

Des cycles biogéochimiques de la planète Terre au métabolisme des êtres humains

La possibilité de la vie sur Terre est liée à d'innombrables contingences qui ont permis son apparition il y a plus de trois milliards d'années et sa continuation jusqu'à aujourd'hui. *A fortiori*, la vie humaine est le fruit de contingences supplémentaires qui invitent à l'émerveillement. Si celle-ci est appréhendée de façon très diverse par les différentes communautés humaines, comme peut en témoigner la variété des religions, des croyances et des cultures, la biogéochimie permet de l'analyser sur la base des mécanismes biologiques, géologiques, physiques et chimiques qui la sous-tendent et permet de préciser certaines conditions qui font que la vie est aujourd'hui possible. Nous proposons dans cette partie d'étudier cette contingence de la vie suivant trois échelles géographiques.

Dans le premier chapitre (chapitre 1.1), nous analyserons le cadre planétaire des cycles biogéochimiques qui permettent aujourd'hui de soutenir la vie des êtres humains. Nous analyserons en quoi ce cadre est actuellement modifié par l'action humaine et introduirons la notion de soutenabilité des modes de vie des différentes communautés humaines.

Dans le second chapitre (chapitre 1.2), nous analyserons comment fonctionne la vie humaine sous un angle biogéochimique, c'est-à-dire en étudiant plus en détail le métabolisme des êtres humains. Les caractéristiques du métabolisme humain constituent une donnée de base incontournable et permettent de définir un certain nombre de conditions *sine qua non* de vie de l'humanité.

Enfin, dans le troisième chapitre (chapitre 1.3), nous nous placerons à l'échelle des territoires, échelle intermédiaire entre celle, planétaire, des cycles biogéochimiques et celle, individuelle, du métabolisme des êtres humains. Le territoire, espace approprié et organisé par une société humaine, introduit alors de nouvelles dimensions d'appréhension des conditions de vie de l'humanité. Nous mobiliserons d'autres disciplines, en particulier la socio-écologie et l'écologie territoriale, pour définir un cadre d'analyse qui permette de confronter les enjeux purement biogéochimiques de la vie de l'humanité et les enjeux de l'organisation des sociétés humaines. Nous nous appuyerons sur un pilier fondamental de l'organisation de toute société humaine, le système alimentation/excrétion, et poserons les bases de sa description théorique et du cadre dans lequel nous procéderons à son analyse tout au long de cette thèse.

1.1. Les interactions de l'humanité avec les cycles biogéochimiques planétaires

Ce premier chapitre, principalement appuyé par une recherche bibliographique, permet de poser le cadre des enjeux planétaires dans lequel se situe la problématique de cette thèse. Nous présenterons ainsi dans une première section les principaux cycles biogéochimiques planétaires en interaction avec le vivant (section 1.1.1). Nous analyserons ensuite en quoi ces cycles sont aujourd'hui profondément modifiés par les activités de certaines communautés humaines (section 1.1.2), ce qui questionne fondamentalement la soutenabilité des modes de vie humains analysée à la section 1.1.3.

1.1.1. Cycles biogéochimiques planétaires

La vie sur Terre est soumise à de nombreuses contraintes physiques et biogéochimiques. Nous proposons d'en retenir deux principales⁵ :

- le besoin d'échanger de l'énergie avec son environnement. Une des plus importantes sources d'énergie disponible sur la planète Terre est celle du rayonnement solaire : à notre ère, les organismes photosynthétiques sont ainsi à la base de la mise à disposition de l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique disponible pour tous les êtres vivants ;
- le besoin d'échanger de la matière avec son environnement. La vie sur Terre s'est organisée autour de la combinaison de certains éléments chimiques qui participent à la structure des êtres vivants et conditionnent ainsi fondamentalement la possibilité même de la vie telle que nous la connaissons. À partir du moment où ces éléments chimiques sont impliqués dans un mécanisme physiologique, on peut considérer qu'ils sont tous d'égale importance car leur disponibilité pour la vie conditionne sa possibilité. Ces différents éléments, que nous nommerons par le terme général de nutriments, sont toutefois d'abondance variable sur la planète et la variabilité de leur

⁵ Nous brosons ici très rapidement les principes du métabolisme des êtres vivants que nous détaillerons plus finement dans le cas des êtres humains au chapitre suivant (chapitre 1.2).

disponibilité limitera donc plus ou moins fortement la possibilité de la vie. C'est ce point que nous choisissons de détailler plus finement dans la suite de ce chapitre⁶.

On constate une première différence fondamentale entre les éléments chimiques majoritaires qui structurent les êtres vivants et ceux qui structurent la planète Terre. Les quatre éléments qui constituent près de 95 % de la masse du manteau terrestre sont, par ordre massique, l'oxygène, le magnésium, le silicium et le fer (Valero Delgado, 2008). Dans la croûte terrestre et océanique, les sept premiers éléments, représentant plus de 97 % de la masse totale, sont dans l'ordre l'oxygène, le silicium, l'aluminium, le fer, le calcium, le magnésium et le sodium (*ibid.*). Seul l'oxygène est commun avec les constituants principaux des êtres vivants dont les quatre premiers constituants, à la base de la majorité des molécules organiques, sont l'oxygène, le carbone, l'hydrogène et l'azote (Fraústo da Silva & Williams, 2009). La structuration de la vie nécessite donc de mobiliser spécifiquement certains éléments chimiques, moins abondamment présents dans la lithosphère que dans la biosphère.

L'hydrosphère fournit bien sûr l'hydrogène et l'oxygène en abondance dans les molécules d'eau. Mais les quatre éléments suivants les plus abondants dans l'eau de mer sont le chlore, le sodium, le magnésium et le soufre (teneurs supérieures à 2 % en masse sur la matière sèche et représentant plus de 90 % de la masse totale – Valero Delgado, 2008). Finalement, seule l'atmosphère présente une teneur élevée en azote (78 %), mais celui-ci y est sous la forme très stable du diazote (N_2), au degré d'oxydation zéro, alors que l'azote qui constitue les êtres vivants est majoritairement réduit sous la forme du groupe amine $R-NH_2$. Sa disponibilité pour la vie dépend donc de la possibilité de réduire le diazote. De façon plus générale, on distingue usuellement le diazote atmosphérique (au degré d'oxydation zéro) et toutes les autres formes de l'azote, qualifiées de réactives, dans lequel l'azote est soit réduit (jusqu'au degré d'oxydation -3 par exemple dans le groupe amine $R-NH_2$), soit oxydé (jusqu'au degré d'oxydation +5 par exemple dans l'ion nitrate NO_3^-). Le deuxième constituant de l'atmosphère est l'oxygène sous forme de dioxygène (21 %), le troisième l'argon (1 %) et enfin le carbone, principalement sous la forme du dioxyde de carbone (CO_2) à une concentration très faible inférieure à 0,05 % (*ibid.*).

⁶ On notera également l'importance du second principe de la thermodynamique dans la vie. Étant donné que les organismes vivants sont caractérisés par un degré d'organisation élevé de leur structure, c'est-à-dire par une baisse de l'entropie de leurs molécules constitutives par rapport à l'état de ces molécules dans de la matière inerte, la vie ne peut exister qu'au détriment de l'augmentation de l'entropie de son environnement. Pour le dire autrement, il n'est pas possible de vivre sans dégrader son environnement.

Ainsi, pour leurs besoins énergétiques, les êtres vivants de la planète Terre disposent d'une source abondante sous la forme du rayonnement solaire incident. Leur composition chimique est en revanche assez différente des substrats sur lesquels ils vivent, en particulier pour les organismes terrestres.

Or la composition même des milieux dans lesquels évolue la vie sur Terre est dépendante de cette vie. Il est par exemple établi que l'atmosphère terrestre était très réductrice lors de l'apparition de la vie et que ce sont les organismes photosynthétiques oxygéniques qui ont progressivement fait monter la teneur en oxygène de l'atmosphère (Fennel *et al.*, 2005). Finalement, on constate que l'ensemble des êtres vivants évolue dans un milieu très particulier, à l'interface entre l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère. Les couches superficielles du sol en forêt par exemple, riches en matières organiques, témoignent d'une composition très différente de la composition minérale de la croûte terrestre sur laquelle s'est constituée la vie. La vie sur Terre est aujourd'hui indissociable du milieu dans lequel elle se déroule et les êtres vivants ne peuplent pas tant une planète minérale qui serait le support inerte de leur vie qu'un milieu très spécifique qui a co-évolué avec la vie sur Terre. Lovelock (1979) développe encore davantage ce constat en définissant la conjonction de ces milieux de vie comme formant eux-mêmes un grand organisme vivant qu'il nomme Gaïa et dont les modalités de fonctionnement et de régulation conditionnent fondamentalement les modalités de la vie humaine sur Terre. La communauté scientifique appelle aujourd'hui communément « Zone Critique » ce système de support de la vie.

L'approche biogéochimique que nous proposons de mettre en œuvre dans cette thèse est ainsi elle-même fondamentalement liée à ce fait que les cycles mis en jeu dans la présence de la vie sur Terre ne sont pas des cycles répondant purement à des lois de physique de milieux inertes mais répondent à une combinaison de facteurs biologiques, géologiques et chimiques qui président à la façon dont ceux-ci se déroulent.

Si l'on reprend les constituants les plus abondants de tout être vivant, ils correspondent ainsi à trois cycles biogéochimiques de la planète Terre qui se déroulent dans cette enveloppe superficielle de la planète qui abrite la biosphère :

- le cycle de l'eau. Ce cycle conditionne la possibilité de la vie sur la croûte terrestre, et donc la vie humaine, puisqu'il permet de mettre à disposition de l'eau en dehors des océans ;
- le cycle du carbone. Pour une majorité d'êtres vivants, ce cycle consiste en une réaction d'oxydo-réduction entre le carbone réduit de la matière organique (degré d'oxydation voisin de 0) et le carbone oxydé de l'atmosphère ou de l'hydrosphère, sous la forme du dioxyde de carbone ou des carbonates (degré d'oxydation +4). Le dioxygène atmosphérique est un réservoir important et largement disponible qui permet dans la majorité des cas de mettre en œuvre cette réaction d'oxydo-réduction :

réduction du carbone par les organismes autotrophes tels que la majorité des plantes terrestres, oxydation du carbone par les organismes hétérotrophes tels que les animaux (cf. détails et définitions sous-section 1.2.1.1) ;

- le cycle de l'azote. Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, l'abondance de l'azote sous forme de diazote atmosphérique n'est finalement pas le gage d'une possibilité de large utilisation par la vie car peu d'organismes sont capables de réaliser la fixation de l'azote atmosphérique sous forme réduite et cette fixation nécessite de fournir une grande quantité d'énergie. Seuls certains microorganismes sont capables de la réaliser, parfois en symbiose avec des plantes terrestres telles que les légumineuses (Fabacées⁷). Paradoxalement, cet élément est assez limitant pour le développement de la vie sur Terre et la majorité du cycle de l'azote des écosystèmes consiste en un recyclage de l'azote réduit entre les différents organismes qui les composent.

La sensibilité de la vie à ces trois grands cycles est donc variable. Pour l'eau, la disponibilité en eau d'un écosystème sera très dépendante des conditions locales et de la période considérée ; pour le carbone, le réservoir atmosphérique de carbone permet aux organismes photosynthétiques de faire entrer le carbone dans les différents écosystèmes sous forme réduite pour constituer de la matière organique ; enfin, pour l'azote, la possibilité de fixation de l'azote atmosphérique existe mais elle est finalement restreinte et ce cycle apparaît donc comme le plus limitant pour la vie dans les climats non arides comme l'est le climat tempéré en Europe.

Si l'on examine par exemple le cycle de l'azote dans une forêt tempérée, on constate que la fixation d'azote atmosphérique est un phénomène très minoritaire (5 %) au regard des flux d'échange d'azote réactif entre les différents organismes de cet écosystème, tel qu'illustré par la figure suivante (Figure 1.1).

⁷ Lecointre *et al.* (2016) indiquent qu'il s'agit même d'un caractère dérivé propre de tout le clade des Eufabidées II qui comprend également les Rosacées, les Cucurbitacées ou les Fagacées.

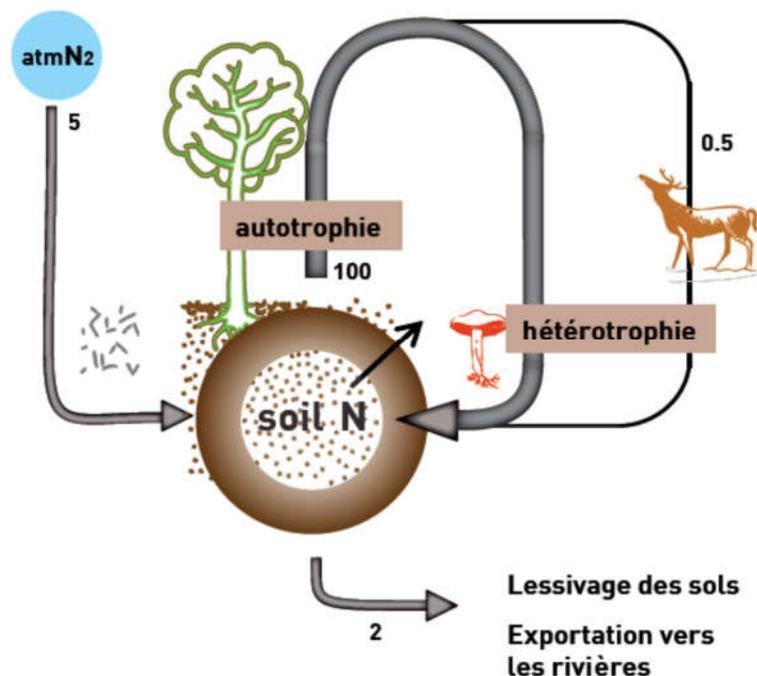


Figure 1.1 : Le cycle de l'azote dans une forêt tempérée.

Flux d'azote associés au métabolisme des principaux groupes fonctionnels, exprimés en kgN/ha/an.

Source : Billen *et al.*, 2011.

Le fonctionnement des écosystèmes terrestres – la même chose se vérifie dans les écosystèmes aquatiques – est finalement régi par une « rareté structurante de l'azote » (Billen *et al.*, 2011) et la possibilité de conservation de l'azote sous forme réactive dans les écosystèmes est une condition importante de leur pérennité⁸.

Au-delà de ces trois cycles principaux de l'eau, du carbone et de l'azote, l'importance relative des autres cycles biogéochimiques est délicate à définir. Certains paraissent toutefois plus critiques que d'autres.

Ainsi, le phosphore et le soufre sont usuellement mis en exergue car ils sont constitutifs d'éléments structurels des cellules : le phosphore est un élément constitutif de l'ADN, des phospholipides membranaires ou encore du vecteur énergétique cellulaire qu'est l'ATP ; le soufre est présent dans deux acides aminés protéinogènes, la cystéine et la méthionine. Dans les conditions standard, le phosphore n'a pas de phase gazeuse et il est présent dans la matière organique uniquement sous forme

⁸ Cet état actuel du fonctionnement de la planète Terre n'était pas vrai lors de l'apparition de la vie sur Terre où les conditions réduites du milieu favorisaient la présence et le maintien de l'azote sous forme réduite, sans passage par des niveaux moins réduits comme le diazote ou les formes oxydées de l'azote, aujourd'hui favorisées par les conditions oxydantes de l'atmosphère (*ibid.*).

oxydée ce qui fait que son cycle biogéochimique est moins complexe que celui de l'eau, du carbone et de l'azote. Il consiste principalement en des conversions entre orthophosphates et esters phosphoriques. Le cycle biogéochimique du soufre montre une certaine similitude avec celui de l'azote puisque le soufre présente aussi des phases gazeuses (H_2S ou SO_2), un degré d'oxydation réduit dans la matière organique (degré -2 dans le groupe sulfhydryle R-SH) mais possiblement oxydé jusqu'au degré +6 sous la forme minérale de l'ion sulfate (SO_4^{2-}).

Le phosphore semble particulièrement critique pour la vie du fait de sa plus faible concentration que le soufre dans la lithosphère et dans l'hydrosphère. Par exemple, d'après les données de concentrations moyennes compilées par Valero Delgado (2008), le ratio molaire S/P est proche de 200 dans l'eau douce et proche de 15 000 dans l'eau de mer⁹. Les deux facteurs limitants de la croissance algale dans les milieux aquatiques sont ainsi l'azote et le phosphore (cf. ratio de Redfield¹⁰).

En dehors des milieux aquatiques, le potassium peut également apparaître comme un élément limitant. En agronomie, les trois principaux nutriments essentiels à la croissance végétale sont ainsi l'azote, le phosphore et le potassium ; le soufre n'apparaît que comme un macronutriment secondaire avec le calcium et le magnésium (IFA *et al.*, 2016). Nous avons vu que le calcium et le magnésium sont des éléments relativement abondants de la croûte terrestre et océanique ce qui devrait induire *a priori* une criticité moins forte en tant que facteur limitant de la vie par rapport à l'azote ou au phosphore. En milieu terrestre, ces raisonnements globaux sont toutefois limités dans leur pertinence par deux facteurs au moins :

- la variabilité de la nature des roches selon les lieux considérés ;
- l'interaction entre les êtres vivants et leur milieu de vie, en l'occurrence le sol, qui fait que la composition même des sols est fonction de cette interaction, à court terme par les processus de minéralisation et d'organisation, ou à long terme par exemple par les processus de sédimentation ou de fossilisation.

Enfin, comme nous l'indiquions précédemment, tous les autres nutriments peuvent présenter une certaine criticité en fonction de leur disponibilité locale et leur importance sera variable en fonction de

⁹ Valero Delgado (2008) donne 900 mgS-SO₄²⁻/L contre 62 µgP/L dans l'eau de mer et 3,7 mgS/L contre 20 µgP/L dans l'eau douce.

¹⁰ On pourra consulter la référence classique Redfield, A.C., Ketchum, B.H., Richards, F.A., 1963. *The influence of organisms on the composition of sea-water*. In: Hill, M.N. (Ed.), *The Sea*. John Wiley & Sons, New York, p. 12–37. Dans le cas des diatomées, dont le silicium est un élément constitutif essentiel, on notera l'importance de la présence de cet élément en tant que facteur limitant de croissance algale.

l'être vivant considéré. Outre les éléments déjà cités (éléments fondamentaux : hydrogène, oxygène, carbone et azote ; macronutriments : phosphore, potassium, soufre, calcium et magnésium), on notera l'importance du chlore et du sodium pour les êtres humains (Fraústo da Silva & Williams, 2009)¹¹. Nous les nommerons également macronutriments. Les autres nutriments seront nommés micronutriments : ce sont principalement le fer, le manganèse, le cobalt, le zinc, le molybdène, le sélénium, le bore, le cuivre et le nickel (Fraústo da Silva & Williams, 2009 ; IFA *et al.*, 2016)¹².

Tous les autres éléments ne sont donc pas considérés comme nécessaires à la vie mais la plupart peuvent interagir avec les êtres vivants et présenter en particulier une certaine toxicité en concentration élevée (mercure, plomb, uranium, etc.).

En conclusion, nous retiendrons que l'organisation des cycles biogéochimiques planétaires est intimement liée à la co-évolution des organismes vivants sur la planète Terre et à la composition des compartiments environnementaux dans lesquels ils évoluent (atmosphère, hydrosphère, lithosphère/sol). Les principaux éléments nécessaires à la vie ne correspondent pas aux minéraux les plus abondants dans la croûte terrestre : la biosphère fonctionne donc « en boucle » et le recyclage des éléments de la vie entre les différents compartiments environnementaux est un mécanisme fondamental de régulation de la vie sur Terre.

1.1.2. Anthropocène

Comme tous les êtres vivants, les êtres humains font partie de la biosphère planétaire et la possibilité de leur vie sur Terre est donc intimement liée aux régulations des cycles biogéochimiques (section 1.1.1). Si l'activité biologique influence par essence les cycles biogéochimiques et donc la forme sous laquelle les éléments chimiques sont disponibles à la surface terrestre, l'action de certaines communautés humaines, en particulier depuis les révolutions industrielles, modifie substantiellement le fonctionnement de ces cycles. Ainsi, pour l'azote, la disponibilité d'énergie abondante issue de l'exploitation des hydrocarbures fossiles, combinée à la mise au point du procédé Haber-Bosch au début du XX^e siècle, a permis d'introduire de l'azote réactif dans l'environnement autrement que par la culture de plantes symbiotiques de microorganismes fixateurs d'azote (Erisman *et al.*, 2008).

¹¹ Le sodium semble moins important pour les plantes que pour les animaux.

¹² D'autres éléments jouent aussi un rôle dans le métabolisme de certains organismes vivants. Fraústo da Silva & Williams (2009) listent le silicium (déjà mentionné pour les diatomées), l'iode, le fluor, l'arsenic et le vanadium. Le cadmium, le strontium et le baryum seraient utilisés par une ou deux espèces seulement. Le brome, le chrome, le tungstène et l'étain sont également mentionnés comme potentiellement impliqués.

Dès 1924, Lotka (1924) voit dans ce procédé une véritable révolution biogéochimique : « Ce développement extraordinaire est bien davantage que le départ d'une nouvelle industrie. Il ne représente rien moins que le début d'une nouvelle ère ethnologique dans l'histoire de l'humanité, une nouvelle époque cosmique. Dans le court laps de temps d'une douzaine d'années (un bref instant en termes géologiques), l'homme a initié des transformations comparables en importance aux processus cosmiques. » (traduction de Billen *et al.*, 2011).

En effet, comme nous l'avons vu, l'azote est un des principaux facteurs limitants de la vie sur Terre, et en particulier de la croissance des plantes. Sa mise à disposition massive a permis d'augmenter simultanément la production agricole et la population humaine. Ce fait est illustré par exemple par Erisman *et al.* (2008) dont nous reproduisons un graphique (Figure 1.2).

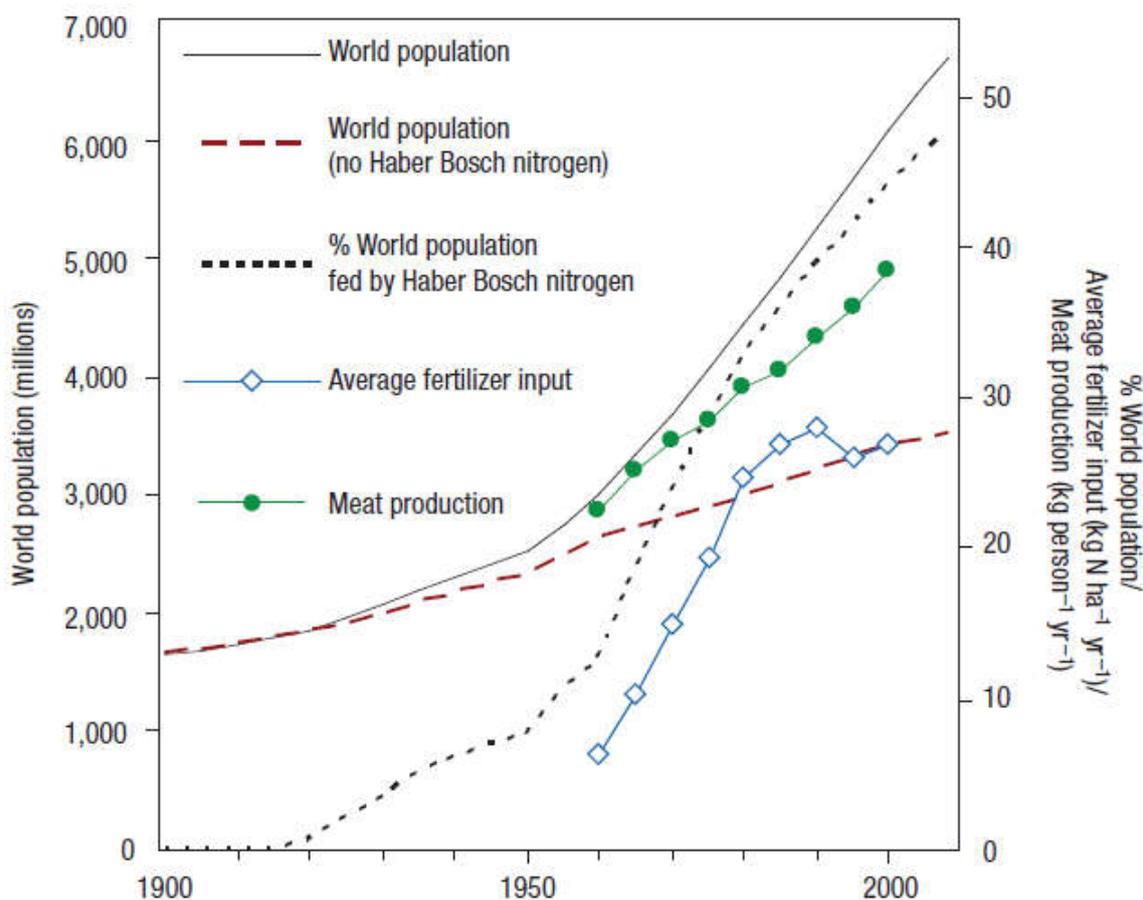


Figure 1.2 : Évolutions comparées durant le XX^e siècle de la population humaine mondiale et de l'utilisation de l'azote.

Source : Erisman *et al.* (2008).

On voit que la « nouvelle époque cosmique » est encore très peu amorcée en 1924 mais elle est très rapidement advenue : la population humaine et la production d'engrais azotés décollent parallèlement à

partir de 1960 et la quantité totale d'azote réactif d'origine anthropique dépasse la production naturelle dès le milieu des années soixante-dix (Erisman & Larsen, 2013). Cette modification majeure du cycle biogéochimique de l'azote se double d'une modification majeure de celui du carbone par la combustion des hydrocarbures fossiles qui entraîne une augmentation progressive de la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique (Figure 1.3 – IPCC, 2007).

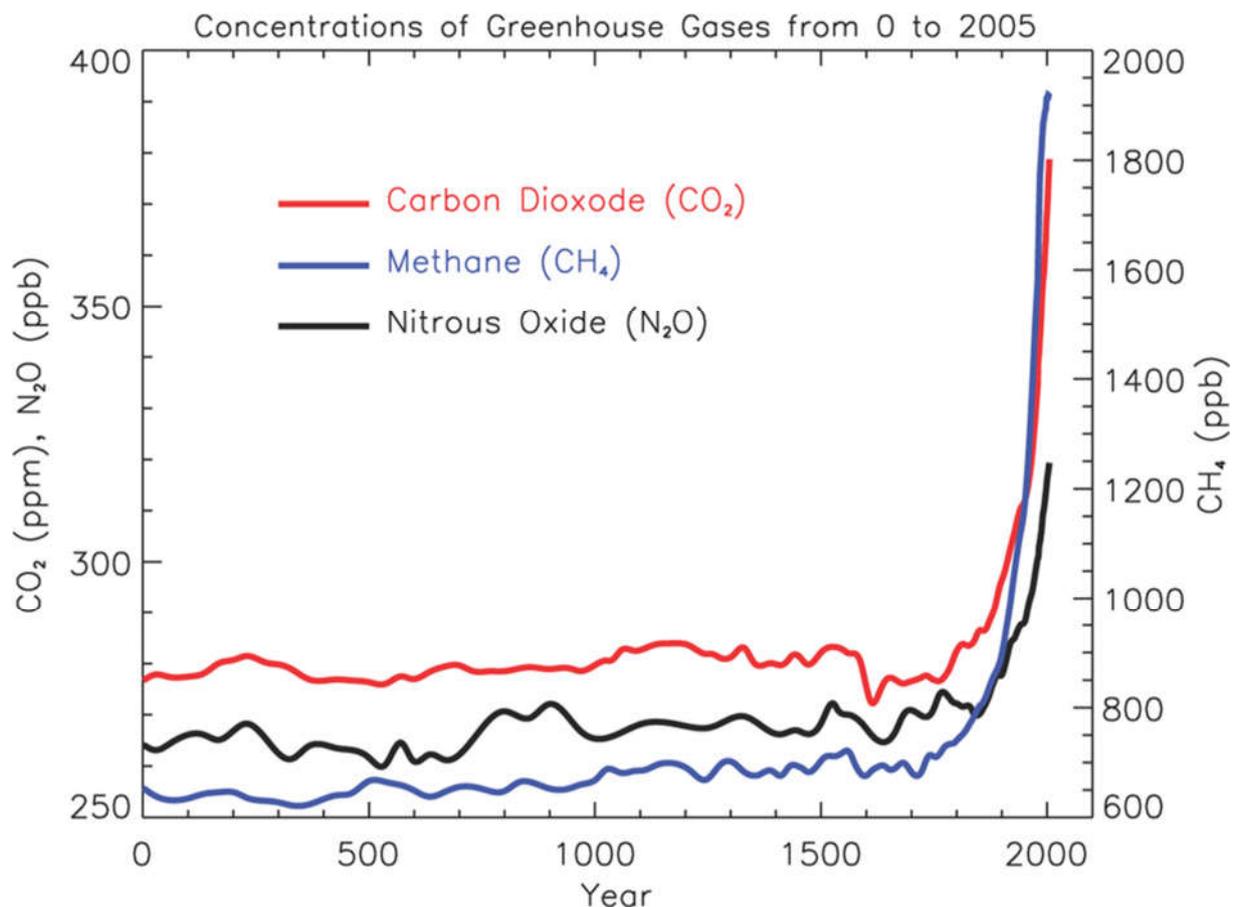


Figure 1.3 : Concentration atmosphérique des trois principaux gaz à effet entre l'an 0 et l'an 2005.

Source : IPCC (2007).

Les concentrations en méthane (CH₄) augmentent aussi considérablement, de même que les concentrations en oxyde nitreux (N₂O). Le cycle biogéochimique du phosphore est également intensément modifié par l'exploitation de gisements fossiles de phosphore qui introduisent autant de phosphore dans l'environnement (Figure 1.4 – Cordell, 2010).

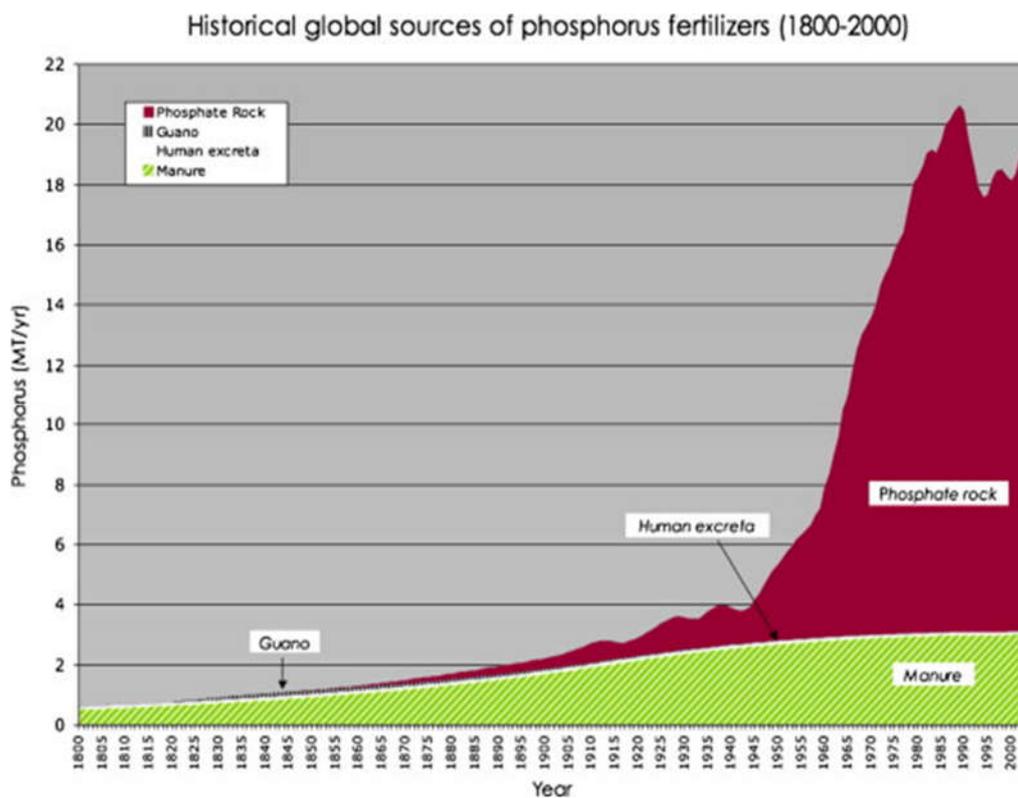


Figure 1.4 : Sources historiques mondiales de fertilisants phosphorés (1800-2000).

Source : Cordell (2010).

Finalement, il apparaît que l'activité de certaines communautés humaines a bouleversé les trois grands cycles biogéochimiques depuis les révolutions industrielles. Crutzen (2002) propose ainsi de considérer l'entrée de l'humanité dans une nouvelle ère géologique et de la nommer Anthropocène. Actuellement toujours en débat, entre autres au sein de la communauté des géologues, cette dénomination permet de traduire efficacement cette intensité de l'action de l'humanité sur son environnement. Elle est plus particulièrement marquée, depuis les années cinquante, par ce que Steffen *et al.* (2007) nomment « la Grande Accélération », à savoir l'augmentation soudaine et très forte de la quasi-totalité des indicateurs de l'activité humaine (Figure 1.5).

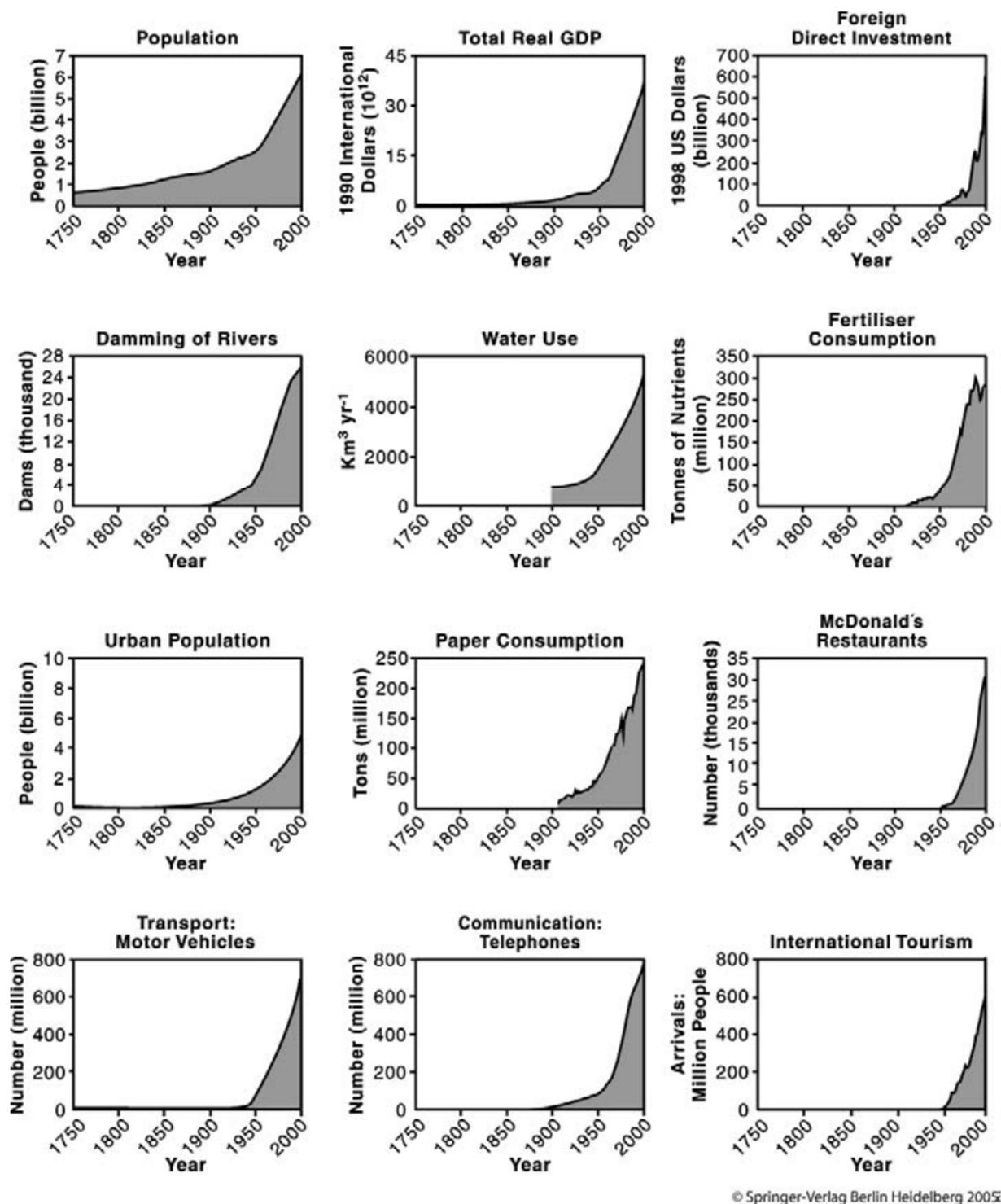


Figure 1.5 : La Grande Accélération.

Elle est ici illustrée par douze indicateurs de l'activité humaine estimés entre 1750 et 2000.

Source : Steffen *et al.* (2007).

Ainsi les caractéristiques biogéochimiques de l'Anthropocène entraînent, du fait des activités humaines, une évolution importante par rapport à celles qui ont prévalu durant l'Holocène et qui ont permis le récent développement de l'humanité. De nombreux auteurs s'inquiètent que les modifications biogéochimiques de l'Anthropocène, engendrées par certaines communautés humaines,

soient néfastes pour l'humanité toute entière et puissent remettre en cause ses conditions de vie. Si le changement climatique lié à l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre est probablement la préoccupation environnementale qui entraîne actuellement une des plus fortes mobilisations mondiales, Rockström *et al.* (2009) puis Steffen *et al.* (2015) ont tenté une analyse systématique de cette mise en danger des conditions de vie de l'humanité par les modifications globales de l'Anthropocène. Pour ce faire, ils ont développé le concept de « limites planétaires » : ils ont cherché à caractériser le fonctionnement de la planète Terre suivant quelques grands indicateurs environnementaux majeurs et ont cherché à quantifier, d'une part la valeur actuelle de cet indicateur, d'autre part la limite de valeur de cet indicateur au-delà de laquelle il est plausible que les conditions de vie de l'humanité risquent d'être remises en cause par des modifications environnementales abruptes et non linéaires à l'échelle continentale ou planétaire. Dans leurs derniers travaux, neuf indicateurs ont été identifiés et sept d'entre eux ont pu faire l'objet d'une quantification au moins partielle de la valeur actuelle de l'indicateur et de ses seuils critiques (Figure 1.6).

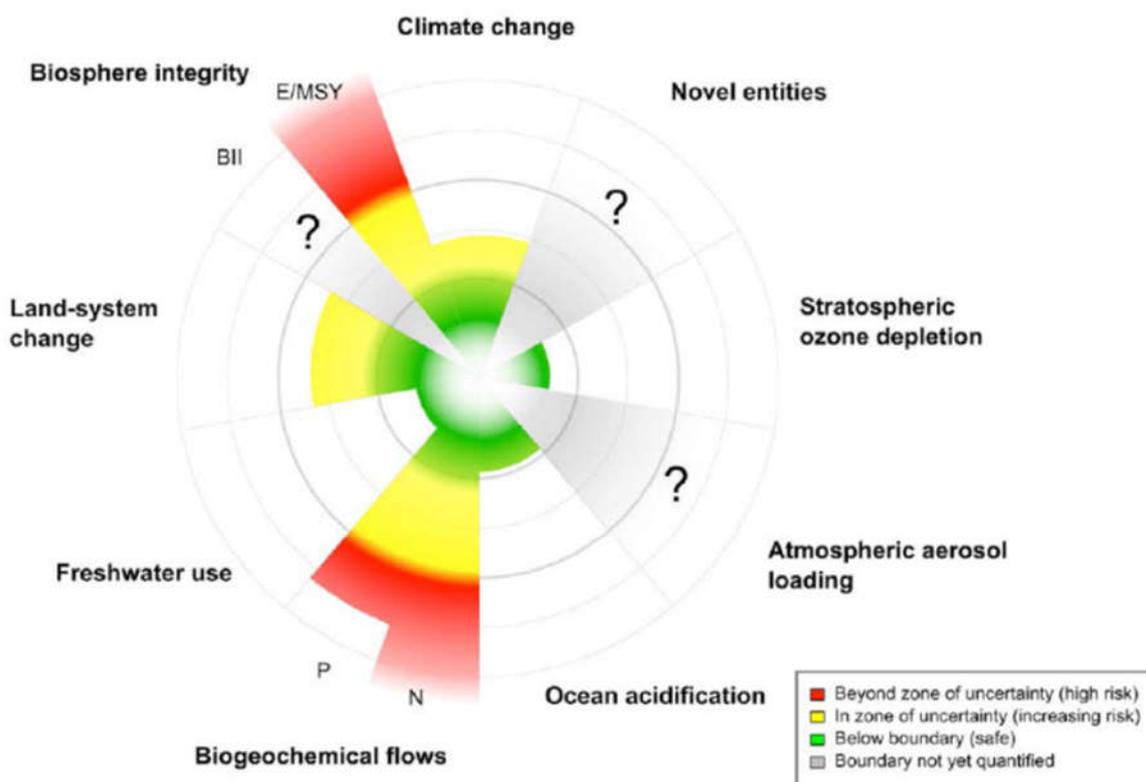


Figure 1.6 : Statut actuel des variables de contrôle de sept des neuf limites planétaires.

Source : Steffen *et al.* (2015).

Ces auteurs estiment ainsi que quatre variables de contrôle du fonctionnement du système Terre ont dépassé les limites planétaires et mettent en péril les conditions de vie de l'humanité toute entière. Il s'agit de :

- l'intégrité de la biosphère, évaluée par le taux d'extinction des espèces vivantes ;

- les flux biogéochimiques, évalués par la quantité de fixation d'azote atmosphérique d'origine anthropique (industrielle ou biologique intentionnelle) et par les flux de phosphore provenant des eaux douces et rejoignant les océans ;
- le changement d'usage des sols, évalué par la proportion de surfaces couvertes par de la forêt au regard de la couverture forestière originelle ;
- le changement climatique, évalué par la concentration atmosphérique en CO₂ et le déséquilibre énergétique au sommet de l'atmosphère.

L'introduction de cette analyse de l'impact des activités humaines à l'échelle planétaire modifie radicalement l'appréhension des problèmes environnementaux causés par l'activité humaine. Le second principe de la thermodynamique entraîne nécessairement que l'existence de l'humanité a un impact sur son environnement (cf. section 1.1.1). Toutefois, l'ampleur de cet impact est aujourd'hui évalué comme étant tellement grand qu'il a des conséquences qui ne sont pas seulement locales mais mondiales et qui sont de nature à remettre fondamentalement en cause les conditions de la vie humaine et non humaine sur Terre.

Les quatre limites planétaires précédemment mentionnées sont bien entendu toutes interdépendantes. L'appréhension des problèmes qu'elles peuvent poser nécessite d'en conserver une vision globale. Dans cette thèse, nous choisissons de nous concentrer principalement sur les cycles biogéochimiques qui constituent le cœur de notre réflexion et dont nous verrons, dans cette partie et dans la suivante, en quoi ils sont fondamentalement liés à notre problématique.

Si l'on analyse donc plus spécifiquement le cas de l'azote, on constate que l'introduction massive d'azote réactif dans l'environnement a entraîné une ouverture générale de ce cycle. Or la grande mobilité de l'azote et ses nombreux changements d'état possibles induisent que cette ouverture provoque une « cascade biogéochimique » (Billen *et al.*, 2011) : une fois introduit quelque part par l'action humaine, l'azote réactif va pouvoir se retrouver dans de nombreux compartiments environnementaux différents et sous diverses formes : gazeuses, dissoutes dans l'eau, constituant de matière organique, etc. Cela induit une cascade d'impacts environnementaux résumée par Sutton *et al.* (2011) et le réseau européen NinE (Nitrogen in Europe) par un acronyme de neuf lettres résumant les neuf impacts de l'introduction d'azote réactif dans l'environnement : ACT AS GrOUP. On pourra se référer à cet ouvrage pour une vision détaillée des impacts environnementaux liés à l'introduction d'azote réactif dans l'environnement dont nous ne présentons ici que l'illustration de l'acronyme ACT AS GrOUP sur la figure suivante (Figure 1.7).

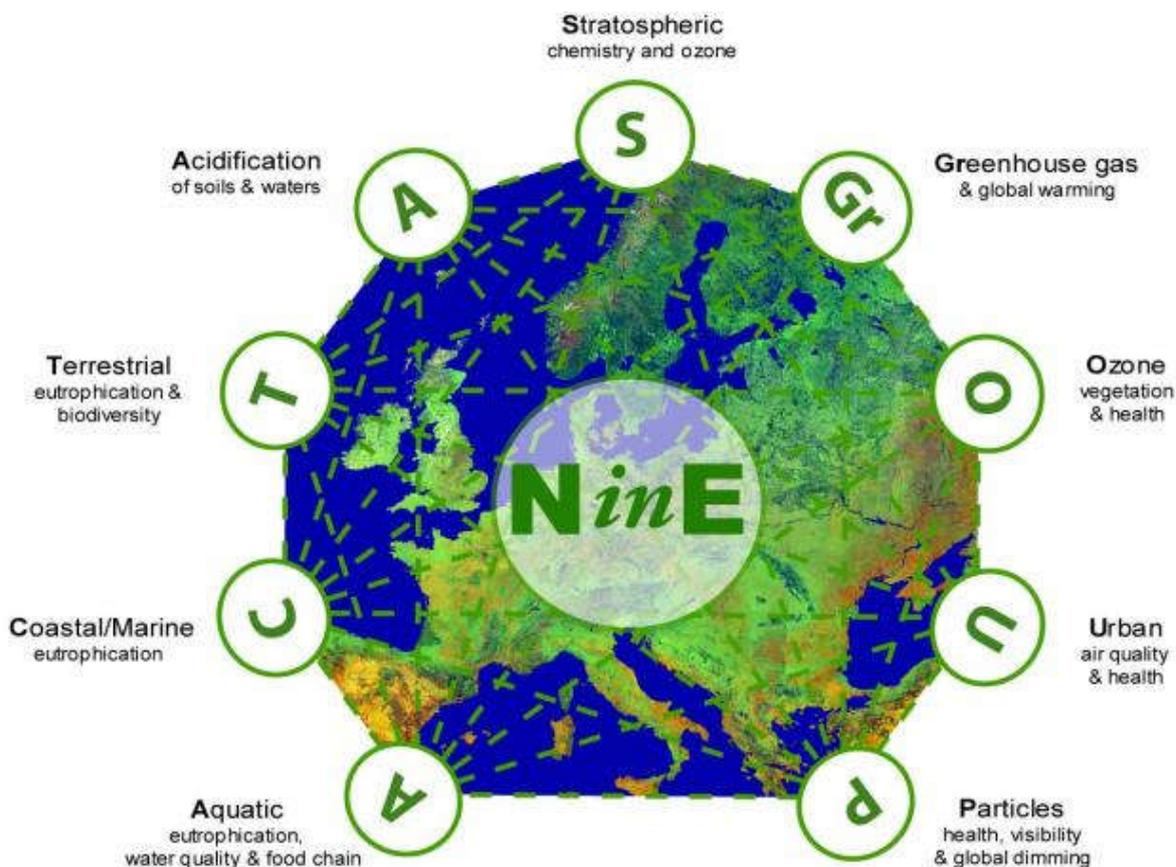


Figure 1.7 : Acronyme ACT AS GrOUP des neuf altérations environnementales majeures résultant de l'introduction massive d'azote réactif dans l'environnement.

Source : Réseau NinE - www.nine-esf.org (dernière consultation le 18 janvier 2018).

Ces neuf altérations illustrent bien l'interdépendance des limites planétaires entre elles puisque l'introduction d'azote réactif dans l'environnement, qui traduit d'ailleurs souvent en lui-même un changement d'usage des sols vers l'agriculture, va participer également à l'érosion de la biodiversité (eutrophisation) et au changement climatique (émission de N_2O).

Ainsi, on ne peut plus considérer l'introduction d'azote réactif uniquement par ses effets locaux, tel qu'on peut par exemple le constater par l'eutrophisation d'une rivière recevant une pollution locale sous forme d'azote réactif. L'introduction d'azote réactif dans l'environnement constitue nécessairement une pollution que nous nommerons globale. Quelles que soient ses conséquences locales, elle participera à la perturbation régionale ou mondiale en cascade de son cycle biogéochimique qui est désormais à même de remettre en cause les conditions de la vie humaine et non humaine. On nommera « pollution locale » le fait que l'introduction d'un élément dans l'environnement induise des modifications substantielles de l'environnement au niveau local. Pour l'azote réactif, toute introduction dans l'environnement constitue donc une pollution globale mais le caractère local de la pollution devra être apprécié au cas par cas selon l'environnement dans lequel cette introduction se déroule.

Quatre cycles biogéochimiques sont mis en avant par Rockström *et al.* (2009) : l'eau, le carbone, l'azote et le phosphore. Pour les autres éléments chimiques que nous avons mentionnés, ils ne sont pas présentés comme indicateurs d'une perturbation majeure du système Terre même si Steffen *et al.* (2015) indiquent que des développements ultérieurs feront probablement intervenir également d'autres éléments. La perturbation du cycle du soufre, liée à la combustion d'hydrocarbures fossiles non raffinés, a été à l'origine d'une pollution intense par le passé. Le raffinage des hydrocarbures fossiles induit aujourd'hui que du soufre fossile est extrait en grandes quantités de la lithosphère mais les modalités actuelles de sa gestion n'entraînent pas, selon ces auteurs, de perturbation majeure globale. Les autres macronutriments (potassium, calcium, magnésium, chlore et sodium) et les micronutriments voient également leurs cycles biogéochimiques modifiés (dissolution du calcaire par acidification par exemple) mais ils ne sont pas tous identifiés comme variables de contrôle globales du système Terre, en particulier du fait que nombre d'entre eux ne constituent pas des facteurs de pollution environnementale globale au même titre que l'azote et le phosphore (potassium, sodium, etc.). Certains éléments, par exemple les éléments traces métalliques, sont en revanche bien identifiés dans la variable de contrôle « nouvelles entités » mais celle-ci n'est pour l'instant pas quantifiée. Nous avons déjà subdivisé en deux catégories les éléments chimiques à la section précédente (section 1.1.1) :

- ceux qui sont nécessaires à la vie par leur rôle de micronutriment. La modification de leur cycle biogéochimique s'apparente alors à celle du cycle de l'azote ou du phosphore au sens où c'est leur mise en circulation en excès qui peut être dommageable alors que leur présence en quantités modérées est nécessaire ;
- ceux qui ne sont pas nécessaires à la vie. Leur mise en circulation dans l'environnement constituera nécessairement une pollution mais dont l'importance est à quantifier au cas par cas, en fonction en particulier du fond biogéochimique local.

De très nombreuses autres molécules, souvent de synthèse, mises en circulation par certaines communautés humaines, constituent aussi une préoccupation environnementale forte de l'Anthropocène, largement étudiée au niveau local et au niveau global mais pour l'instant non quantifiée par Steffen *et al.* (2015) au sein de la variable de contrôle « entités nouvelles » du fait des difficultés méthodologiques de cette intégration.

Tous ces éléments qui participent de cycles biogéochimiques peuvent être appréhendés de deux manières vis-à-vis des communautés humaines :

- d'un côté ils constituent une ressource au sens où leur mise à disposition est perçue comme utile par une communauté vis-à-vis de certains objectifs (augmentation du rendement agricole pour l'azote, matériau de construction pour le plomb, etc.). Leur présence dans l'environnement est plus ou moins diffuse et ils sont plus ou moins

facilement accessibles : caractère extrêmement diffus de l'azote dans l'atmosphère mais nécessitant un apport d'énergie pour convertir le diazote sous forme réactive, caractère plus concentré des minerais dans certains gisements mais qui nécessitent également un apport d'énergie pour les concentrer davantage pour leur usage futur ;

- d'un autre côté, ils peuvent constituer une mise en péril des conditions de vie, de cette même communauté ou d'une autre communauté humaine, par leur mise en circulation dans l'environnement. La plupart du temps, leur mise en circulation leur confèrera alors à nouveau un caractère diffus les rendant difficilement accessibles pour les communautés humaines mais participant d'une pollution globale de l'environnement.

En reprenant l'illustration du cycle de l'azote forestier de la Figure 1.1, on peut finalement l'appliquer aussi aux communautés humaines. Si l'on nomme anthroposphère l'environnement qui constitue le milieu de vie modifié par les communautés humaines pour leurs besoins (Baccini & Brunner, 2012), on constate que l'enjeu de la mise en circulation des éléments dans l'anthroposphère s'apparente finalement à celui de l'azote dans un écosystème forestier. La fermeture des cycles de l'anthroposphère permet à la fois de conserver des ressources jugées comme utiles pour les communautés humaines et de limiter leur mise en circulation en dehors de l'anthroposphère, ce qui peut mettre en péril les conditions de vie de cette même communauté humaine ou d'une autre.

L'Anthropocène est actuellement caractérisée, *a contrario*, par une ouverture extrême des cycles de l'anthroposphère qui traduit donc un double péril de perte de ressource et de pollution. Pour au moins trois éléments, à savoir le carbone, l'azote et le phosphore, les répercussions de cette ouverture des cycles de l'anthroposphère constituent une menace pour l'humanité, suivant l'approche développée par Rockström *et al.* (2009). Le maintien de conditions environnementales qui puissent permettre à l'humanité de vivre et de se développer dans des conditions décentes pour tous nécessite donc une modification, potentiellement radicale, du fonctionnement des communautés humaines à l'origine de cette ouverture des cycles biogéochimiques et plus généralement des dépassements des variables de contrôle des limites planétaires. Ce point fait l'objet de la section suivante (section 1.1.3).

1.1.3. Soutenabilité des modes de vie

Des modifications du fonctionnement des communautés humaines ont été proposées de longue date et peuvent concerner toutes les différentes facettes de leur organisation : sociale, politique, économique, institutionnelle, etc. Depuis la seconde guerre mondiale et l'entrée de l'humanité dans l'époque de la Grande Accélération de l'Anthropocène, un certain nombre de remises en cause ont plus particulièrement concerné les modalités du développement des pays.

En 1972 se tient ainsi le premier sommet de la Terre à Stockholm. La même année, le rapport Meadows intitulé « Les limites de la croissance »¹³ montre que le prolongement tendanciel d'un modèle de fonctionnement de l'anthroposphère basé sur le couplage entre le système population, le système agro-alimentaire, le système industriel, les ressources non renouvelables et la pollution environnementale n'est pas soutenable¹⁴, c'est-à-dire que les grandes variables de fonctionnement de l'anthroposphère ne peuvent continuer à suivre toutes, parallèlement et pour toute l'humanité, une croissance continue, du fait du caractère fini de la planète sur laquelle vit l'humanité (Meadows *et al.*, 1972).

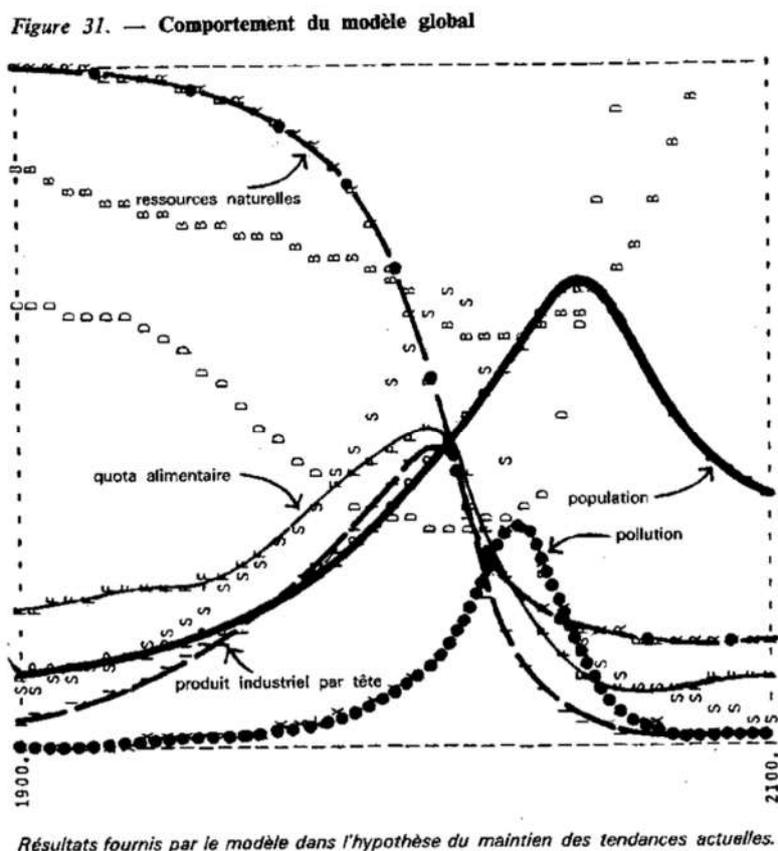


Figure 1.8 : Modèle global tendanciel du rapport Meadows.

Source : Meadows *et al.* (1972). Version française aux éditions Fayard (1972).

À la fin des années quatre-vingts, la notion de développement durable ou soutenable (*sustainable development*) est introduite par le rapport *Notre avenir à tous* sous l'égide de l'Organisation des Nations Unies (WCED, 1987) et précisé en 1992 au sommet de la Terre de Rio. La nécessité de

¹³ Le titre original est « The limits to growth ». Nous proposons ici une traduction différente de la traduction usuelle « Halte à la croissance ».

¹⁴ « *sustainable* » dans le texte.

modifier les caractéristiques du fonctionnement de l'anthroposphère est mise en avant, afin de « satisfaire les besoins fondamentaux de tous », « étendre à tous l'opportunité de réaliser leurs aspirations pour une vie meilleure » et « satisfaire les besoins [des générations] actuelles sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire leurs propres besoins »¹⁵.

Ce constat s'accompagne de nombreuses analyses des conséquences du mode de développement de l'humanité et donne lieu à une abondante littérature. Nous proposons ici de nous concentrer sur quelques points marquants qui nous paraissent pertinents dans le cadre de notre problématique :

- la dépendance de l'humanité à son environnement pour vivre induit la nécessité de prendre en compte les facteurs environnementaux pour assurer sa subsistance (Diamond, 2005) ;
- le caractère fini de la planète Terre induit nécessairement que les variables de contrôle de l'activité matérielle de l'humanité ne peuvent croître indéfiniment ;
- les modes de vie de certaines communautés humaines peuvent être préjudiciables à elles-mêmes (cf. section 1.1.2) mais également à d'autres communautés humaines (actuelles ou futures) ce qui introduit un enjeu différencié de responsabilité des différentes communautés humaines vis-à-vis des conséquences de leur mode de vie ;
- ce n'est pas tant la survie de l'humanité qui est en question que les conditions dans lesquelles peuvent vivre les différentes communautés humaines.

Le constat scientifique que nous présentions à la section 1.1.2 de risque de changement des conditions du fonctionnement planétaire peut donc être appréhendé de façon très différente par les différentes communautés humaines selon entre autres :

- leur connaissance des enjeux que nous avons mentionnés jusqu'ici ;
- leur appréhension du risque de changement des conditions du fonctionnement planétaire ;
- leur souci ou non pour le maintien d'un fonctionnement planétaire dans des conditions similaires à celles qui ont permis jusqu'alors le développement de l'humanité ;
- leur appréhension de leur responsabilité vis-à-vis des autres communautés humaines.

¹⁵ « meeting the basic needs of all », « extending to all the opportunity to fulfil their aspirations for a better life » et « meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs » (traduction personnelle de WCED, 1987).

Nous ne débattons pas ici des différents positionnements qu'il est possible d'avoir vis-à-vis de cette problématique mais chercherons plutôt à préciser le cadre dans lequel nous choisissons de nous placer dans la suite de cette thèse. Nous nous intéresserons ainsi à des modalités de fonctionnement de l'anthroposphère pour lesquelles :

- les variables de contrôle présentées par Rockström *et al.* (2009) se situent en-dessous des limites planétaires ;
- les modes de vie de chacun sont potentiellement extensibles à toute l'humanité sur plusieurs générations, sans préjudice du point précédent.

Nous proposons de nommer « soutenables » les modes de vie qui respectent ces deux conditions. Par application de ces critères, nous considérerons donc que le mode de vie actuel dominant des pays dits développés n'est pas soutenable et doit donc être modifié pour le devenir.

En conclusion, nous avons ainsi montré en quoi la vie sur Terre, et la vie humaine en particulier, est intimement liée aux modalités de fonctionnement de la mince couche planétaire dans laquelle elle se déroule. La soutenabilité des modes de vie humains est donc fondamentalement liée aux relations que les êtres humains peuvent entretenir avec la biosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et l'atmosphère. Comme l'écrit Hache (2011) : « Gaïa nous fait réexpérimenter la contingence de notre existence, mais au lieu de nous inviter à en tirer motif à autocélébration – en nous considérant comme une « chance » accordée à une nature inanimée –, elle nous incite à célébrer ce hasard qui nous a fait exister et à l'honorer en prenant soin de cette vie et de toutes celles qui nous ont permis – et nous permettent encore – d'exister ».

1.2. Le métabolisme des êtres humains

Dans ce chapitre, nous étudions le fonctionnement biogéochimique des êtres humains afin d'examiner plus en détails ses interactions avec les grands cycles biogéochimiques planétaires et les possibilités de sa soutenabilité. Ce chapitre est subdivisé en trois sections. Dans la première section, nous présenterons de façon générale les flux de matière et d'énergie mis en œuvre par les êtres humains pour assurer leur métabolisme (section 1.2.1). Nous nous appuyerons sur une recherche bibliographique et présenterons aussi quelques résultats issus de la synthèse des données compilées. Dans la deuxième et la troisième section, nous présenterons plus en détail les modalités de l'alimentation et de l'excrétion humaine, principalement sur la base de recherches bibliographiques (sections 1.2.2 et 1.2.3).

1.2.1. Flux fondamentaux d'énergie et de matière

1.2.1.1. Éléments principaux soutenant le métabolisme humain

Caractéristiques générales du métabolisme

Les êtres vivants sont caractérisés par le fait de puiser dans leur environnement de l'énergie et de la matière, de la transformer et de la rejeter après transformation. Cette interaction permet de soutenir l'ensemble des réactions chimiques, nommé métabolisme, qui se déroule en leur sein. Elle leur permet de se maintenir en vie, de se développer, de se reproduire, etc. On peut distinguer trois fonctions essentielles de soutien du métabolisme :

- l'approvisionnement en éléments structurels qui vont permettre la constitution de l'organisme, dite biosynthèse ;
- l'approvisionnement en ressources énergétiques, qui vont permettre de soutenir thermodynamiquement cette biosynthèse et le maintien des structures ;
- l'excrétion des résidus issus des deux fonctions précédentes.

S'il est souvent réduit à ces deux premières fonctions, nous choisissons volontairement de considérer également l'excrétion comme élément fondamental du métabolisme car la vie est caractérisée par un échange de matières et d'énergie avec son environnement et non par un simple prélèvement à sens unique. En tant qu'êtres vivants, les êtres humains sont donc soumis à la nécessité d'assurer ces trois fonctions. Elles conditionnent ainsi fondamentalement l'interaction des êtres humains avec leur environnement. La comparaison du fonctionnement du métabolisme humain avec les autres métabolismes connus sur Terre permet de mieux cerner les besoins physiologiques qui en découlent.

Chimioorganohétérotrophie des êtres humains

Les voies chimiques du métabolisme des différents organismes vivants sont très variées. On se fonde usuellement sur trois critères pour distinguer l'approvisionnement en matière et en énergie qui définissent autant de types trophiques :

- la source d'énergie utilisée. On distingue ainsi les phototrophes, qui peuvent convertir l'énergie du soleil en énergie chimique, et les chimiotrophes, qui tirent leur énergie d'un substrat moléculaire chimique. Les phototrophes les plus connus sont les plantes terrestres qui peuvent presque toutes¹⁶ absorber l'énergie solaire par la photosynthèse au moyen de la chlorophylle. Les êtres humains n'ont pas cette capacité et dépendent donc d'un substrat chimique pour leur approvisionnement énergétique ;
- le type de substrat utilisé pour cette fourniture d'énergie. Il s'agit chez les chimiotrophes d'une oxydation du substrat. On distingue les lithotrophes, qui utilisent un substrat minéral, et les organotrophes, qui utilisent un substrat organique. Les lithotrophes sont par exemple les bactéries nitrifiantes qui peuvent obtenir leur énergie en oxydant un élément minéral comme l'ammonium (NH_4^+). Les êtres humains n'ont pas non plus cette capacité et dépendent d'un substrat organique pour leur approvisionnement énergétique ;
- enfin la nature des sources de matière servant à la biosynthèse. On distingue les autotrophes, qui réalisent leur biosynthèse à partir d'éléments minéraux, et les hétérotrophes, qui utilisent un substrat organique. Pour reprendre les exemples ci-dessus, la majorité des plantes terrestres et les bactéries nitrifiantes sont des organismes autotrophes : elles utilisent du carbone minéral (typiquement le gaz carbonique CO_2) et de l'azote minéral (typiquement l'ammonium NH_4^+) pour leur biosynthèse. Là encore, les êtres humains dépendent de l'absorption de matière organique, pour constituer leur propre matière.

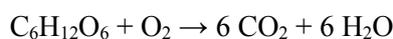
Les êtres humains sont doublement dépendants d'une matière organique exogène : à la fois pour leur biosynthèse et pour la fourniture d'énergie qui permet cette biosynthèse. Ils partagent cette caractéristique avec tous les autres organismes chimioorganohétérotrophes qui comprennent les animaux, les champignons, ainsi qu'un grand nombre d'autres eucaryotes, de bactéries et d'archées.

¹⁶ On notera l'existence de plantes telles que les orobanchacées qui ont perdu leurs chloroplastes et sont désormais strictement chimiotrophes.

La voie par laquelle les êtres humains réalisent ce prélèvement de matière organique dans son environnement est quasiment exclusive : il s'agit de l'ingestion, par la bouche, de matière organique sous la forme d'aliments. L'alimentation constitue une voie d'entrée unique dans l'organisme pour deux ressources distinctes : les matériaux de biosynthèse et les ressources énergétiques soutenant la biosynthèse. *A contrario*, les voies d'excrétion des êtres humains sont plus nombreuses (cf. section 1.2.3) et introduisent une certaine dissymétrie du métabolisme humain entre la voie d'approvisionnement de ce métabolisme et ses voies d'excrétion.

Énergie

Pour retirer de l'énergie à partir de la matière organique de notre alimentation, le métabolisme humain utilise principalement la voie oxydative qui permet de libérer de l'énergie par la différence de potentiel d'oxydo-réduction entre la matière ingérée réduite et les éléments excrétés oxydés. Pour réaliser cette oxydation, les êtres humains utilisent le dioxygène (O₂) de l'atmosphère¹⁷. L'inspiration de dioxygène combinée à l'ingestion d'aliments permet donc de réaliser l'approvisionnement énergétique des êtres humains pour leur biosynthèse. Le résidu de cette transformation est principalement constitué de gaz carbonique (CO₂) et d'eau (H₂O) et peut se résumer par la réaction suivante pour l'oxydation du glucose (C₆H₁₂O₆) :



Nous choisissons dans cette équation le glucose comme molécule type organique oxydée par le métabolisme humain. Les êtres humains ne s'alimentent bien sûr pas que de glucose mais la fourniture d'énergie humaine provient de l'oxydation du carbone réduit de la matière organique ingérée et le glucose fournit une bonne représentation générale du mécanisme en jeu, transposable également aux autres molécules organiques oxydées¹⁸. On constate ainsi que l'excrétion humaine correspondant à l'approvisionnement énergétique réside principalement dans l'« excrétion » de gaz carbonique, qui intervient par expiration, et le rejet de molécules d'eau, qui participe au bilan hydrique du corps humain.

¹⁷ On notera que les cellules musculaires du corps humain sont également capables de réaliser la fermentation lactique qui permet, temporairement, de fournir de l'énergie aux muscles sans utiliser d'oxygène. Ce métabolisme reste chimioorganotrophe. En outre, ce mécanisme anaérobie n'est que temporaire durant les efforts intenses et le catabolite de cette fermentation, l'acide lactique, est lui-même finalement oxydé de façon aérobie après l'effort.

¹⁸ On pourrait sinon choisir d'utiliser la formule générique de la biomasse C₅H₇O₂N (Rittmann, 2013) où le carbone est au même degré d'oxydation que dans le glucose.

Dans le cas du glucose, l'énergie totale (E) potentiellement libérée par cette oxydation est :

$$E = 16 \text{ kJ/g}$$

ou encore :

$$E = 40 \text{ kJ/gC}$$

Cette énergie est ensuite utilisée :

- sous forme chimique pour produire le travail métabolique de biosynthèse ;
- sous forme mécanique pour produire du travail musculaire.

Les différentes étapes de transformation de cette énergie libèrent principalement de la chaleur, pour environ 75 % de l'énergie initialement contenue dans les aliments (Sherwood *et al.*, 2013). Or les êtres humains ont la particularité d'être homéothermes : ils régulent leur température interne pour la maintenir constante aux alentours de 37 °C. Les voies de cette régulation avec le milieu extérieur se font :

- par transfert conductif ou convectif de chaleur à l'interface avec l'environnement via la peau ;
- par perspiration ou transpiration en faisant perdre au corps la chaleur latente d'évaporation de l'eau ainsi perspirée ou transpirée ;
- par rayonnement, principalement dans l'infra-rouge pour le corps humain suivant la loi de Planck.

En cas d'environnement extérieur refroidissant (vent, températures basses, etc.), la chaleur issue des mécanismes énergétiques du métabolisme a un impact favorable sur la thermorégulation puisqu'elle permet d'augmenter la température interne. *A contrario*, en cas d'environnement extérieur réchauffant, la chaleur issue du métabolisme a un impact défavorable sur la thermorégulation et nécessite un forçage négatif de cette thermorégulation, par exemple par la transpiration, qui modifie en conséquence le bilan hydrique du corps¹⁹. La zone de neutralité de la thermorégulation pour un être

¹⁹ Il convient de noter que le corps humain n'a pas, à notre connaissance, la capacité d'utiliser des sources d'énergie sous forme de chaleur ou de rayonnement, typiquement le soleil, pour soutenir énergétiquement son métabolisme de biosynthèse. Les pratiques de jeûne de très long terme (nommées inédie ou pranisme) ne paraissent donc pas physiologiquement possibles, ni sur le plan énergétique, ni sur le plan du nécessaire renouvellement des éléments structurels de la biosynthèse. La lumière possède toutefois plusieurs fonctions importantes (synthèse de vitamine D, rythmes circadiens, etc.).

humain nu se situe entre 26 °C et 33 °C (Kingma *et al.*, 2014). La vie humaine en climat tempéré nécessite donc des mesures spécifiques de protection contre le froid : à Paris, la température minimale moyenne mensuelle est de 2 °C en janvier et février et la température maximale moyenne mensuelle n'est « que » de 24 °C en juillet²⁰. Cet élément explique en partie le fait que nous ayons besoin de nous abriter et de nous vêtir (cf. développements ultérieurs section 1.3.1.2).

Biosynthèse

Pour permettre la biosynthèse, nous avons vu que les êtres humains doivent s'approvisionner en matière organique exogène par l'alimentation. Alors que le mécanisme de fourniture d'énergie peut assez simplement se résumer par l'oxydation du carbone, la biosynthèse dans le corps humain recouvre une diversité beaucoup plus grande de mécanismes en jeu et d'éléments chimiques impliqués.

L'analyse de la composition du corps humain permet d'appréhender les résultats de cette biosynthèse. La thèse de Wang, en 1997, semble être le premier travail ayant proposé d'analyser la composition du corps humain suivant cinq échelles différentes : l'échelle atomique, l'échelle moléculaire, l'échelle cellulaire, l'échelle des organes et enfin l'échelle de l'organisme au complet, tel qu'illustré par la Figure 1.9 (Wang, 1997).

²⁰ Station météo de Paris-Montsouris, moyennes 1951-1980, source www.meteo-paris.com/ile-de-france/climat.html, consulté le 20 janvier 2017.

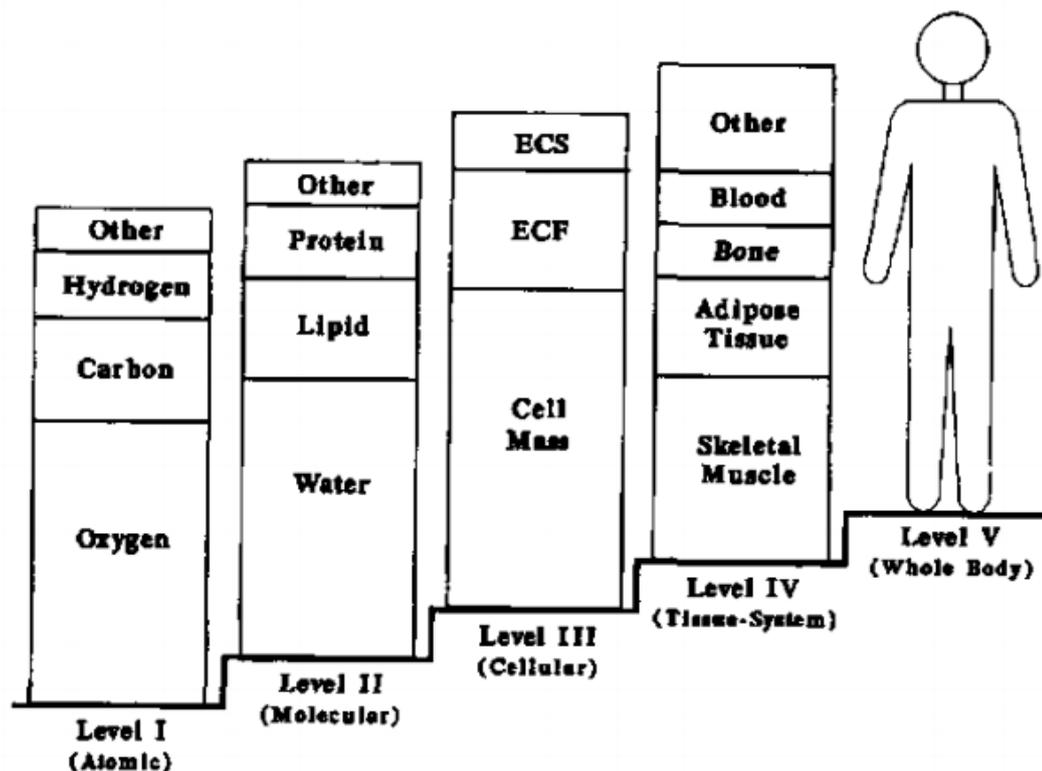


Figure 1.9 : Les cinq échelles d'analyse du corps humain.

ECF = Extra-Cellular Fluid / ECS = Extra-Cellular Solids. Source : Wang (1997).

À l'échelle moléculaire, on constate que le corps humain est avant tout constitué de molécules d'eau, pour environ 60 % en masse. Viennent ensuite deux types de molécules organiques, les lipides – env. 19 % en masse – et les protides – env. 15 % en masse (*ibid.*).

Les lipides sont principalement caractérisés par la présence d'une longue chaîne carbonée qui leur confère leur caractère hydrophobe. Leur composition chimique est très variable mais ils sont majoritairement constitués de carbone.

Les protides peuvent eux-mêmes être décomposés plus finement en chaînes d'acides aminés. Ces acides aminés sont en nombre réduit, vingt-et-un pour le corps humain, et ont comme caractéristique commune d'être constitués d'un groupe amine $-NH_2$, d'un groupe carboxyle $-COOH$ et d'une chaîne latérale plus ou moins longue et complexe. Cette chaîne va de trois atomes, un simple groupe $-CH_2$, pour l'acide aminé le plus simple, la glycine, à vingt-et-un atomes pour l'acide aminé le plus long, le tryptophane.

Environ 94 % de la masse du corps humain est ainsi constituée de ces trois éléments moléculaires. On notera que les glucides ne sont pas un constituant aussi important du corps humain que les protides et

les lipides. Ils représentent moins de 1 % du poids total du corps humain, sous forme de glycogène (*ibid.*).

Au niveau atomique, la composition des trois constituants majeurs du corps humain peut ainsi être assez facilement résumée :

- H_2O pour l'eau ;
- CNO_2H_3-R pour les acides aminés ;
- $C_xH_y...$ pour les lipides.

Cela implique finalement que le corps humain est composé essentiellement d'atomes d'hydrogène et d'oxygène. Son troisième constituant principal est le carbone qui représente environ 23 % du corps humain en masse. Puis vient l'azote qui représente environ 3 % en masse (*ibid.*). Les autres constituants, minoritaires, seront intégrés ultérieurement (cf. sous-section 1.2.1.2).

Ainsi, en ratio molaire, plus de 99 % des atomes du corps humain sont des atomes H, O, C et N dont H et O sont principalement sous forme d'eau, C sous forme de lipides et d'acides aminés et N sous forme d'acides aminés (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Composition atomique du corps humain.

Calculé d'après Wang (1997).

Atome	Ratio molaire dans le corps humain	Forme principale
Hydrogène	62 %	Eau
Oxygène	24 %	Eau
Carbone	12 %	Lipides et protides
Azote	1 %	Protides
TOTAL	99 %	

Excrétion

Enfin, les êtres humains doivent également assurer l'excrétion des produits issus des transformations métaboliques des éléments prélevés dans leur environnement, que l'on nomme métabolites. Une fois l'âge adulte atteint, on notera tout d'abord que le poids d'un individu ne change pas notablement dans

le temps. Par bilan de masse, et en première approximation pour les éléments principaux mentionnés ci-dessus, on peut en déduire que tous les prélèvements réalisés dans l'environnement se retrouvent intégralement excrétés.

Pour la fourniture d'énergie, nous avons déjà vu qu'au prélèvement de glucides par l'alimentation et d'oxygène par l'inspiration correspondait une excrétion de gaz carbonique par l'expiration. Pour l'eau, le bilan hydrique du corps humain montre que la voie principale d'excrétion est constituée par l'urine, pour environ deux tiers des excrétions d'eau (Heymsfield, 2005). Or la fonction principale de l'excrétion urinaire d'eau est de permettre l'excrétion d'éléments qui peuvent être dissous cette eau. Une fonction métabolique essentielle du prélèvement d'eau dans le milieu extérieur est donc l'excrétion de métabolites.

Ce point semble d'autant plus fondamental qu'il peut paraître contre-intuitif et nécessite une analyse plus poussée. Prenons le cas d'un individu ayant ingéré de grandes quantités d'eau ou de boissons aqueuses. Ceci entraînera une augmentation du volume liquide du corps, rapidement régulé par un remplissage de la vessie et le besoin impérieux d'une miction urinaire pour excréter cette eau en excès par rapport aux besoins physiologiques. Cette expérience commune montre un lien de cause à effet entre la boisson et la miction urinaire que l'on pourrait traduire par la formule « je bois donc j'urine ». Mais, en l'absence de boisson d'eau en excès, le lien de causalité entre boisson et excrétion peut être établi de façon inverse : la miction urinaire ayant principalement comme fonction de permettre d'excréter des métabolites, la formule « j'urine donc je bois » semble plus appropriée et montre une primauté, assez contre-intuitive semble-t-il, de l'excrétion sur l'ingestion²¹.

Maxime 1 : « J'urine donc je bois »

Le métabolite principal de l'excrétion urinaire est l'urée, de formule chimique $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, qui constitue plus d'un tiers en masse des matières solides excrétées dans l'urine (cf. sous-section 1.2.3.1). L'urée est la forme principale sous laquelle le corps humain excrète l'azote.

En administrant un régime sans acides aminés, et donc presque sans azote, à des adultes, on constate en effet que le métabolisme du corps humain induit des excrétions obligatoires d'azote de 3,3 g/pers/j²², largement dominées par l'excrétion urinaire (68 %) (Caballero, 2013). Ces excrétions

²¹ En toute rigueur, il faudrait compléter cette maxime par les autres excrétions qui nécessitent que la boisson remplace les pertes d'eau consécutives (principalement expiration, perspiration et transpiration – cf. plus loin p. 70 et suivantes). La large primauté de l'urine par rapport aux autres excrétions d'eau justifie la formulation de notre maxime.

²² 47,3 mg/kg/j (Caballero, 2013), ramené à 3,3 g/pers/j pour un individu de 70 kg.

obligatoires sont dues à des voies métaboliques de l'azote non réversibles du corps humain. La quantité d'acides aminés dérivant de la dégradation des protéines déjà présentes dans le corps permet de couvrir la majeure partie du besoin en acides aminés nécessaires à la synthèse de nouvelles protéines (OMS, 2007)²³. Mais quelques réactions sont irréversibles, soit par l'oxydation des acides aminés, soit par la modification irréversible d'acides aminés durant ou suite à la synthèse de protéines, telle que la méthylation, soit par la synthèse de métabolites azotés non protéiques (acides nucléiques, créatine, sérotonine, dopamine, etc.) (*ibid.*)²⁴.

In fine, le produit de dégradation de la majorité des molécules azotées dans le corps humain est l'ammoniac. Or les êtres humains n'ont pas la capacité métabolique de synthétiser des acides aminés à partir d'azote minéral. L'ammoniac étant toxique pour l'organisme, celui-ci ne peut être présent en trop grandes quantités dans l'organisme. C'est ainsi que le foie synthétise de l'urée à partir de l'ammoniac : cette réaction est énergivore mais permet à l'organisme de stocker l'ammoniac sous une forme non toxique et facilement diluable dans le sang. Le rein filtre ensuite l'urée sanguine et la concentre dans l'urine, stockée dans la vessie avant son excrétion. L'excrétion sous forme d'urée se nomme uréotélie. Elle se retrouve chez certains organismes qui, comme les êtres humains, ne vivent pas en milieu aquatique et n'ont pas non plus de fortes contraintes d'eau ou de poids²⁵.

Bilan des principales interactions des êtres humains avec leur environnement

Cette analyse succincte de la composition du corps humain et des mécanismes de la biosynthèse permet de mettre en relation les principaux prélèvements et excrétions de matière et d'énergie du corps humain et les fonctions métaboliques associées (Tableau 1.2).

²³ Dans le régime alimentaire occidental aujourd'hui, relativement riche en protéines comme nous le verrons ultérieurement, la quantité de protéines ingérées chaque jour correspond à environ un tiers du renouvellement protéique quotidien réalisé par le corps humain (AFSSA, 2007). Ce renouvellement correspond lui-même à environ 2,5 % de la masse totale de protéines du corps humain (*ibid.*).

²⁴ On notera qu'il est difficile de trouver une explication claire sur l'origine du besoin alimentaire en azote dans le métabolisme humain. On pourrait théoriquement imaginer un meilleur recyclage de l'azote protéique par le corps humain et un besoin physiologique nettement plus faible. La plupart des ouvrages généraux de physiologie ou de biochimie donnent une explication insatisfaisante du besoin alimentaire en azote en disant simplement qu'il sert à remplacer les pertes excrétoires sans expliquer davantage l'origine de ces pertes excrétoires. Nous nous cantonnerons ici à l'explication donnée par l'OMS de l'existence de réactions irréversibles.

²⁵ Les autres formes d'excrétion azotée principales sont l'ammoniotélie – par exemple chez les téléostéens (poissons) qui excrètent l'azote sous forme d'ammonium par les branchies – et l'uricotélie – par exemple chez les oiseaux qui excrètent de l'acide urique (Sherwood *et al.*, 2013).

Tableau 1.2 : Principaux flux de matière et d'énergie de l'interaction des êtres humains avec leur environnement.

Élément prélevé	Modalité principale de prélèvement	Composés chimiques majeurs	Modalité principale d'excrétion	Fonction métabolique principale
Oxygène	Inspiration	O ₂	Expiration	Énergie
Glucide et lipide	Alimentation	C	Expiration	Énergie
Protide	Alimentation	C	Expiration	Énergie
		N	Urine	Biosynthèse
Eau	Alimentation	H ₂ O	Urine	Excrétion d'azote

Nous avons cherché à quantifier ces flux pour un habitant d'une ville occidentale. Nous nous sommes placés dans les conditions d'un habitant théorique moyen de l'Ile-de-France, au début du XXI^e siècle, représentatif de la tranche d'âge 3-79 ans (les données ont été arrondies à deux chiffres significatifs).

Nous avons pour cela utilisé la deuxième étude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires (dite INCA 2) réalisée par l'AFSSA en 2006-2007 (AFSSA, 2009). Parmi les différentes études alimentaires que nous avons consultées, cette étude nous paraît être la mieux renseignée pour estimer les consommations alimentaires des Français. Sur cette base, nous avons converti les masses de lipides, protides, glucides et fibres consommées en masses de carbone consommé²⁶. Pour ce faire, nous avons utilisé les ratios suivants :

- 0,44 gramme de carbone par gramme de glucide, calculé comme le ratio de carbone dans une chaîne monomère de glucide dans l'amidon. Dans d'autres travaux, nous trouvons un ratio utilisé de 0,42, calculé comme une moyenne de taux de carbone de différents glucides (Muñoz *et al.*, 2007), ce qui montre que cette valeur pourrait encore être affinée. Nous nous contenterons ici de cette précision qui indique une marge d'erreur de l'ordre de 5 % ;

²⁶ Ce travail de conversion en carbone a été réalisé par Léo Petit lors de son stage de licence supervisé par Gilles Billen.

- 0,53 gramme de carbone par gramme de protide. C'est le ratio que l'on trouve pour les protéines du blé (Lasztity & Hidvégi, 1985), qui se situe entre la valeur des légumineuses et des viandes (0,525) et les protéines de lait (0,535), indiquant une marge d'erreur *a priori* inférieure à 5 % ;
- 0,70 gramme de carbone par gramme de lipide, calculé à partir d'un triglycéride standard ;
- 0,44 gramme de carbone par gramme de fibre (taux de carbone considéré équivalent à celui des glucides).

Nous avons calculé le taux de siccité des aliments consommés par différence entre la masse totale et la somme des masses des quatre constituants principaux listés ci-dessus et avons ainsi déterminé les quantités d'eau et de matière sèche ingérées. Cette méthode de calcul surestime légèrement la teneur en eau des aliments car elle ne tient pas compte de leur teneur en autres éléments qui sont principalement les minéraux, l'alcool et les acides. Nous avons testé l'erreur ainsi réalisée sur quelques aliments (table Ciqual de l'ANSES ; <https://ciqual.anses.fr>) et celle-ci nous paraît pouvoir être considérée inférieure à 2 %.

Pour quantifier l'azote, nous avons utilisé le ratio de 6,25 grammes de protéine par gramme d'azote. Les travaux précédemment mentionnés (OMS, 2007 ; AFSSA, 2007) indiquent que ce facteur, couramment utilisé depuis le XIX^e siècle, peut être affiné pour tenir compte de la variabilité de la richesse en azote des différentes protéines ainsi que de la teneur en azote non protéique dans les aliments. Ces corrections ne nous ont pas paru être nécessaires à intégrer dans une première approche, en particulier du fait des incertitudes existant sur les autres données utilisées (en particulier les données relatives à l'ingestion d'aliments). On notera que ce coefficient est plutôt légèrement supérieur pour les protéines d'origine animales [6,25 ; 6,38] et plutôt légèrement inférieur pour les protéines d'origine végétale [5,7 ; 6,25]. Nous avons par ailleurs vérifié la cohérence des données utilisées avec les valeurs indiquées dans la table Ciqual.

Enfin, du fait que l'étude INCA 2 différencie les adultes de 18-79 ans et les enfants de 3-17 ans, nous avons utilisé les données INSEE 2014 de la population d'Île-de-France pour évaluer la proportion de ces deux tranches d'âge dans la population totale (respectivement 76,5 % et 19,3 %) et évaluer ainsi les consommations d'un habitant moyen théorique d'Île-de-France de la tranche d'âge 3-79 ans, les tranches d'âge inférieures à 3 ans et supérieures à 80 ans, représentant moins de 5 % de la population, étant ainsi exclues du calcul.

Les données de l'étude INCA 2 sont également régionalisées mais les différences entre régions sont minimales. Nous sommes donc partis des données France entière. Les coefficients de variation des apports quotidiens de l'INCA 2 se situent aux alentours de 30 % pour les principaux nutriments.

Pour les excréctions, nous avons utilisé les données suivantes :

- pour les excréctions urinaires, en volume et en quantité d’azote, nous avons utilisé les données compilées par Friedler *et al.* (2013). Les différentes données de la littérature présentent d’assez larges valeurs de variations mais ces valeurs nous paraissent le mieux correspondre à l’état actuel de la physiologie des Français et sont en particulier cohérentes avec les valeurs de l’étude INCA 2 ;
- pour les expirations d’eau, nous avons trouvé des valeurs allant de 350 g/j (Muñoz *et al.*, 2007) à 816 g/j (Heymsfield, 2005) et avons donc choisi une valeur intermédiaire de 600 g/j ;
- pour l’expiration de CO₂, nous avons considéré, suivant Muñoz *et al.* (2007), que 89 % du carbone ingéré hors fibres suivait une combustion en CO₂ (ici calculé comme la somme du carbone issu des glucides, lipides et protides). Les valeurs ainsi trouvées sont cohérentes quoique légèrement inférieures avec les autres valeurs trouvées dans la littérature : 191 gC-CO₂/j (Baccini & Brunner, 2012), 195 gC-CO₂/j (Muñoz *et al.*, 2007), 225 gC-CO₂/j (Barles, 2013), 281 gC-CO₂/j (Villarroel Walker *et al.*, 2014)²⁷.

Les résultats sont synthétisés à la Figure 1.10²⁸.

²⁷ Cette dernière étude, dont les résultats s’éloignent le plus de nos valeurs, ne semble pas avoir cherché une quantification trop précise de cette valeur.

²⁸ On trouvera également un bilan plus détaillé des flux d’azote (et aussi de phosphore) ultérieurement au Tableau 3.4.

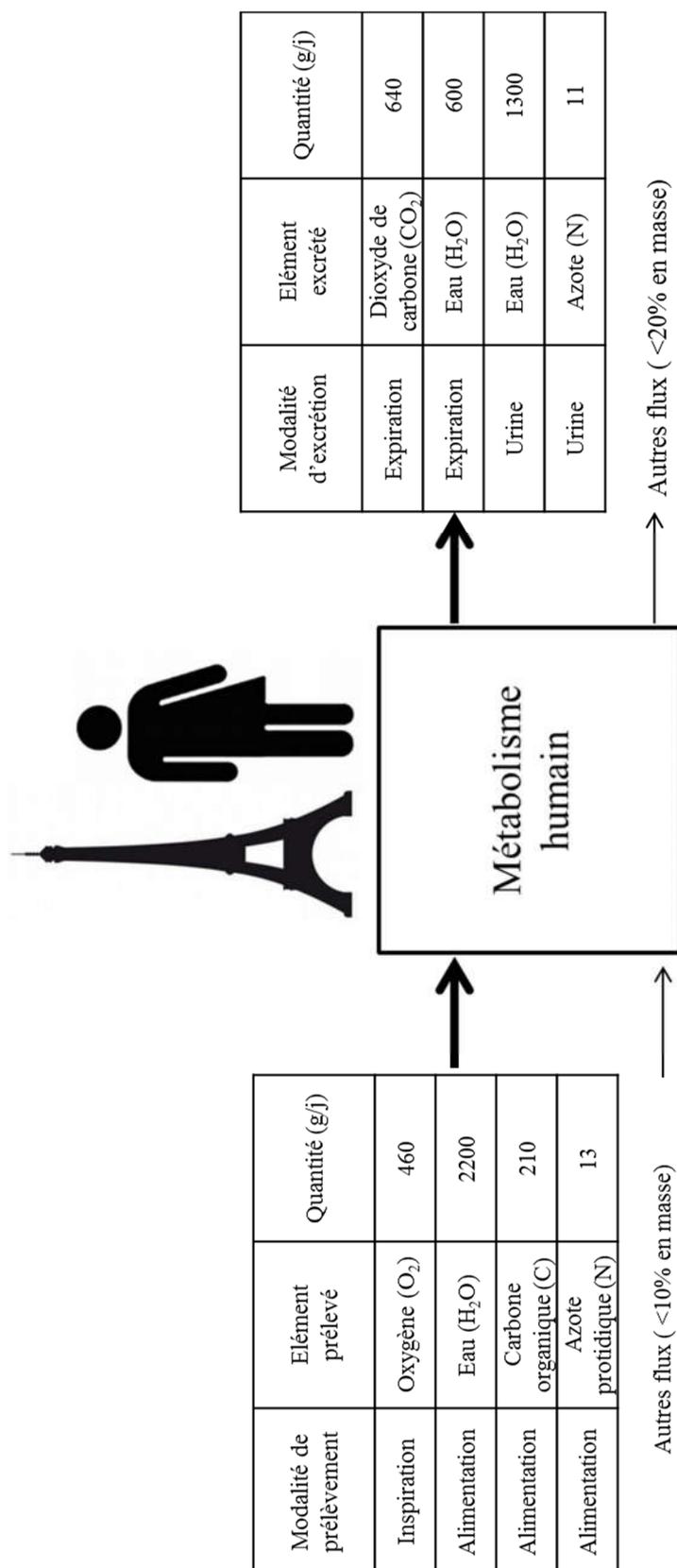


Figure 1.10 : Principaux flux de l'interaction entre les êtres humains et leur environnement
 Habitant théorique moyen de l'Ile-de-France au début du XXI^e siècle.

Cette description des flux de matière liés à l'interaction des êtres humains avec leur environnement reste peu détaillée mais elle permet de mettre en exergue que plus de 90 % des flux de prélèvement et plus de 80 % des flux d'excrétion peuvent être résumés par l'analyse de l'oxygène, de l'eau, du carbone et de l'azote et simplement deux modalités de prélèvement et d'excrétion : inspiration et alimentation d'un côté, expiration et miction urinaire de l'autre. L'importance de l'inspiration, de l'expiration et de l'alimentation en matière organique est caractéristique du fonctionnement chimioorganohétérotrophe du corps humain tandis que l'importance des flux d'eau alimentaire et de la miction urinaire est caractéristique de son uréotélie²⁹.

Les flux alimentaires peuvent aussi être exprimés en termes d'énergie. Les 210 g/j de carbone ingérés correspondent à environ 8,8 MJ/j soit une puissance instantanée équivalente ingérée de 100 W. On peut également en déduire le contenu énergétique du carbone alimentaire, qui vaut donc 41 kJ/gC. L'approximation par le contenu énergétique du glucose est donc une très bonne approximation, à 4 % près.

On constate l'importance des flux de gaz dans le métabolisme humain puisqu'un être humain excrète plus d'un kilogramme de gaz par jour de dioxyde de carbone et d'eau³⁰. Les autres flux alimentaires non représentés sont constitués des atomes d'hydrogène et d'oxygène liés aux atomes de carbone des différents nutriments et des trois autres principaux types d'aliments : les minéraux, l'alcool et les acides (les fibres ont été intégrées dans le flux de carbone).

Deux éléments complémentaires peuvent être intégrés pour affiner le bilan hydrique :

- l'apport d'eau métabolique, c'est-à-dire l'apport d'eau issue de la combustion des aliments (cf. réaction d'oxydation du glucose p. 43). Il représente environ 300 g/j³¹.
- la perspiration d'eau, c'est-à-dire les pertes insensibles d'eau par la peau (hors transpiration). Elle représente environ 350 g/j³².

²⁹ Plus spécifiquement, l'importance du flux d'eau urinaire est caractéristique des limites de capacité du rein humain à concentrer l'urée dans l'urine. Les souris sauteuses des déserts australiens (*Notomys spp.*), par exemple, sont également uréotèles mais leur rein peut concentrer six fois plus l'urée dans l'urine que le rein humain.

³⁰ C'est semble-t-il Santorio qui, au XVI^e siècle, constata le premier ce qu'il appela alors la perspiration insensible, dans son expérience étalée sur trente ans durant laquelle il se pesa lui-même ainsi que toutes les matières solides et liquides (mais non gazeuses) qu'il ingérait ou excrétaient (Baccini & Brunner, 2012).

³¹ 305 g/j par calcul basé sur les 210 g/j de carbone calculés (en excluant les fibres) et 350 g/j dans la littérature consultée (Sherwood *et al.*, 2013).

Enfin, l'équilibre complet du bilan de masse des flux de la Figure 1.10 s'obtient en incluant les autres excréments du corps humain. Celles-ci comprennent les matières fécales et diverses excréments principalement tégumentaires (peau, cheveux, sueur, etc.). Le détail de ces excréments sera présenté à la section 1.2.3.

1.2.1.2. Éléments secondaires

Une description simplement basée sur l'hydrogène, l'oxygène, le carbone et l'azote nous permet déjà d'appréhender de façon satisfaisante le métabolisme des êtres humains. Une description complète de ce métabolisme nécessite d'inclure l'ensemble des autres éléments chimiques mobilisés que nous avons présentés à la section 1.1.1.

En nous basant toujours sur la composition atomique du corps humain fournie par Wang (1997), deux éléments supplémentaires sont en quantité supérieure à 0,05 % en ratio molaire dans le corps humain : le calcium et le phosphore (respectivement 0,22 % et 0,17 % en ratio molaire). Cette abondance du calcium et du phosphore dans le corps humain traduit principalement le fait que les êtres humains sont dotés d'un squelette en os dont le constituant principal est l'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). Nous avons vu précédemment (sous-section 1.2.1.1) que la chimioorganohétérotrophie et l'uréotélie des êtres humains conditionnaient fortement leur métabolisme. La présence d'un squelette osseux est une caractéristique supplémentaire des êtres humains qui confère au calcium et au phosphore un rôle particulier par rapport aux autres êtres vivants. Les vertébrés ne partagent pas tous cette caractéristique car nombre d'entre eux ont un squelette cartilagineux (tels les chondrichthyens qui comprennent les requins et les raies) et le taxon regroupant les animaux dotés d'un squelette osseux correspond plutôt à celui des eutélostomiens³³. Nous proposons donc de regrouper dans une maxime ces trois caractères

³² Valeurs à nouveau assez variables selon les auteurs : en prenant 100 g/j pour la transpiration (Sherwood *et al.*, 2013), elle représente de 236 g/j (Heymsfield, 2005) à 450 g/j (Muñoz *et al.*, 2007). On notera que Muñoz *et al.* font dominer la perspiration d'eau sur l'expiration d'eau au contraire de Heymsfield. Nous avons suivi ici Heymsfield.

³³ Exceptionnellement, nous n'utilisons pas ici la terminologie de Lecointre *et al.* (2016) qui nomment ce taxon ostéichthyens car l'étymologie de ce terme laisse à penser que ce taxon ne contiendrait que des poissons. Nous avons donc choisi le terme proposé par le Centre américain pour les informations biotechnologiques (NCBI) du fait de l'absence apparente d'un consensus pour nommer ce taxon au sein de la communauté scientifique. On notera également que le taxon des eutélostomiens contient quelques animaux dont le squelette est principalement cartilagineux qu'il conviendrait donc d'exclure du groupe d'animaux avec lesquels les êtres humains partagent l'importance biogéochimique du calcium et du phosphore dans la constitution du corps. D'autres organismes ont également des besoins spécifiques en phosphore (coquilles).

fondamentaux des êtres humains qui conditionnent la plupart des flux biogéochimiques mis en œuvre dans le métabolisme humain (Maxime 2).

Maxime 2 : « Les êtres humains sont des chimioorganohétérotrophes uréotèles eutélostomiens »

Le calcium et le phosphore se différencient de l'hydrogène, de l'oxygène, du carbone et de l'azote en ce que le corps humain constitue un stock de calcium et de phosphore important par rapport aux flux d'alimentation et d'excrétion. En suivant la même méthodologie que dans la sous-section précédente (sous-section 1.2.1.1), les données de Wang de composition du corps humain et de l'AFSSA du régime alimentaire nous permettent en effet de comparer l'importance respective des flux et des stocks dans le métabolisme du corps humain. En prenant une espérance de vie de 82,8 ans (données INSEE pour l'Île-de-France), on peut calculer une quantité théorique intégrée sur la vie des flux alimentaires et la rapporter au stock constitué dans le corps humain. Les résultats de ce calcul sont compilés dans le tableau suivant (Tableau 1.3).

Tableau 1.3 : Comparaison des flux et des stocks des principaux éléments du métabolisme humain.

Élément	Flux alimentaire annuel (kg/pers/an)	Stock du corps humain (kg/pers)	Taux de stockage dans le corps, intégré sur toute la vie, par rapport aux flux alimentaires
H	> 200	7	< 0,1 %
O	> 800 ^a	43	< 0,1 %
C	77	16	0,3 %
N	4,8	1,8	0,5 %
P	0,43	0,58	1,6 %
Ca	0,33	1,0	3,7 %

^a Pour l'oxygène, le flux alimentaire inclut l'inspiration.

On peut donc considérer comme négligeable le stockage dans le corps humain de l'hydrogène, de l'oxygène, du carbone et de l'azote par rapport aux flux alimentaires mais ce stockage est plus

important, quoique toujours relativement marginal, pour le phosphore et le calcium, en particulier chez les enfants³⁴. À la mort, le corps humain contient un stock relativement important de calcium et de phosphore minéralisé dans le squelette³⁵. Les flux restent toutefois nettement dominants par rapport à ce stock et ces deux éléments n'interviennent pas que pour la constitution et le renouvellement des tissus osseux mais également dans d'autres processus physiologiques. En particulier le phosphore est un composé de structure essentiel des constituants cellulaires (ADN, ATP, parois membranaires, etc.). Le phosphore est également plus critique que le calcium en termes de disponibilités dans l'environnement (cf. section 1.1.1). On notera également que l'absorption du phosphore dans le processus de digestion des monogastriques, comme le sont les êtres humains, est nettement moins efficace que celui de l'absorption de l'azote, en particulier du fait que le phosphore des végétaux est en partie présent sous forme de phytates non directement assimilables (Sherwood *et al.*, 2013). En conséquence, les matières fécales représentent une voie non négligeable d'excrétion de phosphore par le corps humain – 39 % d'après Friedler *et al.* (2013) – par rapport à l'excrétion urinaire³⁶. De même que pour les fibres dans le cas du carbone, le flux de phosphore des matières fécales correspond donc majoritairement à un flux traversant le corps humain sans assimilation plutôt qu'à une réelle excrétion d'un élément métabolisé.

Les cinq autres principaux macronutriments (potassium, soufre, magnésium, sodium et chlore) sont présents en quantités plus faibles dans le corps humain (< 0,05 % en ratio molaire) et dans les flux alimentaires, et *a fortiori* les micronutriments. Ils restent physiologiquement importants même si leur importance massique est moindre et que les processus physiologiques dans lesquels ils sont impliqués sont plus spécifiques.

1.2.1.3. Dépendance des êtres humains vis-à-vis des autres êtres vivants

Les flux de matières et d'énergie du corps humain présentés ci-avant traduisent la forte dépendance des êtres humains vis-à-vis d'autres êtres vivants. Deux dépendances apparaissent principalement.

L'hétérotrophie des êtres humains détermine leur absolue dépendance vis-à-vis d'organismes autotrophes. En pratique, les producteurs primaires (c'est-à-dire autotrophes) de la chaîne alimentaire

³⁴ Il semble que les taux de stockage des autres éléments sont également négligeables.

³⁵ Après les guerres napoléoniennes, Barles (2005) rapporte ainsi que des entreprises se sont spécialisées dans la production d'engrais phosphorés à partir des os des cadavres des champs de bataille.

³⁶ Les flux urinaires de calcium et de phosphate correspondent à une régulation fine et couplée du taux plasmatique de ces deux ions dans le corps humain en fonction des apports alimentaires et de son ratio Ca/P. Leur taux d'absorption digestive est également régulé (Sherwood *et al.*, 2013).

des êtres humains sont presque exclusivement³⁷ des organismes chlorophylliens. Même si un être humain peut se nourrir lui-même d'un organisme hétérotrophe (animal d'élevage ou sauvage), cet organisme hétérotrophe dépendra toujours lui-même, directement s'il est herbivore ou indirectement s'il est carnivore, d'un organisme autotrophe.

L'autre dépendance principale des êtres humains vis-à-vis d'autres êtres vivants est liée aux microorganismes qui forment le microbiote intestinal. Alors que le corps humain est constitué d'environ 10^{13} cellules – description au niveau III de Wang (Wang, 1997) –, le microbiote intestinal est composé de dix fois plus de cellules soit 10^{14} cellules (Sahakian *et al.*, 2010 ; Enders & Enders, 2016)³⁸.

Ainsi, si le métabolisme chimioorganohétérotrophe précédemment décrit correspond à celui des cellules constitutives du corps humains, les êtres humains hébergent dans leur tractus gastro-intestinal, très majoritairement à la fin de celui-ci, dans le côlon, des organismes dont le métabolisme est différent. Plus de 99 % des microorganismes du microbiote intestinal sont des organismes anaérobies (Sahakian *et al.*, 2010) : ils participent au processus de digestion et obtiennent leur énergie à partir des molécules organiques que le système digestif humain n'a pas assimilées (fibres, amidon résistant, etc.) par deux métabolismes principaux :

- un métabolisme chimioorganotrophe. Le substrat de ces microorganismes reste toujours des molécules organiques ; toutefois la fourniture d'énergie n'est plus liée à une oxydation par le dioxygène de l'air mais par d'autres molécules. On notera principalement les processus fermentatifs dans lesquels c'est le substrat organique lui-même qui est réduit en produisant principalement des acides organiques (lactate, acétate, etc.) mais également du dihydrogène. Son rendement énergétique est moins bon que celui de la respiration aérobie mais il permet au microbiote intestinal de tirer encore de l'énergie des molécules organiques non assimilées par le système digestif ;
- un métabolisme chimiolithotrophe : ce métabolisme permet aux microorganismes du tractus gastro-intestinal de tirer leur énergie de l'oxydation de substrats minéraux. On notera en

³⁷ On pourrait imaginer des producteurs primaires qui soient chimiolithotrophes et non phototrophes mais ce cas serait *a priori* tout à fait anecdotique.

³⁸ La dépendance des êtres humains aux microorganismes est d'ailleurs également fondamentale pour tous les eucaryotes puisqu'il est désormais attesté que les mitochondries, qui fournissent la majorité de l'énergie aux cellules eucaryotes, sont issues d'une endosymbiose d'une bactérie – une protéobactérie α en l'occurrence (Lecointre *et al.*, 2016). Les eucaryotes chlorophylliens ont encore davantage développé cette symbiose avec les bactéries puisque les chloroplastes résultent aussi eux-mêmes d'une endosymbiose d'une bactérie chlorophyllienne (*ibid.*).

particulier la méthanisation, réalisée par des archées, dont une des voies consiste à synthétiser du méthane à partir de dihydrogène, lui-même produit par les processus fermentatifs décrits ci-dessus (Gaci *et al.*, 2014).

La prise en compte de cette complémentarité entre le système digestif humain et le microbiote intestinal est fondamentale car elle détermine en grande partie la nature des excréments issues du système digestif humain (cf. 1.2.3.2)³⁹. On notera toutefois que cette symbiose s'exprime de façon très différente selon les êtres vivants et l'étude des métabolismes animaux révèle une multiplicité de fonctionnement au sein duquel le fonctionnement des êtres humains constitue une forme spécifique parmi d'autres (Sherwood *et al.*, 2013). Deux fonctionnements nettement différents peuvent illustrer cette diversité : la digestion des ruminants et des rongeurs. Les êtres humains sont monogastriques et le processus de digestion est relativement linéaire de la bouche à l'anus. Les ruminants possèdent eux des panses gastriques supplémentaires⁴⁰ et ils réalisent une sorte d'élevage de bactéries. Les ruminants ne se nourrissent pour ainsi dire pas directement d'herbe mais ils font digérer la cellulose des végétaux qu'ils consomment par les microorganismes de leur système digestif et se nourrissent ensuite de ces bactéries et des produits de leur métabolisme, principalement fermentatif (typiquement de l'acétate). Au vu de l'éructation de méthane qui découle de cette typologie de digestion, l'importance des ruminants dans la culture agricole et alimentaire française, et même mondiale (principalement bovins, ovins et caprins), a de fortes conséquences en termes d'émissions de gaz à effet de serre⁴¹. Les rongeurs quant à eux ont développé la cæcotrophie qui est une des formes de la coprophagie : un premier passage des aliments dans leur tube digestif leur permet d'en récupérer les éléments nutritifs facilement mobilisables, de faire dégrader le reliquat par leur microbiote intestinal (en partie situé dans le cæcum d'où le nom) et d'en excréter le produit par l'anus. Ils ingèrent ensuite les matières fécales issues de cette première digestion pour assimiler les nouveaux éléments rendus disponibles par le microbiote (dont la vitamine B12) (Sherwood *et al.*, 2013).

³⁹ On pourrait reprendre ici l'hypothèse légèrement digressive émise par James Lovelock (1979). Du fait que les premiers organismes vivants ayant peuplé la planète Terre se sont développés dans des conditions anaérobies, suivant des métabolismes proches de ceux dont notre tractus gastro-intestinal est le siège, Lovelock avance l'hypothèse selon laquelle les êtres humains sont avant tout des enveloppes corporelles qui permettent au microbiote intestinal de bénéficier de conditions de vie optimales (alimentation, régulation thermique, conditions anaérobies, etc.). Cette hypothèse pourrait compléter la thèse des trois humiliations cosmologique, biologique et psychologique développée par Freud (1917) par une quatrième humiliation, microbiologique.

⁴⁰ La première s'appelle rumen et leur donne leur nom.

⁴¹ Outre les animaux d'élevage, de nombreux animaux sauvages sont également des ruminants (antilopes, cervidés, etc.). On notera en particulier que l'okapi, comme tous les giraffidés, est un ruminant.

On notera pour l'instant que le système digestif des êtres humains peut ainsi être considéré comme moins performant que celui des ruminants ou des rongeurs ce qui conditionne la nature des aliments ingérés : la digestibilité des végétaux très fibreux (herbe) par les êtres humains est relativement faible.

1.2.1.4. Échelles d'appréhension des prélèvements et des excrétiens

Les prélèvements et excrétiens du corps humain peuvent, comme la composition du corps humain, être analysés suivant différentes échelles. Les principaux prélèvements et excrétiens du corps humain ne sont pas diffus à l'échelle de tout l'organisme (contrairement par exemple à l'excrétion transcutanée d'ammoniac des têtards) mais sont concentrés au niveau d'un ou deux organes : bouche et nez pour l'inspiration et l'expiration, bouche pour l'alimentation, urètre pour l'urine (5^{ème} échelle de Wang, Figure 1.9). Mais ces organes ne sont que des voies de passage pour soutenir le métabolisme des 10^{13} cellules du corps humain (3^{ème} échelle de Wang, Figure 1.9), à la fois en termes d'approvisionnement (dioxygène et molécules organiques) et d'excrétion (dioxyde de carbone et molécules azotées). Les principaux flux de prélèvement et d'excrétion présentés à la Figure 1.10 peuvent ainsi être analysés comme la résultante, à l'échelle de tout l'organisme, du métabolisme qui s'est opéré au niveau de chaque cellule.

L'excrétion de matières fécales correspond en revanche plutôt à l'échelle de l'individu dans son ensemble puisqu'elle est principalement la résultante de la traversée des aliments dans le système digestif humain⁴². L'excrétion de matières fécales se distingue encore, de ce point de vue, des autres excrétiens précédemment mentionnées. Les résidus alimentaires et les microorganismes que l'on retrouve dans les matières fécales n'ont d'ailleurs pas pénétré, *stricto sensu*, à l'intérieur du corps humain. Cela les distingue radicalement du gaz carbonique expiré ou de l'urée urinaire qui sont le produit de la digestion effective des aliments et du remplacement de molécules du corps humain par des molécules exogènes ingérées et digérées. La figure suivante (Figure 1.11) permet de schématiser ces échelles imbriquées du métabolisme du corps humain en simplifiant les cinq échelles de Wang à deux échelles : cellule (et échelles inférieures moléculaires et atomiques) et corps humain (et échelle inférieure des tissus).

⁴² Seule la bilirubine, issue de la dégradation des globules rouges, constitue réellement un produit d'excrétion de catabolite du corps humain par les matières fécales mais elle est minoritaire dans la composition des matières fécales (Sherwood *et al.*, 2013).

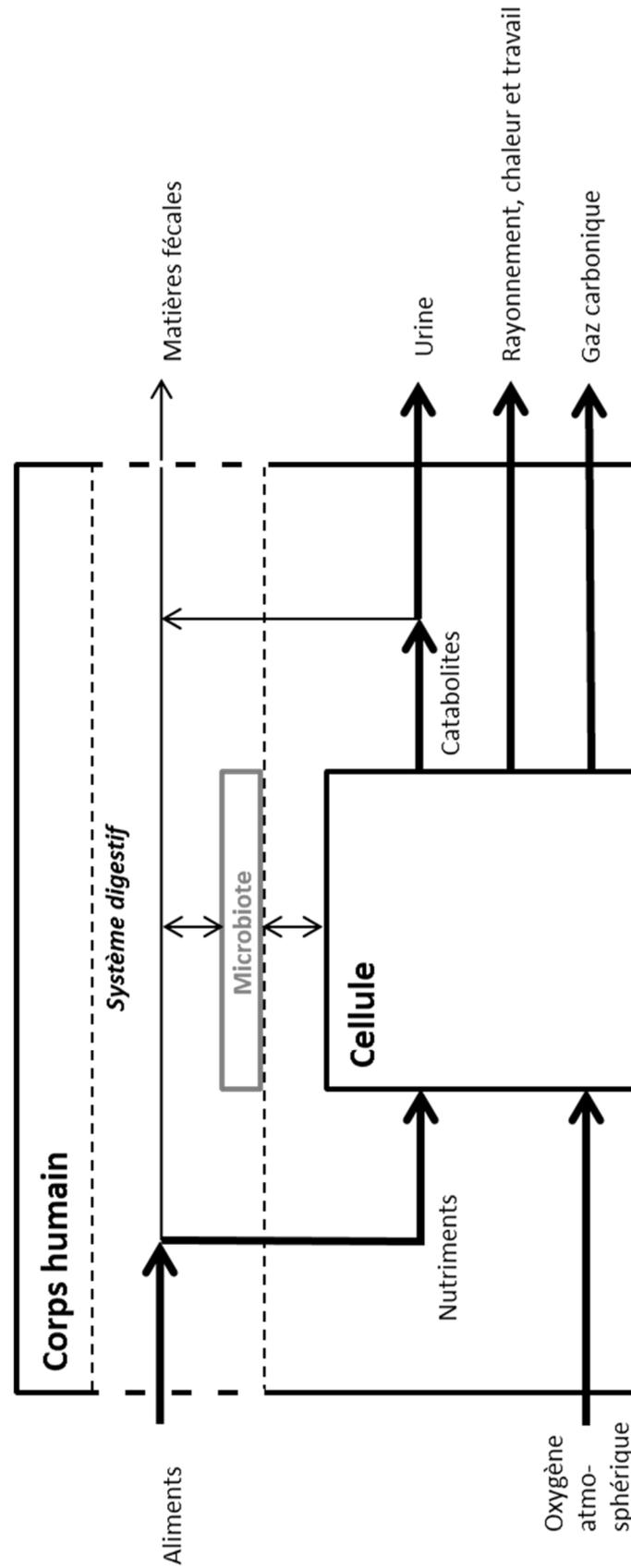


Figure 1.11 : Échelles imbriquées du métabolisme humain et flux de matière et d'énergie correspondants.

Enfin, on retiendra également que d'un point de vue de la stricte physiologie humaine, il n'y a pas réellement d'importance supérieure du prélèvement par rapport à l'excrétion. Ces deux facettes de l'interaction des êtres humains avec leur environnement sont tout aussi nécessaires l'une que l'autre et sont consubstantielles au fait même de vivre. On mourrait tout autant de l'impossibilité de s'alimenter que de l'impossibilité d'uriner. On en fait d'ailleurs l'expérience quotidienne par l'impérieux besoin d'uriner que notre corps nous fait ressentir, au moins autant que le besoin de boire ou de manger.

1.2.2. Alimentation

L'étude de l'alimentation des êtres humains peut relever de très nombreuses disciplines scientifiques. Nous allons ici l'analyser principalement sous un angle biogéochimique de comptabilité de flux de substances ; néanmoins il est essentiel de garder à l'esprit que l'alimentation relève tout autant d'un fait socio-culturel et que les modalités d'alimentation des différentes sociétés humaines peuvent également être appréhendées par les aspects immatériels qui les induisent. L'inscription du repas gastronomique à la française à la liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité par l'UNESCO en 2010 illustre d'ailleurs l'importance de ces aspects immatériels, tout particulièrement en France. En outre, hormis pour les sociétés de chasseurs-cueilleurs, le lien de l'alimentation avec les systèmes agricoles et agro-alimentaires est évident et les modalités d'organisation de la production agricole influenceront les régimes alimentaires et *vice versa*. Si le caractère omnivore de l'être humain lui laisse *a priori* un large choix dans la nature de son alimentation, de très nombreux déterminants sociaux, culturels, historiques et économiques participent à expliquer la nature des régimes alimentaires des différentes sociétés (Armelagos, 2014).

1.2.2.1. Évaluation du régime alimentaire au regard des besoins physiologiques

Comme nous l'avons vu à la section précédente (section 1.2.1), le régime alimentaire doit permettre de soutenir le métabolisme énergétique et de biosynthèse du corps humain. Les besoins physiologiques minimaux auxquels le régime alimentaire doit permettre de répondre varient fortement en fonction des multiples interactions entre la nature des aliments ingérés, la physiologie des différentes personnes, l'âge, le climat, les interactions des différents nutriments ingérés entre eux, les activités d'une population, etc. En outre, au-delà de la consommation de protides, lipides et glucides que nous avons présentée à la section précédente, la nutrition humaine relève d'une finesse beaucoup plus grande de typologie de nutriments (nature des protides, lipides et glucides, vitamines, etc.). Nous nous cantonnerons ici à une analyse simplifiée du régime alimentaire en se fondant principalement sur les apports hydriques, les lipides, les glucides et les protides. Ceux-ci peuvent être appréhendés par trois valeurs : la siccité de l'alimentation, les apports énergétiques et la quantité d'azote. Nous reprenons ici

les résultats, issus de la méthodologie explicitée à la sous-section 1.2.1.1, qui nous permettent d'évaluer le régime alimentaire d'un habitant théorique moyen de l'Île-de-France (cf. Figure 1.10).

Nos calculs de siccité des aliments permettent également d'analyser de façon globale le régime alimentaire sous forme de bilan massique différencié entre les apports hydriques et les apports de matière sèche. Il nous paraît intéressant de noter le faible taux de siccité des aliments puisque ce taux moyen est de 16 % (2 565 g/pers/j de nourriture ingérée dont seulement 410 g/pers/j de matière sèche). Nous proposons de regrouper les différents aliments en trois catégories en fonction de leur siccité ce qui permet de faire ressortir le régime alimentaire quotidien comme composé de⁴³ :

- 730 g d'eau de boisson ;
- 1 120 g d'aliments à siccité faible (comprise entre 1 % et 16 %) correspondant à seulement 80 g de matière sèche. Ces aliments sont :
 - les aliments liquides à l'exclusion des aliments non aqueux tels que les huiles. Par ordre croissant de siccité, ils sont catégorisés dans l'étude INCA 2 en café, boissons alcoolisées, autres boissons chaudes, soupes et bouillons, boissons rafraîchissantes non alcoolisées et lait ;
 - trois types d'aliments solides ou pâteux mais à très forte teneur en eau à savoir les légumes (hors pommes de terre), les fruits et l'ultra-frais laitier (yaourts et assimilés).
- 720 g d'aliments à siccité élevée (supérieure à 20 %) correspondant à 330 g de matière sèche.

En termes énergétiques, nous avons vu que les apports alimentaires du régime que nous étudions sont de 100 W/pers. Ce régime est plus particulièrement caractérisé par une proportion élevée de la part des lipides dans les apports énergétiques puisque ceux-ci représentent 39 % des apports énergétiques (hors alcool) contre 44 % pour les glucides et 19 % pour les protides (AFSSA, 2009). Les recommandations sur les apports énergétiques sont de 114 W/pers pour les adultes (ANSES, 2017) ce qui place ce régime comme relativement équilibré d'un point de vue de l'énergie totale consommée.

Pour l'azote, nous avons vu à la sous-section 1.2.1.1 que les excréments obligatoires d'azote du corps humain sont de 3,3 g/pers/j. Les recommandations de l'OMS sur les quantités d'azote à ingérer en

⁴³ Pour mémoire, les coefficients de variation de l'étude INCA 2 sont aux alentours de 30 % pour les principales catégories de nutriments. Ils sont assez logiquement beaucoup plus importants pour les différents groupes d'aliments (par exemple 73 % pour l'eau de boisson).

moyenne sont plus de deux fois plus élevées et s'élèvent à 7,4 g/pers/j⁴⁴ et les besoins de sécurité, qui sont évalués comme correspondant à la satisfaction des besoins de 97,5 % d'une population, sont près de trois fois plus élevés et valent 9,3 g/pers/j (OMS, 2007). Cette valeur rejoint celle de l'HCSP (2000) qui recommande une consommation de 9,0 g/pers/j.

On constate immédiatement que ce régime alimentaire est particulièrement riche en azote par rapport à ces recommandations puisqu'il fournit des apports azotés correspondant à 140 % des recommandations indiquées ci-dessus (percentile 97,5). Si l'on prend les besoins moyens d'une population plutôt que le percentile 97,5, ce qui correspond mieux à l'évaluation des flux alimentaires que nous avons effectuée précédemment pour un habitant théorique moyen, on aboutit même à une valeur largement supérieure de 180 %.

En outre, ce régime est caractérisé par une teneur élevée d'azote d'origine animale. Toujours sur la base des données de l'étude INCA 2, nous évaluons la proportion d'azote d'origine animale à 69 % dans ce régime et la proportion d'azote provenant de la consommation de viande à 43 % (cf. également plus loin Tableau 3.4). Les recommandations officielles françaises du PNNS sont de consommer trois produits laitiers par jour et une à deux fois de la viande ou du poisson (ANSES, 2017). On notera toutefois que le régime alimentaire végétalien est physiologiquement possible⁴⁵. Contrairement aux apports quantitatifs d'eau, d'énergie et d'azote, dont les apports minimaux à assurer relèvent d'une nécessité physiologique, la nature animale ou végétale des produits alimentaires nous paraît pouvoir varier de 0 à 100 %.

Une autre façon de quantifier la part et la nature des produits animaux dans le régime alimentaire consiste à évaluer le positionnement de l'être humain en termes de niveau trophique. Cette méthodologie, très utilisée dans l'analyse des écosystèmes, n'a été appliquée aux êtres humains que très récemment (Bonhommeau *et al.*, 2013). Un végétalien est au niveau trophique 2 puisqu'il se nourrit exclusivement de végétaux (niveau trophique 1). Bonhommeau *et al.* évaluent le niveau trophique moyen de l'humanité à 2,21, en croissance de 3 % par an depuis 1961, et celui des pays occidentaux aux alentours de 2,4.

⁴⁴ En prenant un poids moyen de 70 kg.

⁴⁵ Dans les régimes pauvres en produits d'origine animale, il convient de veiller à l'équilibre des acides aminés essentiels apportés et à divers nutriments tels que la vitamine B12 ou le fer.

1.2.2.2. Évolution historique du régime alimentaire

Ces caractéristiques du régime alimentaire d'un habitant théorique moyen de l'Île-de-France sont le fruit d'une longue évolution historique. La part importante des lipides dans l'alimentation est ainsi relativement récente et résulte, en France, d'une transition nutritionnelle opérée sur un siècle depuis 1880-1890 selon Combris (2006) (Figure 1.12).

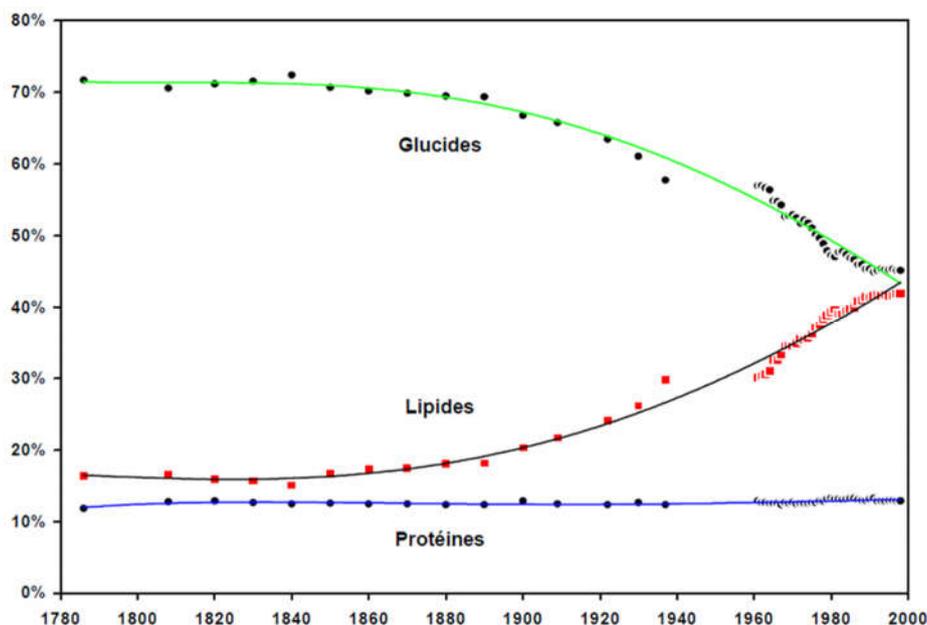


Figure 1.12 : Transition nutritionnelle française dans la structure des apports énergétiques.

Source : Combris (2006).

La quantité totale d'azote ingéré et sa proportion d'origine animale a également fortement évolué depuis deux siècles en France. En reprenant les données que nous avons compilées dans Le Noë *et al.* (soumis), issues de Toutain (1971) pour la période 1785-1962 et de la FAO pour la période 1961-2013, on peut évaluer l'évolution de la consommation alimentaire française au travers de la quantité totale d'azote et de la proportion de cet azote provenant des différents types d'aliments ici répartis en trois catégories : produits animaux terrestres, produits de la mer et végétaux (Figure 1.13). On notera que la consommation alimentaire ici représentée ne correspond pas strictement au régime alimentaire puisqu'elle correspond aux denrées mises sur le marché desquelles il convient de retirer les biodéchets afin de connaître la part réellement ingérée.

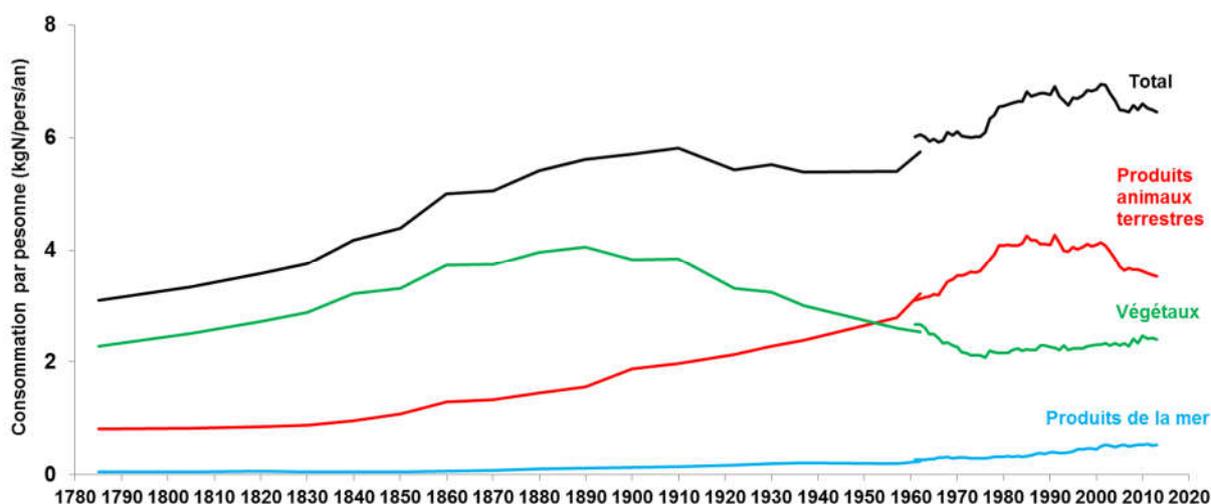


Figure 1.13 : Évolution du régime alimentaire français depuis 1785 analysé en termes du contenu azoté de la consommation apparente.

Source : données compilées dans Le Noë *et al.* (soumis).

Données Toutain (1971) pour la période 1785-1962 et FAO pour la période 1961-2013.

On constate ainsi que le régime alimentaire moyen français de la fin du XVIII^e siècle est très proche du besoin physiologique moyen donné par l'OMS (2,7 kgN/pers/an) et qu'il est constitué d'environ 75 % de produits végétaux. Dès le milieu du XIX^e siècle, avec un taux de produits végétaux toujours aux alentours de 75 %, la quantité totale d'azote disponible est significativement supérieure au besoin physiologique et correspond donc *a priori* à une situation nutritionnelle satisfaisante de ce point de vue. Jusqu'à la fin du XX^e siècle, la quantité totale d'azote va globalement croître et la proportion d'azote d'origine animale va passer de 25 % en 1850 à 67 % au début des années quatre-vingts⁴⁶.

Cette évolution du régime alimentaire traduit une évolution globale des régimes alimentaires selon la richesse des pays. Billen *et al.* (2013) ont ainsi montré que la quantité totale d'azote de la consommation apparente des différents pays, ainsi que la proportion d'azote d'origine animale était corrélée au produit intérieur brut (Figure 1.14). Bonhommeau *et al.* (2013) arrivent à des conclusions similaires et montrent également la corrélation des régimes alimentaires avec l'espérance de vie, les émissions de CO₂ et le taux de population urbaine.

⁴⁶ Cette valeur est très proche de la valeur de 69 % que nous trouvons dans le régime alimentaire français par l'étude INCA 2.

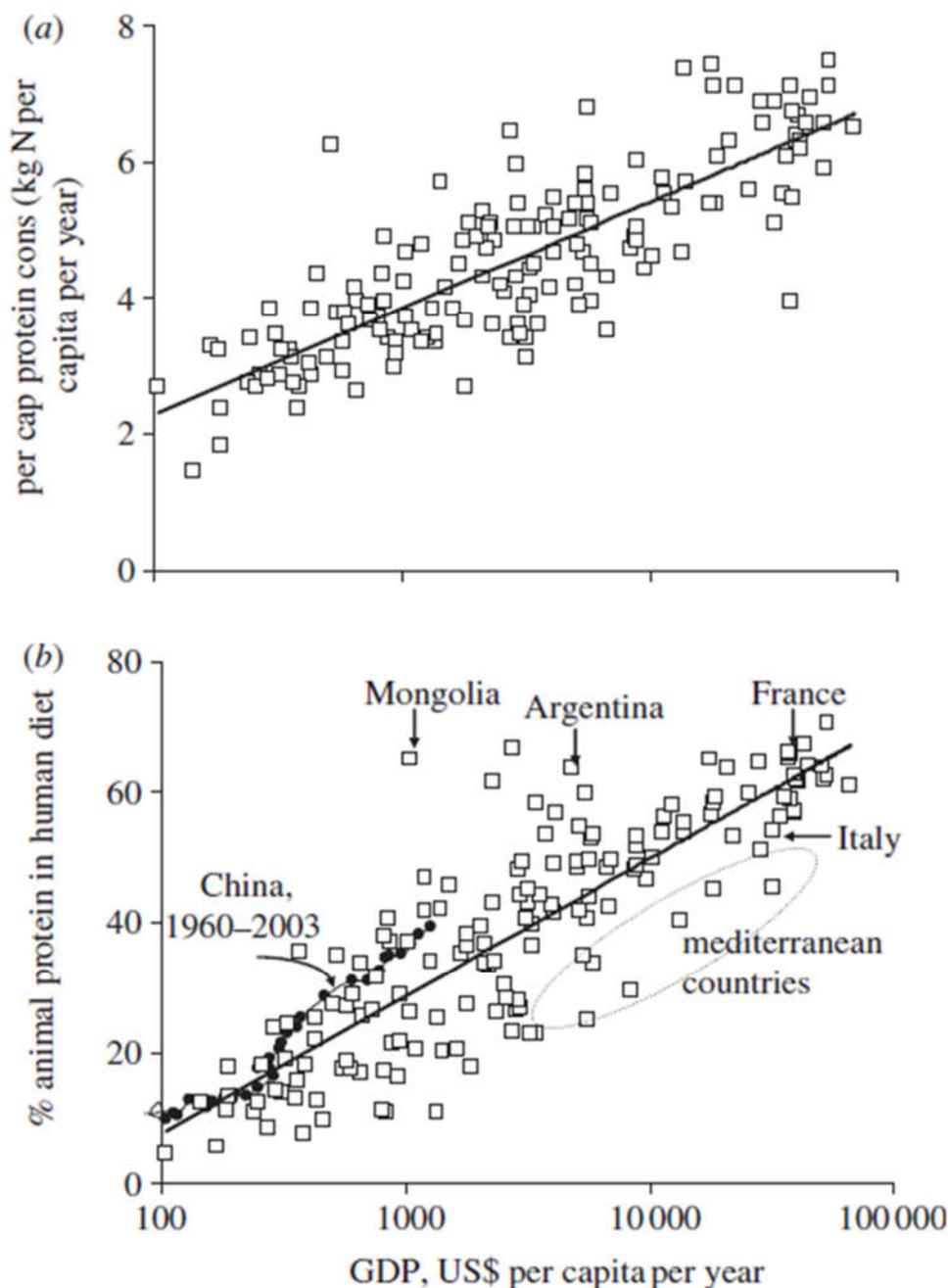


Figure 1.14 : Relation entre le produit intérieur brut et (a) la consommation d'azote par personne et (b) la proportion d'azote d'origine animale dans le régime alimentaire.

Source : Billen *et al.* (2013).

Finalement, le régime alimentaire riche en protéines et avec une proportion élevée de protéines d'origine animale correspond au modèle de développement de la société occidentale et de nombreux pays s'en rapprochent actuellement. La soutenabilité de ce régime alimentaire en termes des empreintes environnementales induites au niveau du système agricole pose toutefois question. Ainsi, aujourd'hui en Europe, la quantité d'azote réactif émis dans l'environnement pour produire un kilogramme d'azote alimentaire varie presque d'un facteur cent entre les productions les moins

polluantes (les légumineuses – 150 gN rejeté) et les productions les plus polluantes (la viande de bœuf – 12.000 gN rejeté) (Westhoek *et al.*, 2015). De nombreux auteurs proposent ainsi un régime alimentaire soutenable et équitable réduisant la quantité totale de protéines ingérées et la proportion de protéines d'origine animale (Billen *et al.*, 2015 ; van Grinsven *et al.*, 2015 ; Solagro, 2016 ; Billen *et al.*, 2017a ; Seconda *et al.*, 2017 ; Muller *et al.*, 2017). Une telle proposition a fait l'objet d'une déclaration formelle en 2009, à Barsac, sous le nom de régime demitarien car elle consiste globalement à diviser par deux la quantité de protéines d'origine animale du régime alimentaire occidental⁴⁷. On constate Figure 1.13 qu'une évolution en ce sens est actuellement à l'œuvre en France et correspond peut-être au début d'une tendance globale d'orientation vers un régime demitarien.

1.2.3. Excrétion

Nous avons souligné à la sous-section 1.2.1.1 l'importance massique de l'expiration de dioxyde de carbone et d'eau dans les excréments humains. Ces deux matières excrétées sont toutefois peu importantes dans la problématique de cette thèse et nous nous concentrerons dans cette section sur les excréments d'urine et de matières fécales ainsi que, plus succinctement, sur les diverses autres excréments.

1.2.3.1. Urine

Comme représenté dans la Figure 1.10 et explicité à la sous-section 1.2.1.1, l'excrétion principale des êtres humains est, en masse, l'excrétion urinaire⁴⁸. Le rein est l'organe principal de régulation du système urinaire puisque l'urine y est produite. L'urine est constituée d'eau à 95 % d'après Friedler *et al.* (2013) et cette excrétion d'eau permet l'évacuation de métabolites. Nous avons insisté à la sous-section 1.2.1.1 sur l'importance de l'azote dans l'urine humaine du fait de notre uréotélie et de l'incapacité du rein humain à concentrer très fortement l'urée dans l'urine. Cette évacuation sélective de l'urée concerne également d'autres molécules organiques que le corps ne peut pas réutiliser ou métaboliser et qu'il excrète par l'urine :

- d'autres composés azotés dont les principaux sont la créatinine (ainsi que la créatine dont elle est le produit de dégradation) et l'acide urique, issu de la dégradation de l'azote purique ;
- diverses molécules organiques, sous la forme chimique d'alcools, d'alcènes, d'alcyènes, de protéines, etc. (Kuntke, 2003).

⁴⁷ On pourra consulter cette référence sur le site internet du réseau NinE (www.nine-esf.org).

⁴⁸ Légèrement supérieure dans notre bilan à l'expiration.

Ces molécules peuvent être elles-mêmes issues du métabolisme humain, comme par exemple les hormones, ou provenir de l'ingestion et être excrétées car identifiées comme inutilisables voire dangereuses par l'organisme comme par exemple les alcaloïdes alimentaires ou les médicaments, sous une forme éventuellement différente de la forme ingérée.

L'autre fonction principale du système urinaire est une fonction de régulation du volume et de la composition du fluide extra-cellulaire. Cette fonction est cruciale pour permettre la vie en dehors de l'eau car les échanges d'eau et de sels (comme ceux d'azote ammoniacal) sont beaucoup plus complexes pour les organismes aériens par rapport aux organismes aquatiques. Comme tous les vertébrés terrestres, les êtres humains doivent réguler l'eau et les électrolytes du fluide extracellulaire dans une fourchette étroite compatible avec les besoins des cellules et cette fonction est assurée par le système urinaire qui régule ainsi la concentration en solutés inorganiques, le volume d'eau plasmatique et l'équilibre osmotique et acido-basique (Sherwood *et al.*, 2013).

Notons également deux caractéristiques de la régulation urinaire :

- elle permet plus facilement de gérer l'excès que la pénurie, c'est-à-dire que l'organisme excrétera plus d'eau ou plus de molécules organiques ou inorganiques en cas d'excès alors que les capacités de rétention en cas de déficit sont plus limitées. Cette caractéristique physiologique induit que les recommandations sanitaires auront tendance à favoriser une alimentation supérieure aux besoins physiologiques afin de garantir l'absence de carence. Comme nous l'avons vu dans le cas du régime demitarien, les enjeux d'empreinte environnementale peuvent jouer en sens inverse et nécessitent donc de trouver un équilibre entre recommandations sanitaires et enjeux environnementaux de l'alimentation et de l'excrétion⁴⁹, comme dans de nombreux autres domaines ;
- elle intervient en continu dans le corps humain mais, dans le système urinaire, la vessie sert de stockage temporaire de l'urine. L'évacuation de l'eau et des solutés urinaires intervient donc de façon fractionnée dans la journée en fonction du remplissage de la vessie.

La fréquence des mictions urinaires, leur volume et leur composition sont ainsi extrêmement variables en fonction des individus, des substances ingérées, du climat, de l'activité physique, de la période de la journée, etc. Dans une perspective générale de bilan de masse du métabolisme humain comme nous

⁴⁹ Les excès alimentaires, qui peuvent être sources de problèmes de santé comme dans l'obésité, jouent aussi en faveur d'une modération sanitaire du régime alimentaire.

l'avons fait Figure 1.10 et comme nous le ferons dans la suite de cette thèse, nous pouvons toutefois donner quelques caractéristiques générales de l'urine, en particulier en contexte occidental.

L'urine est la voie de sortie majoritaire de l'azote ingéré : la quantité d'azote excrété par les urines peut donc être correctement approchée par la connaissance du régime alimentaire et l'application d'un coefficient de 85 % - 90 % d'azote excrété par les urines, donné par de nombreux auteurs et indiqué comme valable de façon relativement indépendante de la nature du régime alimentaire, ce qui s'explique bien par les mécanismes physiologiques que nous avons décrits précédemment (Larsen & Gujer, 1996 ; OMS, 2012a ; Rose *et al.*, 2015). Dans la plupart des contextes occidentaux, on peut ainsi considérer que la concentration en azote total de l'urine humaine avoisine 9 gN/L mais cette valeur variera très fortement selon les quantités d'azote ingéré et le bilan hydrique du corps. Udert *et al.* (2006) donnent par exemple $9,2 \text{ gN/L} \pm 20 \%$ et Friedler *et al.* (2013) $8,7 \text{ gN/L}$ avec une fourchette de [3;16]. L'urine est usuellement plus concentrée le matin que durant le reste de la journée. Dans le stage de Master 2 que nous avons encadré, nous avons ainsi trouvé des valeurs de $5,7 \text{ gN/L} \pm 3,1$ sur 83 échantillons d'urine masculine collectés durant la journée pour un volume de $310 \text{ mL} \pm 130$ (Smail, 2016). Rose *et al.* (2015) indiquent un nombre de mictions urinaires quotidiennes d'environ six, très variable également selon les situations.

La quantité des autres éléments chimiques retrouvés dans les urines dépendra des phénomènes physiologiques de leur assimilation et de leur excrétion. Ainsi, pour le phosphore, sa présence sous forme de phytates difficilement digestibles (cf. sous-section 1.2.1.2) induit une présence plus importante que pour l'azote dans les matières fécales, variable selon la nature du régime alimentaire et entre autres de sa richesse en végétaux. En Occident, la proportion de phosphore dans les urines par rapport aux matières fécales avoisine 60 % (Friedler *et al.*, 2013 ; Rose *et al.*, 2015), presque exclusivement sous forme de phosphate inorganique (Udert *et al.*, 2006). Le potassium, régulé par l'urine en tant qu'électrolyte des fluides corporels, est majoritairement émis dans les urines – à 75 % d'après Friedler *et al.* (2013). On trouvera une revue assez complète de la composition de l'urine pour les différents éléments chimiques dans Karak & Bhattacharyya (2010) et dans Rose *et al.* (2015). Les métaux sont dans des concentrations majoritairement inférieures à 1 mg/L, souvent un ordre de grandeur en-dessous des métaux présents dans les urines d'animaux d'élevage, du fait de leur complémentation alimentaire en métaux (Ronteltap *et al.*, 2007 ; Jönsson & Vinnerås, 2013). La présence de résidus médicamenteux et de leurs métabolites dans l'urine a été étudiée en détails par Winker (2009) dans l'urine allemande, avec des concentrations globalement inférieures à 1 mg/L mais bien sûr très dépendantes des individus et de la période. Une base de données du métabolome urinaire donne également des teneurs pour plus de trois mille substances différentes détectées dans les urines (Bouatra *et al.*, 2013).

Enfin, la stérilité de l'urine chez l'individu sain a longtemps été admise par la communauté scientifique. Depuis quelques années, les techniques de détection de microorganismes par l'analyse de l'ADN ont toutefois permis de mettre au jour l'existence d'un microbiote urinaire chez l'individu sain. Lewis *et al.* (2013) recensent ainsi 94 genres de microorganismes détectables dans le microbiote urinaire de l'individu sain. Après excrétion, ce microbiote est toutefois *a priori* négligeable par rapport à la présence de microorganismes dans l'environnement. Diverses maladies peuvent entraîner la présence d'agents pathogènes dans les urines. En climat tempéré, aucun de ces agents n'est rapporté comme susceptible d'être à l'origine de contaminations après recueil sélectif des urines et les urines peuvent donc être considérées comme salubres (OMS, 2012a)⁵⁰. Elles sont également très peu odorantes à l'excrétion.

1.2.3.2. Matières fécales

Après l'expiration et la miction urinaire, la défécation est la troisième voie d'excrétion du corps humain (évaluée en masse de matière sèche). Les matières fécales⁵¹ sont toutefois très différentes, dans leur rôle physiologique, par rapport à ces deux autres voies d'excrétion, car seule la bilirubine⁵², minoritaire au sein des matières fécales, constitue une réelle excrétion du métabolisme du corps humain, le reste étant plutôt un résidu de la digestion non assimilé (fibres), une partie du microbiote intestinal – jusqu'à 55 % des matières sèches des matières fécales d'après Rose *et al.* (2015) – et

⁵⁰ Seule une douve (*Schistosoma haematobium*), helminthe parasite, dont la présence est endémique à 74 pays de la zone tropicale, nécessite d'être pris en compte mais sa dépendance aux escargots aquatiques du genre *Bulinus* dans son cycle de vie induit que le cycle infectieux sera interrompu dès lors que les urines ne rejoignent pas des étendues d'eau où vivent ces escargots (OMS, 2012a).

⁵¹ Nous avons opté pour l'emploi systématique du terme « matières fécales » qui, à l'usage, s'est avéré beaucoup plus clair, compréhensible et sans ambiguïté de prononciation pour la majorité des personnes que le synonyme « fèces » (malgré la brièveté pratique de ce dernier terme). Le terme excréments désigne de façon ambiguë soit les matières fécales, soit l'ensemble des excréments du corps humain. Nous préférons donc l'emploi du terme « excréments » pour désigner l'ensemble des excréments d'un système (corps humain, ville, etc.). Nous avons opté pour une orthographe francisée plutôt que latine (*excreta*) de ce terme dont l'usage et l'orthographe sont encore peu stabilisés (cf. par exemple l'orthographe difficilement compréhensible « excréta » adoptée dans l'arrêté du 21 août 2008 relatif à la récupération des eaux de pluie et à leur usage à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments).

⁵² Les hémoglobines, dont le produit de dégradation est la bilirubine, ont ainsi un rôle fondamental dans la pigmentation des fluides corporels puisqu'ils donnent leur couleur rouge au sang, marron aux matières fécales et jaune à l'urine – et verte pour les excréments des oiseaux et des reptiles du fait que l'hémoglobine est dégradée en biliverdine (Sherwood *et al.*, 2013).

diverses substances relictuelles issues du processus digestif. Les matières fécales seront ainsi un peu plus importantes dans les régimes alimentaires riches en matières fibreuses.

Les matières fécales contiennent nettement moins de matière sèche que l'urine : 29 g/pers/j contre 59 g/pers/j (Rose *et al.*, 2015). Cette réalité est usuellement mal perçue du fait du caractère liquide des urines et du caractère pâteux des matières fécales mais les matières fécales représentent dix fois moins de matière que les urines (en masse : 128 g/pers/j) pour un taux d'humidité élevé d'environ 75 % (*ibid.*). Ce résultat est d'autant plus remarquable que nous avons vu que la quantité totale de nourriture absorbée est d'environ 2,6 kg/pers/j et que la quantité totale de sucs digestifs utilisés par le corps humain avoisine 7 kg (Sherwood *et al.*, 2013). Les matières fécales constituent donc un reliquat d'environ 1 % du flux total d'intrants du système digestif. Nous proposons de marquer ce fait important dans la maxime suivante (Maxime 3).

Maxime 3 : « Le corps humain excrète deux fois plus de substances par les urines que par les matières fécales »

Les matières fécales sont une voie d'excrétion de l'azote environ neuf fois moins importante que l'urine. Elles ont en revanche une DBO et une DCO deux à trois fois plus importante que les urines – 12 gDBO₅/pers/j et 31 gDCO/pers/j d'après Friedler *et al.* (2013).

L'autre caractéristique principale des matières fécales est de contenir un grand nombre de microorganismes issus du microbiote intestinal, dont un certain nombre peut être pathogène même chez l'individu sain, et d'être également une voie importante d'excrétion de divers agents pathogènes chez les individus sains et malades. Le tableau suivant (Tableau 1.4) donne une illustration des agents pathogènes potentiellement présents dans les matières fécales et des maladies et symptômes associés (OMS, 2012a).

Tableau 1.4 : Exemples d'agents pathogènes pouvant être excrétés dans les matières fécales et maladies & symptômes associés.

Source : OMS (2012a).

Groupe	Pathogène	Maladie et symptômes
Bactéries	<i>Aeromonas</i> spp.	Entérite
	<i>Campylobacter jejuni/coli</i>	Campylobactériose – diarrhée, crampes, douleurs abdominales, fièvre nausée, arthrite; syndrome de Guillain-Barré
	<i>Escherichia coli</i> (EIEC, EPEC, ETEC, EHEC)	Entérite
	<i>Plasmodium shigelloides</i>	Entérite
	<i>Salmonella typhi/paratyphi</i>	Fièvre typhoïde/paratyphoïde – maux de tête, fièvre, malaise, anorexie, bradycardie, splénomégalie, toux
	<i>Salmonella</i> spp.	Salmonellose – diarrhée, fièvre, crampes abdominales
	<i>Shigella</i> spp.	Shigellose – dysenterie (diarrhée sanglante), vomissements, crampes, fièvre; syndrome de Reiter
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cholera – diarrhée aqueuse, létale dans les cas graves et non traités
	<i>Yersinia</i> spp.	Yersiniose – fièvre, douleur abdominale, diarrhée, douleurs articulaires, rash
	Virus	Adénovirus entérique 40 et 41
Astrovirus		Entérite
Calicivirus (norovirus, notamment)		Entérite
Coxsackievirus		Divers : affection respiratoire; entérite; méningite virale
Echovirus		Méningite aseptique; encéphalite; souvent asymptomatique
Entérovirus types 68–71		Méningite; encéphalite; paralysie
Virus de l'hépatite A		Hépatite – fièvre, malaise, anorexie, nausée, gêne abdominale, ictère
Virus de l'hépatite E		Hépatite
Poliovirus		Poliomyélite – souvent asymptomatique, fièvre, nausée, vomissement, maux de tête, paralysie
Rotavirus		Entérite
Protozoaires parasites	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Cryptosporidiose – diarrhée aqueuse, crampes et douleurs abdominales
	<i>Cyclospora cayetanensis</i>	Souvent asymptomatique; diarrhée, douleur abdominale
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Amibiase – souvent asymptomatique; dysenterie, gêne abdominale, fièvre, frissons
	<i>Giardia intestinalis</i>	Giardiase – diarrhée, crampes abdominales, malaise, perte de poids
Helminthes	<i>Ascaris lumbricoides</i> (ver rond)	Ascariadiase – généralement a- ou paucisymptomatique; respiration sifflante, toux, fièvre, entérite, éosinophilie pulmonaire
	<i>Taenia solium/saginata</i> (ver plat)	Taeniase
	<i>Trichuris trichiura</i> (trichocéphale)	Trichiuriase – d'asymptomatique (vague détresse du tractus digestif) à l'émaciation avec peau sèche et diarrhée
	<i>Ancylostoma duodenale</i> / <i>Necator americanus</i> (ver à crochets)	Prurit, rash, toux, anémie, déficience protéique
	<i>Schistosoma</i> spp. (douve)	Schistosomiase, bilharziose

Enfin, le système digestif est également à l'origine d'émissions gazeuses, dont une partie est expirée par le système respiratoire, et l'autre est excrétée par l'anus – entre 0,4 et 2,1 L/pers/j (Sahakian *et al.*, 2010). En bilan massique, ces excréments sont bien entendu très faibles. Muñoz *et al.* (2007) estiment ainsi que moins de 0,1 % du carbone ingéré est émis par l'organisme sous forme de méthane. Ce majorant est confirmé par les données de Sahakian *et al.* (2010). Le processus de production de méthane, lié à la présence d'archées méthanogènes dans le microbiote intestinal, est beaucoup plus faible que chez les ruminants. Une partie de la population ne produirait d'ailleurs pas du tout de méthane⁵³. On notera également l'importance du dihydrogène qui constitue 20 % des émissions gazeuses anales.

1.2.3.3. Autres excréments

Les autres voies d'excrétion du corps humain que les urines et les matières fécales sont très variées en nature mais peu importantes en flux de matière. Les éléments stockés dans le corps humain peuvent ne pas être négligeables par rapport aux flux alimentaires (Tableau 1.3). Leur devenir sera lié aux modalités de gestion du corps après la mort⁵⁴. Les expirations gazeuses d'azote sous forme d'ammoniac sont négligeables et constituent moins de 0,1 % des flux alimentaires d'azote – calculé d'après Sutton *et al.* (2000).

Adapté et complété d'après Trelaün (1983), nous proposons de synthétiser les diverses excréments liquides et solides du corps humain, en grande partie tégumentaires, dans le tableau suivant (Tableau 1.5).

⁵³ Les enfants de moins de trois ans n'émettent apparemment pas de méthane. Il était usuellement admis que les méthanogènes ne représentaient qu'un tiers de la population mais Sahakian *et al.* (2010) estiment que ce ratio est vraisemblablement plus proche des trois quarts.

⁵⁴ On notera l'existence de mouvements qui prônent l'« humusation » des corps afin que les corps humains soient réintégrés dans les cycles biogéochimiques après la mort (cf. par exemple le site internet d'une fondation belge www.humusation.org).

Tableau 1.5 : Excrétions liquides et solides du corps humain.

Adapté et complété de Trelaün (1983).

Localisation Type	Générale	Tête hors bouche	Bouche	Entre-jambe
Support vital	Lait			Sperme ; menstruations ; mucus génitaux ; placenta
Agents à faible taux de renouvellement	Ongles ; poils	Cheveux ; barbe	Dents de lait	Poils pubiens
Excrétion liquide courante	Sueur	Larmes	Salive (crachée)	Urine
Excrétion solide courante	Sébum ; peaux mortes	Cérumen ; pellicules	Résidus du brossage de dents	Matières fécales
Excrétion épisodique/ accidentelle	Sang ; pus ; lymphe	Mucus nasal ; mucus oculaire	Vomissure ; mucus bronchique	Diarrhée

Une évaluation approximative du bilan massique de ces différentes excrétions les situe individuellement, pour les plus importantes, dans un ordre de grandeur de 0,1 % des flux alimentaires. Nous proposons de considérer qu'elles représentent dans leur ensemble environ 1 % des flux alimentaires en moyenne annuelle. Seules les excrétions tégumentaires d'azote sont indiquées comme plus importantes par Sutton *et al.* (2000), principalement par la sueur, qui les estime aux environs de 0,3 gN/pers/j soit 2 à 3 % des flux azotés alimentaires.

En conclusion, comme nous l'avons représenté de façon simplifiée dans la Figure 1.10, l'ensemble des excrétions humaines est bien largement dominé par l'expiration et l'urine pour la majorité des éléments chimiques. Les matières fécales sont moins importantes mais non négligeables et les autres excrétions sont quasiment négligeables.