

On peut noter que contrairement à d'autres sciences, les crises ne viennent pas de la confrontation avec la nature, mais très souvent de la confrontation avec les systèmes informatiques eux-mêmes. En effet, on observe que les utilisateurs/concepteurs de systèmes informatiques tentent toujours de les pousser dans leurs limites et créent ainsi en permanence de nouveaux problèmes à résoudre.

Ex. l'histoire de la conception des **calculateurs** s'inscrit pleinement dans des paradigmes appaaraître, se développer, entrer en crise, et se succéder. **science**. Dans d'autres domaines, ex. les **bases de données**, on voit des para- (Floyd, 1978). Ces paradigmes coexistent, ce qui fait penser à une phase de **pré-structuration en paradigmes de programmation** en référence à **SRS** début XXe). D'autres champs comme celui de la **programmation** de plus en plus explicite de la **calculabilité** (Turing, 1936) et de la **complexité** (Bachmann et Landau, certains champs de l'informatique, ex. **l'algorithme**, sont ancrés dans des paradigmes au moins aussi anciens que la science informatique, ex. les théories de la **calculabilité** (Turing, 1936) et de la **complexité** (Bachmann et Landau, début XXe). D'autres champs comme celui de la **programmation** en référence à **SRS** me première tendance à la conception d'instructions de jeux réduits d'instructions plus faciles à exécuter efficacement à une **fréquence élevée**, puis l'accroissement de la fréquence d'exécution ayant atteint ses limites, on est passé à la **multiplication** des unités d'exécution, le paradigme actuel avec les processeurs **multi-cœurs**.

Certains champs de l'informatique, ex. **l'algorithme**, sont ancrés dans des paradigmes au moins aussi anciens que la science informatique, ex. les théories de la **calculabilité** (Turing, 1936) et de la **complexité** (Bachmann et Landau, début XXe). D'autres champs comme celui de la **programmation** en référence à **SRS** me première tendance à la conception de nouveaux problèmes à résoudre.

Que peut nous dire de l'informatique la théorie de Kuhn ? Il faut d'abord observer que les objets de l'informatique sont très divers : des **processus aux réseaux**, de la **programmation à l'intelligence artificielle**, de **l'imagerie numérique à l'automatisme**, etc. Il faut donc s'attendre à voir des paradigmes se développer indé- pendamment dans différents sous-domaines. Ses méthodes sont aussi très diver- ses : certaines très **mathématiques**, d'autres très **expérimentales**, avec des expé- riences confinées dans un **laboratoire** ou situées dans le **monde réel**. On observe enfin des relations complexes entre **science** informatique et **industrie** informa-

ne mentionne jamais aucun fait scientifique postérieur aux années 20.

Dans SRS, Kuhn ne fait jamais référence à l'informatique, ni en 1962 ni en 1970. L'explication semble être que Kuhn ne fait **pas l'histoire du présent** ; il ne parle pas plus de physique no de biologie contemporaine que d'informatique. En fait, il

Et l'informatique ?

Les anomalies

Les **anomalies** sont donc plus un aliment de la recherche qu'un signe d'échec (lire aussi les « **Conversations avec le Sphinx** » de Klein). Kuhn dit que le métier des chercheurs est de résoudre des **anomalies** à l'intérieur d'un paradigme, plus que de chercher de nouveaux paradigmes quand une anomalie se fait jour. Selon Kuhn, les paradigmes sont entourés d'un **glacis protecteur** d'hypothèses auxiliai- res qu'il est possible de contester sans remettre en cause le paradigme.

La **mécanique de Newton** l'illustre bien. Ex. ses premières applications prédi- saient un **mouvement lunaire non conforme aux observations**, et il a fallu 60 ans pour découvrir comment **appliquer correctement** la théorie et résorber cette anomalie. Ce genre d'épisode se répétera durant le développement du para- digme, mais à chaque fois, les chercheurs ont d'abord incriminé l'observation ou l'application du paradigme ou les hypothèses complémentaires (ex. découvertes de **Uranus** et **Neptune**). Mais pour résoudre l'anomalie de la trajectoire de **Mercure**, il faudra un nouveau paradigme, celui de la **relativité de Einstein**.

Avant Kuhn, Popper disait déjà qu'une **théorie** (il n'employait pas le mot **para- digme**) pouvait **s'immuniser** contre les **contre-exemples**. Mais pour lui, elle le faisait à tort, alors que pour Kuhn c'est à raison. Kuhn et Popper ne s'opposent donc pas sur l'observation des faits, mais sur le sens qu'ils leurs donnent.

L'incommensurabilité

Même si deux paradigmes traitent du même sujet, Kuhn dit que les comparer est impossible, car ils sont **incommensurables**. Deux paradigmes sont comme **deux langues différents**, et il n'existe pas une **super-langue** dans laquelle exprimer les deux. Ex. la **masse de Newton** et celle **de Einstein** ne sont pas comparables à l'intérieur de l'un ou l'autre de leur paradigme. L'incommensurabilité se voit aussi dans **l'application des normes**. Ex. la **simplicité** : le formalisme mathématique se **complexifie**, mais pour le spécialiste moderne cela **simplifie** la modélisation.

C'est probablement la thèse la plus provocante de Kuhn, car elle semble interdire de déterminer quel paradigme est le meilleur, et donc de reconnaître un **progrès**. Kuhn fut accusé de **relativisme** par ses détracteurs, mais il restaure une notion de progrès en affirmant qu'il s'observe dans la résolution des anomalies, mais pas dans la comparaison des paradigmes. Il dit que la science ne progresse pas **vers quelque chose**, la Vérité, mais **de quelque chose**, son Histoire.

Comme Kuhn, Christensen souligne le rôle des **valeurs** dans le fonctionnement des entreprises. **Non explicites**, elles orientent l'appréciation de la **performance** par les utilisateurs et les opérateurs, et expliquent des formes **d'aveuglement** que certains croient pouvoir reprocher à ceux qui n'ont pas vu les menaces. Mais tout mes à la fois, Christensen explique qu'il est difficile de statistaire à la fois un marché établi et un marché émergent. Christensen préconise de développer les nouveaux services dans des structures suffisamment indépendantes pour qu'elles puissent respecter **leurs propres valeurs** : comme le font ces sociétés qui créent des **filiales** *low cost* plutôt que de développer un service *low cost* elles-mêmes.

Christensen explique que la technologie en place peut se défendre soit en **fuyant**, c-à-d. en se réfugiant dans les marchés les plus exigeants, les **marchés de niche**, soit en **contournant**, c-à-d. en intégrant à son offre des services nouveaux. En langage kuhnien, la fuite correspond à une **hyper-spécialisation d'un paradigme en crise**, tandis que la contractualre correspond à une **extension du paradigme**.

La technologie en place est alors **menacée** par la nouvelle qui commence à lui prendre la part de marché des utilisateurs **sur-satisfaits**. Et la **rupture** arrive quand la nouvelle technologie satisfera la plupart des utilisateurs de l'ancienne.

Dependant, la nouvelle technologie s'améliore continument comme par **dévelop- pement du paradigme**, à la grande satisfaction de ses utilisateurs, mais en lui permettant aussi d'en gagner de **nouveaux** à cause de ses performance accrues. Dans le même temps, la technologie en place progresse aussi, mais ne rend toujours pas le nouveau service, et surtout commence à **sur-satisfaire** une partie de ses utilisateurs, qui rechignent à payer pour un service qu'ils **sous-emploient**.

Selon Christensen, une nouvelle technologie, mais aussi un nouveau type de servi-

ce ou d'organisation, est acceptée car elle rend de **nouveaux services**, mais pas forcément de façon très performante, et surtout elle est moins performante que les **technologies en place** pour les services classiques. Elle ne peut pas remplacer la technologie en place, et ne semble donc **pas la menacer**.

Le modèle d'innovation de Christensen identifie des périodes **d'innovation conti- nue** et des moments de **rupture** comparables avec la **science normale** et les **révolu- tions**. Mais c'est l'**insatisfaction des utilisateurs** qui tient lieu d'**anomalie**.

Et l'innovation ?

Structure d'un paradigme, ou matrice disciplinaire

Kuhn définit la structure d'un paradigme comme formée de quatre composantes :

Généralisations symboliques : les **lois primitives** du paradigme, c-à-d. sa **théorie**, au centre de l'exposition académique d'une discipline, ex. les lois de la **mécanique newtonienne**.
Noter qu'entre la présentation originelle de Newton dans un style géométrique, et la présentation moderne dans le langage de l'analyse mathéma- tique, comme **f = m dv/dt**, il n'y a pas changement de paradigme, mais seulement son **développement**. Kuhn dit de ces lois qu'elles constituent les **définitions impli- cites** de leurs symboles. Ex. les lois de Newton définissent simultanément **f**, **m** et **v**, et tout paradigme admettant d'autres lois, comme **e = m c²**, définit tout autre chose, même pour les symboles qu'ils ont en commun, comme ici la masse **m**.

Modèle métaphysique : les **grands principes** de la théorie, non formalisés, mais essentiels à sa compréhension. Ex. la mécanique de Newton repose sur le principe d'une **influence à distance instantanée et sans contact**.

Normes et valeurs : elles guident l'action mais sont souvent implicites. On ne consi- dère pas ici les valeurs **morales** comme l'**intégrité**, mais des valeurs **épistémiques**, comme la **précision**. Les valeurs peuvent changer avec les périodes. Ainsi, la valeur de **précision** est importante pour la science normale, mais l'est moins en période de révolution. Ex. la **constante gravitationnelle** n'est pas précisée quand le paradigme newtonien se crée, et c'est à la nouvelle science normale de le faire. Inversement, la valeur de **fécondité** est plus importante en période de révolution puisque elle détermine l'espoir qu'on place dans un paradigme. Mais ce qui change le plus d'un paradigme à un autre ce sont les critères d'application des valeurs. Ainsi, la valeur de **simplicité** : **f = m dv/dt** n'est simple que si on connaît le **calcul différentiel**.

Exemples : les problèmes types résolus par le paradigme et la façon de les réso- dre. C'est le sens premier du mot **paradigme**. Kuhn dit que les exemples sont le cœur d'un paradigme. Ce sont eux qui sont repris dans des expériences types, qui sont décrits dans les traités, et qui sont enseignés. Les **plans inclinés de Gallée**, les **pinsons de Darwin**, et le **pendule de Foucault**, sont de tels exemples.

Kuhn ajoute que chaque paradigme suscite la création de différents **institutions**, sans lesquelles il ne pourrait pas se développer : **laboratoires** de recherche, **dépar- tements** universitaires, **journaux**, **colloques**, **sociétés savantes**, **prix**, etc.

On reprocha à Kuhn d'avoir surchargé le mot **paradigme** de nombreux sens diffé- rents alors qu'une définition était déjà en usage (**paradigme = exemple**). Il proposa d'utiliser à la place le terme de **matrice disciplinaire**, mais c'est bien le terme de **paradigme** qui a prévalu.

« **Structure des révolutions scientifiques** » , Thomas Kuhn (1962). Préférer la 2^{de} édition (1970) pour sa postface dans laquelle Kuhn synthétise sa pensée et répond ses objectifs.
* « **The Innovator's Dilemma** » Clayton Christensen (Harvard Business School, 1997). Suitvent de nombreux ouvrages dans lesquelles Christensen applique son mo- dèle à la santé, l'éducation, les transports aériés, l'informatique, etc.
* « **Contre la méthode** », Paul Feyerabend (1970).
* « **The Paradigms of Programming** » Robert Floyd (Turing Award Lecture, 1978).
* « **La science en action** », Bruno Latour (1989).
* « **Conversations avec le Sphinx** », Etienne Klein (Albin Michel, 1991).
* « **Petites leçons d'épistémologie** », Yannis Delimas Rigoutsos (Vuibert, 2009).
* « **Science : A Discovery in Comics** », Margaret de Heer (NBM Publishing, 2013).

Bibliographie

Reste à situer l'**informatique** selon les termes de Kuhn. Celle-ci semble avoir des domaines bien ancrés dans un **paradigme**, ex. **l'algorithme**, et des domaines qui cherchent encore leurs méthodes, ex. la **programmation**. Les premiers seraient donc en phase de **science normale**, et les seconds à l'état de **pré-science**.

Kuhn est dans les listes de lecture des études scientifiques tout comme Christensen l'est pour les études de management. Les comparer permet d'envisager qu'ils deviennent des références pour les deux domaines. Ce qui est naturel quand on considère que l'ingénierie a des aspects scientifiques et managériaux à la fois.

Dans le modèle d'innovation de Christensen, l'**insatisfaction** tient lieu d'**anomalie**. Tout service **s'améliore** en continu pour **résoudre** des anomalies, c-à-d. augmenter la satisfaction des utilisateurs. Mais la **sur-satisfaction** est aussi une insatisfaction, et qui dévientent ainsi une **menace** pour le service en place, dans une forme de **crise**. La **rupture** survient quand les utilisateurs optent massivement pour le nouveau service.

La contribution de **Kuhn** est beaucoup plus une **structure de la science normale** que une **structure des révolutions scientifiques** tant il met en avant le concept de **paradigme**, c-à-d. de ce qui encadre la science normale. Sa théorie met à mal la théorie de la **mécanique de Galilée** (1638), mais c'est de la physique. Il rappelle aussi que la vérité n'est pas directement visible dans les **observa- tions**, tant celles-ci sont **chargées de théorie** a priori.

Conclusion

Pré-science, science normale, anomalie, crise, et révolution

Pré-science. Avant d'être étudié scientifiquement tout domaine a pu être étudié au cours d'une période qu'on qualifie parfois de **pré-science** ou de **science immature**. Ex. la **physique d'Aristote** n'est pas encore de la **physique scientifique** au sens où on l'entend depuis la **mécanique de Galilée** (1638), mais c'est de la physique.

Kuhn soutient que, pris individuellement, les savants de la pré-science ne sont pas moins **rigoureux** et **scientifiques** que leurs successeurs. Ce qui distingue la pré- science de la science, c'est l'**absence de communauté scientifique** soudée autour d'un **paradigme** ; on ne s'entend ni sur la théorie à défendre, ni sur la méthode, ni sur le langage, ni-même sur les phénomènes à expliquer.

Science normale. La période de **science normale** s'organise autour d'un **paradigme** qui structure l'ensemble des activités d'une communauté scientifique. Le paradigme est **connu de tous**, grâce à la **formation scientifique**, et **accepté par tous**, donc **jamais contesté**. Il est la **matrice** de l'ensemble des travaux de cette communauté.

Le but de la science normale est de **développer le paradigme**, ce qui comprend 4 objectifs :

- résorber les désaccords** connus entre le paradigme et les données empiriques,
- améliorer sa précision** (c-à-d. préciser la valeur des constantes postulées, accroître son pouvoir de prédiction, …), ex. en améliorant l'instrumentation,
- étendre sa portée** à de nouveaux domaines,
- et **améliorer sa cohérence**.

Kuhn soutient, contre Popper, que **tester** le paradigme (pour le **confirmer** ou le **réfuter**), ou même **découvrir** des phénomènes nouveaux, n'est **jamais un objectif** en période de science normale.

Anomalies et crises. Les **anomalies** sont les désaccords entre les prédictions du paradigme et les données empiriques. Le développement du paradigme conduit à les **résorber**, mais aussi à en détecter de **nouvelles**. Celles-ci ne causent pas l'aban- don immédiat du paradigme. Bien au contraire, elles alimentent le programme de recherche de la communauté. Ce n'est que lorsque des anomalies **se multiplient** ou restent trop longtemps **non résolues** que le paradigme entre en **crise**.

Révolution. La crise conduit à rejeter ou corriger des éléments du paradigme, en commençant par les éléments les plus périphériques. Si cela résout l'anomalie, le cours de la **science normale** peut reprendre. Sinon la crise débouche sur une **révo- lution** scientifique. Pour Kuhn, il ne suffit ni d'une crise durable, ni d'un paradigme concurrent, pour changer de paradigme, il faut avoir les deux ensemble.

Finalemnet, le travail de Christensen et celui de Kuhn s'appuient tous deux sur une autre question se pose en lisant Thomas Kuhn. En effet, écrivant dans les années 1950-60, il fonde son analyse sur l'histoire des sciences qui ont précédé cette date, et s'appuie donc essentiellement sur l'histoire des **sciences de la nature** comme la physique et la chimie, la biologie et l'astronomie. On peut alors se poser la question du positionnement dans la grille d'analyse de Kuhn des sciences qui alternent des phases d'amélioration continue et des phases de ruptu- re. Les deux exposent les ressorts cachés qui font naître ou étouffer une rupture. Nous explorons donc la parallèle entre la pensée de Christensen sur l'innovation et la rupture et celle de Kuhn sur le développement scientifique et la révolution.

L'étude de l'**innovation** et celle du progrès des **sciences** semblent se développer indépendamment. Cependant, le modèle de l'innovation proposé par **Clayton Christensen** en 1997 fait écho au modèle des révolutions scientifiques proposé par **Thomas Kuhn** en 1962, sans pour autant y faire référence. Les deux proposent une vision qui alterne des phases d'amélioration continue et des phases de ruptu- re. Les deux exposent les ressorts cachés qui font naître ou étouffer une rupture.

Une autre question se pose en lisant Thomas Kuhn. En effet, écrivant dans les années 1950-60, il fonde son analyse sur l'histoire des sciences qui ont précédé cette date, et s'appuie donc essentiellement sur l'histoire des **sciences de la nature** comme la physique et la chimie, la biologie et l'astronomie. On peut alors se poser la question du positionnement dans la grille d'analyse de Kuhn des sciences qui se sont développées après. Nous pensons évidemment à l'**informa- tique** et plus largement à ce qu'on appelle aujourd'hui **sciences du numérique**.

Finalément, le travail de Christensen et celui de Kuhn s'appuient tous deux sur une autre question se pose en lisant Thomas Kuhn. En effet, écrivant dans les années 1950-60, il fonde son analyse sur l'histoire des sciences qui ont précédé cette date, et s'appuie donc essentiellement sur l'histoire des **sciences de la nature** comme la physique et la chimie, la biologie et l'astronomie. On peut alors se poser la question du positionnement dans la grille d'analyse de Kuhn des sciences qui se sont développées après. Nous pensons évidemment à l'**informa- tique** et plus largement à ce qu'on appelle aujourd'hui **sciences du numérique**.

Science et Innovation

La proposition de Thomas Kuhn

L'essentiel des idées de Kuhn figure dans son livre, **La structure des révolutions scientifiques (SRS)**, qui est vite devenu un *best-seller* en épistémologie, et un ouvrage de référence dans de nombreux cursus scientifiques.

Thomas Kuhn s'intéresse à deux questions : (1) **En quoi consiste l'activité scienti- fique ?** et (2) **En quoi consiste le progrès des sciences ?**, la question (2) primant selon lui sur la question (1). Kuhn adopte en cela une approche historique et des- criptive de la science, en rupture avec l'approche **normative** et **a priori** privilé- giée jusque-là par des philosophes des sciences comme **Karl Popper**.

À ces questions, Kuhn répond en proposant un modèle **cyclique et discontinu** de l'histoire des sciences. Ce serait une alternance de phases longues de **science normale** et phases brèves de **science révolutionnaire**, auxquelles correspondent deux schémas d'activité très différents. La première se caractérise par le mono- pole d'un **paradigme**, une théorie acceptée par tous et qui exclut de ce fait toute critique. À l'inverse, la seconde est un état **transitoire et anarchique** de l'activité scientifique durant lequel l'ancien paradigme perd son monopole et rentre en conflit avec une ou plusieurs théories rivales. L'une d'elles finit par s'imposer, inaugurant ainsi un **nouveau** cycle de science normale.

Selon Kuhn, deux paradigmes successifs sont **incommensurables** entre eux, et il n'existe aucun point de vue à l'aune duquel l'un pourrait être dit plus vrai que l'autre. Kuhn rompt ainsi avec le **modèle cumulatif** de l'histoire des sciences d'après lequel la science **progress**e par empilement de résultats définitifs.

Les idées de Kuhn font débat. On reproche à la thèse de l'incommensurabilité de conduire au **relativisme** et de ruiner l'idée de progrès. On a également accusé Kuhn de déprécier la science et ses acteurs, en présentant l'homme de la science normale comme un esprit dogmatique, à l'opposé de ce que préconise le falsifi- cationnisme de Popper. Kuhn insiste en outre sur les facteurs subjectifs, voire irrationnels, qui président aux choix des scientifiques en période de révolution.

En réalité, Kuhn veut montrer que même si les scientifiques, pris individuelle- ment, ne se conforment pas toujours à la logique ou au calcul des probabilités pour fonder leurs décisions, la science, conçue collectivement, est l'activité ra- tionnelle la plus à même d'inventer et de progresser. Kuhn introduit ainsi un point de vue **sociologique**, voire politique, sur la science qui inspirera des auteurs tels que Paul Feyerabend, ou Bruno Latour.

Compléments de lecture : sciences, épistémologie et innovation.

Pliage : traits gris rentrants, traits **rouges** saillants. Découper selon le trait rouge entre les deux ●, puis achever le pliage.

1 Histoire des inventions et histoire des usages

L'histoire de l'**innovation** est trop souvent présentée sous la forme d'une histoire des **inventions** et surtout des **inventeurs**. Elle conduit souvent à la recherche de l'inventeur premier et à une quête effrénée de l'**antériorité**, ex. pour la machine à vapeur, la faire remonter à **Watt** (1769), voire **Newcomen** (1712), ou même **Papin** (1690), et pourquoi pas **Héron** (ca. 62) en omettant les plus de 200 ans après Watt de développement de cette technologie soutenu par un flot continu d'innovations. Le résultat est une histoire presque exclusivement ouest-européenne ou nord-américaine, masculine et blanche. Dans son livre ***The Shock of the Old***, **David Edgerton** parle d'une histoire racontée pour les **garçons de tous âges**.

Une autre façon de raconter l'histoire de l'innovation est de la raconter par les **usages** qu'elle introduit et comment ils se sont développés. **Edgerton** parle alors d'une histoire racontée aux **adultes de tous sexes**. Ex. son livre est une histoire mondiale, **globale**, du développement des usages ; il met en particulier l'accent sur le nécessaire entretien, la **maintenance**, de l'innovation initiale par un flot continu d'innovations d'amélioration qui ont lieu là où sont les usages, et pas forcément là où l'invention a eu lieu.

3 Ce qu'en pensent Popper, Kuhn, Lakatos et Feyerabend

Karl Popper (1902-94) est connu pour son critère de démarcation entre théorie scientifique et théorie non scientifique. Selon Popper, pour être scientifique une théorie doit être **falsifiable**. Une lecture simpliste a souvent cours dans les milieux scientifiques pour dénigrer des domaines concurrents.

Thomas Kuhn (1922-1996) a une formation de **physicien** (PhD en mécanique quantique de l'université de **Harvard** en 1949). Il trouve alors un poste universitaire comportant la mission d'enseigner l'**histoire des sciences**. Il se forme à ce domaine nouveau pour lui, et l'enseigne pendant 12 ans, pendant lesquels il élabore sa théorie des révolutions scientifiques qu'il publie en 1962 dans **La structure des révolutions scientifiques (SRS)**. Il deviendra professeur à l'université de Berkeley, puis à Princeton, et enfin au MIT.

Imre Lakatos (1922-1974) est un philosophe hongrois. Il développe sur les **mathématiques** un point de vue proche de Kuhn en montrant qu'elles ne procèdent pas de façon aussi purement déductive qu'on l'imagine. Elles aussi procèdent par essais et erreurs, en ajustant les hypothèses et les conclusions des théorèmes.

Paul Feyerabend (1924-94) défend l'idée que la pensée scientifique n'est pas plus digne d'intérêt a priori que d'autres formes de pensées. Selon lui les activités qu'on convient d'appeler scientifiques sont aussi **dogmatiques** et **subjectives** que les autres.

1 Les paradigmes informatiques

En 1978, dans son discours de réception du Prix Turing, **Robert Floyd** utilise en informatique le concept de **paradigme** en référence explicite à la SRS (Kuhn) pour décrire des **familles de langages de programmation** en terme de mode de pensée pour le programmeur. Ex. on parle du paradigme **impératif**, ou comment décrire un enchaînement **d'actions élémentaires** qui font passer d'un **état initial à l'état final désiré**, ou du paradigme **fonctionnel**, ou comment décrire une composition de **fonctions élémentaires** qui associe à chaque **valeur d'un paramètre d'entrée** la **valeur de sortie désirée**.

Même sans utiliser le terme de paradigme, certains développements scientifiques et techniques de l'informatique se comportent comme des paradigmes de Kuhn. Ex. dans le domaine des **bases de données**, le **modèle relationnel** proposé par **Codd** en 1970 est reconnu comme prometteur dès le début car il résout des problèmes de conception jusque là non résolus, mais il ne se traduit pas par une adhésion immédiate dans l'usage car **on ne sait pas encore le mettre en œuvre efficacement**. Il ouvre alors un vaste **programme de recherche pour le rendre efficace**, qui conduira à un **usage généralisé dans les années 1990-2000**. Mais à cette époque naissait le **web**, qui introduit progressivement un nouveau type de demande que le modèle relationnel ne peut pas satisfaire. Il s'en suit actuellement une **profusion de modèles alternatifs** qui fait penser à une phase de **crise** selon Kuhn.

1 Épistémologie et histoire des sciences

L'**épistémologie** étudie les conditions de la **connaissance** et particulièrement de la **connaissance scientifique**. Elle essaie de répondre à de nombreuses questions comme :

- **« Qu'est-ce qu'une connaissance scientifique ? »**,
- **« Comment la distingue-t-on d'une connaissance non-scientifique ? »**,
- **« Comment la distingue-t-on d'une croyance ? »**,
- **« Pourquoi lui donne-t-on de la valeur ? »**,
- **« Comment se construit-elle ? »**, etc.

À un extrême, elle peut chercher à donner des **normes** de comportement scientifique, comme le fait par exemple **Karl Popper** pour distinguer les connaissances scientifiques des autres connaissances. À un autre extrême, elle peut chercher à décrire l'**activité** des scientifiques, comme le fait **Thomas Kuhn**. Ce point de vue peut être irrigué par l'**histoire des sciences** et peut conduire à la **sociologie des sciences**, comme l'ont fait par exemple **Robert King Merton** et **Bruno Latour**.

4 Observation, induction et test

Observer des **faits particuliers** et en tirer des **lois générales** est au cœur de l'activité scientifique. Cela s'appelle l'**induction**. Pourtant, l'observation de faits particuliers ne fournit de conclusion **logique** que lorsqu'elle **contredit** une théorie. Ex. n'observer que des **cygnes blancs** ne permet pas de conclure logiquement que **tous les cygnes sont blancs** ; il en est des **noirs** en Australie, et le jour où on le découvre la théorie des **cygnes tous blancs** devient certainement fausse. Pour Popper, le scientifique devrait donc délibérément chercher à mettre en cause les théories en les soumettant à des contre-expériences, et pour être scientifique une théorie devrait être **falsifiable**. Moins logiciste, le sociologue **Robert King Merton** dit que l'induction empirique est une forme de raisonnement comme une autre, mais qu'une des valeurs de la science est le **scepticisme organisé**. Dès sa création en 1660, la **Royal Society**, la plus ancienne société savante, adoptait la devise **Nullius in Verba** : ne croire personne sans vérifier.

Pour Kuhn, l'observation pure n'existe pas, elle est toujours **chargée d'a priori**. Ex. selon qu'on observe la **Lune** avec l'a priori qu'elle est **lisse** ou bien qu'elle a un **relief**, on n'interprète pas ses **taches** de la même façon (différentes couleurs du sol dans un cas, et ombres du relief dans l'autre). Selon lui, une observation contradictoire ne condamne pas nécessairement une théorie, et il vaut mieux chercher d'abord à vérifier ses hypothèses a priori.

En **informatique**, **programmer** revient à rédiger les lois générales d'un système. Il est crucial de s'assurer que ces lois sont correctes, et une pratique courante est alors de **tester** le programme en le soumettant à des expériences. Mais comme pour l'induction, et comme le dit le pionnier de la programmation **Edsger Dijkstra**, « Tout ce que peut démontrer un test c'est qu'un programme est faux ». Pourtant, le test reste la principale méthode de validation des programmes. Se pose alors la question de ce qu'on peut réellement déduire d'un test réussi.

2 La découverte des planètes du système solaire

Même sans avoir conscience de l'appartenance à un **système solaire**, l'Humanité a très tôt distingué les planètes par leur mouvement d'apparence erratique sur le fond stable des étoiles. Les planètes **Mercure**, **Vénus**, **Mars**, **Jupiter** et **Saturne** sont visibles à l'œil nu et sont identifiées depuis l'Antiquité. La **Terre** est aussi une planète, mais dans la tradition **géocentrique** elle est le centre fixe autour duquel tournent la Lune, les planètes et les étoiles ; la Lune et les planètes tournant sur des **orbites circulaires** et les étoiles sur une **sphère** qui englobe le tout.

Au cours du temps, l'observation de plus en plus précise des astres contredit ce modèle, qui sera progressivement augmenté d'hypothèses complémentaires, pour le réparer sans en changer, mais sans pour autant gommer totalement les anomalies. Il faudra **Nicolas Copernic** (1472-1543), qui propose que le Soleil occupe le centre, mais conserve l'idée d'orbites circulaires, **Tycho Brahé** (1546-1601), qui propose que le Soleil et la Lune tournent autour de la Terre, mais que les autres planètes connues alors tournent autour du Soleil, **Johannes Kepler** (1571-1630), qui formule des lois de mouvement des planètes sur des trajectoires elliptiques autour du Soleil, et **Galilée** (1564-1642), qui défend publiquement les idées de Kepler, pour envisager le système **héliocentrique** moderne. **Isaac Newton** (1643-1727) en donnera les lois qui sont les mêmes que celles de la **chute des corps** sur Terre.

Des instruments toujours plus précis permirent d'explorer le système solaire lointain. En 1781, la planète **Uranus** est découverte par **William Herschel** (1738-1822). Plus justement, la précision croissante des observations permit à Herschel de requalifier en **comète** un astre pris jusque là pour une **étoile**, et des calculs toujours plus précis permirent à **Anders Lexell**, **Johann Bode** et **Charles Messier** de la requalifier en **planète** en 1783. La nouvelle planète sera ensuite nommée **Uranus** vers 1850 après de nombreuses autres propositions. Dès 1788, des observations encore plus précises de la future Uranus permirent de déceler des anomalies qui résistèrent aux vérifications jusqu'à ce que vers 1820 on en vienne à postuler l'existence d'une 8^{ème} planète dont la masse perturberait la trajectoire d'Uranus, ou pour certains à suggérer, en vain, que la loi de la gravitation universelle devait être revue.

En 1843, **John Couch Adams** commence les calculs qui permettraient de localiser la planète perturbatrice et en 1845 il transmet ses résultats pour vérification à l'observatoire de Cambridge, qui les ignora. En 1845, **Urbain Le Verrier** se lança indépendamment dans les mêmes calculs et publie ses résultats la même année. Il les transmet au même observatoire qui les ignore aussi, puis en 1846 à l'observatoire de Berlin qui fait immédiatement la vérification et trouve une planète à l'endroit indiqué. Comme pour Uranus, on sait maintenant qu'elle avait déjà été observée, même par Galilée, mais considérée comme une **étoile**. Elle sera nommée **Neptune** presque immédiatement.

Cette approche de la résolution d'anomalies par le calcul de la position d'astres perturbateurs semblait extrêmement féconde et on tenta de l'utiliser une fois de plus pour expliquer des anomalies de la trajectoire de **Mercure**. Le Verrier se mit au travail et postula une nouvelle planète, appelée **Vulcain**, qui n'a jamais pu être observée. En fait, cette fois-ci c'était la **mécanique de Newton** qui était en défaut, et il a fallu attendre la théorie de la **relativité générale** de **Einstein** pour expliquer la trajectoire de Mercure. Cependant, la méthode des perturbations est toujours utilisée pour détecter des exo-planètes.

2 Le procès de l'Act 590 de l'Arkansas

Le procès de l'Act 590 de l'Arkansas fournit un exemple de ce que essayer de répondre à la question « Qu'est-ce que la science ? » n'est pas que spéculation abstraite. Dans l'exemple qui suit, l'issue d'un procès en dépend.

Le **créationnisme** s'oppose à la **théorie de l'évolution** en s'appuyant sur une **lecture littérale de la Bible**. Le créationnisme affirme que toutes les espèces ont existé depuis la Création, souvent fixée à il y a environ 6000 ans. Aux États-Unis, l'opposition entre le créationnisme et la théorie de l'évolution occupe depuis longtemps le débat public, les uns demandant que le créationnisme soit traité comme une théorie scientifique, en particulier dans l'enseignement, les autres affirmant qu'il ne s'agit que d'une croyance religieuse.

En 1982, le Parlement de l'Arkansas vote une loi, ***l'Act 590***, qui oblige les enseignants de biologie des lycées à enseigner de paire la **théorie de l'évolution** et la **théorie de la création**, comme deux théories également scientifiques. Les opposants à cette loi ont alors intenté un procès à l'État de l'Arkansas en avançant que la **théorie de la création** est une **croyance religieuse**, et que l'enseigner comme une **connaissance scientifique** viole la **Constitution** qui stipule que l'État ne peut avantager une religion par rapport aux autres.

Il restait au juge **William Overton**, chargé de l'affaire, à décider si le créationnisme est une **théorie scientifique** ou une **croyance religieuse**. Il fit appel à l'expertise d'un **épistémologue**, **Michael Ruse**, pour lui demander ce qu'est une théorie scientifique. La réponse fut la suivante : une théorie scientifique

- s'appuie sur des lois générales qui décrivent des phénomènes naturels,
- fournit des explications fondées sur ces lois,
- est testable empiriquement,
- n'est pas un dogme (c-à-d. que même ses défenseurs savent qu'une théorie peut-être amenée à être contredite et à être remplacée par une autre), et
- est **falsifiable** au sens de Popper (c-à-d. qu'il est possible d'imaginer une expérience qui pourrait la contredire).

Le juge observant que la Théorie de la création ne respectait pas ces critères la considéra comme une **croyance religieuse** et son enseignement officiel parmi des théories scientifiques comme une **violation de la Constitution**.

2 Clayton Christensen

Clayton Christensen est un professeur de la **Harvard Business School** qui a consacré sa recherche à l'étude de l'**innovation**. S'intéressant à des domaines très variés, marchands ou non, technologiques ou non, il caractérise l'**innovation** comme une idée nouvelle qui rentre dans l'**usage**, et la **rupture** comme une innovation qui **change les usages**.

Par exemple, pour Christensen l'**automobile** est une **innovation** quand elle rentre dans l'usage (vers 1890), mais n'est pas encore une rupture car elle ne fait que prendre la place des calèches où le cocher deviendrait chauffeur. Pour lui la **rupture** arrive avec la **construction à bas coût** des voitures en **chaîne de montage** (vers 1910) car à ce moment-là seulement des **couches nouvelles** de la population ont pu accéder à un **moyen de transport personnel**.

5 L'informatique est-elle une science ?

Tenter d'analyser l'**informatique** dans les termes de Kuhn demande de répondre d'abord à la question « L'informatique est-elle une science ? », car sinon l'entreprise n'a pas de sens.

Pour certains la réponse est **non**. Ex. **Richard Feynman** s'emploie à démontrer dans ses **Leçons sur l'informatique** (1984-86) que l'informatique n'est que **technologie** et que les seules questions scientifiques qu'elle pose sont des questions de **physique**. C'est excessif, mais malheureusement partagé par de nombreux scientifiques pour qui les sciences ont forcément pour objet la compréhension de la **nature**, ex. la **physique** et la **chimie**, la **biologie**, l'**astronomie**, etc. alors que l'informatique aurait pour objet les **ordinateurs**, qui ne sont pas des objets de la nature. À cette objection, **Edsger Dijkstra** (reprenant une formule de **Fellows** et **Parberry**) répond que « L'informatique n'est pas plus la science des ordinateurs que l'astronomie n'est la science des télescopes ».

Parmi ceux qui disent **oui**, certains défendent que l'informatique est une branche des **mathématiques**. Un point de vue plus moderne défend qu'elle est **la science du calcul**, de ses conditions de **faisabilité**, de ses **moyens**, et de ses **applications**, étant entendu que le calcul n'est **pas que le calcul numérique** : point de vue déjà esquissé par **Ada Lovelace** en 1843 dans sa traduction annotée de l'article de **Luigi Menabrea** sur la machine analytique de **Charles Babbage**.

3 Ce qu'en pensent Boltzmann, Planck, Einstein, de Broglie et Feynman

Ludwig Boltzmann (1844-1906) est un physicien allemand considéré comme le père de la physique statistique : « Peut-être le profane s'imagine-t-il que nous avançons progressivement dans la découverte de la nature par **ajouts successifs de nouveaux résultats**... Mais cette idée est erronée car la physique théorique progresse toujours par **bonds** ».

Max Planck (1858-1947) est un physicien allemand qui reçut le Prix Nobel en 1918 pour son travail sur la théorie des quantas : « Une **nouvelle vérité** scientifique ne triomphe pas en convaincant ses opposants et en leur faisant voir la lumière, mais plutôt parce que les opposants finissent par mourir, et qu'une nouvelle génération grandit, **familiarisée avec la nouvelle théorie** » (citée dans SRS).

Albert Einstein (1879-1955) est un physicien allemand qui reçut le Prix Nobel en 1921 pour son travail sur les quantas de lumière : « De la science sans **épistémologie** c'est du primitif et du confus ».

Louis de Broglie (1892-1987) est un physicien français qui reçut le Prix Nobel en 1929 pour son travail sur le comportement ondulatoire de l'électron : « Une doctrine qui parvient à réaliser une vaste synthèse produit sur le théoricien une **impression de beauté** et **l'incline à croire qu'elle renferme une grande part de vérité** ».

Richard Feynman (1918-1988) est un physicien américain qui reçut le Prix Nobel en 1965 pour son travail sur l'électromagnétisme quantique : « Si nous avons **confiance** dans une loi, et si quelque chose semble **aller de travers**, cela peut nous suggérer un **autre phénomène** ».