

# Les territoires, lieux de rencontre entre les êtres humains et la planète Terre

Les perturbations majeures des cycles biogéochimiques de la planète, et plus généralement la crise écologique que nous traversons, sont intimement liées au soutien du métabolisme humain, besoin physiologique fondamental de tout être humain. Dès lors, la problématique à laquelle nous allons tenter de contribuer consiste à savoir en quelle mesure les modalités de support du métabolisme humain, c'est-à-dire des trois fonctions majeures que sont l'approvisionnement énergétique, la biosynthèse et l'excrétion, peuvent être soutenables. Cette problématique fait ainsi se rencontrer deux échelles extrêmes de son appréhension : l'échelle planétaire des grandes régulations de nos facteurs environnementaux de vie (cf. chapitre 1.1) et l'échelle atomique de déroulement des fonctions métaboliques au sein du corps humain (cf. chapitre 1.2)<sup>55</sup>. Entre ces deux échelles extrêmes, elle peut se décliner à de nombreuses échelles intermédiaires. Dès que l'analyse dépasse les processus strictement cantonnés au corps humain (cf. Figure 1.11), les interactions entre les êtres humains et leur environnement apparaissent. Le champ disciplinaire auquel nous devons désormais faire appel dépasse alors celui de la physiologie humaine ou de la biogéochimie et rejoint celui de la socio-écologie.

---

<sup>55</sup> Nous laissons volontairement de côté toute analyse située à une échelle sub-atomique, à laquelle nous n'identifions pas de contribution pertinente à notre problématique. Hormis le rayonnement solaire, nous laissons aussi de côté toute analyse incluant des éléments extra-planétaires. Même si nous verrons que l'intérêt de l'humanité pour l'espace extra-terrestre et plus particulièrement les voyages dans l'espace et la vie en dehors de la planète Terre font appel à des éléments d'analyse similaires aux nôtres, nous nous plaçons ici dans une approche résolument terrestre et nous ne nous intéresserons qu'à l'épanouissement de l'humanité sur la planète Terre. En effet, l'exploration spatiale actuelle repose essentiellement sur l'exploitation de ressources planétaires (kérosène, matériaux de construction, logistique terrestre de soutien à l'exploration spatiale, etc.) : seule une infime partie des moyens humains consacrés à l'exploration spatiale se situent physiquement en dehors de la planète Terre et ceux-ci sont de toute façon intimement liés aux processus biogéochimiques terrestres. L'étude du développement de potentielles communautés humaines extra-terrestres qui ne seraient plus totalement dépendantes de l'exploitation de ressources humaines et environnementales de la planète Terre nous paraît très peu pertinente au regard des enjeux sus-mentionnés de réponse à la crise écologique que traversent les sept milliards d'habitants de la planète Terre et nous l'excluons donc du champ de notre analyse.

## 1.3.1. Méthodologie d'analyse socio-écologique

### 1.3.1.1. Recherches sur les systèmes socio-écologiques

L'humanité vit dans une anthroposphère très fortement connectée au reste de la biosphère, à l'hydrosphère, à l'atmosphère et à la lithosphère et en dépend pour les conditions de sa vie (chapitre 1.1). Nous avons jusqu'ici eu une approche principalement basée sur les sciences naturelles (biogéochimie, physiologie, etc.) pour analyser les conditions matérielles dans lesquelles se déroule le métabolisme des êtres vivants. Or la problématique de cette thèse ne nous permet pas de rester cantonnés aux sciences naturelles et doit nécessairement inclure des éléments d'analyse sociologiques pour étudier le fonctionnement non pas seulement des êtres humains considérés chacun comme une unité vivante avec ses caractéristiques biogéochimiques mais également de l'ensemble formé par les populations humaines. Nous allons ainsi chercher à étudier comment notre problématique se décline pour des sociétés humaines.

Les sciences sociales étudient entre autres les caractéristiques immatérielles du fonctionnement de la société dans ses dimensions culturelles, organisationnelles, politiques, informationnelles, communicationnelles, économiques<sup>56</sup>, etc. Or il s'agit ici de prendre en compte la matérialité biogéochimique du lien qui unit les sociétés humaines et la biosphère et d'avoir donc une approche intégrative des éléments matériels et immatériels des sociétés humaines. C'est justement l'ambition de la socio-écologie, dont une présentation générale des concepts est donnée par Fischer-Kowalski & Haberl (2007). Ces auteurs mettent en exergue le caractère hybride des systèmes socio-écologiques qu'ils définissent comme la conjonction des sociétés humaines et des réalités biophysiques. Nous reproduisons leur schéma conceptuel sur la figure suivante (Figure 1.15).

---

<sup>56</sup> Nous rejoignons en ce sens l'analyse de Fischer-Kowalski & Haberl (2007) qui considèrent la science économique actuelle comme relativement détachée de la matérialité des processus physiques correspondants, de même que sa déclinaison dans les phénomènes financiers.

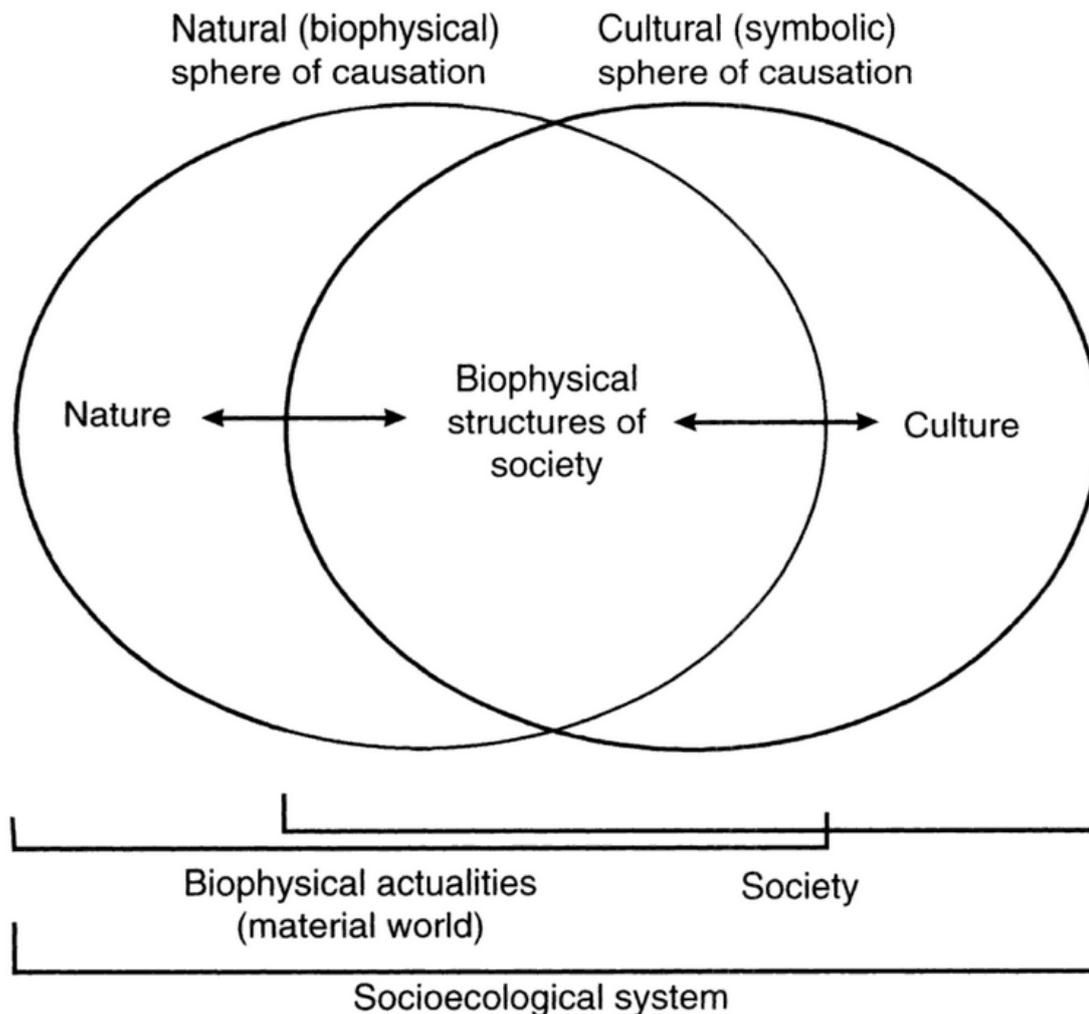


Figure 1.15 : Les systèmes socio-écologiques représentés comme le recouvrement des sphères naturelles et culturelles.

Source : Fischer-Kowalski & Haberl (2007).

Ils mettent en avant la possibilité de caractériser des régimes socio-écologiques c'est-à-dire des « modalités fondamentales spécifiques d'interaction entre les sociétés humaines et [leur environnement biophysique] [...] qui se maintiennent dans un équilibre plus ou moins dynamique sur des longues périodes de temps »<sup>57</sup>. Ces régimes correspondent finalement à ce que l'on nomme usuellement les modes de subsistance et ces auteurs distinguent ainsi trois grands régimes socio-

<sup>57</sup> « specific fundamental pattern[s] of interaction between (human) society and natural systems [...] that remain in a more or less dynamic equilibrium over long periods of time ». Nous avons cherché ici à lever l'ambiguïté du terme *nature* qui nous paraît trop fortement connoté au risque d'une appréhension dichotomique entre nature et culture. Nous avons préféré le terme d'environnement biophysique qu'ils emploient également et qui nous permet de désigner ce qui environne les sociétés humaines, analysé suivant ses dimensions physiques et biologiques. Nous emploierons également l'expression « environnement biogéochimique ».

écologiques qui sont le régime du chasseur-cueilleur, le régime agraire et le régime industriel. Les périodes d'équilibre qui caractérisent les régimes sont séparées par des périodes dites de transition socio-écologique durant lesquelles les modalités de fonctionnement des systèmes socio-écologiques vont évoluer d'un régime à un autre. Les trajectoires socio-écologiques désignent simplement l'évolution temporelle des systèmes socio-écologiques.

Leur approche est fondée sur une caractérisation relativement macroscopique des systèmes socio-écologiques et les principaux descripteurs mobilisés qui permettent de caractériser ces régimes sont usuellement au nombre de trois<sup>58</sup> :

- la densité de population humaine ;
- la quantité et la forme d'énergie qu'elle utilise ;
- la quantité totale de matière qu'elle mobilise.

Nous choisissons de nous intéresser principalement dans cette thèse aux sociétés humaines qui ont achevé leur transition vers le régime socio-écologique dit industriel. Nous emploierons le terme classique d'Occident pour les désigner. L'Occident nous paraît d'autant plus intéressant à étudier que la majorité des autres sociétés humaines de la planète montre actuellement les signes d'une transition vers un régime similaire (Fischer-Kowalski & Haberl, 2007). Les caractéristiques métaboliques principales du régime socio-écologique industriel occidental sont précisées dans le tableau suivant (Tableau 1.6).

---

<sup>58</sup> On peut multiplier ces descripteurs à l'envi et ces trois descripteurs nous ont paru être le plus communément utilisés pour une caractérisation macroscopique. Un quatrième descripteur pourrait être l'usage des sols.

Tableau 1.6 : Principales caractéristiques du régime socio-écologique industriel occidental

	<b>Unités</b>	<b>Valeurs standard des régimes industriels</b>
<b>Densité de population</b>	pers/km <sup>2</sup>	100 – 300
<b>Utilisation d'énergie par personne</b>	W/pers	5 000 – 12 000
<b>Part des ressources fossiles dans l'énergie</b>	%	60 – 80
<b>Utilisation de matière par personne</b>	t/pers/an	15 – 25

Source : Fischer-Kowalski *et al.* (2007)

En France, depuis les années deux mille, un champ de recherche a émergé en relation avec la socio-écologie : l'écologie territoriale. Elle se fonde « sur l'analyse des consommations d'énergie et de matières d'un territoire donné et de leur circulation au sein de celui-ci » afin « de mieux comprendre les interactions entre ce territoire et son milieu naturel [...] par la détermination de *bilans de matières*, d'*analyses des flux de matières et d'énergie*, d'*empreintes environnementales*. L'écologie territoriale y associe l'analyse des acteurs, institutions, politiques, techniques qui sont à l'origine de ces flux, c'est-à-dire de la dimension sociale du métabolisme, au côté de celle des processus naturels qui le guident » (Barles, 2015a).

L'écologie territoriale a donc pour objet de caractériser des systèmes socio-écologiques par l'ensemble des relations matérielles entre une société et son environnement tout en prenant en compte les relations immatérielles au sein de la société et entre une société et son environnement. Elle est ainsi centrée sur l'analyse des flux matériels et nous nous placerons dans cette perspective dans cette thèse. Comme nous l'avons déjà fait dans les chapitres précédents, nous utiliserons les analyses de flux de matières et les analyses de flux de substances comme outil fondamental méthodologique de travail<sup>59</sup>. Cette approche permet d'asseoir la compréhension du fonctionnement d'un territoire sur les réalités physiques qui le soutiennent. Sans s'opposer à l'économie dont elle cherche à intégrer la dimension, l'écologie territoriale donne une primauté à la comptabilité matérielle des flux physiques plutôt qu'à la

---

<sup>59</sup> Cf. par exemple Baccini & Brunner (2012) pour plus de détails méthodologiques théoriques sur les analyses de flux et matières ou de substances.

comptabilité des flux monétaires qui rendent difficilement compte du lien entre le fonctionnement d'une société humaine et son interface avec son environnement. Dans le contexte de crise écologique que nous vivons, cette approche paraît particulièrement bien adaptée pour aborder notre problématique<sup>60</sup>.

Un des enjeux de l'écologie territoriale et de la socio-écologie est toutefois d'intégrer correctement les dimensions immatérielles d'un système socio-écologique. Nous fonderons principalement notre démarche sur une comptabilité de flux de matière et nous ne pourrons ici développer aussi finement les dimensions immatérielles. Leur intégration requiert le soutien de sciences sociales que nous avons mobilisées de manière secondaire. Nous essaierons toutefois de garder constamment à l'esprit la nécessité de prendre en compte ces dimensions afin que les méthodologies de flux de matières appliquées ici ne soient pas déconnectées des autres dimensions de notre problématique.

L'autre caractéristique principale de l'écologie territoriale est de s'ancrer dans un territoire. Les territoires nous paraissent particulièrement intéressants en ce qu'ils constituent une échelle intermédiaire où se matérialisent les processus cellulaires et planétaires présentés précédemment (cf. chapitres précédents 1.1 et 1.2 et le développement que nous en tirons à la sous-section 1.3.3.1).

#### **1.3.1.2. Descripteurs des systèmes socio-écologiques**

Les études d'écologie territoriale ou de comptabilité matière déjà réalisées nous permettent de connaître la nature des matières et les sources d'énergie mobilisées par une société humaine. La comptabilité Eurostat liste ainsi 182 types de matières premières regroupés en quatre catégories : biomasse, métaux, minéraux non-métalliques et substances contenant de l'énergie fossile. En croisant ces catégories avec celles utilisées par Barles (2013 ; 2017), nous proposons de compléter cette typologie de regroupement de ces matières premières et énergies en huit catégories décrites dans le tableau ci-dessous (Tableau 1.7).

---

<sup>60</sup> Cf. par exemple son utilisation dans l'étude de cas détaillée de la commune d'Aussois (Buclet, 2015).

Tableau 1.7 : Principaux types de matière première et d'énergie mobilisés par les villes occidentales aujourd'hui.

<b>Matière première ou énergie mobilisée</b>	<b>Commentaires</b>
Eau	En masse, il s'agit du flux mobilisé le plus important dans une société occidentale aujourd'hui. Dans les analyses de consommation de matière en masse, ce flux est usuellement omis pour ne pas masquer les autres flux (par exemple dans la méthode Eurostat)
Minéraux non métalliques	Les matériaux de construction sont souvent dominants en masse. Les flux de consommation urbains se cumulent usuellement en stocks
Hydrocarbures et éléments radioactifs fossiles	Principalement utilisés comme source d'énergie
Sources d'énergie non fossiles	Solaires (rayonnement solaire direct, vent, etc.), géothermiques et gravitationnelles (marée)
Biomasse	Comprend plusieurs types et usages : nutriments, matériaux, combustible, etc.
Dioxygène atmosphérique	Réactif utilisé principalement pour la combustion du carbone (énergie ou respiration humaine)
Métaux	Applications multiples. Les flux de consommation peuvent également se cumuler en stocks
Sol	Absent des comptabilités matières usuelles, mais de plus en plus considéré comme une ressource matérielle à intégrer

Nous ne visons pas à l'exhaustivité dans l'établissement de cette liste mais, sur la base des études précédemment mentionnées, elle nous paraît permettre d'embrasser la majorité des types de matière première et d'énergie mobilisés par une ville occidentale aujourd'hui et de les regrouper de manière à obtenir une liste à la fois succincte (huit types) et relativement complète. Nous employons ici le terme de « matière première » pour indiquer qu'il s'agit de substances ou catégories de substances telles

qu'elles peuvent être trouvées dans l'environnement biogéochimique. Elles peuvent également servir de base à l'établissement d'une analyse de flux de substances.

Pour analyser les systèmes de gestion de matières de l'anthroposphère, Baccini & Brunner (2012) mettent en relation ces matières premières (ou substances) avec quatre autres notions fondamentales que nous adaptons ainsi :

- le bien, qui correspond à une substance ou un mélange de substances ayant une fonction économique ;
- le procédé, qui permet de transporter, transformer ou stocker les substances et les biens ;
- le système de gestion de matières, système ouvert qui consiste en la connexion des procédés et des biens ;
- l'activité, acte réalisé par les êtres humains pour satisfaire leurs besoins et induisant des systèmes de gestion de matière.

Baccini & Brunner proposent également de regrouper les activités sociales qui sous-tendent les systèmes de gestion de matières mis en place en quatre catégories. Ces catégories sont :

- nourrir (« to nourish ») ;
- nettoyer (« to clean ») ;
- habiter & travailler (« to reside & work ») ;
- transporter & communiquer (« to transport & communicate »).

Pour ne pas augmenter la complexité de la description du métabolisme anthropogénique, Baccini & Brunner ont cherché volontairement à faire un regroupement le plus restreint possible. Ils proposent toutefois éventuellement de compléter cette courte liste par deux autres activités qu'il peut être important de ne pas omettre pour une vision globale des activités humaines à savoir :

- croire (« to believe ») ;
- gouverner (« to govern »)<sup>61</sup>.

Baccini & Brunner indiquent que ces activités peuvent être reliées à des besoins, biologiques pour nourrir et nettoyer, et socioéconomiques pour habiter & travailler et transporter & communiquer. Nous proposons de remplacer ici « nourrir » par « s'alimenter & excréter ».

---

<sup>61</sup> Ces six activités laissent encore de côté de nombreuses activités humaines telles que « jouer », « aimer », etc.

Sur cette base, il nous semble donc possible de décrire un système socio-écologique en le subdivisant en sous-systèmes caractérisés par trois niveaux d'analyse interdépendants. Ces niveaux d'analyse sont représentés à la figure suivante (Figure 1.16).

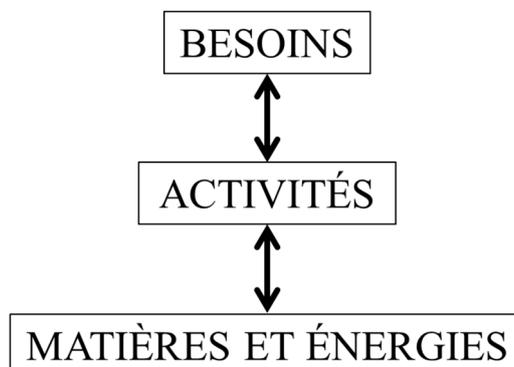


Figure 1.16 : Trois niveaux d'analyse proposés pour la description des systèmes socio-écologiques en sous-systèmes.

Les flèches à double sens indiquent que la relation entre chacun des trois niveaux d'analyse proposés peut aller dans les deux sens. En effet, s'il semble logique à première vue que les flèches soient plutôt descendantes, c'est-à-dire que des besoins induisent des activités qui induisent des mobilisations de matière et d'énergie, la réalité du fonctionnement d'une société s'avère beaucoup plus complexe et ces trois niveaux d'analyse sont plutôt dans une relation d'interdépendance. Dans une trajectoire socio-écologique, cette interdépendance prendra d'ailleurs la forme d'une co-évolution. Pour reprendre l'exemple du besoin physiologique alimentaire décrit dans la section 1.2.2, une personne exerçant une activité physique intense aura un besoin alimentaire plus important que la moyenne, induit par cette activité, elle-même reliée à d'autres besoins (besoin d'accomplissement dans une épreuve sportive par exemple) voire à ce même besoin (besoin de travailler pour pouvoir se nourrir). Il en va de même pour les flux de matières et d'énergie : il est difficile de discerner si l'activité de bronzage provient d'un besoin ou si elle est induite par l'occurrence d'un flux d'énergie solaire. Sans entrer plus avant dans le débat de cette interdépendance et de recherche de l'explicitation de l'origine des systèmes anthropiques, nous considérerons simplement ici que ces trois niveaux d'analyse sont fortement corrélés.

Nous avons proposé au Tableau 1.7 une liste de matières et de sources d'énergie mobilisées et nous avons vu une proposition de liste d'activités faite par Baccini & Brunner. Il est donc intéressant de chercher également à lister les besoins humains. Plusieurs auteurs en ont proposé une typologie. Notons à titre non exhaustif :

- les cinq besoins listés par Maslow : physiologiques, de sécurité, d'amour, d'estime et d'accomplissement de soi (Maslow, 1943) ;

- les neuf besoins listés par Max-Neef : subsistance, protection, affection, compréhension, participation, loisir, activité de création, identité, liberté (Max-Neef, 1991) ;
- les sept besoins listés par Rosenberg : autonomie, célébration, intégrité, interdépendance, besoins physiologiques, communion spirituelle, jeu (Rosenberg, 2016).

La question des besoins est extrêmement complexe car culturellement et historiquement variable : s'il y a un consensus relatif pour dire que des besoins existent, la définition théorique de ceux-ci est très difficile. Nous nous concentrerons principalement sur les besoins physiologiques qui présentent moins de difficultés méthodologiques et utiliserons si nécessaire les quatre autres besoins de Maslow, traditionnellement employés, pour compléter cette liste. Les besoins physiologiques, dont l'alimentation et l'excrétion décrites ici sont un représentant, sont indiscutablement nécessaires à la vie humaine car leur non-satisfaction entraîne la mort. Cela ne les place toutefois pas nécessairement dans une position de supériorité par rapport aux autres besoins (Maslow, 1943) mais leur confère une particularité par leur traduction nécessaire en termes de flux physiques.

Dans la tradition des règles de base de survie, on mentionne usuellement le moyen mnémotechnique des 4 x 3 pour classer par ordre d'importance quatre besoins physiologiques en fonction de l'urgence à les assouvir<sup>62</sup> :

- trois minutes pour l'approvisionnement en oxygène ;
- trois heures pour la thermorégulation ;
- trois jours pour l'approvisionnement en eau ;
- trois semaines pour l'approvisionnement en nourriture.

Une fois de plus, l'excrétion n'est pas mentionnée dans cette liste mais il conviendrait bien sûr de mettre en parallèle l'excrétion de gaz carbonique, d'urine et de matières fécales pour les trois approvisionnements correspondants en tant que besoin physiologique fondamental. D'autres besoins physiologiques existent (par exemple le sommeil) que nous n'aborderons pas ici car ils sortent du périmètre de notre travail.

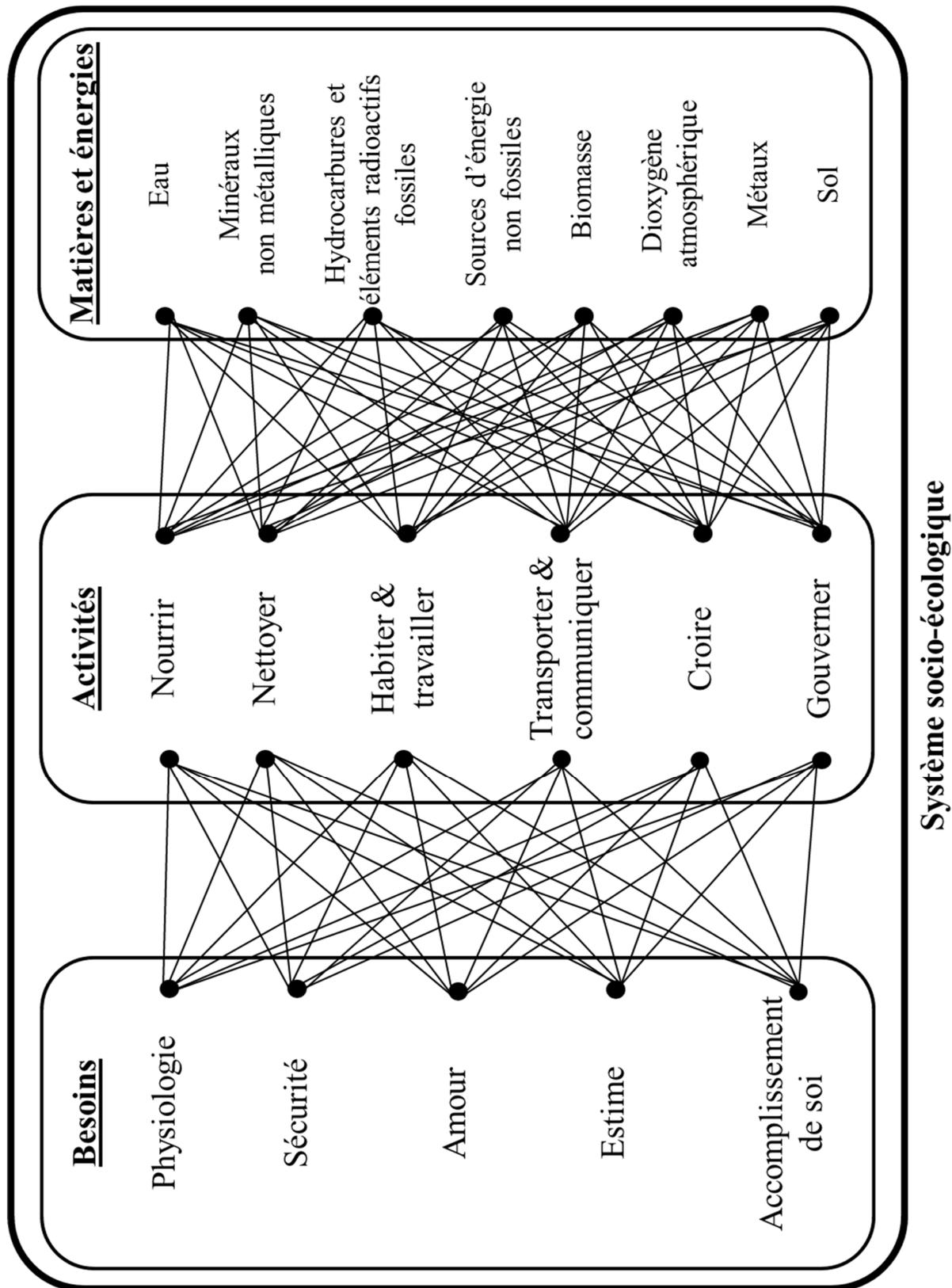
En conclusion, les trois niveaux d'analyse présentés précédemment (flux de matières et d'énergie ; activités ; besoins) nous paraissent pouvoir être utilisés pour décrire un système socio-écologique en

---

<sup>62</sup> Il semblerait que cette liste ait initialement été proposée par un certain Ron Hood. Cette règle nous est connue par tradition orale.

sous-systèmes. Le prisme d'analyse matières premières & énergie inviterait à créer huit sous-systèmes correspondant à ces flux. Le prisme d'analyse activités conduirait à l'adoption de quatre ou six sous-systèmes. Enfin, le prisme d'analyse des besoins peut permettre de caractériser autant de sous-systèmes liés aux différents besoins humains : système de thermorégulation pour le besoin physiologique d'homéothermie de maintenir le corps à 37 °C, système de protection physique pour le besoin de sécurité physique contre les éléments naturels, système religieux pour le besoin de communion spirituelle, etc. On voit tout de suite que l'interdépendance des matières, activités et besoins et leur absence de relation biunivoque rend toutefois difficile la définition des sous-systèmes.

Nous proposons d'illustrer par un schéma conceptuel (Figure 1.17) comment un système socio-écologique peut être représenté comme la combinaison des relations entre besoins, activités et mobilisation de matières et d'énergie. Nous choisissons pour cette représentation les cinq besoins de Maslow, les six activités adaptées de Brunner & Baccini et les huit matières et sources d'énergie du Tableau 1.7.



**Système socio-écologique**

Figure 1.17 : Représentation d'un système socio-écologique par la relation entre besoins, activités et matières & énergie.

Nous avons volontairement représenté, dans cette figure (Figure 1.17), le caractère foisonnant des différents liens entre besoins, activités et matières & énergie, qui montre la difficulté d'appréhender de façon simple des sous-systèmes au sein d'un système socio-écologique. Il nous semble toutefois possible de caractériser de tels sous-systèmes en cherchant quelles relations entre certains besoins, activités et flux de matières & d'énergie spécifiques peuvent faire système.

### 1.3.1.3. Le système alimentation/excrétion

Les deux besoins physiologiques d'approvisionnement du corps humain en nutriments et d'excrétion sont traduits au niveau du corps humain par six activités principales (cf. chapitre 1.2) : inspiration, alimentation (solide et liquide), expiration, excréctions urinaire, fécale et tégumentaires. Ils correspondent à l'activité nommée « s'alimenter & excréter ». Dans le cas des villes occidentales, l'activité « transporter » sera également essentielle pour l'approvisionnement alimentaire et pour l'évacuation des excréments.

En termes de flux de matière première et d'énergie, ces deux besoins physiologiques nécessitent de recourir *a minima* à trois matières premières : l'eau, la biomasse (nourriture) et le dioxygène atmosphérique (cf. chapitre 1.2). La dépendance des êtres humains à des organismes autotrophes (cf. sous-section 1.2.1.3) induit également de façon indirecte une dépendance aux flux d'énergie solaire et aux sols. Enfin, dans le cas des sociétés urbaines occidentales d'aujourd'hui, les trois autres flux principaux listés (hydrocarbures et éléments radioactifs fossiles, minéraux non métalliques et métaux) sont également mobilisés pour permettre de soutenir les besoins d'alimentation et d'excrétion. À titre d'exemple, le stockage d'une tranche de jambon dans un réfrigérateur nécessitera le recours à des minéraux non métalliques pour construire la cuisine, à des métaux pour construire le réfrigérateur où est stockée la tranche de jambon et enfin à des énergies (usuellement fossiles) pour alimenter le réfrigérateur en énergie.

En outre, l'interdépendance des matières & énergie, activités et besoins induit que les deux besoins physiologiques qui nous intéressent peuvent également être reliés à d'autres besoins car les activités d'alimentation et d'excrétion ne sont pas toujours imputables à un strict besoin physiologique. Elles peuvent répondre à d'autres besoins comme un besoin d'activité de création déployé en création culinaire, un besoin de célébration pour les repas festifs, un besoin de communion spirituelle pour les offrandes de nourriture aux dieux, un besoin inassouvi d'amour, d'estime ou d'accomplissement de soi pour les pathologies liées à l'alimentation telles que la boulimie ou l'anorexie, etc.

Il nous semble toutefois que les besoins physiologiques d'alimentation et d'excrétion sont reliés de façon suffisamment forte aux activités correspondantes d'alimentation et d'excrétion pour qu'ils puissent correspondre à la caractérisation d'un sous-système. Nous nous intéresserons donc à toutes

les interactions au sein d'une société et entre une société et son environnement qui sont induites par les six activités physiologiques décrites au chapitre 1.2<sup>63</sup> et considérerons qu'elles peuvent former un sous-système au sein d'un système socio-écologique que nous nommerons système alimentation/excrétion. La caractérisation plus fine de ce sous-système sera un objet essentiel de la suite de cette thèse.

La définition d'un système autour de ces deux activités se retrouve rarement dans la littérature actuelle. En effet, la dichotomie est généralement très forte entre le système alimentaire, qui concerne les flux d'approvisionnement à l'échelle humaine ou de la société, et le système de gestion des excréments. On retrouve par exemple cette dichotomie dans les catégories d'activités proposées par Brunner & Baccini (2012) qui distinguent fondamentalement « nourrir », qui comprend la gestion de l'alimentation, et « nettoyer », qui comprend la gestion de l'excrétion, si bien que les catégories d'activités proposées par ces deux auteurs nous paraissent inadéquates ici. Si nous prenons par exemple le cas de l'évacuation de matières fécales dans une toilette à chasse d'eau, inclure celle-ci dans une activité « nettoyer » présuppose déjà que les matières fécales sont perçues comme une saleté à éliminer. À notre sens, l'activité « nettoyer » ne correspond pas à l'évacuation des matières fécales, qui participe d'une activité de gestion des excréments, mais devrait se cantonner à l'entretien de la toilette ce qui, en termes de flux, ne correspond plus qu'à des flux minimes par rapport aux flux en jeu dans la gestion des excréments.

Cette analyse conjointe de l'alimentation et de l'excrétion nous paraît indispensable dans le cadre de l'étude de la soutenabilité de systèmes socio-écologiques. Elle a déjà été proposée par certains auteurs et communautés (cf. également section suivante 1.3.2 et chapitre 4.1). Nous proposons ici de formaliser la définition et la caractérisation d'un tel système en bénéficiant des apports de la socio-écologie et de l'écologie territoriale<sup>64</sup>.

Nous affinerons la définition de ce système alimentation/excrétion et sa distinction par rapport aux autres sous-systèmes d'un système socio-écologique par la suite (cf. en particulier la section 1.3.3, le

---

<sup>63</sup> Pour mémoire : inspiration, alimentation (solide et liquide), expiration, excréments urinaire, fécale et tégumentaires.

<sup>64</sup> Il nous semble également incontournable de rendre hommage aux auteurs français du XIX<sup>e</sup> siècle qui ont, il y a déjà longtemps, mis au jour l'importance et la fécondité du prisme d'analyse conjointe alimentation/excrétion. Citons en particulier Pierre Leroux qui, dans sa théorie du Circulus, nomme ce système « nutrition et sécrétion » (Leroux, 1853). Au vu de ce que nous décrirons à la sous-section 3.1.2.1, il nous paraît très probable que cette approche soit également légataire d'une appréhension extrême-orientale de l'alimentation et de l'excrétion comme faisant système.

chapitre 2.1 et la Figure 2.5). Dans l'attente de ces développements ultérieurs, nous proposons d'identifier *a minima* trois autres sous-systèmes qui sont le système énergie, le système eau et le système transport et dont nous détaillerons les caractéristiques. Nous préciserons également le spectre couvert par l'étude que nous menons dans cette thèse par rapport à l'étude de l'intégralité du système alimentation/excrétion. Au vu de la part majoritaire de population urbaine dans les sociétés occidentales – et même depuis récemment au niveau planétaire (ONU, 2014) –, nous nous intéresserons plus spécifiquement au cas des systèmes alimentation/excrétion des sociétés de territoires urbains. La définition d'une ville fait l'objet de nombreux débats et nous nous cantonnerons ici à caractériser les villes au sens de l'unité urbaine de l'INSEE à savoir une commune ou un ensemble de communes présentant une zone de bâti continu qui compte au moins 2 000 habitants.

En conclusion, pour caractériser les systèmes alimentation/excrétion dans une approche d'écologie territoriale, nous chercherons à étudier les flux énergétiques et matériels qui permettent de soutenir le métabolisme humain des citadins occidentaux en intégrant autant que possible les dimensions immatérielles liées à ces flux.

### **1.3.2. Le métabolisme urbain et son empreinte**

Du fait que nous nous intéressons aux territoires urbains, l'analyse de flux de matière et d'énergie que nous cherchons à mener s'apparente également à l'écologie urbaine et aux études de métabolisme urbain. Nous allons donc analyser dans cette section les études abordant ce sujet.

#### **1.3.2.1. Décorrélation de l'alimentation et de l'excrétion**

L'idée de considérer les flux de matière et d'énergie d'une ville en analogie avec ceux des écosystèmes a été largement développée depuis plus de cinquante ans, depuis les travaux pionniers d'Odum<sup>65</sup>. Ces approches générales sont très riches en enseignement et montrent la linéarité de la ville occidentale, similaire à un grand organisme hétérotrophe qui dépend pour sa survie de l'approvisionnement en ressources et de l'évacuation de déchets. Pour analyser plus en détail le système alimentation/excrétion, nous allons nous intéresser aux études qui se sont concentrées sur l'approvisionnement alimentaire des villes, les excrétions urbaines correspondantes et les quelques travaux que nous avons pu trouver qui combinent ces deux approches.

---

<sup>65</sup> On pourra consulter l'ouvrage de référence Odum, E. P. (1963). *Ecology*. New York, Holt, Rinehart and Winston.

L'approvisionnement alimentaire des villes a fait l'objet de nombreux travaux de biogéochimie et d'écologie territoriale ces dernières années, dont un certain nombre a porté sur l'étude de l'agglomération parisienne et du bassin de la Seine. On notera ainsi les thèses de Chatzimpiros (2011) et Bognon (2014) qui ont entre autres analysé l'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne sous l'angle des trajectoires socio-écologiques de temps long et des jeux d'acteurs associés. L'azote apparaît comme un traceur pertinent des flux alimentaires à partir duquel est construite la notion d'empreinte environnementale, azotée, de l'approvisionnement des villes (Billen *et al.*, 2009b ; 2012b). En effet, les villes industrielles occidentales sont caractérisées par le fait que leur empreinte environnementale est désormais largement externalisée (Barles, 2015b) et les territoires agricoles d'approvisionnement alimentaire des villes participent largement aux perturbations des cycles biogéochimiques de l'Anthropocène.

Les villes sont également largement déconnectées des territoires agricoles qui les entourent, comme illustré dans la figure suivante (Figure 1.18) issue de Billen *et al.* (2012b).

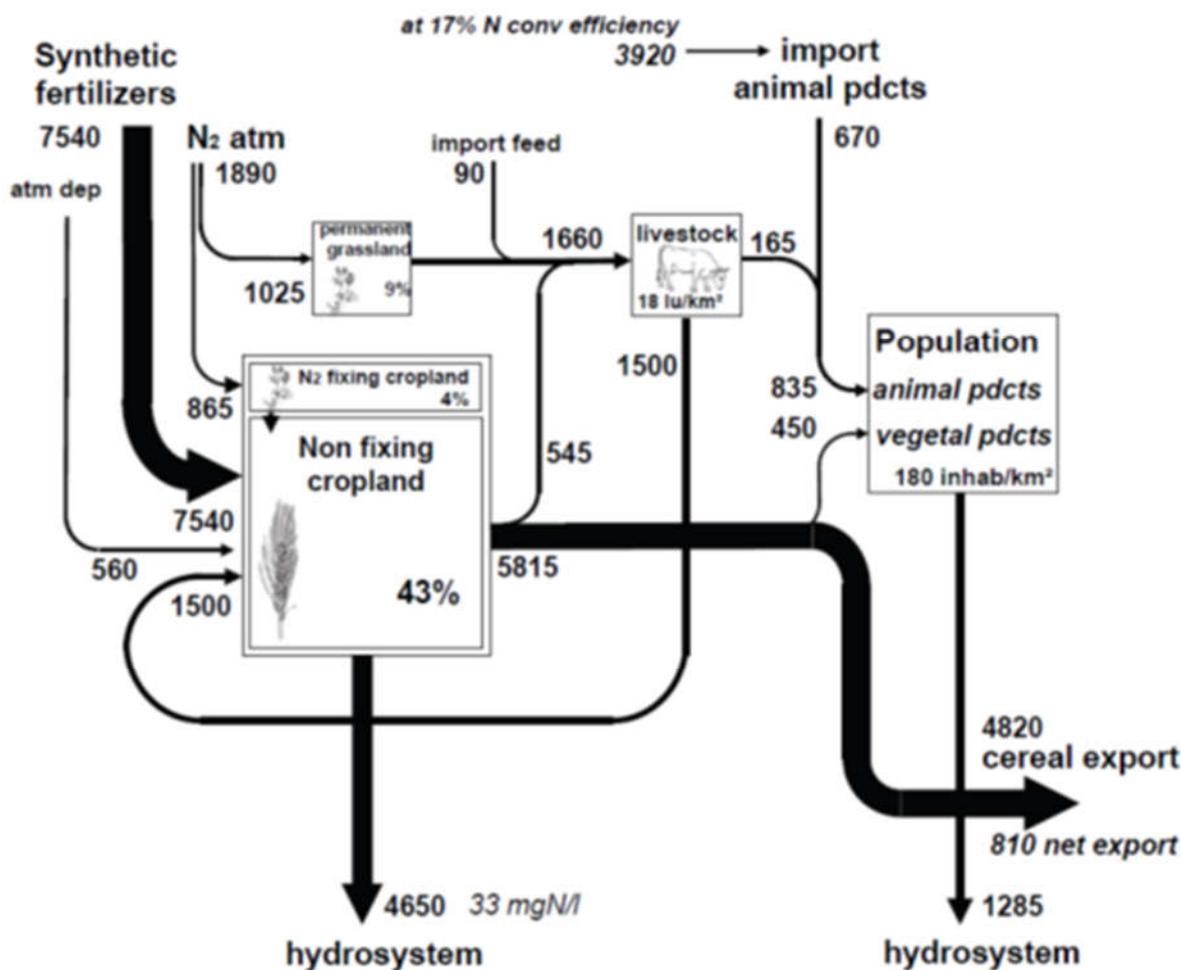


Figure 1.18 : Flux d'azote du système agricole du bassin de la Seine en 2006.

Les flux sont exprimés en kgN/km<sup>2</sup>/an. Source : Billen *et al.* (2012b)

On voit que l'alimentation de la population du bassin de la Seine (soit en majorité l'agglomération parisienne), ne représente que 10 % des céréales produites sur ce même territoire. Cette déconnexion est également illustrée par les flux représentés sur cette même figure puisque le seul flux de recirculation est celui de l'épandage des excréments animaux sur les champs. La ville apparaît comme un destinataire final des flux agricoles dont le devenir est un rejet à l'environnement, en l'occurrence les hydrosystèmes dans le cas de l'agglomération parisienne en 2006 via le système d'assainissement. Dans une telle représentation, l'existence d'un système alimentation/excrétion n'apparaît pas de façon triviale et on constate plutôt une déconnexion entre un système de production alimentaire, qui participe pour une petite part à l'approvisionnement des territoires urbains voisins, et une ville qui reçoit des flux alimentaires d'un côté et rejette des eaux usées de l'autre, sans que ces deux flux ne semblent réellement faire système.

Parallèlement, certains auteurs se sont intéressés au devenir des déchets urbains en analysant leur impact environnemental dans le temps (Morée *et al.*, 2013). Ils montrent que une large déconnexion

entre l'alimentation et l'excrétion des villes, qui ne font pas système aujourd'hui, mais participent de deux fonctions relativement décorréelées, tel qu'illustré par le choix de Baccini & Brunner (2012) de distinguer deux activités différentes « nourrir » et « nettoyer » pour la gestion des intrants alimentaires de la ville et celle des excréments.

Ce sont finalement les études sur le temps long qui montrent qu'alimentation et excrétion ont pu, par le passé, faire système.

### **1.3.2.2. Approches systémiques de l'alimentation et de l'excrétion**

Cette décorrélation de l'alimentation et de l'excrétion, sur laquelle nous reviendrons dans la troisième partie de cette thèse, est ainsi mise en exergue par les travaux de Barles qui a montré, dans le cas de l'agglomération parisienne, qu'elle est finalement le fruit d'un long processus d' « invention des déchets urbains » (Barles, 2005) au terme duquel les excréments urbains apparaissent comme dénués de valeurs et comme une charge pour la ville et, avec l'avènement du tout-à-l'égout pour les excréments humains, connectés non pas au système alimentation mais au système de gestion de l'eau en ville et à l'activité de « nettoyer » (cf. également Drangert, 2017).

Forkes (2007) a proposé une approche générique des flux linéaires et circulaires de l'alimentation et de l'excrétion d'une ville dans le cas de Toronto tel qu'illustré sur la figure suivante (Figure 1.19). Sur cette base, nous proposerons à la section suivante (section 1.3.3) une représentation conceptuelle encore plus détaillée des flux du système alimentation/excrétion d'une ville.

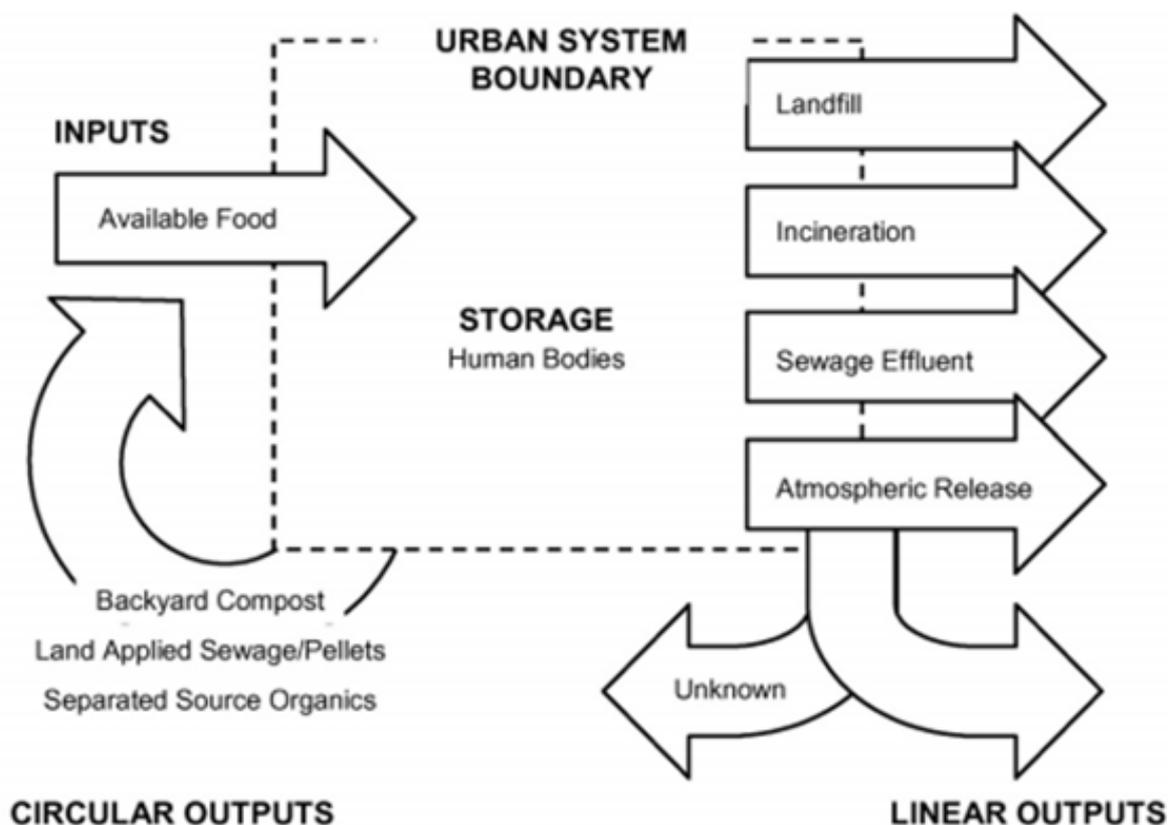


Figure 1.19 : Représentation schématiques des intrants, du stockage et des excréments dans les flux du système alimentation/excrétion d'une ville.

Source : Forkes (2007)

Du fait de la symétrie des flux d'alimentation et d'excrétion du métabolisme humain en nutriments (cf. section 1.2.1), ce sont principalement les études de flux d'azote et de phosphore qui mettent en exergue la possibilité de conceptualisation d'un système alimentation/excrétion.

Les flux d'azote de l'agglomération parisienne ont ainsi été globalement analysés par Svirejeva-Hopkins *et al.* (2011) et montrent effectivement un système alimentation/excrétion majoritairement linéaire de l'agglomération parisienne (Figure 1.20)<sup>66</sup>.

<sup>66</sup> Nous précisons ces flux par la suite (cf. en particulier le chapitre 3.2). Nous montrerons en particulier que la linéarité du système alimentation/excrétion parisien est sous-estimée dans Svirejeva-Hopkins *et al.* (2011). On notera également que le taux d'émission d'azote atmosphérique sous forme de  $N_2$  présenté correspond plutôt approximativement à la situation après mise en œuvre généralisée de la dénitrification, soit 2012, et que la situation de 2006 correspondait à rejet encore plus important d'azote réactif vers les hydrosystèmes. Nous précisons également le devenir des biodéchets.

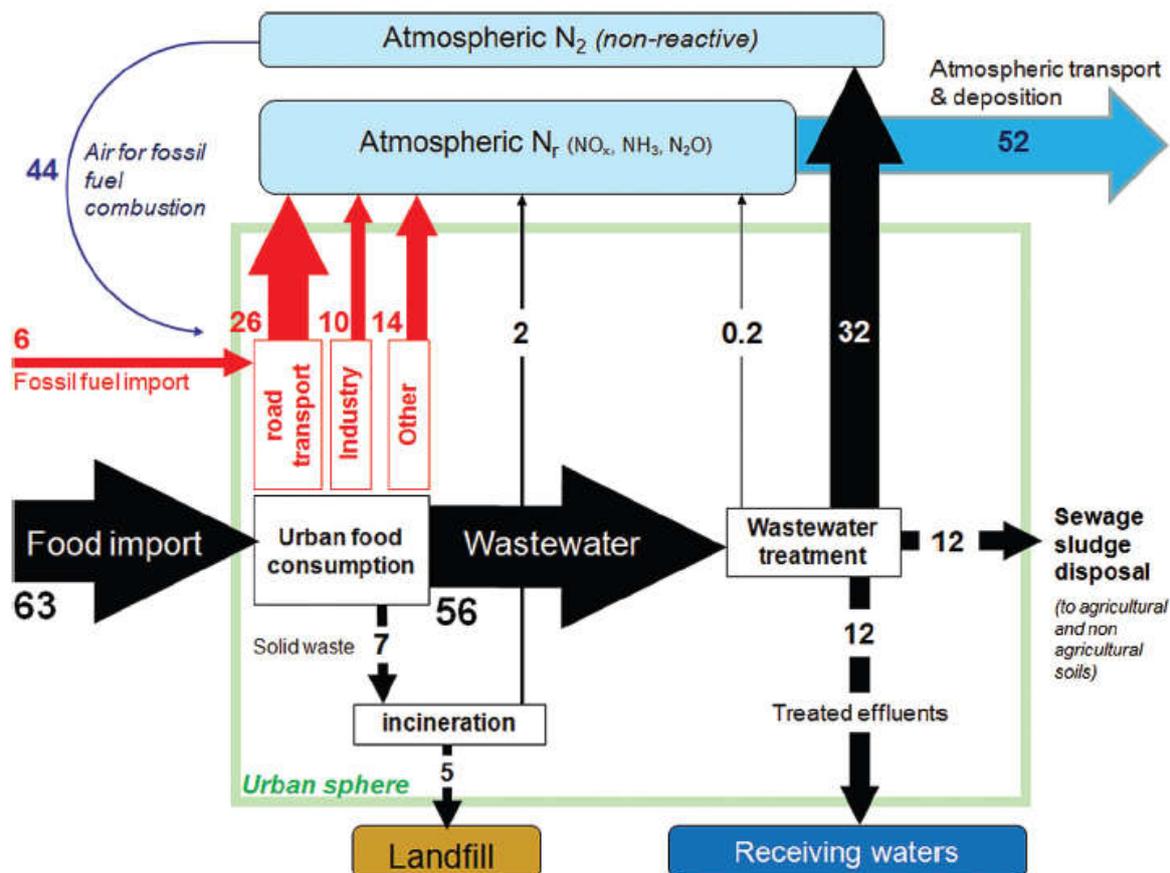


Figure 1.20 : Caractérisation globale des flux d'azote de l'agglomération parisienne montrant la linéarité de son système alimentation/excrétion

Les flux sont exprimés en GgN/an pour l'année 2006. Cf. note de bas de page n° 66 pour un commentaire succinct de cette figure. Source : Svirejeva-Hopkins *et al.* (2011).

Forkes (2007) montre également pour Toronto une très nette domination des flux linéaires sur les flux circulaires puisqu'elle aboutit à un taux de recyclage des excréments urbains du système alimentation/excrétion, quantifiés par leur contenu azoté, inférieur à 5 % sur la période 1990-2004. Barles arrive à une conclusion similaire dans l'analyse des flux d'azote de l'agglomération parisienne. La perspective historique dans laquelle elle présente les flux d'intrants et d'excréments donne à voir la possibilité de caractérisation de trajectoires socio-écologiques basés sur l'évolution du taux de recyclage de l'azote du système alimentation/excrétion de l'agglomération parisienne (cf. Figure 1.21)<sup>67</sup>. Nous nous appuyons sur cette proposition faite par Barles pour proposer une caractérisation fine des systèmes alimentation/excrétion urbains dans la deuxième partie de cette thèse.

<sup>67</sup> Nous précisons à la section 3.1.4 le périmètre légèrement différent du système alimentation/excrétion que nous proposerons de prendre pour analyser la trajectoire de Paris.

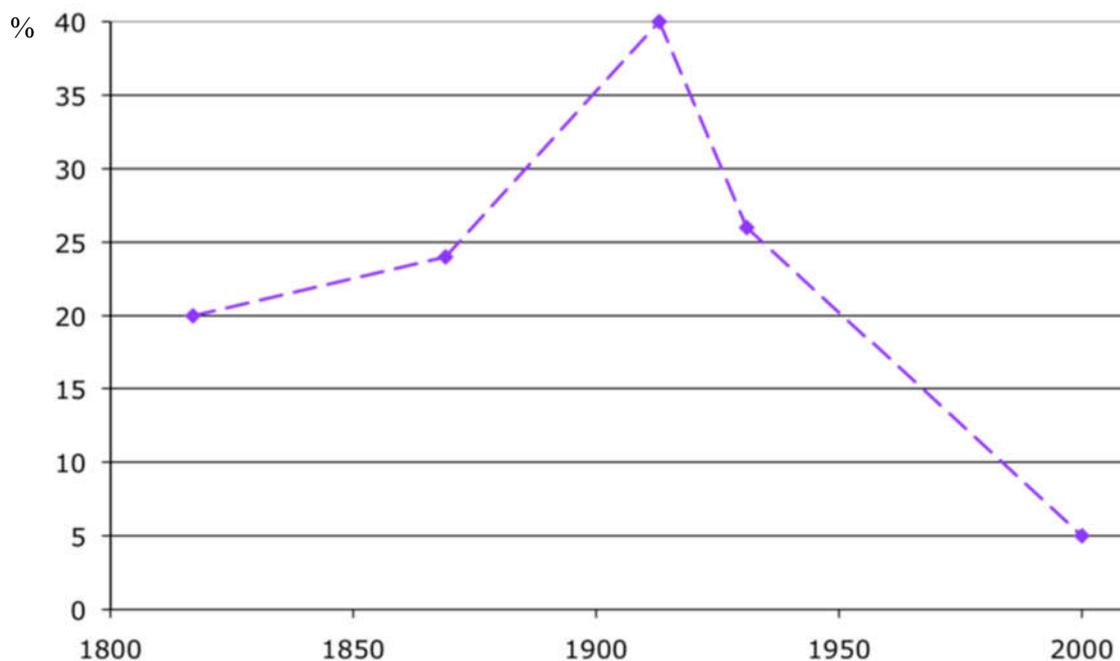


Figure 1.21 : Taux de recyclage de l'azote de l'alimentation humaine et animale à Paris aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles.

Source : Barles (2013)

Nous nous appuyerons également sur les résultats obtenus par Barles (Barles, 2007a ; 2007b) et que nous venons de présenter très succinctement pour détailler, dans la troisième partie de cette thèse, une trajectoire de système alimentation/excrétion urbain. Une analyse similaire de long terme, basée sur les flux d'azote et de phosphore, a également été développée par Neset (2005) dans le cas de la ville de Linköping en Suède. Nous présenterons plus en détails ces résultats dans la section 3.1.4.

Enfin, si nous indiquions précédemment que la distinction entre les activités « nourrir » et « nettoyer » faite par Baccini & Brunner (2012) ne permettait pas aisément de mettre en exergue un système alimentation/excrétion, il convient toutefois de souligner la richesse des angles d'approche proposés par ces auteurs pour appréhender le métabolisme de l'anthroposphère. En particulier, ils développent, suivant une logique similaire à celle que nous avons employée dans cette première partie, une approche multi-scalaire allant de l'être humain à la planète Terre. Ils représentent ainsi le système alimentation/excrétion à l'échelle des ménages que nous reproduisons dans la figure suivante (Figure 1.22)<sup>68</sup>.

<sup>68</sup> Ils présentent également ce même bilan pour l'azote et pour le phosphore que nous ne reproduisons pas ici mais que nous analyserons en détail dans le cas de l'agglomération parisienne au chapitre 3.2.

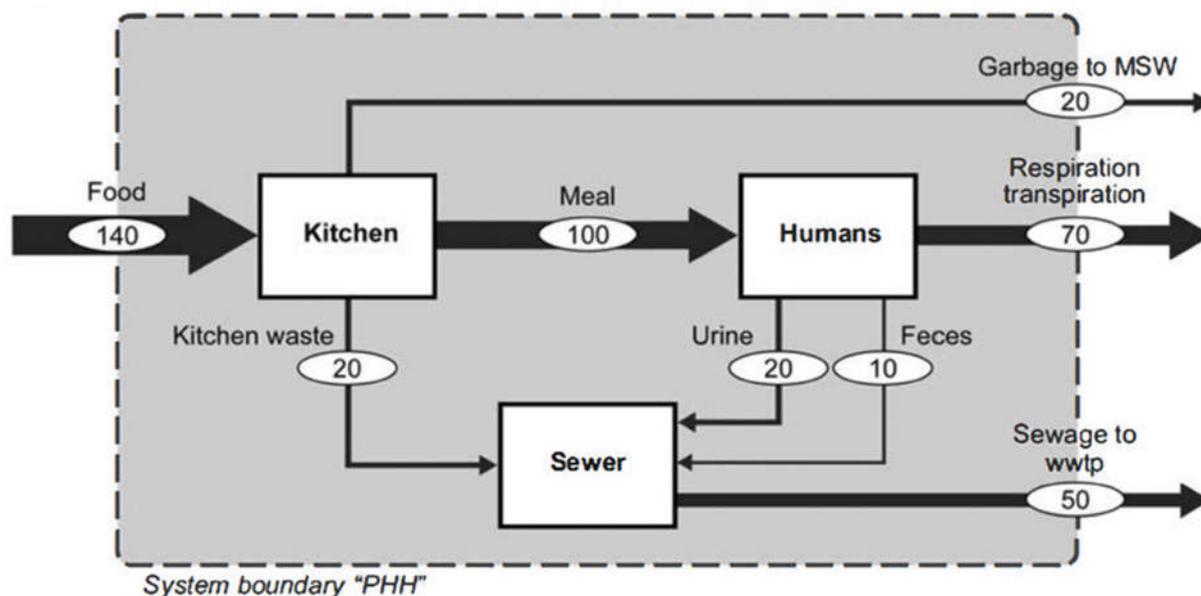


Figure 1.22 : Bilan de masse en matières sèches du système alimentation/excrétion à l'échelle d'un ménage.

Les chiffres sont en kg/pers/an. PHH = Private Household, MSW = Municipal Solid Waste, wwtp = wastewater treatment plant. Source : Baccini & Brunner (2012)<sup>69</sup>.

En nous appuyant sur ces travaux, nous allons ainsi essayer de cerner puis caractériser le système alimentation/excrétion d'un territoire urbain en nous centrant sur le métabolisme humain et en développant, à l'amont pour l'alimentation et à l'aval pour l'excrétion, l'origine et le devenir de ces flux.

### 1.3.3. Le système alimentation/excrétion d'une ville

#### 1.3.3.1. Niveaux imbriqués du système alimentation/excrétion d'une ville

Le métabolisme des êtres vivants repose essentiellement sur une dualité alimentation/excrétion (chapitre 1.2). Pour les sociétés humaines agglomérées dans une ville, on peut retrouver cette dualité à tous les niveaux d'analyse. Nous nommerons intrants la matière et l'énergie entrantes à un niveau donné et excréments la matière et l'énergie sortantes :

<sup>69</sup> On notera que certaines valeurs de la Figure 1.22 s'écartent parfois sensiblement des valeurs présentées dans cette thèse. Les données mobilisées par Baccini & Brunner sont relativement anciennes (années quatre-vingts) et ne correspondent pas nécessairement au cas de l'agglomération parisienne aujourd'hui choisi ici.

- aux niveaux atomique, moléculaire et cellulaire, les principaux intrants sont le carbone réduit des glucides et lipides, l'oxygène, l'eau et l'azote des acides aminés ; les excréments sont le gaz carbonique et l'ammoniac (cf. Figure 1.10). Cette transformation se déroule dans la cellule et on peut ainsi considérer le gaz carbonique excrété des poumons et l'ammoniac excrété sous forme d'urée dans les urines comme les produits du métabolisme cellulaire ;
- au niveau des organes et du corps humain, les intrants sont les aliments et les excréments correspondants sont les matières fécales, résidus de la digestion des aliments qui n'auront pas pu être mobilisés par le métabolisme du niveau inférieur (c'est-à-dire cellulaire) ;
- au niveau de l'habitat, les intrants sont les provisions alimentaires et l'excrément spécifique produit à ce niveau prend la forme des biodéchets alimentaires ménagers ;
- au niveau de la ville, ainsi que des éventuelles chaînes de transformation agro-alimentaire associées à son approvisionnement, les intrants sont les productions agricoles alimentaires et l'excrément produit prend la forme de biodéchets agroalimentaires<sup>70</sup> ;
- au niveau des territoires agricoles alimentant *in fine* la ville, qu'on nommera hinterland agricole nourricier, les intrants sont les engrais, l'énergie solaire et le gaz carbonique et l'excrément produit à ce niveau prend la forme des émissions résiduelles du système de production agricole ;
- enfin, le dernier niveau est constitué du bassin biogéochimique qui englobe les précédents niveaux décrits et dont les ressources de l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère ou la biosphère sont principalement mobilisées par les territoires agricoles pour fournir les engrais et le gaz carbonique.

Nous proposons de représenter ces niveaux de façon imbriquées (Figure 1.23), donnant ainsi à voir un système, que nous avons nommé alimentation/excrétion (cf. 1.3.1.3) et qui, pour chaque ville donnée, se caractérise par une cascade de mobilisations de ressources dans laquelle chaque niveau peut être décrit par analogie avec le métabolisme humain. Ces niveaux s'alimentent en intrants et produisent deux matières : une qui sert d'intrant au niveau inférieur, une autre qui constitue un excrément.

---

<sup>70</sup> On désignera sous ce vocable les biodéchets produits par tous les processus de transformation autres que ceux qui se déroulent à l'échelle de l'habitat, en opposition donc à biodéchets ménagers.

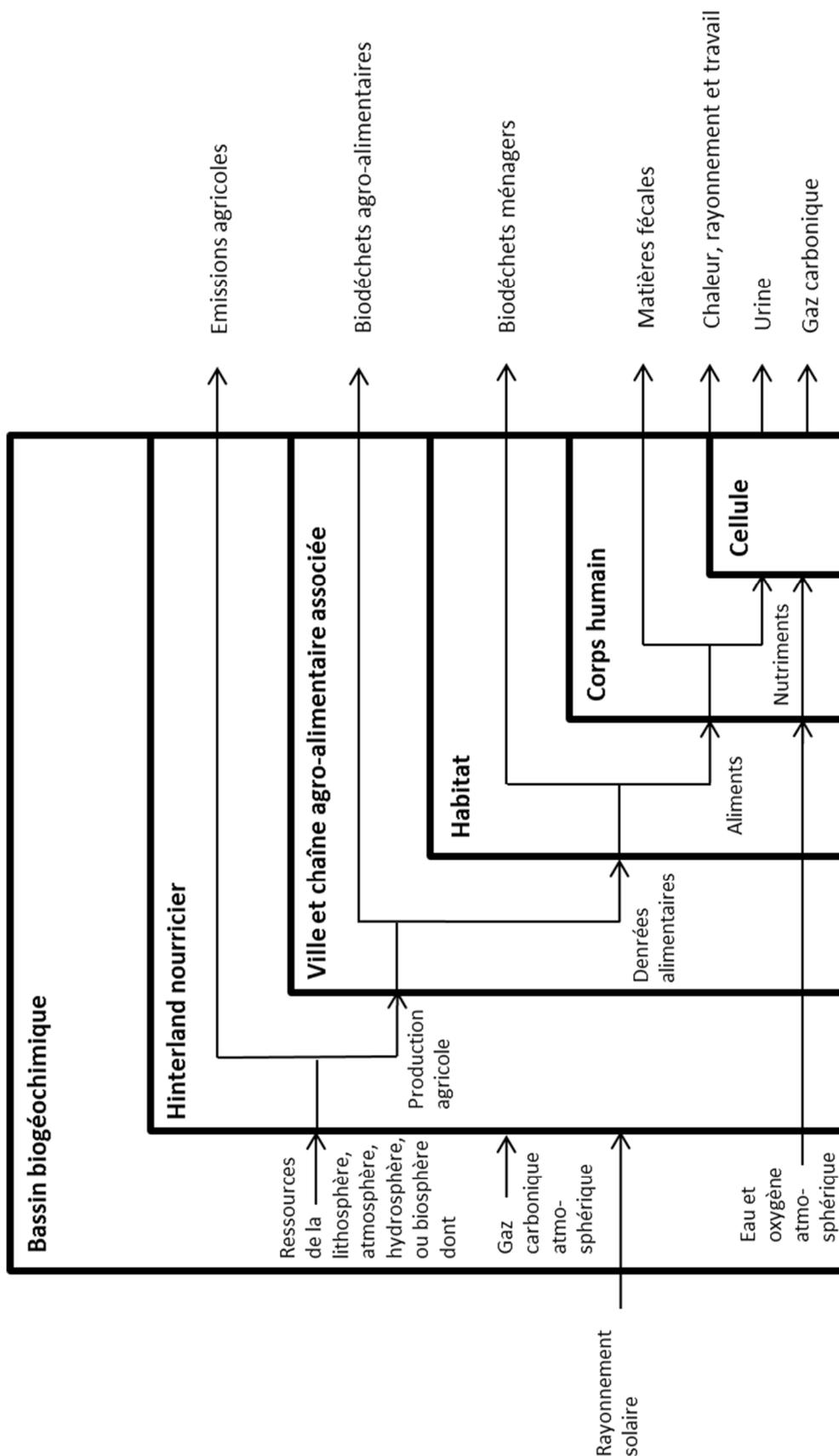


Figure 1.23 : Les niveaux imbriqués du système alimentation/excrétion d’une ville et la cascade d’intrants et excréments correspondants.

Cette représentation permet de faire ressortir certains traits spécifiques du système alimentation/excrétion occultés dans les autres formes de représentations mentionnées à la section 1.3.2. Elle permet en effet d'attribuer un intrant et un excrétat spécifique à chaque niveau représenté et de les mettre ainsi en relation sur une large gamme d'échelles allant du bassin biogéochimique à la cellule. Outre le fait de distinguer un système alimentation/excrétion au sein des sous-systèmes composant un système socio-écologique, elle met en exergue certains traits saillants du métabolisme de l'anthroposphère que nous détaillerons par la suite : importance spécifique de l'urine comme excrétat (cf. chapitre 2.2), dissymétrie intrants/excrétats (cf. sous-section 1.3.3.4), etc.

Dans certains cas, la représentation sous forme de niveaux imbriqués de la Figure 1.23 correspondra en outre à une réelle imbrication spatiale des échelles concernées. On retrouve par exemple cette imbrication dans l'approvisionnement en céréales de l'agglomération parisienne à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle (Billen *et al.*, 2012c).

### 1.3.3.2. Pertinence des niveaux représentés

Cette représentation générique nous paraît adaptée pour décrire tout système alimentation/excrétion urbain. Le fonctionnement du corps humain et de ses cellules constitue une donnée biologique d'entrée que nous considérons comme non maîtrisable ni modifiable. La représentation choisie est certes très simplifiée mais nous l'avons argumentée dans la section 1.2.1 (cf. en particulier la Figure 1.11 pour une vision plus détaillée).

Les niveaux supérieurs représentés nous paraissent revêtir un certain caractère d'universalité. Nous pourrions raffiner cette représentation en distinguant les différents lieux d'utilisation de denrées alimentaires dans la ville (lieux d'habitation des ménages, lieux de travail, espaces publics, etc.). Nous optons ici pour une vision étendue de la notion d'habitat par souci de simplicité. Nous avons également choisi de fusionner deux niveaux qui pourraient être dissociés, à savoir la ville et les chaînes de transformation agro-alimentaire associées. On pourrait arrêter plus précisément le périmètre géographique de la ville suivant la définition donnée à la sous-section 1.3.1.3 et considérer que les intrants sont l'ensemble des denrées alimentaires passant cette frontière géographique, comme cela est usuellement fait dans les analyses de métabolisme urbain (Forkes, 2007 ; Billen *et al.*, 2009b ; 2012b). Si certains produits agricoles peuvent ne subir aucune transformation entre le champ et l'assiette (fruits et légumes), les produits transformés peuvent aussi bien l'être à l'intérieur de la ville qu'à l'extérieur. Ainsi dans le cas de la fabrication d'une baguette de pain, une première transformation, la mouture des grains de céréales en farine, se déroule usuellement en dehors de la ville alors que la fabrication du pain à partir de la farine peut se dérouler dans l'atelier de l'artisan boulanger en ville. C'est cette difficulté d'établissement d'une frontière nette entre la ville et les diverses transformations agro-alimentaires des produits qui nous a amenés à présenter comme fusionnés ces deux niveaux.

La production agricole elle-même peut se dérouler en ville : l'importation de denrées, en particulier alimentaires, caractérise toutefois justement la ville aujourd'hui et la production urbaine agricole ne permet pas, aujourd'hui, de nourrir sa population. Ces flux sont donc *a priori* marginaux même s'ils peuvent justement être porteurs d'une réinvention de la place respective de la ville et de la campagne dans la production alimentaire. La traduction spatiale des niveaux imbriqués de notre schéma conceptuel montrerait alors une importance accrue de l'échelle urbaine dans le niveau que nous avons nommé hinterland agricole nourricier.

Quant à l'hinterland agricole nourricier, il peut ou il a pu exister des sociétés urbaines dont le système d'approvisionnement alimentaire reposerait principalement sur le prélèvement direct de ressources alimentaires dans l'environnement (villes côtières de pêche par exemple avec un régime alimentaire fortement piscivore). Nous excluons ici ce cas particulier d'approvisionnement alimentaire urbain et considérerons par la suite les flux directs de prélèvement de ressources alimentaires comme étant toujours minoritaires par rapport à l'approvisionnement depuis l'hinterland agricole. En effet, si nous prenons le cas de la pêche, qui nous semble être la seule ressource environnementale mobilisable en grandes quantités par l'humanité, la FAO (2005) estime que le rendement maximal annuel constant des prises de pêche marine est de 80 millions de tonnes par an. En appliquant le ratio protéique du poisson de la table CIQUAL (0,2 g/g), l'apport azoté moyen maximal d'une humanité à 7 milliards d'individus se situe en-dessous de 0,4 kgN/pers/an issu de la pêche soit environ 10 % des apports azotés d'un régime alimentaire conforme aux recommandations de l'OMS. On pourra toutefois affiner la représentation en figurant une flèche partant du bassin biogéochimique et alimentant directement la ville et sa chaîne de transformation agro-alimentaire associée par les produits de la chasse, la pêche et la cueillette.

Nous n'avons pas non plus distingué la culture de plantes et l'élevage d'animaux. Deux possibilités sont toutefois à envisager dans le cas d'élevage d'animaux : soit les animaux se nourrissent de plantes cultivées et l'élevage repose dans ce cas sur la culture de plantes. Soit les animaux pâturent et ils réalisent alors eux-mêmes directement, de façon plus ou moins contrôlée, un prélèvement au niveau supérieur du bassin biogéochimique.

Nous avons nommé bassin biogéochimique un niveau pouvant prendre de très nombreuses formes et qui fournit les éléments nécessaires à la croissance des plantes ou à l'alimentation des animaux. Deux intrants se distinguent des autres par leur caractère commun à toute forme de culture de plantes et qui sont liés au métabolisme photosynthétique des plantes chlorophylliennes :

- le rayonnement solaire, qui constitue l'unique élément extra-planétaire mobilisé par les systèmes alimentation/excrétion ;

- le gaz carbonique de l’atmosphère, qui est régulé par le cycle biogéochimique planétaire du carbone<sup>71</sup> (cf. section 1.1.1).

Dans le cas le plus simple, ce bassin biogéochimique peut tout simplement prendre la forme du sol et du sous-sol des espaces cultivés pour autant que ceux-ci soient suffisamment riches pour fournir l’ensemble des nutriments nécessaires à la croissance des plantes. On peut citer par exemple le cas des prairies nord-américaines, mises en culture au XIX<sup>e</sup> siècle par les colons américains et alimentant l’agglomération londonnienne. La richesse initiale de leurs sols en éléments nutritifs a permis une exploitation agricole minière de ces ressources biogéochimiques pendant quelques décennies avant l’épuisement de ces ressources<sup>72</sup>.

Ce bassin biogéochimique peut aussi prendre la forme d’un bassin versant, comme dans les grandes civilisations fondées sur des systèmes agricoles de décrue (Mazoyer & Roudart, 1998). Dans ce cas, les ressources nutritives permettant la croissance des plantes sont issues de l’érosion de l’ensemble du bassin versant amont du fleuve et apportées aux surfaces cultivées lors des crues du fleuve. L’immensité du bassin versant du Nil (troisième plus grand bassin versant fluvial au monde après l’Amazone et le Congo) explique ainsi le développement de la civilisation égyptienne plusieurs millénaires avant notre ère et la célèbre phrase d’Hérodote<sup>73</sup>. Il en va de même pour les civilisations des grands fleuves d’Asie du Sud-Est. Citons comme dernier exemple l’industrie minière actuelle de synthèse des engrais qui élargit le bassin biogéochimique à quelques sites géologiques spécifiques de la planète dans laquelle les éléments nutritifs sont en concentrations élevées dans certaines strates géologiques (gisement de roches phosphatées du Sahara Occidental, gisement de potassium en Allemagne ou en Alsace, nitrates du Chili, etc.). Dans ce dernier cas où les lieux d’origine des engrais

---

<sup>71</sup> Les intenses modifications du cycle biogéochimique planétaire du carbone opérées par les sociétés industrielles depuis le XIX<sup>e</sup> siècle ont des conséquences susceptibles de remettre en cause le fonctionnement pérenne des systèmes alimentation/excrétion de nombreuses villes, par exemple par les modifications induites du cycle biogéochimique de l’eau (sécheresse due au changement climatique, cf. chapitre 1.2). On notera toutefois que l’augmentation de la concentration atmosphérique en gaz carbonique, pris isolément comme un facteur de croissance des plantes, n’est pas néfaste voire peut permettre dans certaines conditions d’augmenter les rendements agricoles.

<sup>72</sup> Kempf (2013) reprend même une analyse de Kenneth Pomeranz selon laquelle l’exploitation des ressources biogéochimiques de l’Amérique du Nord, et en particulier des prairies mises en culture, ont été le facteur-clé, avec le charbon, expliquant l’émergence de l’Angleterre et de l’Europe comme puissance mondiale au XVIII<sup>e</sup> siècle.

<sup>73</sup> « L’Égypte est un don du Nil » suivant la tradition française, ou plus précisément « l’Égypte [...] est un don du fleuve » (« Αἴγυπτος [...] δῶρον τοῦ ποταμοῦ ») (*Histoire* d’Hérodote).

sont fortement déconnectés du territoire agricole, on pourrait introduire un niveau supplémentaire auquel se déroule la synthèse d'engrais et qui prend des ressources biogéochimiques en intrants, produit des engrais pour l'hinterland agricole nourricier et excrète des sous-produits de la synthèse de ces engrais.

Ainsi, en gardant à l'esprit les diverses limites mentionnées ci-dessus, la représentation générique de la Figure 1.23 nous paraît suffisamment robuste pour constituer le socle commun de description du système alimentation/excrétion d'une ville.

### 1.3.3.3. Limites de la représentation choisie

Centrée sur les flux de matière et d'énergie dont la cascade permet d'expliquer le soutien final du métabolisme des cellules humaines d'un citoyen, la représentation de la Figure 1.23 reste toutefois nécessairement parcellaire. On notera deux principales limites à cette représentation.

#### *Autres flux mobilisés*

Cette représentation ne fait pas apparaître les flux de matière et d'énergie qui permettent de soutenir le fonctionnement du système alimentation/excrétion. Dans une approche d'écologie territoriale, il convient de compléter la représentation des flux d'intrants et d'excrétats par les flux de matière et d'énergie mobilisés aux différents niveaux pour permettre de faire fonctionner cette cascade.

Nous avons ainsi représenté à la Figure 1.23 le flux d'énergie excrété correspondant au travail, à la chaleur et au rayonnement émis par le corps humain. Une partie du travail fourni par le corps humain sert justement à soutenir le système alimentation/excrétion : travail des mâchoires pour mastiquer les aliments, travail musculaire du corps pour se rendre à un marché alimentaire, travail des muscles du système digestif pour excréter les matières fécales, etc. Cette boucle interne du système alimentation/excrétion nous paraît toutefois secondaire au regard du fait que la majeure partie du travail (au sens thermodynamique) fourni par un citoyen est dédiée à un grand nombre d'autres activités<sup>74</sup>, liées aux autres aspects du système socio-écologique dans lequel il s'inscrit, dont le travail (au sens économique). Comme indiqué dans la sous-section 1.3.1.3, ce flux, ainsi que tous les autres flux secondaires, reflètent les caractéristiques des autres sous-systèmes socio-écologiques : système de transport, système énergie, etc.

---

<sup>74</sup> On remarquera que le nourrisson constitue un cas particulier de citoyen pour lequel l'alimentation et l'excrétion constituent une activité majeure mais il est totalement dépendant d'autres personnes pour son alimentation.

La description complète de ces flux serait ainsi colossale. Si nous prenons le cas d'un croque-monsieur mangé dans l'agglomération parisienne, elle doit tout autant inclure l'énergie d'alimentation et les matériaux de construction de la tronçonneuse qui abat un arbre en Amazonie pour cultiver du soja servant à nourrir un élevage de porc en France à l'origine de la tranche de jambon ; que l'énergie et les matériaux des pelleteuses de la mine d'uranium qui alimente la centrale nucléaire servant à faire fonctionner le four dans lequel notre habitant de l'agglomération parisienne prépare son croque-monsieur. L'interdépendance entre les flux primaires du système alimentation/excrétion et les flux qui les soutiennent est d'ailleurs très forte puisque les différentes caractéristiques d'un système socio-écologique se construisent ensemble dans le temps. Nous limiterons ici volontairement l'analyse des systèmes alimentation/excrétion aux flux primaires de matière et d'énergie de la cascade des intrants et excréments. Autant que possible, nous chercherons à intégrer qualitativement, voire quantitativement, dans notre analyse les éléments de contexte liés à tous les flux de soutien des systèmes socio-écologiques étudiés. Nous chercherons aussi à mettre en exergue le degré de couplage entre ce que nous nommons système alimentation/excrétion au sens strict et les autres sous-systèmes socio-écologiques (cf. plus loin Figure 2.5). Nous n'avons pas l'ambition de décrire finement ces éléments dans notre analyse centrée sur le système alimentation/excrétion. Par la suite, nous renverrons autant que possible à des travaux spécifiques, et en particulier aux analyses de cycle de vie, pour intégrer ces autres sous-systèmes socio-écologiques.

### *Supports physiques*

La représentation choisie en Figure 1.23 ne permet pas de décrire les supports physiques sur lesquels se déroulent les différents processus alors même que ceux-ci vont fortement les conditionner. Les différents compartiments environnementaux du bassin biogéochimique dans lequel s'inscrit notre système interagissent avec tous les niveaux. Ainsi, la frontière entre le bassin biogéochimique et les terres agricoles de l'hinterland nourricier est difficile à définir : le sol par exemple, est fondamentalement intégré dans l'hinterland nourricier et conditionne les pratiques culturelles envisageables. Dans le cas d'une culture de légumineuse alimentant un animal d'élevage, la légumineuse joue au moins deux rôles : par sa symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote, elle permet d'introduire la ressource biogéochimique que constitue l'azote atmosphérique dans le système agricole, sous la forme d'azote réactif, et cette fixation se situe ainsi à la frontière entre le bassin biogéochimique et l'hinterland agricole ; elle sert également de culture nourricière pour les animaux d'élevage et constitue alors, en tant que telle, un élément interne à l'hinterland agricole.

La description complète de ces supports physiques compliquerait inutilement le schéma à ce stade mais nous les intégrerons autant que possible de manière qualitative dans notre analyse, en particulier en ce qui concerne les artefacts urbains impliqués dans le système alimentation/excrétion (toilettes, poubelles, réseaux urbains, etc.).

L'ambition de l'écologie territoriale de prendre en compte les dimensions sociales, économiques, politiques et techniques des flux dans un territoire, qui en fait la force, est aussi un de ses points principaux de difficulté méthodologique : arriver à analyser correctement un système sans verser ni dans l'extrême complexité de la description fine de l'ensemble de ces facettes, ni dans la simplification à outrance de la stricte analyse de flux déconnectée des enjeux du territoire. Notre objectif en la matière est d'arriver à nous concentrer sur les points saillants d'analyse qui nous paraissent les plus pertinents à investiguer.

#### **1.3.3.4. La dissymétrie alimentation/excrétion**

Malgré une symétrie indiquée comme fondamentale dans les métabolismes des différents niveaux imbriqués (alimentation/excrétion – intrants/sortants), la Figure 1.23 présente une profonde dissymétrie entre les intrants, que nous avons représentés à l'intérieur des différents niveaux et les excréments que nous avons choisi de représenter à l'extérieur de tous les niveaux. Cette représentation est volontaire et vise à traduire cette dissymétrie.

En effet, il peut exister une très grande variété de modalités de mise en œuvre à chaque niveau : nature des ressources prélevées dans le bassin biogéochimique, pratiques culturelles, degré de transformation des produits agricoles avant consommation, pratiques culinaires et alimentaires, en particulier vis-à-vis des biodéchets, spécificités du régime alimentaire, etc. Mais le schéma conceptuel nous semble toujours être le même car il est fondamentalement guidé par les contraintes inhérentes à n'importe quel système alimentation/excrétion urbain.

La première contrainte, déjà évoquée ci-dessus, tient au besoin physiologique humain de s'alimenter et d'excréter. Le caractère chimioorganohétérotrophe du métabolisme humain, développé à la section 1.2.1, entraîne une dépendance, en amont de la chaîne, vis-à-vis d'organismes photoautotrophes. La génération de biodéchets ménagers ou agroalimentaires paraît inéluctable par la nature même des denrées alimentaires dont peut disposer l'humanité (non comestibilité humaine de la coque de noix, difficulté de consommer de l'herbe, etc.). L'organisation d'une société sous forme d'une ville entraîne également la dépendance à un hinterland nourricier puisque les citoyens ne sont pas les producteurs principaux de leur alimentation. La culture de plantes photosynthétiques, à la base de toute civilisation humaine ayant effectué sa révolution néolithique, paraît également caractériser de façon incontournable l'hinterland nourricier comme étant un territoire de cultures agricoles et il ne paraît pas possible d'annuler les émissions agricoles dans une culture au champ. Enfin l'inscription de ces niveaux dans un bassin biogéochimique de la planète paraît également inéluctable de par notre condition d'habitants de la planète Terre. Nous discuterons ci-après des éventuelles possibilités de s'abstraire de ces contraintes.

### ***Possibilités d'abstraction des contraintes des systèmes alimentation/excrétion***

La contrainte de l'existence d'un niveau urbain est incontournable par hypothèse, du fait même du choix d'orienter nos recherches sur les sociétés urbaines. L'hinterland nourricier devient également *de facto* une contrainte incontournable. On voit en effet que, dans les conditions actuelles de l'agriculture occidentale, l'autoproduction alimentaire en ville contrevient à la définition même que nous avons donnée de la ville en termes de bâti continu pour des raisons de surfaces agricoles nécessaires et de densité de population urbaine<sup>75</sup>.

De nombreux auteurs explorent toutefois la suppression de ces différentes contraintes. Certains courants transhumanistes<sup>76</sup> visent ainsi à travailler au changement des modalités du métabolisme humain : il nous est loisible d'imaginer nous alimenter exclusivement par intraveineuse, comme cela se pratique par exemple aujourd'hui dans les situations de soutien médical dans le cas de maladies de défaillance du système digestif. Une alimentation en continue par intraveineuse pourrait ainsi peut-être nous permettre de nous abstraire du fonctionnement de notre système digestif et de l'excrétat correspondant, à savoir les matières fécales<sup>77</sup>. L'alimentation par intraveineuse peut aussi permettre de se passer d'un hinterland nourricier puisque les nutriments directement injectés dans le système veineux pourraient alors provenir d'une synthèse industrielle à partir de molécules prélevées dans l'environnement (chimie organique à partir d'hydrocarbures fossiles par exemple). De façon encore plus extrême, certains auteurs travaillent sur la possibilité de faire muter des humains pour qu'ils deviennent photoautotrophes ce qui modifierait radicalement le système alimentation/excrétion de cette population (Agapakis *et al.*, 2011).

La chaîne de transformation agro-alimentaire ou la génération de biodéchets semblent à peu près inéluctables. Le premier élément qui ressort de l'analyse qualitative des biodéchets urbains, par

---

<sup>75</sup>Nous verrons au chapitre 3.2 qu'un habitant de l'agglomération parisienne mobilise aujourd'hui environ 5 000 m<sup>2</sup> de surfaces agricoles dans son hinterland agricole nourricier et, même en supposant que l'on divise cette surface par 10 (ce qui peut être envisageable), voire par 100, il ne paraît pas envisageable que la ville produise sa nourriture alors que la surface disponible par habitant est de 47 m<sup>2</sup>/habitant dans la Ville de Paris et de 270 m<sup>2</sup>/habitant à l'échelle de l'agglomération parisienne.

<sup>76</sup> Suivant Dorthe & Roduit (2014), « le transhumanisme peut être défini comme un mouvement d'idées reposant sur deux convictions : d'une part il n'y a aucune raison de penser que l'humanité est arrivée au terme de son évolution ; d'autre part, elle peut et doit aujourd'hui prendre en charge son évolution et sa destinée grâce aux sciences et technologies émergentes et à venir, issues de la convergence Nano, Bio, Info, Cogno (NBIC) ».

<sup>77</sup> Nous n'avons pas creusé cette piste de recherche, par choix d'orientation de nos recherches comme indiqué ci-après, mais nous pouvons noter que ce système entraînerait sûrement malgré tout une excrétion anale de flux minimes (sécrétions biliaires entre autres).

symétrie avec les denrées alimentaires, est la très grande variété de leur typologie<sup>78</sup>. Leur analyse nécessiterait de mener un travail spécifique qui sort de notre cadre<sup>79</sup>. Ces niveaux pourraient être raccourcis voire supprimés (par exemple par la consommation d'épluchures usuellement non consommées, par l'achat de produits non transformés) mais elles annuleraient alors simplement un flux dans notre schéma.

Au niveau de l'hinterland nourricier, la culture de plantes hors sol permet également d'envisager de s'abstraire d'une agriculture ancrée dans un territoire non urbain. Allant encore plus loin, Matassa *et al.* (2015) proposent de s'abstraire radicalement des contraintes de la culture de plantes, en particulier pour l'alimentation animale. Partant du constat similaire à celui que nous exposons au chapitre 1.2 de tension sur les ressources planétaires, ces auteurs proposent que des « bactéries lithotrophiques hydrogénéotrophiques [soient cultivées à partir d']énergie verte produite en dehors des périodes de pointe de consommation énergétique et à partir d'ammonium récupéré [en station d'épuration], pour produire directement des protéines à haute valeur ajoutée avec un coût énergétique faible et des gains environnementaux nets (captation de CO<sub>2</sub>) »<sup>80</sup>. De tels systèmes de production de nourriture peuvent alors effectivement permettre de s'abstraire des surfaces cultivées d'un hinterland nourricier et concilier les contraintes présentées ci-dessus comme insolubles de densité de population urbaine et de surfaces nécessaires à la production alimentaire.

### ***Fusions de niveaux***

Finalement, nous constatons que toutes ces propositions de remise en cause des niveaux imbriqués et des cascades d'intrants/excrétats associées peuvent être analysées comme la fusion de différents niveaux entre eux. Fusion de la cellule et du corps humain dans le cas du transhumanisme, fusion de l'habitat avec le corps humain (ingestion de denrées usuellement non consommées) ou avec la chaîne de transformation agro-alimentaire (achats ménagers exclusifs d'aliments prêts à ingérer) dans le cas

---

<sup>78</sup> À cette variété typologique des biodéchets peut d'ailleurs répondre une variété typologique des modalités de gestion mises en œuvre telles que la filière de valorisation d'huiles de cuisine usagées à Barcelone, la filière de valorisation de coquilles d'huîtres à La Rochelle, etc.

<sup>79</sup> On pourra à cet effet se référer à la thèse en cours de Barbara Redlingshofer. Dans cette thèse, elle vise à développer une méthodologie pour caractériser la gestion de nourriture en ville, en analysant spécifiquement les flux de nourriture non-consommée (pertes et gaspillages alimentaires). L'analyse doit permettre de décrire et caractériser les flux alimentaires dans le périmètre urbain, identifier l'ampleur des flux de nourriture non-consommée, les activités et acteurs à l'origine et les modalités de leur gestion (prévention à la source, redistribution, recyclage et valorisation).

<sup>80</sup> Traduction personnelle.

de la suppression du biodéchet ménager, fusion plus ou moins intégrée de l'hinterland avec l'habitat dans le cas de la fabrication d'aliments à domicile, fusion de l'hinterland et de la ville dans la culture hors sol ou la culture microbiologique alimentaire. La question de la fusion des niveaux imbriqués relève finalement de considérations éthiques, culturelles et de choix de société, qui renvoient à d'autres disciplines scientifiques et ne seront pas abordées ici.

Dans la suite de notre discussion, et principalement dans les réflexions prospectives que nous mènerons, nous proposons de nous placer dans le cadre suivant :

- nous excluons toute fusion des niveaux du corps humain et de la cellule et considérons un modèle de société non transhumaniste où le métabolisme humain n'est pas modifié, hormis le cas marginal du cadre médical précédemment mentionné ;
- nous considérons comme marginales, en termes d'approvisionnement de la ville, toutes les productions alimentaires déconnectées de territoires agricoles ruraux (agriculture urbaine, culture hors-sol, cultures microbiennes alimentaires, etc.) et considérons donc l'hinterland agricole extérieur à la ville comme le pourvoyeur principal de produits alimentaires pour la ville<sup>81</sup>. Dans les cas qui nous intéressent, et en particulier, la prospective relative à l'agglomération parisienne et plus généralement aux villes françaises et occidentales, nous nous plaçons dans le cas d'un modèle de société qui maintient une production agricole connectée à la terre et aux territoires ruraux ainsi que les éléments de patrimoine qui y sont attachés (paysages, savoirs-faires, biodiversité, métiers, etc.).

Nous avons ainsi défini un cadre conceptuel qui sera celui des systèmes alimentation/excrétion urbains discutés dans cette thèse. Nous avons vu qu'il impose des contraintes dans l'organisation des niveaux imbriqués, du bassin biogéochimique jusqu'à la cellule, et dans la cascade des ressources mobilisées et des flux d'intrants associés. Il nous semble présenter de ce fait un caractère d'universalité. Face à cela, nous avons mis en exergue la production d'excrétions correspondant à chaque niveau mais nous n'avons pas détaillé plus avant leur inscription dans les différents niveaux dans le cadre de la Figure 1.23. Nous avons souhaité montrer ainsi la fondamentale dissymétrie existant entre l'universalité des

---

<sup>81</sup> Nous semblons ici placer sur le même plan des pratiques radicalement différentes telles que l'agriculture urbaine ou la culture microbienne alimentaire. Notre propos est surtout ici d'insister sur la primauté des territoires agricoles ruraux pour alimenter la ville comme choix de société. Si la proposition de marginaliser la culture alimentaire microbienne consiste effectivement à l'évacuer comme modèle de production alimentaire, la pratique d'une agriculture urbaine, marginale en termes de flux alimentaires produits, peut avoir des effets sociaux non négligeables sur le fonctionnement d'un système alimentation/excrétion urbain et mériter paradoxalement d'être promue tout en assumant son caractère marginal.

niveaux et ressources mobilisés dans la cascade des flux d'intrants et une certaine liberté dans la possibilité d'organisation des flux liés aux excréments. Il en découle une grande variété typologique dans les modalités de gestion de ces flux qui va ainsi permettre de distinguer fondamentalement les différentes sociétés<sup>82</sup>. C'est sur cette variété que va porter le travail présenté dans la seconde partie de cette thèse.

---

<sup>82</sup> Nous interprétons le travail de l'artiste Piero Manzoni, qui a mis dans des boîtes de conserve ses matières fécales (*Merda d'artista*), comme une interpellation sur le fait que les sociétés humaines disposent effectivement de degrés de liberté extrêmes quant aux modalités de gestion de leurs excréments.

## Conclusion de la première partie

Cette première partie nous a permis de poser le cadre de l'analyse que nous souhaitons développer des systèmes alimentation/excrétion urbains. Travaillant à différentes échelles, nous avons d'abord caractérisé les enjeux planétaires associés à l'alimentation et à l'excrétion humaine et mis en exergue l'inscription des êtres humains dans des cycles biogéochimiques planétaires, désormais profondément bouleversés par l'action de certaines communautés humaines, et la dépendance de l'épanouissement de l'humanité à la stabilité de ces cycles biogéochimiques. Nous avons analysé la double tension qui s'exerce sur les ressources biogéochimiques de la planète, tant en termes de capacité de mobilisation de ressources par les êtres humains pour subvenir à leurs besoins qu'en termes de limitation de la perturbation des cycles.

À l'autre bout du spectre scalaire d'analyse, nous avons étudié le fonctionnement du corps humain et de ses cellules, caractérisé le besoin physiologique fondamental des êtres humains de s'alimenter et d'excréter et mis en exergue la chimioorganohétérotrophie et l'uréotélie des êtres humains. Nous avons caractérisé les différents régimes alimentaires possibles ainsi que les différentes excréctions du corps humain, principalement l'urine et les matières fécales.

Enfin, nous avons développé la notion de système alimentation/excrétion urbain et montré comment chaque ville constitue un territoire de rencontre biogéochimique entre l'échelle planétaire et celle des cellules du corps humain. Nous avons décrit le système alimentation/excrétion urbain par une succession de niveaux imbriqués qu'il mobilise et par les flux correspondants d'intrants et d'excrétats.

Nous plaçons notre travail dans le cadre d'une réflexion plus générale d'écologie territoriale appliquée à la ville et centrée sur la compréhension et l'analyse des flux de matière et d'énergie au sein d'une ville et entre cette ville et son environnement. Notre ambition ultime serait que cette analyse nous permette de caractériser la soutenabilité d'un système alimentation/excrétion urbain. C'est à la contribution à cette problématique que nous allons consacrer la deuxième partie de cette thèse. Nous concentrerons notre analyse à la partie urbaine de déroulement du système alimentation/excrétion<sup>83</sup>.

---

<sup>83</sup> On se référera utilement à la thèse de Julia Le Noë pour approfondir la partie agricole. Dans ses travaux, elle cherche à évaluer la soutenabilité de l'agriculture par l'analyse des cycles biogéochimiques couplés du carbone, de l'azote et du phosphore dans les agro-systèmes à l'échelle de l'exploitation et du territoire en France.