

bleu de méthylène est fixé avec élection par certaines cellules animales, les œufs d'échinodermes par exemple, comme l'a montré HERTWIG, les fibrilles nerveuses qui se colorent en bleu foncé lorsqu'on injecte la matière colorante dans le torrent circulatoire d'un animal vivant, selon la méthode d'ENRICH, l'épithélium sécréteur du rein qui l'élimine, de telle sorte que c'est un moyen clinique de s'assurer de la perméabilité rénale.

### § 3. — NUTRITION COMPARÉE CHEZ LES ANIMAUX ET LES VÉGÉTAUX

Les substances absorbées subissent diverses métamorphoses avant de faire partie intégrante du protoplasma, et aussi dans leur mouvement de régression du protoplasma vers le milieu extérieur. Entre les produits d'entrée et de sortie se place toute une série de produits intermédiaires. Mais de cette chaîne fermée nous ne connaissons véritablement bien que le premier et le dernier anneau, et tous les chaînons intermédiaires nous sont à peu près inconnus. Ainsi nous savons ce qui entre dans le corps d'un animal comme aliments (eau, sels, hydrates de carbone, graisses et albuminoïdes) ; nous connaissons d'autre part ce qui en sort (eau, sels, acide carbonique et divers produits azotés incomplètement oxydés, tels qu'urée et acide urique) ; mais les termes intermédiaires nous restent cachés pour la plupart, et le chimisme de la cellule garde encore ses secrets. Tout ce que nous pouvons dire, c'est que les processus de la nutrition consistent essentiellement en une *oxydation*, une combustion des aliments avec dégagement de chaleur et de force vive.

La nutrition chez les végétaux consiste aussi d'une manière générale en une fixation de l'oxygène sur les éléments combustibles des tissus et, en ce sens, elle ne diffère pas au fond de la nutrition des animaux ; mais elle présente certains phénomènes surajoutés d'une haute importance : à côté des processus d'oxydation se montrent, chez les plantes vertes, des processus de réduction et de *synthèse* tellement prédominants qu'ils

pourraient donner le change sur le sens véritable de la nutrition végétale.

Nous voyons d'abord au premier coup d'œil, en comparant le mode d'alimentation des animaux et des végétaux, qu'il existe entre eux une différence fondamentale ; les végétaux se nourrissent de matières inorganiques ; avec celles-ci ils sont capables d'édifier la molécule de matière organique, d'en faire la synthèse ; les animaux au contraire ne peuvent vivre qu'aux dépens de la matière organique déjà formée par les végétaux, ainsi que nous l'avons déjà fait observer. Sans ces derniers, par conséquent, la vie animale n'existerait point. En résumé donc les végétaux sont les constructeurs de la matière organique, et les animaux en sont les destructeurs. Toutefois certains produits incomplètement oxydés qu'excrètent les animaux (comme l'urée) doivent pour retourner à l'état inorganique subir un degré d'oxydation plus profond. Or cette transformation ultime de la matière organique est encore le résultat d'une action vitale. Ce sont en effet les êtres inférieurs nommés ferments figurés, microbes, qui s'en chargent. Par exemple, l'urée est transformée par des microorganismes en acide carbonique et ammoniacque, et l'ammoniacque à son tour subit dans la terre des fermentations qui le transforment en acide nitreux et nitrique. Ainsi se trouve fermé ce vaste circuit par lequel la matière inorganique revient à son point de départ, après avoir servi à constituer la matière organique des végétaux et des animaux.

Pour prouver que les végétaux constituent leur propre substance avec des matériaux exclusivement inorganiques, la simple expérience suivante nous suffira : soit un liquide composé de différents sels en solution : pour un litre d'eau, azotate de potassium 1 gramme, chlorure de sodium, sulfate de chaux, sulfate de magnésie de chaque 0<sup>sr</sup>,5, sulfate de fer 0,005 (liquide de SACHS), et contenant par conséquent tous les éléments nutritifs nécessaires, *sauf le carbone* ; plaçons-y un plant de maïs de manière que ses racines plongent dans le liquide et que ses feuilles s'épanouissent dans l'air, *à la lumière* ; la plante va se développer, former des fleurs et des graines qui



pourront servir à une autre expérience ; elle trouve en effet dans le liquide l'azote, le soufre, le fer, etc. ; mais le carbone, où le prend-elle ? Dans l'air, en absorbant par ses feuilles l'acide carbonique de l'atmosphère et en le réduisant par une fonction spéciale de ses parties vertes, la *fonction chlorophyllienne*. Envisageons de plus près les deux faits principaux de la fixation du carbone et de l'azote par les plantes, et les degrés respectifs d'importance des processus de réduction et d'oxydation, chez les végétaux et les animaux.

**1° Fonction chlorophyllienne.** — Les feuilles des plantes sont colorées en vert par une matière spéciale, la *chlorophylle*,

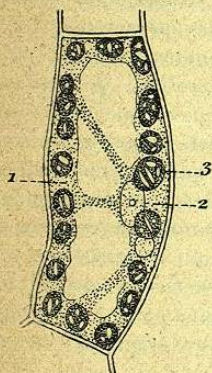


Fig. 7.

Cellule végétale avec corps chlorophylliens (d'après Sachs).

1, protoplasma. — 2, noyau. — 3, corps chlorophyllien. Les petites taches claires dans les corps chlorophylliens sont formées par de l'amidon.

qui forme dans les cellules des amas particuliers (*corps chlorophylliens*). Ces corps pigmentaires jouissent de la propriété d'opérer, sous l'action des rayons solaires, le dédoublement de l'anhydride carbonique ; le carbone se fixe alors dans la feuille,

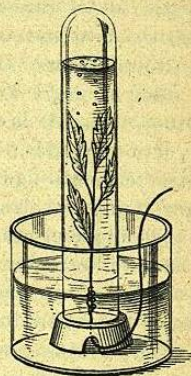


Fig. 8.

Expérience montrant le dégagement d'oxygène par un rameau vert d'une plante sous l'action des rayons solaires. (L'oxygène s'accumule dans la partie supérieure de l'éprouvette.)

tandis que l'oxygène se dégage. Il est bien facile de mettre en évidence ce dégagement d'oxygène ; on n'a qu'à introduire un rameau vert d'une plante dans une éprouvette remplie d'eau tenant du  $\text{CO}^2$  en dissolution et renversée sur la cuve à eau, et à exposer le tout à la lumière ; des bulles se forment à la surface des feuilles, et au bout de quelque temps on recueille dans l'éprouvette une certaine quantité d'un gaz qui montre toutes les propriétés de l'oxygène (fig. 8). Ainsi, à l'inverse de l'animal qui consume l'oxygène et excrète de l'acide carbonique en respirant, la plante verte absorbe l'acide carbonique et dégage de l'oxygène ; et tandis qu'un animal meurt dans une atmosphère de  $\text{CO}^2$ , une plante y prospère. Cette antithèse apparaît avec un caractère particulièrement frappant dans l'expérience fondamentale de Priestley ; après avoir laissé mourir des souris dans de l'air confiné sous une cloche, et constaté que cet air vicié était devenu impropre à la vie pour d'autres souris, Priestley y plaça un pied de menthe, et observa alors que ce végétal, loin de manifester aucun trouble, se développait avec vigueur ; de plus, il remarqua qu'au bout d'un certain temps l'air de la cloche avait récupéré son aptitude à entretenir la vie animale. Nous voyons donc que les plantes purifient l'air vicié par la respiration des animaux.

Pour instituer à présent une expérience plus rigoureuse, enfermons une plante verte sous une cloche contenant une quantité connue d'anhydride carbonique pur, et exposons-la aux rayons solaires ; puis, au bout d'un certain temps, analysons les gaz de la cloche ; nous y constatons la présence d'une quantité d'oxygène précisément égale à la quantité d'anhydride carbonique disparue. Or, on sait que l'anhydride carbonique contient son propre volume d'oxygène ; par conséquent notre expérience nous conduit à admettre non seulement que la plante absorbe  $\text{CO}^2$  et excrète  $\text{O}$ , mais encore que, rejetant autant d' $\text{O}$  qu'il en est contenu dans le  $\text{CO}^2$  absorbé, elle est bien le siège d'un processus de dédoublement du  $\text{CO}^2$ . Mais maintenant, que devient le carbone mis en liberté par ce dédoublement ? Il ne se fixe pas tel quel dans la feuille ; mais il entre immédiatement dans une combinaison organique, l'*amidon*. On voit en effet se former



dans les corps chlorophylliens, proportionnellement à la destruction du  $\text{CO}_2$ , de fines granulations réfringentes d'amidon, dont il est facile de déceler la nature par la réaction micro-chimique avec l'iode (coloration bleue de l'iodure d'amidon). L'amidon nous apparaît donc comme le premier produit organique de l'assimilation ; il résulte de l'union du carbone fixé par les feuilles avec les éléments de l'eau puisés dans la terre par les racines ; et, en partant de ce produit initial, on peut concevoir comment la plante forme les autres, les graisses et les albuminoïdes, bien que les processus de synthèse de ces derniers soient encore très obscurs.

La réduction de l'acide carbonique est effectuée par les plantes à chlorophylle avec le concours des rayons solaires ; elle cesse, de même que la formation d'amidon, lorsque la plante est placée dans l'obscurité ; elle s'opère avec accumulation d'énergie, avec absorption de chaleur (*réaction endothermique*). Cette énergie passe à l'état potentiel (voy. plus loin), et elle devient libre lorsque se produit l'oxydation du carbone accumulé. Parmi les différentes radiations lumineuses, celles qui correspondent aux bandes spectrales d'absorption les plus foncées de la chlorophylle exercent le plus d'influence sur la réduction de l'acide carbonique. Or, ces bandes principales sont dans le rouge. Si donc on expose une feuille, placée dans un tube de verre plein d'eau, comparativement aux différentes radiations du spectre, on observe que le dégagement d'oxygène est le plus intense dans les régions du spectre qui correspondent aux bandes d'absorption les plus sombres de la chlorophylle, et, par conséquent, dans le rouge. De même, si l'on projette un spectre solaire sur une feuille verte vivante comme écran, et qu'ensuite on traite cette feuille par l'iode, on y constate l'apparition de bandes bleues d'iodure d'amidon correspondant aux bandes d'absorption de la chlorophylle.

**2° Fixation de l'azote.** — Les animaux ne peuvent utiliser que l'azote contenu dans la matière protéique ; les végétaux, par contre, le retirent des combinaisons azotées minérales. L'azote se trouve dans le sol sous trois états : l'azote organique, l'azote

ammoniacal et l'azote nitrique. L'azote organique, qui provient des débris animaux et végétaux, n'est généralement pas utilisé directement par les plantes, mais il subit, sous l'influence des microbes du sol, la transformation ammoniacale, et il devient alors assimilable sous cette forme. Mais c'est surtout des nitrates que les végétaux tirent leur azote, et c'est là encore un processus de réduction ; avec cet azote, le soufre pris aux sulfates et les composés hydrocarbonés déjà formés comme il a été dit plus haut, la plante opère la synthèse de la matière protéique qui constitue la substance fondamentale du protoplasma.

Les végétaux ont de plus la propriété de fixer l'azote libre de l'atmosphère, soit sous l'influence des effluves électriques, soit à l'aide de certains organismes inférieurs, algues ou bactéries, qui vivent dans le sol. Chez certaines plantes, comme les légumineuses, ces micro-organismes fixateurs d'azote sont accolés aux racines sur lesquelles ils forment de petits nodules : ils cèdent à la plante l'azote qu'ils ont fixé et lui empruntent, en échange, les hydrates de carbone dont ils ont besoin. C'est là un exemple de *symbiose*, c'est-à-dire d'association de deux organismes collaborant à la vie commune.

**3° Phénomènes de réduction et de combustion comparés chez les animaux et les végétaux.** — D'après ce qui vient d'être exposé, on voit que, dans la vie d'une cellule végétale, ce sont les processus de réduction et de synthèse qui paraissent prédominants, tandis que, dans une cellule animale, ce sont les phénomènes d'oxydation, de combustion. Cependant, de cette antithèse qui exprime un fait réel, il ne faut pas conclure à une différence radicale dans les phénomènes généraux de la nutrition entre les deux sortes de cellules. D'une part, chez les animaux, il se passe aussi certains processus de réduction, de dédoublement et de synthèse, à côté des phénomènes de combustion ; d'autre part, chez les végétaux, si l'on fait abstraction de la fonction chlorophyllienne, les phénomènes fondamentaux de la nutrition ne sont pas différents de ceux des animaux. En effet, toute matière vivante respire, absorbe de l'oxygène et exhale de l'acide carbonique, c'est-à-dire oxyde le carbone, et



c'est là une loi générale de la vie à laquelle les plantes n'échappent point. Pendant la nuit, la fonction chlorophyllienne cesse, la plante absorbe de l'oxygène et dégage de l'acide carbonique, tout comme l'animal, et les oxydations se manifestent le jour comme la nuit pour toutes les parties dépourvues de chlorophylle. Une graine qui germe, une fleur épanouie produisent de l'anhydride carbonique, et dégagent de la chaleur ; pendant la fécondation, l'élévation de température dans la fleur peut même atteindre un degré assez considérable pour être perceptible à la main, comme dans l'*arum maculatum*.

Par conséquent, chez les végétaux de même que chez les animaux, le protoplasma est bien le siège d'une destruction organique, à côté des processus de construction et de synthèse. Les plantes comme les animaux *respirent* en absorbant de l'oxygène et exhalant de l'acide carbonique. La fonction chlorophyllienne est seulement surajoutée et d'ailleurs nullement générale. Il ne faut pas oublier, en effet, que beaucoup de végétaux inférieurs, comme les champignons, les levures sont dépourvus de chlorophylle ; aussi bien, ceux-ci sont-ils incapables de dédoubler l'acide carbonique et prennent-ils, par leur mode de nutrition, les caractères de l'animalité ; comme nous l'avons vu précédemment, ils ne peuvent tirer leur carbone que des composés organiques.

Enfin, certains processus de la nutrition intime des tissus s'accomplissent par les mêmes procédés chez les animaux et les végétaux. Les hydrates de carbone, les graisses, les albuminoïdes ne sont pas toujours aptes à être consommés tels quels par la cellule ; il faut qu'ils subissent d'abord une transformation chimique, qu'ils soient rendus solubles et diffusibles. Ainsi l'amidon est transporté des parties vertes, où il se forme, dans les parties souterraines de la plante, où il s'accumule et constitue une réserve, comme dans les tubercules de la pomme de terre ; pour accomplir cette migration, il est d'abord dissous et transformé en sucre, puis retransformé en substance insoluble (amidon) ; et, plus tard, lorsque le tubercule germe, cette matière de réserve est de nouveau dissoute et émigre vers les points où elle doit être consommée. Les mêmes phénomènes se retrou-

vent pour d'autres substances de réserve, comme le sucre de canne dans les racines de la betterave, les graisses dans les graines des plantes oléagineuses, etc. Or ces mutations et ces transports de matières, chez les végétaux comme chez les animaux, s'opèrent par l'activité de divers ferments solubles (voy. *Ferments*, p. 133).

## ARTICLE II

## PHÉNOMÈNES DE TRANSFORMATION DE FORCES

Les différentes forces par lesquelles se manifeste la vie ne sont point créées par le protoplasma ; celui-ci ne fait que transformer l'énergie qui lui vient du monde extérieur. Examinons de près ce fait fondamental ; nous envisagerons ensuite les différentes modalités de l'énergie qui apparaissent chez les êtres vivants.

## § 1. — ÉNERGÉTIQUE

La grande loi de la conservation de l'énergie formulée par R. MAYER et par HELMHOLTZ est absolument générale, et s'applique aux corps vivants comme aux corps bruts ; elle est fondamentale tout aussi bien pour les phénomènes physiologiques que pour les phénomènes physiques.

**1° Loi de la conservation de l'énergie.** — Dans la Nature rien ne se crée et rien ne se perd ni en matière ni en force ; la quantité de matière et d'énergie existante est invariable ; lorsqu'une certaine quantité d'énergie paraît anéantie, en réalité elle ne l'est point : elle n'a fait que se *transformer*. Les diverses modalités de l'énergie (chimique, mécanique, thermique, lumineuse, électrique, magnétique), sont en effet susceptibles de se transformer les unes dans les autres, et il y a *équivalence* entre la quantité d'énergie qui semble disparaître et la quantité d'énergie nouvelle qui apparaît. Cette équivalence est parfaitement connue pour la chaleur et le travail mécanique ; on sait,