

# De la nutrition

## Prologue I, la nutrition dans le vivant en général

©Amanuensis

2024/04/26

Lien de publication de la version courante:

<http://www.lahri.org/public/Nutrition-vivant.pdf>

Textes et dessins, ©Amanuensis

Commentaires: Pas encore posté sur FS

Contact avec l'auteur: amanuensis at lahari.org

Ma référence : Nutrition-vivant - v0.6

# Sommaire

Le vivant . . . . .	2
Matière . . . . .	2
Énergie . . . . .	3
La palette trophique du vivant . . . . .	6
L'indépendance au reste du vivant . . . . .	7
La totale dépendance au reste du vivant . . . . .	9
Vue d'ensemble . . . . .	10
La biophagie . . . . .	10
Pertes fonctionnelles . . . . .	11
Les animaux . . . . .	12
Résumé . . . . .	12

## Le vivant

Un aspect essentiel de la vie sur Terre est la notion de croissance d'un organisme vivant. Pour croître, c'est à dire augmenter en masse tout en respectant une certaine structure, un organisme a besoin de deux choses: de la matière (des atomes), qui va être intégrée à la structure après traitement, et de l'énergie, nécessaire au traitement.

La nutrition au sens large est l'acquisition de la matière et de l'énergie nécessaires, en couvrant toute la variation que le vivant présente, dont les végétaux ou des unicellulaires. Par exemple cela inclut l'acquisition de gaz comme le dioxygène ou le dioxyde de carbone, ou de molécules dissoutes dans l'eau. Cela élargit la notion de nutrition au sens courant, qui se limite aux solides (à la rigueur les liquides) qui sont traités par le tube digestif de la plupart des animaux qui en sont équipés (bilatériens), ce qui inclut l'espèce humaine.

## Matière

La constitution chimique des organismes vivants est principalement de l'eau et des molécules complexes composées surtout d'atomes de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et

d'azote. S'y ajoutent en plus faibles quantités d'autres espèces atomiques comme phosphore, soufre, chlore, ou encore des métaux, souvent sous forme ionique (sodium, potassium, zinc, fer, cuivre, ...).

L'eau et les atomes utilisés en grande quantité par le vivant sont disponibles aisément dans l'environnement terrestre. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et le diazote ( $\text{N}_2$ ) sont parmi les constituants principaux de l'hydrosphère et l'atmosphère terrestres, là où prospère le vivant, et sont ainsi sources des éléments principaux, H, C, O et N. Les minéraux de la croûte terrestre fournissent le reste.

Il « suffit », pour le vivant, de récupérer puis ré-agencer (réactions chimiques) les atomes de ces matériaux pour grossir. Pour cela il faut toute la machinerie guidant ces réagencements, machinerie qui fait partie de la structure du vivant. Il faut aussi « consommer » de l'« énergie » pour faire tourner la machinerie.

Si O et H sont disponibles à partir de l'eau selon une très vaste palette de réactions, l'intégration de C et N dans les molécules constituant les structures du vivant se fait par un nombre limité de processus. Le carbone du  $\text{CO}_2$  est dans un état d'oxydation supérieur à l'état moyen dans le vivant, et doit donc être réduit pour être incorporé. On parle de « fixation du carbone » à partir du  $\text{CO}_2$ . On a détecté pour le moment seulement six voies de fixation du carbone dans le vivant, et toutes nécessitent de l'énergie. Parmi les six, une fournit une part écrasante du total de fixation du carbone, c'est celle qui fait partie de la photosynthèse, dans laquelle l'énergie nécessaire est obtenue à partir de la lumière solaire. Les cinq autres voies ont été détectées tardivement, toutes chez des unicellulaires procaryotes.

De même le diazote  $\text{N}_2$  n'est pas exploitable directement, et doit être oxydé ou réduit pour entrer dans les processus de synthèse. On parle aussi de « fixation », mais ces réactions sont très différentes. Là encore, les voies de fixation sont très limitées, et celles-ci sont seulement mises en oeuvre par quelques lignées d'unicellulaires procaryotes.

## Énergie

### Ce que dit la physique

En physique l'énergie est une quantité *conservée* : elle ne se perd ni ne se crée, elle ne fait que se transformer. La physique impose que le vivant rejette quasiment autant d'énergie qu'il en absorbe. Ce rejet n'est pas immédiatement visible, car c'est principalement sous forme de chaleur.

Le vivant ne consomme pas l'énergie, il la *dégrade*, il absorbe de l'énergie de grande

qualité prise dans l'environnement, et rejette de l'énergie de moindre qualité. Ce processus est essentiel parce que la matière vivante n'est pas en équilibre avec l'environnement. L'état stationnaire (ou a fortiori avec croissance) est rendu possible grâce au flot d'énergie qui traverse les cellules. L'arrêt du flot amène à la marche vers l'équilibre avec l'environnement, à une dé-structuration, c'est-à-dire la mort. Les physiciens parlent de « système dynamique » quand la stationnarité (le maintien à l'identique) n'est qu'apparente en moyenne. Ce n'est pas un équilibre, c'est obtenu par un flot régulier d'énergie se dégradant.

L'énergie se présente sous des tas de formes différentes, fédérées essentiellement par le fait que les transformations entre les différentes formes *conservent* une certaine quantité, à laquelle on donne le nom d'énergie.

La physique ne propose pas de mesure universelle et parlante de la *qualité* d'une forme d'énergie. Cela dépend de sa nature. Donnons quelques cas, pertinents pour le vivant et la nutrition. La chaleur est une forme d'énergie, dont la qualité se mesure par la température, avec une qualité croissant avec la température. Ainsi, le vivant évacue (dissipation finale) l'énergie consommée, devenue de basse qualité, essentiellement en chaleur à des températures proches de celle de l'environnement, disons 20°C (vers 290 K) plus ou moins quelques dizaines de degrés.

À l'autre bout, l'énergie de haute qualité est celle d'un mouvement macroscopique, d'un courant électrique, de l'énergie potentielle de pesanteur, de pression.

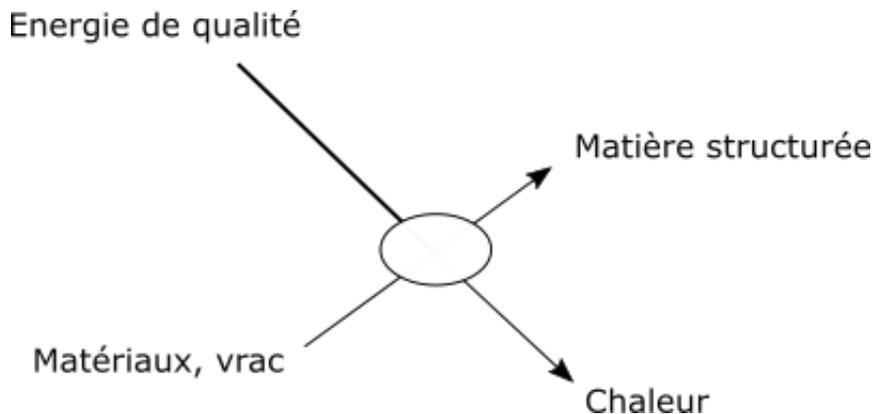
Le rayonnement électromagnétique couvre tous les degrés de qualité, comme le fait la chaleur. Sa qualité est mesurée par l'inverse de la longueur d'onde ou par la fréquence. Ainsi le rayonnement UV est de plus grande qualité que le rayonnement visible, lui-même de plus grande qualité que l'infrarouge. La physique propose une correspondance entre qualité du rayonnement (sa fréquence par exemple) et qualité de la chaleur (la température).

Par ailleurs des formes d'énergie de qualités intermédiaires se présentent avec l'énergie chimique, qui est portée entre autres par les liaisons entre atomes dans les molécules ou entre molécules. Lors de réactions chimiques l'énergie des électrons est redistribuée, non seulement entre atomes et molécules, mais aussi avec l'extérieur, soit en absorbant de l'énergie de haute qualité (de la lumière par exemple), soit en rejetant de l'énergie de moindre qualité (de la chaleur typiquement, la plus basse qualité étant la chaleur de l'environnement, ce qui se mesure par sa température moyenne).

## L'énergie en biologie

Ce qu'on appelle, improprement, « consommer de l'énergie » en biologie signifie dégrader de l'énergie « de qualité », ou encore ce qu'on pourrait présenter comme de l'énergie « concentrée », la transformer en une énergie de plus basse qualité. La dégradation de l'énergie est nécessaire pour faire marcher la machinerie du vivant (tout comme elle l'est dans les moteurs thermiques). En particulier cette dégradation d'énergie est nécessaire pour permettre les transformations chimiques critiques, qui vont construire les molécules du vivant, et ainsi structurer la matière en un organisme ayant les propriétés du vivant, c'est à dire la faculté de récupérer dans l'environnement de la matière et de l'énergie de haute qualité pour maintenir son intégrité, grossir et se reproduire, en rejetant de l'énergie de basse qualité.

Ainsi grossir à partir d'éléments pris dans l'environnement, le passage d'une matière « en vrac » à une matière structurée d'une manière complexe et précise, demande la consommation d'énergie (i.e., une dégradation d'une énergie de qualité). L'échange peut se représenter comme suit :



nutri01.png

## Origine de l'énergie concentrée

Les organismes vivants utilisent essentiellement deux sources d'énergie de haute qualité. L'une est le rayonnement solaire, qui, étant dans le visible, est de plus haute qualité que la référence de basse qualité qui est la température de l'environnement du vivant sur Terre. Les physiciens parlent d'un rayonnement à 5800 K, qu'il est licite de comparer à 290 K, la température (en gros) de l'environnement. On peut dire que l'énergie solaire

est vingt fois plus concentrée que l'énergie thermique rejetée par le vivant. (Ce chiffre a un sens pratique : un photon vers 5800 K absorbé par la surface de la Terre s'équilibre en énergie par l'émission, par la Terre vers l'espace lointain, de vingt photons vers 290 K—dans l'infrarouge.)

La deuxième source importante est de l'énergie chimique, liée aux différences de niveaux énergétiques des électrons des atomes, ions ou molécules, et libérable par re-combinaison d'atomes entre molécules. Certaines paires de molécules trouvées dans l'environnement peuvent ainsi être exploitées pour en tirer de l'énergie.

Si des sources géologiques d'énergie chimique ont été certainement très importantes pour les premières formes de vie, il y a très longtemps, elles sont maintenant dominées en quantité par l'exploitation de l'énergie solaire. Par contre, l'énergie chimique est le moyen de stockage à long terme de l'énergie dans tout le vivant. D'une part sous forme de molécules à la fois stables et décomposables en générant de l'énergie, comme l'amidon, et d'autre part sous forme de molécules réductrices, pouvant se combiner avec l'oxygène de l'air en générant de l'énergie, comme les corps gras (et aussi l'amidon).

Ce stockage d'énergie remplit différentes fonctions, comme le stockage pour passer l'hiver (carotte, ours brun, ...), ou pour permettre la croissance initiale (graine, oeuf d'oiseau, ...). Une autre est le transport entre cellules, comme dans la sève ou le sang.

Par ailleurs, les molécules structurales du vivant, dans lesquelles le carbone est en gros à mi-chemin entre totalement oxydé (comme dans  $\text{CO}_2$ ) et totalement réduit (comme dans  $\text{CH}_4$ ), peuvent aussi se combiner à l'oxygène (être brûlées) pour obtenir de l'énergie.

La matière vivante et le stockage de réducteurs fait des êtres vivants eux-mêmes une source d'énergie quand combinée avec le dioxygène de l'air. Ce qui remplit les conditions pour le vol, le pillage d'énergie par d'autres êtres vivants.

Cet état de fait est à l'origine des *chaînes alimentaires* ou *réseaux trophiques* dans les éco-systèmes.

## La palette trophique du vivant

Il y a une grande diversité dans le vivant dans la manière dont un organisme récupère de la matière et de l'énergie de qualité dans son environnement, afin de maintenir son intégrité, grossir et se reproduire.

On peut organiser les différents cas grossièrement ; on parle de type trophique. Les voies d'entrée du carbone et l'acquisition de l'énergie sont les principaux critères de classifica-

tion des modes de nutrition dans la variété du vivant. Les voies d'entrée de l'azote sont encore moins variées.

Ce n'est pas le propos de ce texte d'en faire l'inventaire, et on va présenter seulement quelques cas très différents, et assez représentatifs. Le dernier présenté recentre sur le sujet, puisque couvrant la nutrition humaine.

On pourra consulter [https://en.wikipedia.org/wiki/Primary\\_nutritional\\_groups](https://en.wikipedia.org/wiki/Primary_nutritional_groups) pour un catalogue avec tous les mots en -trophe concoctés pour grouper des cas.

Notons que la classification enseignée est assez superficielle, et ne colle pas toujours avec les mécanismes détaillés. Par exemple, on peut montrer que l'usage de la lumière (phototrophie) amalgame des cas assez différents, l'un proche par ses mécanismes de cas de chimiotrophie, d'autres bien plus spécifiques. Mais cela sort du propos de cet essai, et mérite un développement séparé, concernant l'énergie dans le vivant en général. Seule une partie serait pertinente pour la nutrition humaine, quand il s'agit des processus à l'échelle de la cellule, et sera un peu abordé dans les textes spécifiques à certaines classes de molécules.

## **L'indépendance au reste du vivant**

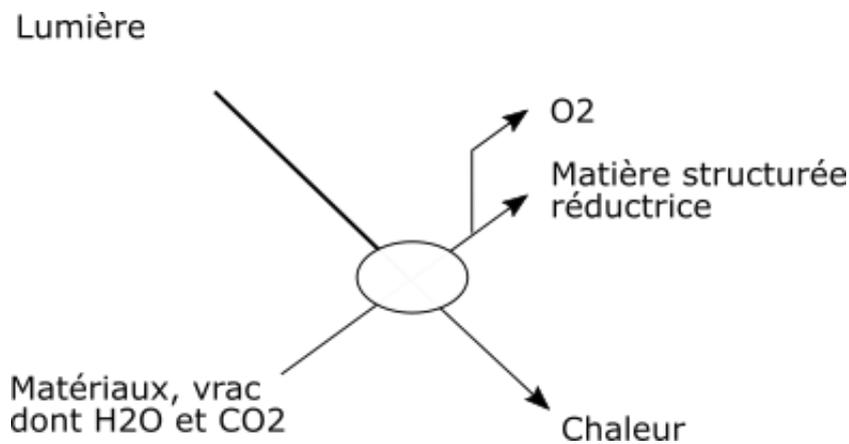
À une extrémité du spectre des « modes trophiques », on trouve des organismes essentiellement indépendants du reste du vivant. La source d'énergie est par exemple la lumière solaire, et la matière nécessaire à la croissance vient directement ce qui est géologiquement disponible, l'eau, le CO<sub>2</sub>, le diazote et du minéral. L'archétype de ce mode de vie est fourni par les cyanobactéries (ou cyanophycées), des organismes monocellulaires photosynthétiques, c'est à dire capables de photosynthèse, un processus combinant la récolte de l'énergie lumineuse et la fixation du carbone.

Ce n'est pas un exemple quelconque, car si on inclut les chloroplastes, organelles de nombreuses lignées comme toutes les « plantes vertes » ou certains unicellulaires marins (considérées comme ayant pour ancêtres des cyanobactéries « capturées » il y a bien longtemps), les cyanobactéries constituent l'écrasante majorité du vivant actuel répondant à ce type trophique, et ainsi la principale, et de loin, voie d'entrée tant de l'énergie solaire que du carbone du CO<sub>2</sub> dans l'écosystème (i.e., dans les chaînes trophiques).

D'autres cas d'indépendance viennent de l'exploitation de l'énergie chimique tirée de l'environnement minéral.

## La photosynthèse

En simplifiant, le processus dit de photosynthèse consiste à capter l'énergie de la lumière en la transformant sous forme d'énergie chimique, puis, après plusieurs étapes, d'utiliser cela pour réorganiser des molécules de  $\text{CO}_2$  et d'eau en des chaînes de carbone partiellement réduit (fixation du carbone), et en rejetant du dioxygène libre. C'est l'inverse d'une combustion. Une partie de l'énergie solaire est ainsi convertie et stockée sous forme de combustible dans la matière vivante (une partie se transportant dans la chaîne trophique) et de dioxygène (« stocké », si l'on peut dire, dans l'atmosphère, le rendant disponible à tous).



nutri02.png

Examinons ce caractère de combustible qu'ont la matière vivante et des substances de réserve (typiquement des glucides et des lipides). La partie « sèche » du vivant est composée essentiellement de molécules basées sur des chaînes de carbone. Sans rentrer dans les arcanes de la chimie organique, ces chaînes sont le plus souvent réductrices car le carbone est réduit quand relié à un autre carbone ou à un atome d'hydrogène, entre autres.

La difficulté d'utiliser le  $\text{CO}_2$  comme matériau en vrac pour construire des chaînes carbonées vient du fait que le carbone du  $\text{CO}_2$  est totalement oxydé: le faire passer dans un état moins oxydé est nécessaire, et cela demande de l'eau et de l'énergie concentrée, comme celle de la lumière solaire (et des processus chimiques complexes que l'industrie moderne aimerait bien imiter de manière économiquement viable).

La réduction du carbone (et de l'hydrogène de l'eau) doit se compenser par la création de matière oxydée ; c'est de l'oxygène dans le cas de la photosynthèse par les cyanobactéries ou les chloroplastes des plantes vertes. Ainsi se forme une nouvelle source d'énergie concentrée, certes moins que la lumière solaire mais parfaitement exploitable, sous forme du couple [O<sub>2</sub>, matière organique].

## La totale dépendance au reste du vivant

Un autre cas, presque opposé, couvre des organismes dont la source d'énergie indispensable est ce couple [O<sub>2</sub>, matière organique]), le deuxième terme couvrant des substances de réserve (huile, amidon) et la matière structurée du vivant elle-même. Non seulement cela consiste à piller de l'énergie, mais c'est aussi se procurer des matériaux de construction élaborés, ce qui permet de se passer des fonctions les plus difficiles comme fixer le carbone à partir de CO<sub>2</sub> ou l'azote à partir de N<sub>2</sub>. On parle d'hétérotrophie.

Ces organismes sont non seulement incapables d'utiliser le CO<sub>2</sub> et le N<sub>2</sub> de l'atmosphère, mais ni non plus se procurer une bonne part des minéraux bruts. Et certains sont même incapables de synthétiser des molécules complexes indispensables à leur survie (notion de molécules essentielles, et de vitamines). Comme leurs besoins en énergie concentrée sont aussi remplis à partir de la matière organique et, pour le plus gros, du dioxygène de l'air qui est, lui aussi, un produit du vivant, les hétérotrophes sont totalement dépendants du reste du vivant pour leur survie comme pour le futur de leurs lignées. D'aucun y verrait des parasites inutiles. Du moins si les humains n'étaient pas des hétérotrophes (mais ils le sont).

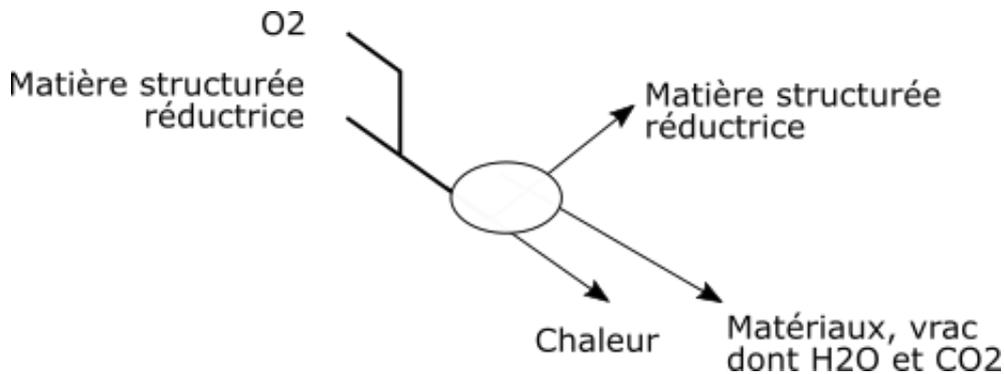
## L'importance de l'oxygène de l'air

Un point essentiel est que le plus gros de l'énergie obtenue par la plupart des hétérotrophes vient de la combustion de matière organique, soit structurelle soit de réserve. Ce qui amène l'approche simpliste de considérer le combustible comme la source d'énergie (comme l'idée de considérer la biomasse comme « source d'énergie ».). On peut tout aussi bien dire que la source d'énergie concentrée est le dioxygène plutôt que le combustible. On parle d'hétérotrophie aérobie. La bonne approche est de considérer que la source d'énergie est le *couple* formé par O<sub>2</sub> et un combustible. Ce qu'amène la matière du vivant est le combustible.

À bien regarder, c'est la disponibilité gratuite de l'énorme quantité de dioxygène dans l'air qui amène à l'oublier, n'étant ni limitatif ni un produit commercial.

## Vue d'ensemble

La vue d'ensemble est surprenante. Une partie du vivant (les organismes pratiquant la photosynthèse, en particulier) utilise une source d'énergie très concentrée (la lumière solaire) de manière *incomplète* pour leurs besoins propres, tout en créant une nouvelle source d'énergie, encore concentrée (relativement à l'environnement). Et cette source d'énergie est disponible, ce dont profitent d'autres êtres vivants, d'où la possibilité et l'évolution d'organismes pilleurs, les hétérotrophes.



nutri03.png

Au fond cela vient de ce que les matériaux du vivant tel qu'il est sur Terre contiennent toujours énormément de carbone partiellement réduit. Il ne peut pas y avoir d'organisme vivant qui ne soit pas source d'énergie. Pas vraiment étonnant qu'une partie de vivant exploite ce filon.

## La biophagie

L'hétérotrophie est assez uniforme dans les détails des processus chimiques impliqués, mais se décline en des modes de vie très variés. Des lignées se sont spécialisées dans une approche ou une autre pour acquérir de la matière biologique. Certains organismes se contentent des débris non vivants issus du vivant (matière morte, feuilles mortes, déjections) ; c'est le cas de nombreux champignons (fungi). D'autres, assez rares, consomment seulement des produits non vivants rendus disponibles par d'autres êtres vivants (comme les colibris vivant du nectar produit par certaines plantes à fleur). D'autres encore sont des parasites, prenant leur nourriture à d'autres êtres vivants sans les tuer (mais en les affaiblissant un peu, pas trop).

Ceci dit, la grande partie des hétérotrophes pratiquent ce que l'auteur appelle ici la biophagie, c'est à dire la consommation de la substance vivante ou fraîchement tuée (prédation).

Cela couvre aussi bien des unicellulaires (e.g., endocytose de bactéries par des amibes, des paramécies, ...) que la consommation du plancton (baleines, méduses, éponges, ...), d'insectes ou de larves d'insectes (mésanges), de feuilles (chenilles, éléphants et autres brouteurs), ou de la chair d'oiseaux ou de mammifères de petite ou grande taille (serpents, rapaces, carnivores, ...). La liste est longue, très longue.

L'intérêt nutritif de la matière vivante fraîche est assez clair: le vivant étant assez uniforme quant à sa composition moléculaire, la matière vivante non dégradée fournit la matière idéale pour la construction (la croissance) d'un organisme vivant. Cela peut fournir en plus de l'énergie obtenue par oxydation d'une partie de cette matière par le dioxygène.

La biophagie n'est pas constructive, elle consiste à changer une forme de vie en une autre, par recyclage de la matière. Elle est même destructive, car si les atomes sont en gros conservés, l'énergie est dégradée. Un biophage doit consommer non seulement la matière dont il se construit, mais aussi de quoi générer un surplus d'énergie, pour la réorganisation de cette matière, ainsi que pour sa capture.

Ce surplus est obtenu partie en consommant plus de matière vivante que strictement nécessaire pour les atomes, partie en consommant des réserves mises de côté par les proies. Ce sont principalement des réserves sous forme de réducteurs, typiquement des glucides ou des lipides, destinés à être consommés avec le dioxygène de l'air.

Dans une proportion plus ou moins grande la biophagie amène à consommer plus de protéines que strictement nécessaires pour l'apport d'azote. Ces protéines en surplus sont démontées, désaminées puis consommées.

## **Pertes fonctionnelles**

Une conséquence importante de la biophagie est une série de pertes fonctionnelles qui peuvent advenir avec ce type de nutrition. Cela amène la notion d'essentialité, l'idée que certaines molécules complexes doivent être impérativement trouvées dans la nourriture.

Quand les apports nutritifs de molécules critiques sont systématiques, l'évolution peut amener la perte de la capacité de synthétiser certaines de ces molécules, sans que cela affecte la survie à long terme de la lignée. Cela advient plus ou moins dans différentes

lignées biophages, qui trouvent tout ce qu'il leur faut dans leur nourriture ; des mammifères dont les humains sont particulièrement affectés.

Dans le cas des humains cela concerne ce qu'on appelle les vitamines, et aussi certains acides aminés (dits alors essentiels) et certains acides gras.

Un autre aspect proche est la perte des fonctions économisant les acides aminés, conséquence potentielle de la consommation du surplus de protéines. Plutôt que recycler tous les acides aminés venant de l'obsolescence de protéines, une partie sont simplement brûlés pour l'énergie, après désamination demandant filtrage et excrétion (c'est le rôle des reins chez les humains, pour lesquels les radicaux amines sont excrétés sous forme d'urée). Pas très économique quand on réalise la difficulté qu'à le vivant à fixer l'azote de l'air. Avec une nutrition biophage, l'apport en protéines est suffisant pour que ce gâchis n'ai pas de conséquence, là encore.

## Les animaux

Une lignée du vivant s'est spécialisée dans la biophagie, ce sont les animaux. Au fond, de nombreuses lignées des eucaryotes pratiquent la biophagie, et encore plus si on inclut les lignées ayant internalisé des bactéries photosynthétiques, pratiquant donc une sorte d'esclavage plutôt que la prédation. La lignée spécialisée à laquelle appartiennent les animaux est un peu plus large, incluant les choanoflagellés ou même un peu plus.

La lignée qui nous intéressera le plus, dans l'épisode suivant, est celle des animaux bilatériens, qui inclut, entre autres, les vertébrés, dont les mammifères, dont les humains.

## Résumé

Pour résumer, la nutrition des biophages se compose (au sens large, tous les intrants):

- De l'eau de l'environnement ;
- Du dioxygène de l'air (respiration) → énergie;
- De la matière organique, principalement vivante ou fraîchement tuée (ingestion et digestion) → construction et énergie;
- Quelques minéraux solubles (e.g., sel) venant de l'environnement minéral.

Dans l'autre sens, les besoins nutritif (au sens large), y compris ceux liés à des déficiences, sont remplis comme suit :

- Eau : eau de l'environnement minéral ;

- Énergie concentrée : matière organique + dioxygène de l'air ;
- Carbone réduit (comme matériau de construction) : matière organique;
- Azote fixé : matière organique;
- Chlore, Sodium et certains autres éléments : minéraux de l'environnement et matière organique;
- Autres éléments (en particulier Phosphore, Soufre, Fer) : matière organique;
- Vitamines et autres molécules essentielles (palliant des déficiences) : matière organique.

Une seconde partie du prologue se focalisera sur la nutrition des lignées particulières d'animaux formant les bilatériens, ce qui inclut les humains.