lunettes anachromatiques, au sein desquelles l'absence de réflexion sur le dispositif global entraîne des aberrations chromatiques importantes. Ensuite, au cours de la phase analytique, la conceptualisation mathématique de l'objet technique commence, et afin de gérer les aberrations chromatiques se développent les réfracteurs à longue et très longue focale. Enfin, la phase synthétique permet d'intégrer les propriétés des différents sous-systèmes pour les faire fonctionner de concert et éliminer les aberrations, en développant le doublet achromatique.

1.4. Recherches technologiques fondamentales et appliquées

L'industrialisation des techniques s'accompagnait déjà d'une certaine tendance à la *scientifisation*. La convergence technologique des sciences et des techniques a accentué cette tendance au point de faire émerger des recherches technologiques qui transcendent les oppositions traditionnelles entre recherche fondamentale et recherche appliquée. Si la phénoménotechnique en est un bon exemple, il existe bien d'autres domaines où cette évolution se fait sentir. Venkatesh Narayanamurti et Toluwalogo Odumosu soulignent que les évolutions récentes des conditions institutionnelles de la recherche ont visé à décroquer la recherche fondamentale de la recherche appliquée⁸⁶⁰, ajoutant, à propos de cette distinction :

Une telle classification élude la complexité et la nature multiple des recherches que nous venons de décrire [recherches fondamentale et appliquée]. Pire, cela renforcerait les préjugés de beaucoup à l'égard de ce qu'on désigne de nos jours comme recherche appliquée⁸⁶¹.

Plutôt qu'à l'effacement « technoscientifique » des frontières entre technique et science, on assiste à la convergence technologique où la recherche technique se scientifie. La scientification s'opère au sein du système industriel, notamment à travers le développement des départements de R&D, comme dans le champ scientifique, avec les recherches sur les lignées

cours de 1971, Simondon a pris connaissance des travaux de Lafitte et les a intégrés à sa propre réflexion, reprenant la tripartition et l'enchaînement des caractères passifs, actifs puis informationnels.

⁸⁶⁰ Venkatesh Narayanamurti et Toluwalogo Odumosu, *Cycles of Invention and Discovery. Rethinking the Endless Frontier*, Cambridge, Harvard University Press, 2016, p. 149.

⁸⁶¹ *Ibid.*, p. 55-56. Nous traduisons.

phénoménotechniques. Popularisée à partir des années 1960, l'expression même de « recherche et développement » indique la solidarité croissance des recherches *appliquées* et *fondamentales*. Comme le souligne J.-L. Maunoury :

Il n'est pas certain que la substitution d'un genre de recherche à un autre corresponde, au moins initialement, à une intensification des efforts consentis. Ce n'est que plus tard, lorsque l'intervention scientifique se heurtera elle-même aux limites des principes dont elle avait permis d'étendre les possibilités, qu'on pourra assister à un accroissement forcé des dépenses de recherche⁸⁶².

Les techniques se développent « sous la double poussée de besoins toujours croissants et de possibilités toujours en progrès⁸⁶³ ». Si l'on reprend le vocabulaire de J.-L. Maunoury, le progrès des lignées techniques modifie soit directement « l'horizon de faisabilité » en enrichissant les lignées déjà existantes ou en en créant de nouvelles, soit indirectement « l'horizon de créativité » dans la mesure où l'obsolescence technique et les modifications de l'horizon de faisabilité incitent à la production de nouvelles intentions techniques. Il est ainsi possible de croiser les vues de G. Simondon concernant les causes extrinsèques et intrinsèques du progrès technique avec les considérations de J.-L. Maunoury sur la rectitude et l'épanouissement des lignées techniques. Les causes intrinsèques du développement des techniques sont nourries par les découvertes scientifiques qui en retour imposent certaines « limites des principe ». De même, les causes extrinsèques, souvent ramenées à des considérations d'ordre économique, peuvent être motrices (passant par un « accroissement forcé des dépenses de recherche ») comme bloquantes. Certains, à l'instar de Daniel Reed, considèrent en effet que « we'll run out of money before we'll run out of physics⁸⁶⁴ », suggérant par là que les potentialités offertes par la nature seront toujours supérieures aux possibilités atteignables par l'industrie, qui se doit de fonctionner sous contrainte de rentabilité.

La convergence de la science et des techniques, au sein du système industriel, passe par le rapprochement des politiques de recherche aboutissant à une R&D dont le rôle est précisément de trouver un équilibre entre les potentialités scientifiques « fondamentales », les possibilités offertes par le système technique et les contraintes économiques de ce dernier. En définitive, il s'agit de lutter contre la saturation des lignées techniques et l'épuisement des potentialités principielles, car comme le remarquait Gordon E. Moore : « No exponential is forever: but "forever" can be

⁸⁶² Jean-Louis Maunoury, *op. cit.*, p. 55.

⁸⁶³ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, *op. cit.*, p. 113.

⁸⁶⁴ Michael Mitchell Waldrop, « More than Moore », *Nature*, vol. 530, 11 février 2016, p. 147.

delayed⁸⁶⁵ ! ». À plusieurs reprises nous avons employé l'expression « système industriel » ; par là, nous entendons le sous-ensemble productif du système technique de B. Gille, que l'historien François Caron définit comme « l'interdépendance étroite qui relie entre elles les différentes composantes de la technologie à un moment donné de l'histoire⁸⁶⁶ ». L'analyse des évolutions du système industriel permet de repérer les structures, mais aussi les limites, qui stimulent et contraignent l'invention :

Ce qui donne la possibilité de l'invention, c'est la dynamique du système, et c'est là l'essentiel du concept de système technique : le choix des possibles en quoi consiste l'invention s'effectue dans tel espace et en tel temps selon le jeu des contraintes, à son tour soumis aux contraintes externes⁸⁶⁷.

Le système technique, tout comme le système industriel, peut se voir comme la matrice au sein de laquelle émerge l'invention. Encore une fois, il ne s'agit pas de nier le libre arbitre des agents humains mais de concevoir un espace objectif permettant de rationaliser les techniques à travers un double jeu de possibilités et de contraintes. Celles-ci sont de trois ordres : « l'invention voit le jour, déterminée par le progrès scientifique, par les progrès parallèles de toutes les techniques, par les nécessités économiques⁸⁶⁸ ». C'est en cela que l'analyse du système industriel est intéressante, car il combine avancées scientifiques, potentialités techniques et contraintes économiques – soit les trois dimensions d'analyse préconisées par Lucien Febvre.

François Russo estimait que « dès qu'un phénomène est mis en évidence, expliqué, maîtrisé, il tend comme spontanément à devenir moyen du plus grand nombre possible de techniques soit scientifiques, soit utilitaires⁸⁶⁹ ». Plutôt que de « spontanéité », il vaudrait mieux parler de « disponibilité » d'un tel développement dans la mesure où seule la formation d'une intention technique en permet l'actualisation. En effet, l'évolution des techniques, contrairement à l'évolution biologique, découle d'une intentionnalité. Il y a un gradient socioculturel qui oriente l'évolution et, s'il peut évoluer, le maintien de sa polarité sur de longues périodes amène une cumulativité entraînant un réel progrès, qui se manifeste notamment par la concrétisation. Il est préjudiciable à l'analyse d'ignorer les ressources et les contraintes proprement techniques qui

⁸⁶⁵ Gordon E. Moore, « No Exponential Is Forever: But "Forever" Can Be Delayed! », *IEEE International Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers*, 2003.

⁸⁶⁶ François Caron, *Les Deux Révolutions industrielles du XX^e siècle*, Paris, Albin Michel, 1997, p. 17.

⁸⁶⁷ Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 58.

⁸⁶⁸ Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques, op. cit.*, p. 48.

⁸⁶⁹ François Russo, « Le système des sciences et sa structure », *Revue des questions scientifiques*, 1961, p. 249.

s'exercent sur l'évolution technique, mais il l'est tout autant d'identifier cette dernière à une évolution naturelle et spontanée. Joel Mokyr souligne en ce sens que le progrès des techniques et l'évolution des espèces se distinguent notamment selon trois directions⁸⁷⁰ :

- Les objets peuvent transmettre aux générations suivantes leurs caractères.
- Les mutations peuvent être dues au hasard mais leur conservation suppose une volonté, si bien que l'évolution est orientée.
- L'hybridation est exceptionnelle chez les vivants alors qu'elle est la règle pour les objets techniques.

Ainsi, le progrès des techniques s'apparente au « résultat du couplage entre la réalisation des intentions techniques, avec la dépendance de chemin des lignées qui en résulte, et des effets du filtre culturel : de nombreuses voies sont abandonnées au cours d'une sélection *artificielle*⁸⁷¹ », et cette sélection artificielle s'opère principalement au sein du système industriel. Transmission, mutation et hybridation sont, à nos yeux, les trois modalités de déploiement de la transduction dans le domaine de la conception technique. Simondon constatait déjà que « l'activité intellectuelle qui semble le plus largement impliquée dans l'invention est le *transfert*⁸⁷² ». Mais c'est « quand la science intervient de façon décisive, que l'invention se réalise en général sur le mode soit de la synthèse, soit de l'interaction et de la transduction⁸⁷³ » : le rapprochement technologique de la science et des techniques au sein du système industriel en a fait le principal stock de potentialités évolutives pour les objets techniques.

2. La naturalisation des artefacts

2.1. L'objet technique comme médiation

La figure bergsonienne⁸⁷⁴ de l'*Homo faber* – « l'homme engagé dans la production matérielle, l'homme utilisateur d'outils en général⁸⁷⁵ » – a largement dominé la réflexion philosophique sur les techniques. Sans entrer dans une controverse qui dépasse le cadre de cette thèse, nous avons suivi

⁸⁷⁰ Joel Mokyr, *The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress*, Oxford, Oxford University Press, 1990.

⁸⁷¹ Vincent Bontems, *La Recherche au nom de l'innovation*, *op. cit.*, p. 104.

⁸⁷² Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, *op. cit.*, p. 323.

⁸⁷³ Jean-Yves Château, « L'invention dans les techniques selon Gilbert Simondon », dans Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, *op. cit.*, p. 49.

⁸⁷⁴ Henri Bergson, *L'Évolution créatrice* [1907], Paris, Presses universitaires de France, 2007.

⁸⁷⁵ Jean-Pierre Sérès, *op. cit.*, p. 103.

G. Simondon en conférant à l'objet technique une large autonomie de fonctionnement, qui invalide sa réduction au rang d'outil. L'objet technique, en particulier l'instrument phénoménotechnique, assume un rôle de médiateur entre l'Homme et le Monde. Cette médiation peut s'effectuer dans les deux sens, permettant de s'affranchir de la distinction entre outil et instrument. « La machine est alors véhicule d'action et d'information, dans une relation à trois termes : homme, machine, monde, la machine étant entre l'homme et le monde⁸⁷⁶ ». Cette définition est en accord avec la centralité du concept d'opération dans l'appréhension des schèmes. Selon la définition courante, en tant qu'instrument d'observation, un télescope n'agit pas sur le monde, se contentant de prélever de l'information. Mais la caractérisation du télescope comme dispositif focalisateur de lumière met en évidence l'originalité de son fonctionnement à travers la réalisation de différentes opérations (réfraction, réflexion, interférométrie...). Les objets techniques, comme, d'une manière générale, la technique, sont des moyens d'action sur le monde, une médiation active entre l'homme et la nature. Le système technique réalise, à plus grande échelle, cette médiation :

C'est parce qu'il n'y a pas de technique isolée qu'il y a toujours milieu technique et système technique, qu'il y a en fait une organisation au sens biologique du terme, que le monde de la technique possède son poids et sa logique ; qu'il y a une dynamique propre à l'ensemble des artefacts techniques au point que ceux-ci ont institué un monde médiateur entre désirs et gestes humains d'une part, réalité physique d'autre part⁸⁷⁷.

Pour reprendre l'expression de G. Simondon, une machine est de l'intelligence et du geste humain fixés et cristallisés en structures qui fonctionnent. L'efficacité de ce fonctionnement dépend de processus physiques. L'inscription de ces processus dans la matérialité implique un écart entre le schème technique et le principe de fonctionnement, c'est-à-dire des aberrations. C'est l'objectif du progrès des techniques que de diminuer ces aberrations, et « ce progrès s'effectue avec le soutien de la science. Il passe souvent par l'invention d'un *tertium quid*, d'une tierce réalité, qui améliore le rendement au cours des transformations entre deux termes⁸⁷⁸ ». Comme B. Gille, A. Leroi-Gourhan et bien d'autres ont noté que des choix s'imposent, et que ces choix « sont peu nombreux⁸⁷⁹ » : « Le nombre des combinaisons utilisables n'est pas infini, dans la mesure où, prenant appui sur des structures existantes, il doit suivre des voies quasi obligatoires⁸⁸⁰. » En effet,

⁸⁷⁶ Gilbert Simondon, MEOT, p. 98.

⁸⁷⁷ Franck Tinland, « La technique comme médiation et comme système », art. cit., p. 107-108.

⁸⁷⁸ Xavier Guchet, *op. cit.*, p. 148.

⁸⁷⁹ Bertrand Gille (dir.), *Histoire des techniques*, *op. cit.*, p. 48.

⁸⁸⁰ Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 58, citant Bertrand Gille.

« de par sa constitution interne, un artefact respecte les lois naturelles⁸⁸¹ » : la nature prime la volonté de l'*Homo faber*.

Ainsi, comme le résume Lewis Mumford, « le progrès mécanique est limité par la nature du monde physique⁸⁸² ». Ces limitations concernent différents aspects du schème technique. Dans le cas du télescope, elles proviennent aussi bien de caractéristiques mécaniques (*sagging*) qu'opératoires (aberrations chromatiques dans le cas des réfracteurs), et même de la nature du milieu associée (*seeing* atmosphérique) et de la lumière (limite de diffraction). Nul fatalisme cependant : ces aberrations sont vouées à diminuer sous l'effet conjugué des progrès scientifiques et des techniques, c'est-à-dire en fonction de la convergence technologique. Nul déterminisme non plus : si « les espèces techniques, d'ailleurs en nombre fini, tendent vers un état qui ferait de l'être technique un système entièrement cohérent avec lui-même, entièrement unifié⁸⁸³ », c'est en fonction d'une dialectique entre la valorisation socioculturelle de certaines intentions techniques et des surdéterminations par les potentialités naturelles. Celles-ci ne deviennent des ressources ou des contraintes qu'en fonction de l'évolution de nos connaissances, d'où la nature technologique du progrès, et la causalité circulaire des théories scientifiques et des dispositifs techniques.

2.2. La nature comme stock de potentialités d'évolution

« Le monde, la circonstance, se présente comme le premier matériau et comme machine potentielle »⁸⁸⁴ ; ainsi la nature ne se limite pas à un rôle contraignant. Au contraire, elle constitue un horizon de *potentialités* qui va au-delà de l'horizon *effectif* constitué par le système industriel. Dès lors, l'apparition d'un objet technique original constitue-t-elle une *invention*, introduisant un nouvel artefact dans le monde et « réussissant à y placer ce qui en était absent⁸⁸⁵ » ? Ou bien faut-il considérer que « l'histoire de la pensée humaine se réduit à la série d'observations faites par l'homme pour mettre au jour, *découvrir*, cette possibilité de machine que le monde, en sa matière, porte de manière latente⁸⁸⁶ », et par conséquent ne parler que de « découvertes » ? Beaucoup de schèmes techniques semblent préexister dans la nature, et pas uniquement sous la forme de potentialités. Même des objets hautement technicisés comme le laser et le maser se trouvent dans

⁸⁸¹ Herbert Simon, *op. cit.*, p. 6.

⁸⁸² Lewis Mumford, *Technique et civilisation, op. cit.*

⁸⁸³ Gilbert Simondon, MEOT, p. 20.

⁸⁸⁴ José Ortega y Gasset, *op. cit.*, p. 62.

⁸⁸⁵ *Ibid.*, p. 30.

⁸⁸⁶ *Ibid.*, p. 63. C'est nous qui soulignons.

l'Univers⁸⁸⁷. La différence entre invention et découverte dépend essentiellement du fait que l'on rapporte le schème à l'un ou l'autre horizon de l'évolution technologique.

En ce qui concerne notre objet d'étude, Fred Watson n'hésite pas à affirmer : « The telescope, far from being a product of human ingenuity, is an invention of nature itself⁸⁸⁸. » Si l'expression « invention de la nature » peut avoir un caractère polémique, de par l'anthropomorphisation de la nature qu'elle suggère, elle permet néanmoins de souligner l'idée que les réalisations humaines, techniques, existent comme potentialités dans le monde. Afin d'explicitier son affirmation, F. Watson commence par rappeler que le télescope et l'œil partagent un certain nombre de points communs. Nous ne reviendrons pas sur les enjeux de l'analogie biologique (voir chapitre 7), ni sur l'approximation que fait F. Watson entre l'œil et le cristallin (voir chapitre 4). En revanche, la suite de l'argumentation est tout à fait intéressante, et originale, puisque l'astronome australien mobilise une analogie physique afin d'appuyer son propos. Observé pour la première fois en 1979, le phénomène de *lentille gravitationnelle* s'explique, dans la théorie de la relativité générale, par l'effet qu'un objet massif (une galaxie ou un amas de galaxies) peut avoir sur le trajet des rayons lumineux issus d'un autre objet situé à l'arrière-plan⁸⁸⁹. Cet effet est double et impacte d'une part le point de focalisation (déviation des rayons lumineux) et d'autre part l'image en elle-même (modification de la forme et de l'intensité). C'est pourquoi F. Watson considère que « the gravitational lens is behaving exactly like a telescope⁸⁹⁰ ». Cette affirmation est à nuancer dans la mesure où une lentille gravitationnelle ne possède pas de point focal image (mais plutôt une ligne focale) et où, contrairement aux lentilles optiques, la déflexion des rayons lumineux est maximale au centre et minimale à la périphérie. Il n'en demeure pas moins que les lentilles gravitationnelles sont à l'heure actuelle une des meilleures sondes pour étudier la distribution de matière noire dans l'Univers.

Si nous avons choisi de développer cet exemple, c'est parce qu'il est selon nous paradigmatique du fait que la nature constitue un stock potentiel de schèmes exploitables et susceptibles de s'incarner en structures aussi bien biologiques que techniques. Cela ne supprime pas la valeur de l'activité inventive humaine, qui consiste précisément – du moins en partie – à se réappropriier les schèmes physiques et à les incorporer dans des structures stables et fonctionnelles :

⁸⁸⁷ Vladimir Strel'nitski, « Masers, lasers and the interstellar medium », *Astrophysics and space science*, vol. 252, n° 1-2, mars 1997, p. 279-287.

⁸⁸⁸ Fred Watson, *op. cit.*, p. 279.

⁸⁸⁹ Pour plus de détails, nous renvoyons à Peter Schneider, Jürgen Ehlers et Emilio E. Falco, *Gravitational Lenses*, New York, Springer, 1992.

⁸⁹⁰ Fred Watson, *op. cit.*, p. 281.

Les objets qui fonctionnent *accomplissent* des fonctions en les *synthétisant* – au double sens de les *intégrer*, ce qui est le processus de concrétisation par surdétermination fonctionnelle, et de les *reproduire* pour les réaliser à la place de [...] ⁸⁹¹

2.3. La naturalisation technologique

Le système industriel et le monde naturel apparaissent chacun à la fois comme un réservoir dans lequel puisent les inventeurs et comme un ensemble de contraintes venant limiter les possibilités d'évolution des lignées techniques. Dans l'ère post-industrielle, leur convergence s'établit à travers l'omniprésence du « système technicien », pour reprendre l'expression de Jacques Ellul. Certains pensent alors que « l'homme se trouve seul avec lui-même ⁸⁹² » : les objets techniques, issus de la main de l'homme, sont partout et la technique est désormais « un événement biologique à grande échelle ⁸⁹³ ». De la même façon qu'en mécanique quantique la méthode d'observation et le phénomène deviennent inséparables (raison pour laquelle G. Bachelard forgea le néologisme « phénoménotechnique »), la réticulation de la technique à l'échelle du monde en tant que médiation avec la nature a tendance à occulter la réalité de cette médiation et à laisser l'humanité avec le sentiment d'avoir affaire à un monde entièrement artificiel. En réalité, l'artificialisation des relations à la nature a pour condition la naturalisation de la médiation technique qui rend possible ces relations.

Dans le cas des instruments phénoménotechniques, cela se traduit par une prise en compte des phénomènes étudiés dans la conception de l'instrument et par l'identification plus importante de celui-ci au principe physique sur lequel il repose. S'ensuit un processus de naturalisation de l'objet technique : « Les objets techniques tendent vers la concrétisation, tandis que les objets naturels tels que les êtres vivants sont concrets dès le début ⁸⁹⁴ ». Si l'apparition d'une essence technique, basée sur un principe physico-chimique, constitue l'origine d'une lignée technique, l'objet naturel, qu'il s'agisse d'un être vivant ou d'un objet naturel, est l'asymptote de la lignée technique. Ce constat n'implique aucune réduction d'un type d'évolution à l'autre, car comme le soulignait A. Leroi-Gourhan, « à côté de la convergence biologique, il existe une convergence technique ⁸⁹⁵ ». Le fait

⁸⁹¹ Bernard Stiegler, *op. cit.*, p. 96. C'est l'auteur qui souligne.

⁸⁹² Werner Heisenberg, *op. cit.*, p. 136.

⁸⁹³ *Ibid.*, p. 132.

⁸⁹⁴ Gilbert Simondon, MEOT, p. 57.

⁸⁹⁵ André Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques*, vol. 2 : *Milieu et techniques*, *op. cit.*, p. 338.

est que « la concrétisation donne à l'objet technique une place intermédiaire entre l'objet naturel et la représentation scientifique⁸⁹⁶ ». *Tertium quid* dans la relation de l'homme au monde, l'objet technique fait partie d'un troisième ordre, qui se nourrit des deux autres. Davantage que la « simplicité » d'implémentation de certains principes par rapport à d'autres, il s'agit de considérer que « all variants of an artifact are not of equal importance. Some are simply inoperable; some are ineffective; and some are effective but have little technological and social influence⁸⁹⁷ ». Nous retrouvons ainsi le triple filtre de la nature (inopérabilité), de la technologie (inefficacité) et du système sociotechnique humain (inutilité). Nous avons eu l'occasion d'étudier les reproches adressés au concept de naturalisation des objets techniques, notamment par ceux qui considèrent qu'elle entraîne un appauvrissement de la condition humaine. Telle que nous la voyons, cette naturalisation permet au contraire de redonner aux objets techniques leur juste place ; ni moyens de domination (ou d'arraisonement), ni simples applications de concepts théoriques, les objets techniques se naturalisent car ils tendent vers l'objet entièrement concret qu'est l'objet naturel, et cette concrétisation passe par la convergence technologique :

La hiérarchie des valeurs de technicité est, en dernier ressort, fondée sur l'affinité du schème technique avec des potentialités physiques dont l'universalité et l'intelligibilité sont établies par les sciences de la nature⁸⁹⁸.

Prenant la contraposée de l'aphorisme de Richard Feynman (« Ce que je ne peux créer, je ne le comprends pas⁸⁹⁹ »), nous pouvons dire que plus l'homme comprend le monde, plus il est capable d'agir sur lui avec finesse. Inversement, le développement instrumental permet des expériences plus fines, et donc de mieux comprendre le monde. Savoir c'est pouvoir :

L'intervention de la technique dans les rapports de la nature avec l'homme se traduit par le fait qu'elle transforme sur une large échelle le monde environnant de l'homme, lui montrant sans cesse et inévitablement l'aspect scientifique de l'univers⁹⁰⁰.

⁸⁹⁶ Gilbert Simondon, MEOT, p. 56.

⁸⁹⁷ George Basalla, *op. cit.*, p. 34.

⁸⁹⁸ Vincent Bontems, *La Recherche au nom de l'innovation, op. cit.*, p. 105.

⁸⁹⁹ « What I cannot create I do not understand ».

⁹⁰⁰ Werner Heisenberg, *op. cit.*, p. 131.

3. Éléments de prospective technique

3.1. Une prospective exploratoire

Forgée à partir du verbe latin « *prospicere* » – qui signifie « regarder devant soi » –, la « prospective » désigne l'art de « voir loin, large, profond » pour « prendre des risques et penser à l'Homme » selon son inventeur Gaston Berger⁹⁰¹. Il s'agissait pour lui surtout de se démarquer de la « prévision », qui reflète une vision quantitative et déterministe de l'évolution de sociétés de manière analogue aux prédictions formulables sur un système physique isolé dont on connaît les lois d'évolution. Au contraire, Berger utilise le terme de « prospective » pour désigner une activité plus réflexive, consistant à envisager plusieurs futurs possibles en tenant compte du fait que la manière dont nous nous projetons dans l'avenir oriente l'évolution des systèmes et d'autre part que les systèmes dont l'Homme fait partie n'ont pas de lois mais des tendances et des ruptures inattendues. À la suite de Berger, Michel Godet synthétisera une définition opératoire : la prospective consiste à « éclairer l'action présente à la lumière des futurs possibles ».

Plutôt qu'une discipline bien constituée, la prospective recouvre un ensemble de pratiques et de méthodes appliquées à un domaine d'enquête qui, la plupart du temps, concerne le devenir des relations entre le système technologique et l'existence humaine. Ces différentes prospectives ont en commun de proposer des scénarios mettant en perspective le présent avec divers futurs. Elles le font selon deux modalités principales : soit en supposant, à un horizon temporel déterminé, des futurs contrastés et en construisant à rebours les scénarios susceptibles d'y conduire à partir du présent (méthode dite du « *backcasting* ») ; soit en identifiant dans le présent des « signaux faibles » qui sont l'indice de tendances évolutives et en extrapolant vers l'avenir plusieurs scénarios qui varient selon le degré d'amplification de ces tendances (méthode dite « exploratoire »). Afin de tirer parti au mieux des éléments dégagés par l'enquête mécanologique et d'éviter de basculer dans la spéculation, nous mobiliserons les concepts issus de la prospective *exploratoire*. Celle-ci vise à produire un instrument d'aide à la décision et à l'action, en invitant à considérer le futur non seulement comme un territoire à *explorer* en élargissant nos anticipations au-delà de ce que nous considérons comme l'évolution immédiate la plus probable, mais aussi comme territoire à *construire*, en soulignant quelles tendances sont à l'œuvre dans le présent et quels sont les facteurs d'évolution qui permettent d'intervenir sur elles.

⁹⁰¹ Gaston Berger, « Sciences humaines et prévision », *La revue des deux mondes*, n°3, 1957, p. 417-426.

Elle se fonde sur la représentation que nous pouvons nous forger du présent, de ce qu'il recèle comme tendances lourdes et émergentes pour aller explorer le spectre des futurs possibles, y compris ceux pouvant résulter de discontinuités ou de ruptures⁹⁰².

Les scénarios exploratoires permettent de formuler « une série de futurs possibles alternatifs, basée sur des appréciations diverses de l'évolution tendancielle du système »⁹⁰³. Ils « s'opposent » en cela aux scénarios de rétro-anticipation (*backcasting*) dont « le point de départ n'est pas la situation présente mais l'image d'un futur possible et souhaitable, décrite par un ensemble donné d'objectifs à réaliser »⁹⁰⁴. En réalité, il ne s'agit pas d'une opposition entre futurs possibles et futurs souhaitables renvoyant à deux ordres distincts, mais de deux directions pour un même type de réflexion. On peut établir un parallèle avec les travaux de Maunoury : les futurs possibles prolongent l'horizon de faisabilité quand les futurs souhaitables font rétroagir l'horizon de créativité, mais le but dans les deux cas est de faire advenir des scénarios qui correspondent à des intentions techniques.

3.2. Les dimensions du possible technologique

La première étape de l'analyse prospective consiste à enquêter auprès d'experts et de non-experts afin d'acquérir une connaissance du système étudié, et surtout, des relations que les individus ont avec lui. Cette connaissance doit déterminer les dimensions d'évolution possibles du système et identifier pour chacune d'elles les facteurs d'évolution (en distinguant ceux sur lesquels il est possible d'agir et ceux qui sont indépendants de notre action). Dans l'idéal, il faudrait que cette enquête aboutisse à un tableau de *tous* les scénarios qui découlent de la combinatoire des différents facteurs, de manière analogue à l'« analyse morphologique » développée par l'astrophysicien Fritz Zwicky⁹⁰⁵, qui visait à explorer toutes les résolutions possibles d'un problème scientifique à partir de la combinaison de toutes les hypothèses associables à ses variables ou ses composantes. Dans les faits, les prospectivistes opèrent toujours une réduction du système à ses dimensions jugées les plus pertinentes et sélectionnent, au sein de la combinatoire des scénarios possibles, ceux qui présentent des situations finales suffisamment contrastées pour offrir un espace de choix et des stratégies en fonction de certains facteurs d'intervention.

⁹⁰² Hugues de Jouvenel, « Science-fiction et prospective », *Futuribles*, Juin 2016, éditorial.

⁹⁰³ Pierre-André Julien, Pierre Lamonde & Daniel Latouche, « La méthode des scénarios en prospective », *L'Actualité économique*, n°51 (2), 1975, p. 255.

⁹⁰⁴ *Ibid.*, p. 256

⁹⁰⁵ Fritz Zwicky, « The morphological approach to discovery, invention, research and construction », in Fritz Zwicky & Albert G. Wilson (eds), *New methods of thought and procedure*, Berlin, Springer, 1967, p. 273-297.

Dans notre approche, celle d'une prospective technique appliqué à l'évolution des lignées de télescopes, l'acquisition des connaissances et la réduction des dimensions a été opérée par l'analyse mécanologique. Il ne s'agit pas de nier que l'évolution du système dépend d'autres facteurs sociaux, dont la prospective relèverait d'enquêtes sociologiques préalables, mais d'offrir une exploration des dimensions du possible technologique fondé sur un éclairage proprement technique. L'analyse de ces dimensions se combine ainsi avec notre méthode dans la mesure où les tendances techniques analysées aux chapitres précédents s'interprètent comme autant de tendances évolutives polarisant ces dimensions. Rappelons les 8 tendances génériques dégagées précédemment que l'on peut ainsi regrouper en 4 dimensions :

- Dimensions d'unité : simplification / complexification ;
- Dimension d'adaptabilité : spécialisation / diversification ;
- Dimension de modifiabilité : fermeture / ouverture ;
- Dimension de relativité : autonomie / hétéronomie.

Ces 8 tendances suggèrent la formulation de $2^4=16$ possibilités d'évolution pour les instruments scientifiques puisque chaque trame résulte d'une combinaison différente. Celle-ci se construit en sélectionnant pour chaque dimension, une tendance, et se caractérise donc par un *quatuor* de tendances, qui traduit un projet pour faire évoluer les instruments scientifiques vers un certain possible technologique. Par exemple, la trame aboutissant à des instruments plus simples, spécialisés, fermés et hétéronomes, correspond au projet de réduire à l'avenir le rôle des télescopes à celui d'un « terminal », un point d'entrée et de sortie d'un réseau informationnel (voir chapitre 6), alors que la possibilité opposée, celle qui aboutit à des dispositifs plus complexes, modulables, ouverts et autonomes, correspond au projet de développer, au sein de la famille des télescopes, des « instruments génériques ».

Tableau 11- Tableau des 16 quators de tendances possibles.

Si – Sp – F – A Observatoires IA	Si – D – F – A	Si – Sp – F – H Terminal de réseau	Si – D – F – H
Si – Sp – O – A	Si – D – O – A Instrument idéal	Si – Sp – O – H	Si – D – O – H
C – Sp – F – A Observatoires IA	C – D – F – A	C – Sp – F – H Situation actuelle	C – D – F – H
C – Sp – O – A	C – D – O – A	C – Sp – O – H	C – D – O – H Instrument générique

Dans le cas des télescopes, la tendance à l'hétéronomie est la règle, le télescope s'insérant dans une chaîne phénoménotechique d'acquisition des données toujours plus complexes où il doit fonctionner en relation avec un réseau informationnel ainsi qu'avec les autres instruments. Toutefois, la prospective vise précisément à élargir le champ des anticipations en se faisant un devoir d'explorer des évolutions contre-tendancielle et en rupture avec ce qui est jugé le plus probable au présent. En outre, cette méthode permet parfois d'identifier des possibilités demeurant masquées par les habitudes de pensée héritées du passé. Ainsi, le développement de l'intelligence artificielle pourrait donner naissance à de nouveaux scénarios et à des observatoires astronomiques autonomes. De même, dans le cas de l'astronomie spatiale, le caractère fermé est davantage présent, bien que le cas du *Hubble Space Telescope* montre que celui-ci n'est pas définitif et que des évolutions du dispositif technique vers l'ouverture sont envisageables.

Stimulant pour l'imagination, le balayage complet du champ des possibles dépasse en général l'ensemble des solutions techniques envisageables au présent, et sa mise en œuvre systématique se heurte à la difficulté de produire le nombre de scénarios correspondant à la saturation de la combinatoire (« les futurs possibles ne peuvent être tous énumérés⁹⁰⁶ »). Tout en le conservant à l'esprit, il est préférable, d'un point de vue opératoire, d'en revenir à l'identification d'un nombre limité de projets divergents dont l'extrapolation permet déjà une exploration des futurs significative sans être exhaustive. En définitive, il s'agit de repérer « un certain nombre de grandes lignes qui sont déjà dessinées et que nous pouvons, et que nous devons prévoir⁹⁰⁷ ». Les différents scénarios

⁹⁰⁶ Philippe Durance, art. cit., p. 314.

⁹⁰⁷ Intervention de Gaston Berger, in « L'avenir : prospectives », émission de la RTF (16 juin 1960. Cité par Philippe Durance, art. cit., p. 314.

sont ainsi autant d'outils heuristiques destinés à offrir des pistes de réflexion aux concepteurs des futures missions spatiales, certaines combinaisons de tendances pouvant aboutir à de nouvelles idées qui sortent du cadre conceptuel actuel. Raison pour laquelle nous ne cherchons pas à saturer les cases du tableau 11 : celui-ci, en laissant ouvertes de nouvelles possibilités, doit rester un moyen de stimuler l'imagination des concepteurs.

3.3. Les scénarios d'évolution

Chaque scénario doit s'accompagner de l'identification des facteurs d'intervention, c'est-à-dire des facteurs d'évolution sur lesquels il est possible d'agir pour construire un projet. Il s'agit de préparer le passage de la prospective exploratoire vers une prospective stratégique qui aura pour but de sélectionner le meilleur scénario. Nous ne nous étendrons pas sur le sujet, qui dépasse le cadre de cette analyse, mais nous réaffirmons, après Michel Godet, la pertinence des méthodes d'aide à la décision multicritère dans le choix des scénarios. Ces *méthodes multicritères* permettent en effet : d'évaluer les conséquences de chacune des actions possibles, dans les différents contextes décrits par les scénarios ; de juger chaque action selon les critères que l'acteur concerné doit prendre en considération (critères financiers, techniques, stratégiques, humains, etc.) ; de mettre en avant le *groupe d'actions à entreprendre en priorité*, compte tenu des probabilités d'apparition des différents scénarios⁹⁰⁸.

La prospective exploratoire appliquée à la lignée des télescopes et des observatoires englobe également l'extrapolation des tendances lourdes héritées du passé lointain ou proche, telles que l'augmentation de la taille des dispositifs, ou de la puissance de calcul, et de la complexification des structures impliquées. Il ne s'agit pas de se restreindre à une vision performative mais de parvenir à une meilleure compréhension des dimensions d'évolution permettant l'émergence de projets originaux, car comme nous le rappelle Andrew Feenberg, « la technique est sous-déterminée par le critère de l'efficacité⁹⁰⁹ ». Nous avons ainsi choisi de faire reposer la construction de nos scénarios, au sein de la combinatoire générale des dimensions technologiques, sur les logiques de conception exhibées au chapitre précédent : d'une part la priorité qui est donnée, ou non, à l'investissement dans les dispositifs optiques (segmentation), d'autre part l'investissement dans les réseaux informationnels (virtualisation). Ce point de vue permet d'opérer une synthèse entre la logique d'évolution interne (« l'évolution tendancielle du système ») et les facteurs externes (les « objectifs

⁹⁰⁸ Michel Godet, « La méthode des scénarios », *Futuribles*, Novembre 1983, p. 120.

⁹⁰⁹ Andrew Feenberg, *op. cit.*, p. 146.

à réaliser ») et permet de distinguer quatre grands scénarios, que nous présentons sous forme matricielle (Tab. 12).

Tableau 12 - Scénarios possibles en fonction des logiques accentuées.

		Virtualisation	
		-	+
Segmentation	-	Scénario <i>tendanciel</i>	Scénario <i>data-driven</i>
	+	Scénario <i>optique</i>	Scénarios <i>ambitieux</i>

En conformité avec les vues de Gaston Berger, Philippe Durance considérait que « l'avenir n'est ni utopique, ni idéal, ni continu, ni indéterminé mais "mesuré". Ce n'est plus un temps unique et global, mais un temps *échelonné*⁹¹⁰ ». Ces considérations ne sont pas sans rappeler celles que Simondon portait sur le futur :

C'est la catégorie de l'avenir qui devient la catégorie fondamentale de la recherche interdisciplinaire, non d'un avenir utopique ou idéal, mais d'un avenir mesuré, au sens propre du terme, c'est-à-dire dont on définit la portée : dans 5 ans, dans 7 ans..., au lieu de considérer l'avenir comme une catégorie continue et indéterminée : il y a des échelons dans l'avenir ; il devient une grandeur au lieu d'être seulement un cadre ; il a sa dimension ; au lieu d'être ce qui permet de s'échapper à tout ordre par la rêverie ou l'attente, il est dé-subjectivé, il devient *ce qui ordonne* et non pas seulement ce par quoi l'homme ordonne. Les sciences, ou leur réunion interdisciplinaire, sont invoquées comme des techniques pour l'avenir⁹¹¹.

Cette intégration de la prospective de Berger au sein de la mécanologie, opérée par Simondon de son vivant et redécouverte par Durance après coup, nous conforte dans la possibilité de mobiliser notre méthodologie à des fins de prospective technologique. Pour être cohérent avec les pensées de Durance et Simondon, il semble donc qu'il faille donner un échelonnement de nos scénarios. S'il est toujours compliqué, et risqué, de procéder à un tel exercice, le fait qu'un certain nombre de projets actuels s'inscrit dans les scénarios mentionnés (et que nous étudierons au paragraphe suivant) nous permet de suggérer que ces derniers se déploieront au cours des deux ou trois prochaines décennies.

⁹¹⁰ Philippe Durance, art. cit., p. 312.

⁹¹¹ Gilbert Simondon, *Sur la Philosophie (1950-1980)*, Paris, Presses universitaires de France, 2016, p. 149-150.

4. Les futurs des télescopes

4.1. Le scénario tendanciel

Le scénario tendanciel constitue en une simple continuation du présent et à ce titre, il s'apparente davantage à de l'extrapolation qu'à de la prospective. Ce scénario n'implique pas de changement radical dans la conception des dispositifs techniques mais entraîne des améliorations techniques s'inscrivant dans la poursuite de ce qui se fait aujourd'hui. S'inscrivent par exemple dans ce scénario, les futurs « télescopes » géants (en réalité des observatoires si l'on suit nos définitions) que sont le GMT et le TMT, le premier s'apparentant fortement au MMT original et le second reprenant presque à l'identique l'architecture des télescopes Keck.

Le scénario tendanciel n'est pas forcément un scénario prudent : certes, les principes techniques mis en œuvre sont maîtrisés tout comme les sous-ensembles techniques permettant leur implémentation, mais les phénomènes de saturation ou d'hypertélie peuvent perturber, voire faire déraiser et échouer, les projets qui se présentent comme de simples prolongements. Du fait même qu'un tel scénario ne repose pas sur l'anticipation d'éventuelles ruptures technologiques et qu'il ne vise pas à opérer de rupture d'échelle dans les résultats scientifiques escomptés, il est en réalité assez risqué au regard de l'horizon envisagé. En revanche, il possède l'avantage de présenter moins de risques immédiatement perceptibles que les autres scénarios et peut-être donc être socialement favorisé dans un contexte d'aversion au risque. Il repose en fin de compte sur un certain type de prévalence à la demande externe.

4.2. Les scénarios probables : scénario privilégié et scénario alternatif

Les scénarios privilégié et alternatif correspondent à l'approfondissement des deux logiques qui traversent aujourd'hui la conception des dispositifs astronomiques. Le premier d'entre eux est marqué par la poursuite de la logique de virtualisation, scénario dit *data-driven*, et donne la priorité aux éléments informatiques ainsi qu'à la quantité de données recueillies et à leur traitement. Les deux projets emblématiques s'inscrivant dans ce cadre sont, au sol, le LSST⁹¹² et dans l'espace, l'observatoire Euclid, ces deux observatoires ayant d'ailleurs prévu de collaborer dans l'investigation de la nature et de la distribution de matière noire.

⁹¹² Mario Juric, Eric Bellm & Leanne Guy, « Machine learning applications with LSST : From data processing to knowledge discovery », *American Astronomical Society*, AAS Meeting n°233, 2019.

A propos des spécificités d'Euclid, dont le lancement est prévu pour 2022, nous avons conduit un entretien avec Marc Sauvage, responsable du segment sol de la mission⁹¹³. A nos yeux, cet observatoire est emblématique de la Big Data-Driven Science. Comme le rappelle Marc Sauvage, « ce qui est nouveau avec Euclid, c'est qu'on a optimisé certains éléments du système dans un but unique ». Du point de vue purement technique, le télescope de l'observatoire Euclid est un télescope de type Korsch (comme le JWST) dont le miroir primaire mesure 1m20 de diamètre (là où celui du HST, lancé 30 ans plus tôt, fait le double). Mais ces caractéristiques techniques, somme toute modestes, sont amplifiées par le reste de la chaîne phénoménoteknique d'acquisition des données : d'une part « il y a une simplification de l'appareillage au profit d'une complexification du détecteur - et cela n'est possible que parce que l'on a appris à traiter des signaux plus complexes » et d'autre part « l'arrivée de méthodologies basées sur le *Big Data* et le *Machine Learning* ont rendu possible l'idée de faire un instrument qui possède jusqu'à 90 CCD dans le même champ, parce que ces données, on est désormais en mesure de les traiter ». Ainsi, si le télescope en lui-même n'est pas révolutionnaire, l'observatoire (qui lui adjoint les détecteurs et les systèmes de traitement de l'information) en revanche permet une rupture d'échelle en matière de quantité et de précision des données. Sans aller jusqu'à affirmer la préséance des sous-systèmes informatiques sur les sous-systèmes optiques, force est de constater qu'Euclid traduit au plus haut point une nouvelle façon de faire la science :

On n'est plus dans la situation où l'instrumentaliste produit des données et le chercheur s'en sert pour faire de la science. C'est devenu beaucoup plus compliqué car on s'est spécialisé et on a intégré des spécialisations dans le traitement même de données⁹¹⁴.

Deuxième scénario probable, le scénario alternatif, donne la priorité à l'investissement dans les dispositifs optiques et l'accent est mis sur la poursuite de la logique de segmentation. Celle-ci permet une rupture d'échelle dans la taille des miroirs primaires qui, si elle résulte d'impératifs performatifs, s'accompagne d'une complexification structurelle. L'exemple paradigmatique de ce scénario est le futur E-ELT, implémentant un nouveau design à 5 miroirs, et mobilisant un miroir secondaire lui aussi segmenté. Dans l'espace, la réflexion porte sur les modalités de déploiement et dépliement comme illustré par le JWST et TALC qui, eux aussi, possèdent des miroirs primaires segmentés permettant de s'affranchir en partie des limitations volumiques liées à la coiffe du

⁹¹³ La retranscription de cet entretien est fournie dans l'annexe A.2.

⁹¹⁴ Les citations de ce dernier paragraphe sont issues de l'entretien conduit avec M. Sauvage.

lanceur. Dans le cadre de cette thèse, nous avons échangé avec Gilles Durand⁹¹⁵, le concepteur de TALC, afin qu'il nous expose sa propre logique de conception, l'innovation que représenterait selon lui la réalisation de TALC, et les évolutions qu'il estime probables. Durand met en avant le concept de « tenségrité », dont il s'est souvent inspiré, pour caractériser l'originalité de son projet qu'il présente comme une résolution inventive de problème. Bien que cette résolution n'intègre pas de nouvelles connaissances scientifiques, il insiste sur le fait qu'elle renouvelle l'ensemble des performances du télescope ; puisqu'elle concerne aussi bien sa structure que ses matériaux, son déploiement que ses mécanismes d'amortissement actif, son degré de résolution et de sensibilité que la forme du signal fourni. Ce caractère innovant lui a d'ailleurs valu de recevoir le « Best Innovative Paper Award » en novembre 2016. Il estime cependant que son projet est clairement alternatif en raison de l'orientation *data-driven* privilégiée par le champ et de la rude concurrence entre les différents projets.

Les scénarios probables ont en commun de repousser les limites de ce que l'on sait faire actuellement et constituent en cela des ruptures qualitatives dans l'évolution des télescopes. Sans tomber dans le piège du scepticisme, gageons toutefois qu'il sera compliqué à l'horizon 2050 d'accomplir une véritable rupture d'échelle avec cette stratégie. Comme le remarquait déjà Simondon, les lignées ne durent pas éternellement. Arrive un stade de saturation où la poursuite des logiques performatives conduit à des hypertélies (exemple des réfracteurs à très grandes focales) ou bien n'est tout simplement plus possible (impasse évolutive analogue à celle que semble avoir potentiellement atteint la physique des particules avec le LHC).

4.3. Les scénarios ambitieux

Les scénarios ambitieux constituent le troisième type de scénarios prospectifs envisageable. Ces scénarios visent à opérer de véritables ruptures technologiques et supposent des investissements plus intenses, des accélérations imprévues ou un temps plus long que les autres types de scénarios. Dans un scénario ambitieux, les logiques de virtualisation et de segmentation sont promues conjointement, aboutissant, par exemple, à la formulation de projets tels que l'hypertélescope, ainsi que son équivalent au sol, CARLINA, tous deux reposant sur un nouveau *principe technique*, la densification de pupille⁹¹⁶. Notre méthodologie d'enquête, fondée sur la mécanologie génétique et ses catégories, nous pousse en outre à formuler d'autres scénarios basés sur :

⁹¹⁵ Nous avons rencontré Gilles Durand à deux reprises, les 17 avril et 17 octobre 2017.

⁹¹⁶ Voir chapitre 8.

- La transduction technologique (interférométrie optique à très longue base)⁹¹⁷ ;
- De nouveaux *principes physiques* de focalisation des photons (donnant naissance à de nouvelles lignées) ;
- La focalisation d'autres particules, comme par exemple les neutrinos ou les muons (nouvelle famille, et donc nouvelle science).

Les plus ambitieux de ces scénarios débordent du cadre de la prospective technologique telle que l'envisage une organisation comme l'ESA mais font quand même partie de la prospective à proprement parler. Ces scénarios de rupture pourraient même s'avérer déterminants en cas d'échec des autres scénarios ou de découverte scientifique imprévue : si le JWST et Euclid ne fournissent pas de nouveaux résultats, il sera probablement nécessaire de projeter une nouvelle rupture d'échelle dans les performances des dispositifs astronomiques ; à l'inverse, si Euclid découvrirait des résultats inattendus à propos de la matière noire, il pourrait susciter de nouveaux projets. Paradoxalement, le chercheur est technologiquement tout autant motivé par l'échec que le succès. Toutefois, dans le premier cas, il sera d'autant plus difficile de justifier le financement de nouveaux projets que les dispositifs seront en situation d'échecs (ou de saturation). Cette situation illustre la circularité entre les ruptures épistémologiques et les ruptures technologiques comme la dépendance du champ astronomique aux facteurs externes, et notamment aux contraintes budgétaires.

Conclusion de chapitre

La mise en perspective de l'évolution des rapports entre science et technique et l'analyse des différents stades du système industriel permettent de caractériser le mode de conception *phénoménoteknique* des instruments contemporains. Il s'agit de ne pas retomber dans l'opposition entre nature et culture tout en évitant le réductionnisme naturaliste (« l'objet technique comme prolongement du corps ») : la nature impose ses contraintes mais propose également des solutions. De cette dialectique émergent alors des tendances d'évolution objectives, qui se doublent de logiques d'évolution subjectives. S'en emparer à des fins prospectives autorise la formulation de scénarios qui viennent éclairer le, et plus exactement les, futurs possibles des télescopes. Ces scénarios sont avant tout des outils heuristiques : il ne s'agit pas de dire comment *vont* évoluer mais comment *pourraient* évoluer les télescopes. Bien entendu, la construction de nos scénarios repose énormément sur les processus évolutifs dégagés par notre enquête mécanologique, et notre façon

⁹¹⁷ Les futurs SKA et CEA témoignent d'ailleurs de ce phénomène de transduction entre les différentes longueurs d'onde.

de faire de la prospective, fortement marquée par la génétique technique, n'est pas celle des fondateurs de cette discipline. Il s'agit avant tout de proposer un nouveau regard permettant d'éclairer les choix des concepteurs mais d'autres façons d'envisager le futur des instruments astronomiques sont évidemment possibles. Les scénarios construits à partir des logiques évolutives mises au jour au chapitre précédent constituent ainsi des outils heuristiques d'exploration du futur, et ce dernier chapitre a présenté une ébauche de ce que pourrait être la *prospective mécanologique*.

Conclusion de partie

Un des moyens de lutter contre les nouvelles formes d'opacité - technique, algorithmique ou sociale - générées par la multiplication des « boîtes noires » dans le champ des techniques, passe par le prolongement et le développement de l'« instrumentation générique⁹¹⁸ ». Il est nécessaire de continuer à concevoir et développer des dispositifs phénoménotecniques novateurs basés sur de « bonnes idées⁹¹⁹ » et qui ne se contentent pas de répondre à des besoins immédiats. Pour ce faire, le recours à la prospective exploratoire et à la formulation de scénarios est un bon moyen de proposer des pistes d'évolutions novatrices. L'élucidation des tendances techniques et des logiques de conception permet ainsi d'éclairer le futur des télescopes et des observatoires. Ces évolutions techniques sont largement tributaires de considérations non techniques : la façon de faire de la science, la répartition des budgets alloués à la recherche en astronomie, les luttes économiques entre les fabricants... sont autant de facteurs pouvant faire basculer l'évolution des télescopes vers tel ou tel scénario. La mobilisation d'outils d'aide à la décision multicritère à des fins de prospective stratégique constitue à ce titre le prolongement naturel des éléments de prospectives exploratoires présentés dans cette dernière partie. Il est vrai que la mécanologie génétique assume un certain parti pris évolutionniste. Que l'on souscrive à de telles hypothèses, nous avons néanmoins souhaité montrer la portée pratique de la mise en œuvre opératoire de notre méthodologie d'enquête. Tout comme le concept de concrétisation « est à la fois normatif et descriptif (il mesure un progrès et décrit une évolution)⁹²⁰ », les tendances ou logiques permettent de comprendre les choix passés et éclairer les décisions futures.

⁹¹⁸ Terry Shinn & Pascal Ragouet, « Formes de division du travail scientifique et convergence technico-instrumentale », *Revue française de sociologie*, vol. 41, n°3, p. 457.

⁹¹⁹ David Baird, *op. cit.*, p.63 : « Good ideas do more than figure in building a single instrument ; they establish an approach... A good idea can father many instrument ».

⁹²⁰ Paul Dumouchel, art. cit., p. 412. Nous traduisons.

Conclusion et perspectives

The future cannot be predicted, but futures can be invented.

Dennis GABOR, *Inventing the future*

Au carrefour de la philosophie, de l'histoire et de la sociologie des techniques, la *mécanologie génétique* se veut une méthode d'investigation et d'élucidation, permettant de porter un nouveau regard sur les objets techniques et en particulier, comme c'est le cas pour cette thèse, sur les télescopes. Avec cette thèse, nous avons voulu montrer tous les bénéfices qu'il y avait à retirer de l'application de la mécanologie génétique à l'étude des instruments scientifiques. Pour se faire, nous avons développé plusieurs concepts et outils, parfois en reprenant et en affinant certains préexistants. Pour ne pas nous en tenir à une pétition de principe, nous avons souhaité mettre la mécanologie génétique à l'épreuve de l'étude d'un cas objectivable sur le long terme. Dans cette optique, le recours aux matrices et diagrammes s'est avéré primordial, aussi bien pour capturer, restituer et synthétiser l'information que pour intégrer les connaissances acquises à diverses échelles. La combinaison de la mécanologie génétique avec les diagrammes développés conduit ainsi à une véritable gestion diagrammatique des connaissances sur les lignées de télescopes. Croiser les niveaux de classification avec les diagrammes de fonctionnement permet de fixer le périmètre d'étude ; coupler les diagrammes de lignées avec la matrice des innovations permet de repenser l'argumentation de l'évolution ; appliquer la matrice des performances aux différentes échelles de la technique coordonne les différentes mises en perspectives que l'on peut faire de l'évolution technique en fonction de l'échelle d'analyse adoptée.

Si les classifications traditionnelles des machines reposent en général uniquement sur des critères utilitaires externes, l'approche mécanologique inaugurée par G. Simondon apparaît en revanche trop centrée sur le schème technique interne. Si elle possède le mérite de permettre de retracer la généalogie des objets techniques, elle ne permet pas de saisir toutes les évolutions qui en jalonnent l'histoire, notamment celles motivées par les exigences de performance du système socio-industriel. L'ambition affichée par notre approche de la mécanologie génétique consiste précisément à opérer une synthèse entre cette approche strictement internaliste et la prise en compte des facteurs externes, rejoignant, entre autres, les analyses de certains économistes comme J.-L. Maunoury ou H. Simon. La machine est à l'interface entre un environnement technique interne et un

environnement socioéconomique externe, tout comme la technique est à l'interface entre l'Homme et le Monde. Le développement d'une ontologie reprenant ces idées nous a permis de formuler des concepts classificatoires dont l'utilité immédiate est de repenser les bases de connaissances concernant les objets techniques, aussi bien des centres de recherche que des groupes industriels.

L'application de la mécanologie génétiques aux lignées de télescopes optiques nous a en outre conduit à faire du télescope bien plus qu'un simple objet permettant de *voir loin*, et cette redéfinition a induit une relecture originale de sa longue et riche histoire. La course au gigantisme (*aperture fever*) et la complexification correctrice sont les deux logiques qui traversent cette histoire. Si les motivations de la première sont à chercher parmi des causes extrinsèques, la seconde résulte de considérations essentiellement internes. Des facteurs sociaux et purement techniques sont donc parallèlement à l'œuvre au sein de l'évolution des télescopes, et de leur dialectique émerge le processus de concrétisation que G. Simondon avait formulé. Ce processus évolutif se prolonge au niveau de la famille en un processus d'idéalisation, que l'on a assimilé, dans le cas des télescopes, à une réduction des aberrations. L'étude génétique des télescopes nous a aussi permis d'affiner les concepts issus d'une discussion théorique en évolutionnisme technique. Si un certain nombre de convergences *spontanées* se manifestent entre les pensées évolutionnistes, il nous semblait important de les mettre à l'épreuve. Aux logiques de conception immédiatement saisissables (gigantisme et complexification correctrice) et aux processus évolutifs émergents qui en découlent (concrétisation et idéalisation), nous avons ainsi pu exhiber quatre axes évolutifs portant sur la dimension fonctionnelle de l'objet technique (spécialisation / diversification), sa structure (simplification / complexification), son insertion dans le milieu associé technico-géographique (autonomie / hétéronomie) et sa relation avec l'individu humain (ouverture / fermeture).

Nous l'avons vu, la standardisation est une tendance générale de l'histoire des techniques. Elle précède et permet l'industrialisation qui la déploie en opérant un changement d'échelle au niveau des ensembles de production. Ce stade industriel laisse ensuite place au stade scientifique, lors duquel les propriétés informationnelles deviennent prépondérantes dans la conception des dispositifs techniques. Cette convergence technoscientifique, largement étudiée par ailleurs et à laquelle nous préférons le terme de phénoménotechnique, se traduit par un effacement de la frontière entre recherche fondamentale et appliquée. Pour ce qui est des télescopes, nous avons identifié cette informatisation des instruments scientifiques à une logique de virtualisation. Celle-ci est le résultat d'une transition d'échelle, l'individu technique présentant dorénavant des propriétés assimilables à celles d'un réseau. Dans le même temps, nous avons constaté que s'opère une

miniaturisation des éléments, notamment par l'adjonction de composants électroniques. Cette nouvelle instrumentation transforme la façon de faire la science : à l'œuvre depuis le dernier quart du XX^e siècle, elle tend à complexifier la conception et la concrétisation des instruments scientifiques, tout en permettant la poursuite, souvent à moindre frais, des logiques performatives.

Ces tendances sont issues d'une lecture rétrospective du passé, et prolonger ces lignes d'analyse aux temps futurs permet d'en faire des instruments de prospective exploratoire. À l'instar des principes de la TRIZ, les axes d'évolution mis en évidence par la mécanologie génétique doivent servir à formuler des suggestions pouvant orienter les concepteurs vers de futurs dispositifs. Ces suggestions se présentent sous la forme de scénarios orientés par les logiques de virtualisation et de segmentation exhibées au cours de l'enquête mécanologique. Ces scénarios esquissent trois futurs possibles pour les télescopes, échelonnés à l'horizon 2050. Au scénario tendanciel prudent, s'ajoute deux scénarios probables : un premier dans lequel la logique de segmentation se poursuit et induit des progrès dans le domaine optique et un second pour lequel l'accent est mis sur la logique de virtualisation et qui repose davantage sur les dispositifs de traitement de données. Enfin reste les scénarios ambitieux qui visent à conjuguer ces deux logiques ainsi que les scénarios de rupture dont le déclenchement est conditionné par un changement de paradigme scientifique en astronomie observationnelle.

Cette thèse illustre ainsi l'intérêt de la mécanologie génétique pour les astronomes, qu'ils soient concepteurs ou utilisateurs de dispositifs techniques, et laisse présager des transpositions fécondes dans d'autres domaines industriels. L'application des matrices de performances peut enrichir les outils d'aide à la décision quand l'explicitation des logiques et tendances techniques est en mesure de déceler aussi bien les potentialités d'innovations que les situations d'hypertélies. Il ne s'agit pas de faire de la mécanologie génétique un outil prédictif, ni un moyen d'évaluer les projets de dispositifs techniques. Il s'agit de donner aux scientifiques les outils leur permettant de réfléchir sur l'histoire des instruments de leur discipline de manière à pouvoir défendre l'autonomie et la pertinence de leurs projets futurs. La mécanologie génétique et la gestion diagrammatique des connaissances sont des invitations faites aux chercheurs à se réapproprier le destin de leurs instruments en ne demeurant pas prisonnier des horizons immédiats.

Les nouveaux individus *réticulés* mettent en jeu différents principes de fonctionnement et font appel à des individus techniques non matériels, notamment de type algorithmique. Les outils et concepts pour étudier et investiguer les lignées d'ensembles et de réseaux, ainsi que les lignées

immatérielles, restent à définir car ils sortent du cadre de la mécanologie, initialement développée pour l'étude des individus matériels. Prolonger notre méthodologie aux autres échelles et modes d'existence de la technique suppose l'élaboration de nouvelles catégories. Elle permettrait en retour de comprendre comment la virtualisation et le déphasage de la technicité ont transformé notre façon de faire de l'astronomie et largement modifié l'organisation sociale de la discipline⁹²¹. Cette tâche serait d'autant plus utile que ces évolutions sont le résultat de technologies génériques et induisent par conséquent des transformations transverses à tous les champs scientifiques.

⁹²¹ L'annexe A.1 propose une ébauche de ce que pourrait être une évaluation bibliométrique du champ astronomique.

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

A

- ABT H. A., « Some trends in American astronomical publications », *Publications of the astronomical society of the pacific*, vol. 93, n° 553, 1981, p. 269-272.
- « Citations to single and multiauthored papers », *Publications of the astronomical society of the pacific*, vol. 9, n°583, 1984, p. 746-749.
- « Scientific efficiency of ground based telescopes », *The astronomical journal*, vol. 144, n°91, 2012, p. 91-95.
- ADGERTON D., *Quoi de neuf ? Du rôle des techniques dans l'histoire globale*, Paris, Seuil, 2013.
- ALBERT D., HATCHUEL A. & LAUFER R., *Les nouvelles fondations des sciences de gestion*, Paris, Presse des Mines, 2012.
- ALUNNI C., « Des enjeux du mobile à l'enchantement du virtuel – et retour », in CHATELET G. (dir.), *L'enchantement du virtuel. Mathématique, physique, philosophie*, Paris, Editions rue d'Ulm, 2010.
- ANDERS G., *Hiroshima est partout*, Paris, Seuil, 2008 (1982).
- AÏT-EL-HADJ S., *Systèmes technologiques et innovation*, Paris, L'Harmattan, 2002.
- AÏT-EL-HADJ S. & BOLY V. (dirs.), *Les systèmes techniques, lois d'évolution et méthodologies de conception*, Paris, Lavoisier, 2009.
- ALTSHULLER G., *The innovation algorithm : TRIZ, systematic invention and technical creativity*, Worcester, Technical Invention Center, 1999.
- *Et soudain apparut l'inventeur*, Paris, Seredinski, 2002.
- *40 Principes d'innovation TRIZ pour toutes applications*, Paris, Seredinski, 2004.
- ANDERSON C., « The end of theory: the data deluge makes the scientific method obsolete », *WIRED*, 23 juin 2008.
[En ligne] URL : <https://www.wired.com/2008/06/pb-theory/>
- ANDERSON P. W., « More is different », *Science*, n°177, 1971, p. 393-396.

APPERNZELLER I., « Astronomical technology – the past and the future », *Astronomische Nachrichten*, n°337, 2016, p. 694-702.

ARENDRT H., *Condition de l'homme moderne*, Paris, Pocket, 2002 (1958).

ARIES S., LE BLANC B. & ERMINE J.-L., « MASK : une méthode d'ingénierie des connaissances pour l'analyse et la structuration des connaissances », in ERMINE J.-L. (dir.) *Management et ingénierie des connaissances, modèles et méthodes*, Paris, Hermes sciences, 2008.

ARIOTTI P. E., « Bonaventura Cavalieri, Marin Mersenne, and the reflecting telescope », *ISIS*, vol. 66, n°3, 1975, p. 302-321.

ARMATTE M., « La notion de modèle dans les sciences sociales : anciennes et nouvelles significations », *Mathématiques et sciences humaines*, n°172, 2005.
[En ligne] URL : <http://journals.openedition.org/msh/2962/>

ATLAN H., *Entre le cristal et la fumée*, Paris, Seuil, 1979.

AUDOUZE J., « Is astronomy useful for societies ? », *The role of astronomy in society and culture*, 2011, p. 275–380.

B

BABCOCK H. W., « The possibility of compensating astronomical seeing », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 65, n° 386, 1953, p. 229-236.

BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Librairie philosophique Jacques Vrin, 1990 (1938).

— *Le rationalisme appliqué*, Paris, Presses universitaires de France, 2004 (1949).

— *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Presses universitaires de France, 2013 (1934).

BAIRD D., *Thing knowledge. A philosophy of scientific instrument*, Los Angeles, University of California press, 2004.

BARREAU H., « André Jacob, genèse de la pensée linguistique », *Revue philosophique de Louvain*, n°14, 1974, p. 357-359.

BARTHELEMY J.-H., *Penser la connaissance et la technique après Simondon*, Paris, L'Harmattan, 2005.

BASALLA G., *The evolution of technology*, Cambridge, Cambridge university press, 1988.

BEAUNE J.-C., *La technologie introuvable*, Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 1980.

- BELY P., *The design and construction of large optical telescopes*, New-York, Springer, 2003
- BENN C. R., & SANCHEZ S. F., « Scientific impact of large telescopes », *Publications of the astronomical society of the pacific*, n°113, 2001, p. 285-296.
- BENSAUDE-VINCENT B., *Eloge du mixte. Matériaux nouveaux et philosophie ancienne*, Paris, Hachette, 1998.
- BERGER G., « Sciences humaines et prévision », *La revue des deux mondes*, n°3, 1957, p. 417-426.
- BERGSON H., *L'Évolution créatrice*, Paris, Presses universitaires de France, 2007 (1907).
- BLEEKER J., GEISS J. & HUBER M., *The century of space science*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- BLOCH E., *L'angoisse de l'ingénieur*, Paris, Allia, 2015.
- BLOCH M., *Apologie pour l'histoire ou métier d'historien*, Paris, Armand Colin, 1967.
- BOCK R. K. & VASILESCU A., *The particle detector briefbook*, Berlin, Springer, 1998.
- BOLDRINI J.-C., « Le rythme implacable de l'innovation est-il gouverné par des lois d'évolution internes aux objets ? », *Revue française de gestion industrielle*, vol. 31, n° 1, 2012, p. 107-131.
- BONTEMS V., « Quelques éléments pour une épistémologie des relations d'échelle chez Simondon : individuation, technique, et histoire », *Appareil*, n°2, 2008.
[En ligne] URL : <http://appareil.revues.org/595/>
- « Actualité d'une philosophie des machines. Gilbert Simondon, les hadrons et les nanotechnologies », *Revue de synthèse*, Tome 130, 6^e série, n°1, 2009, p. 37-66.
- « Simondon, le progrès et l'évolution des lignées techniques », in PARROCHIA D. & TIRLONI V. (dirs.), *Formes, systèmes et milieux techniques après Simondon*, Lyon, Jacques André Editeur, 2012.
- « Causalité historique et contemporanéité relative. De la relativité einsteinienne aux sciences historiques », *Revue de Synthèse*, Tome 135, 6^e série, n° 1, 2014, p. 71-89.
- « Le cycle de la technologie chez Simondon », in BARTHELEMY J.-H. (dir.), *Cahiers Simondon*, n°6, Paris, L'Harmattan 2015.
- « Sur la classification des objets techniques selon Simondon », *Artefact*, n° 3, 2015, p. 183-200.

- « Analogies techniques et raisonnements analogiques (une lecture simondonienne) », in DE BEAUNE S., HILAIRE-PEREZ L. & KOEN V. (dirs.), *L'analogie dans les techniques*, Paris, CNRS éditions, 2017, p. 273-290.
- « On the current uses of Simondon's philosophy of technology » in LOEVE S., GUCHET X. & BENSUADE-VINCENT B. (eds.), *French philosophy of technology*, Cham: Springer, 2018, p. 37-49.
- *La recherche au nom de l'innovation : « Faster ! Better ! Cheaper ! »*, Manuscrit HDR (inédit), 2019.
- BONTEMS V. & GUY T., « L'étude des lignées phénoménotechniques. De Bachelard à Simondon et aux "micromégas" », in DONATIELLO P., GALOFARO F. & IENNA G., *Il senso della tecnica : saggi su Bachelard*, Bologne, Esculapio, 2017, p. 109-120.
- BORDESSOULLES M., « Et si on relisait Gille avec Russo ? La notion de système technique », *Bulletin de la Sabix*, 2013.
[En ligne] URL : [http:// journals.openedition.org/sabix/1073/](http://journals.openedition.org/sabix/1073/)
- BOWDEN M., *Pitt Rivers. The life and archaeological work of Lieutenant General Augustus Henry Lane-Fox Pitt-Rivers*, Cambridge, Cambridge university press, 1991.
- BRANDL B., *400 years of astronomical telescopes. A review of history, science and technology*, New-York, Springer, 2010.
- BRANS J.-P., *L'ingénierie de la décision : élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE*, Laval, Presses de l'université Laval, 1982.
- BRISAUD I. & BARON E., « La Course des accélérateurs de particules vers les hautes energies et la log périodicité », *Cybergeog*, 2007.
[En ligne] URL : <https://journals.openedition.org/cybergeog/14173/>
- BRUNIER S. & LAGRANGE A.-M., *Great observatories of the world*, Ontario, Firefly books, 2005.
- BUBB M., *La camera obscura. Philosophie d'un appareil*, Paris, L'Harmattan, 2010.
- BUSCHER D. F., *Practical optical interferometry*, Cambridge, Cambridge university press, 2015.
- BUTLER S., « Darwin among the machines », *The Press*, 13 juin 1863.
- *The book of the machines*, 1872.

C

- CARNINO G., HILAIRE-PEREZ L. & HOOCK J. (dir.), *La technologie générale. Johann Beckmann, Entwurf der allgemeinen technologie / Projet de technologie générale (1806)*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2017.
- CARON F., *La dynamique de l'innovation*, Paris, Gallimard, 2010.
- *Les deux révolutions industrielles du XX^e siècle*, Paris, Albin Michel, 1998.
- CARROZZINI G., « Gilbert Simondon et Jacques Lafitte : les deux discours de la “culture technique” », in BARTHELEMY J.-H. (dir.), *Cahiers Simondon*, n° 1, Paris, L'Harmattan, 2009.
- CAVALLUCCI D., « TRIZ : l'approche altshullerienne de la créativité », *Techniques de l'ingénieur*, 1999.
- CAVALLUCCI D. et WEILL R. D., « Integrating Altshuller's Development Laws for Technical Systems into the Design Process », *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 50, n° 1, Issy-les-Moulineaux, Elsevier, 2001, p. 115-120.
- CELNIKIER L. M., *Histoire de l'astronomie occidentale*, Paris, Lavoisier, 1996.
- CHATEAU J.-Y., « La Technique. Genèse et concrétisation des objets techniques dans *Du mode d'existence des objets techniques* de Gilbert Simondon », *Philopsis : revue numérique*, 2010.
- CHATY S., « Multi-wavelength study of high mass X-ray Binaries », *Binary star evolution : mass loss, Accretion and mergers*, June 2010, Mykonos, Greece.
- CHENG J., *The principles of astronomical telescope design*, New-York, Springer, 2009.
- CHOULIER D., « Synthèse sur les lois d'évolution comparaison entre les vues de Simondon, Deforge, et Altshuller », *Rapport interne du laboratoire M3M, UTBM*, 2000.
- COLLINS H., « Son of seven sexes : the social deconstruction of a physical phenomenon », *Social studies of science*, vol. 11, n°1, 1981, p. 33-62.
- COMTE A., *Discours sur l'esprit positif*, Paris, Librairie philosophique J. Vrin, 1995.
- COTTE M., « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences » in REY A.-L. (dir.), *Méthode et histoire. Quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques?*, Paris, Classique Garnier, 2003, p. 201-216.
- « Les matériaux et les structures au départ de la première industrialisation (début XIX^eme) », in ROSMORDUC J. (dir.), *Brest, CRDP de Bretagne*, 1997.
- COUDERC P., *Histoire de l'astronomie classique*, Paris Presses universitaires de France, 1982.

CRAWFORD M. B., *Contact : pourquoi nous avons perdu le monde, et comment le retrouver*, Paris, La Découverte, 2016.

— *Eloge du carburateur. Essai sur le sens et la valeur du travail*, Paris, La Découverte, 2010.

D

D'ALEMBERT J. L. R., *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, Paris, Librairie philosophique J. Vrin, 2000 (1751).

DAUMAS M., *Les instruments scientifiques aux XVIIème et XVIIIème Siècles*, Paris, Jacques Gabay, 2004 (1953).

— *Histoire générale des techniques* (5 tomes), Paris, Presses universitaires de France, 1962-1979.

— « L'histoire des techniques : son objet, ses limites, ses méthodes », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, tome 22, n°1, 1969, p. 5-32.

— « A la recherche de la technologie. A propos d'un ouvrage de Jean-Claude Beaune », *Revue d'histoire des Sciences*, n°34, 1981.

DE BEAUNE S., *L'homme et l'outil : l'invention technique durant la préhistoire*, Paris, 2005.

— « De la beauté du geste technique en préhistoire », *Gradhiva*, n°17, 2013, p. 26-49.

DE CESARE S., « Disentangling organic and technological progress : an epistemological clarification introducing a key distinction between two levels of axiology », *Studies in history and philosophy of biological and biomedical science*, Elsevier, 2017.

DEFORGE Y., *Technologie et Génétique de l'Objet Industriel*, Paris, Maloine, 1985.

DELEUZE G. et GUATTARI F., *Qu'est ce que la philosophie ?*, Paris, Les éditions de Minuit, 2005 (1991).

DELABRE B., « Optical design for an adaptive anastigmatic five-mirror extremely large telescope », *Astronomy and Astrophysics*, n° 487, 2008.

DESCARTES R., *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*, Paris, Edition Angot (Source numérisée : BnF/Gallica), 1668.

DEVEREUX G., *Ethnopsychanalyse complémentariste*, Paris, Flammarion, 1985.

DIEIRICKX P., « Optical fabrication in the large », *Workshop on Extremely Large Telescopes*, 1999.

- DJEBBAR A., *Une histoire de la science arabe*, Paris, Seuil, 2001.
- DOBZHANSKY T., « Nothing in biology makes sense except in the light of evolution », *The American biology teacher*, n°35, 1973, p. 125-129.
- DOLLOND J., « An account of some experiments concerning the different refrangibility of light », *Philosophical transactions of Royal Society of London*, 50, 2, 1758, p. 733-743.
- DOUKI C. MINARD P., « Histoire globale, histoires connectées : un changement d'échelle historiographique ? », *Revue d'histoire moderne & contemporaine*, n° 54 - 4bis, 2007, p. 7-21.
- DUCASSE P., *Histoire des techniques*, Paris, Presse universitaires de France, 1974 (1948).
- *Les techniques et le philosophe*, Paris, Presses universitaires de France, 1958.
- DUHEM P., *La théorie physique : son objet, sa structure*, Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 1993 (1906).
- *Sauver les phénomènes. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Librairie scientifique A. Hermann, 1908.
- DUMOUCHEL P., « Gilbert Simondon's plea for a philosophy of technology », *Inquiry*, n°35, 1992, p. 407-421.
- DURANCE P., « Le futur dans la philosophie de la technique de Gilbert Simondon », in BONTEMS V. (dir.), *Gilbert Simondon ou l'invention du futur*, Colloque de Cerisy (actes), Langres, Klincksieck, 2016, p. 303-315.
- E**
- EINSTEIN A. & INFELD L., *L'évolution des idées en physique : des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta*, Paris, Flammarion, 1983.
- ELIAS N., *La dynamique de l'occident*, Paris, Pocket, Paris, 2001 (1969).
- *La société des individus*, Paris, Pocket, 2008 (1987).
- ELLUL J., *La technique ou l'enjeu du siècle*, Paris, Economica, 1990 (1954).
- *Le système technicien*, Paris, Le cherche-midi, 2012 (1977).
- ELREDGE N., « Paleontology and cornets : thoughts on material cultural evolution », *Evolution education outreach*, n°4, 2011, p. 364-373.

ERMINE J.-L., *La gestion des connaissances*, Paris, Hermès Lavoisier, 2003.

ERMINE J.-L., CHAILLOT M., BIGEON P., CHARRETON B. & MALAVIEILLE D., « MKSM : méthode pour la gestion des connaissances », *Ingénierie des systèmes d'information*, vol. 4, n° 4, 1996, p. 541-575.

F

FANTOZZI G., NIEPCE J.-C. & BONNEFONT G., *Les céramiques industrielles. Propriétés, mise en forme et applications*, Paris, Dunod, 2013.

FEBVRE L., « Réflexions sur l'histoire des techniques », *Annales d'histoire économique et sociale*, n°36, 1935, p. 531-535.

FEENBERG A., *Pour une théorie critique de la technique*, Montréal, Lux Éditeur, 2014.

FEYNMAN R., *La nature de la physique*, Paris, Seuil, 1980.

— *Lumière et matière*, Paris, Seuil, 1987.

FOREST J., « Théorie des objets techniques et rationalité », dans AÏT-EL-HADJ S. et BOLY V. (dir.), *Les systèmes techniques, lois d'évolution et méthodologies de conception*, Paris, Lavoisier, 2009.

FOREST J. et FAUCHEUX M., « Expliquer l'inexplicable : Sciences de la conception et créativité », *Cahiers de RECITS*, 2007.

FOUCAULT M., *Les mots et les choses. Une archéologie des sciences humaines*, Paris, Gallimard, 1990 (1966).

FRANSEN M., LOKHORST G.-J. & VAN DE POEL I., « Philosophy of Technology », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2018 Edition).

G

GALILEI G., *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Paris, Seuil, 1992 (1632).

— *Le messager des étoiles*, Paris, Seuil, 1992 (1610).

GALLISON P., « Bubbles, sparks, and the postwar laboratory », in BROWN L. M. DRESDEN M. & HODDESON L. (eds.), *Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s*, Cambridge, Cambridge university press, 1989.

GILLE B., *Histoire des Techniques*, Paris, Gallimard, Encyclopédie de la Pléiade, 1978.

- « La notion de “système technique” (essai d'épistémologie technique) », *Technique et culture*, n°1, 1979, p. 8 -18.
 - « L'Encyclopédie, dictionnaire technique », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, tome 5, n°1, 1952.
 - « Note sur le progrès technique », *Revue d'histoire de la sidérurgie*, tome 7, n°3, 1966.
- GINGRAS Y., *Histoire des sciences*, Paris, Presses universitaires de France, 2018.
- GINGRAS Y. et GODIN B., « The experimenters' regress: from skepticism to argumentation », *Studies in History and Philosophy of Science*, n°33, 2002, p.137-152.
- GINGRAS Y., KEATING P. & LIMOGES C., *Du scribe au savant : Les porteurs du savoir de l'Antiquité à la révolution industrielle*, Paris, Presses universitaires de France, 2000.
- GIOVANENELLI F. & SABU-GRAZIATI L., *The Impact of space experiments on our knowledge of the physics of the universe*, Dordrecht, Springer, 2013.
- GOMEZ E. L. & GOMEZ H. L., « The World's first global telescope network at your fingertips », *Proceedings IAU symposium*, n° 260, 2009.
- GOULD S. J., *L'équilibre Ponctué*, Paris, Gallimard., 2012.
- GRAHAM-SMITH F., *Eyes on the Sky*, Oxford, Oxford university press, 2016.
- GRANGE J., « L'invention technique et théorique : la philosophie des sciences de G. Bachelard », *Imaginaire, industrie et innovation*, Centre culturel de Cerisy, 2015.
- GRAS A., *Fragilité de la puissance. Se libérer de l'emprise technologique*, Paris, Fayard, 2003.
- GRILLOT S., « Les instruments des observatoires français au 19ème siècle », *L'astronomie*, Juin 1986, p. 275-289.
- GROTHKOPF U., MEAKINS S. & BORDELON D., « Basic ESO publication statistics », 2018.
- GUCHET X., *Les Sens de l'évolution technique.*, Paris, Léo Scheer, 2005.
- « Évolution technique et objectivité technique chez Leroi-Gourhan et Simondon », *Appareil*, n°2, 2008.
[En ligne] URL : <http://journals.openedition.org/appareil/580>.
- GUEDJ M., *Itinéraire en histoire des sciences : des concepts et des objets pour des questions nouvelles*, manuscrit HDR, 2016.
- GUENON R., « *La crise du monde moderne*, Paris, Gallimard, 1994.

GUFFROY Y. & BONTEMS V., « La mécanologie : une lignée technologique francophone ? », *Artefact*, n°8, 2018, p. 255-280.

GUY T., « Compte-rendu de lecture : LE BOT F., DARD O., DIDRY C., DUPUY C. & PERRIN C. (dirs.), *L'Homme-machine I. Le travailleur-machine* », *Artefact*, n°9, 2019, p. 363-368.

GUY T. & BONTEMS V., « La généalogie des Micromégas », *Scintillations*, n°97-98, 2018, p. 7-9.

— « Relecture mécanologique de l'histoire des télescopes », *Artefact*, n°10, 2019.

GUY T., BONTEMS V. & MINIER V., « Quel laser pour Mars ? Analyse mécanologique d'une innovation extra-terrestre », *Nacelles. Passé et présent de l'aéronautique et du spatial*, n°6, 2019.

H

HERLEA A., « Deux histoires des techniques », *Revue d'histoire des sciences*, tome 35, n°1, 1982, p. 57-63.

HACKING I., *Representing and intervening*, New-York, Cambridge university press, 2010.

HAMEL J., « Kepler, Galileo, the telescope and its consequences », *Astronomische Nachrichten*, n°330, 2009, p. 526-535.

HARDY J. W., « Active optics: A new technology for the control of light », *IEEE Proceedings*, 66/110, 1977.

HATCHUEL A. & WEIL B., *L'expert et le système*, Paris, Economica, 1992.

HEBERT H., *Instruments scientifiques à travers l'Histoire*, Paris, Ellipse, 2004.

HEIDEGGER M., « La question de la technique », in *Essais et Conférences*, Paris, Gallimard, 1958.

HEISENBERG W., *La nature dans la physique contemporaine*, Paris, Folio, 2000.

HENDERSON R. & CLARK K., « Architectural innovation : The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms », *Administrative Science Quarterly*, n° 35, 1990, p. 9-30.

HERBERT S., *Les sciences de l'artificiel*, Paris, Gallimard, 2004 (1969).

HILAIRE-PEREZ L., *L'invention technique au siècle des Lumières*, Paris, Albin Michel, 2000.

HOEPPE G., « Working data together: the accountability and reflexivity of digital astronomical Practice », *Social studies of science*, n°44, 2014, p. 243-270.

HOTTOIS G., *Philosophies des sciences, philosophies des techniques*, Paris, Odile Jacob, 2004.

HUGHES T. P., « The evolution of large technological systems », in BIJKER W., HUGHES T. P. & PINCH T. (eds.), *The social construction of technological system*, Cambridge, MIT press, 2012 (1989).

HUME D., *Enquête sur l'entendement humain*, Paris, Librairie générale française, 1999 (1748).

HUMPHREYS P., *Extending ourselves*, New-York, Oxford university press, 2004.

I

IMPEY C., « Seeing the universe: on the cusp of technology », *ASP Conference Series*, n° 409, 2009.

J

JARRIGE F., *Technocritiques. Du refus des machines à la contestation des technosciences*, Paris, La découverte, 2014.

K

KANT E., *Critique de la raison pure*, Paris, Presses universitaires de France, 2012 (1781).

KIM S.-C. « Paper productivity of ground-based large optical telescopes from 2000 to 2009 », *Publications of the Astronomical Society of Australia*, n°28, 2011, p. 249-60.

KING H. C., *The history of the telescope*, New-York, Dover Publications Inc, 2003 (1955).

KISHNER S. J., GARDOPEE G. J., MAGIDA M. B. & PAQUIN R. A., « Large stable mirrors: a comparison of glass, beryllium, and silicon carbide », *Proceedings SPIE*, 1335, 1990.

KOCMANOVA A., DOCEKALOA M. & LUNACEK J., « PROMETHEE-GAIA Method as a support of the decision-making process in evaluating technical facilities », Springer, *IFIP Advances in information and communication technology*, 2013.

KOYRE A., *La révolution astronomique*, Paris, Les belles lettres, 2016 (1961).

— *Du Monde clos à l'univers infini*, Paris, Gallimard 1988 (1962).

KUCHARAVY D. & DE GUIO R., « Application of S-Shaped Curves » in CARSTEN G., LINDEMANN U. & RIED H. (eds.), *Current Scientific and Industrial Reality. TRIZ Future 07*, Kassel, Kassel university press, 2007.

KURKJIAN C. R. & PRINDLE W. R., « Perspectives on the history of glass composition », *Journal of the American ceramic society*, vol. 81, n° 4, 1998, p. 795-813.

KUHN T., *La révolution copernicienne*, Paris, Les belles lettres, 2016 (1957).

— *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 2008 (1962).

KUIPER G. P. & MIDDLEHURST B. M. (eds.), *Telescopes*, University of Chicago Press, 1960.

L

L'ESTRANGE TURNER G., *Scientific instruments (1500-1900). An introduction*, London, University of California press, 1998.

LABEYRIE A., « Resolved imaging of extra-solar planets with future 10–100 km optical interferometric arrays », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 118, 1996, p. 517-524.

LAFITTE J., *Réflexions sur la science des machines*, Paris, Librairie philosophique J. Vrin, 1972 (1932).

— « Sur la science des machines », *Revue de Synthèse*, tome 6, n°10, 1933.

LAND M. F. & FERNALD R. D., « The evolution of eye », *Annual review of neuroscience*, vol. 15, 1992, p. 1-29.

LARIVIERE V. & SUGIMOTO C. R., *Mesurer la science*, Montréal, Presses de l'université de Montréal, 2018.

LATOUR B., *Aramis, ou l'amour des techniques*, Paris, La découverte, 1992.

LATOUR B. & WOOLGAR S., *La Vie de Laboratoire*, Paris, La découverte, 1988.

LE BOT F., DARD O., DIDRY C., DUPUY C., PERRIN C. (dir.), *L'Homme-machine I. Le travailleur-machine*, L'Homme et la société, Paris, L'Harmattan, 2017.

LE MASSON P., WEIL B. & HATCHUEL A., *Les processus d'innovation. Conception innovante et croissance des entreprises*, Paris, Hermès Lavoisier, 2006.

— *Théorie, méthode et organisations de la conception*, Paris, Presses des Mines, 2014.

LE MOIGNE J., *La théorie du système générale*, Paris, Presses universitaires de France, 1977.

- LE ROUX R., « Influence des projets de théories des machines sur l'histoire des techniques chez Ducassé et Russo », 2013.
- « L'impossible constitution d'une théorie générale des machines ? », *Revue de Synthèse*, tome 130, 6^{ème} série, n°1, 2009, p. 5-36.
- LEMONIER P., « A Propos de Bertrand Gille : la notion de « système technique », *L'Homme*, tome 23, n°2, 1983, p. 109-115.
- LENA P., *Une histoire de flou. Miroirs, trou noirs et autres mondes*, Paris, Le Pommier, 2019.
- LENA P. & ROUAN D., *L'observation en astrophysique* (3^{ème} édition), Paris, CNRS éditions, 2008
- LEROI-GOURHAN A., *Evolution et Technique (1). L'homme et la matière*, Paris, Albin Michel, 2017 (1943).
- *Evolution et Technique (2) Milieu et Technique*, Paris, Albin Michel, 2015 (1945).
- *Le Geste et la Parole (1). Technique et Langage*, Paris, Albin Michel, 1964.
- LEVERINGTON D., *Observatories and telescopes of modern times*, Cambridge, Cambridge university press, 2017.
- LEVI-STRAUSS C., *Race et Histoire*, Mayenne, Gonthier, 1982.
- LLYOD G. E., *Une histoire de la science grecque*, Paris, Seuil, 1999.
- LOEVE S., « La Loi de Moore : enquête critique sur l'économie d'une promesse », in AUDETAT M. (dir.), *Sciences et technologies émergentes : pourquoi tant de promesses ?*, Paris, Hermann, 2015.
- LOEVE S, GUCHET X. & BENSAUDE-VINCENT B. (eds.), *French Philosophy of Technology*, Cham, Springer, 2018.
- LONGO G. & CALUDE G., « The deluge of spurious correlations in big data », *Foundations of Science*, vol. 22, n°3, 2016, p. 595-612.

M

- MARCUSE H., *L'Homme unidimensionnel. Études sur l'idéologie de la société industrielle*, Paris, Editions de Minuit, 1968.
- MARX K., *Le capital* (Livre 1), Paris, Presses universitaires de France, 2009 (1867).

- *Contribution à la critique de l'économie politique*, Texte établi par BONNET A., GIARD V. & BRIERE E., 1909 (1859).
- MAUSS M., « Les techniques du corps », *Journal de Psychologie*, vol. 32, n°3, 1936.
- MAUNOURY J.-L., *La genèse des innovations. La création technique dans l'activité de la firme*, Paris Presses universitaires de France, 1968.
- MAUREL A., *Optique géométrique : cours*, Paris, Belin, 2002.
- MERTON R. K., *The sociology of science : theoretical and empirical investigation*, Chicago, University of Chicago press, 1973.
- MICHEL H., « Les tubes optiques avant le télescope », *Ciel et Terre*, vol. 70, 1954.
- MICHELSON A. A. & PEASE F. G., « Measurement of the diameter of a Orionis with the interferometer », *Astrophysical Journal*, n° 53, 1921, p. 249–259.
- MILLER N. J., MATTHEW P. D. & DUNCAN B. D., « Optical Sparse Aperture Imaging », *Applied Optics*, *Optical Society of America*, n°46, 2007.
- MINIER V. & BONTEMS V., « Simondon et l'innovation dans les machines spatiales de l'astronomie » in BONTEMS V. (dir.), *Gilbert Simondon ou l'invention du futur*, Colloque de Cerisy, Paris, Klincksieck, 2016, p. 147-159.
- « L'astrophysique : l'objet-image et la culture numérique », in STIEGLER B. (dir.), *La vérité du numérique : Recherche et enseignement supérieur à l'ère des technologies numériques*, FYP éditions, 2018, p. 63-79.
- « Investiguer / Diagrammatiser / Inventer / Digitaliser », *ExplorNova : inventer le futur*, Nantes, ExplorNova Studio, 2016.
- MINIER V., BONNET R.-M., BONTEMS V., DE GRAAUW T., GRIFFIN M., HELMICH F., PILBRATT G. & VOLONTE S., *Inventing a space mission. The story of the Herschel Space Observatory*, Cham, Springer, 2017.
- MOKYR J., *The Lever of riches : technological creativity and economic progress*, Oxford, Oxford university press, 1990.
- « Evolution and technological change : a new metaphor for economic history ? », in FOX R. (ed.), *Technological change. Methods and themes in the history of technology*, Hardwood, 1996.
- MOLES A., *Créativité et méthodes d'innovation*, Paris, Fayard, 1970.

— « Cybernétique, information et structures économiques », *Les Cahiers de la publicité*, n°19, 1968.

MONNIER J. D., « Optical interferometry in astronomy », *Reports on progress in physics*, vol. 66, n°5, 2003.

MOORE G.E., « No exponential is forever : but “forever” can be delayed ! », *IEEE International Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers*, 2003.

MUMFORD L., *Technique et Civilisation*, Paris, Editions Parenthèses, 2016 (1934).

N

NARAYANAMURTI V. & ODUMOSU T., *Cycles of invention and discovery*, Cambridge, Harvard university press, 2016.

NELSON J., « Segmented mirror telescopes », *Optics in Astrophysics*, 61–72, 2006.

NEWTON I., *Traité d'optique*, Paris, Gauthier-Villars, 1955 (1704).

NIETZSCHE F., *Par-delà bien et mal*, Paris, Gallimard, 1971 (1886).

NOSENGO N., *L'extinction des technosaures. Histoires de technologies oubliées*, Paris, Belin, 2010.

O

O'CONNOR T. & WONG H.Y., « Emergent Properties », in ZALTA E. N. (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2015.

ORTEGA Y GASSET J., *Méditations sur la technique*, Paris, Allia, 2017 (1933).

P

PARROCHIA D., « La conception spatiale », in *La conception technologique*, Paris, Hermès, 1998.

— *La forme des crises : logique et épistémologie*, 2008.

PASSERON J.-C. & REVEL J. (dir.), *Penser par cas*, Paris, Editions de l'EHESS, 2005.

PEDROTTI F. L. PEDROTTI L. M. & PEDROTTI L. S., *Introduction to optics* (3rd edition), Cambridge, Cambridge university press, 2018.

PIAGET J., *Introduction à l'épistémologie génétique*, Paris, Presses universitaires de France, 1950.

PITT J.C., *Doing philosophy of technology. Essays in a pragmatic spirit*, Dordrecht, Springer, 2011.

PITT-RIVERS A. H., « Typological Museums, as exemplified by the Pitt Rivers Museum in Oxford and his provincial museum in Farnham Dorset », *Journal of the Society of Arts*, n° 40, 1891.

PLATON, *Théétète*, Paris, Flammarion, 1994.

POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1968 (1902).

PRUD'HOMME J., DORAY P. & BOUCHARD F. (dir.), *Sciences, technologies et sociétés de A à Z*, Montréal, Presses de l'université de Montréal, 2015.

PUTNAM H., *Raison, vérité et histoire*, Paris, Cambridge university press, 1981.

Q

QUINET C., « Herbert Simon et la rationalité », *Revue française d'économie*, vol. 9, n°1, 1994, p. 133-181.

R

RACINE R., « The historical growth of telescope aperture », *Publications of the astronomical society of the pacific*, vol. 116, n° 815, 2004, p. 77-83.

RAGAB-ZOUAOUA D., *Lois d'évolution de TRIZ pour la conception des futures générations des produits : proposition d'un modèle*, manuscrit de thèse, 2012.

ROSHDI R. & MORELON R., *Histoire des sciences arabes (1). Astronomie, théorique et appliquée*, Paris, Seuil, 2003.

— *Histoire des sciences arabes (2). Mathématiques et physique*, Paris, Seuil, 2003.

— *Histoire des sciences arabes (3). Technologie, alchimie et sciences de la vie*, Paris, Seuil, 2003.

REISS T., « Espace de la pensée discursive : Le cas Galilée et la science classique », *Revue de synthèse*, n° 98, 1977, p. 5-47.

RENAN E., *L'avenir de la science. Pensées de 1848*, Paris, Calmann Lévy, 1890.

REY J. J. et al., « A deployable, annular, 30m telescope, space-based observatory », *NGAS*, 14-1062, 2014.

ROBERT W. J., « Fraunhofer and the Great Dorpat Refractor », *American Journal of Physics*, vol. 35, n°4 1967, p. 344-350.

ROGERS E., *Diffusion of innovations*, New-York, Free Press, 2003 (1962).

ROSA H., *Aliénation et accélération. Vers une théorie critique de la modernité tardive*, Paris, La découverte, 2012.

ROSENBERG N., *Inside the black box : technology and economics*, Londres, Cambridge university press, 1982

ROSMORDUC J., *Histoire des Sciences et des Techniques*, Nantes, CRDP de Bretagne, 1997.

ROTHBART D., *Philosophical instruments. Minds and tools at work*, Chicago, University of Illinois press, 2007.

RUSSO F., *Nature et méthode de l'histoire des sciences*, Paris, Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, 1984.

— *Introduction à l'Histoire des Techniques*, Paris, Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, 1986.

— « Le système des sciences et sa structure », *Revue des questions scientifiques*, 1961 (avril).

S

SAHAL D., *Patterns of Technological Innovation*, Londres, Addison Wesley Longman Publishing, 1981.

SCHUSTER J. A. & TAYLOR A. B., « Blind trust : the gentlemanly origins of experimental science », *Social Studies of Science*, n°27, 1997, p. 503-536.

SELIN H. (ed.), *Astronomy accros culture : the history of non-western astronomy*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000.

SENNET R., *Ce que sait la main. La culture de l'artisanat*, Paris, Albin Michel, 2010.

SERIS J.-P., *La Technique*, Paris, Presses universitaires de France, 2013.

SERRES M., *Eléments d'histoire des sciences*, Paris, Bordas, 1989.

SHAFER D. R., « Four-mirror unobscured anastigmatic telescopes with all-spherical surfaces », *Applied Optics*, vol. 17, n°7, 1978.

SHAPIN S. & SCHAFFER S., *Leviathan et la pompe à air*, Paris, La Découverte, 1993.

- SHINN T. & RAGOUE T. P., *Controverses sur la Science. Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*, Paris, Editions Raisons d'Agir, 2005.
- « Formes de division du travail scientifique et convergence technico-instrumentale », *Revue française de sociologie*, vol. 41, n°3, p. 447-473.
- SHELLEY M., *Frankenstein ou le Prométhée moderne*, Paris, Gallimard, 2015 (1818).
- SIMON H., *The science of the artificial*, Cambridge, The MIT press, 1969.
- SIMONDON G., *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Millon, 2005.
- *L'invention dans les Techniques. Cours et conférence*, Paris, Le Seuil, 2005.
- *Imagination et invention*, Paris, Presses universitaires de France, 2008.
- *Communication et Information. Cours et Conférence*, Chatou, Editions de la transparence, 2010
- *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 2012 (1958).
- *Sur la technique*, Paris, Presses universitaires de France, 2014.
- *La résolution des problèmes*, Paris, Presses universitaires de France, 2018.
- SIMONDON G. & LE MOYNE J., « Entretien sur la mécanologie », *Revue de synthèse*, Tome 130, n°1, 2009, p. 103-132.
- SINGER C. J., *A History of Technology* (8 tomes), Oxford, Clarendon press, 1954-1984.
- SMITH R. C., *Observational astrophysics*, Cambridge, Cambridge university press, 1995.
- SMITH R. W., « The history of space astronomy: reflections on the last three decades », in ORCHISTON W. (ed.), *The new astronomy: opening the electromagnetic window and expanding our view of planet Earth*, Dordrecht, Springer, 2005.
- *The space telescope*, Cambridge, Cambridge university press, 1993.
- SMITH R. W. & TATAREWICZ J. N., « Counting on inventions: devices and black boxes in very big science », *Osiris*, n°9, 1994, p. 101-123.
- SPENGLER O., *L'Homme et la Technique*, Paris, Gallimard, 1969 (1931).
- STACK M. & GARTLAND M. P., « Path creation, path dependency, and alternative theories of the firm », *Journal of economic issues*, vol. 37, n°2, 2003, p. 487-494.

STAHL P., Preliminary cost model for space telescopes », *SPIE optical engineering proceedings*, vol. 7436, 2009.

STAHL P. & al., « Multivariable parametric cost model for ground optical telescope assembly », *Optical Engineering*, vol. 44, n°8, 2005.

STRASSER B., « Totems de laboratoire, microscopes électroniques et réseaux scientifiques : l'émergence de la biologie moléculaire à Genève (1945-1960) », *Revue d'histoire des sciences*, tome 55, n°1, 2002, p. 5-44.

— « Data-driven sciences: From wonder cabinets to electronic databases », *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, n°43, 2012, p. 85-87.

STRASSER B. et BÜRGI M., « L'histoire des sciences, une histoire à part entière ? », *SZG/RSH/RSS*, n°55, p. 1-16.

STRELNITSKI V., « Masers, lasers and the interstellar medium », *Astrophysics and space science*, vol. 252, 1997, p. 279-287.

SUPIOT A., *La gouvernance par les nombres*, Paris, Fayard, 2015.

STIEGLER B., Temps et individuations technique, psychique et collective dans l'œuvre de Simondon », *Intellectica*, n°26-27, 1998, p. 241-256.

— *La Technique et le Temps*, Paris, Fayard, 2018.

T

TEMKIN I. & ELREDGE N., « Phylogenetics and material cultural evolution », *Current anthropology*, n°48, 2007, p. 146-153.

TINLAND F., La technique comme médiation et comme système, in TINLAND F., BRETON P. & RIEU A.-M. (dirs.), *La techno-science en question*, Paris, Champ Vallon, 1993.

TRIMBLE V., « Productivity and impact of large optical telescopes », *Scientometrics*, vol. 36, n°2, 1996, p. 237-246.

TRIMBLE V. & CEJA J. A., « Productivity and impact of astronomical facilities: three years of publications and citation rates », *Astronomische Nachrichten*, vol. 329, n°6, 2008, p. 632-647.

TRIMBLE V. & ZAICH P., « Productivity and impact of radio telescopes », *Publications of the astronomical society of the pacific*, vol. 118, n°842, 2006, p. 933-938.

TRIMBLE V., ZAICH P. & BOSLER T., « Productivity and impact of space-based astronomical facilities », *Publications of the astronomical society of the pacific*, vol. 118, n°842, 2006, p. 651-655.

— « Productivity and impact of optical telescopes », *Publications of the astronomical society of the pacific*, vol. 117, 2005, p. 111-118.

TUOMI Ikka, « The lives and the death of the Moore's Law », 2002.

[En ligne] URL : <http://www.meaningprocessing.com/personalPages/tuomi/articles/>

V

VAN HELDEN A., « The Invention of the telescope », *Transactions of the american philosophical society*, LXVII-4, 1977.

VAN HELDEN A. & HANKINS T. L., « Instruments in the history of science », *Osiris*, n°9, 1994, p. 1-6.

VAN HELDEN A., DUPRE S., VAN GENT R. & ZUIDERVAART H. (eds.), *The origins of the telescope*, Amsterdam, Knaw press, 2010.

VERDET J.-P., *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, 1990.

VIGROUX L., « Astronomy, technology development and industry », in *The role of astronomy in society and culture*, 2009.

W

WALDROP M., « More than Moore », *Nature*, vol. 530, 11 février 2016, p. 144-147.

WALKER C. B., *Astronomy before the telescope*, Londres, St. Martin's press, 1997.

WATSON F., *Stargazer. The life and times of the telescope*, Cambridge, Da Capo press, 2004.

WEBER M., *L'éthique protestante et l'esprit du capitalisme*, Paris, Pocket, 1994.

WEIL B., HATCHUEL A. & LE MASSON P., *Théories, méthodes et organisation de la conception*, Paris, Presses des Mines, 2014.

WEINBERG A. M., « Impact of large-scale science on the United States », *Science*, vol. 134, n°3473, 1961, p. 161-164.

WIENER N., *La cybernétique : Information et régulation dans le vivant et la machine*, Paris, Seuil, 2014 (1948).

— *Cybernétique et société*, Paris, Seuil, 2014 (1950).

WIENER L., *Autonomous technology. Technics-out-of-control as a theme in political thought*, Cambridge, The MIT press, 1977.

WILSON R., *Reflecting telescope optics*, New-York, Springer, 2003.

WOUTERS P., « Aux origines de la scientométrie. La naissance du Science Citation Index », *Actes de la recherche en sciences sociales*, n°164, 2006, p. 11-22.

Z

ZHANG Y. et ZHAO Y., « Astronomy in the Big Data era », *Data science journal*, n°14, 2015, p. 1-9

ZIRKER J. B., *An acre of glass : a history and forecast of the telescope*, Johns Hopkins university press, 2005.

ZWICKY F. & WILSON A. (eds), *New methods of thought and procedure*, Berlin, Springer, 1967.

Annexe A

A.1. Bibliométrie et grands observatoires

Une des ambitions affichées de la génétique technique est la réconciliation des pratiques internalistes et externalistes en histoire des techniques. Si notre méthodologie s'apparente davantage aux approches internalistes, c'est en partie à cause de l'échelle d'analyse à laquelle elle opère. Une des pistes que nous avons explorées afin d'incorporer le point de vue externaliste à une étude à grande échelle des évolutions, repose sur l'analyse bibliométrique des bases de données d'articles scientifique. La bibliométrie¹ se définit comme l'analyse quantitative des caractéristiques des documents publiés par les chercheurs (articles, livres, actes de colloques et de conférences ...) et passe par l'évaluation de plusieurs indicateurs (nombre de citations, facteur d'impact...):

La prémisse de la bibliométrie est que les nouvelles connaissances sont incorporées dans la littérature scientifique et qu'en mesurant les caractéristiques de cette littérature, on mesure certains attributs de la production des connaissances².

Les premiers travaux remarquables dans l'analyse bibliométrique des publications astronomiques remontent aux années 1980 et sont l'œuvre de l'astrophysicien Helmut A. Abt³. Ils reposent sur des postulats issus du fonctionnalisme de Robert Merton⁴ et ont été rendus possibles par la création et le développement de l'*Institute for Scientific Information* (ISI) par Eugene Garfield dans les années 1960s.

The idea that science has a rewards structure that corresponds reasonably well to the value of the work and that one can be quantitative about and how well the science is done are older even than the senior author and are associated with the name of one of the giants of 20th century sociology, Robert K. Merton (e.g., Merton 1942, 1969). Counting citations to a given

¹ Pour un panorama général de l'activité, nous renvoyons à l'excellent ouvrage (disponible en accès libre): Vincent Larivière & Cassidy R. Sugimoto, *Mesurer la science*, Montréal, Presses de l'université de Montréal, 2018.

² Vincent Larivière, « Bibliométrie » in Julien Prud'homme, Pierre Doray & Frédéric Bouchard (dir.), *Sciences, technologies et sociétés de A à Z*, Montréal, Presses de l'université de Montréal, 2015, p. 27.

³ Helmut A. Abt, « Some trends in American astronomical publications », *Publications of the astronomical society of the pacific*, vol. 93, n° 553, 1981, p. 269-272.

⁴ Robert K. Merton, « Science and Technology in a Democratic Order », *Journal of Legal and Political Sociology*, 1942, repris, et plus connu, sous le titre de « The normative structure of science » in *The sociology of science : theoretical and empirical investigation*, Chicago, University of Chicago Press, 1973.

paper in later papers as part of the quantitative process arose with Eugene Garfield's development in 1964 of the Science Citation index (SCI), which he has described (Garfield 1979)⁵.

D'un « simple » contage de citation à ses débuts, la bibliométrie (souvent synonyme de scientométrie) à évoluer et développer des indicateurs plus complexes (*cross-citation*, cartes de co-citation...) rendus possibles là encore par l'essor des moyens informatiques. Car si « sans le recours aux ordinateurs, un index des citations scientifiques n'aurait pas été possible⁶ », sans eux, il eut été tout autant impossible d'analyser les immenses bases de données d'articles scientifiques telles que le *Web of Science* (WoS) de Thomson Reuters (anciennement ISI) et la base *Scopus* de Elsevier. L'analyse de ces bases de données par le recours à un certain nombre d'indicateurs, se veut un moyen « objectif » d'évaluer les pratiques scientifiques. Cependant, toute évaluation quantitative possède une large part de subjectivité, du fait même de la définition des critères à évaluer. Plus raisonnablement, considérons que la bibliométrie est un moyen, parmi d'autres, d'étudier les impacts *sociaux*, au sens large, des publications scientifiques.

Dans le cadre de notre thèse, nous avons souhaité mobiliser les outils bibliométriques afin de réaliser une certaine cartographie du champ disciplinaire astronomique, étudier l'importance des observatoires astronomiques au sein de ce champ et analyser l'évolution de cette importance au cours du temps. Ces travaux, modestes dans leurs ambitions comme dans leurs résultats, ont été réalisés dans le cadre d'une mission d'un mois effectuée au sein de l'École de Bibliothéconomie et des Sciences de l'Information (EBSI) de l'Université de Montréal (UdeM).

Nos données sont issues du *Thomson Reuters' Web of Science* (WoS) et de son *Science Citation Index Expanded*. Elles couvrent la période allant de 1991 (année à partir de laquelle les résumés sont ajoutés aux métadonnées des articles déposés) à 2016. Chaque article indexé par le WoS s'accompagne de nombreux champs « descripteurs-classificateurs » (plus de 330 à ce jour) : année de publication, auteur(s), revue, discipline, spécialité, institution(s), pays ...

La classification disciplinaire proposée par le WoS s'accompagne cependant d'une particularité qui a été la source d'un certain nombre de problèmes : une revue ne peut appartenir qu'à une unique

⁵ Virginie Trimble, Paul Zaicht & Tammy Bosler, « Productivity and impact of optical telescopes », *Publications of the astronomical society of the pacific*, n°117, 2005, p. 111.

⁶ Paul Wouters, « Aux origines de la scientométrie. La naissance du *Science Citation Index* », *Actes de la recherche en sciences sociales*, n°164, 2006, p. 11-22.

discipline. Cela signifie qu'un article traitant d'astronomie mais publié dans *Science* (revue étiquetée « recherche biomédicale ») ne sera pas compté, *a priori*, comme tel ; et inversement, un article publié dans *Astronomy and Astrophysics*, mais traitant de biologie, sera compté comme un article d'astrophysique. Par souci de simplicité, nous avons souhaité conserver cette classification. On peut supposer que les articles non référencés et ceux référencés à tort se compensent ; dans la mesure où nous allons nous intéresser à l'évolution relative de certaines publications, cette imprécision sur le volume absolu des publications ne doit pas être bloquante.

Nous avons ensuite sélectionné les 100 *principaux* observatoires astronomiques (50 au sol et 50 dans l'espace, toutes longueurs d'onde confondues), et avons fait ressortir du WoS tous les articles mentionnant ces télescopes (ou leur acronyme) dans le titre et/ou dans l'abstract. Cela donne un premier ensemble qu'il a fallu *nettoyer* afin de retirer les articles ne traitant pas d'astronomie (notamment ceux issus des acronymes comme MOST, ISO, FAST...). La solution retenue, radicale et imparfaite, a été de ne sélectionner que les articles dont la discipline étiquetée était *astronomy and astrophysics* (selon la terminologie du WoS, il s'agit en fait de la *spécialité*, la discipline étant la méta catégorie « science de la Terre et de l'espace »). Un tel nettoyage s'est avéré nécessaire de part l'écart bien trop marqué entre le nombre de publication étiquetées *astronomy and astrophysics* (n=244.288), et le nombre d'articles mentionnant un de nos observatoires (n=1.433.818). Si des articles mentionnant nos télescopes peuvent effectivement se retrouver rattachés à d'autres spécialités (ingénierie, physique nucléaire, météorologie ...), un écart aussi important traduit un problème dans l'étape de sélection des données.

Nous avons tout d'abord souhaité savoir comment se répartissait les 244.288 articles publiés dans une revue d'astronomie entre 1991 et 2016 selon la revue à laquelle ils sont rattachés (Fig. 1) :

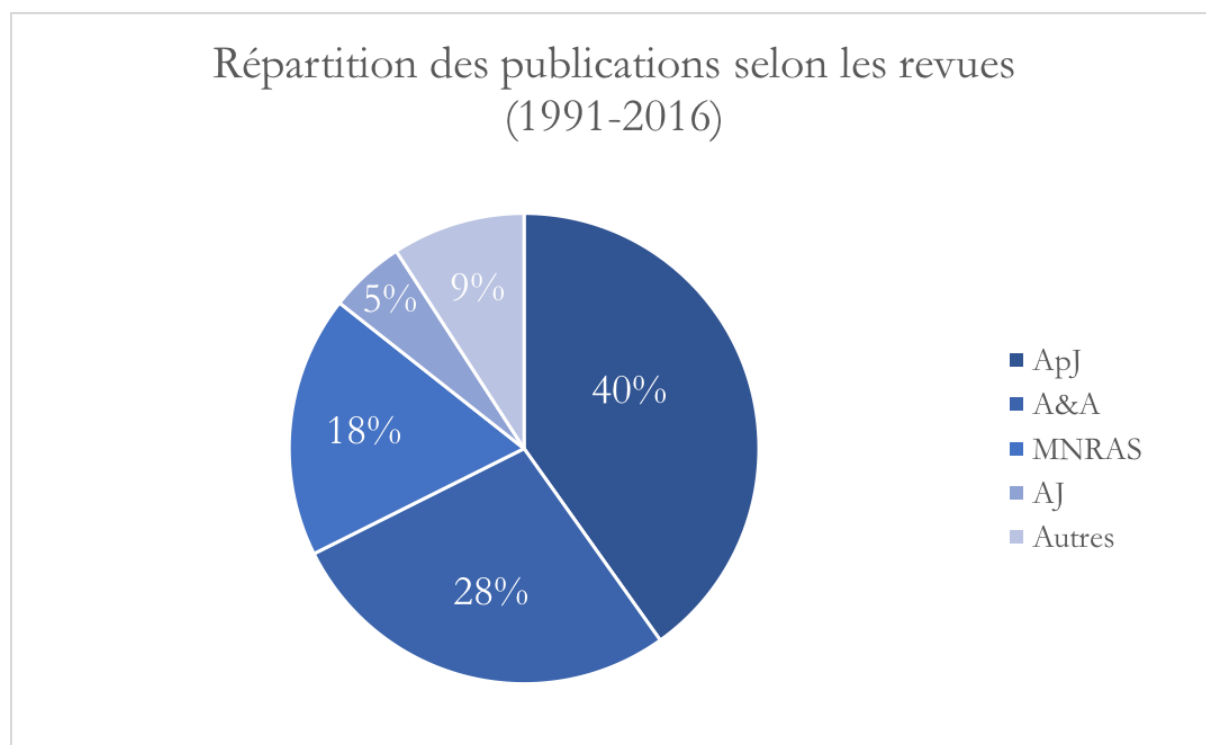


Figure 1- Distribution des publications selon la revue d'origine (1991-2016).
(© Thomas Guy)

La situation, bien connue des membres de la communauté, s'apparente à un oligopole, tant les quatre principales revues de la discipline captent une fraction importante du nombre de publication. Il s'agit, dans l'ordre, de :

- *The Astrophysical Journal* (ApJ), édité par IOP Publishing (USA) ;
- *Astronomy & Astrophysics* (A&A), publié par EDP Science (France) pour le compte de l'ESO (*European Southern Observatory*) ;
- *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* (MNRAS), éditée par John Wiley & Sons (UK) pour le compte de la *Royal Astronomical Society* ;
- *The Astronomical Journal* (AJ), publiée par l'université de Chicago (USA) pour le compte de l'*American Astronomical Society*.

Ces quatre revues représentent 91% des publications en astronomie et astrophysique (dont 40% pour le seul *Astrophysical Journal* et ses suppléments). Les 54 autres revues référencées par le WoS se partagent les 9% restant.

Après les revues, nous nous sommes intéressés à l'autre « extrémité » de la chaîne de publication, à savoir la répartition des publications selon le pays référencé (Fig. 2) - et qui donc finance les

travaux des chercheurs conduisant aux publications en question. Un même article peut être rattaché à plusieurs pays (du fait des collaborations), ce qui explique que nous travaillons ici avec 499.682 articles (ce qui fait en moyenne deux pays par publication). Nous obtenons la répartition suivante :

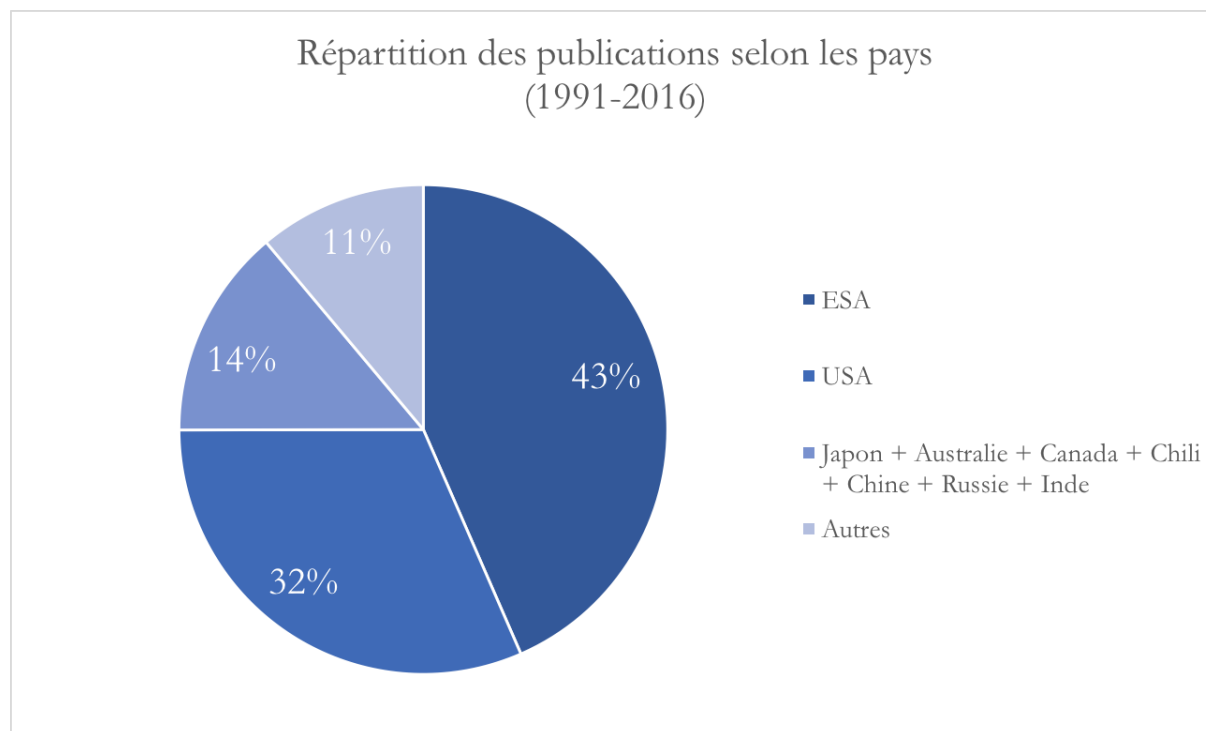


Figure 2 - Distribution des publications selon le pays d'origine (1991-2016).
(© Thomas Guy)

A nouveau, la situation s'apparente à un oligopole. L'Europe et les Etats-Unis, à travers leurs agences spatiales respectives que sont l'ESA⁷ et la NASA, sont responsables des $\frac{3}{4}$ des publications en astronomie et astrophysique. Le quart restant est partagé presque pour moitié entre les autres puissances spatiales (*anciennes* comme la Russie, *nouvelles* comme le Japon, la Chine et l'Inde, ou *associées* car disposant d'observatoires au sol performant, comme pour l'Australie, le Canada et surtout le Chili) et les 110 autres pays (qui ne représentent que 11% du volume total). Malgré les collaborations entre pays et institutions, les publications en astronomie et astrophysique restent majoritairement le fait d'une douzaine de pays (même au sein de l'ESA, les disparités sont très importantes).

⁷ Par ordre décroissant du nombre de publications, l'ESA (*European Space Agency*) est composée des 23 « pays » suivants : Italie, Allemagne, Angleterre, France, Espagne, Pays-Bas, Suisse, Pologne, Ecosse, Suède, Danemark, Belgique, Finlande, Irlande, Grèce, Autriche, Portugal, Pays de Galle, Hongrie, République Tchèque, Irlande du Nord, Ukraine, Norvège

La répartition selon les institutions était le troisième et dernier aspect de la cartographie que nous avons envisagée. Cependant, celle-ci s'est révélée être trop fragmentaire pour être réellement significative (pour donner une idée, on compte 105 institutions à plus de 1000 publications).

Les observatoires « sélectionnés » pour les paragraphes ci-dessous sont les suivants :

- Observatoires Gamma :
 - au sol H.E.S.S, MAGIC, VERITAS ;
 - spatial : Fermi, INTEGRAL, Swift ;
- Observatoires X : ROSAT, ASCA, Chandra, XMM-Newton, NuStar ;
- Observatoires Visible :
 - au sol : MMT, HET, Subaru, VLT, Keck, AAT, CHFT, Gemini ;
 - spatial : Corot, Euclid, Gaia, Hipparcos, Hubble, Kepler MOST ;
- Observatoires IR : Akari, IRAS, Spitzer, Herschel JWST ;
- Observatoires Radio : Arecibo, ATCA, Effelsberg, FAST, GMRT, LOFAR, VLA, VLBA, Westerbork.

Afin de mesurer l'importance relative des dispositifs observationnels en astronomie et astrophysique, nous présentons (Tab. 1) l'évolution du nombre d'articles publiés dans une revue étiquetée A&A ainsi que l'évolution du nombre d'articles mentionnant un des télescopes listés ci-dessus :

Tableau 1 - Evolution du nombre d'articles mentionnant un des télescopes sélectionnés et du nombre d'articles A&A pour la même année.
(© Thomas Guy)

Année	Articles télescopes	Articles A&A	Année	Articles télescopes	Articles A&A	Année	Articles télescopes	Articles A&A
1991	813	9921	2000	2838	13299	2009	5380	16858
1992	1001	9635	2001	3329	14437	2010	5615	17062
1993	1311	11076	2002	3375	14374	2011	5830	18354
1994	1596	11950	2003	3710	14882	2012	5991	18793
1995	1800	11954	2004	4145	15830	2013	5956	18692
1996	2155	12781	2005	4207	15175	2014	5904	19368
1997	2157	13079	2006	4438	15670	2015	6087	20067
1998	2514	13444	2007	4821	15346	2016	6175	20144
1999	2890	13425	2008	4691	16300			

L'inflation du nombre d'article n'est pas spécifique à l'astronomie et celui-ci est largement documenté pour la science en général. En revanche, il est intéressant de noter le fait que de plus en plus d'articles font références à au moins un observatoire (Fig.3) :

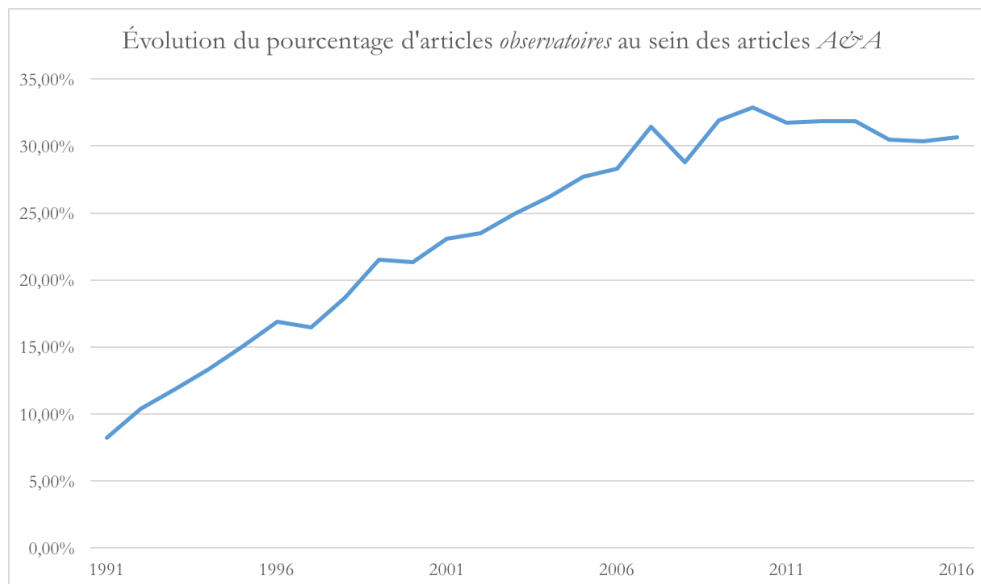


Figure 3 - Évolution du pourcentage d'articles mentionnant un des observatoires listés précédemment au sein de la catégorie des articles étiquetés « astronomie et astrophysique ».
(© Thomas Guy)

Nous nous intéressons maintenant aux articles mentionnant un des observatoires de notre liste afin de voir comment se structure le sous-champs de l'astronomie observationnelle

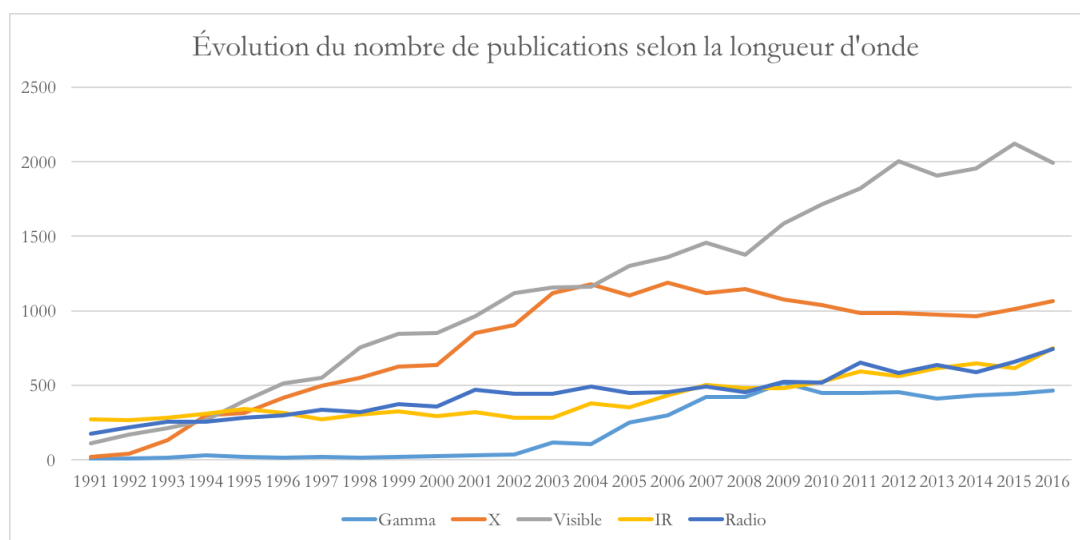


Figure 4 - Répartition des publications selon la longueur d'onde étudiée par l'observatoire.
(© Thomas Guy)

- Le premier constat que l'on peut faire est la prédominance de l'astronomie en longueur d'onde visible. Les observatoires sont plus nombreux et produisent un grand nombre de données, aussi bien en imagerie qu'en photométrie et spectrographie.
- La deuxième observation, plus surprenante, concerne l'importance des observations dans les X.
- On observe une relative stabilité de la production en IR et Radio.
- Enfin, la « dernière fenêtre astronomique » correspondant aux rayonnements Gamma, après une période de forte expansion, s'est stabilisée, presque au niveau des fenêtres IR et Radio.

Sélectionner un domaine de longueur d'onde permet de mettre en lumière d'autres phénomènes. Dans le domaine visible par exemple, séparer les publications issues des observatoires au sol de celles issues des observatoires spatiaux permet de mettre en lumière la complémentarité - bien davantage que la concurrence - qui existe entre la *ground-based astronomy* (Fig. 4) et la *space-based astronomy* (Fig. 5) :

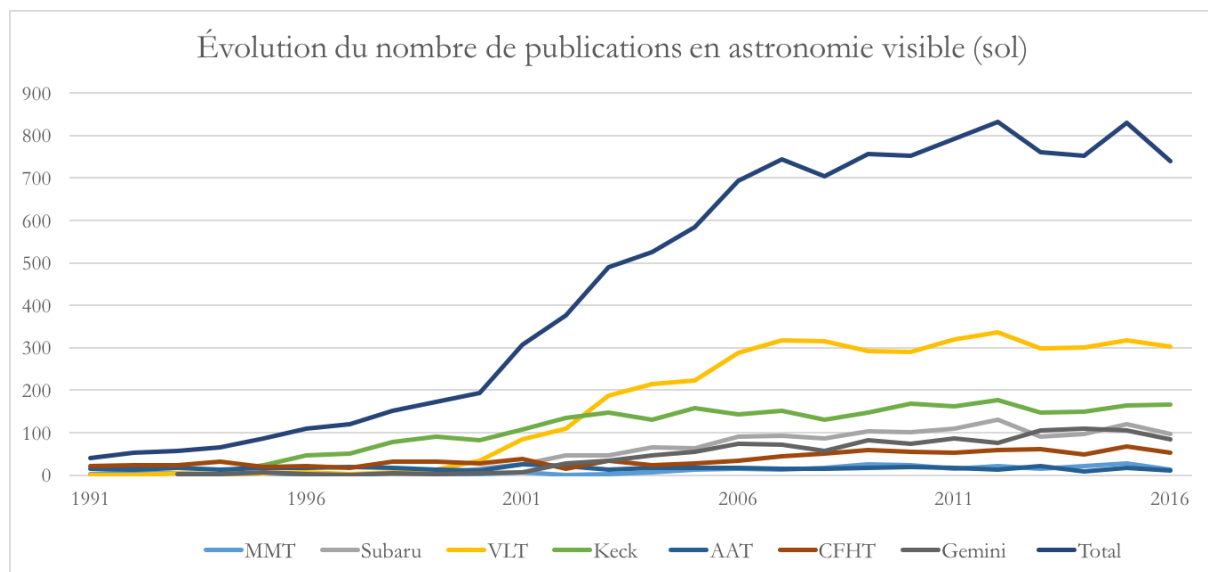


Figure 5- Évolution du nombre de publications des observatoires visibles au sol.
(© Thomas Guy)

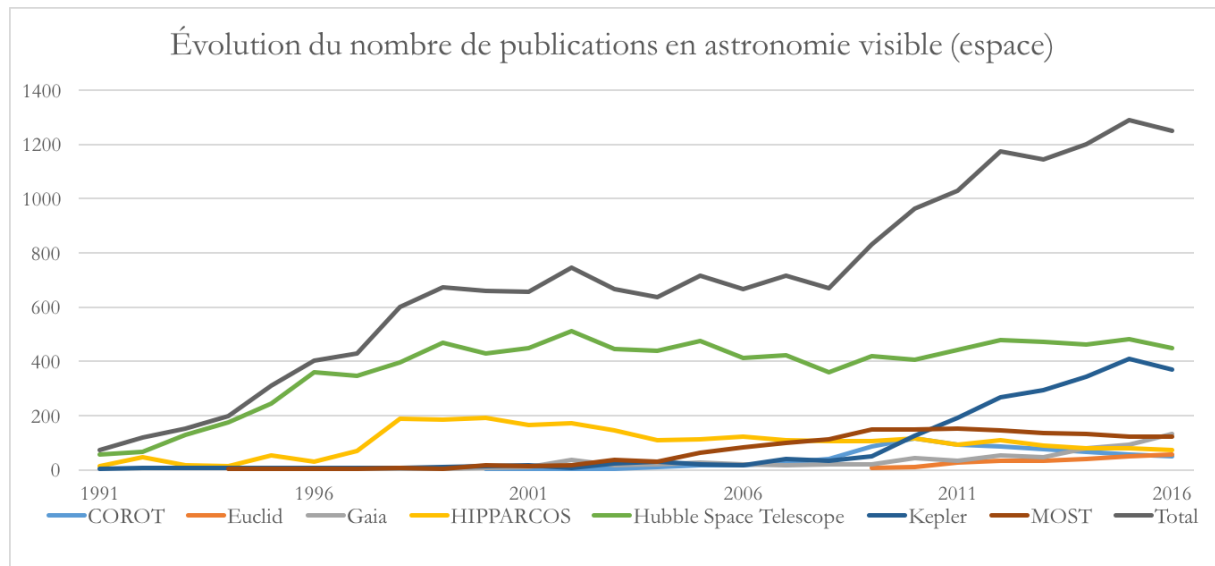


Figure 6 - Évolution du nombre de publications des observatoires visibles dans l'espace.
(© Thomas Guy)

Dans le domaine des X (Fig. 6), spatial par définition, c'est la durée de vie limitée des missions qui s'illustre spontanément. En effet, le nombre de publication liées à un observatoire en particulier a tendance à diminuer lorsque le successeur est mis sur orbite. On constate en outre – et peut-être est-ce spécifique à ce domaine particulier qu'est l'astronomie X – la compétition entre l'ESA et la NASA, les deux entités dominantes du champ :

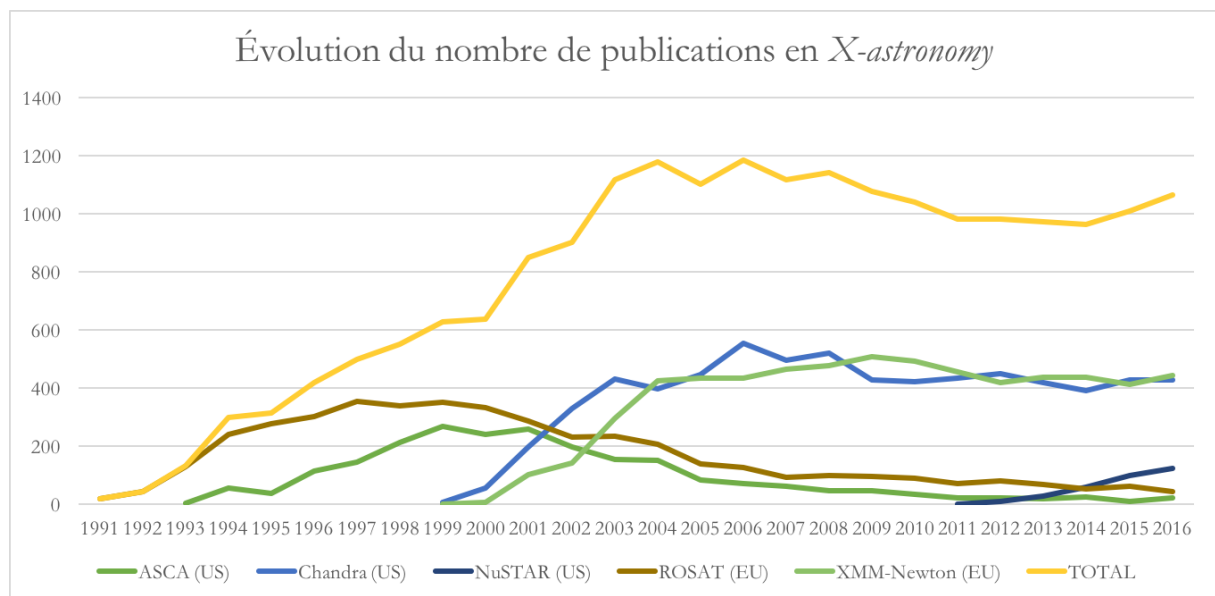


Figure 7 - Évolution du nombre de publication des observatoires à rayons X.
(© Thomas Guy)

Ces premiers résultats se veulent relativement modestes et n'ont qu'un lien indirect avec le reste de cette thèse. Cependant, ils donnent un bon aperçu des possibilités offertes par une étude bibliométrique à grande échelle de la production scientifiques (mesurée par le nombre de publications) des observatoires astronomiques. Ces derniers ont d'ailleurs eux-mêmes recours à ce genre de travaux⁸, bien qu'avant tout à des fins d'évaluation ou de communication. De notre côté, nous estimons que ces études à grande échelle peuvent compléter notre méthode mécanologique en ajoutant une dimension sociologique à l'évolution des observatoires astronomiques.

⁸ Uta Grothkopf, Silvia Meakins, Dominic Bordelon, « Basic ESO publication statistics », ESO Library Garching, 2018.

A.2. Entretien avec le responsable du Segment sol de la mission Euclid

Afin de discuter certaines de nos conclusions, nous avons effectué un entretien semi-directif, d'une durée d'une heure, avec Marc Sauvage (CEA-DAP), responsable du segment sol de la mission spatiale Euclid. Sa retranscription est l'objet de cette annexe.

T. Guy : Une des conclusions qui ressort de l'étude de l'évolution des observatoires est la diminution de l'importance accordée aux propriétés matérielles des instruments scientifiques, en particulier des télescopes, au profit de leurs capacités informationnelles. Est-ce qu'à l'instar de ce qu'on a pu appeler la *Big Science* pour le XX^e siècle, ne sommes-nous pas entrés dans une ère de la *Big Data Science* ?

M. Sauvage : Je pense que c'est vrai mais je n'irai pas jusqu'à dire que cela efface la partie « invention technique » de l'objet. Celle-ci saute moins aux yeux car le design des télescopes s'est relativement stabilisé. Maintenant on se contente de perfectionner des techniques déjà maîtrisées. Au niveau des systèmes optiques macroscopiques, l'optique adaptative est peut-être le dernier grand saut technologique et la dernière grande « invention » est la segmentation des miroirs. Cette dernière notamment permet de s'affranchir de la limite en taille des télescopes.

T. Guy : N'y a-t-il vraiment plus aucune limite ? Ne risque-t-on pas de retrouver des problèmes de déformations et de mauvais alignement ?

M. Sauvage : Ils ont toujours été et seront toujours présents. Mais maintenant que nous avons réussi à phaser les signaux, il n'y a pas de limites imposées par la nature (rien nous dit que les algorithmes vont diverger au delà d'un certain nombre de miroirs). La seule contrainte qui reste, et pas des moindres, est celle liée à la taille de la structure englobante (dôme, monture ...).

Pour revenir à la première question, il y a effectivement une explosion de la partie « analyse de l'information ». Jusqu'à présent, le schéma de la science expérimentale était le suivant : un système d'acquisition de données, puis un traitement, par des outils algorithmiques relativement standards, conduisant à une représentation des données, que les scientifiques sont ensuite en mesure d'exploiter. Aujourd'hui, il est vrai que la partie analyse a débordé, et a intégré de plus en plus du système d'acquisition, jusqu'à devenir prépondérante. La raison est simple, suivant ce que l'on veut faire comme science, on va acquérir les données différemment, quand bien même on utilise le

même objet (en fait, on va modifier l'objet technique et son comportement en fonction de ce qu'on veut faire avec). Par exemple avant, on pouvait se dire : « j'ai une caméra, je fais des images et j'utilise ces images pour faire de la science ». Aujourd'hui, le traitement de l'information est intégré au détecteur ; il s'intéresse à la façon dont le photon est traité dans le CDD pour ensuite remonter à l'information portée par le photon.

En astronomie, les détecteurs intègrent désormais des fonctions auparavant dévolues télescope. En spectroscopie par exemple, l'élément disperseur est directement intégré dans le senseur, *i.e.* le pixel, et on commande la bande passante du pixel de façon active ce qui permet de faire de la spectroscopie. Plus généralement, on se débarrasse de plus en plus d'éléments optiques (polarisateurs, disperseurs...) car on a intégré ces propriétés directement au niveau des senseurs. Il y a une simplification de l'appareillage au profit d'une complexification du détecteur, et cela n'est possible que parce que l'on a appris à traiter des signaux plus complexes.

T. Guy : Peut-on alors parler d'une tendance à la spécialisation ? Par exemple le futur télescope Euclid dont on dit souvent qu'il ne pourra faire que ce pour quoi il est conçu, alors que le HST pouvait faire davantage choses.

M. Sauvage : A nuancer. Euclid et le HST ne sont pas fondamentalement différents au niveau de l'instrumentation. En revanche, ce qui est nouveau avec Euclid, c'est qu'on a optimisé certains éléments du système dans un but unique. Pour la partie visible d'Euclid (mesure de forme), on a fait le choix de tout faire en réflexion et rien en transmission, afin de limiter les modifications de la PSF et d'avoir la meilleure qualité possible. Pour le HST, et même le JWST, il y a un grand nombre d'exigences scientifiques, chacune faisant peser des contraintes techniques particulières. Il faut donc prendre l'intersection de toutes ces contraintes pour concevoir le télescope. Sur Euclid, certes on ne va pas faire que de la mesure de forme, l'imagerie et la spectrométrie pouvant servir à plein d'autre choses. En revanche, « on va interdire à ces objectifs scientifiques non prioritaires d'imposer des contraintes sur la conception des instruments ».

T. Guy : C'est donc plutôt les objectifs scientifiques qui se spécialisent et ce n'est que dans un second temps que l'on optimise les instruments en fonction des contraintes retenues ?

M. Sauvage : C'est ça. Seuls les objectifs scientifiques prioritaires ont le droit d'imposer des contraintes sur les dispositifs techniques. Effectivement, dans un second temps, une fois l'objet

construit, on peut faire d'autre science. Sur Euclid, il y a tout un pan du *legacy* qui est dévoué à d'autres objectifs que la cosmologie, qui sont tout autant de bonus, mais qui représentent en volume autant que les publications en cosmologie.

T. Guy : En tant que mission spatiale, le satellite Euclid dispose-t-il d'une durée de vie limitée ?

M. Sauvage : On sait que pour effectuer le relevé dont on a besoin pour atteindre les objectifs scientifiques visés il faudra 5 ans et demi. Le seul facteur qui pourrait être limitant est le carburant permettant le repointage du télescope, mais celui-ci est présent en suffisamment grande quantité. La vraie limite est imposée par la durée de vie des détecteurs (diminuée du fait du bombardement ionisant qui en dégrade les performances). Il existe aussi une limite économique : la mission peut prendre fin lorsque les bénéfices scientifiques supplémentaires attendus ne justifient plus le financement d'une équipe.

T. Guy : Pour revenir aux objectifs scientifiques d'Euclid, on sait que le signal utile est inférieur au bruit. Sont-ce les progrès techniques ou les progrès algorithmiques qui ont rendu possible la planification d'une telle observation ?

M. Sauvage : Les deux. Le signal utile est effectivement brouillé par l'environnement (l'univers) et par la chaîne d'acquisition qui introduit ses propres perturbations. Si ces dernières sont nulles, il faut effectivement de grandes capacités de traitement de l'information car le signal initial est intrinsèquement bruité. N'importe quel télescope n'en est pas capable. Les effets de déformations liés au *weak lensing* sont de l'ordre du % donc les contraintes imposées sur la qualité du système optique doivent être bien inférieures au %. Et ça c'est une exigence technique : « il faut que je connaisse parfaitement mon appareillage, que je le contraigne dans sa construction et que je sache comme le modéliser. Si je ne peux pas le contraindre par des mesures, je ne peux pas être sûr des informations que je reçois ». Le fait de savoir développer un algorithme pour traiter l'information est vital mais on ne peut pas s'affranchir d'une connaissance précise de l'appareillage technique.

T. Guy : Comment procède-t-on ?

M. Sauvage : Deux façons. On peut choisir de construire l'appareillage « n'importe comment » parce que l'on sait que l'on peut le caractériser absolument à travers des mesure (option qui n'est en réalité pas viable). Pour la construction d'Euclid, on a regardé les éléments que l'on pouvait

caractériser de façon absolue et ceux qu'il allait falloir caractériser en banc de test. « On combine progrès dans la modélisation mathématique des système d'acquisition et progrès dans le traitement de l'information qu'ils délivrent ». Les transformations mathématiques sous-jacentes sont très lourdes (convolutions, produits matriciels ...). Et suivant la façon dont on a modélisé le système, on peut se retrouver dans une situation qu'on ne peut pas résoudre ; on a alors besoin d'une étape de modélisation pour réduire la complexité (contraindre l'espace des solutions, observation des symétrie...). De leur côté, les progrès en traitement du signal ont permis de comprendre que l'on pouvait négliger certains termes (affiner les contraintes) : on résout alors le système pour un espace limité de solution, en l'occurrence le problème qui nous intéresse.

T. Guy : Mais est-ce qu'avec cette méthode on est certain de ne pas perdre de l'information sur le signal incident ?

M. Sauvage : Honnêtement non car on découple le signal bruité des perturbations de l'instrumentation. En revanche, on n'est jamais à l'abri d'une erreur *conceptuelle*. La modification de la forme des galaxies par le lentillage gravitationnel a tendance à les écraser dans un certain sens, et Euclid s'intéresse aux corrélations entre ces déformations, en partant de l'hypothèse que la distribution intrinsèque des formes de galaxies est aléatoire. Or c'est discutable. On sait que les galaxies se forment autour des filaments mais on ne sait pas si cela a un impact sur l'alignement de la forme de la galaxie avec la structure filamentaire (des modèles disent oui, d'autres disent non). Il y a donc un risque d'observer des corrélations qui ne sont peut-être pas liées au *weak lensing* : on a toujours besoin d'hypothèses *et* de modélisation. Dans l'instrument aussi on va faire des hypothèses sur son fonctionnement idéal *et* en pratique on a besoin de tester certains élément en confrontant la modélisation avec des mesures très précises.

T. Guy : Pourquoi une méthode purement inductive (avec aucune modélisation) ne suffit-elle pas ?

M. Sauvage : Ce n'est pas exclu. Quand on observe une galaxie, le signal est convolué par la fonction de transmission instrumentale. On a alors deux approches. La première est basée sur une modélisation la plus détaillée possible du système. La seconde, consiste à utiliser les autres sources présentes dans le champ afin de mesurer en temps réel la PSF et s'en servir pour gérer le signal intéressant. Mais on retombe sur la contrainte de départ : est-ce qu'il y a assez de réalisations (assez d'étoiles en l'occurrence) pour que le modèle apprenne à la précision requise ? On est toujours obligé de repasser par une étape de modélisation, de représentation du système, pour être certain

que l'on dispose d'assez d'information pour le contraindre suffisamment (sinon on mesure *en aveugle*). Que faire alors si l'on n'a pas assez d'étoiles ? On pourra juste dire : « à cet état donné du ciel correspond une mesure de tant de précision ». Les méthodes basées sur l'apprentissage à partir d'un certain nombre d'expériences, « s'opposent » aux méthodes basées sur la modélisation physique des éléments du système optique. Chacune possède ses limites (quantité de données disponibles pour l'apprentissage vs. Précision de la mesure). En réalité, dans la pratique, on croise ces deux approches : la modélisation permet de réduire la taille de l'espace d'apprentissage. Tout ceci est très récent et est apparu il y a 10-20 ans.

T. Guy : Jusqu'à présent on a parlé de la partie instrumentale, mais les astronomes ont les mêmes approches lorsqu'ils font de la science, non ?

M. Sauvage : Pour ma part, j'ai de moins en moins tendance à séparer « instrumentalistes » et « scientifiques », entre la personne qui conçoit l'instrument et le chercheur astronome qui s'en sert, et ceci pour deux raisons. La première raison est due à la convergence des méthodes. C'est quelque chose de nouveau là aussi, mais il n'y plus vraiment de séparation de méthode entre les deux communautés. Par exemple le *machine learning* est utilisé aussi bien pour faire sortir des connaissances de grandes masses de données que pour servir à caractériser les dispositifs instrumentaux (trouver des sources de bruit ou des biais). Il s'agit d'une méthodologie transverse pour trouver du sens à partir de grands ensembles de données multidimensionnelles, qu'il s'agisse de mesures prises sur des galaxies ou de mesures prises en phase de calibration. La seconde raison est qu'il est désormais très compliqué de faire de la science en faisant complètement abstraction de la façon dont les données ont été produites. Là encore il s'agit d'un phénomène relativement récent. La question centrale étant : « Qu'est ce que je veux sortir de ces données et comment je vais produire des données interprétables dans ce cadre ? ». On n'est plus dans la situation où l'instrumentaliste produit des données et le chercheur s'en sert pour faire de la science. C'est devenu beaucoup plus compliqué car on s'est spécialisé et on a intégré des spécialisations dans le traitement même de données. Par exemple dans Euclid, on a filtré des éléments non pertinents, considérés comme des perturbations (nuages diffus d'hydrogènes par exemple) et on sait que l'on n'y aura plus jamais accès.

T. Guy : Les catalogues de données sont donc déjà traités ?

M. Sauvage : Exactement. A partir des mêmes données brutes, on les travaille différemment selon l'objet d'intérêt à extraire, et pour ça, on n'applique pas les mêmes méthodes.

T. Guy : Et pour la partie purement cosmologique, y a-t-il une ou plusieurs méthodes ?

M. Sauvage : Il y a un unique pipeline, c'est-à-dire une seule méthode de traitement. Mais on se garde des possibilités d'amender. Des tests de vraisemblance (corrélation jours pairs/impairs, ciel sud/nord ...) sont réalisés en permanence pour être sûr qu'il n'y a pas de faux positifs, pour être sûr que les algorithmes n'introduisent pas des biais. C'est pour quoi le segment sol perdure tout au long de la mission : plus l'apprentissage est long, plus on est susceptible de trouver de nouvelles corrélations permettant d'améliorer les modèles instrumentaux – d'ailleurs parfois plus précis que les mesures quand celles-ci sont trop bruitées pour être utilisable pour la calibration (exemple des courants d'obscurité). « Les modèles phénoménologiques mis en place lorsqu'on ne connaît pas forcément la physique derrière, sont parfois plus performant qu'une mesure de calibration ». Euclid compte beaucoup là dessus car ce seront toujours les mêmes mesures qui seront réalisées, donc on espère en sortir des éléments de correction des données.

T. Guy : Quelle est l'importance relative du bruit instrumental par rapport à l'effet de *weak lensing* ?

M. Sauvage : En fait on contrôle cette importance à travers la conception. Le bruit introduit par les éléments d'acquisition doit justement être inférieur à l'effet que l'on souhaite détecter. Donc on a des exigences de performances sur la qualité des éléments, sur l'alignement du télescope ... On a donné des marges aux éléments de la chaîne d'acquisition mais celles-ci doivent être inférieures aux déformations attendues du signal qui nous intéresse. Un des grands défis a justement été de s'assurer que l'on abouti à un système faisable, réalisable. Il ne faut pas exiger des choses impossibles pour la technique actuelle - et le budget alloué. Euclid a d'ailleurs traversé cette phase à un moment de sa conception

T. Guy : Quelle stratégie a été mise en place pour ne pas rester bloqué à cette étape ?

M. Sauvage : Il a fallu travailler sur les méthodes d'analyse du signal pour voir ce qu'on pouvait autoriser comme incertitudes sur le système physique et ce que l'on pourrait récupérer par calibration ou analyse. Au début, on part d'exigences maximales (idéales) car on dispose de peu de connaissance sur la façon dont on va pouvoir analyser le signal. Puis, via la confrontation avec les

ingénieurs et techniciens qui disent que telle ou telle exigence n'est pas possible, on affine notre approche, notamment en travaillant sur les méthodes d'analyse, afin de relâcher certaines contraintes techniques.

T. Guy : C'est très intéressant. Ça veut dire que l'on apporte une solution algorithmique, numérique, à un problème technique, matériel ?

M. Sauvage : Tout à fait. D'ailleurs quand on regarde la structure du projet Euclid, on s'aperçoit que l'on a des exigences scientifiques (je veux mesurer telle chose avec tel degré de précision), qui vont se décliner en exigences instrumentales (les instruments doivent au minimum garantir tel niveau de performance), en exigences de calibration (mesurer certaines propriétés du système avec telle précision) et en exigences d'analyse (système d'analyse capables d'extraire telle information avec tel niveau de précision). Ces trois volets apparaissent très tôt dans l'historique de la mission. Ils sont compliqués à générer et à anticiper car souvent la maturité de réflexion sur l'un des points n'est pas au niveau, et notamment au niveau des autres. On a alors recours toujours aux deux mêmes stratégies : soit une résolution analytique, soit un recours à des simulations numériques assez poussées.

T. Guy : En parlant de ces simulations et des méthodes de traitement de données, à quel moment le segment sol a été mis en place ?

M. Sauvage : Ma philosophie consiste à dire que le segment sol d'un instrument spatial doit démarrer en même temps que l'on commence à penser à l'instrument. Très tôt donc. Déjà car on ne peut pas concevoir un système d'analyse de données si l'on ne connaît pas l'instrument qui acquiert, qui produit les données. On peut. Mais il va falloir alors beaucoup de temps pour appréhender l'instrument, pour savoir ce qui est pertinent parmi les données qui en sort. Le plus intéressant est de faire progresser en parallèle la définition de l'instrument et les systèmes de traitement de données. Pour Euclid, il a été décidé, et c'est regrettable, de séparer le segment sol des groupes instrumentaux. Il y a certes une interface mais qui n'est pas au niveau d'Herschel par exemple pour lequel segment sol et groupes instrumentaux étaient confondus.

T. Guy : Pourquoi une telle séparation ?

M. Sauvage : Je ne sais pas exactement. Je suppose que les groupes instrumentaux ont eu un peu peur du cout financier du segment sol. La question a été négligée au début mais avec la montée du segment sol, de plus en plus de gens se sont penchés sur la question des liens entre segment sol et instruments. Euclid est un projet intéressant d'un point de vue plus « sociologique » au même titre que d'autres grandes expériences, car on observe des processus hautement extra-scientifiques à l'œuvre. D'après moi, la mise en place du segment sol doit se faire en même temps que la définition des exigences qui vont s'appliquer aux algorithmes (donc très en amont). Il faut mettre en place des procédures sans être certain que ce seront les bonnes. Mais il est important de progresser en parallèle, quitte à reconfigurer par la suite. C'est l'un des intérêts du segment sol ; sa dimension « soft » autorise des modifications plus simplement que sur l'instrument. Il est reconfigurable. Certes c'est mieux si l'on réussit du premier coup mais il reste toujours possible de modifier par la suite.

T. Guy : On dirait que contrairement à ce qui se faisait avant le milieu du XXème, désormais c'est l'observatoire, le télescope et les instruments, qui arrive en prothèse du segment sol ?

M. Sauvage : Je n'irai pas jusque là. Même si c'est vrai qu'aujourd'hui, c'est devenu impossible de se dire « je traiterai les données quand il y en aura ». Ne serait-ce que parce que pendant plusieurs mois, voire années, on ne sera même pas sur d'utiliser le système de manière optimale.

T. Guy : Vous dateriez ça à partir de quand ?

M. Sauvage : Pour le spatial, on va dire dans les années 1990 (sur ISO par exemple il fallait déjà avoir les systèmes de traitement de données pour les instruments). Pour le spatial, il faut être prêt au moment du lancement, et c'est encore plus vrai pour certain domaine comme l'IR ou les missions ont un temps de vie limité due à l'évaporation de l'hélium qui refroidi activement les détecteurs. Dans tous les cas on ne peut pas perdre trop temps à apprendre comment utiliser l'instruments et les données produites de manière optimale. Pour les observatoires au sol, je dirais que cela commence avec le VLT (donc au début des années 2000s). Je crois que le VLT est le premier à avoir mis en place un environnement de traitement dans lequel tous les instruments doivent s'intégrer. Les équipes responsables d'un instrument sont aussi responsables de la chaîne d'analyse qui doit s'intégrer dans l'environnement global, standardisé, développé par le VLT et être opérationnelle dès la mise en service. Tout ceci fait suite à la prise de conscience du fait qu'il n'est pas du tout efficace d'attendre les données pour se demander comment les traiter.

T. Guy : D'après vous, il s'agit juste d'une question d'efficacité, d'optimisation de l'utilisation de l'instrument ? Ou bien se peut-il que les données soient en trop grande quantité, ou d'une trop grande complexité, pour pouvoir se passer de cette étape ?

M. Sauvage : A mes yeux, c'est avant tout cette prise de conscience qu'il n'y a aucun intérêt à perdre du temps, donc plutôt une question d'efficacité. Tout ceci est apparu dans les années 1970s quand les données ont commencé à être bien plus compliquées à gérer, notamment avec l'apparition des CCD. Le passage des détecteurs analogiques aux détecteurs numériques fait que, si l'on n'a pas de système de visualisation, de traitement, on ne sait pas ce que l'on regarde. Avant le seul traitement était le traitement de la plaque photo (révélation). Mais cette étape reste du domaine matériel. Avec des CCD, la révélation passe par le système de traitement numérique. Sans lui, pas de données numériques. Et à l'époque, les CCD étaient bien moins bien compris qu'aujourd'hui. C'est intéressant de constater que tout ne progresse pas à la même vitesse, et que des progrès dans un domaine autorisent des progrès dans un autre. L'arrivée de méthodologies basées sur le *big data* et le *machine learning* ont rendu possible l'idée de faire un instrument qui possède jusqu'à 90 CCD dans le même champ, parce que ces données, on est désormais en mesure de les traiter. Fondamentalement, technologiquement, les CCD d'Euclid et du LSST ne sont pas très différents de ceux d'avant. Il n'y a pas eu de saut technologique.

T. Guy : Il n'y pas eu de « révolution ».

M. Sauvage : Non. En revanche, ce qui est révolutionnaire, c'est le fait de passer de quelques capteurs à 90 CCD de 4000 x 4000 pixels. Instantanément, la quantité de données devient phénoménale. Mais « si on n'avait pas les techniques pour extraire de l'information de ces grands ensembles de données on ne concevrait pas de tel instrument, car cela ne sert à rien de produire un instrument donc on ne peut pas se servir ». La compréhension du traitement de données nous a autorisé à faire des instruments gigantesques, avec globalement la même technologie utilisée il y a 10 ans. Réciproquement, il y a eu, et il y aura, des moments où des sauts technologiques vont nécessiter des progrès dans les méthodes de traitement des données.

A.3. Les grands télescopes optiques au sol

Nous présentons une liste *antichronologique* des plus grands télescopes optiques, existant ou ayant existés. Pour les plus récents, la dénomination correspond aux acronymes employés par la communauté ; quant aux plus anciens, ils sont désignés selon leur lieu d'implantation et/ou leur constructeur. La date retenue correspond à la mise en service (année de la *première lumière*) et nous indiquons pour chaque télescope son « type » :

- c : télescope réfracteur anachromatique.
- a : télescope réfracteur achromatique.
- l : télescope à miroir liquide.
- m : télescope réflecteur.
- ms : télescope à miroir segmenté.
- mm : télescope (observatoire) à miroirs multiples.

Les lettres en commentaires permettent de distinguer certains télescopes :

- r : télescope « remarquable », important pour l'histoire de l'astronomie.
- t : télescope plus grand de son temps (présent dans les figures 44 et 61).
- h : télescope identifié comme hypertélique.

Cette table reprend en grande partie les travaux de Renée Racine et a servi de base de données pour la construction d'un certain nombre de diagrammes présents dans ce manuscrit. Les sources sont les suivantes :

- Renée RACINE, « The historical growth of telescope aperture », *Publications of the astronomical society of the Pacific*, vol. 116, n° 815, 2004, p. 77-83.
- Henry C. KING, *The history of the telescope*, New-York, Dover Publications Inc, 2003.
- Fred WATSON, *Stargazer. The life and times of the telescope*, Cambridge, Da Capo press, 2004.
- Gerard P. KUIPER & Barbara M. MIDDLEHURST (eds.), *Telescopes*, University of Chicago press, 1960.
- Robert C. SMITH, *Observational astrophysics*, Cambridge, Cambridge university press, 1995.
- Serge BRUNIER & Anne-Marie LAGRANGE, *Great observatories of the world*, Ontario, Firefly Books, 2005
- Francis GRAHAM-SMITH, *Eyes on the Sky*, Oxford, Oxford university press, 2016.

Nom	Date	Diamètre (mètre)	Type	Commentaire
E-ELT	2025*	39	ms	
TMT	2022*	30	ms	
GMT	2020*	24,5	mm	
VLT	2012	20	mm	r
GTC	2007	10,4	ms	t
ILMT	2005	4	l	
LBT	2005	12	mm	t
LBT1	2004	8,4	m	
LBT2	2004	8,4	m	
SALT	2004	9,2	ms	
LZT	2003	6	l	
Magellan-2	2003	6,5	m	
VLT-4	2002	8,2	m	
Gemini South	2002	8	m	
Magellan-1	2002	6,5	m	
MMTO	2002	6,5	m	r
VLT-3	2001	8,2	m	
Subaru	2000	8,2	m	
VLT-2	2000	8,2	m	
Gemini North	2000	8	m	
HET	2000	9,2	ms	t
VLT-1	1998	8,2	m	
Keck II	1996	9,8	ms	
NASA LMT	1994	3	l	
Keck I	1993	9,8	ms	t
WHT	1982	4,2	m	
UKIRT	1979	3,8	m	
CFHT	1979	3,6	m	
MMT (Original)	1979	4,5	mm	
BTA-6	1976	6	m	t
ESO	1976	3,6	m	r
IRTF	1976	3	m	
AAT	1974	3,9	m	
CTIO	1968	4	m	
Smith & McDonald	1968	2,7	m	
KPNO	1966	3,8	m	
Lick & Shane	1963	3	m	
Crimean Obs.	1960	2,6	m	
Hale Telescope	1948	5,08	m	t
Grubb (Pretoria)	1948	1,9	m	

Nom	Date	Diamètre (mètre)	Type	Commentaire
Warner & Swasey & McDonald	1939	2,1	m	
Grubb & Dunlap	1935	1,9	m	
Harvard	1934	1,6	m	
Warner & Swasey	1932	1,8	m	
Boyden	1930	1,5	m	
Hooker Telescope	1917	2,54	m	t
Paskett (DAO)	1917	1,8	m	
Lowell (Flagstaff)	1910	1,1	m	
Ritchey (Mt. Wilson)	1908	1,5	m	
Paris Exhibition	1900	1,2	a	h
Yerkes Obs.	1897	1	a	r
Steinheil (Berlin)	1896	0,7	a	
Grubb (Greenwich)	1893	0,7	a	
Paris-Meudon	1893	1	m	
Common (Crossley)	1892	0,9	m	
Paris-Meudon	1890	0,6	a	
Common, Lockyer	1889	0,8	m	
Clark (Nice)	1887	0,8	a	
Clark & Lice	1885	0,9	a	
Clark & Pulkova	1884	0,8	a	
Clark & Bruce & Boyden	1883	0,6	a	
Henry (Paris)	1882	0,7	a	
Grubb (Vienna)	1880	0,7	a	
Common (Harvard)	1879	1,5	m	
Clark (USNO)	1874	0,7	a	
Cooke (Newall)	1869	0,6	a	
Grubb (Melbourne)	1867	1,2	m	
Foucault (Marseille)	1864	0,4	m	
Clark (Dearborn)	1862	0,5	a	
Lassel (malta)	1861	1,2	m	
Merz (Harvard)	1847	0,4	a	
Leviathan of Parsonstown	1845	1,83	m	
Parsons (Birr Castle)	1845	1,8	m	h
Nasmyth	1845	0,5	m	
Parsons (Birr Castle)	1840	0,9	m	
Merz (Pulkowa)	1839	0,45	a	
Plöss	1835	0,28	a	
Cauchoix (Paris)	1834	0,35	a	
Cauchoix (Short)	1825	0,3	a	
Lerebours (Paris)	1820	0,35	a	
Ramage (Greenwich)	1817	0,35	m	

Nom	Date	Diamètre (mètre)	Type	Commentaire
Fraunhofer (Dorpat)	1805	0,25	a	
Guinand & Lalandre (Paris)	1798	0,15	a	
Herschel 40 ft	1789	1,26	m	r
Herschel "Large" 20 ft	1785	0,45	m	
Herschel 30 ft	1782	0,6	m	h
Reverend Michell	1780	0,8	m	h
Michell's Gregorian reflector	1780	0,75	m	
Herschel 20 ft	1778	0,35	m	
Herschel 10 ft	1776	0,22	m	
Herschel 7 ft	1774	0,15	m	
John Dollond	1770	0,13	a	
Peter Dollond	1763	0,1	a	
Dollond & Sons	1761	0,08	a	
Noel's Gregorian reflector	1761	0,6	m	h
Short's "King of Spain"	1753	0,45	m	h
Peter Dollond	1750	0,12	a	
Short's 2nd Gregorian reflector	1750	0,5	m	
Short	1750	0,3	m	
Hawksbee	1735	0,15	m	
Short's 1st Gregorian reflector	1734	0,38	m	
Chester Moor Hall	1733	0,06	a	r
Hadley	1721	0,15	m	
Huyghens	1692	0,19	c	h
Cassini	1690	0,2	c	
C. Huygens "210 ft refractor "	1686	0,22	c	
Hooke	1675	0,13	m	
Newton	1672	0,1	m	r
Huygens	1656	0,08	c	
Huygens	1655	0,06	c	
Hevelius refractor	1645	0,12	c	h
Hevelius Scheiner's helioscope	1638	0,06	c	
Galileo's 1620 telescope	1620	0,038	c	
Galileo's 1612 telescope	1612	0,026	c	
Galileo's 1609 telescope	1609	0,015	c	r

Annexe B

Cette annexe recense les diverses publications écrites, ou coécrites, dans le cadre de cette thèse.

La première d'entre elles est le fruit d'une « commande » du Département de Physique Nucléaire (DPhN) du CEA-Saclay pour la revue interne « Scintillations ». Elle s'intéresse à une *espèce* particulière de détecteurs de particules, les Micromégas, que notre enquête génétique a rattaché à la famille des détecteurs à ionisation.

Les conclusions de cette publication ont été reprises dans un chapitre corédigé avec Vincent Bontems dans le cadre d'un ouvrage collectif sur l'héritage bachelardien en philosophie des techniques.

La troisième publication référencée ici est un article portant sur le développement du laser embarqué sur le rover martien *Curiosity*. Après les bolomètres (en stage de M2), les détecteurs de particules Micromégas, et, bien sur, les télescopes, il s'agit de la quatrième application de notre méthode à un instrument scientifique.

La quatrième publication propose une relecture mécanologique de la riche et longue histoire des télescopes optiques. Elle synthétise une partie du chapitre 5 de ce manuscrit et constitue un vecteur de communication pour les travaux issus de cette thèse.

Enfin, sortant du périmètre direct de la thèse mais abordant des problématiques en lien avec la fermeture des machines et l'automatisation du travail, la cinquième et dernière publication est le compte-rendu d'un ouvrage collectif portant sur la figure du *travailleur-machine*.

Bibliographie

1. GUY T. & BONTEMS V., « La généalogie des Micromégas », *Scintillations*, n°97-98, 2018, p. 7-9.
2. BONTEMS V. & GUY T., « L'étude des lignées phénoménotechniques. De Bachelard à Simondon et aux "Micromégas" », in DONATIELLO P., GALOFARO F. & IENNA G. (eds.), *Il senso della Technica : Saggi su Bachelard*, Bologne, Esculapio, 2017, p. 109-120.
3. GUY T., BONTEMS V. & MINIER V., « Quel laser pour Mars ? Analyse mécanologique d'une innovation extra-terrestre », *Nacelles. Passé et présent de l'aéronautique et du spatial*, n°6, 2019.
[En ligne] URL : <http://revues.univ-tlse2.fr/pum/nacelles/index.php?id=735>.
4. GUY T. & BONTEMS V., « Relecture mécanologique de l'histoire des télescopes », *Artefact*, n°10, 2019.
5. GUY T., « Compte-rendu de lecture : LE BOT F., DARD O., DIDRY C., DUPUY C. & PERRIN C. (dir.), *L'Homme-machine I. Le travailleur-machine* », *Artefact*, n°9, 2019, p. 363-368.

B.1. La généalogie des Micromegas

La mécanologie génétique est l'étude de l'invention des objets techniques et de l'évolution des lignées techniques. Dans *Du mode des objets techniques*, le philosophe Gilbert Simondon précise que « le début d'une lignée d'objets techniques est marquée par cet acte synthétique d'invention constitutif d'une essence technique »¹. Une lignée technique se développe à travers la succession dans le temps d'objets fondés sur le même principe de fonctionnement et dont l'essence technique reste stable à travers la lignée évolutive. À la classification usuelle des objets techniques fondée sur leur fonction, Simondon substitue donc une classification fondée sur leur *fonctionnement*.

Au sein de ces lignées, le progrès procède par alternance de phases de progrès mineurs et majeurs : d'abord, intervient une série d'améliorations graduelles au cours desquelles les composants s'ajustent et s'adaptent. Quand ces progrès mineurs ont complètement optimisé son fonctionnement, l'objet est « saturé » : pour progresser encore, il faut une rupture, une reconfiguration globale de l'objet. Cette reconfiguration ne modifie pas l'essence technique de la lignée, l'opération interne étant conservée, mais donne naissance à une nouvelle génération d'individus techniques plus « concrets ».

Afin d'identifier l'essence technique correspondant à la lignée des Micromegas, nous avons combiné les principes de la mécanologie génétique de Simondon avec des outils diagrammatiques empruntés à la méthode de gestion des connaissances MKSM/MASK², développée au CEA par Jean-Louis Ermine. Le diagramme de fonctionnement (Fig. 1), inspiré des diagrammes SCFC (Source, Cible, Flux, Champ) de la MASK, permet ainsi de dégager le principe de fonctionnement de tous les Micromegas et de replacer sa lignée au sein de l'arborescence générale où elle est apparue.

¹ G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, G. Simondon, Aubier, 2012, p.63

² J.-L. Ermine, *MKSM : méthode pour la gestion des connaissances*, in Ingénierie des systèmes d'information, Paris, Hermès, 1996

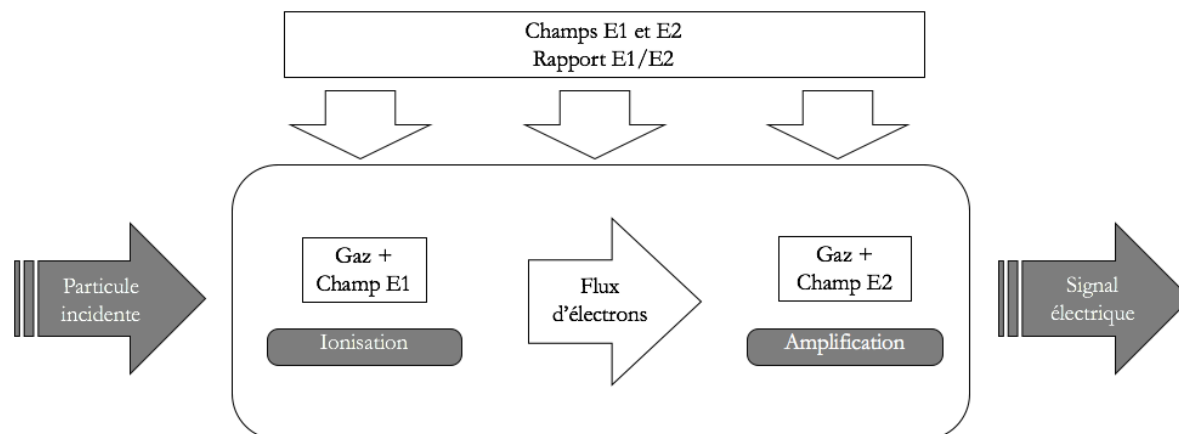


Figure 1 : Diagramme de fonctionnement des Micromegas.

Bien que d'une grande généralité, ce diagramme permet de rattacher les Micromegas à la famille des *détecteurs gazeux à ionisation* dont les opérations internes sont une ionisation et une amplification. La lignée des Micromegas se rattache plus spécifiquement à la branche des détecteurs recueillant l'information sous la forme d'un signal électrique. Notre méthodologie nous conduit donc à écarter, entre autres choses, les chambres à brouillard et les chambres à bulles, qui, malgré leur rôle important et leur fonction similaire en physique des particules, ne délivraient pas l'information sous la forme d'un signal électrique. L'historien des sciences Peter Gallison a aussi insisté sur les différences entre ces deux traditions instrumentales, celle des « instruments producteurs d'images »³, tels que les chambres à bulles, et celle des « dispositifs de comptage logique », où il rangea les chambres à fils mais aussi les chambres à étincelles (ce que nous ne faisons pas car les opérations internes sont différentes).

Une fois définie l'essence de notre lignée, nous avons tâché de retracer sa généalogie en identifiant les différentes inventions qui ont engendré des lignées techniques réalisant au moins partiellement le « schème technique » des détecteurs gazeux à ionisation produisant un signal électrique. Le résultat de cette enquête a été formalisé sous la forme du « diagramme de lignée » MASK⁴ (Fig. 2).

³ P. Gallison, *Bubbles, sparks, and the postwar laboratory*, in *Pions to quarks: particle physics in the 1950s*, Cambridge University Press, 1989

⁴ J.-L. Ermine, *MASK : Méthode d'Analyse et de Structuration des (K)Connaissances*, La gestion des connaissances, Paris, Hermès, 2003

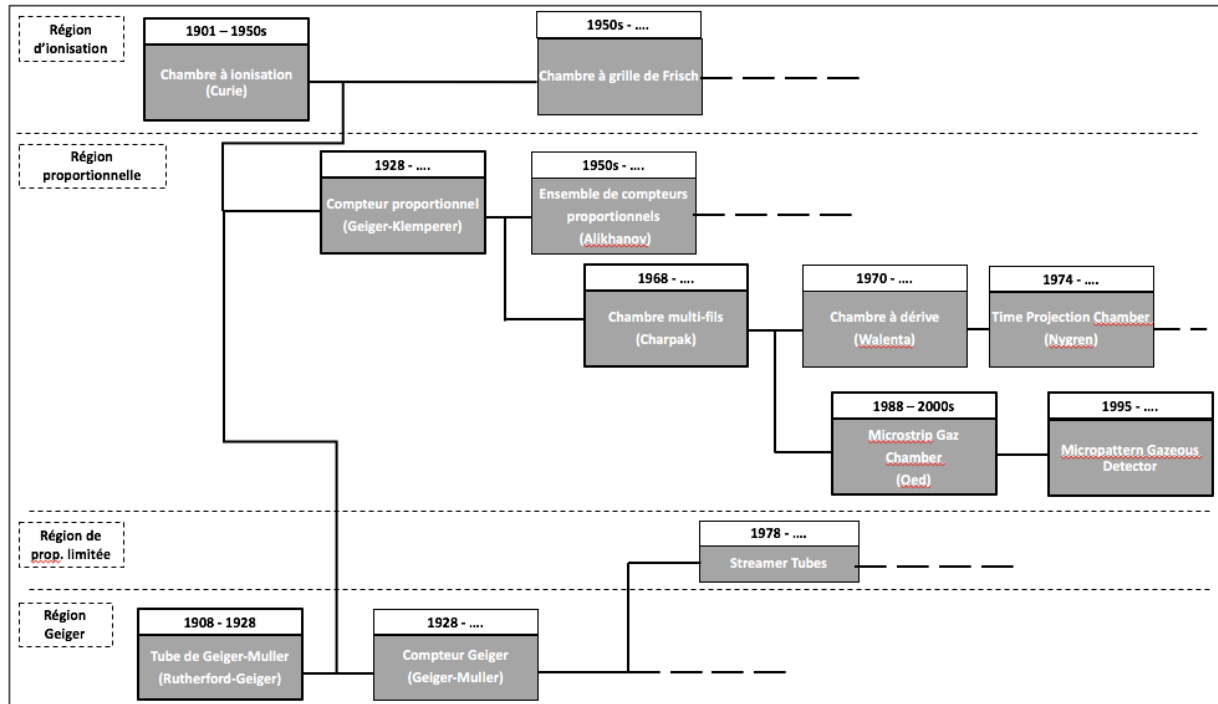


Figure 2 : Arborecence des détecteurs gazeux à ionisation (on a distingué suivant la région d'ionisation impliquée). Pour chaque lignée, les dates de début et éventuellement de fin sont indiquées.

Les premières lignées de détecteurs gazeux à ionisation sont nées au début du siècle dernier avec, d'une part, les chambres à ionisation utilisées par les Joliot-Curie (1901) et, d'autre part, la réalisation des premiers tubes de Geiger-Muller⁵ (1908). C'est l'hybridation de ces deux schèmes techniques qui a donné naissance à la lignée des compteurs proportionnels⁶ (1928) dont sont issus les Micromégas. Les compteurs proportionnels, aussi appelés compteurs de Geiger-Klemperer, opèrent dans la région de proportionnalité limitée (nombre de charges collectées, N_{coll} , proportionnel au nombre de charges créées N_{cr}), qui est une zone intermédiaire entre les régions d'ionisation ($N_{\text{coll}} = N_{\text{cr}}$) et de saturation (N_{coll} indépendant de N_{cr}). Notons que la distinction structurelle entre les détecteurs cylindriques et plans n'est pas pertinente ici, la lignée étant définie par ses opérations internes et non par sa structure.

Un seuil de concrétisation crucial fut franchi avec l'invention, en 1968, des chambres multi-fils par le futur prix Nobel Georges Charpak⁷. Cette nouvelle génération d'instruments a redynamisé

⁵ E. Rutherford, H. Geiger, An electrical method of counting the number of alpha particle from radioactive substances, *Proceedings of the Royal Society*, vol. 81, n°. 546, 1908

⁶ P. W. Frame, *A history of radiation detection instrumentation*, in *A Half Century of Health Physics: 50th Anniversary of the Health Physics Society*, Baltimore, Lippincott Williams and Wilkins, 2006

⁷ G. Charpak et al., *The use of multivire proportional counter to select and localize charged particles*, *Nuclear instruments and methods in physics research*, vol. 62, 1968

la lignée des détecteurs gazeux à ionisation en intégrant le schème technique permettant une sortie électrique du signal. La datation des concrétisations majeures antérieures (1901 – 1908 – 1928 – 1968) suggère que le progrès de la lignée était en décélération, alors que la datation des concrétisations postérieures (1968 – 1988 – 1995) indique une accélération du processus de concrétisation. À nos yeux, cette accélération est liée au fait que les chambres multi-fils, qui permettent le traitement informatique des données, se substituent aux ensembles techniques issus de la lignée des détecteurs visuels (chambres à bulles) pour faire de la trajectographie, absorbant ainsi une part de leur potentiel évolutif.

Une autre étape importante dans l'évolution de la lignée des détecteurs gazeux à ionisation est le passage à l'échelle micrométrique du progrès de la technicité avec la naissance des « micro-pattern gaseous detectors » (MPGD), des détecteurs gazeux à haute granularité et à petites distances (inférieures au millimètre) entre anodes et cathodes. Ce changement d'échelle a été rendu possible par le développement de la micro-électronique et les premiers travaux de Anton Oed⁸. Une reconfiguration globale de l'appareil fait alors franchir un seuil aux performances, notamment en termes de résolution et de temps de réponse.

Au sein des MPGD, les Micromegas, inventés en 1995⁹, se singularisent par le fait que le passage à l'échelle micrométrique s'opère aussi pour la grille employée. L'introduction de cette grille, inventée en 1944 par Otto Frisch, visait au départ à blinder l'espace au-dessus de la région d'amplification mais elle s'avéra utile par ailleurs en réduisant les temps de dérive et de réponse du détecteur – réalisant ainsi ce que Simondon appelle la « convergence des fonctions » par une « surabondance des effets » d'une invention qui résout plusieurs problèmes en même temps. Le nom Micromegas signale ce haut degré de concrétude : en appliquant le changement d'échelle aux distances anodes-cathodes comme à la grille, ces détecteurs ont fortement augmenté leur synergie interne.

Prolonger la formalisation d'une lignée par l'étude de leur rythme de concrétisation permet aussi de formuler des hypothèses. Une modélisation rudimentaire de la généalogie des Micromegas incite ainsi à explorer certaines zones temporelles pour y chercher l'origine d'autres

⁸ A. Oed, *Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases*, Nuclear instruments and methods in physics research, vol. 251, 1988

⁹ Y. Giomataris et al., *MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environment*, Nuclear instruments and methods in physics research, vol. 376, 1996

éléments que son schème technique a « recrutés » ou retrouvés lors de sa conception. Par exemple, 1948 apparaît comme une étape « manquante » induite par la symétrie de notre collection de dates. Or, il se trouve qu'en 1948 paraissaient justement les premiers articles¹⁰ suggérant d'utiliser des compteurs multi-fils, idée qui sera reprise vingt ans plus tard pour le développement des chambres multi-fils, et qui contribuera à la renaissance de la lignée des détecteurs gazeux dont les Micromegas sont un des aboutissements.

Considérés comme la première instance des MPGD, en concurrence avec les GEM, Microdots et autres Microgaps, les Micromegas sont inventés en 1995. Qu'en est-il des progrès réalisés après cette date ? Nous notons un essoufflement du rythme du progrès avec comme dernière réalisation majeure en 2003 le développement de la technologie « Bulk ». Ce procédé de fabrication tout-en-un permet d'intégrer la micro-grille à l'électrode de lecture afin de construire un détecteur monolithique ; il représente un progrès de la concrétisation même si des effets indésirables (difficulté à nettoyer les impuretés dans le cas de détecteurs grande surface par exemple) en relativisent la portée.

Au-delà de cette date, la rétrospection, et à plus forte raison la prospective, deviennent hasardeuses : l'arborescence des détecteurs gazeux à ionisation a en effet donné naissance à de multiples lignées qui demeurent actives aujourd'hui, certaines sous des formes hypertéliques, c'est-à-dire suradaptées à certaines « niches », d'autres avec une généricité bien plus grande et des perspectives importantes en termes de progrès de la concrétisation. Mais au sein de la compétition entre les différentes lignées, celle des Micromegas possède indéniablement un fort potentiel générique.

¹⁰ S. C. Curran, J. M. Reid, *The properties of some new type of counters*, *The review of scientific instruments*, vol. 19, 1948

B.2. L'étude des lignées phénoménotechniques.

De Bachelard à Simondon et aux « Micromegas »

La « phénoménotechnique » apparaît dans l'article « Noumène et microphysique » (1932) de Gaston Bachelard, qui l'oppose à la « phénoménographie », c'est-à-dire à l'enregistrement de phénomènes préexistants. Désignant allusivement la *production* de phénomènes au travers des appareils de mesure en physique quantique, la phénoménotechnique constitue le versant expérimental de la microphysique. La « nouménologie » en désigne le versant mathématique : « Cette nouménologie éclaire une phénoménotechnique par laquelle des phénomènes nouveaux sont, non pas simplement trouvés, mais inventés, mais construits de toutes pièces. »¹ Ce caractère « constructif » la distingue de la simple correspondance entre dispositif expérimental et représentation symbolique². Pour comprendre la phénoménotechnique de la recherche contemporaine, nous retracerons sa caractérisation dans l'œuvre Bachelard, puis nous l'appliquerons au fonctionnement des microscopes à effet tunnel à l'aide des concepts de la « mécanologie génétique » de Gilbert Simondon. Enfin, nous étudierons la généalogie de la lignée technique des détecteurs « micromegas ».

1. La phénoménotechnique selon Gaston Bachelard

La phénoménotechnique actualise des potentialités induites par la structure des équations. L'expérimentation n'est plus une « observation » servant à une généralisation abstraite mais la construction de phénomènes nouveaux à partir de prédictions théoriques. Cela est confirmé par la seconde occurrence du terme dans une conférence de 1933 :

Cela revient à dire qu'à la phénoménologie des philosophes, la science contemporaine substitue une phénoménotechnique. Au lieu de réduire des faits pour contempler je ne sais

¹ Gaston Bachelard, *Études*, Paris, Vrin, 1970, p. 19.

² Pierre Duhem, *La Théorie physique, son objet, sa structure*. Paris, Vrin, 1993, p. 235 : « lorsqu'un physicien fait une expérience, deux représentations bien distinctes de l'instrumentation sur lequel il opère occupent simultanément son esprit : l'une est l'image de l'objet concret qu'il manipule en réalité ; l'autre est un type schématique du même instrument, construit au moyen de symboles fournis par les théories ». Pour une analyse détaillée des rapports entre la phénoménotechnique de Bachelard et le conventionnalisme de Duhem, Cf. Lucie Fabry, « La phénoménotechnique et l'héritage critique du conventionnalisme », séance publique de l'Atelier Bachelard du 3 mars 2017 à l'Ecole normale supérieure de Paris.

quelle généralité aristotélicienne ou baconienne, la science produit des phénomènes. Elle fait apparaître des phénomènes au mépris des apparences. Désormais on crée des phénomènes à l'exacte mesure de la pensée ; mieux, on les crée par la mesure, sur le plan même de la mesure. On les crée méthodiquement, comme on effectue un problème de géométrie³.

Dans l'*Essai sur la connaissance approchée* (1927) Bachelard s'en tenait à une conception de la « réalisation approchée » en tant qu'application du déterminisme et évitait de reprendre à son compte la distinction entre les « nature naturelle » et « nature artificielle » posée par Georges Sorel⁴. Dans la conférence « Physique et métaphysique », la phénoménotechnique adjoint désormais à la « *natura naturans* » et à la « *natura naturata* » de Spinoza une « *natura constructa* » produite artificiellement. Il serait hâtif d'en conclure que Bachelard dispose dès lors d'un concept opératoire. La phénoménotechnique est absente des *Intuitions atomistiques* (1933) qui affirme pourtant que « *l'atomistique est précisément devenue une technique* »⁵. Le *Nouvel Esprit scientifique* (1934) souligne que le couplage noumène-phénoménotechnique caractérise la science contemporaine :

Entre le phénomène scientifique et le noumène scientifique, il ne s'agit plus d'une dialectique lointaine et oisive, mais d'un mouvement alternatif qui, après quelques rectifications des projets, tend toujours à une réalisation du noumène. La véritable phénoménologie scientifique est donc bien une phénoménotechnique⁶.

Mais il n'est pas précisé comment le phénomène est « trié, filtré, épuré, coulé dans le moule des instruments, produit sur le plan des instruments »⁷. L'ouvrage s'en tient à une élucidation théorique et certains commentateurs n'en retiennent que l'idée que « les instruments ne sont que des théories matérialisées. »⁸ La phénoménotechnique est absente de *L'Expérience de l'espace et la physique contemporaine* (1936), qui porte sur le versant théorique de la physique quantique. En revanche, *La Formation de l'esprit scientifique* (1938) en généralise l'application en tant que rupture avec la pratique naïve de l'observation : « La phénoménotechnique étend la phénoménologie. Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique

³ Gaston Bachelard, « Physique et métaphysique » in *Septimana Spinozana*, La Haye, Nijhof, 1933, p. 83.

⁴ Georges Sorel, *De l'Utilité du pragmatisme*, Paris, Marcel Rivière, 1921. L'ouvrage est cité et critiqué par Bachelard au chapitre IX « Connaissance et technique. ». Cf. Vincent Bontems, « L'épistémologie transversale d'Ettore Majorana », *Revue de synthèse*, n°1, 2013, p. 29-51.

⁵ Gaston Bachelard, *Les Intuitions atomistiques (essai de classification)*, Paris, Vrin, 1975, p. 142.

⁶ Gaston Bachelard, *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, Presses universitaires de France, 1983, p. 16-17.

⁷ *Ibid.*, p. 16.

⁸ *Id.*

de réalisation. »⁹. La notion est utilisée indépendamment de celle de noumène et appliquée rétrospectivement à l'histoire de la découverte des « ruptures d'échelles »¹⁰ : « cette phénoménologie instrumentale, coupée par les seuils *infranchissables* de la sensibilité opératoire, qui est la seule phénoménologie scientifique »¹¹. Si les lignées d'instruments intéressent moins Bachelard que « la lignée des génies »¹², son étude des progrès du psychisme scientifique a le mérite de souligner la solidarité du progrès des sciences avec l'organisation de la cité scientifique en même temps qu'avec les progrès des techniques : « si l'on prétend par exemple trouver la largeur d'une frange d'interférence et déterminer, par les mesures connexes, la longueur d'onde d'une radiation, alors il faut non seulement des appareils et des corps de métiers, mais encore une théorie et par conséquent toute une Académie des Sciences. »¹³

Il semble que l'attention épistémologique de Bachelard oscille entre les pôles théoriques et techniques¹⁴ puisque la notion est de nouveau absente de la *Philosophie du non* (1940) alors qu'elle revient au premier plan dans le *Rationalisme appliqué* (1949) qui l'étend à la chimie :

L'expérience ainsi associée à des vues théoriques n'a rien de commun avec la recherche occasionnelle, avec ces expériences "pour voir" qui n'ont aucune place dans des sciences fortement constituées comme le sont désormais la Physique et la Chimie, dans des sciences où l'instrument est l'intermédiaire nécessaire pour étudier un phénomène vraiment instrumenté, désigné comme un objet d'une phénoménotechnique¹⁵.

Surtout, ce sont des analyses phénoménotechniques précises qui sont proposées tant au sujet de la lampe électrique à fil incandescent¹⁶ que des expériences liées à la piézo-électricité¹⁷. La dispersion entre les différents « rationalismes régionaux » pluralise alors la notion : « Une fois qu'on a fragmenté le rationalisme pour bien l'associer à la matière qu'il informe, aux phénomènes qu'il règle, à la phénoménotechnique qu'il fonde, on est amené à poser le problème du rapport d'un

⁹ Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1993, p. 61.

¹⁰ *Ibid.*, p. 212.

¹¹ *Ibid.*, p. 219.

¹² *Ibid.*, p. 251

¹³ *Ibid.*, p. 242.

¹⁴ Daniel Parrochia affirme que l'orientation théorique de *La Valeur inductive de la Relativité* « sera évidemment contredite par toute l'évolution ultérieure de la philosophie de Bachelard, qui ne cessera ensuite de réhabiliter l'expérience mécanique, physique ou chimique et de valoriser non seulement les transcendances expérimentales mais les appareils techniques qui les rendent possibles. » (« préface » in Gaston Bachelard, *La Valeur inductive de la Relativité*, Paris, Vrin, 2014). Il s'agit d'un jugement excessif : Bachelard continue, tout au long de son œuvre, à privilégier l'étude des noumènes même s'il a le souci d'équilibrer celle-ci par la mention du caractère fondamental de la phénoménotechnique.

¹⁵ Gaston Bachelard, *Le Rationalisme appliqué*, Paris, Presses universitaires de France, 1949, p. 3.

¹⁶ *Ibid.*, p. 108.

¹⁷ *Ibid.*, p. 208.

rationalisme général avec les divers rationalismes régionaux »¹⁸. Introduite pour expliquer la dualité onde-corpuscule des manifestations du noumène en physique quantique, la phénoménotechnique permet ici de coordonner les diverses applications d'une équation : « cette formule est humainement plus concrète que l'une ou l'autre de ses deux applications phénoménotechniques. »¹⁹

La phénoménotechnique est donc le vecteur par excellence du rationalisme appliqué : « En phénoménotechnique – nous en avons ici une preuve de plus – tout se développe dans le sens du rationalisme appliqué. »²⁰ Le « rationalisme *appliqué* » n'est pas une simple application technique de la science, il consiste, en sa pointe phénoménotechnique, à créer de nouveaux phénomènes en rupture avec les intuitions issues de la perception à notre échelle, « des phénomènes qui ne sont pas-naturellement-dans-la-nature. »²¹

Nous n'avons relevé que trois occurrences du terme dans *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine* (1951), qui plus est, concentrées en un passage :

Ainsi, de tous les corpuscules de la physique moderne, on ne peut faire qu'une étude *phénoménotechnique*. Le philosophe devra donc noter ici la grande différence entre la phénoménologie naturaliste et la phénoménotechnique à laquelle travaillent les physiciens contemporains. Dans la phénoménotechnique, aucun phénomène n'apparaît *naturellement*, aucun phénomène n'est de premier aspect, aucun n'est *donné*. Il faut le *constituer* et en lire les aspects *indirectement*, avec une conscience toujours éveillée de l'*interprétation* instrumentale et théorique, sans que jamais l'esprit ne se divise en pensée expérimentale pure et théorie pure²².

Il ne faut pas en déduire une baisse d'intérêt pour la production technique des phénomènes. De nombreuses remarques de Bachelard montrent qu'il intègre systématiquement à sa réflexion épistémologique le couplage de la construction mathématique des objets avec les modalités techniques de leur réalisation : « La révolution épistémologique qu'entraîne la microphysique conduit d'ailleurs à remplacer la phénoménologie par une nouménologie, c'est-à-dire par une organisation d'*objets de pensée*. Les *objets de pensée* deviennent ensuite des *objets d'expériences techniques*, dans une pure facticité de l'expérience. »²³ Il entend toutefois réserver la phénoménotechnique à la science contemporaine afin de la distinguer des techniques qui n'étaient pas encore couplées à des

¹⁸ *Ibid.*, p. 131.

¹⁹ *Ibid.*, p. 168.

²⁰ *Ibid.*, p. 169.

²¹ *Ibid.*, p. 137. L'utilisation des « mots-phrases » composés étant ici l'expression d'une ironie mordante à l'égard du style de la phénoménologie d'inspiration allemande.

²² Gaston Bachelard, *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, Presses universitaires de France, 1951, p. 92.

²³ *Ibid.*, p. 80.

noumènes. La phénoménotechnique demeure toujours solidaire de l'affirmation du primat de la construction théorique.

De même, le dernier ouvrage épistémologique insiste sur la *rationalité* du matérialisme des sciences contemporaines plutôt que sur les dispositifs du « matérialisme *technique* ». Néanmoins, on peut considérer que l'intention et l'extension du terme sont définitivement établies quand *Le Matérialisme rationnel* (1953) récapitule ses traits distinctifs :

1. La production de nouveaux phénomènes : « une phénoménotechnique créant sans cesse de nouvelles matières »²⁴.
2. Une échelle s'étendant de la physique des particules à la chimie : « la phénoménologie des substances homogènes, bien qu'elle puisse, semble-t-il, trouver des exemples dans des substances naturelles est solidaire d'une phénoménotechnique. »²⁵
3. La disqualification de la notion positiviste d'« observation » pour comprendre l'expérimentation : « nous sommes ici en présence, non pas d'une *observation* d'un phénomène, mais bien de la *production* d'un phénomène. Et la connaissance physique des lames minces est dès lors solidaire d'une phénoménotechnique ».²⁶
4. Le rappel de la valeur inductive de la structure mathématique : « Nous rencontrons dans la phénoménotechnique que nous invoquons un *conditionnement géométrique* plus fort. »²⁷

Des commentateurs ont comparé la conception bachelardienne de la phénoménotechnique à la philosophie des sciences de Léon Brunschvicg²⁸, à celle de ses héritiers Georges Canguilhem et Michel Foucault²⁹, ou à celle d'historiens des sciences contemporains (Peter Gallison ou Ian Hacking³⁰). Les analyses phénoménotechniques sont, en revanche, peu nombreuses³¹. Pour prolonger l'effort applicatif, nous allons nous tourner vers les travaux de Gilbert Simondon.

²⁴ Gaston Bachelard, *Le Matérialisme rationnel*, Paris, Presses universitaires de France, 1972, p. 17.

²⁵ *Ibid.*, p. 65.

²⁶ *Ibid.*, p. 196.

²⁷ *Ibid.*, p. 197.

²⁸ Christina Chimisso, « From phenomenology to *phenomenotechnique*: the role of early twentieth-century physics in Gaston Bachelard's philosophy », *Studies in History and Philosophy of Science*, n°39, 2008, P. 384-392.

²⁹ Hans-Jörg Rheinberger, « Gaston Bachelard and the Notion of "Phenomenotechnique" », *Perspectives on Science*, vol. 13, n°3, 2005, p. 313-328.

³⁰ Teresa Castela, *Gaston Bachelard et les études critiques de la science*, Paris, l'Harmattan, 2010, p. 53-65.

³¹ Catherine Allamel-Raffin, « L'apport d'une perspective génétique à l'analyse des images scientifiques », *Protée*, 37, n°33, hiver 2009-2010, p. 19.

2. Analyse phénoménoteknikue des mikroskopes à effet tunnel

Simondon n'a pas repris le terme à son compte, ni produit d'analyse complète de l'opération d'un instrument scientifique, mais il a souligné son rôle paradigmatique : « la véritable activité technique est aujourd'hui dans le domaine de la recherche scientifique qui, parce qu'elle est recherche, est orientée vers des objets ou des propriétés d'objets encore inconnus. »³². Il était attentif aux conditions de fonctionnement de ces « machines à information » indispensables à la recherche et pourtant souvent oubliées par l'analyse épistémologique :

L'instrument permet à l'observation de changer d'ordre de grandeur. C'est probablement ce rôle de médiation entre les échelles qui explique pourquoi le rôle crucial de l'instrument est si mal compris : la perception, la connaissance et l'action sont bien définies à différents ordres de grandeur, tandis que les instruments, en tant que médiateurs ou adaptateurs, disparaissent du champ de la connaissance et de l'action, de telle sorte que ce genre d'objets ou d'extensions de l'opérateur sont rarement étudiés pour eux-mêmes³³.

Il signale, par exemple, à propos des détecteurs que le progrès de leur sensibilité et de leur résolution passe par l'abaissement de la température (pour diminuer le bruit thermique ou quantique) et par l'amélioration de leur sélectivité³⁴.

Pour illustrer l'intérêt des concepts mécanologiques pour une analyse phénoménoteknikue, nous avons choisi le cas du *scanning tunneling microscope* (STM) utilisé pour « voir les atomes » dans les nanotechnologies. Or, le STM n'est pas seulement un instrument mais aussi un outil puisqu'il permet la manipulation individuelle des atomes. Il correspond à la caractérisation bachelardienne de la phénoménoteknikue mais aussi à la machine simondonienne en tant que médiation technologique entre les échelles :

Grâce à la machine s'institue un cycle qui va de l'objet au sujet et du sujet à l'objet : la machine prolonge et adapte l'un à l'autre sujet et objet, à travers un enchaînement complexe de causalités. Elle est outil en tant qu'elle permet au sujet d'agir sur l'objet, et instrument en

³² Gilbert Simondon, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Grenoble, Millon, 2005a, p. 512.

³³ Gilbert Simondon, « L'Homme et l'Objet », 1975 (inédit).

³⁴ Gilbert Simondon, *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, Paris, Le Seuil, 2005b, p. 224.

tant qu'elle apporte au sujet des signaux venus de l'objet ; elle véhicule, amplifie, transforme, traduit et conduit dans un sens une action et en sens inverse une information³⁵.

Cette dualité instrument/outil des STM a aussi été relevée par des spécialistes des « nano » :

Imager avec un STM consiste à déplacer une pointe sur une surface afin d'obtenir des informations topographiques sur cette surface. (...) Les composants d'un STM comprennent une sonde (la pointe), un dispositif piézo-électrique qui contrôle la position de la pointe dans les trois dimensions, une source électrique, un moyen de mesurer le courant qui passe de l'échantillon à la pointe, et, pour finir, [un programme] capable à la fois de traduire les données en cours en une image et de contrôler les déplacements³⁶.

Un microscope électronique permet de « voir » des objets de taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière selon un procédé analogue à la vision ordinaire : les photons sont remplacés par des électrons et l'œil par un détecteur. Au contraire, le STM opère en « caressant » l'échantillon de sa pointe ultrafine. Les données quasi « tactiles » issues de ce relevé sont d'abord synthétisées sous forme d'un sobre graphique qui représente la variation du courant par effet tunnel au cours du passage de la sonde. Ensuite, un algorithme intègre l'information recueillie au cours des passages successifs de la sonde sur l'échantillon pour les traduire sous forme d'images. Cette transduction des données s'opère à partir de modèles théoriques des atomes inférant leur position d'après les informations extraites de la « mer d'électron ». La représentation finale pourrait être sonore aussi bien que visuelle.

Il y a donc bien deux chaînes de *transductions* distinctes : celle de l'enregistrement, depuis l'échantillon jusqu'à l'obtention des données, puis celle de la visualisation proprement dite, qui transduit ces données en une image de synthèse qui s'affiche à l'écran. La première chaîne ne conditionne pas absolument la seconde. Entre les deux s'opère un choix « esthétique » : « nous présentons visuellement ces “données tactiles”, et nous le faisons parce que, en tant qu'êtres humains, nous pouvons rapidement et facilement – virtuellement de façon transparente - “savoir ce que nous voyons” »³⁷. Toutefois, l'analogie avec la lecture en braille que proposent Baird et Ashley est trompeuse : la pointe effleure l'échantillon pour effectuer son relevé d'un infime courant électrique, mais elle ne mesure ainsi pas directement le relief de l'échantillon. Ce qui est mesuré est

³⁵ Simondon 2005a, p. 523.

³⁶ Davis BAIRD & Ashley SHEW, « Probing the History of Scanning Tunneling Microscopy », in Davis BAIRD, Alfred NORDMANN & Joachim SCHUMMER, dir., *Discovering the Nanoscale*, Washington, IOS Press, 2004, p. 146-147.

³⁷ *Ibid.*, p. 154.

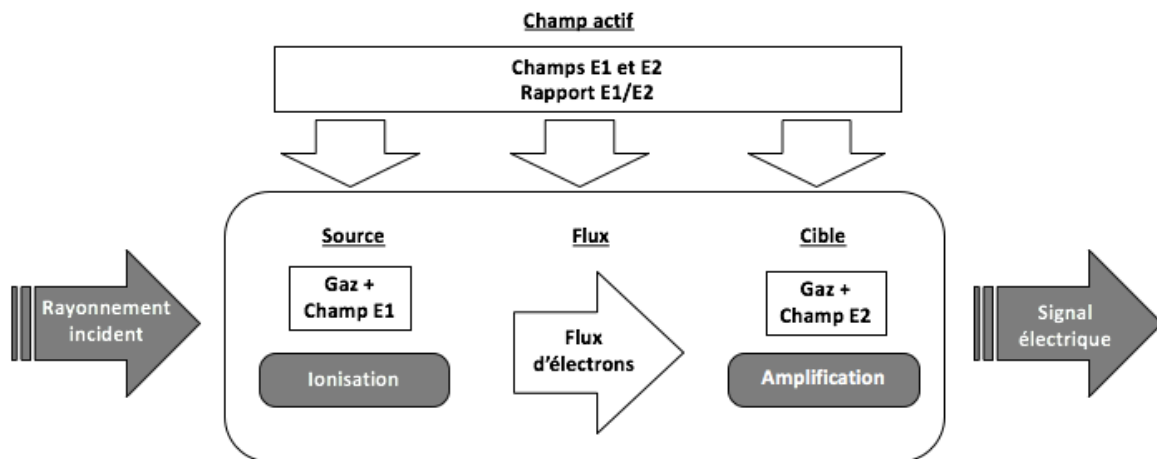
une propriété de la « mer d'électrons » environnant l'échantillon et non la position des atomes. Seul un modèle théorique permet le passage de l'une vers l'autre. Le STM produit donc une image qui n'est pas plus analogue au braille qu'à une observation à l'œil nu. La ressemblance avec celle-ci repose sur des conventions contingentes : « fausses couleurs », signifiantes ou non ; ombres portées par les nano-objets destinées à faciliter la perception des volumes ; formes géométriques souvent source de malentendu, les atomes n'étant pas de petites boules statiques. L'image « The Beginning », produite par Don Eigler et Erhard Schweizer en 1990 montre 35 atomes de xénon, qui forment le logo IBM sur une surface de nickel, ayant une forme de goutte en raison d'un « effet de pointe » de l'appareil. Il y a ainsi des distorsions dues au fonctionnement des appareils : si un échantillon est contaminé par une molécule d'un élément plus conducteur, la variation du courant risque d'apparaître comme une variation du relief alors que la molécule se trouve sur le même plan que le reste de l'échantillon (la comparaison avec l'information sur la position de la sonde suffit à rectifier cet artefact).

Seul un regard averti peut interpréter correctement une nano-image. La connaissance de la genèse phénoménoteknique de l'image-nano est donc indispensable à son intelligibilité. Elle passe par la compréhension de l'opération des microscopes à sonde locale. Le résultat de cette première chaîne de transduction produit un graphique, qui constitue l'« image source ». Avant d'obtenir une éventuelle diffusion, celle-ci sera traitée algorithmiquement. L'évolution des dispositifs matériels et informatiques est au centre des analyses phénoménotekniques.

3. Étude de la généalogie de la lignée des « micromegas »

Nous avons étudié la généalogie de « micromegas », un type particulier de détecteur employé en physique des particules, en collaboration avec des physiciens du CEA, notamment Ioannis Giomataris qui fut leur inventeur avec Georges Charpak. Afin d'identifier le schème technique correspondant à la lignée de micromegas, nous avons empruntés à la méthode de gestion des connaissances MASK³⁸, développée au CEA par Jean-Louis Ermine, le diagramme « Source-cible-flux-champ » :

³⁸ Jean-Louis Ermine, « MKSM : méthode pour la gestion des connaissances » in *Ingénierie des systèmes d'information*, Paris, Hermès, 1996.



Bien que d'une grande généralité, ce diagramme permet de rattacher les micromegas à la famille des *détecteurs gazeux à ionisation* dont les opérations internes sont une ionisation et une amplification (opérées respectivement par les champs E1 et E2). La lignée de micromegas se rattache plus spécifiquement à la branche des détecteurs transduisant l'information sous forme d'un *signal électrique*. Notre méthodologie conduit donc à écarter, entre autres choses, les chambres à brouillard et les chambres à bulles, qui, malgré leur fonction similaire en physique des particules, ne délivrent pas l'information sous forme d'un signal électrique. Peter Gallison a aussi insisté sur les différences entre la tradition instrumentale des « instruments producteurs d'images »³⁹, tels que les chambres à bulles, et celle des « dispositifs de comptage logique », où il range les chambres à fils mais aussi les chambres à étincelles (alors que du point de vue mécanologique les opérations internes sont différentes). Une fois définie la lignée de « micromegas », nous avons retracé sa généalogie en identifiant les inventions qui ont engendré des lignées techniques réalisant au moins partiellement le schéma technique des *détecteurs gazeux à ionisation produisant un signal électrique*.

Les premières lignées de détecteurs gazeux à ionisation sont nées au début du siècle dernier avec, d'une part, les chambres à ionisation utilisées par les Joliot-Curie (1901) et, d'autre part, la réalisation des premiers tubes de Geiger-Muller⁴⁰ (1908). C'est l'hybridation de ces deux schèmes techniques qui a donné naissance à la lignée des compteurs proportionnels⁴¹, en 1928, dont est issu micromegas. Les compteurs proportionnels, aussi appelés compteurs de Geiger-Klemperer,

³⁹ Peter Gallison, « Bubbles, sparks, and the postwar laboratory » in Laurie Brown, Max Dresden & Lillian Hoddeson (éd.), *Pions to quarks: particle physics in the 1950s*, Cambridge, Cambridge University Press, 1989, p. 213-251.

⁴⁰ Ernest Rutherford & Hans Geiger, « An electrical method of counting the number of alpha particle from radioactive substances », *Proceedings of the Royal Society*, vol. 81, n° 546, 1908.

⁴¹ Paul W. Frame, « A history of radiation detection instrumentation » in *A Half Century of Health Physics: 50th Anniversary of the Health Physics Society*, Baltimore, Lippincott Williams and Wilkins, 2006.

opèrent dans la région d'ionisation proportionnelle (nombre de charges collectées N_{coll} proportionnel au nombre de charges créées N_{cr}), qui est donc une zone intermédiaire entre les régions d'ionisation ($N_{\text{coll}} = N_{\text{cr}}$) et de saturation (N_{coll} indépendant de N_{cr}).

Un seuil de concrétisation crucial fut franchi avec l'invention, en 1968, des chambres multi-fils par le futur prix Nobel Georges Charpak⁴². Son invention a redynamisé la lignée des détecteurs gazeux à ionisation en intégrant le schème technique rendant possible une sortie électrique du signal. Les chambres de Charpak permettent le traitement informatique des données et se sont substituées pour cette raison aux ensembles techniques issus de la lignée des détecteurs visuels pour faire de la trajectographie.

Une autre étape importante dans l'évolution de la lignée des détecteurs gazeux à ionisation est le passage à l'échelle micrométrique du progrès de la technicité avec la naissance des « *micro-pattern gaseous detectors* » (MPGD) en 1988. Ce sont des détecteurs gazeux à haute granularité et à petites distances (inférieures au millimètre) entre anodes et cathodes. Ce changement d'échelle a été rendu possible par le développement de la micro-électronique et les premiers travaux d'Anton Oed⁴³. Cette reconfiguration globale de l'appareil fait franchir un seuil aux performances, notamment en termes de résolution et de temps de réponse.

Au sein de ces MPGD, la lignée de micromegas, inventée en 1996⁴⁴, se singularise par le fait que le passage à l'échelle micrométrique s'opère aussi pour la grille séparant les différentes régions d'opération. Si l'introduction de cette grille, inventée en 1944 par Otto Frisch, visait au départ à blinder l'espace au-dessus de la région d'amplification, elle s'avéra utile par la suite en réduisant les temps de dérive et de réponse du détecteur – réalisant ainsi ce que Simondon appelle la « convergence des fonctions » par une « surabondance des effets » typique d'une invention majeure qui résout plusieurs problèmes à la fois. Le changement d'échelle de la distance anode-cathode *et* de la grille a fortement augmenté la synergie du détecteur.

Prolonger l'analyse d'une généalogie par l'étude de son rythme de concrétisation permet en outre de formuler des hypothèses en vue d'un approfondissement de l'enquête historique. Une

⁴² Georges Charpak et al., « The use of multiwire proportional counter to select and localize charged particles », *Nuclear instruments and methods in physics research*, vol. 62, 1968.

⁴³ Anton Oed, « Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases », *Nuclear instruments and methods in physics research*, vol. 251, 1988.

⁴⁴ Ioannis Giomataris et al., « MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environment », *Nuclear instruments and methods in physics research*, vol. 376, 1996.

modélisation rudimentaire de la généalogie de micromegas suggère d'explorer certaines zones temporelles pour y chercher l'origine d'autres éléments que son schème technique a « recrutés » ou retrouvés lors de sa conception. Par exemple, 1948 apparaît comme une étape « manquante » induite par la symétrie de notre collection de dates : 1901 – 1908 – 1928 – 1968 – 1988 – 1996. Or, il se trouve qu'en 1948 paraissaient justement les premiers articles⁴⁵ suggérant d'utiliser des compteurs multi-fils, idée qui sera reprise 20 ans plus tard par Charpak pour le développement des chambres multi-fils, et qui contribuera à la renaissance de la lignée des détecteurs gazeux dont micromegas est un des aboutissements.

Conclusion : de la nécessité d'ouvrir les boîtes noires

La « phénoménotechnique » n'est pas seulement la marque de fabrique de l'épistémologie bachelardienne, elle définit le programme d'une étude pertinente de l'instrumentation scientifique contemporaine. Au moment où quelques collègues anglo-saxons s'avisent que l'épistémologie de Bachelard intègre « la manière dont la savoir humain est "incorporé" dans les artefacts techniques »⁴⁶, il importe de rappeler que ce programme suppose l'élucidation du fonctionnement des dispositifs. Bruno Latour et Steve Woolgar avaient affirmé le rôle constitutif des instruments⁴⁷ avant de les réduire à de simples « inscripteurs » fournissant aux chercheurs des « inscriptions »⁴⁸ selon un paradigme textuel en faisant une ressource aussi plastique et contingente que les mots servant à traduire les observations⁴⁹.

Au contraire, le prolongement de la phénoménotechnique par la mécanologie génétique de Simondon vise à ouvrir les boîtes noires en respectant leur technicité. L'enjeu est double : épistémologique, afin d'assurer l'intelligibilité des résultats scientifiques contre toute « opacité épistémique »⁵⁰, politique, car ce n'est qu'en gardant la maîtrise de la conception et de la

⁴⁵ Samuel C. Curran et J. M. Reid, « The properties of some new type of counters », *The review of scientific instruments*, vol. 19, 1948.

⁴⁶ Joseph C. Pitt, *Doing Philosophy of Technology. Essays in a Pragmatist Spirit*, Dordrecht, Springer, 2011, p. 47.

⁴⁷ Bruno Latour & Steve Woolgar, *La Vie de laboratoire. La production des faits scientifiques*. Paris, La Découverte, 1996, p. 59 : « Cette réalité, que Bachelard appelle "phénoménotechnique", prend l'apparence du phénomène dans le processus même de sa construction par des techniques matérielles ».

⁴⁸ Ibid. p. 61 : « C'est en ce sens que Bachelard se référait aux appareils comme à de la "théorie réifiée". L'inscripteur produit des inscriptions qui peuvent à leur tour servir à écrire des articles ou à faire des percées significatives en concevant des appareils à partir des théories bien établies ».

⁴⁹ Davis Baird, *Thing Knowledge. A Philosophy of Scientific Instruments*. Berkeley, University of California Press, 2004, p. 7.

⁵⁰ Paul Humphreys, *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, Oxford, Oxford university press, 2004.

concrétisation de ses instruments que le champ scientifique sera en mesure de préserver son autonomie relative :

La plus forte cause d'aliénation dans le monde contemporain réside dans cette méconnaissance de la machine, qui n'est pas une aliénation causée par la machine, mais par la non-connaissance de sa nature et de son essence, par son absence du monde des significations, et par son omission dans la table des valeurs et des concepts faisant partie de la culture⁵¹.

⁵¹ Gilbert Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 2012, p. 10.

B.3. Quel laser pour Mars ?

Analyse mécanologique d'une innovation extra-terrestre¹

Depuis le programme *Bioscience* de la NASA lancé en 1960, de nombreuses missions spatiales se sont succédées pour essayer de trouver des traces de vie extraterrestre sur Mars². Aux premières sondes du programme *Mariner* chargées de survoler la planète, ont succédé celles, plus ambitieuses, du programme *Viking*, accompagnées des premiers modules au sol, avant de laisser place aux *Mars Exploration Rover* (MER) Spirit et Opportunity ouvrant la voie à une exploration géologique de la planète rouge. Héritier des MER et lancé en 2011, le rover Curiosity est le fer de lance de la mission d'exploration actuelle *Mars Science Laboratory* (MSL) et une des réalisations techniques du domaine spatial les plus complexes de ces dernières années. À ce titre, il intègre nombre d'innovations, dont la présence inédite d'un laser opérant sur Mars.

La vue d'artiste de Curiosity reproduite ci-dessus représente avec emphase l'utilisation de ce laser. Elle est infidèle sur le plan visuel, le fin faisceau du laser étant invisible à l'œil nu, et ne renseigne pas son spectateur sur ce qui fait la technicité de l'instrument *Chemistry and Camera* (ChemCam) auquel il est intégré.

Cet instrument a été conçu pour analyser la composition des roches et des sols martiens afin de déterminer si des conditions favorables à la vie ont pu être réunies sur Mars. Il est composé d'une partie imagerie et d'un complexe spectroscopique basé sur la LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy* soit « spectroscopie sur plasma induit par laser »), une technique employée par l'industrie nucléaire, la police scientifique et d'autres domaines de pointe³.

L'élément central de ChemCam est donc un laser développé spécialement pour cette mission. Unique en son genre, ce premier laser extra-terrestre constitue une innovation tant par sa structure que son milieu associé martien. Pour autant, s'agit-il d'une invention ou d'une *rupture* par rapport aux lasers existants sur Terre ?

Nous proposons d'élucider la nature de l'innovation technique que constitue le laser de ChemCam en recourant à la *mécanologie génétique* (« mécanologie » en tant qu'étude scientifique des machines et « génétique » parce que cette étude se fonde sur la genèse de ces machines). Cette

¹ Les auteurs tiennent à remercier Sylvestre Maurice (Deputy PI de ChemCam à l'IRAP), Muriel Saccoccio (Chef de Projet laser puis Partie Française de ChemCam au CNES), Jean-Luc Lacour (expert LIBS au CEA), Nicolas Mangold (Opération ChemCam-MSL) et Eric Durand (Chef de Projet laser ChemCam chez Thales) pour leurs conseils et relectures.

² Vincent Minier, « Un choc martien » in *La science des sixties*, Paris, Belin, 2015, p. 87.

³ *Dossier de presse du CEA* : « La LIBS: les applications d'un laser d'analyse, des systèmes nucléaires à l'exploration spatiale », (<http://www.cea.fr/presse/Documents/DP/2014/Dossier-presse-LIBS-ChemCam-20062014.pdf>).

méthode d'analyse des structures et des évolutions des objets techniques est tirée des travaux de Gilbert Simondon⁴. Il s'agit, en particulier, de repérer l'apparition de nouveaux « schèmes techniques » (les opérations à la base du fonctionnement d'une machine) et d'en préciser les spécificités. L'analyse procèdera en trois temps. Tout d'abord, nous proposerons une analyse structurale de ChemCam afin de caractériser l'opération qu'il réalise dans son milieu associé. Puis, nous effectuerons une analyse génétique de la famille des lasers afin de retracer les lignées techniques ayant abouti au laser de ChemCam. Enfin, nous étudierons le processus de conception qui l'a engendré afin de préciser à quel type d'innovations il correspond.

1. Analyse structurale de ChemCam

Le fonctionnement d'un instrument aussi complexe que ChemCam est à appréhender sous l'angle de la *phénoménotechique*, selon l'expression consacrée du philosophe Gaston Bachelard :

Dès qu'on passe de l'observation à l'expérimentation [...] il faut que le phénomène soit trié, filtré, épuré, coulé dans le moule des instruments, produit sur le plan des instruments [...]. La véritable phénoménologie scientifique est donc bien essentiellement une phénoménotechique⁵.

En effet, ChemCam ne se contente pas d'observer l'environnement martien : son laser produit les phénomènes porteurs de nouvelles connaissances. L'analyse de la structure de ChemCam et de ses niveaux d'organisation éclaire la complexité des innovations intégrées au fonctionnement de cet instrument phénoménotechique.

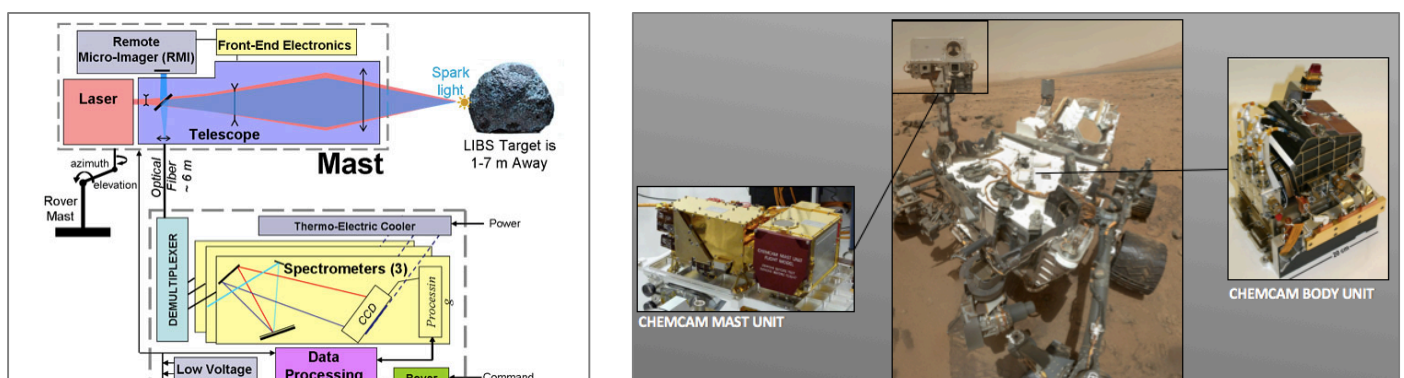


Figure 1: Diagramme structural de ChemCam (à gauche). Photo de Curiosity (à droite) (Credit: ChemCam/LANL/IRAP/CNES)

⁴ Gilbert Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques [MEOT]*, Paris, Aubier, 2012, p. 23.

⁵ Gaston Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934, p. 18.

ChemCam se compose de deux unités distinctes⁶ : le *Body Unit*, intégré au corps du rover, qui contient les spectromètres, l'alimentation et l'unité de calcul, et le *Mast Unit*, situé sur le mât de Curiosity, qui contient le laser, le télescope et l'imageur ; les deux unités étant reliées par fibre optique (Fig. 1).

Le *Mast Unit*, développé sous la supervision de l'IRAP (Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie) et du CNES (Centre National d'Études Spatiales), possède une double fonction au sein de l'instrument ChemCam. Dans un premier temps, le télescope est pointé sur la source à étudier et une série d'impulsions laser ultracourtes est générée. L'énergie par impulsion du faisceau laser, associée au faible étalement de la zone ciblée, conduit à un *éclaircissement* de quelques Gw/cm² suffisant pour transformer l'échantillon étudié en plasma. Puis, dans un second temps, le télescope a pour mission de collecter la lumière émise par ce plasma et de la transmettre au spectromètre afin d'enregistrer le spectre d'émission de ce rayonnement dont l'analyse permet de déterminer la composition chimique élémentaire (et non pas simplement moléculaire) de l'échantillon.

Plus qu'un instrument d'observation, ChemCam est un dispositif phénoménoteknique : le recours à la LIBS permet la production de nouveaux phénomènes - transformation de l'échantillon en plasma - qui en retour fournissent de nouvelles connaissances - composition chimique de l'échantillon. Ce type de machine établit ainsi entre l'opérateur humain et l'échantillon martien une double chaîne de transductions, porteuse d'actions en un sens et d'informations dans l'autre :

Grâce à la machine s'institue un cycle qui va de l'objet au sujet et du sujet à l'objet : la machine prolonge et adapte l'un à l'autre sujet et objet, à travers un enchaînement complexe de causalités. Elle est outil en tant qu'elle permet au sujet d'agir sur l'objet, et instrument en tant qu'elle apporte au sujet des signaux venus de l'objet ; elle véhicule, amplifie, transforme, traduit et conduit dans un sens une action et en sens inverse une information⁷.

Plutôt qu'une mesure passive d'un phénomène préexistant, il s'agit d'une *médiation* entre ordres de grandeur, de la mise en relation de l'échelle macroscopique d'observation de l'échantillon brut avec l'échelle microscopique qui révèle sa composition atomique à travers des raies d'émission. Chargé à la fois de focaliser le rayonnement laser vaporisant l'échantillon et de collecter la lumière émise en retour, le télescope est investi d'un double rôle au cours de la médiation qui manifeste la *réversibilité* de ses fonctions d'effecteur et de senseur.

⁶ Sylvestre Maurice, Roger C. Wiens et al., « The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Science Objectives and Mast Unit Description », *Space Science Reviews*, Vol. 170, n° 1, Septembre 2012, p. 98.

⁷ Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de formes et d'information*, Paris, Millon, 2005, p. 523.

La LIBS présente de grands avantages pour réaliser des analyses chimiques précises et rapides dans le milieu associé martien. Contrairement à d'autres techniques d'analyse chimique, elle opère à distance et sans préparation préalable de l'échantillon⁸. Si les prédécesseurs de Curiosity devaient utiliser des brosses pour éliminer la couche de poussière martienne des roches à étudier, le laser de ChemCam permet de décaper à distance cette couche de surface avant de réaliser des analyses en profondeur de l'échantillon tout en limitant les déplacements. Cette minimisation des déplacements est fondamentale car Curiosity étant pilotée depuis la Terre, les communications avec le centre de commande mettent plusieurs minutes à parvenir de la Terre à Mars et les opérations, ainsi que leur complexité, doivent donc être réduites au minimum.

Pour pallier les limitations inhérentes à la commande à distance, Curiosity embarque un système de visée autonome baptisé AEGIS (*Autonomous Exploration for Gathering Increased Science*)⁹ qui fonctionne selon deux modes. En mode « raffinement de pointage autonome », le système corrige les erreurs de pointage transmises par les opérateurs terrestres afin d'obtenir une plus grande fiabilité lors des analyses LIBS. En mode « sélection de cible autonome », AEGIS identifie les cibles géologiques au sein des images transmises par les caméras de navigation du rover et choisit lui-même les cibles qui correspondent aux paramètres spécifiés par les scientifiques de la mission. ChemCam procède alors à leur analyse sans demander validation au centre de commande : « Dans un cas idéal, AEGIS pourrait sélectionner tout seul des zones d'intérêt correspondant à différents types de contexte géologiques »¹⁰. Si ce degré de précision n'est pas encore implémenté, ce mode confère néanmoins à ChemCam une plus grande autonomie lui permettant d'opérer même lorsque les communications avec la Terre sont impossibles ou interrompues. De plus, AEGIS intègre un certain nombre de contraintes portant sur la sécurité ; il prévient ainsi tout pointage de ChemCam en direction du rover ou en direction du Soleil (ce qui pourrait endommager les caméras).

Si AEGIS offre à Curiosity une certaine autonomie vis à vis de l'opérateur humain, l'impossibilité d'effectuer des réparations sur Mars implique tout de même la plus grande prudence. Ainsi, un *monitoring* vigilant est exercé depuis le centre de commande. Curiosity est un rover, un véhicule servant de plateforme aux instruments - c'est-à-dire un « ensemble technique » au sens de Simondon - mais c'est aussi un *terminal* qui s'insère au sein d'un *réseau* mettant en relation les instruments scientifiques avec le *segment sol* en passant par les satellites chargés de relayer les communications. Ce réseau, coordonné depuis la Terre, s'assure que Curiosity reste opérationnel

⁸ Andrew K. Knight, Nancy L. Scherbarth et al., « Characterization of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for Application to Space Exploration », *Applied Spectroscopy*, Vol. 54, n° 3, 2000, p. 331-340.

⁹ Raymond Francis et al., « AEGIS autonomous targeting for ChemCam on Mars Science Laboratory: Deployment and results of initial science team use », *Science Robotics*, Juin 2017.

¹⁰ Nicolas Mangold, communication privée.

comme point d'entrée de l'information issue des échantillons martiens et comme point de sortie de l'action vers lequel convergent les commandes transmises depuis la Terre.

L'analyse structurale caractérise donc le *Mars Science Laboratory* comme étant un réseau technique, Curiosity un ensemble technique et ChemCam un système associant plusieurs individus techniques, dont le laser, véritable pierre angulaire de la mission. Un individu technique est conditionné par son milieu associé constitué par la rencontre du milieu géographique et du milieu technique : « L'objet technique est au point de rencontre de deux milieux [géographique et technique], et il doit être intégré aux deux milieux à la fois »¹¹.

Or, dans le cas présent, le milieu « géographique » est en fait un milieu *extra-terrestre* avec les contraintes de l'environnement martien (gamme de températures importante, faible pression, composition atmosphérique différente ...) et du transport depuis la Terre (résistance au décollage et à l'atterrissage sur Mars). Le milieu technique est, quant à lui, particulièrement exigeant puisqu'il intègre les interactions du laser avec les autres individus techniques (le télescope, le spectromètre mais aussi le *Body Unit*) ainsi que des contraintes de poids et de volume liées à la mission spatiale (en particulier au lanceur).

Ces différentes contraintes ont été prises en compte lors de la conception du laser et ont orienté le développement de l'objet technique. Toutefois, avant de nous intéresser au processus de conception lui-même, il faut reconstituer l'évolution technique qui mène à lui, c'est-à-dire comment son schème opératoire s'insère dans des lignées techniques préexistantes.

2. Analyse génétique des lasers

Le laser (acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) est un dispositif d'amplification de lumière par émission stimulée. Ce phénomène physique intervient lorsqu'un atome dans un état excité est soumis à une onde électromagnétique. Sous l'action du photon incident, l'atome se désexcite en émettant un photon possédant exactement les mêmes caractéristiques physiques que le photon incident. Le photon émis vient alors s'ajouter au champ incident : il y a donc amplification.

Le mécanisme d'émission stimulée a été théorisé par Albert Einstein en 1915. Il a ensuite fallu attendre 1953 pour que les américains Charles H. Townes, James P. Gordon et Herbert J. Zeiger réalisent le premier dispositif d'amplification d'un rayonnement électromagnétique basé sur l'émission stimulée : le maser (acronyme de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

¹¹ MEOT, p. 64.

Le maser, qui opère dans le domaine spectral des micro-ondes, est l'ancêtre du laser – appelé d'ailleurs « maser optique » à cette époque¹².

Maser et laser fonctionnent sur le même principe : lorsque les atomes du milieu amplificateur sont amenés dans un état d'énergie excité, ils peuvent amplifier un rayonnement incident. La difficulté est de parvenir à maintenir les atomes du milieu amplificateur dans un état excité car en vertu des lois de la thermodynamique, ils ont tendance à occuper les états d'énergie les plus bas. Pour cela, il faut réaliser ce qu'on appelle une « inversion de population », c'est-à-dire réussir à amener les atomes à occuper majoritairement les états d'énergie les plus hauts.

La solution se trouve dans une technique mise au point en 1950 par Alfred Kastler - la technique dite de « pompage optique » - qui vaudra à son inventeur le Prix Nobel de physique en 1966. Cette technique permet de modifier les états des atomes à l'aide d'une onde lumineuse polarisée¹³.

L'inversion de population réalisée, on transforme le dispositif amplificateur en oscillateur en reliant la sortie du milieu amplificateur à son entrée afin d'en faire une source lumineuse. Dans le cas du laser, il faut renvoyer la lumière dans le milieu en plaçant ce dernier dans une cavité résonante. La cavité laser la plus simple est composée de deux miroirs parallèles ; on parle de « cavité de Fabry-Perrot », du nom du premier résonateur optique réalisé en 1890 par Alfred Perrot et Charles Fabry. L'idée est d'obtenir une émission stimulée permanente, permettant ainsi de produire une onde particulièrement intense et très cohérente.

Ainsi, un laser est la réunion de trois éléments : un milieu amplificateur, un dispositif de pompage, réalisant l'inversion de population, et une cavité optique, transformant le milieu amplificateur en oscillateur. Le premier à avoir combiné ces trois concepts au sein d'un dispositif d'amplification optique est l'américain Théodore Maiman qui, en 1960, mit au point le premier laser de l'histoire¹⁴. Afin de préciser l'essence technique de la famille des lasers, il est utile d'en représenter le principe de fonctionnement sous la forme d'un diagramme. Pour cela, nous combinons les principes de la mécanologie génétique avec les outils de diagrammatisation de la *MKSM*, une méthode de gestion des connaissances développée par Jean-Louis Hermine au CEA¹⁵. Voici le diagramme de fonctionnement des lasers (Fig. 2), inspiré des diagrammes *SCFC* (Source, Cible, Flux, Champ) issus de la *MASK* :

¹² Arthur L. Schawlow, Charles H. Townes, « Infrared and Optical Masers », *Physical Review*, Vol. 112, n°6, déc. 1958.

¹³ The Nobel Prize in Physics 1966 was awarded to Alfred Kastler for « the discovery and development of optical methods for studying Hertzian resonances in atoms » (source: nobelprize.org).

¹⁴ Théodore H. Maiman, « Stimulated Optical Radiation in Ruby », *Nature*, n°187, août 1960, p. 493-494.

¹⁵ Jean-Louis Hermine, « MKSM : Méthode pour la gestion des connaissances », *Ingénierie des systèmes d'information*, Vol. 4, n°4, 1996, p. 541-575.

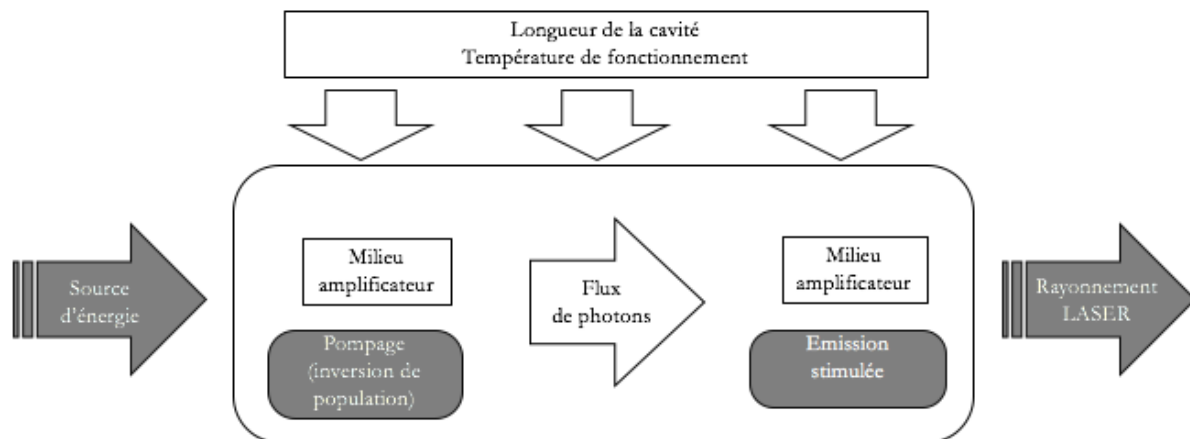


Figure 2 : Diagramme de fonctionnement du LASER. Le fait que le milieu amplificateur intervienne à la fois comme "source" et comme "cible" montre le caractère oscillatoire du laser.

Ajoutons qu'un laser peut fonctionner selon deux modes : un mode continu et un mode pulsé. Dans le mode continu l'intensité de l'émission laser est continue au cours du temps, alors que dans le mode pulsé la puissance optique se décompose en impulsions d'une certaine durée (et avec un certain temps de répétition).

Le premier laser de Maiman fonctionnait en mode pulsé, du fait du dispositif de pompage qui fonctionnait lui-même en mode pulsé (décharge d'une lampe à flash). Les lasers à mode continu sont apparus plus tard en raison de certaines contraintes portant notamment sur les propriétés du milieu amplificateur, qui doit pouvoir dissiper la chaleur efficacement sous peine de surchauffe et de destruction. Les lasers employés pour faire de la LIBS opèrent eux en mode pulsé. Ce mode peut être réalisé par plusieurs procédés techniques : le pompage pulsé, le *couplage de mode*, le *blocage de mode* et le *Q-switching*.

Le laser de ChemCam appartient à cette dernière famille. Pour réaliser un tel laser, on autorise l'inversion de la population à s'accumuler en introduisant une perte à l'intérieur du résonateur qui dépasse le gain du milieu (que l'on modélise par une réduction du facteur de qualité « Q » de la cavité). Ensuite, après que l'énergie stockée dans le milieu laser ait approché le niveau maximum possible, le mécanisme de perte introduit est rapidement éliminé, ce qui permet à l'effet laser de se déclencher rapidement en évacuant l'intégralité de l'énergie stockée d'un seul coup. Il en résulte une impulsion extrêmement courte (de l'ordre de la nanoseconde) et par conséquent une puissance de crête relativement élevée (de l'ordre du mégawatt). Dans le cas de la LIBS, cette puissance est, une fois focalisée sur une petite zone, suffisamment importante pour transformer en plasma l'échantillon rocheux à étudier.

Cette technique spectroscopique, proposée dès 1963 par Jeanine Debras-Guédon et Nicole Liodec¹⁶, ne fut que peu explorée au cours des années suivantes, essentiellement à cause de limitations techniques portant sur les lasers. Son essor ne s'est fait qu'à partir des années 1980 avec la commercialisation de lasers plus simples d'utilisation, plus performants et moins onéreux.

L'évolution technique des lignées de lasers aboutissant au laser de ChemCam peut être retracée en combinant les principes de la mécanologie génétique avec les *diagrammes de lignées* de la méthode MASK (*Method for Analysis and Structuring Knowledge*) une extension de la MKSM :

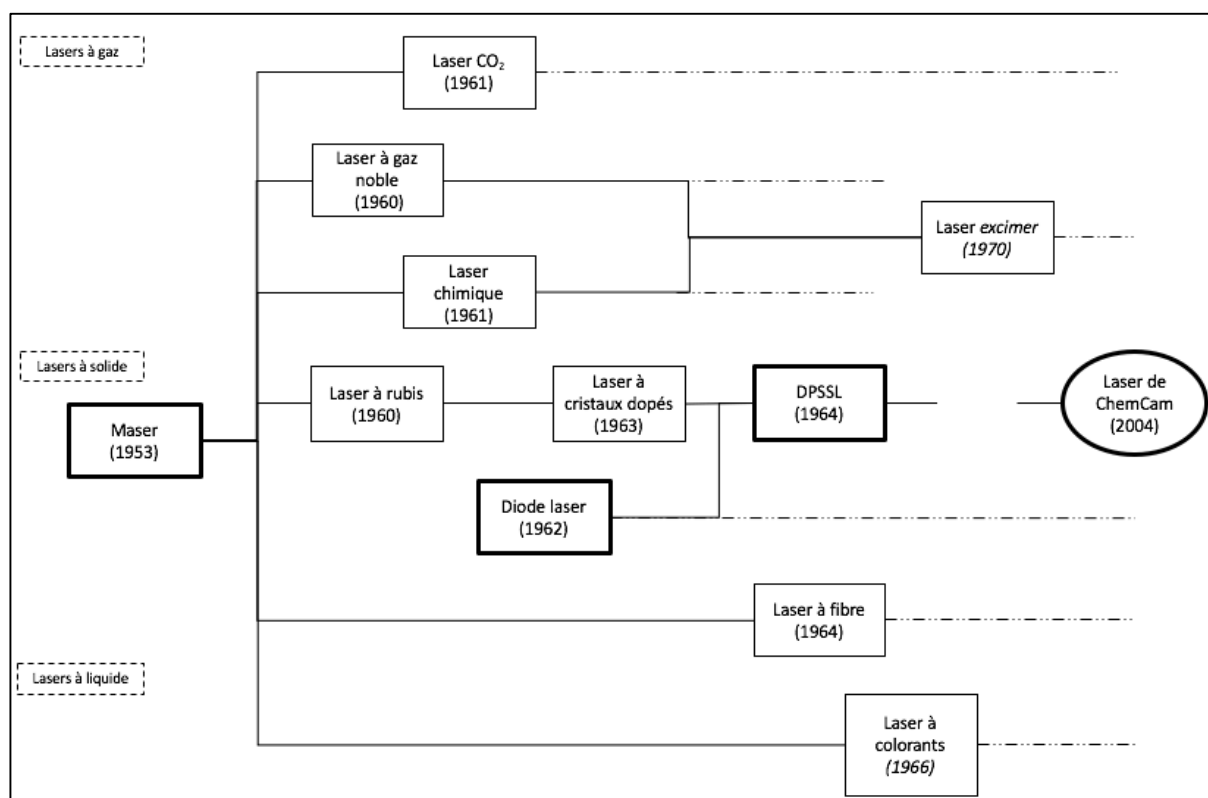


Figure 3: Diagramme de lignées du LASER. La transition des DPSSL au laser de ChemCam est analysée dans la section

3.

Alors que d'autres familles techniques utilisées en astrophysique sont caractérisées par une forte progressivité et des ruptures évolutives au sein de leurs lignée¹⁷, le schème technique des lasers semble d'une remarquable stabilité (il n'a que très peu évolué depuis 1960) et les progrès de la lignée sont surtout réalisés par une combinaison des variantes de ses éléments.

¹⁶ Jeanine Debras-Guédon & Nicole Liodec, « De l'utilisation du faisceau d'un amplificateur à ondes lumineuses par émission induite de rayonnement (laser à rubis), comme source énergétique pour l'excitation des spectres d'émission des éléments », *Compte rendu de l'Académie des Sciences*, n°257, 1963.

¹⁷ Vincent Minier & Vincent Bontems, « Simondon et l'innovation dans les machines spatiales de l'astronomie » in Vincent Bontems (dir.), *Gilbert Simondon ou l'invention du futur*, Paris, Klincksieck, 2016, p. 147-159.

Les évolutions au sein des lignées se sont essentiellement fait en adaptant les différents éléments de l'objet technique que sont le milieu amplificateur, le dispositif de pompage et la cavité résonante. Par exemple, si le premier laser était un laser à solide (rubis), la décennie suivante a vu le développement de lasers à liquide, à gaz, à colorants organiques, à fibre ou à semi-conducteur.

Chacune de ces sous-familles a pu se subdiviser à son tour suivant le matériau utilisé (parmi les lasers à gaz nobles, citons par exemple, le laser He-Ne, le laser au xénon et le laser à l'argon). Ces évolutions ne marquent pas de véritables ruptures au sein des lignées techniques de la famille du laser : ni les opérations, ni la structure globale de l'objet technique ne sont grandement modifiées ; il n'y a pas de *concrétisation* au sens de Simondon, c'est-à-dire qu'il n'y a pas un gain significatif de synergie entre les éléments.

Chaque évolution de l'essence technique du laser répond plutôt à un usage particulier, notamment en termes de longueur d'onde ou d'intensité. La faible progressivité des lignées de laser s'explique probablement par le fait que « la concrétisation des objets techniques est conditionnée par le rétrécissement de l'intervalle qui sépare les sciences des techniques »¹⁸.

Or le laser est précisément un objet technique hautement concrétisé dès son origine ; son schème technique correspond à un phénomène physique obtenu par une phénoménotechnique¹⁹ de haute technicité : l'émission stimulée, théorisée plusieurs années avant sa réalisation par Maiman.

L'évolution des lignées de laser ne passe donc pas par une réinvention de son schème opératoire, mais sera plutôt à chercher du côté des dispositifs de modulation du phénomène d'émission stimulée (nouveaux dispositifs de pompage, nouvelles cavité résonantes, etc.) et de l'optimisation adéquate des combinaisons de ses éléments pour tel ou tel usage.

Il faut, pour reprendre l'expression de François Russo, comprendre « l'épanouissement » d'un schème technique plutôt que son évolution : « Dès qu'un phénomène est mis en évidence, expliqué, maîtrisé, il tend comme spontanément à devenir moyen du plus grand nombre possible de techniques soit scientifiques, soit utilitaires »²⁰.

Après avoir été le graal de la recherche en optique pendant des décennies, le laser s'est, à ses débuts, retrouvé cantonné à un rôle de curiosité scientifique, faisant dire à Pierre Aigrain, membre de l'académie des sciences d'alors : « Nous avons l'habitude d'avoir un problème et de chercher

¹⁸ MEOT, p. 36.

¹⁹ Gaston Bachelard, *Études*, Paris, Vrin, 1970, p. 19 : « une phénoménotechnique par laquelle des phénomènes nouveaux sont, non pas simplement trouvés, mais inventés, construits de toutes pièces. »

²⁰ François Russo, « Le système des sciences et sa structure », *Revue des questions scientifiques*, 1961, cité dans Jean-Louis Manoury, *La genèse des innovations*, Paris, Presse Universitaires de France, 1968, p. 68.

une solution. Dans le cas du laser, nous avons la solution et nous cherchons le problème » Le laser n'a pas été conçu pour répondre à un besoin, qu'il soit économique, politique ou même scientifique, et sa réalisation s'en est, pour ainsi dire, trouvée « libérée » des facteurs extrinsèques pesant habituellement sur les processus de conception des autres objets techniques.

L'invention des lasers à semi-conducteurs, ou diodes lasers, constitue toutefois une étape importante dans l'évolution des lignées de laser. Une diode laser utilise les propriétés des semi-conducteurs pour réaliser l'inversion de population : le pompage se fait électriquement, et non plus optiquement, et sert à enrichir le milieu générateur en trous d'un côté et en électrons de l'autre. La lumière est produite par la recombinaison des trous et des électrons grâce à un phénomène d'électroluminescence qui intervient donc en parallèle du mécanisme d'émission stimulée.

De plus, dans la majeure partie des cas, ce type de laser ne présente pas de miroirs de cavité : le simple fait de cliver le semi-conducteur, de fort indice optique, permet d'obtenir un coefficient de réflexion suffisant pour déclencher l'effet laser. Ainsi, que ce soit dans sa structure ou dans son principe de fonctionnement, la diode laser constitue, au niveau des éléments, une évolution majeure au sein de la lignée des lasers.

Par ailleurs, une application immédiate des diodes lasers a été de se substituer aux lampes flash pour servir de dispositif de pompage optique pour d'autre laser, en particulier les lasers à solides, donnant ainsi naissance à la famille des DPSSL (*Diode-Pumped Solid-State Lasers*) dont le laser de ChemCam est un lointain descendant.

Notons au passage que ces deux familles, les diodes lasers et les DPSSL, représentent l'immense majorité des lasers actuellement en circulation : leur polyvalence fait qu'on les retrouve aussi bien dans le secteur industriel (découpe laser, lecteurs optiques, etc.) que médical (ablation dentaire, correction de la cornée, etc.) ou même universitaire (pointeurs lasers).

Les DPSSL présentent les caractéristiques suivantes : un pompage par diode laser, elle-même pompée électriquement, un milieu amplificateur à l'état solide (dans la majorité des cas un cristal dopé) et une cavité résonante.

Dans la perspective d'une mission spatiale, cette famille de laser présente le double avantage d'être particulièrement compacte et de posséder un rendement énergétique plus important que chez d'autres types de lasers. Il est donc assez aisé de comprendre pourquoi cette lignée a été privilégiée quand il s'est agi de concevoir le laser intégré à ChemCam qui devait à la fois répondre aux exigences d'une qualification pour un vol spatial et effectuer la LIBS en milieu martien.

3. La conception du laser de ChemCam

Dans son ouvrage *Réflexions sur la science des machines*²¹, Jacques Laffite introduisait les notions de mécanologie, de lignées techniques, et proposait une distinction entre trois types de machines : les machines *passives*, qui visent la stabilité, les machines *actives*, qui ont pour critère le rendement, et enfin les machines *réflexes*, dotées d'une boucle de rétroaction.

Simondon intègrera cette typologie en rebaptisant ces dernières machines *à information* pour étendre ce type à toutes les machines qui assurent la fidélité de l'information²². Simondon a, par ailleurs, complexifié les catégories de Laffite en redéfinissant les machines passives en tant que dispositif d'amortissement des perturbations, les machines actives en tant que dispositif de transfert d'énergie, et les machines informationnelles en tant que dispositif d'amplification de l'information.

En fin de compte, plutôt que trois types de machines, on peut estimer qu'il s'agit, en fait, de trois points de vue pertinents pour mesurer le degré de technicité d'un objet technique selon les performances envisagées.

Caractéristiques	Passives	Actives	Informationnelles
Critères	Stabilité	Rendement	Fidélité

Nous appliquerons cette grille de lecture à l'étude des processus de conception ayant abouti au laser de ChemCam. Les contraintes imposées par le milieu associé martien seront ainsi analysées selon leur dimension passive (stabilité thermique et mécanique), active (rendement énergétique du laser) et informationnelle (contraintes sur la durée des impulsions et la qualité du faisceau pour transmettre une information fidèle et exploitable aux autres instruments).

ChemCam est le fruit d'une collaboration entre le LANL (*Los Alamos National Laboratory*) et des partenaires français sous la responsabilité nationale du CNES. Ces deux établissements réfléchissaient à utiliser la LIBS à des fins d'exploration martienne depuis les années 2000. En 2004, le projet prend le nom de *ChemCam* lorsque Français et Américains décident de collaborer pour répondre à l'appel d'offre de la NASA concernant l'envoi d'un rover sur Mars à l'horizon 2007

²¹ Jacques Laffite, *Réflexions sur la Science des Machines*, Paris, Bloud & Gay, 1932, p. 68.

²² Gilbert Simondon, *L'invention dans les Techniques*, Paris, Seuil, 2005, p. 170-225.

(reporté à 2009 puis 2011). Les équipes américaines MIDP (*Mars Instrument Development Program*) et françaises MALIS²³ (*Mars Analysis by Laser Induced Spectroscopy*) unissent alors leurs efforts afin de proposer un instrument innovant.

La conception de la partie laser de cet instrument est confiée au CNES; le CEA apporte ses connaissances en matière de LIBS pour déterminer les performances exigées²⁴ et l'industriel

Thalès est choisi pour la fabrication du laser (basé sur un produit fonctionnellement similaire appelé laser DIVA).

The ChemCam laser is a Q-switched compact laser developed specifically for planetary applications. It derives from a commercial laser (DIVA) by Thalès Optronics. A complete redesign was undertaken by CNES and Thalès, to reduce its mass - nearly by a factor 10 - and volume significantly and to improve its stability and reliability for flight applications²⁵.

Ce partenariat entre scientifiques et industriels est pour Murielle Saccoccio (d'abord responsable du développement du laser au CNES puis chef de projet de la partie française de Chemcam) à la base de la réussite d'un tel projet : « Si Thales n'aurait pas pu concevoir et réussir ce remarquable petit laser solide pompé par diode, très performant et stable, seul, sans un bon lasériste terrestre, compréhensif et motivé, nous n'aurions pas pu réussir. »²⁶

Les techniques sur lesquelles se basent le laser de ChemCam datent du milieu des années 1960. Dès 1965 par exemple, le pompage par diode laser ou l'emploi de l'ion néodyme comme dopant sont maîtrisés. L'innovation que constitue la mise au point du laser de ChemCam ne repose donc pas sur une invention. Elle résulte de la *combinaison* de techniques préexistantes contraintes par les exigences du milieu associé (rencontre du milieu martien et des exigences des autres instruments), au premier rang desquelles se trouvent les contraintes thermiques :

The *Mast Unit* must operate over a wide range of temperatures: from -40°C to $+35^{\circ}\text{C}$. It must be stored over an even wider range, but that posed no real problem. The laser was the first concern with such a large range. The options were to use a classical Nd:YAG pulsed laser and to implement an active thermal

²³ Brennetot et al., « Mars analysis by laser-induced breakdown spectroscopy (MALIS): influence of mars atmosphere on plasma emission and study of factors influencing plasma emission with the use of doehlert designs », *Applied Spectroscopy*, vol. 57, 2003, p. 744-752.

²⁴ Jean-Luc Lacour et al., « Micro-laser-induced breakdown spectroscopy technique: a powerful method for performing quantitative surface mapping on conductive and nonconductive samples », *Applied Optics*, Vol. 52, n°30, p. 6063-6071, 2003.

²⁵ Maurice, Wiens et al., *op. cit.*, p. 111.

²⁶ Communication personnelle.

control to regulate its temperature at plus-or-minus a few degrees, or to develop an entirely new laser, based on another type of crystal, which operates over a wide range of temperatures in absence of active thermal control. The second solution was preferred because of the very low electrical power allocated at the beginning of the project²⁷.

Au standardisé Nd:YAG (Neodymium doped : Yttrium-Aluminium-Garnet), le CNES et Thalès ont préféré un autre milieu amplificateur, relativement peu exploité quoique connu depuis plusieurs années²⁸, le Nd:KGW (Neodymium doped : Potassium-Gadolinium-Tungstate), cela en raison de l'efficacité énergétique et de la stabilité thermique qu'il présente.

Les cristaux de YAG disposent d'une gamme de température de fonctionnement peu étendue (de l'ordre de 3°C autour du point optimal) tandis que les cristaux au KGW possèdent eux une acceptation thermique bien plus importante (jusqu'à 40°C autour du point optimal). Il n'est donc pas nécessaire d'implémenter un système de contrôle thermique actif qui consommerait de la puissance électrique et augmenterait la masse et le volume du laser.

En revanche, le KGW présente l'inconvénient d'être plus fragile que le YAG, ce qui dans le cadre d'une mission spatiale représente un risque. La fabrication des cristaux et la conception du laser doivent donc être particulièrement soignées pour garantir la résistance du laser aux chocs et aux vibrations pouvant se produire au cours des phases de décollage et d'atterrissage.

Les lasers terrestres sont notamment sensibles aux désalignements induits par de grandes excursions de température ou un environnement mécanique agressif. L'équipe en charge du laser a donc dû particulièrement soigner ses caractéristiques passives. Cela a été fait en faisant le choix d'une cavité laser linéaire, moins sensible aux désalignements qu'une cavité repliée, et par un choix rigoureux des matériaux et procédés de fabrication et d'assemblage.²⁹

L'innovation du laser de ChemCam se base sur une technologie préexistante et suffisamment mature pour avoir pénétré le champ industriel. Le laser a cependant été développé spécialement pour des applications spatiales : l'innovation dans ce cas est une *adaptation* à un usage et à un milieu associé particuliers. L'inventivité du laser de ChemCam n'est pas à chercher dans la transformation ou la reconfiguration de ses éléments constitutifs mais dans leur sélection et leur combinaison, dans une *hybridation*.

Basé sur un schème connu et maîtrisé (le laser DIVA), le processus de conception a consisté à recruter au sein d'autres domaines les apports techniques requis : un nouveau matériau (le

²⁷ Maurice, Wiens et al., *op. cit.*, p. 112.

²⁸ Vikram Kushawaha, Ashok Banerjee, Lawrence Major, « High-efficiency Flashlamp-pumped Nd:KGW Laser », *Applied Physics B-Photophysics and Laser Chemistry*, Vol 56, n°4, Avril 1993, p. 239-242.

Nd:KGW), le recours à la miniaturisation (permettant d'alléger l'instrument au maximum), l'emploi de *getters* (pièges à contamination pour éviter des pannes liées à la contamination des optiques) et l'utilisation d'un boîtier en titane (pour garantir la solidité de l'objet).

Garantir la robustesse et la résilience de l'instrument tout en diminuant la masse et le volume ; optimiser la consommation énergétique tout en conservant une stabilité thermique importante ; telles sont les « résolutions de problèmes inventifs »²⁹ requises pour cette innovation. Les résultats obtenus, mesurés à l'aune de ces critères, sont remarquables : le laser pèse moins de 600 grammes et peut fonctionner dans une gamme de température de 60°C.

Toutefois, il s'agit d'une application *suradaptée* à un milieu associé donné. Elle peut donc limiter la « généralité » de l'objet technique, c'est à dire sa capacité à être réemployé dans d'autres domaines ou à donner naissance à de nouveaux développements.

On pourrait être tenté de la qualifier d'*hypertélique* au sens de Simondon tant les contraintes mécaniques et thermiques imposées par le milieu extérieur ont déterminé les choix de conception. Ces contraintes, portant sur la dimension passive de l'objet technique, sont parmi les plus importantes dans le contexte martien.

L'impossibilité d'effectuer des réparations conduit à privilégier les structures les plus stables pour le laser, Chemcam et plus généralement pour Curiosity, afin de garantir la pérennité de la mission. L'utilisation d'une cavité laser linéaire, la pressurisation du laser et l'insertion de « *getters* » s'inscrivent dans cette optique d'aboutir à un objet technique stable et performant, malgré la complexité induite par les contraintes spatiales et martiennes.

En plus de ces contraintes, celles liées à l'intégration du laser au sein de ChemCam et de Curiosity – le milieu technicisé – ont aussi eu un impact sur les solutions retenues. L'exemple le plus parlant concerne les interactions du laser avec le télescope chargé de le focaliser sur l'échantillon. Ce télescope est un Schmidt-Cassegrain dont nous donnons un schéma ci-dessous :

²⁹ Genrich Altshuller, *The Innovation Algorithm: TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*, Worcester, Technical Innovation Center, 2007.

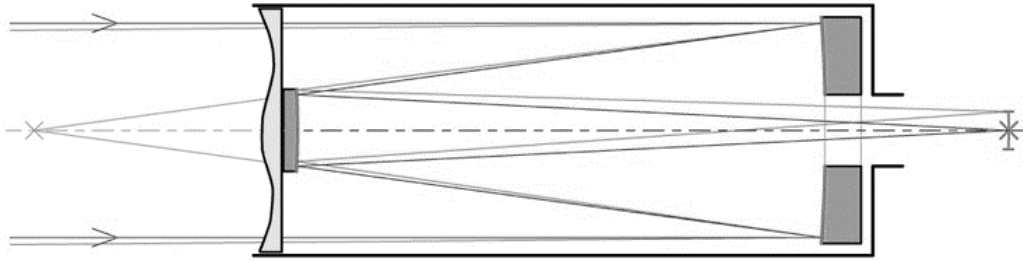


Figure 4: Trajectoire des rayons lumineux au sein d'un télescope Schmidt-Cassegrain.

Ce type de télescope présente l'avantage d'être très compact et de disposer d'un grand champ de vue, ce qui permet dans le cas de ChemCam d'élargir le faisceau laser d'un facteur 10 tout en proposant un encombrement limité. Cependant, la présence du miroir secondaire a tendance à occulter une partie du faisceau laser, d'où une perte de puissance allant jusqu'à 50%.

Afin de maintenir une puissance nécessaire à l'emploi de la LIBS jusqu'à 10 mètres, il a fallu rajouter un étage d'amplification afin de passer de 15 mJ en sortie de l'oscillateur à 35 mJ en sortie du laser. C'est un choix de conception assez courant chez les fabricants de laser, visant à obtenir la puissance optique nécessaire, tout en préservant la qualité de faisceau. Ceci permet ici d'obtenir la densité de puissance optique requise pour faire de la spectroscopie LIBS sur la cible dans toute la gamme de distance applicable.

Ces contraintes portent sur la dimension *active* du laser : la puissance en sortie de ChemCam et la densité de puissance optique sur la cible doivent être suffisantes pour transformer la zone visée en plasma, tout en minimisant la consommation électrique. Indirectement, il s'agit de contraintes portant sur le rendement énergétique : la puissance électrique disponible étant limitée, le laser se doit d'être le plus performant possible.

La première solution retenue par les ingénieurs du CNES et de Thalès, pour le pompage de l'oscillateur laser et de l'amplificateur simple passage, se basait sur l'*autostack*, dernière évolution en date du pompage par diode. D'une puissance de 1000 W, cette technique de pompage pouvait amener l'énergie du faisceau laser de sortie aux 35 mJ requis.

Malheureusement, l'*autostack* n'a pas trouvé assez de débouchés commerciaux et Thalès en a cédé les droits à une autre compagnie, en 2005, qui en a ensuite abandonné le développement. Les ingénieurs en charge du laser de ChemCam ont donc dû se rabattre sur la génération précédente de diodes lasers : les *stacks*.

Cette « régression technique », qui affecte les performances actives du laser, à savoir la puissance et le rendement, a rejaili sur les performances passives : là où un seul étage d'amplification par

autostack aurait suffi, l'emploi de stacks a obligé à l'ajout d'un second étage d'amplification augmentant le poids et le volume du dispositif final.

Cet exemple montre que l'étude des innovations doit intégrer les ressources et les contraintes économiques à la « base de connaissances » à partir de laquelle se développe le processus de conception afin d'éviter les écueils d'une étude purement *internaliste* des dynamiques de l'évolution technique.

En outre, il montre que les caractéristiques passives, actives et mêmes informationnelles de l'objet technique sont liées : le recours à un double étage de stacks conduit à un laser plus lourd, et à un faisceau plus puissant mais de moins bonne qualité, d'où une dégradation des performances informationnelles.

Si le laser de ChemCam peut être vu à la fois comme un outil et une sonde (à l'instar d'un bâton qui peut servir à pousser comme à tâter le terrain), et peut être évalué tant pour ses performances actives qu'informationnelles, un dispositif LIBS vise avant tout des performances informationnelles. Afin de garantir la fidélité de l'information, recueillie sous forme de rayonnement par le télescope, les caractéristiques du laser doivent donc satisfaire un ensemble de contraintes portant en premier lieu sur la qualité du faisceau ou la durée des impulsions.

Les concepteurs du laser ChemCam ont pris en compte ces exigences, et ont veillé à garantir leur obtention sur une large gamme de température, inégalée jusqu'ici dans le domaine des lasers, sans régulation thermique. Ainsi, le laser Chemcam est plus petit, plus performant et plus robuste que son lointain modèle terrestre de départ, tout en produisant un faisceau de qualité (profil de faisceau et durée d'impulsion) suffisante pour faire de la spectroscopie LIBS à distance, sur des cibles situées entre 1 et 10 m.³⁰

De par ses caractéristiques et son usage, le laser de ChemCam constitue une innovation. Celle-ci ne découle pas d'une invention, mais d'un processus de conception extrêmement contraint par le milieu associé (extraterrestre et technique). L'adaptation et l'hybridation de techniques existantes a ainsi produit un objet, certes très performant, mais suradapté à un milieu particulier.

Cette innovation est une *customisation* et il n'est pas sûr qu'elle puisse donner lieu à des prolongements ou à la naissance d'une nouvelle lignée. Pour preuve, il est envisagé que les futures missions spatiales de la NASA (notamment l'instrument SuperCam du Mars 2020 Rover³¹) voient

³⁰ Murielle Saccoccio et al, "The CHEMCAM Instrument on Mars Science Laboratory (MSL 11): First Laser Induced Breakdown Spectroscopy Instrument in Space!", *SAE Technical Paper*, 2009.

³¹ Roger C. Wiens, Sylvestre Maurice et al, « The SuperCam remote sensing instrument suite for Mars 2020 », *47th Lunar and Planetary Science Conference*, 2016.

le retour des lasers YAG, notamment grâce à l'emploi de diodes de pompes « multicolores » qui n'existaient pas à l'époque de ChemCam.

Conclusion : de l'importance des milieux associés

L'étude mécanologique de ChemCam montre l'importance du milieu associé (ici l'environnement martien) au cours d'un processus de conception innovante. Le caractère extraterrestre de ce milieu explique pour beaucoup pourquoi les surdéterminations sociales et culturelles semblent absentes. Si le concours organisé par la NASA pour trouver le nom de Curiosity augmente la participation affective du grand public, il n'engage aucun feedback sur le design de l'objet technique.

Les modalités de l'insertion sociale et culturelle du laser de ChemCam sont paradoxales, parce que la présence de ce laser sur Mars signifie une prouesse technique, mais aussi un affranchissement des contraintes sociales qui pèsent sur les objets techniques fonctionnant à notre contact.

Notre étude se veut une tentative de faire valoir la valeur culturelle *propre* de la technicité du laser de ChemCam. Le schème technique de la LIBS, l'originalité du milieu associé martien, le progrès par « épanouissement » de la lignée des lasers, l'intrication des performances passives, actives et informationnelles lors de la customisation, et l'observation d'une relation inverse entre l'adaptation à un milieu donné et la généricité, sont autant de concepts issus de la mécanologie génétique de Gilbert Simondon qui nous semblent pertinents pour valoriser cette « innovation extraterrestre », au sein de la culture, sans en trahir ni déguiser les caractéristiques techniques.

L'utilisation d'un laser sur Mars n'est pas la seule des « applications hors du commun »³² de la LIBS. Une autre application remarquable, qui a trait au patrimoine culturel, va nous permettre, pour finir, de considérer comment les facteurs sociaux et culturels sont intégrés à la conception comme à l'utilisation d'une innovation comparable : au musée du Louvre, des lasers sont utilisés pour l'étude et la restauration des œuvres d'art. La LIBS permet l'identification des pigments utilisés en peinture, la restauration de certaines sculptures, voire « l'étude stratigraphique d'un Daguerrotypage du XIX^e siècle »³³.

Davantage que pour la rapidité et la facilité de ses analyses à distance, la LIBS est ici appréciée pour son caractère quasi non destructif. Moins de quelques microgrammes sont vaporisés par le laser, un prélèvement invisible à l'œil nu mais suffisant pour des analyses approfondies. Les lasers

³² Nadège Caron & Jean-Baptiste Sirven, « Analyse in situ par spectrométrie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS) : des performances uniques au service d'applications multiples » in Christine Labaune et Gérard Mourou (dir.), *50 ans du laser dans la ville lumière*, Paris, 2010, p. 143.

³³ *Id.*

employés dans l'analyse d'œuvres d'art sont extrêmement contraints par la *finesse* de l'opération à réaliser : la préservation de l'intégrité de l'œuvre passe avant toute considération sur la robustesse ou la puissance du faisceau.

Il est intéressant de noter que l'insertion sociale et technique, au sein d'un milieu terrestre aussi culturellement marqué que le Louvre, conduit au développement de lasers tout aussi spécialisés que celui de ChemCam destiné à s'insérer dans un milieu extraterrestre. Bien que répondant à des exigences différentes, la customisation de ces deux lasers produit une perte de généricité analogue : si le laser de ChemCam serait bien trop destructeur pour entrer au Louvre, les lasers employés au sein de ce dernier seraient bien trop fragiles pour être embarqués vers Mars.

B.4. Relecture mécanologique de l'histoire des télescopes

Les historiens de l'astronomie ont coutume de distinguer l'astronomie *pré-télescopique* de l'astronomie telle que nous la connaissons aujourd'hui¹. L'invention de la lunette de Galilée en 1609, tenue pour la première occurrence du télescope dans l'histoire, a constitué un profond bouleversement des pratiques astronomiques : désormais les astronomes possédaient un instrument permettant d'acquérir des informations à propos d'objets extrêmement lointains, et dont la taille dépasse largement l'échelle humaine. La lunette astronomique a révolutionné l'astronomie par l'importance et la précision des observations réalisables, mais aussi parce qu'elle opéra un premier déphasage au sein des échelles d'observation². À la modification des pratiques scientifiques s'ajoutait une modification de la vision que l'Homme avait de sa place dans le cosmos³ ; ce changement épistémologique et ontologique constituant une révolution aussi bien scientifique⁴ qu'astronomique⁵. Si des instruments d'observation existaient depuis longtemps – astrolabes, sphères armillaires et autres quadrant –, ceux-ci ne permettaient pas de dépasser les possibilités perceptives humaines alors que le télescope, en tant que dispositif amplificateur, allait devenir l'instrument central de l'astronomie. L'apparition de la lunette en 1609 signe le triomphe de la technicisation des observations et ouvre la voie aux autres champs scientifiques : « jusqu'aux alentours de 1600, l'astronomie était l'unique science utilisant des instruments. En 1700, aucune science ne pouvait prétendre s'en passer⁶ ».

Mais des premières lunettes aux grands observatoires modernes, les dispositifs techniques mobilisés en astronomie ont énormément évolué. Nous proposons de retracer cette histoire selon le point de vue de la *mécanologie génétique*. Cette méthode d'analyse des évolutions des lignées techniques prolonge le projet mécanologique de Jacques Lafitte⁷ en l'enrichissant de la méthode

¹ Christopher Walker, *Astronomy Before the Telescope*, Londres, British Museum Press, 1999, p. 12.

² Gilbert Simondon, « Psychosociologie de la technicité », dans *Sur la Technique*, Paris, Presses universitaires de France, 2014, p. 27-73.

³ Alexandre Koyré, *Du Monde clos à l'univers infini*, Paris, Presses universitaires de France, 1962.

⁴ Thomas Khun, *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 2008.

⁵ Alexandre Koyré, *La Révolution astronomique*, Paris, Les belles lettres, 2016.

⁶ Jean-Pierre Sérís, *La Technique*, Paris, Presses Universitaires de France, 2013, p. 208.

⁷ Jacques Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, Paris, Bloud & Gay, 1932, p. 68. : « La science des machines, ou mécanologie, science normative, n'a d'autre but que l'étude et l'explication des différences qui s'observent entre les machines ».

génétique de Gilbert Simondon⁸. Il s'agit en particulier de repérer l'apparition, l'évolution et la diffusion des différents *schèmes techniques* afin de retracer les différentes lignées de la famille des télescopes. Reprenant les catégories de Simondon, le télescope, en tant que réalisation effective d'un schème technique particulier dans un milieu associé, sera qualifié *d'individu technique*. Ses composants, indifférents à la nature du milieu seront qualifiés *d'éléments* et les dispositifs englobants, et articulant plusieurs milieux, *d'ensembles techniques*. Si le concept de lignées techniques nous semble être l'outil méthodologique le plus à même de proposer une reconstruction synthétique et robuste de l'histoire des télescopes c'est parce qu'il rattache l'évolution de ces dispositifs techniques à une dynamique – à une *genèse*⁹ pour reprendre le vocabulaire simondonien – d'évolution, et évite ainsi l'écueil d'une classification purement utilitariste des objets techniques.

En effet, selon l'étymologie, un télescope est ce qui permet de « voir loin » (*τηλε σκοπω*), mais, du point de vue mécanologique, nous appellerons « télescope » tout dispositif technique permettant de *collecter* et de *focaliser* un rayonnement électromagnétique. Cela correspond à un nombre limité de schèmes techniques. Encore aujourd'hui, on ne connaît que deux principes réalisant cette double opération : il s'agit des phénomènes de réfraction lumineuse (à l'œuvre dans les lentilles) et de réflexion (à la surface de miroir notamment). Ces deux principes physiques se traduisent en deux schèmes techniques à l'origine des deux lignées de télescopes : les télescopes *réflecteurs*, ou simplement télescopes en français, et les télescopes *réfracteurs*, ou lunettes¹⁰. Historiquement, c'est ce dernier, basé sur le principe de réfraction, qui donna naissance au premier instrument permettant d'observer les astres en collectant et focalisant leur rayonnement.

Vie et mort des télescopes *réfracteurs*

Nous ferons débiter l'histoire du télescope en 1609, année à laquelle Thomas Harriot réalise les premiers dessins de la surface lunaire en utilisant une lunette (*dutch trunk*¹¹), quelques mois avant que Galilée ne l'utilise à son tour pour observer le mouvement des astres¹². Si les pouvoirs

⁸ Gilbert Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 2012, p. 23 : « comme dans une lignée phylogénétique, un stade défini d'évolution contient en lui des structures et des schèmes dynamiques qui sont au principe d'une évolution des formes ».

⁹ Simondon, 2012, p. 22.

¹⁰ On trouve aussi, mais plus rarement, les dénominations de « télescopes catoptriques » et de « télescopes dioptriques ».

¹¹ Henry C. King, *The History of the Telescope*, Buckinghamshire, Dover Publications, 2011, p. 33.

¹² Galiléo Galilei, *Le Messager des étoiles*, Seuil, Paris, 1992 (1^{ère} édition 1610).

grossissants des lentilles étaient connus depuis plusieurs siècles¹³, l'idée d'associer une lentille convexe et une lentille concave au sein d'un même dispositif afin d'obtenir un instrument permettant d'observer des objets éloignés ne fut formulée qu'en 1586, dans l'ouvrage *Magia Naturalis* de l'italien Giambattista della Porta. La paternité de cette invention sera néanmoins disputée entre plusieurs opticiens hollandais. Entre septembre et octobre 1608, Hans Lippershey, Jacob Metius et Zacharias Janssen déposeront chacun une demande de brevet pour « un instrument permettant de voir les choses lointaines comme si elles étaient proches¹⁴ », bientôt appelé « lunette d'approche ». Dotée d'un facteur de grossissement de seulement trois et possédant d'importantes aberrations, optiques comme chromatiques, la lunette d'approche est considérée à ses débuts comme un objet anecdotique¹⁵.

Mais du fait de son perfectionnement, puis de son adoption généralisée par la marine, notamment militaire, qui voit dans cet objet technique un formidable instrument de navigation, la lunette d'approche va rapidement se propager dans toute l'Europe jusqu'à parvenir dans les mains du mathématicien et astronome italien Galilée¹⁶. Si son nom est aujourd'hui associé à l'invention de la lunette astronomique, c'est parce qu'il est l'un des premiers à saisir le potentiel scientifique d'un tel dispositif, et à voir en lui le moyen de faire entrer l'astronomie dans une nouvelle ère¹⁷. Instrumentaliste brillant, il perfectionne la lunette hollandaise, diminuant les aberrations latérales et allant jusqu'à obtenir un facteur de grossissement de 20, puis de 30, lui permettant de réaliser, entre autres, les premières observations de Jupiter et de ses satellites.

Il est à noter que la lunette d'approche, devenue lunette astronomique est l'exemple même d'une « technique sans science », c'est-à-dire d'une invention majeure qui ne découle pas de l'application d'un principe scientifique qui l'aurait précédé: dès les premières lignes de la *Dioptrique* (Discours Premier), Descartes nous parle ainsi de « ces merveilleuses lunettes qui, n'étant en usage que depuis peu, nous ont déjà découvert de nouveaux astres dans le ciel, et d'autres nouveaux objets dessus la Terre, en plus grand nombre que ne sont ceux que nous y avons vu auparavant », et d'ajouter

¹³ Albert Van Helden, « The Invention of the Telescope », *Transactions of the American Philosophical Society*, vol. 67, n°4, 1977, p. 1-67.

¹⁴ Albert Van Helden, Sven Dupré, Rob van Gent, Huib Zuidervaart (dir.), *The Origins of the Telescope*, Amsterdam, Knaw Press, 2010.

¹⁵ Paul Couderc, *Histoire de l'astronomie classique*, Paris, Presses universitaires de France, 1982, p. 95.

¹⁶ King, 2011, p. 34.

¹⁷ Le premier utilisateur de la lunette à des fins astronomiques est Thomas Harriot, mathématicien et astronome anglais qui, quatre mois avant Galilée, l'utilise pour observer la surface de la Lune.

« Mais, à la honte de nos sciences, cette invention, si utile et si admirable, n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune ¹⁸ ».

La lunette de Galilée va se diffuser rapidement et subir nombre d'améliorations, notamment par Kepler qui, en 1611, propose dans son ouvrage *Dioptricae* une étude mathématique de la théorie des dioptries et une nouvelle architecture pour la lunette ¹⁹. Désormais composée de deux lentilles convexes et d'un tube non plus télescopique mais fixe, la lunette de Kepler permet d'atteindre des grossissements plus importants au prix d'un allongement du tube et d'une image retournée. Dans la mesure où l'observation des astres lointains ne dépend pas d'une orientation préférentielle ce dernier point est peu problématique – au contraire de l'allongement du dispositif qui va, on le verra par la suite, enclencher une dynamique plus problématique.

Aussi différents soient-ils, les types galiléen et képlérien de lunettes présentent le même inconvénient de recourir à des lentilles et donc de présenter des *aberrations chromatiques* ²⁰. Celles-ci sont dues à la variation de l'indice de réfraction du verre composant les lentilles qui dépend de la longueur d'onde de la lumière qui les traverse : toutes les couleurs du spectre ne sont pas déviées avec la même intensité et sont donc focalisées à des distances différentes ²¹. Si, par exemple, la mise au point est effectuée pour le rouge, le bleu est alors flou et inversement : on note alors la présence d'*irisations* qui nuisent à la qualité de l'image en sortie du système optique. La suppression de ces aberrations chromatiques a constitué le premier grand défi de l'instrumentation astronomique. Deux solutions principales ont alors émergé. La première, proposée par Christiaan Huygens, fut de diminuer le rayon de courbure et l'épaisseur des lentilles utilisées afin de diminuer l'épaisseur de verre à traverser et donc l'importance des aberrations chromatiques. Cette solution présente cependant l'inconvénient de conduire à une augmentation de la distance focale des lunettes et à des tubes toujours plus grands. En effet, la distance focale est d'autant plus grande que le rayon de courbure est faible (déviations des rayons lumineux moins importantes) et de plus celle-ci varie comme le carré du diamètre de l'objectif.

Or, les astronomes ont toujours besoin d'augmenter ce *diamètre d'ouverture* – les anglo-saxons parlent à ce titre d'*aperture fever* ²². En effet, l'ouverture d'un télescope, mesurée par la taille du

¹⁸ Renée Descartes, *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*, Paris, Edition Angot (Source numérisée : BnF/Gallica), 1668, p. 65.

¹⁹ Jean-Pierre Verdet, *Une Histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, 1990, p. 162.

²⁰ Fred Watson, *Stargazer. The Life and Times of the Telescope*, Cambridge, Da Capo Press, 2004, p. 91-92.

²¹ C'est d'ailleurs ce même principe que Newton utilisera pour étudier la décomposition de la lumière par un prisme.

²² Watson, 2004, p. 10.

diamètre de son miroir primaire, est dépositaire des objectifs scientifiques de la mission. L'augmentation du diamètre permet de recueillir plus de lumière et donc de détecter des sources plus faibles, d'où une augmentation de la quantité d'observations réalisées. En outre, le *pouvoir de résolution* augmente aussi, ce qui se traduit par l'augmentation de la qualité des observations. Dans leur quête de données à exploiter, les scientifiques ont donc tendance à construire – ou faire construire – des télescopes toujours plus imposants. Cette *tendance au gigantisme* est dès lors motivée par des facteurs externes au sens où ceux-ci dérivent d'un souci de performance utilitaire et non de nécessités techniques, et ces nouveaux géants vont d'ailleurs rapidement se heurter à un certain nombre de contraintes techniques.

Le double objectif de (1) diminuer la courbure des lentilles utilisées et (2) augmenter le diamètre de l'objectif a amené les lunettes à bientôt dépasser les 30 puis les 40 mètres de longueur jusqu'à atteindre 46 mètres en 1641. Ayant besoin d'échafaudages, de longs mâts ou grues pour les maintenir, ces télescopes étaient très peu maniables et surtout très fragiles : la moindre vibration, le moindre coup de vent risquait de détruire complètement le dispositif. Ces lunettes à très grande focale sont, pour reprendre le vocabulaire de la TRIZ²³, la manifestation d'une *contradiction technique*²⁴ typique des phases de saturation : il s'agit d'un conflit entre deux effets, qui ne peuvent être obtenus en même temps car toute tentative d'améliorer l'un conduit à détériorer l'autre²⁵. L'amélioration d'une fonction utile conduit à amplifier un effet néfaste, ou inversement, la réduction d'un effet néfaste s'accompagne d'une réduction d'une fonction utile. Dans le cas présent, l'augmentation de la distance focale permet de diminuer les aberrations chromatiques mais augmente la fragilité de l'objet technique : il y a donc contradiction entre la performance du dispositif et sa robustesse.

Une solution originale, bien qu'anecdotique, au problème de l'hypertrophie des tubes des lunettes fut proposée en 1675 par les frères Huygens qui proposèrent de se passer complètement de tube : ainsi naquit la sous-lignée des « télescopes aériens » (*tubeless aerial telescope*²⁶). L'objectif était monté à l'intérieur d'un petit tube de fer fixé sur une rotule pivotante elle-même disposée sur

²³ La TRIZ, acronyme russe de « théorie de résolution des problèmes inventifs » est une théorie, mais aussi une méthode d'analyse et de résolution, des problèmes techniques mise au point par l'ingénieur soviétique Genrich Altshuller dans les années 1950.

²⁴ Genrich Altschuller, *The Innovation Algorithm. TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*, Worcester, Technical Innovation Center, 1999.

²⁵ Analogie technique d'un optimum de Pareto au sens d'« allocation des ressources pour laquelle il n'existe pas une alternative dans laquelle tous les acteurs seraient dans une meilleure position ».

²⁶ King, 2011, p. 54.

un mât réglable, tandis que l'oculaire était monté dans un autre tube, les deux tubes étant maintenus alignés par une corde.

Cette idée, aussi élégante soit-elle, ne constitue toutefois pas une solution pérenne pour la lignée des télescopes réfracteurs dans la mesure où les problèmes de fragilité et de maniabilité demeurent : la contradiction principale n'étant pas dépassée, il serait plus judicieux de parler d'une tentative de contournement, *d'un détour*²⁷, plus que d'une *résolution* du problème technique. Les télescopes réfracteurs à très long tube ainsi que les télescopes aériens peuvent être qualifiés de dispositifs *hypertéliques*, à la fois par analogie avec la biologie²⁸ et au sens de Simondon²⁹. En effet, l'allongement de la distance focale de l'instrument pour diminuer la courbure des lentilles afin de diminuer – et non supprimer – les aberrations chromatiques relève d'une logique de conception trop dépendante du donné technique, immédiatement saisissable par les concepteurs, pour constituer un véritable progrès technique. Elle donne plutôt l'illusion d'un progrès par l'amélioration des performances rendue possible par l'hypertrophie de certaines caractéristiques (la distance focale) au détriment d'une réflexion sur une éventuelle évolution du fonctionnement du dispositif technique.

La deuxième solution au problème des aberrations chromatiques relève d'une autre logique de conception et conduit à la mise au point de la lunette *achromatique* par Chester Moore Hall en 1729³⁰. L'idée est de revenir au principe de fonctionnement de la lentille – la réfraction – et de s'en servir pour contrecarrer les problèmes liés au caractère dispersif du verre. Une lentille achromatique est une lentille composée de deux types de verre de dispersion différente. Le premier élément est une lentille convexe en verre « Crown », de dispersion relativement faible, tandis que le second est une lentille concave en verre « Flint », de dispersion plus élevée. Les deux lentilles sont disposées l'une à côté de l'autre et conçues de sorte que la dispersion chromatique de l'une soit compensée par celle de l'autre. La conjonction des deux forme un doublet achromatique permettant de focaliser deux longueurs d'onde différentes au même foyer et d'ainsi réduire drastiquement les aberrations.

Breveté en 1758 par l'opticien anglais John Dollond (déclenchant une querelle de priorité avec Chester Moore Hall), le doublet achromatique va se généraliser dans la conception des lunettes³¹.

²⁷ Gilbert Simondon, *Imagination et Invention (1965-1966)*, Chatou, Les éditions de la Transparence, 2008, p. 139.

²⁸ « Développement exagéré d'un organe qui peut aller jusqu'à compromettre la vie de l'individu ».

²⁹ Pour Simondon, un dispositif technique est qualifié d'hypertélique quand son fonctionnement implique une suradaptation à un usage et un milieu particulier.

³⁰ King, 2011, p. 144.

³¹ Solange Grillot, « Les instruments des observatoires français au 19^e siècle », *L'Astronomie*, vol. 100, 1986, p. 280.

Une évolution ultérieure de cette logique de conception fut la mise au point, dès 1765, du triplet apochromatique permettant de réaliser des lunettes dites apochromatiques. L'idée fut d'utiliser non plus deux mais trois éléments afin de focaliser trois longueurs d'onde différentes au même foyer, contribuant à une nette diminution des aberrations chromatiques. Enfin, le développement du verre en fluorite dans les années 1960, a permis de combiner quatre éléments au sein de lunettes *superachromatiques*, permettant de focaliser quatre longueurs d'onde au même point et améliorant d'autant la qualité des images produites. Notons qu'ici le progrès n'a plus seulement lieu à l'échelle de l'individu (la lunette) mais aux échelles élémentaire (lentilles) et même infra-objectale (type de verre).

La meilleure compréhension scientifique des principes sous-jacents et la volonté de contrôler le schème technique sont à l'origine de progrès au sein de la lignée qui, à la différence des évolutions hypertéliques, n'engendrent pas de contradictions. Le passage de la lunette classique à la lunette achromatique puis apochromatique et enfin superachromatique traduit une logique d'évolution différente de la tendance au gigantisme : la *complexification correctrice*, qui désigne les modifications structurales par l'ajout ou la complexification d'éléments permettant de corriger les défauts de l'objet. Les deux logiques peuvent néanmoins se combiner. L'invention du doublet achromatique et de ses successeurs a rendu à nouveau possible l'emploi de lentilles plus épaisses, de distance focale moins importante, et donc de réduire la taille des instruments de plusieurs ordres de grandeur. Les évolutions ultérieures ont relancé la course au gigantisme : à partir du début du XIX^e siècle, la collaboration entre le verrier Pierre-Louis Guinand et l'instrumentaliste Joseph von Fraunhofer donne naissance à l'ère des « grands réfracteurs ³² ». La découverte par le premier de nouveaux procédés de fabrication du verre Flint permit au second de réaliser une lunette achromatique de 24 centimètres d'ouverture pour une distance focale de « seulement » 4 mètres (à comparer avec la lunette d'Hevelius qui possédait une ouverture de 12 centimètres pour une focale de 46 mètres). Au cours du XIX^e siècle, le diamètre de ces grandes lunettes va plus que quadrupler, passant de 24 centimètres à 102 centimètres pour la lunette de l'observatoire Yerkes et culminant à 125 centimètres pour la lunette de démonstration de l'exposition universelle de Paris 1900 ³³.

³² Waaland J. Robert, « Fraunhofer and the Great Dorpat Refractor », *American Journal of Physics*, vol. 35, n°4 1967, p. 344–350.

³³ Celle-ci reste du point de vue scientifique plutôt anecdotique dans la mesure où, figée en position horizontale, elle ne permettait que des observations limitées. Elle sera d'ailleurs démontée à la fin de l'exposition, faisant de l'observatoire de Yerkes la plus grande lunette officiellement en activité.

Cette lignée des grands réfracteurs finit aussi par rencontrer des *contradictions* techniques insurmontables, de véritables *blocages* technologiques. Tout d'abord, comme dans la lignée des réfracteurs non achromatiques, l'allongement du tube finit par être problématique. L'emploi de lentilles plus larges permet certes de réduire la distance focale mais au prix d'une augmentation du poids de la structure : le seul tube de la lunette de Yerkes pèse plus de 75 tonnes ce qui impacte grandement la maniabilité du dispositif. En outre, l'utilisation de lentilles de grande taille présente, intrinsèquement, deux problèmes majeurs. Le premier réside dans la difficulté à usiner des verres homogènes d'un tel volume conduisant à l'impossibilité d'obtenir des lentilles de bonne qualité de plus d'un mètre. Le second problème provient quant à lui des déformations des lentilles dues à la gravité – on parle de *lens sagging* – une lentille ne pouvant être supportée que par les bords, un poids trop important provoque une distorsion de la forme de la lentille qui ne focalise plus les rayons de la bonne façon. Cette nouvelle contradiction technique entre la taille et la qualité de l'objectif est impossible à résoudre car elle découle du principe même de la réfraction lumineuse ; elle entraîne une saturation définitive de la lignée des télescopes réfracteurs du fait de l'existence d'une limite objective du diamètre d'ouverture des lunettes (autour du mètre). La lignée des réfracteurs, saturée, allait être bientôt supplantée par la lignée concurrente des réflecteurs³⁴.

Concurrence des télescopes *réflecteurs* et substitution

Proposé dès 1636 par Marin Mersenne³⁵, théorisé en 1663 par James Grégory et réalisé en 1668 par Isaac Newton, le télescope réflecteur va peu à peu se substituer au réfracteur pour devenir l'instrument majeur de l'astronomie. Si les aberrations chromatiques sont un problème inhérent à l'usage de lentilles et au phénomène de réfraction, les télescopes réflecteurs recourant à des miroirs et basés sur le principe de réflexion lumineuse en sont quant à eux purement et simplement dénués³⁶. C'est ce constat qui poussa Newton à abandonner les télescopes réfracteurs et à concevoir, en 1668, le premier télescope à base de miroirs. Composé d'un miroir primaire concave sphérique fait d'un alliage d'étain et de cuivre, et d'un miroir secondaire plan et oblique caractéristique des télescopes de « type Newton », ce télescope présentait l'avantage d'être dénué d'aberrations chromatiques et d'être particulièrement compact. Deux autres types de design existent pour les

³⁴ Watson, 2004, p. 181.

³⁵ Piero E. Ariotti, « Bonaventura Cavalieri, Marin Mersenne, and the Reflecting Telescope », *ISIS*, vol. 66, n°3, 1975, p. 302-321.

³⁶ Isaac Newton, *Traité d'optique*, Paris, Gauthier-Villars, 1955.

télescopes composés de miroirs : le type grégorien ³⁷ théorisé en 1663 et le type Cassegrain ³⁸ mis au point en 1672.

Cependant, la difficulté d'usiner des miroirs de la forme désirée est responsable d'aberrations géométriques qui limitent les diamètres d'ouverture par rapport à la lignée concurrente des réfracteurs. Ces limitations industrielles ont été des freins à la diffusion et à l'épanouissement de cette lignée. Les premiers télescopes réflecteurs utilisaient des miroirs métalliques, en bronze tout d'abord puis en *speculum* ³⁹. S'ils présentaient l'avantage d'être dénués d'aberrations chromatiques, ils possédaient l'inconvénient de ternir à l'usage (oxydation due à l'atmosphère) et possédaient un faible pouvoir réfléchissant (un tiers de la lumière incidente étant perdue). Il fallait donc les polir relativement souvent, ce qui, à la longue, contribuait à éloigner les miroirs de leur forme optimale et donc à dégrader la qualité du télescope.

Pour ces raisons, les télescopes réfracteurs, notamment achromatiques, furent longtemps préférés aux réflecteurs. Il fallut plusieurs décennies avant que ces derniers ne s'imposent dans la communauté des astronomes : « quelques télescopes furent fabriqués à partir de 1720, (...) il fallut attendre qu'Edward Scarlett trouve la manière de réaliser de bons miroirs pour que la fabrication prit quelques extensions ⁴⁰ ». Puis, en 1856, Karl August von Steinheil et Léon Foucault adaptèrent indépendamment le procédé Liebig d'argenteure du verre, permettant de déposer une couche d'argent sur un miroir en verre ⁴¹. Cette couche d'argent était non seulement beaucoup plus réfléchissante et plus durable que la surface des miroirs métalliques, mais elle avait aussi l'avantage de pouvoir être enlevée et redéposée sans changer la forme du substrat de verre. Ce nouveau procédé industriel réellement inventif rendait possible la réalisation de miroirs de grande taille et d'une qualité suffisante pour que la lignée des télescopes réflecteurs manifeste ses potentialités et vienne se substituer à la lignée des réfracteurs jusque-là dominante. Le début du XX^e siècle voit la construction de nombreux observatoires modernes, conçus pour l'imagerie photographique de précision et installés sur des sites particuliers ⁴² (éloignés des villes, en altitude). Par la suite, la lignée des télescopes réflecteurs concentre l'essentiel des efforts de développement et connaît nombre

³⁷ Miroir primaire concave hyperbolique, miroir secondaire concave elliptique.

³⁸ Miroir primaire concave parabolique, miroir secondaire convexe hyperbolique.

³⁹ Alliage métallique composé de deux tiers de cuivre et d'un tiers d'étain, et formant une surface hautement réfléchissante une fois poli.

⁴⁰ Maurice Dumas, *Les Instruments scientifiques aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, Editions Jacques Gabay, 2003, p. 67.

⁴¹ King, 2011, p. 262.

⁴² Grillot, 1986, p. 275 : « c'est au cours du 19^{ème} siècle, ..., qu'ont été créés les grands observatoires français autres que celui de Paris ».

d'évolutions non seulement selon la tendance au gigantisme mais aussi selon la tendance de complexification correctrice. Si les télescopes réflecteurs sont dénués d'aberrations chromatiques, ils possèdent en revanche un certain nombre d'aberrations *géométriques*. C'est la meilleure compréhension scientifique de ces aberrations et de leurs causes qui constituent le moteur du progrès de la lignée des réflecteurs : tout comme les progrès de la dioptrique avaient permis l'évolution des lentilles et des lunettes, une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu va induire l'évolution des miroirs et des télescopes réflecteurs.

Le télescope Ritchey-Chrétien (RCT), inventé en 1910, constitue à ce titre une avancée majeure au sein de la lignée ⁴³. Un télescope constitué de miroirs sphériques souffrira toujours d'aberrations sphériques. Si les miroirs sont rendus paraboliques pour corriger l'aberration sphérique, ils sont affligés alors de *coma* (déformation de l'image qui semble avoir une queue (coma) comme une comète) et d'*astigmatisme* (lignes verticales et horizontales sont focalisées à des distances différentes). Avec deux miroirs hyperboliques, le Ritchey-Chrétien élimine à la fois les aberrations sphériques et le coma jusqu'à l'ordre 3. Cela ouvre à un plus grand champ de vision utile même si de tels télescopes souffrent encore d'aberrations aux ordres supérieurs (coma d'ordre 5 et astigmatisme). L'ajout d'un troisième miroir en 1935 permettra de remédier à ce problème et donnera naissance au Three Mirror Anastigmat (TMA) qui, comme son nom l'indique, en plus des aberrations d'ordre inférieur, est dénué d'astigmatisme. Parallèlement à ces développements, l'invention de la lame de Schmidt puis de la chambre de Schmidt en 1930 (par l'opticien allemand Bernhard Schmidt) donne naissance à une nouvelle lignée : la lignée des télescopes catadioptriques. Une lame de Schmidt (*Schmidt corrector plate*) est une lentille asphérique conçue pour que, une fois combinée avec un miroir sphérique, elle supprime le coma tout en compensant l'astigmatisme du réflecteur.

Le développement du RCT puis du TMA tout comme l'invention de la lame de Schmidt relèvent de deux logiques de conception différentes pour corriger les aberrations de coma et d'astigmatisme. Si la première solution consiste essentiellement en des modifications structurales, la seconde introduit un nouvel élément. Simondon nomme *recrutement* ⁴⁴ cet ajout d'un élément au sein de l'individu au cours du processus de concrétisation. Cela correspond aussi à l'hybridation des opérations de réfraction et de réflexion pour former un nouveau schème technique, celui de la lignée des télescopes catadioptriques. L'évolution est analogue à celle rencontrée lors de l'étude des réflecteurs et relève de la même logique de complexification correctrice. La lignée des télescopes

⁴³ Pierre Bely (dir.), *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*, New-York, Springer, 2003.

⁴⁴ Simondon, 2008, p. 146.

catadioptriques va à son tour connaître une bifurcation selon que le correcteur employé occupe l'intégralité de l'ouverture (*full aperture corrector*) ou n'occupe qu'une portion choisie de celle-ci (*sub aperture corrector*). Dans les deux cas, l'utilisation d'éléments dioptriques permet de corriger les aberrations, constituant ainsi un progrès sur le plan *phénoménotekhnique*⁴⁵. Néanmoins, elle se heurte à nouveau aux limitations liées à l'impossibilité d'usiner de grandes lentilles : par conséquent, si le télescope de Schmidt-Cassegrain est l'un des plus populaires parmi les astronomes amateurs, il ne peut constituer le cœur opérationnel des grands observatoires. Au sein de ces derniers, ce sont les Ritchey-Chrétien et les TMA qui sont majoritairement employés et qui constituent, à ce jour, les dernières évolutions d'architecture du télescope⁴⁶. Tout comme dans la lignée des lunettes, les efforts de développement ont ensuite porté sur les échelles infra et supra individuelles.

On l'a vu, la tendance à l'augmentation du diamètre d'ouverture – la taille du miroir primaire vu comme élément technique – est apparue dès les premiers télescopes et demeure dans toutes les lignées. Cependant, d'un point de vue mécanologique, elle n'est que seconde par rapport à la problématique de réduction des aberrations qui a conduit à la diversification des schèmes et à leur complexification à l'intérieur de chaque lignée. Bien que ces lignées aient coexisté pendant une longue période, les télescopes basés sur des miroirs possèdent *intrinsèquement* certains avantages par rapport à ceux utilisant des lentilles. À l'absence d'aberrations chromatiques s'ajoute la possibilité industrielle de pouvoir usiner des miroirs plus grands, les lentilles étant limitées à des diamètres d'un mètre tout au plus. Le passage des lentilles aux miroirs constitue ainsi la première innovation de rupture dans l'évolution au niveau élémentaire, permettant un gain en fidélité tout en ouvrant tout un champ de potentialités en termes de sensibilité. Les deux évolutions majeures ultérieures de la lignée des télescopes réflecteurs joueront d'ailleurs sur ces deux dimensions : le passage des miroirs en *speculum* à ceux en aluminium puis à support en verre permettront un gain du coefficient de réflexion tout en étant plus facile à usiner et autorisant de plus grandes tailles⁴⁷. On retrouve les logiques sous-tendant l'évolution des lunettes. D'un côté une tendance au gigantisme, essentiellement motivée par des causes externes, de l'autre, une complexification croissante du dispositif (passage de deux à trois miroirs, utilisation de miroirs hyperboliques plutôt que sphériques, ajout d'un correcteur) résultant de nécessités techniques internes.

⁴⁵ Gaston Bachelard, *Le Nouvel esprit scientifique*, Paris, Presses Universitaires de France, 1934, p. 17 : « Dès qu'on passe de l'observation à l'expérimentation [...] il faut que le phénomène soit trié, filtré, épuré, coulé dans le moule des instruments, produit sur le plan des instruments [...]. La véritable phénoménologie scientifique est donc bien essentiellement une phénoménotekhnique. ».

⁴⁶ Jack B. Zirker, *An Acre of Glass : a History and Forecast of the Telescope*, Johns Hopkins University Press, 2005, p. 317.

⁴⁷ Grillot, 1986, p. 281.

Les miroirs à support de verre ont progressé jusqu'à atteindre une taille de 5-6 mètres ⁴⁸. Au-delà, leur masse fait qu'ils se déforment sous leur propre poids et qu'il devient impossible de maintenir leur forme idéale. On retombe donc sur les problèmes de *sagging* conduisant à un retour des aberrations géométriques dont on aurait pu penser s'être débarrassé. Objets plus *concrets* au sens de Simondon ⁴⁹, les télescopes réflecteurs se heurtaient à une contradiction technique face à laquelle plusieurs solutions s'offraient ⁵⁰ : alléger la masse du miroir ou corriger en temps réel sa forme. La première solution agit sur les éléments déjà existant et passe par le développement de nouveaux types de miroirs (miroirs fins), de nouvelles structures de miroir (nid d'abeilles) ou de nouveaux matériaux (SiC, CFRP). La seconde passe par l'ajout de nouveaux éléments (les actuateurs) et le développement d'une nouvelle technique : l'optique active. Les deux recherches convergent puisque les miroirs plus légers nécessitent le recours à l'optique active pour ne pas plier sous leur propre poids.

La logique de conception de l'optique active s'est prolongée en direction de l'utilisation de miroir segmenté ⁵¹. L'idée est de réaliser un grand miroir à partir de segments plus petits et juxtaposés ; l'alignement devant être de l'ordre de la longueur d'onde du rayonnement incident. Cette précision nanométrique n'a été possible que grâce aux développements de l'informatique. Parallèlement, l'idée d'utiliser non plus plusieurs segments pour réaliser un plus grand miroir mais plusieurs miroirs pour réaliser l'équivalent d'un plus grand télescope est apparue. L'apparition des télescopes à miroirs multiples a là encore été rendue possible par les progrès en traitement du signal et notamment la possibilité d'utiliser l'interférométrie aux longueurs d'onde visibles. Enfin, la technologie des miroirs fins a progressé de façon à donner naissance aux miroirs ultra fins, utilisés notamment en optique adaptative. Optique active et miroir segmenté, ainsi qu'optique adaptative et interférométrie, sont le prolongement aux autres échelles des deux logiques de progrès identifiées au niveau de l'individu télescope, à savoir la tendance au gigantisme et la complexification correctrice.

⁴⁸ Le télescope de Hale, mis en service en 1949, et le BTA-6 de 1975, sont, avec respectivement cinq et six mètres d'ouverture, les plus grands télescopes à support de verre classiques.

⁴⁹ Simondon, 2012, p. 56 : « L'objet technique concret, c'est à dire évolué, (...), tend vers la cohérence interne ».

⁵⁰ Jingquan Cheng, *The Principles of Astronomical Telescope Design*, New-York, Springer, 2009, p. 102-120.

⁵¹ Raymond Wilson, *Reflecting Telescope Optics*, New-York, Springer, 2003.

Evolutionnisme et génétique technique

Les objets techniques évoluent au sein d'une lignée par *concrétisation* selon Simondon, c'est-à-dire vers une plus grande synergie interne ⁵². L'épuisement des potentialités d'évolution d'une génération d'objets techniques conduit à des évolutions mineures concernant les matériaux ou la structure. Une fois l'objet saturé, celui-ci ne peut progresser à nouveau qu'en changeant totalement son plan d'organisation. De même que dans la TRIZ, l'évolution technique se retrouve sur un « point selle », c'est-à-dire dans une situation où progresser dans une direction implique une dégradation dans une autre ⁵³. La notion de contradiction technique proposée par Genrich Altshuller rejoint donc les analyses de Simondon sur le processus de saturation des objets techniques : les solutions fondées sur un *trade-off* correspondent à une stagnation. Une véritable invention technique implique un dépassement de la contradiction, car « c'est dans les incompatibilités naissant de la saturation progressive du système de sous-ensembles que réside le jeu des limites dont le *franchissement* constitue un progrès ⁵⁴ ».

Dans les lignées étudiées ici, le passage d'une génération d'objets techniques à la suivante s'accompagne de ce processus de concrétisation : c'est le cas en particulier du passage des premières lunettes aux lunettes achromatiques ou encore le passage du RCT au TMA. En effet, les différentes lentilles se compensent pour éliminer les erreurs résiduelles liées au caractère dispersif des verres employés tout comme les différents miroirs travaillent de concert pour supprimer les aberrations dues à l'asphéricité des optiques mobilisées : ce qui était obstacle devient moyen de réalisation ⁵⁵. Le processus de concrétisation peut alors être vu comme le résultat de la dialectique existante entre les deux logiques de conception identifiées précédemment. La complexification correctrice tend à augmenter le nombre de sous-systèmes de l'objet technique, et donc la probabilité de rencontrer des « incompatibilités », quand la tendance au gigantisme tend à saturer l'objet selon une certaine direction. Arrive un point où l'objet technique se retrouve sur un point selle qu'il ne peut franchir qu'en se réinventant, en se concrétisant.

⁵² Simondon, 2012, p. 26.

⁵³ Denis Cavallucci, « Integrating Altshuller's development laws for technical systems into the design process », *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 50, 2001, p. 115-120 : « Loi n°5 (développement inégal des parties) : Les parties d'un système évoluent à des rythmes inégaux. Plus le développement des pièces est inégal, plus le système devient complexe. Il en résulte des contradictions physiques et techniques qui, à leur tour, créeront des problèmes pour le développement futur du système. Le système ne peut alors se développer logiquement que si ces contradictions sont résolues ».

⁵⁴ Simondon, 2012, p. 32.

⁵⁵ Altshuller, 1999, p. 32 : « We can compensate for the evil and extract something useful from it instead of eliminating it ».

Dans son célèbre article de 1935⁵⁶, Lucien Febvre indiquait les trois dimensions dans lesquelles devaient se déployer toute tentative d'histoire des techniques : faire l' « histoire technique de la technique », étudier l' « insertion de l'invention technique dans la série des faits scientifiques » et rattacher cette activité au sein « des autres activités humaines ». Même si notre méthodologie répond avant tout à la première exigence, ce sont les trois dimensions que la mécanologie génétique tente de concilier à travers l'étude des objets techniques : la compréhension des tendances techniques réclame celle des phénomènes physiques qui sous-tendent les fonctionnements et les contradictions de l'objet ; les logiques de conception doivent aussi être éclairées par les dynamiques sociales qui affectent les concepteurs. En tant qu'instrument scientifique, le télescope est sans doute moins soumis aux surdéterminations économiques et socioculturelles qui pèsent sur les objets d'usage⁵⁷. Avec son histoire largement documentée et s'étendant sur plus de quatre siècles, l'astronomie peut donner lieu à une étude mécanologique telle que la nôtre, pouvant se coupler à une histoire sociologique de l'institutionnalisation des pratiques et de la discipline.

La prise en compte des facteurs socio-économiques, des progrès et des besoins scientifiques, ainsi que des possibilités technologiques développées dans d'autres domaines sont autant de prolongements naturels de notre démarche : la mobilisation du concept de lignées techniques ne permet donc pas seulement d'exhiber la « logique interne⁵⁸ » d'évolution des dispositifs télescopiques mais aussi des pistes d'articulation avec les autres dimensions de l'histoire des techniques. En réinterprétant le processus de concrétisation à l'œuvre au sein de ces lignées, non plus comme la réponse à une « nécessité interne⁵⁹ » mais comme émergent d'une dialectique entre deux tendances d'évolution (et deux logiques de conception), nous visons par cette démarche à réconcilier les pratiques internalistes et externalistes de l'histoire des techniques au profit d'une véritable « génétique technique⁶⁰ ».

⁵⁶ Lucien Febvre, « Réflexions sur l'histoire des techniques », *Annales d'histoire économique et sociale*, n°36, 1935, p. 531-535.

⁵⁷ Simondon, 2012, p. 31 : contrairement à l'automobile par exemple, « objet technique chargé d'inférences psychiques et sociales [qui] ne convient pas au progrès technique ».

⁵⁸ Jean-Louis Maunoury, *La Genèse des innovations. La Création technique dans l'activité de la firme*, Paris, Presses Universitaires de France, 1968, p. 56.

⁵⁹ Simondon, 2012, p. 27.

⁶⁰ Michel Cotte, « La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des sciences » in Anne-Lise Rey (dir.), *Méthode et histoire. Quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?*, Paris, Classique Garnier, 2003, p. 201-213.

B.5. Compte-rendu d'ouvrage :

LE BOT F., DARD O., DIDRY C., DUPUY C., PERRIN C. (dir.), *L'Homme-machine I. Le travailleur-machine*, L'Homme et la société, Paris, L'Harmattan, 2017.

Qui aliène qui ? Entre le travailleur ne possédant que sa force de travail pour subvenir à ses besoins et la machine en tant que nouvel instrument de travail, les liens ont toujours été ambivalents. Ce sont ces liens que le dossier propose d'interroger au sein d'une réflexion plus large portée sur les pratiques, actuelles et passées, du capitalisme. Le sujet est plus que jamais d'actualité : aux prophéties enchanteresses en provenance de la *Silicon Valley*, promettant le réenchâtement du travail et la libération de l'homme par la machine, s'oppose le discours médiatique pessimiste annonçant l'effondrement des conditions de travail et la banalisation du chômage de masse. Cette double controverse, économique et sociale, n'est cependant pas récente : dès la fin du XVIIIème siècle, un certain nombre d'auteurs dénoncent déjà la dangerosité du machinisme, source d'asservissement des travailleurs pour les uns, instrument de domination pour les autres. Le dossier se propose ainsi de revenir sur la façon dont le capitalisme a conditionné - et conditionne toujours - les relations entre le travailleur et la machine.

L'introduction est d'ailleurs là pour le rappeler : le but n'est pas de revenir sur l'analogie entre l'Homme et la machine, notamment au sein du domaine philosophique, mais bien d'interroger l'impact des injonctions capitalistes dans l'évolution du « vieux couple que forme l'ouvrier, ou plutôt le prolétaire, et la machine ». Assumant une position socio-historique, le dossier aborde cette problématique sous plusieurs angles tout en essayant de conserver un ordre chronologique. De l'apparition du concept d'ouvrier-machine aux nouvelles normes de contrôle social rendues possible par les nouvelles techniques, tant numériques que managériales, en passant par les controverses médiatiques sur le prétendu avènement d'un Homme nouveau, le dossier se veut une exploration multi-facette du concept si ambigu de « travailleur-machine ».

Le premier article se penche sur l'invention de « l'ouvrier-machine » comme entité économique mais aussi morale. François Jarrige nous rappelle que cette expression est l'œuvre du publiciste et membre du directoire Pierre-Edouard Lemontey, qui, déjà en 1801, met en garde contre les dérives engendrées par la montée conjointe du machinisme et des impératifs capitalistes. Selon lui, le fait que la chaîne de montage ait vocation à remplacer le travail qualifié par un travail routinisé risque de produire un prolétariat « pauvre, servile et sans émulation » résultant d'un « appauvrissement matériel et moral » lié à un travail avilissant et abrutissant. A l'opposé de cette condamnation morale, certains comme Jules Michelet tentent de réenchâter le machinisme en le présentant

comme facteur d'autonomisation du travailleur. En définitive, la véritable question réside dans la capacité de réappropriation de la machine par l'ouvrier, devant faire d'un instrument de domination et d'aliénation, un outil d'émancipation.

Un autre courant tente quant à lui d'aborder la problématique de l'ouvrier-machine sous un angle purement physiologique. C'est ce courant, héritier direct des travaux de Lavoisier, que Barthélémy Durrive nous présente, en centrant son étude autour des figures de Gustave-Adolphe Hirn et Jules Amar. Le premier, ingénieur chimiste de son état, tente d'appliquer, à travers une série d'expérimentations, les concepts de la thermodynamique à « l'Homme-au-travail ». Retraccées avec minutie et précision par l'auteur, ces expériences illustrent le projet de mise en équation de l'organisme humain ainsi que de la quantification de sa force de travail. Dans sa thèse, intitulée *Le rendement de la machine humaine* (1909), Jules Amar cherche à calculer analytiquement et à mesurer expérimentalement le rendement énergétique de l'être humain. Mais à la différence de Hirn, qui souhaitait contribuer au développement de la thermodynamique naissante, la démarche d'Amar se veut bien plus normative, et cherche à « dégager les fondements scientifiques du travail professionnel ». Barthélémy Durrive nous montre ainsi que préalablement à la transformation du travailleur en machine, c'est son objectivisation, via l'assimilation de son fonctionnement à un mécanisme, qui a ouvert la voie au Taylorisme et aux différentes formes d'organisation « scientifique » du travail.

Ce monde « tout entier voué à l'Efficienc e et au Rendement » fut largement critiqué en son temps par Georges Bernanos, notamment dans *La France contre les robots* (1947). Olivier Dard nous fait (re)découvrir cet ouvrage qui se veut une critique acerbe de « la civilisation des machines » dont la figure centrale est cet « homme des machines ». Adoptant le style pamphlétaire qui le caractérise, Bernanos critique cette « civilisation de la quantité », cette « tyrannie abjecte du nombre », dans lequel l'Homme est nié dans ses dimensions économiques, politiques et sociales – simple rouage d'un système qui le dépasse et l'écrase. Pour Bernanos le constat est clair : le triomphe de la mentalité anglo-saxonne, associé au rationalisme post-Lumières, a conduit à l'émergence d'une modernité basée sur l'égoïsme et l'intérêt personnel, encourageant le matérialisme, ne valorisant que l'efficacité, la performance et la rentabilité, et surtout excluant tout « homme qui croit à autre chose qu'à la technique ». L'Homme contemplatif n'a plus sa place dans le système industriel ; à l'injonction d'aller toujours plus vite, Bernanos rétorque « Aller vite ? Mais pour aller où ? ».

L'article suivant oppose les figures de Louis Armand et d'Abraham Moles à celles d'Henri Lefebvre et de Raoul Vaneigem, dans le contexte des controverses ayant entouré le développement de la cybernétique. Si les premiers se veulent les promoteurs d'une modernité enthousiaste et exaltant à l'occasion un certain « prospectivisme cybernétique », les seconds adoptent une position

bien plus critique, s'inspirant du courant situationniste pour dénoncer « un culte du futur ... réactionnaire ». La spécificité de l'analyse proposée par Alexandre Moatti est double : d'une part montrer que cette bataille idéologique repose en grande partie sur des luttes lexicales – robot, cyborg, cyberanthrope, ultra-humain... - et d'autre part mettre en lumière la dimension sociale de cette bataille en analysant les réseaux que tissent ces différents acteurs ainsi que l'occupation de l'espace médiatique par ces derniers. L'article se termine sur la discussion par Jean Rostand des thèses de Pierre Teilhard de Chardin, permettant de prolonger la « querelle de la cybernétique » à la « querelle du transhumanisme » actuelle.

Si dans le *Manifeste du parti communisme* (1848) la machine doit permettre l'émancipation du prolétariat et le renversement du capitalisme par l'émergence d'une conscience de classe, celle décrite dans le *Capital* (1867) possède un rôle bien plus négatif, aliénant le travailleur et détruisant normes morales aussi bien que structures familiales. C'est sur ce dernier aspect que se concentre Claude Didry, focalisant son analyse sur « l'enfant-machine », précurseur de l'ouvrier-machine. L'un des mérites de la chaîne de montage mécanisée a été de décomposer le travail en une succession de tâches basiques pouvant être accomplies par une main d'œuvre inexpérimenté, faisant baisser le prix du travail. L'ouvrier se voit ainsi forcer d'envoyer à l'usine sa femme et ses enfants, afin de satisfaire aux besoins du ménage, entraînant la destruction de la cellule familiale et abandonnant tout espoir d'émancipation, la misère ouvrière étant inculquée et vécue dès le plus jeune âge. Pourtant Marx veut encore croire aux potentialités éducatives du travail des enfants, pouvant constituer, selon lui, un véritable « enseignement technologique » à même de « produire des hommes dont toutes les dimensions soient développées ».

Les deux articles suivants proposent des figures originales du travailleur-machine. La première est celle de Pierre Bézier, ingénieur de chez Renault et père de nombreux procédés de production automatisés (machines transfert, machines à commande numérique, CFAO). Couplant les archives issues de la longue carrière de Bézier chez Renault à celles de l'entreprise, Alain Michel livre une analyse internaliste tout à fait originale de l'apparition et du développement de l'automatisation en France au XX^{ème} siècle. La figure de « l'ingénieur-machine » permet de redonner une saveur à l'idéal de progrès et d'ancrer les controverses sur le machinisme dans une perspective davantage concrète. L'article revient d'ailleurs sur cette querelle en identifiant les trois axes selon lesquels elle se propage (inquiétudes humanistes, technophobie, critique sémiologique) et en montrant que les penseurs internalistes des techniques évitent certains de ces écueils en centrant leurs analyses sur « le fonctionnement concret des ensembles techniques et ... les liens que ce fonctionnement crée entre les hommes ».

Après l'ingénieur, voici « l'artisan-machine », nouvel avatar du travailleur-machine lui aussi trop souvent délaissé dans les analyses. Cédric Perrin revient sur l'évolution de la notion d'artisanat en France au cours du XX^{ème} siècle et sa confrontation avec le monde des machines. L'auteur montre très clairement que la naissance, puis le développement, de la figure de l'artisan comme travailleur manuel est à mettre en regard du rejet ou de la glorification de la modernité, et non pas du recours aux machines. Au conservatisme des années 1930 glorifiant le travail manuel succède la fièvre modernisatrice des *Trentes Glorieuses* rejetant ce même travail manuel jugé bien trop archaïque. Artisanat et machinisme ne sont pourtant pas antinomiques : malgré un certain nombre d'obstacles à leur diffusion (liés aux coûts d'acquisition notamment) l'artisanat est un des secteurs qui a le plus bénéficié de l'apport des machines et qui s'est le plus transformé à leur contact. Sans tomber dans une vision glorificatrice du travail artisanal, Cédric Perrin nous livre une analyse de l'artisanat et de ses liens avec le machinisme faisant écho à celles de Matthew B. Crawford sur le travail manuel et la modernité.

Les deux derniers articles du dossier adoptent quant à eux une approche davantage sociologique. Ainsi Cynthia Colmellere se base sur une cinquantaine d'entretiens réalisés au sein d'entreprises pharmaco-chimiques pour analyser dans quelle mesure la « rationalité technicienne et managériale » permet un contrôle accru du travail et la perpétuation de l'ordre capitaliste. L'originalité de l'étude se trouve dans la diversité des points de vues exprimés, aussi bien par les ingénieurs en charge des plannings que par les opérateurs chargés de les appliquer. Si les premiers sont soumis à de forts impératifs de rentabilité et n'hésitent pas à vendre « la modernisation technologique comme une stratégie de survie », les seconds ressentent la division du travail opérée et « l'automatisation massive des *process* » comme une véritable dépossession. Plus qu'un moyen d'optimiser les profits, le recours à des techniques managériales couplées à des dispositifs techniques, permet de perpétuer l'ordre social imposé aux ouvriers en l'ancrant dans une certaine matérialité.

Enfin, reprenant le thème du contrôle social du travail, le dernier article nous propose une plongée vertigineuse dans l'univers des « ouvriers invisibles » de l'industrie agro-alimentaire, chargés de préparer les colis qu'une voix numérique issue d'un casque leur *ordonne* et d'en valider la réalisation à l'aide d'un micro. Uniquement en contact avec le progiciel de gestion, ces ouvriers apparaissent comme le prolongement de l'outil de planification, renversant l'image de l'outil en tant que prolongement du corps. David Gaborieau se base sur une série d'enquêtes et d'entretiens pour nous montrer comment les ouvriers mobilisent l'image du robot pour lutter contre le sentiment de dépersonnalisation. L'article nous présente ainsi la façon dont se perçoivent ces ouvriers et les stratégies qu'ils adoptent pour adoucir les *stigmates* d'un travail particulièrement aliénant.

Quel bilan tirer de cette exploration des différentes facettes du « travailleur-machine » ? Tout d'abord, que la perspective sociohistorique adoptée, centrée sur les hommes, femmes et enfants au contact des machines permet de fournir une analyse qui échappe aux discours mystificateurs des chantres du capitalisme. On y retrouve les controverses portant sur la division du travail, l'appauvrissement et l'aliénation qu'elle entraîne, ainsi que les bouleversements consécutifs à l'introduction du machinisme, aussi bien dans les pratiques de l'artisanat que dans les nouvelles normes de contrôle social. Mais l'originalité du dossier réside dans sa capacité à montrer que ces débats résultent d'une construction temporelle longue et d'une lutte sociale encore d'actualité. Il ne s'agit de condamner ni le capitalisme, ni le machinisme, mais d'interroger scrupuleusement les liens existants entre ces deux grandes tendances héritières des Lumières. Soulignons que le dossier conforte l'analyse d'un précédent numéro qui statuait que « le *profit* [C. Didry], la *justification* [F. Jarrige], le *contrôle* [D. Gabonneau], la *perpétuation* [C. Colmellere] et la *prophétie* [O. Dard] constituaient le moteur du capitalisme¹ ».

Deux raisons principales expliquent que l'introduction de la machine au sein du monde du travail a été, et est toujours, aussi mal vécue. La première est d'ordre structurel. Plus que le capitalisme, il conviendrait d'interroger les impacts négatifs du productivisme. L'optimisation des moyens de production conduit nécessairement à une dépersonnalisation transformant le travailleur en simple extension de la machine et assimilant l'individu à un réservoir de travail. La seconde raison est d'ordre psychologique. Le travailleur, et a fortiori l'Homme, ne doit plus voir la machine, ni comme un rival, ni comme un esclave, car c'est dans ces considérations que résident les germes de l'aliénation :

Malgré les apparences, une civilisation du rendement, en dépit des apparentes libertés civiques qu'elle laisse aux individus, est extrêmement contraignante pour eux et empêche leur développement, parce qu'elle asservit simultanément l'homme et la machine ; elle réalise à travers la machine une intégration communautaire contraignante. Ce n'est pas contre la machine que l'homme, sous l'empire d'une préoccupation humaniste, doit se révolter ; l'homme n'est asservi à la machine que quand la machine elle-même est déjà asservie par la communauté².

¹ O. Dard, C. Didry, F. le Bot et C. Perrin, *Les mille peaux du capitalisme I*, L'Homme et la société, Paris, L'Harmattan, 2015.

² G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Grenoble, Editions Jérôme Million, 2013, p. 355.

Ah ça y est ! Je viens de comprendre à quoi ça sert la canne.

En fait ça sert à rien.

Du coup, ça nous renvoie à notre propre utilité... L'Homme, face à l'Absurde.

Perceval de Galles, *Kaamelott* (Livre IV), *L'inspiration*, écrit par Alexandre Astier

Titre : Gestion diagrammatique des connaissances sur les lignées techniques de télescopes

Mots clés : Télescopes ; lignées techniques ; mécanologie ; gestion des connaissances ; diagrammes

Résumé : Dispositif central de l'astronomie, le télescope est aussi l'un des tout premiers instruments scientifiques. Nous proposons d'en livrer une analyse novatrice basée sur la *mécanologie génétique*. Cette méthode d'analyse des structures et des évolutions des objets techniques est notamment inspirée des travaux de Jacques Lafitte et de Gilbert Simondon. Il s'agit en particulier de repérer l'apparition de nouveaux *schèmes techniques* et de les rattacher à la *lignée technique* à laquelle ils appartiennent.

Dans ce contexte, nous développons un certain nombre de concepts et d'outils afin d'extraire, de formaliser et d'enrichir les connaissances portant sur les inventions apparues au cours du processus de concrétisation des lignées techniques de télescopes. Les informations recueillies ne sont pas de simples données archivées : leur formalisation à l'aide de diagrammes en fait des connaissances *technologiques*, qui éclairent le fonctionnement de l'instrument et permettent d'en retracer la généalogie.

En analysant les processus de conception, ainsi que la compétition entre les différentes lignées de télescopes, nous parvenons ainsi à une meilleure compréhension des logiques d'évolution technique qui sous-tendent le développement de ces instruments, et à la formulation de *tendances techniques* très générales. Elles se doublent, dans le cas des télescopes, de logiques évolutives plus spécifiques, résultant d'impératifs performatifs externes et de nécessités techniques internes. L'explicitation de ces logiques, ainsi que des processus émergents auxquels elles donnent naissance, permet de comprendre les dynamiques sur le temps long et d'anticiper les difficultés pour les missions futures.

Ainsi, notre démarche ne se veut ni normative, ni positive : par une dialectique constante entre la formulation de nos « lois d'évolution » et les données historiques, nous entendons dégager avec une certaine objectivité des régularités au sein de l'évolution des télescopes, dans une perspective historique qui se veut à la fois rétrospective mais aussi prospective.

Title : Diagrammatic knowledge management on telescopes technical lineages.

Keywords : Telescopes ; technical lineages ; mechanology ; knowledge management ; diagrams.

Abstract : Central device of astronomy, the telescope is also one of the very first scientific instruments. We propose to deliver an innovative analysis based on *genetic mechanology*. This method of analyzing the structures and the evolutions of technical objects is inspired by the work of Jacques Lafitte and Gilbert Simondon. In particular, this involves identifying the appearance of new *technical schemes* and relating them to the *technical lineage* to which they belong.

In this context, we develop several concepts and tools to extract, formalize and enrich the knowledge about inventions that have emerged during the *concretization process* of telescope technical lineages. The collected information is not passive archived data : its formalization through diagrams must turn them into *technological* knowledge, which clarifies the operation of the instrument and allow to trace its genealogy.

By analyzing the design processes, as well as the competition between the different lineages of telescopes, we achieve a better understanding of the technical evolution patterns underlying the development of these instruments and are able to formulate very general *technical trends*. Those latter are accompanied, in the case of telescopes, by evolutionary patterns resulting from external performance imperatives as well as from internal technical necessities. The explanation of these patterns, as well as the emerging processes to which they give rise, make it possible to understand the long time dynamics and anticipate difficulties for future missions.

Thus, our approach is neither normative nor positive: through a constant dialectic between the formulation of our « laws of evolution » and the historical data, we exhibit, with a certain objectivity, some regularities in the evolution of telescopes, in a historical perspective that is both retrospective and prospective.