

ENCYCLOPÉDIE

CHIMIQUE

TOME X

APPLICATIONS DE CHIMIE ORGANIQUE

CHIMIE AGRICOLE

NUTRITION DE LA PLANTE

PARIS - IMPRIMERIE C. MARPON ET E. FLAMMARION
26, RUE RACINE, 26

ENCYCLOPÉDIE CHIMIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE

M. FREMY

Membre de l'Institut, professeur à l'École polytechnique, directeur du Muséum
Membre du Conseil supérieur de l'instruction publique

PAR UNE RÉUNION

D'ANCIENS ÉLÈVES DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DE PROFESSEURS ET D'INDUSTRIELS

ET NOTAMMENT DE

MM. ARSON et AUDOUIN, ing. en chef des travaux chim. à la Compagnie parisienne du gaz
H. BECQUEREL, répétiteur à l'École polytechnique; BERTHELOT, sénateur, membre de l'Institut
BOUILLET, ing. dir. de la maison Christophe; M. BOURGEOIS, prép. du cours de chimie organique au Muséum
BOURGOIN, prof. à l'École de pharm.; BOUTAN, ingén. des Mines; CAMUS, directeur de la Compagnie du gaz
A. CARNOT, directeur des études de l'École des mines; CHASTAING, pharmacien en chef de la Pitié
CLÈVE, prof. à l'Université d'Upsal; Ch. CLOEZ, répétit. à l'École polyt.; GUMENGE, ing. en chef des mines
CURIE (J.), maître de conférences à la Faculté des sciences de Montpellier; DRIZÉ, ingénieur des manuf. de l'État
DEBRAY, membre de l'Institut; DECAUX, directeur des teintures des manuf. de l'État; DEHÉRAIN, prof. au Muséum
DITE, professeur à la Faculté des sciences de Caen; DUBREUIL, président de la chambre de commerce à Limoges
DUCLAUX, prof. à l'Institut agronom.; DUPRÉ, s.-dir. du labor. municipal; DUQUESNAY, ing. des manuf. de l'État
EUVÈRE, directeur des forges de Terre-Noire; DE FORGRAND, docteur ès sciences; FUCHS, ing. en chef des Mines
GAUDIN, ancien élève de l'École polytechnique, prof. de chimie; GIRARD, directeur du laboratoire municipal
L. GRUNER, inspecteur général des mines; GUNTZ, docteur ès sciences
HENRIVAUX, direct. de la manuf. des glaces de St-Gobain; HERSEL, ingénieur civil des Mines
JOANNIS, docteur ès sciences; JOLY, maître de conférences à la Sorbonne
JOULIE, pharmacien en chef de l'hospice Dubois; JUNGFLEISCH, professeur à l'École de pharmacie
KOLB, administrateur de la Société des manufactures des produits chimiques du Nord
LEIDIÉ, pharm. en chef de l'hôpital Necker; LEMOINE, ing. en ch. des ponts et chaussées, répétit. à l'École polytechnique
LODIN, ing. des mines; MALLARD, prof. à l'École des mines; MARGOTTET, prof. à la Faculté des sciences de Dijon
MARGUERITE, prés. du conseil d'admin. de la compagnie par. du gaz; MARGUIN, anc. élève de l'École polyt.
MATHEY, dir. des bouillères de Blauzy; MEUNIER (STANISLAS), aide natur. au Muséum; MOISSAN, agrégé à l'Éc. de pharm.
MOUTIER, examinateur de sortie à l'École polytechnique
MUNTZ, dir. des travaux pratiques de Chimie au cons. des arts et métiers; NIVOIT, prof. à l'École des ponts et chaussées
ODENT, anc. élève de l'École polytechnique; OGIER, dir. du laboratoire de toxicologie à la préfecture de police
PARST, chimiste principal au laboratoire municipal; PARMENTIER, prof. de la Faculté des sciences de Montpellier
PÉCHINEY, directeur des usines de produits chim. du midi; PERSOZ fils, directeur de la condition des soies
POMMIER, industriel; PORTES, pharm. en chef de l'hôpital de Louvain; PRUNIER, prof. à l'École de pharmacie
RIBAN, directeur du laboratoire de la Sorbonne; ROSWAG, ingénieur civil des Mines
ROUSSEAU, s.-dir. du laboratoire de chimie de la Sorbonne; SABATIER, prof. à la Faculté des sciences de Toulouse
SARRAU, professeur à l'École polytechnique; SCHLAGDENHAUFEN, prof. à la Faculté de médecine de Nancy
SCHLESING, prof. au Conservatoire des arts et métiers; SOREL, anc. ingén. des manuf. de l'État
TERRELL, aide naturaliste au Muséum; TERQUEM, professeur à la Faculté de Lille
URBAIN, répétiteur à l'École centrale des arts et manufactures; VERNEUIL, professeur de chimie
VIELLE, ing. des poudres et salpêtres; VILLIERS, agrégé à l'École de pharm.; VINCENT, prof. à l'École centrale
VIOLE, prof. à la Faculté des sciences de Lyon; WELDON, membre de la Société royale de Londres, etc.

TOME X. — APPLICATIONS DE CHIMIE ORGANIQUE

CHIMIE AGRICOLE

NUTRITION DE LA PLANTE

Par M. DEHÉRAIN

Professeur au Muséum.

PARIS

V^{VE} CH. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES CHEMINS DE FER, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

49, Quai des Augustins, 49

1885

Droits de traduction et de reproduction réservés.

LA NUTRITION DE LA PLANTE

CHAPITRE PREMIER

GERMINATION

Les végétaux herbacés sur lesquels portent la majeure partie des opérations agricoles se reproduisent de graines, quelques-uns cependant proviennent de tubercules ou de bulbes. Ce chapitre dans lequel nous étudions la formation des organes nouveaux qui apparaissent au moment du réveil de la végétation, comprendra donc d'abord trois parties, correspondant aux trois organes différents employés aux semences et aux plantations; quant aux végétaux ligneux, ils émettent au retour de la belle saison des bourgeons, dont le développement est analogue à celui des organes précédents, l'étude de leur évolution formera la quatrième et dernière partie de ce premier chapitre.

ÉVOLUTION DES GRAINES

§ 1. — Du choix de la graine.

Pureté. — La réussite complète d'une culture est étroitement liée aux soins qu'on apporte aux semences; en effet pour être assuré d'un bon rendement, il faut que tous les individus qui croissent sur le même champ parcourent simultanément toutes les phases de leur développement et surtout que tous mûrissent leurs graines en même temps; si la maturation est inégale, qu'on soit conduit

à retarder la moisson pour attendre la maturation des individus dont l'évolution n'est pas terminée, on subit des pertes sensibles, les graines ayant en général une grande tendance à se séparer de la tige aussitôt qu'elles sont arrivées à maturité ; et l'on conçoit que le cultivateur attache une grande importance à la pureté de la graine et à son homogénéité.

Un examen superficiel suffit d'ordinaire pour reconnaître si une graine destinée aux semences ne renferme qu'une seule espèce, si des graines de plantes adventives ne s'y trouvent pas mêlées ; cet examen devra être particulièrement attentif quand il s'agira de plantes souvent attaquées par des parasites, telle que la luzerne, dont la graine renferme parfois les germes de son parasite la cuscute.

Cet examen superficiel est insuffisant toutefois pour reconnaître l'âge des graines et savoir si elles se trouvent dans de bonnes conditions de germination et surtout si elles germeront simultanément, aussi procède-t-on souvent dans les laboratoires des stations agronomiques à la détermination du pouvoir germinatif des graines.

L'essai se fait habituellement dans le germoir de Nobbe, il se compose essentiellement d'une plaque de terre cuite présentant au centre une large cavité peu profonde dans laquelle sont placées les graines ; une rigole est destinée à contenir l'eau qui arrive par imbibition jusqu'à la cavité centrale ; enfin quatre trous sont pratiqués aux angles pour recevoir un couvercle qui retarde la dessiccation et préserve les graines des attaques des rongeurs ; en plaçant dans un appareil semblable où l'on a soin d'entretenir une humidité convenable un nombre de graines déterminé, vingt par exemple, on peut suivre leur évolution et en déduire leur qualité germinative. Certaines espèces présentent à la germination une résistance prolongée, tels sont les trèfles et comme l'évolution de cette plante cultivée surtout comme fourrage n'exige pas aussi impérieusement que celle des céréales une maturation simultanée, on est convenu dans la pratique du contrôle pour les trèfles, d'ajouter aux graines qui se gonflent en dix jours un tiers de celles qui ne se gonflent pas.

Qualité de la graine. — C'est surtout dans la culture du lin que le choix de la graine est important. Les praticiens ont reconnu que malgré son prix élevé, on a beaucoup plus de chances de bénéfice en semant la graine provenant directement de Riga ; elle est expédiée en petits barils portant des marques spéciales et porte le nom de *graine de tonne* ; on réussit encore en employant la graine récoltée sur les lins semés en France et provenant des semences de Riga ; cette graine est désignée sous le nom de graine d'après tonne ; le mélange des graines de semences avec des graines plus âgées destinées au broyage sont une des causes les plus fréquentes de mauvaise réussite de cette culture difficile (1).

Dans la culture de la betterave le choix de la graine présente une importance exceptionnelle, car bien que le mode de culture, la distribution des engrais, et notamment l'excès d'engrais azoté puisse avoir une influence fâcheuse sur la

(1) Voyez *Annales agronom.*, t. II, un Mémoire de M. A. Renouard fils sur la graine de lin.

quantité de sucre produite (1), les qualités de la betterave sont surtout déterminées par la nature de la graine (Péligot, puis Frémy et Dehérain), aussi le choix des porte-graines est-il devenu l'objet de travaux importants particulièrement dans le département du Nord où MM. Desprets et Simon Legrand ont établi des laboratoires pour procéder à la recherche des porte-graines les meilleurs, imitant ainsi sur une vaste échelle ce qu'avaient fait depuis de longues années MM. Vilmorin pour la création de leur race de betteraves améliorées.

En général, les betteraves très riches en sucre ne donnent qu'un médiocre rendement à l'hectare, de telle sorte que lorsque le mode d'achat des racines est seulement basé sur le poids des betteraves portées à la sucrerie, l'intérêt du cultivateur est opposé à celui du fabricant; l'un ne visant qu'à la quantité et l'autre recherchant surtout la bonne qualité de la betterave. Ces intérêts n'ont pu encore trouver un terrain de conciliation uniformément adopté, et ces divisions ont actuellement l'influence la plus funeste sur l'industrie sucrière.

Il n'est malheureusement pas possible de déterminer à l'aide d'un examen attentif aidé de l'analyse, la qualité de la graine de betterave; j'ai analysé il y a plusieurs années des graines appartenant aux variétés les plus différentes sans pouvoir en tirer aucune indication précise, et le cultivateur doit s'en rapporter à la bonne foi du marchand de graines; le seul essai qui soit entré dans la pratique a pour but de connaître les qualités germinatives des fruits qui renferment les véritables graines de betteraves.

Les cultivateurs attachent habituellement une grande importance au choix des graines de céréales qui doivent être semées; un certain nombre d'expériences semble indiquer que cette préoccupation est exagérée et qu'une graine médiocre, chétive, placée dans de bonnes conditions de végétation peut fournir d'excellentes récoltes; cependant ces expériences ne sont pas assez nombreuses pour qu'on puisse détourner les cultivateurs d'une pratique qui a pour elle la sanction du temps et qui repose sans doute sur une longue série d'observations inédites, transmises d'un cultivateur à l'autre. Il faut bien se garder de blâmer hâtivement ces pratiques agricoles anciennes, elles ont presque toujours leur raison d'être, et un examen attentif permet souvent d'en reconnaître l'utilité.

§ 2. — Préparation des graines.

Les cultivateurs ont depuis longtemps l'habitude d'ajouter aux semences, avant de les confier à la terre, diverses matières qui doivent exercer des actions différentes. Les unes ont pour but de préserver les semences contre l'invasion des végétations cryptogamiques telles que la carie ou contre les rongeurs, les autres doivent servir à favoriser le développement de la jeune plante; nous examinerons la préparation des graines à ces deux points de vue différents.

Pour préserver les graines de la carie on emploie depuis longtemps la chaux, d'où est venu le nom de l'opération désignée sous le nom de chaulage; la surface

(1) *Ann. agronom.*, t. I, II, III. Mémoires de MM. Corenwindes, Pagnoul, Frémy et Dehérain.

du grain étant humectée par de l'eau pure ou salée ou même du sulfate de soude, on répand la chaux en poudre, par des pelletages répétés on arrive à imprégner les grains et cette pratique ne paraît pas avoir d'inconvénients sur les propriétés germinatives des grains; il n'en est plus ainsi quand on opère à une température plus élevée. Isidore Pierre (1) a reconnu que lorsqu'on verse sur du blé de semence un lait de chaux dont la température diffère peu de 100 degrés et qu'on mélange ensuite vivement à la pelle le grain et le liquide, la température de ce dernier s'abaisse assez vite, au contact du blé froid, à une température de 50 à 60 degrés; et cependant un quart environ des grains qui avaient subi cette opération ne présente aucune trace de germination.

On remplace souvent la chaux par du sulfate de cuivre: on dissout 100 grammes de sulfate dans une dizaine de litres d'eau, quantité suffisante pour un hectolitre de grains. Le blé est placé dans un baquet avec la dissolution à laquelle on ajoute assez d'eau pour qu'il soit recouvert d'une couche de liquide de 12 à 15 centimètres d'épaisseur. On brasse et, après avoir enlevé les grains surnageant, on met à égoutter dans des paniers qui, une heure après, sont plongés pendant un instant dans l'eau fraîche. Après avoir fait égoutter le grain une seconde fois, on le sèche en l'étendant sur une aire.

Il faut toutefois se garder d'élever la température de la dissolution du sulfate de cuivre dans laquelle le blé doit être immergé, car même quand la température ne dépasse pas 50 degrés, l'immersion pendant un temps très court peut suffire pour priver le blé de sa faculté germinative.

En 1854, l'Alsace fut envahie par les campagnols; on estima à plus de 800.000 francs les dégâts qu'ils occasionnèrent dans le seul arrondissement de Wissembourg, et M. Boussingault fut conduit à étudier le mode de préparation des grains qui pourraient les mettre à l'abri de la dent des rongeurs (2). Il reconnut d'abord que le sulfatage, même en dépensant 500 grammes de sulfate de cuivre par hectolitre de blé, était un préservatif insuffisant, car les campagnols enlevaient la pellicule imprégnée de sel vénéneux et dévoraient l'amande sans en souffrir; or à cette dose le sulfate de cuivre détruit les propriétés germinatives du blé; on essaya alors un mélange de 20 grammes de chaux et 2 grammes d'acide arsénieux pour un litre de blé; à cette dose les campagnols moururent. On conçoit donc que dans certains cas il puisse y avoir avantage à empoisonner les semences à l'aide de l'acide arsénieux; il est à remarquer toutefois que non seulement on occasionnerait la mort des rongeurs dont on veut se débarrasser, mais sans doute aussi du gibier qu'on a habituellement intérêt à conserver.

Quelques cultivateurs ont l'habitude d'ajouter leurs semences de diverses matières minérales dans le but non seulement de favoriser la germination, mais aussi de nourrir la plante dans son jeune âge; à diverses reprises, on a préconisé le pralinage des grains sans que l'avantage de ces pratiques soit bien évident. On assure qu'en immergeant des grains dans l'eau tiède pour les gonfler avant de les confier au sol, et en dissolvant dans cette eau des sels ammoniacaux, de l'azotate de soude ou des superphosphates, on obtient une levée plus régu-

(1) *Ann. agronom.*, t. II, p. 176.

(2) *Ann. de chim. et de phys.* (3), t. XLVI, 1836, p. 458.

lière. Je n'ai pas eu l'occasion de reconnaître l'avantage de ces pratiques, mais, en revanche, j'ai vu souvent que les sels ammoniacaux exerçaient une influence funeste sur la levée des graines de betteraves, et il m'est arrivé d'être obligé de semer à deux reprises différentes des parcelles de mon champ d'expériences de Grignon, destinées aux betteraves, sur lesquelles on avait répandu une dose un peu forte de sel ammoniacal; les nitrates ne paraissent pas exercer une action aussi fâcheuse.

§ 3. — Des conditions de la germination.

Pour qu'une graine vivante entre en germination, trois conditions sont nécessaires : de l'oxygène, de l'humidité, une température convenable.

Oxygène. — Rien n'est plus facile que de disposer des expériences pour démontrer la nécessité de ces conditions. Si on place des graines dans des ballons renfermant de petites quantités d'eau suffisantes pour gonfler les graines, mais que l'atmosphère de ces ballons soit formée d'azote, d'acide carbonique ou d'hydrogène, aucune graine ne germe : elles pourrissent ou fermentent. Cette expérience est suffisante à démontrer que l'oxygène est nécessaire à la germination.

Quantité d'oxygène nécessaire à la germination. — Les proportions d'oxygène qu'une graine doit rencontrer pour commencer à évoluer varient avec ses dimensions. Les petites graines n'exigent qu'une quantité faible d'oxygène; on peut le démontrer par la méthode suivante : on sait qu'un grand nombre de graines germent très bien dans l'eau, à condition d'y rencontrer une certaine quantité d'oxygène dissout. On détermine la proportion d'oxygène contenue dans l'eau à utiliser pendant l'expérience; on remplit de cette eau de petits ballons de 125^{cc}; on y introduit des graines, du colza, par exemple, en nombre croissant, de telle sorte que le ballon n° 1 renferme une graine, le ballon n° 2 deux graines, et ainsi de suite. On ferme tous les ballons à la lampe, on les expose à une douce température. Après deux ou trois jours, les graines ont germé quand elles n'ont été qu'en petit nombre; mais quand elles ont été accumulées en plus grande quantité, toutes les graines n'ont pas germé. En divisant le nombre de centimètres cubes d'oxygène contenus dans le liquide par le nombre de graines germées, on a une idée de la proportion d'oxygène nécessaire. L'expérience réussit difficilement avec des graines de grosses dimensions, même lorsqu'on les place dans des vases renfermant un volume d'eau considérable.

La petite quantité d'oxygène dissoute dans l'eau de fontaine ordinaire est, en général, suffisante pour déterminer la germination; et, dans les laboratoires, on réussit souvent à obtenir une évolution régulière en plaçant les graines dans de l'eau constamment renouvelée. Si on peut chauffer légèrement l'eau en la faisant passer dans un tube de laiton sous lequel on a placé un bec de gaz, la germination est rapide.

Cette petite quantité d'oxygène contenue dans l'eau est indispensable à l'évo-

lution ; on réussit à le montrer par la disposition suivante. Sur un carton ou une planchette on fixe des tubes de verre de 10 centimètres environ, assez larges pour recevoir des graines ; on les relie les uns aux autres par des tubes à gaz courbés en arc de cercle ; enfin le premier porte un tube droit à entonnoir et le dernier un tube recourbé, effilé, qui permet de rejeter au dehors l'eau qui circule dans l'appareil. Les tubes étant garnis de graines, on y fait circuler très lentement un courant d'eau. Les graines du premier tube trouvant de l'eau aérée, germent parfaitement ; quelques-unes du second tube, trouvant encore un peu d'oxygène dans l'eau, évoluent plus lentement ; mais l'eau qui arrive dans les autres tubes ayant été absolument dépouillée d'oxygène par son passage dans les premiers tubes, les graines qui y sont renfermées ne montrent aucune trace d'évolution.

On peut encore faire germer les graines dans de l'eau tiède constamment parcourue par un courant d'air. M. Emery, il y déjà plusieurs années, a donné les résultats d'un grand nombre d'expériences faites dans ces conditions.

Il résulte des importantes recherches de M. P. Bert (1) que la germination est ralentie lorsque les graines sont soumises à l'action de l'oxygène maintenue à une très faible ou à une trop forte tension. Ainsi, sur la germination de l'orge et du cresson, une augmentation, même légère, dans la pression de l'oxygène agit défavorablement. L'oxygène pur, à la pression de 76 centimètres, serait moins efficace que ce même gaz ramené à une pression semblable à celle qu'il présente dans l'air atmosphérique. Dans l'air comprimé à dix atmosphères, le ricin et le melon ne germent plus ; au-dessus de sept atmosphères, l'orge et le cresson, à leur tour, cessent de germer.

Dans l'air dilaté, la germination se fait d'autant moins vite que la pression est moindre. La différence commence à se manifester dès la pression de 50 centimètres de mercure. La limite inférieure, à laquelle a pu avoir lieu la germination, est pour le cresson d'environ 60 centimètres, et pour l'orge d'environ 6 centimètres ; ces différences sont dues, non à la diminution de la pression atmosphérique, mais à l'abaissement de la tension de l'oxygène. En effet, M. Bert a reconnu que la germination peut encore avoir lieu à la tension de 4 centimètres, à la condition d'employer une atmosphère très oxygénée.

Dans l'oxygène pur, à la pression ordinaire, la germination du cresson ou du lin ont cependant encore lieu d'une façon complète, et l'on verra plus loin plusieurs exemples de germinations identiques dans l'oxygène et dans l'air.

Mélanges gazeux. — Quand on place les graines dans des mélanges gazeux, on peut reconnaître à quels points certains gaz exercent sur les graines une action fâcheuse ; tandis que la germination a lieu dans un mélange renfermant 80 centimètres cube d'azote et seulement 8^{cc},9 d'oxygène, qu'elle a encore lieu quand l'oxygène est dilué d'hydrogène ; elle cesse de se produire quand on remplace l'hydrogène ou l'azote par de l'acide carbonique, l'oxygène ne renfermant que de faibles quantités d'acide carbonique provoque un commencement de germination qui s'arrête bientôt (2).

(1) *Comptes rendus*, 1873, t. LXXVIII, p. 1493.

(2) Dehérain et Landrin. *Ann. des sc. nat. Bot.*, 5^e série, t. XIX, p. 387.

au-dessous de 0°. Elle augmente à peu près proportionnellement à la température pour s'étendre bien au delà de la température optimale d'accroissement, jusqu'à des degrés de chaleur où l'élongation s'éteint, et elle ne s'arrête, ainsi que l'ont montré des recherches antérieures, qu'avec la vitalité même de la plante.

« L'élongation et la respiration sont donc deux fonctions dont les marches sont loin d'être parallèles. »

M. Borodin, enfin, a observé également que la quantité d'acide carbonique, émise par du cresson en germination, croît avec l'élévation de la température, et cette proportionnalité peut être considérée comme acquise.

Influence de la lumière. — Les expériences, exécutées sur ce sujet par nombre d'observateurs, les ont conduits à des résultats contradictoires; dans un travail étendu (1), M. Pauchon est arrivé aux conclusions suivantes :

« La lumière et la chaleur agissent d'une manière identique sur la respiration des semences, au moins en ce qui concerne l'absorption de l'oxygène; elles l'activent, et cette influence accélératrice augmente à mesure que l'intensité de ces énergies se prononce davantage.

« Dans les limites des expériences exécutées, il n'est pas douteux que la lumière soit favorable à la germination, puisqu'elle augmente l'absorption de l'oxygène et diminue le dégagement absolu de l'acide carbonique, comme cela a été constaté pour le ricin. Pour le haricot, il est plus difficile de se prononcer, la perte absolue en acide carbonique étant un peu plus élevée à la lumière qu'à l'obscurité..... »

L'influence de la lumière est, dans tous les cas, très faible; cela résulte, des recherches de M. Pauchon comme de celles de ses devanciers et en outre, des conditions mêmes dans lesquelles germent toutes les graines enterrées dans le sol à l'abri de la lumière (2).

Influence de l'électricité. — On sait avec quelle ardeur les physiologistes du XVIII^e siècle étudièrent l'influence de l'électricité sur la végétation; leurs nombreuses expériences les conduisirent à des résultats très divergents, et Ingen Houz finit par montrer, par des essais rigoureux, que l'influence de l'électricité était loin d'être démontrée. Depuis cette époque, à plusieurs reprises différentes, des résultats plus ou moins avantageux ont été annoncés, mais presque toujours, les expériences de vérification échouèrent absolument; tels furent les essais de Forster, démentis par Solly (1864) et, plus récemment, ceux de M. Grandeau, que ne put reproduire M. Naudin.

Rien n'est donc moins certain que l'influence de l'électricité sur la germination, et il est inutile de s'attarder à des discussions qui n'ont conduit à aucunes conclusions précises (3).

(1) *Ann. des sciences naturelles. Bot.*, 6^e série, t. X, p. 81.

(2) Dans un travail tout récent, M. von Liebeberg attribue à des échauffements inégaux pendant le jour et la nuit, la germination un peu plus rapide des graines exposées à la lumière. *Ann. Agron.* t. X, p. 185, avril 1884.

(3) *Ann. agronom.*, t. VI, p. 28.

§ 4. — Échanges gazeux observés pendant la germination.

Toute germination est accompagnée d'un dégagement d'acide carbonique, par suite d'une action de l'oxygène atmosphérique sur les principes immédiats de la graine; par suite, enfin, d'une pénétration de l'oxygène au travers des tissus de la plante, pénétration dont il faut saisir le mécanisme.

Si on réfléchit que les grains germent très bien dans un courant d'eau renouvelée, ou même dans de l'eau parcourue par un courant d'air, ainsi qu'il a été dit plus haut, on sera convaincu que les gaz pénètrent dans les grains en dissolution dans l'eau, passant par diffusion au travers des enveloppes ramollies.

Une fois l'oxygène introduit dans la graine, il y exerce son action comburante sans qu'on sache bien encore qu'elle est la cause qui détermine le commencement de l'attaque; les matières contenues dans la graine sont, en effet, médiocrement oxydables. Les recherches de M. Pasteur ont montré que les matières organiques, même très oxydables, résistent à l'action de l'oxygène et que souvent il faut l'intervention d'un organisme inférieur pour que l'oxydation se produise. Ces organismes existent-ils dans les graines et, s'ils existent, est-ce à eux qu'on doit le commencement de cette action? Nous l'ignorons, les recherches n'ayant pas été dirigées de ce côté.

Il y a quelques années, M. Landrin et moi (1), nous avons essayé d'expliquer ce commencement d'attaque par une condensation des gaz dans les grains, condensation accompagnée d'un dégagement de chaleur suffisant pour amener l'oxygène à une température convenable pour déterminer l'attaque des principes immédiats, la chaleur dégagée par le commencement de l'oxydation suffisant pour qu'elle se continuât. Cette manière de voir repose sur le fait, que si on place des graines dans une atmosphère limitée et qu'on détermine le volume du gaz peu de temps, après le commencement de la germination, on trouve que ce volume de gaz a diminué, que si, en outre, on extrait les gaz contenus dans les graines avant et après la germination, au moyen de la pompe de M. Alvergniat ou d'une trompe à mercure, on trouve que le volume de gaz est beaucoup plus abondant après la germination qu'au commencement; il semble donc que les gaz pénètrent la graine, et qu'ils se condensent dans l'intérieur des tissus, puisqu'on réussit encore l'expérience avec des haricots dépouillés de leur testa; on trouva notamment que 100 grammes de haricots d'Espagne renfermant, avant la germination, 32^{cc},1 de gaz, composés de 7,1 d'oxygène, 24,1 d'azote et 0,9 d'acide carbonique, tandis qu'après huit jours de germination, on en a retiré 117 centimètres cube de gaz, renfermant 1,9 d'oxygène, 98^{cc},6 d'acide carbonique et 21^{cc},5 d'azote (2).

La pénétration des gaz dans les graines, la diminution de volume qui en résulte fatalement, doit donc être accompagnée d'un dégagement de chaleur qui a, sans doute, une influence sur l'attaque des principes immédiats.

(1) *Annales des sciences naturelles*, t. XIX, 1874.

(2) *Ann. agronom.*, t. I, p. 229.

Cette manière de voir combattue par divers auteurs, a été, au contraire, proposée de nouveau par M. Detmer, qui paraît n'avoir pas eu connaissance des travaux précédents et qui attribue le dégagement de chaleur à la condensation dans les graines de la vapeur d'eau (1). M. Detmer écrit, sur ce sujet, les lignes suivantes :

« M. Wiesner a montré que les graines en contact avec de l'eau développent de la chaleur même avant le dégagement d'acide carbonique. Il pense que la chaleur ainsi développée prend sa source dans une condensation de l'eau dans la graine. M. Nobbe n'admet pas cette manière de voir; il croit plutôt que cette chaleur est déterminée par la formation de produits intermédiaires avant le dégagement d'acide carbonique. Je crois, ajoute l'auteur, que des phénomènes, tels que les présume M. Nobbe, peuvent très bien se produire lors de la germination, mais il peut y avoir certainement, d'un autre côté, dégagement de chaleur à la suite d'une condensation d'eau. Il faut, en effet, que les effets physiques se manifestent dès que se rencontrent les conditions de leur production. J'ai fait sur ce sujet plusieurs expériences, dont les résultats me paraissent démonstratifs.

« J'ai installé trois cylindres destinés à recevoir: le premier, 100 grammes de fécule de pomme de terre; le second, 100 grammes de graines de pois réduites en poudre; le troisième, 100 grammes de sable quartzifère. Après avoir déterminé la température de ces substances, on les arrose de 100 centimètres cubes d'eau.

	Température initiale de l'eau et des autres substances.	Température des mélanges.
I.	23°,4	25°,2
II.	23°,3	25°
III.	23°,5	23°

« Il y a donc eu une augmentation subite de la température, qui nous apprend que le développement de la chaleur vient d'une condensation de l'eau. Or, une telle condensation doit se produire, sans doute, lors de l'absorption de l'eau par les graines. »

Nature des gaz dégagés pendant la germination. — Quand les graines germent au contact d'une quantité suffisante d'oxygène, le seul gaz qui apparaît habituellement est de l'acide carbonique; plusieurs auteurs ont constaté cependant dans des atmosphères où se trouvaient des grains en germination un excès d'azote ou des gaz combustibles, et il importe d'en rechercher l'origine.

L'azote dégagé peut provenir ou bien de celui que renfermaient les graines en expérience, ou de la décomposition des matières albuminoïdes mettant de l'azote en liberté. Si la combustion, qui se produit dans les graines pendant la germination, déterminait une destruction complète d'une quantité plus ou moins forte d'albuminoïdes, le dégagement d'azote devrait être notable et se produire aussi habituellement que l'acide carbonique; il n'en est pas ainsi, il arrive très souvent que la quantité d'azote dégagé soit nulle ou très faible, ou

(1) *Ann. agronom.*, t. V, p. 302.

même qu'elle fasse place à une absorption, ce qui s'accorde mieux avec l'idée d'un échange de gaz entre la graine et l'atmosphère ambiante qu'avec l'idée d'une combustion.

En outre, il est une cause d'erreur contre laquelle il importe de se mettre en garde, d'autant plus qu'elle est difficile à éviter. Quand le nombre de graines introduites dans les appareils est assez grand, il arrive souvent que toutes ne germent pas, mais que quelques-unes se décomposent; or, on sait que la décomposition des matières albuminoïdes en présence de l'oxygène est accompagnée d'un dégagement d'azote (Reiset, puis Lawes et Gilbert), de telle sorte, que le dégagement d'azote observé souvent peut-être dû non à des graines qui germent, mais à des graines qui se décomposent.

Quand les graines séjournent dans une atmosphère limitée pendant un temps assez prolongé, elles absorbent l'oxygène jusqu'à la dernière trace, elles périssent et se décomposent; cette décomposition est accompagnée souvent d'un dégagement d'hydrogène, mélangé parfois de formène; ces gaz n'apparaissent habituellement que dans les atmosphères d'où l'oxygène a complètement disparu, c'est-à-dire dans les conditions où la graine se décompose.

Rapport entre l'oxygène absorbé et l'acide carbonique émis. — Quand les graines séjournent dans une atmosphère limitée, mais que l'oxygène s'y rencontre en quantités suffisantes, on trouve que l'oxygène absorbé surpasse l'acide carbonique émis; il est naturel qu'il en soit ainsi, puisque l'oxygène peut non seulement servir à brûler du carbone et à fournir de l'acide carbonique dont le volume est précisément égal à celui de l'oxygène qui a servi à le former, mais encore être employé à former des produits fixes, tels que les acides qu'on rencontre souvent dans les graines germées; en outre, dans les graines oléagineuses, l'oxygène peut encore se fixer sur l'huile elle-même; enfin, l'asparagine est un des produits habituels de la germination, et elle provient de l'oxydation des combinaisons azotées. Or, si on compare, comme l'a fait M. Pfeffer (1), la composition de l'asparagine à celle de la légumine qui existe dans les graines des papilionacées, qu'il a parfaitement étudiées on remarque que la légumine qui, pendant la germination se métamorphose en asparagine, ne le peut faire qu'à la condition de perdre du carbone qui disparaît, sans doute, sous forme d'acide carbonique; de l'hydrogène qui s'unit à l'oxygène libre pour donner de l'eau, qu'en fixant enfin une certaine quantité d'oxygène. On conçoit donc que l'oxygène absorbé surpasse l'acide carbonique produit.

Quand l'oxygène a été entièrement consommé par les graines maintenues dans une atmosphère limitée, le dégagement d'acide carbonique continue à se produire, mais dans ce cas, il est dû à des fermentations secondaires qui peuvent même produire de petites quantités d'alcool, ainsi que l'a reconnu un de nos collaborateurs, M. Bréal. C'est là, sans doute un cas particulier, du fait établi par MM. Lechartier, Bellamy, Pasteur, et vérifié par M. Müntz sur des plantes entières, que les cellules vivantes, soustraites à l'action de l'air, prennent la qualité de ferment. Le gaz dégagé ne peut donc plus être attribué à une germination régulière.

(1) *Bot. Zeit.*, 1874, n° 14, et *Ann. des sc. nat. Botan.*, 5^e série, t. XIX, p. 391.

Les échanges gazeux qui se produisent pendant la germination pouvant être affecté par la présence de l'acide carbonique formé, plusieurs auteurs ont imaginé des appareils qui permettent d'absorber l'acide carbonique aussitôt après sa formation (1).

§ 5. — Des transformations que subissent les graines pendant la germination.

Quand on détermine le poids d'un certain nombre de graines mises en germination, qu'on sait, par la dessiccation de graines de même nature, la quantité de matière sèche qu'elles renferment; puis, qu'après l'évolution, à l'abri de la lumière, on pèse le résidu de la graine et les jeunes organes émis, on trouve toujours que la germination est accompagnée d'une perte de matière sèche.

Si on compare la composition élémentaire de la graine à celle des grains germés, on trouve que la perte constatée peut être représentée par du carbone et de l'eau, quand la germination a eu lieu dans de l'eau distillée; si elle se produit dans de l'eau ordinaire ou dans un liquide renfermant des matières minérales, les résultats sont plus compliqués, à cause de la grande quantité de matières minérales absorbées.

Dans le tableau suivant, nous empruntons les éléments aux analyses de M. Boussingault; on n'a pas tenu compte des changements de poids des matières minérales :

Nature de la graine.	Perte de poids constatée.	Matières disparues pendant la germination.			Oxygène nécessaire pour former de l'eau avec l'hydrogène disparu.
		Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	
Pois.	4 ^r ,161	0,567	0,072	0,500	576
Froment.	0 ,952	0,465	0,052	0,436	436
Mais.	0 ,239	0,090	0,014	0,133	120
Haricots.	0 ,360	0,159	0,023	0,176	184

On voit que les chiffres, calculés pour l'oxygène nécessaire pour constituer de l'eau avec l'hydrogène trouvé, diffèrent peu de ceux qui ont été calculés d'après l'analyse, les pertes d'azote ayant été trouvées nulles ou insignifiantes.

Transformation des principes immédiats pendant la germination. — Pendant la germination, les principes insolubles contenus dans les graines deviennent solubles en se modifiant plus ou moins profondément; ils atteignent ainsi les points où apparaissent les jeunes organes auxquels ils fournissent les matériaux nécessaires à la constitution des tissus, dans lesquels s'accomplissent les phénomènes réguliers d'assimilation.

Dans les graines amylacées, la transformation qui se produit d'abord est due à l'action d'un ferment soluble, la diastase, découverte par MM. Payen et Persoz.

(1) MM. Wolkoff et Rischawi. *Ann. agron.*, t. III, p. 144, et tout récemment MM. Bonnier et Mangin, notamment, les ont employés. *Ann. des sc. natur.*, 3^e série, t. XVII, p. 210.

D'après ces auteurs, une partie de diastase suffit à modifier plus de 2,000 parties d'amidon. On a cru, pendant longtemps, que l'amidon donnait de la dextrine, puis ensuite du glucose; mais, d'après les travaux de M. Musculus, l'amidon donnerait simultanément de la dextrine et de la glucose.

Les matières grasses, contenues dans les graines oléagineuses, subissent elles-mêmes des transformations importantes, elles perdent du carbone et donnent d'abord naissance de la glycole; puis, celle-ci se transforme en cellulose comme dans les graines amylacées.

Le tableau suivant, emprunté aux analyses de M. Boussingault (1), montre les transformations subies par une graine amylacée :

Composition immédiate de graines et de plants de maïs développés dans l'obscurité.

	POIDS total	AMIDON et dextrine.	GLUCOSE et sucre.	HUILE.	CELLULOSE.	MATIÈRES azotées.	MATIÈRES minérales	MATIÈRES indéterminées.
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
Graines . . .	8,626	6,386	»	0,516	0,516	0,880	0,156	0,235
Plants. . . .	4,529	0,777	0,953	0,150	1,316	0,880	0,156	0,297
Différences..	-4,107	-5,609	+0,953	-0,312	+0,800	0,000	0,000	+0,062

M. Fleury donne l'exemple suivant des transformations subies par les graines de ricin (2) :

Époques à partir des débuts de l'expérience.		Matières grasses.	Sucre et analogues.	Cellulose.	Matières albuminoïdes.
Début.	1	46,60	2,21	17,99	20,30
6 jours.	2	45,90	»	»	»
11 jours.	3	41,63	»	»	»
16 jours.	4	33,15	9,95	»	»
21 jours.	5	7,90	18,47	»	»
36 jours.	6	10,30	17,72	»	»
31 jours.	7	10,28	26,90	29,99	20,31

Il résulte manifestement de ces deux séries d'expériences, comme de celles de Laskowski, sur les graines de potiron, que dans la germination des graines amylacées ou dans celles des matières grasses, l'amidon ou l'huile disparaissent et sont remplacées par de la cellulose. Ces points étant établis, il reste à préciser les produits intermédiaires, dont la présence a pu être constatée quand l'analyse a été plus complète que celle que nous venons de citer.

Transformation de l'amidon. — Pendant la germination, l'amidon, matière de réserve contenue dans les graines, se dissout, devient mobile et est utilisé à la formation des organes nouveaux, où il se retrouve, après diverses transformations, sous une forme isomérique de celle qu'il avait au point de départ.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 4^e série, t. IV, p. 5.

Cette transformation a été l'objet de recherches nombreuses, et cependant elle n'est encore que très incomplètement connue; si on sait quels sont les produits solubles qui dérivent de l'amidon, on ignore encore comment ces produits solubles se métamorphosent en cellulose; si on sait que la transformation a lieu sous l'influence d'un ferment soluble, la diastase, on ignore le mode d'action de ce ferment.

La diastase, qui préexiste parfois dans les graines normales, se produit en général en plus grande quantité au moment de la germination; elle ne paraît pas être identique dans toutes les graines.

Pour extraire la diastase de l'orge germé, il est avantageux de substituer au procédé décrit par Payen et Persoz, auxquels on doit la découverte de ce premier exemple d'un ferment soluble, la méthode suivante, due à Wittich: le malt, concassé, est mis à digérer dans de la glycérine pure; après quelques jours, la masse est exprimée et le liquide, filtré, est précipité par addition d'alcool et d'une petite quantité d'éther. La diastase se précipite; on la redissout dans l'eau pour la séparer des albuminoïdes coagulés par l'alcool, et on la précipite de nouveau par l'alcool.

La transformation de l'amidon sous l'influence de la diastase donne deux produits appartenant à des groupes différents; l'un est une saccharose, la maltose, répondant à la formule du sucre de canne, mais en différant par la propriété de se réduire en deux glycoses droites, l'une et l'autre appartenant au groupe des dextrines.

D'après M. Baranetzky (résumé de M. Van Tieghem), la série des transformations serait la suivante: les grains d'amidon ou granulose, désignés ainsi par opposition à l'enveloppe du grain formé par un principe isomère différent appelé amylose), donnent d'abord, outre la maltose, de l'*amylo-dextrine*.

L'*amylo-dextrine* est cristallisable, soit en aiguilles isolées, soit en prismes groupés concentriquement en forme de disques. Fraichement préparés et aqueux, ces cristaux se dissolvent facilement dans l'eau froide; desséchés, ils y sont peu solubles, mais se dissolvent activement dans l'eau vers 50° ou 60°. Ils ne se colorent pas par l'iode, mais leur dissolution prend une teinte rouge cuivrée sous l'influence de ce réactif. Le pouvoir rotatoire de l'*amylo-dextrine* est +213°. Elle réduit très facilement le tartrate cupropotassique; son pouvoir réducteur est 6, celui de la glycose étant 100. La maltose possède un pouvoir rotatoire à droite de 139°; son pouvoir réducteur est 66.

L'*amylo-dextrine*, représentée par quatre molécules de dextrine ($C^{12}H^{10}O^{10}$), fixe un nouvel équivalent d'eau et donne de l'érythro-dextrine ($C^{24}H^{20}O^{20}$), et de la maltose. L'érythro-dextrine se distingue de l'*amylo-dextrine*, dont elle partage le grand pouvoir rotatoire et le faible pouvoir réducteur, en ce qu'elle ne devient jamais insoluble dans l'eau froide, et en ce qu'elle se colore toujours en beau rouge par l'iode aussi bien à l'état solide qu'en dissolution. C'est elle qui forme la majeure partie de la dextrine du commerce.

Par une nouvelle hydratation et un nouveau dédoublement, l'érythro-dextrine produit ensuite de l'achroo-dextrine ($C^{24}H^{20}O^{20}$) et de la maltose. L'achroo-dextrine ne se colore par l'iode ni en dissolution ni à l'état solide. Son pouvoir rotatoire est + 210°; son pouvoir réducteur, 12.

En absorbant un nouvel équivalent d'eau, l'achroodextrine se dédouble à son tour en dextrine et maltose. La dextrine, beaucoup plus résistante à l'action des acides que les produits précédents, ne se colore pas par l'iode. Son pouvoir rotatoire est beaucoup plus faible, + 150°; son pouvoir réducteur plus fort, 28.

La même influence continuant à agir, la dextrine absorbe un équivalent d'eau et se transforme en maltose.

Ainsi qu'il a été dit, toutes ces transformations ne sont que transitoires, et pendant la germination, aux actions qui fluidifient l'amidon viennent bientôt se joindre des actions inverses qui le solidifient sous forme de celluloses variées. Malheureusement, nous ne connaissons pas encore le mécanisme de cette métamorphose inverse.

Transformation des matières grasses. — M. Muntz (1) a reconnu que, pendant la germination des graines oléagineuses du colza, du pavot et du radis, la matière grasse se dédoublait progressivement en glycérine et en acides gras. La glycérine n'a pas pu être retrouvée dans les graines germées; il est probable qu'elle disparaît à mesure qu'elle est mise en liberté. La transformation des huiles neutres est assez complète pour que, à une certaine époque de son développement, la jeune plante ne contienne plus que des acides gras libres.

Que deviennent ces acides gras? M. Muntz a pu constater seulement qu'ils absorbaient de l'oxygène en assez faible proportion; il n'a pu reconnaître à quelles substances ils donnaient naissance. Il semble, d'après les analyses de M. Peters (cité par M. Sachs, *Phys. végét.*, p. 390), qu'avant de donner de la cellulose les matières grasses produisent des sucres et de l'amidon. L'auteur trouve, en effet, dans les graines normales de cucurbita, pepo. : 49,51 de matières grasses quand il les met en germination; à la deuxième période de développement, il dose 3,42 de sucre et 7 d'amidon dans les cotylédons; 5,84 de sucre et 7,62 d'amidon dans l'axe hypocotyle, et enfin 6,96 et 8,21 d'amidon dans les racines. A ce même moment, la matière grasse n'a plus que 26,40, 3,93 et 3,10 dans chacun de ces trois organes.

Il n'est donc pas douteux que, dans les graines étudiées, il disparaît de la matière grasse et il apparaît du sucre et de l'amidon; mais il faut bien reconnaître que si les hydrates de carbone dérivent des graisses, nous n'avons aucune indication sur les transformations successives qu'elles subissent.

On rencontre, au reste, dans quelques graines, et notamment dans le ricin, une matière particulière, l'aleurone, étudiée par A. Gris, et dont le rôle est encore mal défini; il est possible que si on arrivait à mieux connaître cette matière, on parvînt à comprendre l'évolution de la matière grasse dans la germination (2).

Transformation des matières azotées. — Quand on se contente de doser l'azote des graines normales ou germées par la chaux sodée, on reconnaît habituellement que la proportion de ce gaz reste constante pendant la germination;

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 4^e série, t. XXII, p. 472. 1871.

(2) Voyez le mémoire d'A. Gris, *Ann. des sciences natur. Botan.*, 5^e série, t. II, p. 5.

mais ce serait une erreur de croire que les substances azotées n'ont subi aucune modification. De même que les huiles ou l'amidon se transforment en matières solubles dans l'eau, cristalloïdes, susceptibles de se déplacer d'une cellule à l'autre, prennent, en empruntant l'expression des physiologistes allemands, « une forme de voyage, » les matières albuminoïdes se métamorphosent à leur tour et deviennent surtout de l'asparagine. M. Boussingault a extrait de 200 gr. de haricots germés dans l'obscurité 5^{gr},40 d'asparagine cristallisée. MM. Robert Sachsse et Walter ont vu dans les pois en germination l'asparagine augmenter à mesure que la germination était plus avancée (1).

M. F. Meunier a dosé l'asparagine dans diverses graines maintenues à l'obscurité ou à la lumière, il a obtenu les résultats suivants :

DURÉE de la germination.	ASPARAGINE POUR 100 de matière sèche		OBSERVATIONS.	
	à l'obscurité.	à la lumière.		
<i>Pois de Clamart.</i>				
9 jours.	0,48	0,36	Après trente-quatre jours de germination, les lupins n'avaient encore qu'un faible développement correspondant à la première période des autres graines étudiées, il n'est donc pas extraordinaire que l'asparagine soit en même proportion dans les graines maintenues à l'obscurité ou exposées à la lumière; mais si l'expérience avait pu être poursuivie plus longtemps, il est probable que l'asparagine aurait diminué dans les jeunes lupins vivant à la lumière, comme on l'a observé pour les autres espèces.	
12 —	0,59	0,56		
20 —	2,69	2,58		
42 —	1,22	traces		
<i>Haricots d'Espagne.</i>				
13 jours.	1,13	1,18		
18 —	2,28	2,25		
38 —	5,18	1,41		
<i>Lupins jaunes.</i>				
12 jours.	4,53	4,38		
18 —	9,69	9,51		
34 —	17,5	17,1		
<i>Fèves de Marais.</i>				
12 jours.	1,53	1,49		
17 —	3,25	2,91		

Le tableau précédent démontre clairement : 1° que la proportion d'asparagine formée varie avec la durée de la germination et la nature de la graine ; 2° que

(1) La méthode employée par les physiologistes allemands est basée sur la décomposition des amides par l'hypobromite de soude. On recueille l'azote gazeux. Les essais exécutés par cette méthode au laboratoire de physiologie du Museum ont donné des résultats assez divergents, et M. F. Meunier, que j'avais chargé d'étudier cette question, s'est arrêté au procédé suivant : La matière broyée, séchée et pesée, est introduite dans un petit sachet en toile à mailles très serrées, ayant pour but de retenir l'amidon transformé en empis ; on introduit le tout dans une capsule de porcelaine et on épuise par l'eau bouillante ; on filtre et on précipite les matières albuminoïdes par le sous-acétate de plomb, la leucine est précipitée en même temps ; on filtre de nouveau et on se débarrasse de l'excès de sous-acétate de plomb par le bicarbonate de soude. Dans le liquide

dans la première phase de la germination la quantité d'asparagine formée est la même à la lumière qu'à l'obscurité; mais que lorsque la germination est plus avancée, l'asparagine disparaît souvent de la jeune plante exposée à la lumière, tandis qu'on la retrouve encore en proportion notable dans les plantes qui végètent à l'obscurité (pois, haricots).

Les résultats obtenus par M. F. Meunier confirment donc l'important travail publié par M. Pfeffer sur le rôle que joue l'asparagine dans la germination et sur sa disparition dans les végétaux éclairés.

Il est à remarquer que l'asparagine est souvent mêlée à d'autres amides, notamment à la leucine, que M. Gorup Besanez a trouvé dans les graines de vesce en germination (1).

§ 6. — Influence des matières minérales sur le développement de la jeune plante.

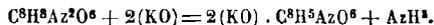
Quelle est la cause de la transformation de la matière azotée en asparagine? est-elle due à un ferment soluble, ou bien est-ce une évolution spontanée? c'est ce que nous ignorons absolument aujourd'hui. Le point important acquis par les nouvelles recherches a été de faire comprendre les métamorphoses des albuminoïdes en produits solubles et dialysables, et de rapprocher ainsi la transformation qui se manifeste dans les graines en germination, à ce qui a lieu dans l'estomac pendant la digestion, on a pu dire avec raison qu'il se formait dans l'un et l'autre cas des peptones et que pendant la germination, le jeune embryon digérait les matériaux de réserve qui l'entourait.

Quand on incinère des jeunes plantes encore en voie de germination, c'est-à-dire qui n'ont pas encore complètement vidé leurs cotylédons, et qu'on compare la quantité de cendres qu'elles contiennent à celle que renfermait la graine, on reconnaît que la proportion des matières minérales a considérablement augmenté.

Pendant la première période de la vie, l'assimilation des matières minérales est tellement active qu'elle vient compléter partiellement la perte de poids due à la combustion lente qui accompagne la germination.

Ainsi 100 pieds de blé bien développés, pris dans un champ au mois de décembre pesaient 2^{sr},970 et renfermaient 0^{sr},360 de cendres, tandis que les 100 grains dont ils provenaient pesaient 4^{sr},450, mais ne laissaient que

clair provenant de la filtration du carbonate de plomb, on ajoute de la potasse caustique, puis on distille en opérant comme pour un dosage d'ammoniaque. On sait, en effet, que l'asparagine décomposée par la potasse donne de l'acide aspactique qui se combine à l'alcali, tandis que la moitié de l'azote se dégage sous forme d'ammoniaque :



L'ammoniaque dégagée est reçue dans de l'acide sulfurique titré; on apprécie, à l'aide d'une liqueur alcaline, la quantité d'acide saturé par l'ammoniaque, comme dans le dosage de l'azote par la chaux iodée. Le poids de l'azote trouvé, multiplié par le coefficient 10,714, donne l'asparagine. (*Ann. agronom.*, t. VI, p. 275.

(1) M. Capus a donné un résumé historique très complet des travaux publiés sur l'asparagine dans les *Ann. agronom.*, t. V, p. 578.

0^r,075 de cendres ; pendant la première partie de la vie, le blé avait perdu 1^r,765 de matière organique, mais gagné pendant le même temps 0^r,285 de matière minérale.

Cette assimilation de matière minérale est-elle fortuite, ou bien, au contraire, a-t-elle une influence décisive sur l'évolution de la jeune plante ? Telle est la question que nous devons examiner dans ce paragraphe.

L'éminent physiologiste autrichien, M. J. Bœhm, a recherché l'influence des matières minérales dans la germination du haricot d'Espagne : il a reconnu que lorsque les jeunes plantes étaient enracinées dans de l'eau distillée, leur développement s'arrêtait rapidement et qu'elles ne tardaient pas à périr sans pouvoir utiliser les réserves contenues dans les cotylédons ; tandis qu'au contraire, l'évolution se produisait normalement quand les plantes étaient enracinées dans de l'eau de fontaine, qui renferme toujours en dissolution des sels de chaux (1).

Des expériences synthétiques qu'exécuta M. Bœhm, il put tirer les conclusions suivantes :

« Les jeunes plantes de *Phaseolus multifloris*, élevées dans l'eau distillée, meurent tôt ou tard, toujours avant l'emploi de la totalité des matières de réserve ; la tige se flétrit et se fane au-dessous du bourgeon terminal. Différents sels calcaires (sauf le chlorure) empêchent cet accident. La chaux ne peut être remplacée par aucune autre base ; le carbonate de magnésie est positivement vénéneux. »

Appuyant sur les conséquences de ces expériences, M. Bœhm ajoute : « Dans la transformation des matériaux organiques en matières constitutives du corps de la plante, la chaux joue un rôle tout aussi important que dans la transformation du cartilage en os. »

Cette question intéressante a été reprise récemment au Museum (2) ; on a reconnu, comme M. Bœhm, que les jeunes plantes enracinées dans l'eau absorbaient avec une extrême énergie les matières minérales dissoutes, et que, de toutes ces substances, les sels de chaux étaient les plus favorables ; en effet, des graines mises à germer dans l'eau de fontaine évoluent normalement à la température ordinaire, tandis qu'elles ne se développent que très mal dans l'eau distillée. L'influence heureuse des sels de chaux est particulièrement sensible sur le développement de la racine.

Cependant si, habituellement, il est difficile de voir développer des jeunes plantes enracinées dans l'eau distillée, en répétant ces expériences à diverses époques de l'année, on n'obtient pas toujours les mêmes résultats, tandis qu'au printemps, le blé enraciné dans l'eau distillée formait de si faibles racines, que le poids de la jeune tige entraînait souvent la chute des plantes, mises à germer entre des baguettes de verre ; au mois de juillet, on obtint un résultat différent, le développement se produisit normalement, les racines s'allongèrent aussi bien dans l'eau distillée que dans l'eau ordinaire.

(1) *Ann. agronom.*, t. I, p. 470.

(2) *Ann. agronom.*, t. IX, p. 58. Influence des matières minérales dans la germination, par MM. Dehérain et Bréal.

On fut pendant quelque temps avant de pénétrer la cause de cette diversité de résultats mais en réfléchissant à l'influence qu'exerce l'élévation de la température sur la germination, on eut l'idée que peut-être, pendant les chaleurs de l'été, l'évolution des graines avait pu se produire, bien que l'absence des matières minérales étrangères leur fut défavorable; et en effet, en plaçant des graines de blé ou de haricots dans l'eau distillée, mais en les maintenant à une température de 30 à 35°, on obtint une évolution complète. L'expérience fut particulièrement décisive sur un haricot enraciné dans l'eau distillée et maintenu dans une étuve chauffée à 35° : le développement fut normal, bien que les nouveaux organes ne renfermassent pas une trace de chaux : elle était restée tout entière dans les cotylédons encore incomplètement vidés.

Ainsi, bien que la présence de la chaux dans l'eau où plongent les racines soit avantageuse, on ne peut pas dire que cette base soit nécessaire à la formation des organes nouveaux.

M. Von Liebenberg (1) a entrepris également une série d'expériences intéressantes sur l'influence des matières minérales sur la germination. Il conclut de ses recherches qu'il existe des graines d'une structure incomplète ne renfermant pas toutes les matières nécessaires à leur développement, et donne une liste des plantes pour lesquelles il croit la chaux indispensable; mais comme il ne fait nulle mention de l'influence décisive de la température à laquelle les opérations ont eu lieu, il est probable que cette liste devra être révisée.

Quoi qu'il en soit, on peut déduire avec certitude des recherches précédentes que la composition minérale des graines n'est pas telle qu'elles puissent normalement évoluer aux températures ordinaires, sans aucun secours étranger; mais il faut reconnaître en outre que les substances minérales qu'elles renferment sont celles qu'elles auraient le plus de peine à rencontrer en quantités suffisantes, tandis que celles qui font défaut sont précisément les matières les plus abondamment répandues dans le sol. Dans la lutte pour la vie qui s'établit dans le monde végétal, des graines renfermant de l'acide phosphorique et de la potasse, mais manquant de chaux, ont une supériorité incontestable sur des germes qui renfermeraient de la chaux mais auxquels manqueraient l'acide phosphorique et la potasse, aussi ne rencontre-t-on aucunes graines dans lesquelles ces deux éléments fassent défaut; s'il a existé des espèces privées de ces deux éléments, il est probable qu'elles ont été rapidement éliminées par les espèces pourvues des éléments plus difficiles à trouver abondamment dans le sol.

On ne saurait admettre au reste que toutes les matières minérales contenues dans les végétaux présentent pour leur évolution le même intérêt; on a souvent réussi à élever des plantes en les privant d'un ou plusieurs des éléments qu'elles contiennent habituellement en proportions considérables, et tout récemment M. V. Jodin a pu faire vivre des maïs et les faire fructifier dans des dissolutions privées de silice. La grande abondance des matières minérales dans les jeunes plantes paraît être due tout simplement à la prédominance, à cette époque de la vie, de la racine sur les organes foliacés; tous les principes qui viennent du sol,

(1) *Ann. agronom.*, t. IX, p. 127.

matières azotées et matières minérales abondent, tandis que plus tard quand la fonction chlorophyllienne qui engendre les hydrates de carbone a pris tout son développement, elle prédomine à son tour, et bien que l'assimilation des matières minérales continue de se produire, elle est moins active que l'élaboration des substances organiques, aussi la proportion centésimale des cendres va-t-elle rapidement en diminuant (1).

Résumé des phénomènes de germination. — La graine est essentiellement formée d'un embryon et de réserves alimentaires qui doivent lui fournir les matériaux nécessaires à son développement; quand les conditions d'humidité, d'aération, de température indiquées plus haut sont remplies, la graine sort de la vie latente pour passer à l'état de vie active, et les réserves se dissolvent peu à peu; leur rôle a été mis en lumière par des expériences d'une rare élégance, dues à M. Van Tieghem, qui a réussi à remplacer les aliments contenus dans les organes qui entourent l'embryon par des pâtes formées soit par la matière même que contenaient ces organes, soit par des matières analogues.

La succession des phénomènes qui se produit dans la graine peut être résumée en quelques mots :

La graine mise au contact de l'eau et de l'air à une température convenable, absorbe de l'eau et de l'oxygène, elle augmente de volume, se gonfle.

L'oxygène agit sur les principes de la graine et les brûle, de l'acide carbonique apparaît; cette combustion porte sur les hydrates de carbone dont une partie disparaît complètement sur les matières grasses qui se saponifient sur les matières azotées qui se métamorphosent en asparagine.

Il est probable que la chaleur dégagée par la combustion lente favorise la métamorphose des principes immédiats.

Cette série de métamorphoses est produite sans doute par l'influence de diastases dont quelques-unes seulement sont connues. Elle a essentiellement pour but de métamorphoser les substances insolubles et colloïdales de la graine, en matières solubles et cristalloïdes.

Tous les produits devenus solubles susceptibles sous leur nouvelle forme de se dialyser aisément sont employés à la formation d'organes nouveaux; sous leur nouvelle forme (forme de voyage) ils s'acheminent d'après les lois de la diffusion vers les points où ces organes nouveaux apparaissent et subissent une nouvelle transformation; amenés à l'état de cellulose, paracellulose, vasculose, cutose, ils forment les tissus des nouveaux organes, racines, tigelles, feuilles, à l'aide desquels la plante va pouvoir vivre aux dépens du monde extérieur. La période de germination cesse, celle d'assimilation commence.

§ 7. — Évolution des tubercules et des bulbes.

Plusieurs des plantes de grande culture, notamment les pommes de terre et les topinambours, etc., parmi les plantes d'ornement les dahlias, les

(1) *Ann. agronom.*, t. VII, p. 161. Recherches sur la maturation de quelques plantes herbacées, par MM. Dehérain et Bréal.

cannas etc., se multiplient non par le semis des graines, mais par la plantation de tubercules.

On a beaucoup discuté sur les avantages et les inconvénients de l'emploi comme semences des gros ou des petits tubercules, de fragments ou de tubercules entiers. De cette discussion résumée dans un mémoire de M. Saint-André, il résulte qu'il y a avantage à employer de gros tubercules entiers quand la semence n'est pas d'un prix très élevé (1).

Bien que les tubercules diffèrent essentiellement des graines, les matériaux de réserve y sont analogues et les conditions nécessaires à l'évolution identiques à celles qui déterminent la germination. Dans les tubercules de pommes de terre existe une matière, la féculé, qui, sauf la dimension des grains est identique à l'amidon des graines, les topinambours et les dahlias renferment un autre hydrate de carbone, l'inuline, différant de la matière amylacée, mais jouant le même rôle dans la germination.

De même que l'oxygène, l'humidité, une légère élévation de température, sont nécessaires à l'évolution de la graine, de même, ces conditions sont aussi celles qu'exige le passage des tubercules de la vie latente à la vie active; il est à remarquer en outre que la quantité d'eau contenue dans les tubercules étant beaucoup plus considérable que celle qu'on trouve dans les graines, il arrive très souvent que les pommes de terre germent dans les silos aussitôt que la température s'élève.

Les transformations que subissent les tubercules de pommes de terre ont été l'objet d'un grand nombre de travaux; l'un des plus complets est dû à M. Kellermann (2). L'auteur a suivi la végétation des pommes de terre pendant quatorze semaines; il a soumis à l'analyse les vieux tubercules qui se vident peu à peu pour donner naissance aux plantes nouvelles. Les analyses ont conduit aux dosages suivants, que nous reproduisons intégralement; les chiffres indiquent en grammes les poids des matières contenues dans mille plantes :

Modifications présentées par les vieux tubercules de pommes de terre pendant 14 semaines.

MATIÈRES DOSÉES.	1 ^{re} SEMAINE.	2 ^e SEMAINE.	3 ^e SEMAINE.	4 ^e SEMAINE.	5 ^e SEMAINE.	8 ^e SEMAINE.	9 ^e SEMAINE.	14 ^e SEMAINE.
Matière sèche. . .	9160,4	8412,7	8062,7	7494,3	5027,8	2202,3	1707,7	1343,8
Cellulose.	222,1	250	240,8	216	214	214	216	276
Azote.	86,7	86,6	79,9	74,7	48,9	24,3	19,0	15,8
Protéine.	542	541	499	467	306	152	120	98
Matières grasses.	30,2	49,6	39,2	26,4	23,5	22,2	23,1	22
Mat. extractives non azotées. . .	8004	7208	6926	6475	4836	1594	1275	820
Cendres.	361	363	357	319	246	189	173	126
Chaux.	4,2	5,0	6,5	10,3	12,8	20,5	22,7	21,9
Acide phosphor.	48,7	48,2	46,5	32,2	30,8	13,8	10,3	8,7
Potasse.	228	224	212	201	145	77,8	67,2	37

On voit que la diminution considérable que présente la matière sèche ne

(1) *Ann. agronom.*, t IV, p. 19.

(2) *Id. id.* p. 615.

porte pas sur la cellulose dont le poids reste sensiblement constant; les matières grasses ne disparaissent que très lentement, tandis qu'au contraire les matières extractives non azotées, c'est-à-dire la fécule, sont utilisées à la formation des organes nouveaux; à la fin de la cinquième semaine leur poids n'est plus que la moitié de ce qu'il était à l'origine.

La disparition de l'azote a lieu régulièrement et presque parallèlement à celle de la fécule. Parmi les matières minérales la potasse émigre le plus complètement, à la fin elle n'est plus que peu supérieure au dixième de ce qu'on avait trouvé à l'origine, tandis qu'il reste à ce moment le sixième environ de l'acide phosphorique; loin de diminuer la chaux au contraire augmente régulièrement.

Les formes de voyage de la fécule sont la dextrine et la glycose, celle de l'albumine sans doute la solanine, dont les propriétés vénéneuses engagent les praticiens à détacher les germes des tubercules destinés à la nourriture des porcs.

Dans les topinambours la fécule est remplacée par de l'inuline, on y trouve en outre un hydrate de carbone voisin de la gomme et qui a reçu le nom de levuline; son analyse a montré qu'elle était isomère de la fécule. Cette substance paraît coexister avec l'inuline dans le topinambour normal et n'être pas identique avec la matière qui provient de la transformation de l'inuline par hydratation, car les sucres provenant de ces deux hydrates de carbone n'ont pas le même pouvoir rotatoire (1).

Avec l'inuline et la levuline, on trouve dans les tubercules de topinambour un sucre non cristallisable qui fait fortement dévier la lumière à droite.

Quand on maintient des bulbes d'oignon, d'ail ou d'échalotte dans une atmosphère confinée et qu'on examine les modifications survenues dans le volume et la composition des gaz, on arrive aux conclusions suivantes (2):

Au commencement de leur développement les bulbes fonctionnent exactement comme les graines en germination; le volume du gaz diminue, cette diminution porte surtout sur l'oxygène, le volume de l'acide carbonique émis étant plus petit que le volume de l'oxygène absorbé.

§ 8 — Évolution des bourgeons.

Dans les plantes vivaces les réserves nécessaires à la formation des organes nouveaux sont logées dans le bois d'où elles émigrent au retour de la belle saison.

Pendant longtemps cette fonction des tiges ligneuses avait été méconnue; on ne l'a bien comprise qu'assez récemment. Payen, en France, M. Hartig, en Allemagne, ont montré le fait de la production et de la résorption de l'amidon dans les couches ligneuses; plus récemment A. Gris a reconnu sur de nombreux exemples que la fécule logée dans les divers tissus du bois s'étend profondément jusque dans les couches ligneuses âgées d'un grand nombre d'années. C'est ainsi qu'un frêne de 40 ans, un bouleau de 35 ans, présentaient de la fécule jusque dans leurs couches ligneuses les plus âgées. Dans le frêne, la présence de la

(1) Dieck et Tollens. *Ann. agronom.*, t. V, p. 470.

(2) Saint-André. Sur le développement des bulbes. *Ann. agronom.*, t. III, p. 306.

fécule très abondante jusque dans les couches profondes du bois a été signalée par Payen. Cette matière est résorbée presque entièrement dans les premiers temps de la végétation annuelle, au mois de mai, circonstance qui explique une pratique suivie par les exploitants de gaules de frêne, qui ont reconnu que les arbres de 15 à 20 ans doivent être abattus en mai, si l'on veut qu'ils ne soient pas promptement attaqués par les insectes qu'attire l'abondance de la fécule contenue dans leurs tissus pendant les autres saisons.

La résorption de l'amidon préalablement déposé dans les couches ligneuses pendant les premières périodes de la végétation annuelle des arbres est, sans aucun doute, destinée à fournir à l'alimentation des bourgeons, qui se développent rapidement en rameaux chargés de feuilles. Le corps ligneux, rempli des matières nutritives qui y ont été déposées pendant le cours de la végétation de l'année précédente, joue ici le rôle des cotylédons ou du périsperme dans les premières périodes du développement de l'embryon.

Ces matières rapidement épuisées par l'activité de la végétation printanière se reforment promptement; dès le mois de juin on voit les divers tissus qui les contenaient pendant l'hiver se remplir de nouveau de grains d'amidon. Le développement des fruits ne paraît amener aucune diminution dans le dépôt de la matière nutritive; l'activité de la végétation suffit alors à la nutrition du fruit sans qu'elle ait besoin de recourir aux provisions réservées pour le développement des rameaux au printemps suivant; cela est, comme on le voit, très différent de ce qui se passe dans les végétaux annuels, qui, comme on l'a constaté depuis longtemps, épuisent pour fournir à la formation des graines, une grande partie des matériaux nutritifs élaborés dans les tiges et les racines, épuisement qui amène leur dessiccation et leur mort (1).

En 1879, j'ai chargé un de mes élèves de l'Ecole de Grignon, déjà habile aux analyses, M. Desbarres, de déterminer les différences qui existent entre les quantités des principes utilisables pour la formation des bourgeons en hiver, puis au printemps après le développement des bourgeons. L'auteur a opéré sur de jeunes rameaux du sumac élégant (*Rhus elegans*), il a obtenu les chiffres suivants se rapportant à 100 de matière sèche et à 100 parties de cendres (2) :

SUBSTANCES DOSÉES.	BOIS EN HIVER.	BOIS APRÈS le développement des bourgeons.	DIFFÉRENCE.
Matière sèche.	72,16	66,70	5,46
Matières azotées.	9,42	2 25	7,17
Amidon.	17,31	1,57	15,74
Cendres.	1,60	1,23	0,37
<i>Analyse des cendres.</i>			
Acide phosphorique.	4,56	3,42	1,14
Potasse.	22,76	21,47	1,29
Chaux.	41,62	41,41	0,21

(1) Brongniart, *Ann. des sc. nat. Bot.*, 5^e série, t. XIV.

(2) *Ann. agronom.*, t. V, p. 422.

La formation des bourgeons est accompagnée de phénomènes respiratoires énergiques, ils ont été étudiés par M. Garreau, puis plus récemment par M. Moissan. En laissant séjourner des bourgeons dans une atmosphère limitée à des températures variables, l'auteur a reconnu que la quantité d'acide carbonique formé varie du simple au double quand la température passe de 15° à 30°.

Tant que le bourgeon n'est pas ouvert la quantité d'oxygène consommé est à peu près égale à celle de l'acide carbonique produit, tandis qu'aussitôt que les feuilles apparaissent, la quantité d'oxygène absorbé surpasse l'acide carbonique émis (1).

Quand on opère dans l'oxygène pur, on trouve que la respiration est plus active. Ainsi à 13°, 100 grammes de rameaux de marronnier munis de leurs bourgeons donnent, en dix heures, dans l'oxygène 149^{cc},25 d'acide carbonique; dans les mêmes conditions de durée, des rameaux identiques n'exhalent dans l'air que 76^{cc},25. L'absorption d'oxygène surpasse la production d'acide carbonique.

M. Moissan appuie avec raison sur l'inégalité constatée à diverses reprises entre l'oxygène consommé et l'acide carbonique produit; à basse température l'absorption d'oxygène surpasse le dégagement, tandis qu'à une température plus élevée c'est l'inverse qu'on observe; il est donc évident que la respiration n'est pas un phénomène aussi simple qu'on serait tenté de le croire; l'oxygène est employé à des travaux très différents de la formation d'acide carbonique, il brûle sans doute de l'hydrogène pour former de l'eau, il se fixe sur des matières neutres pour les transformer en acides, tandis que l'acide carbonique provient non seulement des combustions provoquées par l'oxygène, mais encore des décompositions dont la plante est le siège. C'est ainsi que tous les observateurs qui se sont occupés de cette question ont reconnu que l'émission d'acide carbonique se continue même en l'absence d'oxygène; elle va en s'atténuant il vrai pendant quelques temps, jusqu'au moment où elle reprend un mouvement ascensionnel très marqué, mais qui est dû alors à une véritable fermentation alcoolique observée successivement par MM. Lechartier et Bellamy, Pasteur et Muntz.

§ 9. — Évolution des jeunes organes à l'obscurité.

Tous les phénomènes de germination s'accomplissent à l'obscurité, les jeunes tiges qui apparaissent sont d'un blanc jaunâtre, elles ne deviennent vertes qu'autant qu'elles sont soumises à l'action de la lumière.

Si l'évolution des organes nouveaux se poursuit à l'obscurité, les plantes prennent un aspect tout particulier. Les tiges s'allongent considérablement tandis que les feuilles restent de dimensions très restreintes: ces tiges minces, veules, sont souvent incapables de rester droites, elles rampent sur le sol; rien n'est plus curieux que de comparer la germination d'un tubercule de pomme de terre évoluant à l'obscurité et fournissant de grandes tiges blanches et minces portant des feuilles réduites à de très petites dimensions aux feuilles dures, rigides, bien vertes, montées sur des tiges très courtes, qui sortent des tuber-

(1) *Ann. agronom.*, t. V, p. 56.

cules qui germent à la lumière. Très souvent, les jeunes tiges développées dans l'obscurité s'inclinent vers la lumière si faible qu'elle soit.

J'ai eu, il y a quelques années, de cette tendance à se diriger vers la jour, que présentent les plantes étiolées, une démonstration saisissante : J'ai fait répandre dans un grand silo de l'École de Grignon une couche de terre de 2 centimètres d'épaisseur et j'y ai fait semer de l'avoine, puis on maintint les portes bien fermées, de façon que la germination et l'évolution eussent lieu dans l'obscurité. Quand on était enfermé dans le silo, on ne pouvait rien y distinguer, on devinait seulement de quel côté se trouvait l'ouverture par un mince filet de lumière, qui filtrait sous les portes malgré la botte de paille que j'avais fait mettre extérieurement pour rendre l'obscurité plus complète. Cette faible quantité de lumière avait suffi cependant pour faire incliner les blanches tiges d'avoine vers le petit filet lumineux qui pénétrait dans le silo; elles étaient toutes inclinées parallèlement et toutes penchées vers cette lumière à peine perceptible.

Il est intéressant de remarquer que les réserves accumulées dans les graines se dépensent très différemment suivant les conditions dans lesquelles a lieu l'évolution. On a semé dans le jardin du Muséum des graines, les unes dans un sol stérile, les autres dans une bonne terre, puis on les a arrachées quand elles commencèrent à se développer; on trouva pour les poids relatifs et de la tige des chiffres très différents, ainsi que le montrent les chiffres suivants :

	Poids de l'avoine développée	
	dans la bonne terre.	dans un sol pauvre.
Poids de la tige sèche.	0,213	0,112
Poids de la racine sèche.	0,033	0,082
Poids de la tige sèche p. 100 de racines.	0,608	0,139

On observe des faits analogues quand on suit la germination parallèlement dans de l'eau ordinaire ou dans une solution nourricière bien composée.

Le manque d'aliment dans le sol détermine un développement exagéré de la racine, l'activité vitale se porte vers l'organe dont le développement est le plus avantageux pour que l'individu puisse évoluer; de même, le manque de lumière détermine une évolution particulière, la jeune plante dépense la meilleure partie de sa réserve à allonger sa tige pour aller au-devant de la lumière qui lui manque, le mécanisme de cet étiolement étant dû sans doute à l'absence de l'évaporation. Les feuilles qui ne peuvent exécuter aucun travail utile, tant qu'elles ne sont pas éclairées, sont réduites au minimum, tandis que les tiges qui les portent prennent des dimensions exagérées; c'est ce qu'on observe dans les tubercules de pommes de terre, germant dans des silos.

Cette disposition à l'allongement par insuffisance de lumière est encore très sensible dans les futaies, où les jeunes brins s'élancent très droit pour atteindre la hauteur où ils pourront prendre leur part d'éclaircissement; c'est encore ce que j'ai pu observer sur diverses plantes et, notamment, sur des geraniums insuffisamment éclairés par la lumière électrique, dans l'expérience qui a été réalisée aux Champs-Elysées en 1881, les pétioles qui portaient les feuilles étaient d'une dimension exagérée.

CHAPITRE II

ASSIMILATION DU CARBONE

§ 10. — Apparition de la chlorophylle.

Toute plante dont les organes régulièrement éclairés deviennent verts est capable d'emprunter à l'acide carbonique aérien tout ou partie de son carbone, elle est dite plante à chlorophylle ; si, au contraire, malgré l'éclaircissement, la plante reste blanche ou jaune, elle ne pourra vivre que sur de la matière organique déjà formée, elle appartiendra à ce grand groupe dont les champignons sont le type le plus connu.

Influence de l'énergie des radiations. — L'apparition de la chlorophylle est déterminée par l'action d'une lumière même peu énergique et insuffisante pour déterminer la décomposition de l'acide carbonique ; M. Hervé Mangon a reconnu depuis longtemps que lumière électrique provoque le verdissement de plantes étiolées ; tous les semis qui ont été placés dans les serres, éclairées à la lumière électrique en 1881, ont verdi, et cependant, dans aucun d'eux, l'assimilation n'a été suffisante pour donner une augmentation du poids de la matière sèche, les plantes étaient à trois mètres d'un régulateur dont l'intensité lumineuse était évaluée à 2,000 bougies. Le verdissement n'exige, en effet, d'après les observations de M. Wiesner (cité par M. Van Tieghem) (1), qu'une flamme de gaz valant 6,5 bougies agissant à 1^m,30. Dans ces conditions, on a observé l'apparition de la chlorophylle après 1 heure dans l'*Impatiens Balsamina*, après 3 heures dans le *Raphanus Sativus*, tandis qu'il a fallu, pour verdir, 6^m,30 au *Convolvulus tricolor*, et 9^m,5 au *Cucurbita Pepo*. Si, dans les mêmes conditions d'éclaircissement, on recherche non plus le verdissement complet des organes, mais à l'aide du spectroscope la première apparition de la chlorophylle, on voit qu'elle se manifeste beaucoup plus rapidement : en 5 minutes dans l'avoine, et successivement en temps de plus en plus longs pour l'orge, le maïs, le cresson, la courge et le haricot, ce dernier exigeant 45 minutes.

Influence de la nature des radiations. — Toutes les radiations ne sont pas également efficaces pour déterminer l'apparition de la chlorophylle, c'est dans

(1) *Traité de botanique*, p. 161.

la partie du spectre où se trouve le maximum d'éclairement que la chlorophylle prend le plus rapidement naissance, mais elle se produit encore dans les rayons ultra-rouges et dans la région ultra-violette. Quand on opère avec des écrans diversement colorés, on reconnaît qu'ils agissent très inégalement, suivant la nature de la plante en expérience; tandis que derrière une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone, qui ne laisse passer que des rayons calorifiques placés à l'extrémité gauche du spectre et en dehors de la partie visible, la plupart des plantes restent blanches: les conifères, les fougères ainsi que le gui verdissent parfaitement.

La lumière, qui traverse une dissolution de bichromate de potasse, renferme les rayons rouges, orangés, jaunes et une partie des rayons verts, mais elle est privée de toute la partie la plus réfrangible du spectre; elle agit très énergiquement sur les plantes étiolées, tandis que la lumière, transmise au travers d'une dissolution des sels de cuivre dans l'ammoniaque qui retient les rayons jaunes et rouges mais laisse passer le bleu, est beaucoup moins efficace.

Influence de la chaleur. — Si certaines radiations lumineuses sont nécessaires pour provoquer l'apparition de la chlorophylle dans les plantes étiolées, cette condition n'est pas toujours suffisante. M. Bœhm a reconnu qu'à une température de 7°, des germes de *Pinus pinea* sont restés jaunes bien qu'ils fussent exposés à la lumière, et M. Sachs a observé également que le *Pinus canadensis* reste jaune quand l'exposition à la lumière a lieu à une température de 41°,7.

§ 41. — Composition de la chlorophylle.

On obtient facilement une dissolution de chlorophylle, en traitant par l'alcool des plantes hachées et bien exprimées pour enlever la plus grande partie de l'eau; on réussit encore mieux en faisant bouillir les plantes, séchant à l'étuve, puis faisant passer les feuilles sèches au moulin, et traitant la poudre ainsi obtenue par les dissolvants. Cette dissolution est dichroïque: vue à la lumière transmise, elle est verte; vue par réflexion, elle présente une teinte rouge.

La chlorophylle a été l'objet de nombreux travaux. M. Frémy a reconnu qu'il était facile d'en séparer deux substances différentes, l'une jaune, l'autre d'un bleu verdâtre; cette séparation peut s'effectuer à l'aide de réactifs énergiques comme l'acide chlorhydrique additionné d'éther, ce dernier monte à la surface du liquide, entraînant la matière bleue, tandis que la matière inférieure reste colorée en jaune. On réussit également à décomposer la chlorophylle à l'aide de réactifs neutres, tels que la benzine qui, laissant dans l'alcool affaibli la matière colorante jaune, monte à la partie supérieure des tubes entraînant avec elle la matière bleue.

La dissolution alcoolique de chlorophylle, ce mélange de phylloxanthine (matière jaune) et d'acide phyllocyanique qui, ainsi que l'a reconnu M. Frémy, est dans la chlorophylle unie à la potasse, cette chlorophylle a été étudiée avec beaucoup de soins par M. A. Gauthier, qui a donné sa composition élémentaire;

les chiffres qu'il a obtenus sont d'accord avec ceux qu'a donnés, un peu plus tard M. Rogalski.

Composition de la chlorophylle.

	A. Gauthier.	Rogalski.	
Carbone.	73,97	73,19	72,83
Hydrogène.. . . .	9,80	10,50	10,25
Azote.	4,15	4,14	4,14
Oxygène.	10,33	10,50	11,14
Cendres.	1,75	1,67	1,64

La chlorophylle est donc une matière azotée; le fait avait été affirmé, puis nié : Il semblait cependant évident, *a priori*, aux personnes qui ont eu occasion de voir quelle vigueur prend la teinte verte des plantes qui ont reçu d'abondants engrais azotés; souvent, dans les champs de blé, on remarque au printemps des touffes puissantes d'un vert foncé qui dominent les autres plantes restées plus jaunâtres; ces touffes, dans lesquelles la chlorophylle est abondante, apparaissent aux places où les tas de fumier ont séjourné, où la plante a trouvé une ample provision de matières azotées.

On peut, au reste, montrer directement l'influence de l'abondance des matières azotées sur le verdissement des feuilles de la façon suivante : on repique un pied de tabac dans une terre pauvre, il développe plusieurs feuilles d'un vert jaunâtre; on ajoute alors au sol une bonne dose d'engrais azoté, les feuilles supérieures, qui prennent naissance sous son influence, présentent une teinte verte beaucoup plus foncée que les premières.

Spectre de la chlorophylle. — Si on place une dissolution de chlorophylle devant la fente du spectroscopie puis qu'on examine le spectre obtenu, on observe qu'il est sillonné de sept bandes sombres. A gauche du spectre, on voit passer une bande rouge, puis elle est suivie d'une bande obscure comprise entre les raies B et C du spectre et très nettement terminée, elle prend tout l'orange; dans le jaune et le jaune vert se trouvent des bandes d'absorption infiniment moins nettes que la précédente, tout près de la raie F dans le bleu commence une bande d'absorption qui fait disparaître presque complètement toute la partie réfrangible du spectre. Ainsi, la chlorophylle ne laisse pas passer indifféremment tous les rayons lumineux; si elle se laisse traverser à gauche par du rouge, au milieu par du vert et les rayons immédiatement voisins, elle retient d'une part les rayons oranges, et de l'autre les rayons bleus et violets.

Altérations de la chlorophylle. — La dissolution alcoolique de chlorophylle est facilement attaquée par les rayons solaires; elle ne tarde pas à perdre sa belle couleur verte, à devenir jaune. Si on imprègne de chlorophylle une bande de papier et qu'on en expose une partie aux rayons solaires, celle-ci est décolorée, tandis que la partie protégée conserve sa couleur.

La chlorophylle en place est même profondément altérée par certaines radiations, c'est ce qu'on observa au Palais des Champs-Élysées, en 1881; les plantes ayant été éclairées pendant six jours par la lumière électrique, émanant de cônes de charbon, se trouvèrent dans un état déplorable.

Tous les pélarгонiums avaient perdu leurs feuilles, les cannas étaient tachés, les belles-de-nuit flétries, les bambous noircis, mais l'effet le plus curieux s'était produit sur les lilas; toutes les parties des feuilles qui avaient reçu directement les rayons émanés de la source étaient teintes de noir, tandis que les parties protégées par les feuilles supérieures conservaient leur belle couleur verte; l'impression produite par les rayons électriques sur l'épiderme avait la netteté d'une épreuve photographique. Habituellement, l'épiderme seul était atteint, les cellules épidermiques étaient parfois noircies seulement à la surface, parfois le protoplasma était contracté et mort, mais l'altération s'arrêtait à la file des cellules en palissades, placés au-dessous de l'hipoderme.

Quand la lumière électrique fut entourée d'un verre transparent qui retient les rayons violets, les effets précédents cessèrent de se produire, d'où il faut conclure que la partie la plus réfrangible du spectre est celle qui exerce sur la chlorophylle l'action la plus fâcheuse (1).

Dans les expériences qu'il a exécutées en Angleterre, M. Siemens a reconnu également l'influence fâcheuse des rayons émanés d'un régulateur quand ils n'avaient pas traversé une couche de verre (2).

Il est à remarquer, au reste, que les rayons qui déterminent la destruction de la chlorophylle sont différents de ceux qui provoquent le verdissement, c'est ce qu'a démontré M. J. Sachs dans une expérience élégante.

Une éprouvette à pied est remplie d'une dissolution alcoolique de chlorophylle, on y plonge un tube également rempli de cette même dissolution et on reconnaît que la chlorophylle y reste sans altération tant qu'elle est protégée par la couche extérieure qui se décolore peu à peu; les rayons actifs pour provoquer la décomposition sont arrêtés par la dissolution extérieure et, par suite, la lumière est sans action sur la chlorophylle du tube. Si, cependant, on enlève cette dissolution intérieure et qu'on y place quelques jeunes plantes étiolées, elles verdissent, la chlorophylle extérieure étant incapable de retenir les radiations efficaces pour provoquer ce verdissement.

§ 12. — Dispositions des grains de chlorophylle dans les cellules.

Les grains de chlorophylle, faciles à voir dans les cellules végétales, y sont parfois uniformément réparties, mais sont susceptibles de se déplacer pour éviter l'action d'un éclairage trop intense.

Ces mouvements, observés d'abord par M. Bœhm, ont été l'objet des études de M. Famintzin (3) et de M. Borodine (4); ils ont vu les grains de chlorophylle, d'abord distribués irrégulièrement dans les cellules normales, changer de place sous l'influence de l'insolation, se réunir sur les parois, y former comme un chapelet continu, puis finir si l'éclairage est trop vif par se grouper, soit sur les parois des cellules parallèles aux rayons incidents, soit même former des

(1) *Ann. agron.*, t. VII, p. 551.

(2) *Ann. agron.*, t. VII, p. 457.

(3) *Ann. des sc. nat. Bot.*, 5^e série, t. VII, p. 193.

(4) *Ann. des sc. nat. Bot.*, 5^e série, t. XII, p. 80.

paquets volumineux dans les angles des cellules, comme s'ils fuyaient l'action trop vive des rayons lumineux.

Cette étude a été reprise par M. Stahl (1) dans ces dernières années; il a particulièrement opéré sur un *Mesocarpus*, algue filamenteuse, fréquente dans les fossés pleins d'eau, et dont chaque cellule renferme un ruban de chlorophylle qui parcourt toute sa longueur, apparaissant tantôt, lorsqu'il est vu de champ, comme un mince filet vert, tantôt, quand il se présente de face, comme une large plaque qui remplit toute la cavité cellulaire.

Ces filaments étant étendus horizontalement sur le porte-objet du microscope, on remarque qu'ils se déplacent avec la direction des rayons lumineux qu'ils reçoivent; si l'éclairage est horizontal, le ruban se place verticalement, de façon à ne montrer que sa tranche à l'observateur, tandis qu'il se remet à plat en présentant sa largeur si l'éclairage est vertical; ils s'orientent ainsi perpendiculairement aux rayons lumineux tant que ceux-ci proviennent d'une lumière diffuse peu énergique; mais c'est l'inverse qui a lieu pour les rayons solaires directs et, dans ce cas, les rubans s'orientent dans le sens des rayons lumineux comme pour éviter leur action trop puissante.

§ 13. — Décomposition de l'acide carbonique par les plantes vertes.

Historique. — C'est au naturaliste genevois Bonnet qu'on doit la première observation sur l'émission des gaz par les plantes. « Au commencement de l'été de 1769, dit-il, j'introduisis dans des poudriers pleins d'eau des rameaux de vigne. Dès que le soleil commença à échauffer l'eau des vases, je vis paraître sur les feuilles des rameaux beaucoup de bulles semblables à de petites perles. J'en observai aussi, mais en moindre quantité, sur les pédoncules et sur les tiges... Je fis bouillir de l'eau pendant trois quarts d'heure, afin de chasser l'air qu'elle contenait. Après l'avoir laissé refroidir, j'y plongeai un rameau semblable au précédent. Je l'y tins en expérience environ deux jours; le soleil était ardent, je ne vis pourtant paraître aucune bulle. »

Il est vraisemblable que Priestley ignorait ces résultats, quand il publia, en 1772, dans ses *Recherches sur diverses espèces d'air*, les mémorables expériences dans lesquelles on a vu, pour la première fois, de l'oxygène dégagé des végétaux.

Priestley, après s'être occupé des modifications que le séjour des animaux fait subir à une atmosphère limitée, fut en quelque sorte conduit à rechercher l'influence qu'exercent les végétaux sur ces atmosphères viciées.

« J'ai eu le bonheur, dit-il, de trouver par hasard une méthode de rétablir l'air altéré par la combustion des chandelles et de découvrir au moins une des ressources que la nature emploie à ce grand dessein, c'est la végétation.

« On serait porté à croire que puisque l'air commun est nécessaire à la vie végétale aussi bien qu'à la vie animale, les plantes et les animaux doivent l'affecter de la même manière, et j'avoue que je m'attendais au même effet, la

(1) *Ann. agron.*, t. VII, p. 150.

première fois que je mis une tige de menthe dans une jarre de verre renversée sur l'eau. Mais, après qu'elle y eut poussé quelques mois, je trouvai que l'air n'éteignait pas la chandelle et qu'il n'était pas nuisible à une souris que j'y exposai.

« Le 16 août 1771, je mis une plante de menthe dans une quantité d'air où une bougie avait cessé de brûler et je trouvai que, le 27 du même mois, une autre bougie pouvait y brûler parfaitement bien. Je répétais cette expérience sans la moindre variation dans le résultat, jusqu'à huit ou dix fois pendant le reste de l'été.

« Cette observation me conduit à conclure que les plantes, bien loin d'affecter l'air de la même manière que la respiration animale, produisaient des effets contraires et tendaient à conserver l'atmosphère douce et salubre, lorsqu'elle est devenue nuisible en conséquence de la vie et de la respiration des animaux.... ». « Les preuves d'un rétablissement partiel de l'air par des plantes en végétation, quoique dans un emprisonnement contre nature, servent à rendre très probable que le tort que font continuellement à l'atmosphère la respiration d'un si grand nombre d'animaux et la putréfaction de tant de masses de matière végétale et animale, est réparé, du moins en partie, par la création végétale; et nonobstant, la masse prodigieuse d'air qui est journellement corrompue par les causes dont je viens de parler, si l'on considère la profusion immense des végétaux qui croissent sur la surface de la terre, dans des lieux convenables à leur nature et qui, par conséquent, exercent en pleine liberté tout leur pouvoir, tant inxhalants qu'exhalants, on ne peut s'empêcher de convenir que tout est compensé et que le remède est proportionné au mal. »

Si importante que soit cette admirable expérience, il faut reconnaître que Priestley ne connaissait pas exactement les conditions de réussite, et c'est à Ingen Housz qu'était réservée la gloire de reconnaître que la décomposition de l'acide carbonique par les feuilles n'a lieu que sous l'influence de la lumière solaire.

C'est lui qui a montré que « l'air déphlogistiqué » l'oxygène ne se dégage des feuilles qu'autant que celles-ci sont exposées à l'action du soleil. Une question importante reste encore à résoudre pour élucider les résultats de Priestley et ceux d'Ingen Housz, il reste à démontrer que les deux observations se complètent l'une par l'autre, que l'oxygène dégagé par les plantes ne provient pas de leurs tissus, mais est le résidu de l'acide carbonique décomposé dans leurs cellules, que les plantes sont de véritables appareils de réduction fixant le carbone et dégageant l'oxygène. L'intervention d'un troisième expérimentateur est nécessaire pour donner une esquisse complète du phénomène et c'est Sennebiér, pasteur à Genève, qui démontre que l'acide carbonique dissous dans l'eau est nécessaire à la production du gaz oxygène qui s'échappe des feuilles au soleil : il faut que cet acide carbonique, dont l'oxygène est un des éléments, soit décomposé au soleil par l'acte de la végétation pour que le dégagement de l'oxygène puisse être observé.

Démonstration expérimentale. — Appareil de Cloëz et Gratiolet. Le mode d'opérer employé par Bonnet au XVIII^e siècle a été utilisé de nouveau par Cloëz

et Gratiolet dans le travail resté classique qu'ils ont exécuté en 1849 (1).

Dans un flacon de deux litres, on met de l'eau ordinaire jusqu'aux quatre cinquièmes de la hauteur, on y introduit des tiges d'une plante marécageuse de l'*Elodea Canadensis*, ou encore du *Ceratophyllum submersum*, du *Potamogeton Crispus*, on achève de remplir le flacon avec de l'eau saturée d'acide carbonique, on y adapte un bouchon muni d'un tube abducteur en s'arrangeant de façon que le tube se remplisse d'eau au moment de la fermeture et on expose le tout au soleil; on ne tarde pas à voir de petites bulles de gaz apparaître sur les feuilles, sur les pédoncules, tandis qu'il s'en dégage d'autres par les sections des tiges.

Les bulles qui en sortent se succèdent souvent avec assez de régularité pour qu'on puisse les compter, et quelques naturalistes ont cru pouvoir déduire du nombre de bulles dégagées dans un temps donné, un moyen de mesurer l'intensité avec laquelle se produit la décomposition de l'acide carbonique; si ce procédé est commode, il est dangereux, car on ne peut jamais savoir si le dégagement est dû à l'oxygène provenant de l'acide carbonique ou à un gaz dilaté par l'élévation de température du liquide exposé au soleil. Il est infiniment plus prudent de recueillir les gaz, de les mesurer et de déterminer leur richesse en oxygène par la potasse et l'acide pyrogallique ou par le phosphore. Il est à remarquer cependant que tout récemment M. Reinke a soumis ce procédé à une nouvelle étude et l'a trouvé plus exacte qu'on n'avait supposé qu'il le fut (2).

En général, quand on opère régulièrement, que la dissolution carbonique n'est pas trop concentrée et les plantes peu tassées, on peut en une demi-heure recueillir une centaine de centimètres cubes de gaz; en les débarrassant par la potasse de l'acide carbonique entraîné, le gaz est assez riche en oxygène pour rallumer les allumettes.

On peut encore facilement constater la décomposition de l'acide carbonique par des feuilles de plantes aériennes en opérant de la façon suivante : A un tube en arc de cercle, on soude un tube vertical auquel on adapte un long caoutchouc; aux deux branches inférieures de cet arc de cercle sont adaptés par des caoutchoucs munis de pinces de Mohr, des tubes à gaz qui sont fixés par de bons bouchons à deux tubes droits assez larges, de 25 centimètres de longueur; l'un des tubes renferme une feuille longue et étroite comme le sont celles des graminées l'autre est vide; l'extrémité inférieure des tubes jumeaux plonge dans un vase rempli d'eau. En aspirant par le caoutchouc on remplit d'eau tout l'appareil, on baisse ensuite le caoutchouc qui fonctionne comme un siphon; quand l'appareil est complètement rempli, qu'il ne reste plus de gaz dans les tubes, on laisse tomber les pinces de Mohr, puis on adapte le caoutchouc qu'on a maintenu rempli d'eau à un gazomètre renfermant un mélange d'acide carbonique et d'air. On fait écouler le gaz en même temps qu'on desserre les pinces de Mohr, en un instant les deux tubes sont rempli du même gaz; on les ferme l'un et l'autre à la partie inférieure avec un bouchon, sans les sortir de l'eau.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3^e série, t. XXXII, p. 41.

(2) *Ann. agron.*, t. X, p. 38.

Grâce à cette disposition on est certain que les deux tubes renferment un gaz présentant la même composition, et par suite que les différences que l'analyse y constatera seront dues à l'action de la feuille.

Les deux tubes sont exposés au soleil : s'il est ardent, il est avantageux de les placer dans un vase rempli d'eau de façon à éviter l'échauffement ; après une demi-heure d'exposition, on analyse le gaz du tube sans feuilles, qui donne la composition du mélange primitif, puis on analyse ensuite le gaz qui a séjourné au contact de la feuille ; on trouve en général que l'acide carbonique disparu a été remplacé par un volume sensiblement égal d'oxygène.

§ 14. — Influence de la composition de l'atmosphère dans laquelle sont placées les feuilles.

M. Boussingault a reconnu que les feuilles exposées au soleil dans de l'acide carbonique pur ne décomposent pas ce gaz, ou si elles le décomposent ce n'est qu'avec une excessive lenteur. Ainsi qu'il a été dit, les feuilles placées au soleil dans un mélange d'acide carbonique et d'air atmosphérique décomposent au contraire rapidement ce dernier, et l'oxygène ne paraît pas intervenir dans les phénomènes, car les feuilles font rapidement disparaître l'acide carbonique, lorsqu'il est mêlé à du gaz azote ou à du gaz hydrogène. Il est curieux de constater que les circonstances dans lesquelles se produit la décomposition de l'acide carbonique soient analogues à celles dans lesquelles on obtient la combustion du phosphore : on sait, en effet, que le phosphore n'est pas lumineux dans l'oxygène pur à la pression ordinaire, mais qu'il le devient immédiatement dans du gaz oxygène dilué par de l'azote ou de l'hydrogène, ou encore dans l'oxygène pur soumis à une faible pression.

Or, l'analogie se poursuit pour l'action qu'exercent les feuilles sur l'acide carbonique à une pression très faible : il a été possible de décomposer un centimètre cube d'acide carbonique avec une petite feuille de laurier-cerise placée dans ce gaz pur, mais amené à la faible pression de 0^m,7 (1).

Les expériences précédentes sont exécutées avec une atmosphère artificielle enrichie d'acide carbonique, et en réfléchissant à la parcimonie avec laquelle l'acide carbonique est répandu dans l'air, on pourrait croire que ces faibles quantités échapperont à l'action des feuilles, il n'en est rien ; c'est ce que démontre l'expérience suivante :

On place à côté l'un de l'autre deux longs tubes horizontaux, l'un est vide, l'autre renferme une couche de feuilles placées à la suite les unes des autres, de façon à tapisser le tube dans toute sa longueur ; on adapte à ces tubes des flacons à eau de baryte, puis des aspirateurs munis de robinets réglés à l'avance de façon qu'ils laissent écouler dans le même temps la même quantité de liquide. L'appareil étant disposé au soleil, on laisse écouler l'eau, en quelques instants la baryte adaptée au tube vide est troublée, tandis que celle qui est fixée au tube à feuilles reste limpide, car l'acide carbonique contenu dans l'air est saisi au passage par les feuilles insolées.

(1) *Comptes rendus*, 1865, t. XL, p. 872.

§ 15. — Pénétration de l'acide carbonique dans la feuille.

Pour que l'acide carbonique aérien soit décomposé par les feuilles, il faut qu'il traverse l'épiderme et pénètre dans les cellules à chlorophylle. Comment a lieu cette pénétration, c'est ce que nous allons nous efforcer d'élucider dans ce paragraphe.

Les gaz passent au travers d'un corps poreux percé d'étroits orifices, ils traversent également des membranes continues comme l'est une couche légère de caoutchouc; mais les lois de leur passage sont, dans les deux cas, très différentes l'une de l'autre.

Quand un gaz traverse un corps poreux comme une plaque de graphite ou encore de très fins orifices percés dans une lame de verre, sa vitesse de passage est inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité Graham, qui a découvert cette loi importante l'appuie des déterminations suivantes :

	Temps du passage de différents gaz soumis à la pression atmosphérique au travers d'une plaque de graphite.	Racine carrée de la densité. L'oxygène est pris comme unité.
Oxygène.	1,0000	1,0000
Air atmosphérique.	0,9501	8,9507
Acide carbonique.	1,1860	1,1760
Hydrogène.	0,2505	0,2502

Le passage au travers des membranes colloïdales comme le caoutchouc, a lieu suivant une loi très différente de celle qui vient d'être annoncée. C'est ce qu'a reconnu Th. Graham à l'aide de son diffusomètre qui consiste essentiellement en un tube de 22 millimètres de diamètre et de 1 mètre de longueur, ouvert à une extrémité et fermé à l'autre par une plaque de gypse recouverte d'une plaque de caoutchouc. Si l'on remplit ce tube de mercure et qu'on le renverse sur un bain de mercure, il s'y fait un vide barométrique; mais l'air rentre peu à peu au travers de la membrane et déprime la colonne du liquide d'autant plus vite que la vitesse de passage est plus grande. Pour obtenir la rentrée d'autres gaz, on recouvre le haut du tube d'une coiffe de caoutchouc munie de deux tubes latéraux; le gaz arrivant par l'un des tubes ressort par l'autre et forme ainsi une atmosphère gazeuse au-dessus de la plaque de diffusion. De tous les gaz l'azote est celui qui traverse le plus lentement le caoutchouc. En représentant par 1 sa vitesse de passage, celle des autres gaz est représentée par les nombres suivants :

	Vitesse.
Azote.	1,000
Oxyde de carbone.	1,112
Air atmosphérique.	1,149
Gaz des marais.	2,448
Oxygène.	2,556
Hydrogène.	5,500
Acide carbonique.	13,558

Ces faits étant établis, appliquons-les à la question posée : comment les gaz pénètrent-ils dans les cellules à chlorophylle, comment entrent-ils dans la feuille, comment passent-ils au travers de son épiderme ?

Les deux faces d'une feuille présentant souvent les deux sortes de structures que nous venons de définir; tandis que le microscope permet d'apercevoir à la partie inférieure à l'envers de la feuille un grand nombre de stomates trouant l'épiderme d'une série d'étroits orifices, les préparations de la cuticule qui recouvrent la face supérieure qu'on désigne dans le langage vulgaire sous le nom d'endroit, y montrent une surface continue renfermant dans un grand nombre d'espèces, beaucoup moins de stomates que l'envers, et parfois en étant complètement dépourvue.

Par quelle face va pénétrer l'acide carbonique ? Va-t-il passer au travers de ces orifices étroits de la face inférieure ? dans ce cas, on comprendra mal comment la petite quantité de ce gaz contenue dans l'air pourra subvenir aux besoins de la feuille, puisque l'acide carbonique doué d'une grande densité aura plus de peine à se faire jour que l'azote et l'oxygène; si, au contraire l'acide carbonique pénètre par la face supérieure-au travers de la cuticule, analogue à la membrane de caoutchouc étudiée par Th. Graham, on conçoit qu'il la traverse infiniment mieux que les deux gaz dont le mélange constitue notre atmosphère et que la facilité qu'il possède de pénétrer dans la feuille compense sa rareté.

Il semble donc *a priori* que ce soit par diffusion au travers de la cuticule se comportant comme la membrane de caoutchouc de Graham que l'acide carbonique pénètre dans la feuille; M. Barthélemy a fourni à cette manière de voir un sérieux appui par une série d'expériences exécutées, il y a quelques années : un cylindre de verre est bouché à l'orifice supérieur avec une plaque de plâtre sur laquelle est fixée une feuille, de telle sorte que les gaz ne pourront pénétrer dans le cylindre qu'en traversant la feuille; on remplit le cylindre de mercure, puis on laisse écouler celui-ci par l'orifice inférieur; on trouve que, lorsque c'est de l'air qui baigne la face supérieure, les deux gaz qui la constituent ne passent pas avec la même vitesse; dans les trois expériences exécutées, il y a toujours eu une proportion d'oxygène plus forte que dans l'air; quand les gaz ont traversé une feuille de vigne vierge, l'atmosphère inférieure, sur 100 parties, renfermait 44 d'oxygène, il en renfermait 43,5 quand les gaz ont passé au travers d'une feuille de catalpa, et 44,5 quand ils ont traversé une feuille de magnolia. Les différences sont encore plus frappantes, quand on compare au temps que l'acide carbonique met à traverser la feuille, celui qu'exigent l'azote ou l'oxygène; en représentant par l'unité le temps du passage de l'acide carbonique, on trouve 9 pour l'oxygène et 15 pour l'azote (1).

Un certain nombre d'expériences directes est venu montrer au reste que les feuilles décomposent plus énergiquement l'acide carbonique quand c'est l'endroit qui est isolé que lorsque c'est l'envers qui reçoit les rayons solaires, Ingen Housz avait déjà observé « que les feuilles fournissent un air plus pur si le soleil donne sur leur surface vernissée que lorsque leur surface inférieure reçoit l'influence directe du soleil ». Cloëz et Gratsolet avaient remarqué de leur côté,

(1) *Ann. des sciences nat.*, 5^e série, t. IX, p. 287.

que des feuilles aquatiques séjournant au soleil dans une eau très calcaire se sont couvertes seulement sur leur face supérieure de concrétions de carbonate de chaux ; il semble qu'il en faille conclure avec eux que l'acide carbonique avait été saisi en plus grande quantité par la face supérieure que par l'inférieure, puisque le dépôt de carbonate de chaux provenant du départ de l'acide carbonique qui le maintenait en dissolution s'était produit sur l'endroit de la feuille plutôt que sur l'envers.

Toutefois, ces premières observations avaient besoin d'être complétées par des expériences directes pour acquérir le degré de précision qui permet de considérer le fait comme démontré ; M. Boussingault s'est chargé de ce soin ; il a choisi des feuilles présentant des dimensions égales, il les a réunies l'une à l'autre à l'aide de colle d'amidon et il a pu ainsi exposer au soleil soit les deux faces supérieures, soit les deux faces inférieures.

Il a trouvé que la face supérieure, l'endroit de feuilles épaisses, rigides comme celles des lauriers, a décomposé plus de gaz acide carbonique que la face inférieure, l'envers. Au soleil, la plus grande différence a été dans le rapport de 4 à 1 ; la plus faible de 1,5 à 1. Le rapport moyen serait de 102 à 44. A l'ombre et à la lumière diffuse, les rapports tendent vers l'unité.

Les feuilles à parenchyme très mince, mais dont l'endroit et l'envers ont des teintes de nuance tellement tranchées que l'on peut dire que le limbe n'est coloré en vert que sur sa face supérieure, ont offert des résultats analogues à ceux fournis par des feuilles plus épaisses ; quand le parenchyme est très mince et que les deux faces présentent sensiblement la même couleur (platane, marronnier, pêcher) ; mais, il n'y a pas eu plus d'acide carbonique décomposé par la face supérieure que par l'inférieure.

§ 16. — Influence de l'état de la feuille.

Pour qu'une feuille décompose de l'acide carbonique, il faut qu'elle soit vivante ; si elle a été privée pendant quelques jours de l'action de l'oxygène, si elle a été plongée pendant un temps même peu prolongé dans un gaz inerte, elle périt et devient incapable de décomposer l'acide carbonique : c'est ce que j'ai eu occasion d'observer il y a déjà plusieurs années, à l'aide de plantes marécageuses, en les laissant dans l'eau ordinaire, mais en les maintenant dans l'obscurité. Après quelques jours, les feuilles ont absorbé tout l'oxygène dissout ; placées ensuite au soleil, dans de l'eau chargée d'acide carbonique, elles ne dégagent plus une trace d'oxygène, elles ont été asphyxiées par leur séjour dans l'eau privée d'oxygène (1). M. Boussingault a reconnu également que des feuilles maintenues dans l'acide carbonique pendant plusieurs jours, puis exposées ensuite au soleil dans un mélange d'acide carbonique et d'air, n'émettaient pas d'oxygène.

Les feuilles détachées perdent également la faculté de décomposer de l'acide

(1) *Bull. de la Soc. chim.*, t. II, p. 106 (1864).

carbonique, même quand la dessiccation a eu lieu à la température ordinaire; en laissant les feuilles dans une atmosphère desséchée par l'acide sulfurique, elles deviennent cassantes; si on les soumet ensuite à l'action d'une atmosphère humide, elles reprennent en même temps que de faibles quantités d'eau, une certaine souplesse, mais elles restent incapables de décomposer l'acide carbonique.

Les chiffres suivants montrent l'influence qu'exerce la dessiccation sur la propriété réductrice des feuilles :

	Eau retenue par la feuille.	Acide carbonique décomposé	
		Total en centim. cubes.	par centim. carré en une heure.
Feuille normale.	0,60	15,9	0,071
Dessiccation commencée.	0,36	10,8	0,045
— avancée.	0,29	2,9	0,012
— absolue.	0,00	0,0	0,000

Enfin, il est certaines matières, le mercure, par exemple, qui agissent sur les feuilles de façon à paralyser leur action sur l'acide carbonique; cette curieuse propriété, observée déjà par une réunion de chimistes hollandais: Deïman, Paats, Van Troostwyck et Lauwenburgh, est facile à vérifier par l'expérience, en empruntant à M. Boussingault une méthode de recherche très élégante.

On sait que le phosphore n'émet des vapeurs que lorsqu'il se trouve au contact de l'oxygène; dans un gaz inerte comme l'acide carbonique ou l'hydrogène, il ne donne aucune réaction; or, si on prépare deux cloches renfermant de l'hydrogène et de l'acide carbonique et qu'on y introduise un bâton de phosphore, on ne voit apparaître aucune vapeur, même quand la cloche est exposée au soleil; il n'en est plus ainsi, si on introduit sous une des cloches une branche remplie de feuilles; aussitôt que l'insolation a lieu, la décomposition de l'acide carbonique produit de l'oxygène et le bâton de phosphore s'entoure de lourdes vapeurs blanches, le phosphore reste sans action; au contraire, quand on plonge sous la seconde cloche un rameau qui a été exposé pendant quelques temps aux vapeurs mercurielles, les feuilles ont perdu la propriété de décomposer l'acide carbonique.

Il est donc important, quand on veut opérer la décomposition de l'acide carbonique sur le mercure, de ne pas mettre les feuilles au contact de ce métal et de les protéger pendant l'expérience par une couche d'eau ou par de la fleur de soufre, dont l'action préservatrice a été observée par les chimistes hollandais, cités plus haut (1).

§ 17. — Volumes de l'acide carbonique décomposé et de l'oxygène dégagé par les feuilles insolées.

La première expérience, ayant pour but de rechercher dans quels rapports de volume se trouvent l'acide carbonique absorbé et l'oxygène exhalé par les

(1) Boussingault, *Agron.*, t. IV, p. 267.

plantes exposées au soleil, est due à Th. de Saussure; elle lui donna les chiffres suivants :

Plantes employées.	Acide carbonique disparu.	Oxygène apparu.	Oxygène manquant pour représenter celui de l'acide carbonique disparu.	Azote apparu.
Pervenche.	431 ^{cc}	292 ^{cc}	139 ^{cc}	139 ^{cc}
Menthe aquatique. . . .	309	224	85	86
Salicaire.	149	121	28	21
Pin.	306	246	60	20
Cactus opuntia.	184	126	58	57

Th. de Saussure avait très bien remarqué que l'oxygène manquant, pour représenter celui qui existait dans l'acide carbonique décomposé, était remplacé par un volume à peu près égal d'azote, mais il semble avoir cru que cet azote provenait de la décomposition des matières azotées contenues dans les tissus de la plante elle-même.

Les expériences exécutées plus tard par Cloëz et Gratiolet, à l'aide des plantes submergées, fournissaient un argument contraire à cette manière de voir; en effet, en laissant pendant plusieurs jours, exposées au soleil, des feuilles de *Potamogeton perfoliatum* dans de l'eau, imprégnée d'acide carbonique qui n'était pas renouvelée, ces habiles expérimentateurs trouvèrent que l'oxygène se purifiait de plus en plus et ne renfermait plus à la fin des essais que de très petites quantités d'azote; le premier jour, le gaz obtenu renfermait sur 100 parties, 84,30 d'oxygène et 15,70 d'azote; le huitième jour, le gaz renfermait 97,10 d'oxygène et 2,90 d'azote.

Il est clair que si l'azote provenait d'une altération de la plante, d'une désorganisation des tissus, d'une destruction des principes azotés dégageant, à l'état de pureté, le gaz azote qu'ils renferment, ce gaz devrait être d'autant plus abondant que les plantes sont dans un état de décomposition plus avancée et, par suite, que l'expérience se serait prolongée plus longtemps; or, on trouve précisément un résultat inverse.

Il était donc vraisemblable que l'azote dégagé dans ces expériences provenait du gaz interposé dans les méats des feuilles; rien n'est plus simple, en effet, que de constater la présence dans les feuilles d'une quantité de gaz notable; on place des feuilles dans de l'eau préalablement bouillie, puis on fait le vide et on voit toute la surface se couvrir de bulles de gaz, en même temps qu'il s'en dégage par les déchirures. Il était donc probable que l'azote dégagé avait été chassé de la feuille par l'oxygène, provenant de la décomposition de l'acide carbonique; ce n'était là, toutefois, qu'une hypothèse qui a été vérifiée par M. Boussingault (1).

L'expérience comporte l'emploi d'une série de trois ballons, d'un lot de feuilles bien homogène et, enfin, d'une provision d'eau légèrement chargée d'acide carbonique. Le premier ballon renferme une partie de l'eau légèrement imprégnée d'acide carbonique, eau dans laquelle devait avoir lieu la décomposition du gaz; ce ballon ne recevait pas de feuilles, il servait seulement à

(1) *Ann. de ch. et de phys.*, 3^e série, t. LXVI, p. 295.

déterminer exactement la proportion des gaz dissous dans l'eau ou l'*atmosphère de l'eau*. Le ballon n° 2 recevait de l'eau semblable à celle du n° 1 et des feuilles, mais il n'était pas exposé au soleil. On extraie du ballon n° 2 l'*atmosphère réunie de l'eau et des feuilles*. Enfin, le troisième ballon recevait de l'eau et des feuilles semblables à celles du n° 3, et il était exposé au soleil.

Quand il s'agit d'obtenir les gaz dissous dans l'eau des deux premiers ballons, on les réunit à l'aide d'un caoutchouc muni de pince de Mohr, avec un ballon plus petit portant un bouchon percé de deux trous, l'un reçoit le tube abducteur du grand ballon renfermant l'eau et les feuilles, tube qui au commencement de l'expérience est exactement rempli d'eau, le bouilleur porte en outre un second tube qui est recourbé et va déboucher sous une cuve de mercure.

On porte à l'ébullition l'eau du bouilleur de façon à chasser tout l'air qu'il renferme, on laisse refroidir et le mercure montant dans le tube indique que l'appareil tient bien le vide; quand il a résisté à cette épreuve, on chasse par l'ébullition, les gaz du grand ballon dans le bouilleur, puis dans une cloche retournée sur le mercure, en portant enfin à l'ébullition l'eau du bouilleur, on déterminait un courant de vapeur qui chassait tous les gaz dans la cloche à mercure.

Cette opération pratiquée d'abord sur le ballon, renfermant l'eau chargée d'acide carbonique, puis sur le ballon contenant l'eau et les feuilles, donnait respectivement l'*atmosphère de l'eau, de l'eau et des feuilles*.

Quant au ballon n° 3, il était exposé au soleil pendant un certain temps: les feuilles décomposaient l'acide carbonique; l'oxygène dégagé, après avoir rempli le bouilleur, préalablement vidé d'air par l'ébullition, chassait le mercure du tube, et se dégageait sous la cloche; à la fin de l'opération, les gaz encore dissous dans l'eau étaient chassés par l'ébullition sous la cloche.

On se proposait particulièrement dans cette expérience de reconnaître s'il apparaît de l'azote pendant la décomposition de l'acide carbonique, et on reconnut que cette émission n'a pas lieu. Cette importante série de recherches démontra en outre que le volume d'oxygène dégagé est sensiblement égal au volume d'acide carbonique disparu.

« Si l'on considère l'ensemble des résultats comme ayant été fournis par une observation unique, on trouve qu'il a disparu 1339^{cc},38 de gaz acide carbonique et qu'il est apparu 1322^{cc},61 de gaz oxygène, que par conséquent 100 volumes d'acide carbonique ont fourni 98^{vol},75 de gaz oxygène. »

On avait cru voir dans les gaz émis par les feuilles une petite quantité d'oxyde de carbone, mais des recherches ultérieures montrèrent que l'oxygène est le seul gaz émis pendant cette décomposition de l'acide carbonique.

§ 18. — De l'action qu'exercent diverses radiations sur la décomposition de l'acide carbonique par les feuilles.

Comme tous les autres organes des végétaux, les feuilles respirent en absorbant de l'oxygène et en émettant de l'acide carbonique, ce phénomène dont les manifestations sont opposées à celles qui accompagnent l'assimilation du car-

bone est d'une énergie moindre que la décomposition de l'acide carbonique, quand les feuilles sont insolées, et dans ces conditions l'oxygène apparaît. Si les radiations lumineuses font défaut, la respiration seule manifeste son action et l'émission d'acide carbonique est sensible, de là l'expression incomplète si souvent répétée : les plantes émettent de l'oxygène pendant le jour et de l'acide carbonique pendant la nuit. En réalité la respiration, l'absorption d'oxygène et l'émission d'acide carbonique ne sont jamais interrompues, mais seulement masquées par le phénomène contraire.

La respiration, qui se traduit par l'émission d'acide carbonique, est surtout provoquée par l'élévation de température, et on conçoit que des feuilles placées dans un tube de verre pour y décomposer de l'acide carbonique, exposées au soleil, puissent ne pas présenter une réaction d'autant plus énergique que le soleil sera plus ardent, car la température du tube peut s'élever à un point où l'énergie de la respiration vient balancer partiellement celle de l'assimilation; on conçoit donc qu'on ait cherché les conditions les plus favorables à ce qu'on appelle l'*optimum* d'éclairement, recherche un peu factice puisque les résultats sont dus aux conditions très particulières de l'expérience, à savoir une feuille placée dans une enveloppe de verre où la température peut atteindre une élévation qui ne se produit pas à l'air libre. M. Famitzin (1) toutefois s'est efforcé d'éviter la cause perturbatrice de l'élévation de température en ne laissant pénétrer les rayons solaires dans les tubes où ses plantes étaient en expériences qu'après qu'ils avaient traversé une couche d'eau qui les dépouille d'une fraction, mais d'une fraction seulement des rayons colorifiques. Les tubes renfermant les feuilles en expériences étaient exposés à la lumière directe ou recouverts d'une ou plusieurs feuilles de papier, il a trouvé que la lumière diffuse exerçait souvent une action presque égale à celle de la lumière directe; c'est ce qu'avait observé également M. Bous-singault, qui écrit : « J'ai placé fréquemment des appareils au nord d'un grand bâtiment et là, par un ciel sans nuages, le volume du gaz oxygène provenant de l'acide carbonique décomposé ne différait pas notablement de celui que l'on obtenait du soleil. »

Si l'on suppose que la lumière soit seule en jeu et que l'influence perturbatrice de la chaleur ne se fasse pas sentir dans ces expériences, on serait porté à adopter l'opinion émise par M. Famitzin, qui attribue « l'existence de l'*optimum* d'intensité lumineuse à la migration des graines de chlorophylle, qui fuient un éclairage trop intense et par suite ne fonctionnent plus dans ces conditions avec autant d'efficacité que lorsqu'ils restent directement exposés à l'action d'une lumière moins éclatante. »

Cependant les causes de cet optimum paraissent plus compliquées que ne le pense le savant russe; en effet, M. Reinke (2) a déterminé le dégagement des gaz de feuilles d'*etodea* très minces, placées dans des lumières d'intensité variable.

Pour obtenir ces variations, M. Reinke dirige à l'aide d'un héliostat un rayon

(1) *Ann. des sc. nat. Bot.*, 6^e série, t. X, p. 62.

(2) *Bot. Zeit.*, 1883, n^{os} 42, 43, 44. — *Ann. agron.*, t. X, p. 38.

lumineux horizontal dans une chambre noire ; le rayon est reçu sur une lentille convergente qui fournit un double cône de lumière ; en opérant à des distances variées de la lentille on obtient des intensités qu'il est facile de déterminer par le calcul ; or M. Reinke observe que le nombre des bulles dégagées décroît régulièrement quand la plante est soumise elle-même à une action lumineuse de plus en plus faible ; mais au lieu de décroître quand l'intensité lumineuse après avoir retrouvé sa valeur initiale, pour l'intensité maximum du point de départ, elle reste stationnaire pour un éclaircissement de plus en plus intense.

On n'observe pas dans ces conditions la diminution constatée quand l'observation a lieu dans des tubes de verre, où la température s'élève considérablement, ce qui serait favorable à l'idée que la diminution observée par M. Famitzin est due en grande partie à l'exagération de la respiration.

§ 19 — Décomposition à l'aide des lumières artificielles.

C'est en opérant avec des lumières artificielles qu'on réussit le mieux à montrer l'influence opposée qu'exercent sur les feuilles les diverses radiations ; ces recherches présentaient d'autant plus d'intérêt qu'au moment où elles ont été publiées, on ignorait encore si les sources artificielles étaient capables de provoquer la décomposition de l'acide carbonique (1). On réussit très facilement à démontrer cette décomposition pendant la courte durée d'une leçon, en plaçant les feuilles dans une atmosphère d'hydrogène et d'acide carbonique et en y ajoutant un petit bâton de phosphore ; après un quart d'heure d'exposition à l'action de la lumière de Drummond les fumées sont visibles.

Pour montrer la différence d'action des diverses radiations, on a employé comme sources lumineuses la lumière de Drummond (chaux rendue incandescente par un chalumeau oxyhydrique), la lampe Bourbouze (toile de platine portée au rouge blanc par la combustion du gaz alimenté par un courant d'air), et on les a fait agir dans l'appareil décrit p. 32 sur des feuilles protégées par un écran liquide.

Ces sources émettent en même temps que des radiations lumineuses, des radiations colorifiques et suivant qu'on laissera prédominer les unes ou les autres on assistera à la décomposition de l'acide carbonique ou à sa production.

Quand on immerge les tubes renfermant les feuilles et l'atmosphère sur laquelle elles doivent agir dans un manchon rempli d'eau, on observe la décomposition de l'acide carbonique, mais on assiste au renversement du phénomène en substituant à l'eau un liquide qui, mieux qu'elle, se laisse traverser par la chaleur obscure : en remplissant par exemple, les manchons de benzine ou mieux encore de chloroforme ; dans ces conditions nouvelles, les radiations calorifiques dominent et l'on trouve moins d'oxygène et plus d'acide carbonique qu'on n'en a introduit, ainsi que le montrent les chiffres suivants, particulièrement caractéristiques pour la lampe Bourbouze, plus chaude et moins lumineuse que la lumière Drummond.

(1) Dehérain et Maquenne., *Ann. agr.*, t. V, p. 401 ; *Ann. sc. nat. Bot.*, 6^e série, t. IX, p. 47.

Lumière Drummond.

	Le manchon dans lequel sont immergés les tubes renfermant la feuille et l'atmosphère à modifier, est rempli	
	d'eau.	de benzine.
Acide carbonique disparu.	8 ^{cc} ,47	4 ^{cc} ,47
Oxygène apparu.	7 ^{cc} ,78	4 ^{cc} ,79

Lampe Bourbouze.

Acide carbonique disparu.	5 ^{cc} ,48	apparu	1 ^{cc} ,74
Oxygène apparu.	4 ^{cc} ,90	disparu	2 ^{cc} ,18

Quand on remplace la benzine par le chloroforme beaucoup plus diathermane qu'elle, la lumière Drummond provoque tantôt une très faible décomposition et tantôt une production d'acide carbonique; avec la lampe Bourbouze, le phénomène de respiration l'emporte nettement sur celui d'assimilation, l'atmosphère s'appauvrit en oxygène et s'enrichit d'acide carbonique.

M. Famitzin a reconnu également que les feuilles exposées à la lumière d'une flamme de gaz valant 50 bougies dégageaient son oxygène; son mémoire, publié sans qu'il eut connaissance du travail que nous avons exécuté, M. Maquenne et moi, est d'une date un peu postérieure au nôtre (1).

Pour constater la décomposition de l'acide carbonique par les feuilles éclairées par des sources médiocrement énergiques, comme la lampe Bourbouze ou la lumière Drummond, il faut les placer à une très faible distance des foyers, à 5 ou 6 centimètres (2); avec le régulateur évalué à 2,000 bougies, qui a éclairé pendant deux mois et demi la petite serre d'expériences du Palais des Champs-Élysées, on a pu constater facilement la décomposition de l'acide carbonique par la lumière électrique, éloignée de plus de deux mètres des feuilles en expériences.

On a employé *l'elodea canadensis* immergé dans l'eau, on a pu recueillir dans un cas 22^{cc} et dans un autre 26^{cc} d'oxygène.

La faiblesse du dégagement n'a rien de surprenant, les radiations émancées d'un régulateur à charbon renfermant une quantité relativement faible de radiations calorifiques.

§ 20. — Influence des diverses parties du spectre solaire.

Il y a longtemps qu'on a reconnu que toutes les radiations lumineuses sont loin de présenter la même efficacité pour provoquer la décomposition de l'acide carbonique par les feuilles.

La méthode la plus simple pour étudier cette question importante consiste à

(1) *Ann. des sc. nat. Bot.*, 6^e série, t. X, 1880.

(2) Quand on opère avec la benzine, il faut entourer les feuilles en expériences d'un manchon où l'on fait circuler le liquide assez rapidement pour qu'il ne s'échauffe pas; il faut en outre que les appareils soient rigoureusement fermés pour éviter l'enflammation du liquide qui ne serait pas sans danger.

placer les plantes en expériences dans des vases où n'arrive qu'une lumière modifiée par son passage au travers d'un verre ou d'une dissolution colorée ; c'est ainsi qu'ont opéré Cloëz et Gratiolet, MM. Sachs, Cailletet, Prilleux, et que nous avons agi nous-mêmes. Cette méthode n'est qu'approximative, car il est très difficile d'avoir des verres colorés ou des liquides qui ne laissent passer qu'une seule espèce de lumière ; en utilisant ce procédé, on reconnaît facilement cependant que les rayons jaune rouge sont beaucoup plus efficaces que les bleus et surtout les verts.

Les expériences exécutées avec le spectre solaire sont beaucoup plus rigoureuses ; elles ont conduit M. Draper à reconnaître que si l'on n'obtenait aucun dégagement de gaz de feuilles exposées à la lumière rouge, si l'on n'en obtenait pas davantage dans la partie du spectre comprenant le bleu, l'indigo et le violet, on trouvait un maximum d'intensité dans la partie comprenant l'orangé et le jaune.

Il est remarquable que les rayons qui, d'après M. Draper, déterminent avec le plus d'énergie la décomposition de l'acide carbonique soient précisément ces rayons qui correspondent à la bande noire qui caractérise la partie gauche du spectre de la chlorophylle ; n'y aurait-il pas là une relation étroite de cause à effet ? Cette hypothèse, signalée par M. E. Becquerel, par M. Jamin, a été l'objet d'un travail remarquable d'un physiologiste russe M. Timiriazeff.

Il a surmonté les difficultés inhérentes à ce genre de travail, dans lequel on n'obtient de précision qu'en ayant un spectre de petites dimensions, en imaginant de nouvelles méthodes de mesurer et d'analyser les gaz ; il a pu n'employer que de très petites surfaces décomposantes, taillées dans une même feuille et les placer dans des tubes étroits, séparés les uns des autres par des écrans et éclairés par des parties bien pures du spectre solaire.

Les éprouvettes, contenant le mélange gazeux à décomposer, étaient exposées dans le spectre dans l'ordre suivant : la première était dans le rouge extrême qui n'est pas absorbé par la chlorophylle, la seconde occupait la partie du rouge qui correspond à la bande d'absorption caractéristique de la chlorophylle, les trois autres éprouvettes venaient à la suite, la dernière étant dans le vert.

Les résultats obtenus furent que la décomposition de l'acide carbonique est en rapport direct avec l'absorption élective de la chlorophylle ; il est, en effet, remarquable de voir qu'il n'y a pas de décomposition dans l'éprouvette placée dans la bande rouge qui borde à gauche la bande d'absorption de la chlorophylle, tandis qu'au contraire cette décomposition atteint son maximum dans la bande d'absorption qui est située dans le voisinage de cette bande rouge.

Si l'on conçoit sans peine que les rayons absorbés par la chlorophylle sont ceux qui sont efficaces pour déterminer la décomposition de l'acide carbonique, si l'on comprend ainsi que les rayons rouges qui traversent la chlorophylle soient sans action, tandis que les orangés qui sont arrêtés déterminent la réduction de l'acide carbonique, on a quelque peine à se figurer, d'autre part, pourquoi les rayons les plus réfrangibles, situés dans le bleu et le violet et qui sont complètement absorbés, ne présentent aucune efficacité. En y réfléchissant,

on comprend cependant que la décomposition de l'acide carbonique, exigeant un travail considérable, doit dépendre de l'énergie du rayonnement ; or, l'effet calorifique est très faible dans la partie du spectre la plus réfrangible, et, bien que ces rayons soient arrêtés, ils possèdent trop peu de radiations calorifiques pour déterminer la décomposition.

Les rayons les plus efficaces sont donc ceux qui, étant absorbés par la chlorophylle, possèdent en même temps le plus d'énergie. C'est ainsi que les rayons rouges, malgré leur forte énergie, sont sans action parce qu'ils traversent la chlorophylle sans absorption visible, tandis que les rayons bleus ne sont pas efficaces, bien qu'ils soient absorbés parce qu'ils n'ont qu'une médiocre énergie.

Si délicate que soit la méthode employée par M. Timiriæzef, elle ne permet pas une analyse aussi profonde du phénomène que celle qui a été employée récemment par M. le professeur Engelmann, de l'Université d'Utrecht

Le nouveau réactif employé est la bactérie ordinaire de la putréfaction et, notamment, la forme la plus petite : le *bacterium termo*.

On sait combien l'oxygène est nécessaire à l'état mobile de ces formes ; dans une goutte d'eau recouverte de la lamelle mince usitée en micrographie, elles se dirigent en masse vers les bords ; lorsque la goutte d'eau emprisonne des bulles d'air, on les voit se réunir autour d'elles ; dans un courant d'hydrogène pur, tout mouvement s'arrête ; lorsque ce mouvement est suspendu par absence d'oxygène et qu'on introduit au milieu du liquide chargé de bactéries des fragments de conserves, quelques navicules (diatomées), on voit les bactéries s'accumuler autour de ces corps et s'y agiter vivement, tandis que toutes celles qui en sont restées éloignées sont devenues immobiles. Si, ensuite, on obscurcit le champ du microscope, en ne laissant que la lumière strictement nécessaire pour apercevoir les bactéries, on voit celles-ci s'arrêter aussitôt et souvent se disperser dans le liquide ambiant par simple mouvement brownien ; en remenant la lumière, on provoque de nouveau, instantanément, le mouvement et on voit les petits organismes s'accumuler de nouveau autour des cellules vertes. Il est bien évident que c'est l'oxygène dégagé par les algues qui provoque ces phénomènes (1).

L'auteur a été plus loin (2), il a fait construire un appareil qui lui permet d'obtenir un spectre microscopique qui vient se projeter sur le porte-objet du microscope. La pureté de ce spectre est telle qu'avec la lumière solaire même mitigée et une fente de 15 μ de large, on aperçoit nettement quelques centaines de lignes de Fraunhofer.

En plaçant une algue filamenteuse perpendiculairement à la direction du spectre, dans de l'eau chargée de bactéries, on voit le mouvement des bactéries commencer dans le rouge, généralement entre les raies B et C, dans le voisinage de la raie C. Si on augmente ensuite l'intensité de l'éclairage, on voit le mouvement s'étendre peu à peu des deux côtés de ce point initial jusqu'au commencement de l'ultra rouge et jusque dans le violet, mais il est plus vif dans le rouge. Quand on opère avec des algues vertes (*euglena*, *ædogonium*

(1) *Bot. Zeit.*, 1881, p. 441. — *Ann. agron.*, t. VIII, p. 461.

(2) *Bot. Zeit.*, 1882, p. 419. — *Ann. agron.*, t. VIII, p. 463.

cladophora) et à la lumière solaire, on observe un minimum dans le vert près de la raie C, et un second maximum près de la raie F.)

Lorsque le liquide de la préparation est chargé d'une grande quantité de bactéries, on obtient ainsi une véritable représentation graphique de l'influence de la longueur d'onde sur la décomposition de l'acide carbonique, dont l'axe des abscisses est figuré par l'objet lui-même et les ordonnées par l'épaisseur de la couche des bactéries qui le recouvre.

L'auteur est revenu encore sur ce sujet dans un mémoire plus étendu, intitulé : « Couleur et Assimilation (1) ». Il a d'abord reconnu, contrairement à l'opinion de M. Pringsheim, que la chlorophylle ne joue pas le rôle d'un écran protecteur, mais est bien l'élément actif de la décomposition de l'acide carbonique.

Dans aucun gaz on n'a pu observer le dégagement de la moindre trace d'oxygène par le protoplasma incolore, tandis que le plus petit corpuscule de chlorophylle en dégage très visiblement.

En opérant ensuite non seulement avec des plantes vertes mais avec d'autres dont le pigment est diversement coloré, il est arrivé aux conditions suivantes :

Pour les cellules vertes le maximum absolu de l'assimilation situé dans le rouge entre B et C, correspond à la première et à la plus forte bande d'absorption de la chlorophylle, tandis que l'extrême rouge peu absorbé, n'agit que faiblement. Le minimum dans le vert entre E et C coïncide avec le minimum du coefficient d'absorption; le second maximum très fort, dans le bleu, à la raie F tombe sur le commencement de la grande absorption de l'extrémité droite du spectre.

Pour les cellules brunes le premier maximum, très fort dans le rouge entre B et C, correspond à la première bande d'absorption, le minimum dans l'orangé et le jaune, à la plus grande transparence de ces cellules; le maximum absolu tombe dans le vert entre D et C, rayons également très fortement absorbés. A partir de ce point l'assimilation baisse très lentement, en effet les rayons bleus et violets sont fortement absorbés.

Pour les cellules bleues le maximum tombe dans le jaune; enfin pour les cellules rouges il est dans le vert.

De ces recherches l'auteur tire cette conclusion, qu'il existe dans le règne végétal, outre la chlorophylle, une série d'autres matières colorantes qui jouent le même rôle dans l'assimilation, et il ajoute : ce sont toujours les rayons complémentaires de la couleur des plantes qui agissent le plus fortement.

Tout récemment M. Reinke (2) est revenu sur ce sujet important, après avoir soumis à une nouvelle série d'épreuves le procédé de M. Sachs, qui consiste à compter le nombre de bulles de gaz dégagé dans un temps donné par la section d'une plante aquatique immergée dans une dissolution d'acide carbonique; l'auteur l'a définitivement adopté, et il s'en est servi pour rechercher l'influence relative des diverses radiations.

(1) *Bot. Zeit.*, 1883, n° 1 et 2. — Une traduction abrégée a été donnée dans *Ann. agron.*, t. IX, p. 78.

(2) *Untersuchungen über die Einwirkung des Lichtes auf die Sauerstoffauscheidung der Pflauzen.* — Résumé dans *Ann. agron.*, t. X, p. 136.

M. Reinke emploie un appareil qu'il désigne sous le nom de *spectrophore*, dont il donne la description suivante :

Un héliostat projette un rayon horizontal sur une fente ajustée dans le volet d'une chambre noire. Au delà, le rayon rencontre un objectif de lunette Steinheil de 0^m,068 de diamètre et d'une longueur focale de 0^m,800. Un prisme à base équilatérale disposé par la déviation *minima* reçoit le cône de lumière et un spectre réel se peint sur un écran d'une construction particulière. Cet écran consiste en deux planchettes de bois verticales qu'on peut déplacer de manière à les rapprocher ou les éloigner à volonté. On arrête ainsi la partie du spectre qu'on veut éliminer ; quant à la partie qui passe entre les deux planchettes, elle traverse une grande lentille convergente qui donne à quelque distance un image coloré de de la fente, si on a écarté quelques rayons, blanche si on a laissé passer tout le spectre. On obtiendra donc ainsi la couleur que l'on voudra, mais il reste encore une difficulté à surmonter et qui consiste à donner à toutes ces images une concentration lumineuse égale. Pour cela, il suffit de fixer devant l'écran une échelle des longueurs d'onde adaptée à la dispersion du prisme employé. Dans la partie rouge du spectre les traits de cette échelle étant beaucoup plus rapprochés que dans la partie violette, on voit de suite que pour obtenir une image violette de même concentration que l'image rouge, il faudra recueillir sur la lentille collectrice une largeur décuple, par exemple, de celle qu'il eût fallu prendre dans le rouge.

Les résultats obtenus par M. Reinke sont les suivants : le maximum du dégagement d'oxygène coïncide avec le maximum d'absorption de la chlorophylle : il se trouve dans le rouge non loin de la raie B ; la courbe descend rapidement vers l'ultra-rouge, plus lentement vers le violet ; mais contrairement à ce qu'a observé M. Engelmann, aucune exagération du dégagement de l'oxygène ne correspond à la raie d'absorption, qui commence entre les raies B et F et qui s'étend sur toute la partie droite du spectre. M. Reinke pense que la lumière bleue accélère par elle-même le mouvement des zoospores et que c'est à la qualité de la lumière et non au dégagement d'oxygène plus actif qu'est dû le mouvement plus rapide observé, dans cette région, par le savant physiologiste d'Utrecht (1).

§ 21. — Principes immédiats formés par la décomposition de l'acide carbonique.

Nous avons indiqué plus haut une méthode propre à reconnaître si certaines atmosphères sont susceptibles d'être modifiées par l'action des feuilles insolaées ; nous savons que si on place une feuille dans une atmosphère formée d'acide

(1) J'ai eu, il y a quelques années, une preuve de la préférence qu'accordent certains animaux à des radiations particulières. Sur une bêche de jardinier, j'avais placé des verres diversement colorés pour suivre l'influence qu'ils exerceraient sur la croissance des plantes. Des fourmis construisirent une fourmilière sous le verre rouge ; pour savoir si le choix de cet emplacement était fortuit, je déplaçai les verres ; après quelques jours, les fourmis avaient quitté leur ancienne demeure pour venir s'établir de nouveau sous le verre rouge.

carbonique et d'hydrogène et qu'on expose le tout aux radiations solaires, on voit le bâton de phosphore s'envelopper de vapeurs blanches montrant le dégagement d'oxygène.

Si au lieu de mêler à l'hydrogène de l'acide carbonique on y introduit de l'oxyde de carbone, aucune vapeur n'apparaît et on en peut conclure, comme l'ont fait successivement Th. de Saussure et M. Boussingault, que l'oxyde de carbone n'est pas décomposé par les cellules à chlorophylle.

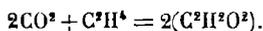
Il est donc vraisemblable qu'au moment où l'acide carbonique est réduit par les cellules à chlorophylle, il ne l'est que partiellement et que la décomposition s'arrête à l'oxyde de carbone; un volume d'acide carbonique donnerait donc seulement par sa décomposition un volume d'oxyde de carbone et un demi-volume d'oxygène; mais l'expérience nous enseigne que pour un volume d'acide carbonique disparu, il apparaît un volume d'oxygène; puisque le volume d'acide carbonique réduit a fourni seulement un demi-volume d'oxygène, il faut qu'une autre matière se décompose à son tour et dégage le demi-volume d'oxygène qui nous est nécessaire pour compléter le volume égal à celui de l'acide carbonique disparu. Nous admettons que l'eau se décompose en même temps que l'acide carbonique: or, un volume de vapeur d'eau se décompose en un volume d'hydrogène et un demi-volume d'oxygène; l'oxygène apparut pendant la décomposition de l'acide carbonique, bien qu'il présente presque rigoureusement le même volume que cet acide, n'en provient donc pas entièrement; il paraît au contraire avoir une double origine; la moitié est fournie par l'acide carbonique, l'autre moitié par l'eau.

Or l'acide carbonique et l'eau décomposés, laissent en présence deux gaz, l'oxyde de carbone et l'hydrogène, qui sont les résidus de la décomposition et qui en s'unissant pourraient former une matière ternaire représentée par les rapports d'équivalents CHO.

Quelle est la matière formée par l'union de ces deux résidus, oxyde de carbone et d'hydrogène? M. Brodie a réussi à déterminer leur combinaison au moyen des effluves (1) et il a pu obtenir de l'acide carbonique et du formène; on conçoit en effet que $4CO + 4H = 2CO^2 + C^2H^4$.

En outre, MM. P. et A. Thenard, en soumettant à l'action de l'effluve un mélange de formène et d'acide carbonique, ont produit une matière organique dans un état de condensation assez avancé.

La combinaison du formène et de l'acide carbonique représente comme premier terme l'aldéhyde formique; on a, en effet:



Les aldéhydes étant susceptibles de polymérie, on conçoit que dans l'expérience de MM. Thenard, elle ait été remplacée par une matière plus condensée; mais on comprend en outre qu'il serait du plus haut intérêt de constater dans la plante même ce premier produit résultant de l'union du formène et de l'acide carbonique.

C'est ce qu'a tenté récemment M. Reinke (2): en soumettant à la distillation

(1) *Chem. News. — Bulletin de la Soc. chim.*, 1876, t. XXI et XXII.

(2) *Deutsche chemische Gesellschaft.*, t. XIV, p. 2144-1881. — V. un résumé dans *Ann. agron.*, t. VIII, 311.

le suc exprimé de feuilles de vigne, préalablement neutralisé par du carbonate de soude, l'auteur a obtenu un liquide qui réduit à une douce chaleur la liqueur de Fehling ou le nitrate d'argent ammoniacal. La substance réductrice est très volatile et les premiers centimètres cubes du liquide distillé possèdent seuls un pouvoir réducteur énergique.

Le suc des feuilles de peuplier ou de saule fournit aussi, d'après M. Reinke, par la distillation, un liquide réducteur, mais ici la substance est moins volatile, car toutes les fractions du liquide distillé offrent sensiblement le même pouvoir; et il ajoute : « Il est probable que ces substances sont formées dans la cellule la plus volatile se rapprochant de l'aldéhyde formique, la seconde serait de la paraldéhyde formique ou trioxyde de méthylène ($C^2H^6O^3$). »

Il est clair que ces premières indications sont précieuses, qu'elles viennent appuyer le fait connu depuis longtemps de la présence dans les plantes de l'acide formique, et qu'elles donnent une nouvelle probabilité en faveur de l'hypothèse que le produit formé dans la cellule à chlorophylle est l'aldéhyde formique, l'acide en provenant par simple oxydation; mais avant de considérer le fait comme acquis, il convient d'attendre qu'on ait recueilli une quantité de matière suffisante pour la purifier, l'obtenir à l'état de pureté et l'analyser.

Si l'on admet cette hypothèse, il devient relativement aisé de concevoir la formation de matières plus complexes; en effet, M. Berthelot a reconnu depuis longtemps que les corps susceptibles de se combiner par addition sont susceptibles aussi de polymérie; or $6(C^2H^2O^2) = C^{12}H^{12}O^{12}$, c'est-à-dire que par une simple condensation l'aldéhyde méthylique donnerait la glycose, une des substances les plus répandues dans le règne végétal.

Enfin la glycose ou ses isomères peut fournir par oxydations ménagées les acides végétaux, par combinaison avec élimination d'eau le sucre de canne, et si trois molécules de glycose s'unissent en perdant six molécules d'eau, elles fourniront l'amidon $C^{36}H^{30}O^{30}$, si abondant dans les cellules à chlorophylle que les botanistes professent d'ordinaire que l'amidon est la matière qui prend naissance directement par décomposition de l'acide carbonique; il est certain, en effet, que l'amidon est facile à voir dans les cellules et qu'il apparaît ou disparaît, suivant que les conditions d'éclairage et de milieu sont favorables ou non à la décomposition de l'acide carbonique. La question mérite toutefois un examen approfondi, et il importe de constater comment cette production est liée à l'action des radiations que reçoivent les plantes et à la composition de l'atmosphère dans laquelle elles sont placées.

§ 22. — Influence de l'intensité de l'éclairage sur la production de l'amidon.

Les physiologistes allemands Hugo von Mohl, Stahl, et, plus récemment, M. Morgen ont montré les relations qui lient étroitement l'apparition de l'amidon à l'intensité de l'éclairage. Nous rappellerons ici le mode d'opérer de ce dernier auteur.

Les expériences portèrent sur le cresson, que l'on fit germer sur de la gaze.

Afin de démontrer que l'amidon est un produit de l'assimilation, il fallait préalablement faire disparaître celui qui provient des matières en réserve emmagasinées dans la graine. On y réussit après quinze jours environ, en diminuant la quantité de lumière qu'on laissait parvenir jusqu'à la plante, sans cependant l'empêcher de se développer et de former de la chlorophylle. Une partie des plantes, privées d'amidon par leur séjour à une lumière ménagée, fut exposée à la lumière solaire directe et à l'air libre; une autre, placée dans les mêmes conditions de lumière, fut mise dans un atmosphère privée d'acide carbonique. M. Morgen formule ainsi ses conclusions : La formation de l'amidon dans les grains chlorophylliens des cotylédons des plantes, exposées à la lumière solaire et à l'air libre, est proportionnelle à l'intensité de la lumière et à la durée pendant laquelle elle agit. Dans les conditions les plus favorables, la production est très abondante après quelques heures d'insolation.

Les plantes de la même espèce que l'on a privées préalablement de l'amidon qu'elles contenaient n'en forment pas traces quand on les met dans un milieu exempt d'acide carbonique (1).

§ 23. — Influence d'une atmosphère chargée d'acide carbonique.

Tous les faits résumés dans ce chapitre démontrent que l'acide carbonique décomposé par les feuilles est l'origine des hydrates de carbone répandus dans les végétaux, et on en pourrait conclure qu'il dût y avoir un avantage décidé à faire vivre les plantes dans un atmosphère enrichie d'acide carbonique; c'est ce qui semblerait résulter de quelques essais de Th. de Saussure (2), d'autant plus que M. Corenwinder (3) a reconnu que les plantes placées dans une atmosphère enrichie d'acide carbonique en décomposent infiniment plus qu'à l'air libre. Toutefois, les expériences de ces deux auteurs n'ont eu qu'une faible durée et, par suite, ne sont pas décisives; en 1880 et 1881, ce sujet fut repris au Museum, et les expériences disposées de façon à établir la comparaison entre des plantes vivant dans de l'air non renouvelé, dans de l'air constamment renouvelé et dans une atmosphère enrichie d'acide carbonique, la disposition des appareils était telle, qu'on savait la quantité d'acide carbonique introduite et qu'on pouvait prélever des échantillons de l'air de la cloche où se trouvaient les plantes en expériences.

Si l'on compare les plantes placées sous les cloches à celles qui ont vécu à l'air libre, on reconnaît bien vite que, malgré l'abondance de l'acide carbonique, les autres conditions ont été tellement défavorables que le développement à l'air libre est bien supérieur; mais si on restreint la comparaison aux plantes qui ont vécu sous cloche, on reconnaît que celles qui n'ont pu renouveler que difficilement leur atmosphère sont mortes après quelques jours, que celles qui ont été soumises à l'action d'un courant d'air continu sont développées

(1) *Ann. agron.*, t. IV, p. 308.

(2) *Recherches chimiques sur la végétation*, p. 21.

(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3^e série, 1858, t. LIV, p. 358.

médiocrement, et que celles qui ont eu l'excès d'acide carbonique leur ont été supérieures (1).

Cependant une seconde série d'expériences, exécutées dans de petites serres présentant environ trois mètres cubes de capacité, dans lesquelles, en 1882 et 1883, on essaya l'action de l'acide carbonique, ne donnèrent que des résultats médiocres, sans qu'on puisse affirmer cependant que dans d'autres conditions l'acide carbonique ne présenterait pas quelques avantages; la difficulté qu'on rencontra fut de faire vivre les plantes dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau, où par suite l'évaporation se fait mal; cet inconvénient disparaîtrait sans doute dans des serres de plus grandes dimensions; quoiqu'il en soit l'avantage que les plantes ont pu retirer de l'abondance de l'acide carbonique a été minime; car, non seulement les plantes maintenues dans cette atmosphère étaient bien inférieures à celles qui vivaient à l'air libre, mais même elles ne présentaient que peu de différences avec celles qui étaient placées dans une serre identique à la précédente, mais ne renfermant pas un excès d'acide carbonique. Il est même arrivé souvent que les plantes, vivant dans l'atmosphère chargée d'acide carbonique, eussent un aspect malade que ne présentaient pas les pieds mis en comparaison dans la serre voisine.

Le seul point que démontrèrent nettement ces deux séries d'expériences est l'extrême abondance de l'amidon dans les feuilles de quelques espèces qui avaient vécu dans les atmosphères enrichies d'acide carbonique; ainsi un *ageratum cœruleum*, maintenu dans une cloche chargée d'acide carbonique, renfermait dans 100 de matière sèche 9,1 d'amidon, tandis qu'il n'y en avait que 6,8 dans la plante qui avait vécu dans l'air normal. Quand on opère sur une plante comme le tabac qui accumule facilement de l'amidon dans ses feuilles, on trouve une profusion de cet amidon telle qu'il est facile de le séparer par les lavages, comme on le fait des tubercules. Nous conservons au Museum un échantillon d'amidon chlorophyllien, extrait des tabacs qui ont vécu dans l'atmosphère chargée d'acide carbonique.

Pendant ces dernières années, on a multiplié les essais sur des espèces très différentes, on a renouvelé l'atmosphère des serres, de façon à empêcher qu'elle ne se saturât; les plantes ne restaient ainsi que pendant la matinée dans l'atmosphère chargée d'acide carbonique, les résultats ne furent pas favorables.

En résumé, le point de départ de ce grand phénomène de décomposition de l'acide carbonique est bien élucidé, on sait également quel est le point d'arrivée: et on peut professer avec certitude que la décomposition de l'acide carbonique dans les cellules à chlorophylle y amène l'apparition de l'amidon; la série de réactions qui sépare ces deux points extrêmes, les étapes successives que nous avons indiquées sont encore au contraire hypothétiques; nous supposons que l'acide carbonique de l'eau en se décomposant simultanément donne de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène qui s'unissent et forment de l'aldéhyde méthylique, qui, se polymérisant en glycose, d'où proviendrait enfin l'amidon; mais rien ne prouve absolument que ce soit bien ainsi que prenne naissance l'amidon chlorophyllien.

(1) *Ann. agron.*, t. VII, p. 385. Dehérain et Maquenna, *Végétation dans une atmosphère enrichie d'acide carbonique*.

§ 24. — La présence de l'acide carbonique est une condition d'existence de la plante verte.

Si l'excès d'acide carbonique dans l'atmosphère où vit la plante n'exerce pas sur son développement toute l'influence qu'on lui aurait attribué *a priori*, l'absence complète d'acide carbonique la fait périr.

C'est encore à Th. de Saussure qu'est due cette importante découverte; ses expériences sont concluantes: des pois sont placés sous une cloche où l'on maintient une soucoupe chargée de chaux éteinte; le volume de gaz diminue et, dès le troisième jour, les plantes qui recevaient l'action du soleil ont péri. Les pois, qui avaient végété durant le même temps sous une cloche, ne renfermant pas de chaux, n'avaient changé l'atmosphère de la cloche ni en pureté ni en volume, et ils étaient sains et vigoureux dans toutes leurs parties.

L'interprétation est facile: les pois qui ont végété sous la cloche, ne renfermant pas de chaux, forment par leur respiration une petite quantité d'acide carbonique; pendant le jour, quand la plante est insolée, cet acide carbonique est décomposé, la plante vit sur elle-même sans augmenter son poids, elle brûle ses vieux organes pour en former de nouveau, elle ne périt pas, la faible dose d'acide carbonique formée par la respiration suffisant à entretenir l'activité de la cellule à chlorophylle; si, au contraire, la cloche renferme de la chaux, celle-ci absorbe l'acide carbonique formé pendant le jour, les cellules à chlorophylle ne trouvant plus de gaz ne tardent pas à périr, entraînant la mort de la plante elle-même. L'expérience est facile à répéter avec succès.

On doit à M. Corenwinder quelques observations importantes sur ce même sujet; il a reconnu d'abord la nécessité de la présence de l'acide carbonique aérien, en confinant un rosier ou un jeune sophora dans de grands ballons; après quelques jours, ils ont jauni et perdu leurs feuilles.

M. Corenwinder eut, en outre, l'idée d'introduire dans un grand ballon parcouru par un courant d'air dépouillé d'acide carbonique, un rameau de figuier couvert de bourgeons pour reconnaître si les feuilles s'ouvriraient; les résultats obtenus furent les suivants:

Neuf feuilles de figuier développées à l'air libre pesaient ensemble. . .	26 ^r ,37
Poids d'une feuille.	2 ,93
Quatre feuilles confinées pesaient	2 ,78
Poids d'une feuille.	0 ,695 (1)

Il est clair que l'absence d'acide carbonique aérien a singulièrement nui au développement des jeunes feuilles de figuier, cependant elles ont continué leur évolution et il y aurait lieu d'en être surpris si une autre expérience de M. Corenwinder ne venait donner l'explication de ce fait en apparence anomal.

Le savant physiologiste de Lille a placé au printemps un rameau de marronnier portant un bourgeon, dans un ballon disposé comme le précédent, c'est-à-

(1) *Ann. agron.*, t. II, p. 577.

dire parcouru par un courant d'air dépouillé d'acide carbonique et passant, après avoir traversé le ballon, dans un flacon rempli d'eau de baryte.

A plusieurs reprises on reconnut que le bourgeon confiné avait émis une quantité sensible d'acide carbonique : le 26 mars les feuilles commencèrent à s'épanouir; le 29 elles étaient développées en partie; enfin le temps devient plus doux, les feuilles s'accroissent et le 13 avril, on peut noter que les feuilles confinées dans le ballon étaient parfaitement saines et visiblement plus grandes que les feuilles extérieures.

N'y a-t-il pas là un fait de nature à infirmer la loi découverte par Th. de Saussure, et n'en faudrait-il pas conclure que les cellules à chlorophylle ont vécu sans avoir d'acide carbonique à décomposer? On serait, au premier abord, fondé à le croire puisque l'épanouissement des feuilles a eu lieu dans un ballon parcouru par un courant d'air privé d'acide carbonique ou dans une atmosphère privée d'acide carbonique par un enduit de chaux sur les parois.

En résumé, il nous faut interpréter les trois résultats suivants :

Le rosier placé dans une atmosphère dépouillée d'acide carbonique est mort.

Un rameau de figuier placé dans les mêmes conditions s'est faiblement développé.

Un rameau d'un arbre de grande dimension, comme le marronnier, s'est développé complètement bien qu'il ait été privé de l'acide carbonique extérieur.

M. Corenwinder estime que les différences constatées tiennent surtout aux dimensions diverses des végétaux en expérience; il suppose que de l'acide carbonique existe dans les tissus même de la plante; il est assez abondant dans un arbre comme le marronnier pour soutenir la végétation des feuilles qui ne trouvent pas d'acide carbonique aérien; la moindre dimension du figuier le condamne à ne soutenir que moins efficacement les feuilles confinées, cependant elles atteignent en moyenne le quart du développement des feuilles normales. Enfin les petites plantes comme le rosier ou le sophora sont mortes, car elles n'avaient pas comme le figuier ou le marronnier une partie de leurs rameaux à l'air libre, vivant régulièrement et pouvant fournir aux bourgeons confinés l'acide carbonique nécessaire à leur existence.

Les résultats de ces expériences n'infirment donc pas ce fait considérable; les cellules à chlorophylle ne vivent qu'à la condition de fonctionner régulièrement en décomposant de l'acide carbonique, mais les observations de M. Corenwinder nous permettent d'ajouter que quand les feuilles sont privées d'acide carbonique aérien, elles peuvent soutenir leur vie en décomposant l'acide carbonique qui circule dans les tissus de la plante et arrive jusqu'aux cellules à chlorophylle.

§ 25. — Importance du phénomène de réduction de l'acide carbonique par les plantes vertes insolées.

La décomposition simultanée de l'acide carbonique et de l'eau en oxyde de carbone et hydrogène avec dégagement d'oxygène exige une absorption de chaleur considérable dont on peut se faire une idée en sachant la chaleur dégagée

par la combustion de l'un et de l'autre de ces gaz combustibles; on conçoit donc que l'intervention des rayons solaires soient nécessaires pour exécuter le travail consommé pendant cette décomposition.

En frappant aujourd'hui les végétaux qui couvrent la surface du globe, les radiations émanées du soleil y déterminent la réduction des corps saturés d'oxygène dont les résidus se combinent pour produire les hydrates de carbone qui sont employés à la nourriture de l'homme et des animaux ou qui fournissent des matières premières utilisées dans l'industrie, agissant autrefois sur les plantes de la période houillère, ces mêmes radiations ont pendant des milliers d'années accumulé ces immenses réserves de combustibles qui animent nos machines.

Depuis qu'il est acquis que le mouvement et le travail ne sont qu'une forme particulière de la chaleur, chacun conçoit que c'est en brûlant dans ses tissus la matière organique formée sous l'influence du soleil que l'animal se meut, que c'est en utilisant la chaleur du soleil accumulée dans la houille ou dans le bois que nos machines travaillent et reconnaît ainsi dans le soleil l'origine de tout le mouvement qui s'exécute sur la terre.

« Ce ne sont pas, disait l'illustre Stephenson en voyant arriver un convoi à toute vitesse, ces puissantes locomotives dirigées par nos habiles mécaniciens, qui font avancer le train; c'est la lumière du soleil qui, il y a des milliers d'années, a dégagé le carbone de l'acide carbonique pour le fixer dans les plantes qu'une révolution du globe a ensuite amenées à l'état de houille. »

Ce ne sont ni le froment ni l'avoine, pouvons-nous dire aujourd'hui, qui font mouvoir tous ces êtres qui tourbillonnent autour de nous; c'est la lumière du soleil qu'accumule lentement pour fournir à ce mouvement la plante immobile; elle absorbe la chaleur et la conserve sans en rien distraire, mettant tout en réserve pour ces privilégiés de la nature, les êtres animés, qui consomment et dépendent ces forces accumulées. Depuis longtemps on a senti que sous deux formes différentes la vie avait deux fonctions diverses; on a depuis longtemps écrit qu'elles étaient complémentaires, et nous reconnaissons en effet que l'immobilité de la plante qui lui permet d'accumuler la chaleur est nécessaire à la mobilité de l'animal qui dépense la force ainsi mise en réserve en transformant cette chaleur en mouvement.

§ 26. — Assimilation des matières carbonées de la terre arable.

L'acide carbonique aérien est-il la seule source où les plantes puisent le carbone nécessaire à la constitution de leurs tissus, ou bien les matières carbonées qui s'accumulent dans le sol cultivé par l'apport du fumier de ferme, dans la prairie ou la forêt par la décomposition lente des feuilles, des racines, des débris de végétations antérieures peuvent-elles également intervenir? Telle est la question qu'il nous reste à discuter.

Théodore de Saussure n'hésitait pas à admettre que les matières ulmiques, c'est le nom un peu vague sous lequel on désigne les substances carbonées qu'on peut extraire du sol par les alcalis, servaient directement à l'alimentation

de la plante. Cependant, on ne trouve pas dans les *Recherches chimiques sur la végétation*, d'expériences décisives sur ce sujet ; mais l'influence du terreau sur le développement des plantes était tellement établie par les expériences séculaires des cultivateurs et des jardiniers, qu'on avait naturellement admis que les matières carbonées du sol sont utiles à la végétation par leur assimilation directe, quand Liebig publia son Cours de chimie appliquée à l'agriculture. Dès cette époque, il soutint nettement l'opinion que l'humus n'est pas directement absorbé par les plantes ; voici au reste comment il résume sa manière de voir :

« L'humus nourrit les plantes, non pas parce que, comme tel, il est absorbé et assimilé, mais parce qu'il présente aux racines une source d'acide carbonique qui approvisionne la plante de la nourriture essentielle, tant que les conditions nécessaires à la pourriture, l'humidité et l'accès de l'air, se trouvent réunies. »

Malgré quelques expériences contraires de Th. de Saussure, de Malaguti, de Soubeyran qui ne furent peut-être pas conduites avec toute la rigueur nécessaire, l'opinion de Liebig prévalut : discutant les résultats que lui avait fournis une culture de tabac, M. Boussingault calcule que la récolte obtenue sur un hectare, renfermait 4.424 kilogrammes de carbone, représentant 8.266 mètres cubes de gaz acide carbonique ; « et puisque depuis la mise des plantes en terre jusqu'à la récolte, il s'écoule à peu près trois mois, il interviendrait en moyenne chaque jour environ 92 mètres cubes de gaz acide. »

L'éminent agronome ajoute de plus : « J'admets dans cette discussion que la totalité du carbone assimilé par les plantes a le gaz acide carbonique pour origine, parce que je connais pas une observation assez nette et assez complète pour établir que les matières organiques carbonées renfermées dans le sol, les acides bruns par exemple, leur fournissent directement du carbone. Je crois que le carbone de ces matières doit d'abord être brûlé, constituer du gaz acide carbonique avant d'entrer dans l'organisme végétal. La quantité considérable de gaz acide carbonique que décomposent chaque jour les plantes cultivées sur un hectare, est sans doute fournie par les engrais. Il a été prouvé, en effet, que l'atmosphère confinée d'une terre bien fumée contient jusqu'à 10 p. 100 en volume de ce gaz, alors que l'air extérieur qui, à la vérité, se renouvelle incessamment, n'en renferme pas au delà de 4 p. 10.000. Cette production de gaz acide carbonique dans un sol ameubli par la charrue est la conséquence de la combustion lente que subissent, sans interruption aucune, les matières organiques, les acides bruns et c'est là évidemment l'utilité incontestable du terreau et du fumier (1). »

M. Boussingault émet donc l'opinion que si la matière organique du fumier a une influence marquée sur le développement de la plante, c'est par l'acide carbonique qu'elle fournit ; bien qu'il ne donne aucun détail sur ce point, il paraît vraisemblable qu'il estime que l'acide carbonique du sol est charrié des racines aux cellules à chlorophylle où il est décomposé comme le serait de l'acide carbonique aérien pénétrant directement dans la feuille.

Cette manière de voir très plausible, émise à bien des reprises différentes, a

(1) *Chimie agricole*, t. IV, 1838.

été à diverses reprises soumise au contrôle de l'expérience. On doit notamment à M. Corenwinder un travail sur ce sujet dont nous résumons les principaux passages (1).

« On admet, depuis longtemps, une théorie relative aux racines des plantes qui n'a jamais été démontrée expérimentalement et qui cependant n'est contestée par personne. Je veux parler de la propriété qu'on leur attribue d'absorber dans le sol de l'acide carbonique..... Je pense, aujourd'hui que *les racines des plantes n'ont pas la propriété d'absorber dans le sol de l'acide carbonique*, ou au moins que la quantité qui peut pénétrer dans leurs tissus par cette voie ne doit pas être considérée comme une source importante de carbone. »

Et en effet, M. Corenwinder introduit dans une cloche à douille une racine de *Cuphea* ayant beaucoup de chevelu. Les extrémités de cette racine plongeaient dans de l'eau distillée. La tige traversait la douille et les feuilles flottaient dans l'air. On introduisit sous la cloche un volume d'acide carbonique exactement mesuré, on exposa au soleil pendant quatre heures, puis on fit passer le gaz de la cloche dans de l'eau de baryte, on en trouva 17^{cc},5 de plus qu'on n'en avait introduit.

Une racine de choux plongeant dans une dissolution légère d'acide carbonique, tandis que les feuilles étaient dans l'air, ajouta à cette eau une nouvelle proportion d'acide carbonique au lieu de lui en emprunter; on obtint encore les mêmes résultats avec une Eupatoire. Après avoir rapporté les expériences que nous résumons ici, M. Corenwinder ajoute : « Les recherches précédentes, il faut le reconnaître, ne sont pas favorables à la théorie qui tend à affirmer que les racines des plantes font dans le sol des inspirations abondantes d'acide carbonique. Si l'on ne veut pas en conclure que cette théorie est fautive, il faut admettre, au moins, qu'elle est mise en question aujourd'hui, et qu'elle n'a désormais aucun caractère expérimental. » En 1876, l'auteur de cet ouvrage publia, avec la collaboration de M. Vesque, dans les *Annales agronomiques*, un travail sur la respiration des racines, qui conduisit à des conditions semblables à celles de M. Corenwinder.

Diverses plantes furent enracinées dans de la pierre ponce contenue dans un flacon dont on pouvait à volonté composer l'atmosphère, les variations de pression et de température de cette atmosphère étaient indiquées par un manomètre et un thermomètre, et il était possible d'extraire les gaz renfermant cette atmosphère pour déterminer les modifications qu'elle subissait; on reconnut que les racines absorbaient de l'oxygène et émettaient de petites quantités d'acide carbonique (2).

Dans une note renfermant la relation de quelques expériences qui n'avaient pu trouver place dans le mémoire des *Annales*, on annonça en outre, qu'en enrichissant d'acide carbonique l'atmosphère des racines, il avait été impossible de reconnaître dans l'atmosphère des feuilles un dégagement d'oxygène qu'on fût en droit d'attribuer à la décomposition de l'acide carbonique du sol, saisi par les racines et transporté jusque dans les cellules à chlorophylle.

(1) *Ann. des sciences naturelles, Botan.*, 4^e série, t. IX, p. 63, 1868.

(2) *Ann. agron.*, t. II, p. 513.

Ces expériences sont donc dans le même sens que celles de M. Corenwinder, et il faut répéter avec lui que l'opinion que les matières organiques du sol sont utiles en fournissant à la plante de l'acide carbonique qui servira à sa nutrition, reste une hypothèse non démontrée.

L'influence de ces matières organiques est cependant si sensible qu'il importe de rechercher comment elles peuvent influer sur la végétation? C'est ce qu'essaya de trouver, en 1872, M. L. Grandeau (1), doyen à la Faculté des sciences de Nancy, qui publia sur ce sujet un mémoire intéressant. En étudiant des terres noires de Russie, particulièrement riches en matières organiques, il reconnut que, soit en traitant les terres successivement par l'acide chlorhydrique et par l'ammoniaque, ou directement par le carbonate d'ammoniaque, on pouvait en extraire une solution colorée renfermant, outre une matière ulmique, de l'acide phosphorique, de l'oxyde de fer, de la magnésie, de la chaux, de la silice maintenus en dissolution, en présence les uns des autres, par la matière organique.

« Reste à examiner, dit M. Grandeau, comment cette solution de phosphates, de silice, de chaux, etc., se comporte dans la nutrition des végétaux et l'influence qu'exerce leur présence ou leur absence dans des sols d'autre part identiques. J'ai entrepris à ce sujet des expériences directes dont j'aurai l'honneur de communiquer les résultats à l'Académie, dès qu'elles seront terminées. Je me bornerai aujourd'hui à faire connaître comment se comporte la solution noire extraite du sol dans un dialyseur. Dans le vase intérieur, j'ai placé une solution de matière noire donnant par la calcination 53 p. 100 du résidu minéral (rapporté au poids de la matière noire desséchée). Après trente-six heures, le liquide extérieur (eau distillée), qui était resté complètement incolore a été évaporé et le résidu analysé; ce dernier, qui ne contenait pas de matière charbonneuse était formé de phosphates de fer, de manganèse, de chaux, de magnésie, en un mot des matières de la solution noire du sol, moins les matières organiques. Le liquide du vase intérieur a été évaporé, le résidu charbonneux calciné n'a donné que 8 p. 100 de cendres, 85 p. 100 du poids primitif des éléments minéraux avaient donc traversé la membrane. Il me paraît résulter de là : 1° que les éléments minéraux en question (PhO^2 , Fe^2O^3 , CaO , MgO , etc.) sont à un état directement assimilable pour les végétaux, ou tout au moins, qu'ils peuvent être absorbés par leurs racines; 2° que la matière organique de l'humus n'est point absorbée et reste dans le sol.

Il résulte de l'ensemble des faits consignés dans mon mémoire : « 1° que les sols fertiles renferment les éléments nutritifs minéraux sous la forme où nous les offre le fumier de ferme, et notamment le purin; 2° que la fertilité du sol est étroitement liée à la richesse en éléments minéraux de la matière organique soluble dans l'ammoniaque qu'il renferme; 3° que les substances organiques sont, dans la nature, le véhicule des aliments minéraux; qu'elles les extraient du sol pour les présenter sous une forme immédiatement assimilable aux racines des végétaux. »

(1) Recherches sur le rôle des matières organiques du sol dans les phénomènes de la nutrition des végétaux. (*Comptes rendus des séances de l'Acad. des sciences*, t. LXXIV, p. 988.)

Cette expérience de M. Grandeau eut un certain retentissement, elle fut reproduite dans plusieurs cours de chimie agricole, et fixa l'opinion pendant quelques années. On admit, avec le savant doyen de la Faculté de Nancy, que la matière organique était un dissolvant de la matière minérale, que son influence était ainsi favorable, mais qu'elle était incapable de servir directement d'aliment, puisqu'elle n'était pas susceptible de traverser un dialyseur.

M. Pétermann, directeur de la station agronomique de Gembloux, a montré récemment que la conclusion que M. Grandeau avait tirée de ses expériences était inexacte. En effet, la matière organique du sol, soumise à l'action de l'ammoniaque se métamorphose sans doute par oxydation et devient dès lors incapable de traverser un dialyseur; mais il en est tout autrement pour la matière organique du sol étudiée avant toute métamorphose. M. Pétermann a eu l'idée ingénieuse d'appliquer sur des terres de diverses origines un dialyseur renfermant de l'eau distillée, puis d'examiner la composition du liquide dans lequel s'étaient diffusées les matières solubles du sol.

Il a obtenu les résultats suivants pour 100 grammes de terre fine soumis à la dialyse pendant cent jours.

Nature des terres.	Poids total de la matière dialysée.	Matière organique dialysée.
Sablonneuse.	0 ^{rs} ,076	0 ^{rs} ,038
Sabloschisteuse.	0 ,041	0 ,012
Calcaroschisteuse.	0 ,165	0 ,066
Sabloargileuse.	0 ,263	0 ,181
Argilosablonneuse.	0 ,031	0 ,025

Ces expériences ont été répétées avec plein succès par divers observateurs et sont de nature à ébranler la conviction que la matière organique du sol ne peut servir d'aliment à la plante.

Sans parler de l'influence si remarquable qu'exerce le fumier de ferme sur certaines cultures et notamment sur celle du maïs fourrage, sans appuyer sur le rendement moyen de 90.000 kilog. obtenu sous l'influence de 40.000 kilog. de fumier employé chaque année, tandis qu'à l'aide des engrais chimiques on ne pouvait obtenir que 65.000 kilog. de fourrage, je rappellerai quelques expériences de laboratoire dans lesquelles on ne peut faire intervenir l'influence qu'exerce le fumier comme réceptacle d'humidité.

M. Corenwinder a montré qu'une betterave cultivée dans le sable, enrichi de diverses matières salines, pesait au moment de la récolte 490 grammes, renfermant 60^{rs},07 de sucre, tandis qu'une racine appartenant à la même variété mais cultivée dans du terreau pesait 1^{rs},145 et avait élaboré 121^{rs},27 de sucre.

Il est vraisemblable que si la betterave cultivée dans le terreau a acquis un poids double de celui qu'a présenté la betterave dans le sable, c'est qu'elle a pu utiliser la matière organique du sol; car ainsi qu'il a été dit, on n'a jamais pu montrer que l'acide carbonique fourni aux racines eut une influence directe sur l'accroissement de la plante.

On se rappelle enfin qu'au Museum on a reconnu que des jeunes plantes, blé, lentilles ou haricots, enracinés dans une dissolution d'ulmate de chaux ont présenté des poids de matière sèche bien supérieurs à ceux qu'on a obtenus des individus de même âge, alimentés avec des dissolutions minérales.

.. Au reste, l'opinion généralement admise en France est loin d'être universellement adoptée en Allemagne, c'est ce qui ressort nettement des lignes suivantes que nous empruntons à M. J. Sachs :

« Il existe, dans le règne végétal, deux extrêmes, par rapport à la faculté de créer de la matière combustible; elle peut être produite aux dépens de l'acide carbonique, ou provenir de l'absorption des substances déjà organisées, qui seraient transformées et utilisées par la croissance; entre ces deux points, il y a probablement des intermédiaires. L'un des extrêmes est représenté par les plantes qui sont en état de tirer tout leur carbone de l'acide carbonique, même pendant les périodes de végétation les plus actives; l'autre, par les plantes sans chlorophylle, qui ne décomposent jamais d'acide carbonique et qui, par conséquent, tirent tout leur carbone de combinaisons organiques. Mais il n'est point contraire à la théorie de supposer que les plantes à chlorophylle qui décomposent l'acide carbonique absorbent, en même temps, des substances organisées et utilisent, pour la formation de leurs organes, le carbone provenant de ces deux sources (1). C'est ce que font, dans un certain sens, tous les germes qui se nourrissent aux dépens d'un endosperme; ils tirent d'abord des principes élaborés de ce tissu, qui est très distinct du leur, et peuvent ainsi développer leurs organes; mais dès que leurs feuilles se sont épanouies à la lumière, elles commencent à décomposer l'acide carbonique et les plantes s'accroissent par cette voie. Un parasite vit sur la plante qui le porte, comme le germe sur son endosperme; s'il n'a pas de cellules vertes, c'est de son support qu'il tire tous les composés carbonés dont il a besoin; mais, s'il possède des feuilles vertes, pourquoi ne pas supposer qu'il en utilise les propriétés, en même temps que par ses suçoirs il tire des principes élaborés de la plante qui le porte? Quelques expériences de Pitra semblent montrer que le gui forme lui-même presque toute sa substance organisée et ne tire guère de son support que les éléments inorganiques. On peut donc bien penser que les plantes non parasites à feuilles vertes, qui vivent dans un sol très riche, forment leur substance combustible, en partie en absorbant des matières organisées, en partie en décomposant l'acide carbonique. »

(1) Le fait que l'humus ne cède que très peu de substance organique à l'eau froide, ne prouve pas que les plantes ne puissent pas en absorber, pas plus qu'il ne faut conclure de là que l'extrait aqueux du sol contient très peu d'acide phosphorique et de potasse, que ces substances ne sont pas absorbées. Nous ne savons point si ce sont les sels de l'acide ulmique qui sont importants pour les plantes; un organisme qui se décompose, donne bien d'autres produits; nous ne savons pas quelle est la forme de ceux que la plante absorbe. (Note de M. Sachs.)

CHAPITRE III

ASSIMILATION DE L'AZOTE

Il est à peine besoin d'indiquer qu'un organe végétal quelconque, desséché, puis calciné avec de la chaux sodée dégage de l'ammoniaque qui décèle la présence de matières azotées.

Tandis que souvent la plus grande partie, et dans un certain nombre de cas, la totalité du carbone des plantes provient de l'atmosphère et que par suite le cultivateur n'a pas à intervenir pour assurer l'alimentation carbonée du végétal, l'azote au contraire vient sans doute exclusivement du sol, et un des plus grands soucis de l'agriculture moderne est de fournir à la plante la matière azotée nécessaire à son évolution.

Nous devons rechercher dans ce chapitre les formes sous lesquelles l'azote pénètre dans l'organisation végétale, nous discuterons successivement :

L'assimilation sous forme de nitrates ;

- | | | |
|---|---|----------------------------------|
| — | — | de sels ammoniacaux ; |
| — | — | de matières organiques azotées ; |
| — | — | d'azote libre. |

§ 27. — Assimilation de l'azote sous forme de nitrates.

Quelques observateurs, au XVII^e et au XVIII^e siècle, ont reconnu l'influence heureuse qu'exerce le salpêtre sur la végétation ; toutefois, au commencement de ce siècle on n'accordait guère qu'à l'ammoniaque la propriété de fournir aux végétaux l'azote nécessaire à la constitution de leurs tissus, et cette opinion ne fut abandonnée qu'au moment où l'on rechercha si l'azote de l'air intervient dans la végétation. M. Boussingault, M. G. Ville, S. Cloëz, presque simultanément attribuèrent alors aux nitrates, comme source d'azote des végétaux, une importance qui jusque-là avait été méconnue.

Une des expériences de M. Boussingault a été disposée avec une précision remarquable ; des helianthus ayant été semés dans un sol stérile et arrosés avec de l'eau exempte d'ammoniaque, fournirent les résultats suivants :

	Matières introduites dans le sol.	Poids des plantes desséchées.	Poids des plantes en defalquant la semence.	Rapport du poids de la plante à la semence.
N ^o 1.	Sans nitrates.	0 ^r ,507	0 ^r ,397	4,6
N ^o 2.	0 ^r ,02 de nitrates.	0 ,880	0 ,720	7,6
N ^o 3.	0 ,06 —	1 ,240	1 ,130	11,3
N ^o 4.	0 ,16 —	3 ,390	3 ,280	30,8

Dans une autre expérience, M. Boussingault a fait intervenir dans la végétation des helianthus, encore semés dans un sol stérile, non seulement un nitrate, mais en outre les matières minérales nécessaires au développement normal des végétaux, l'influence exercée par le nitrate est d'une netteté remarquable ; si on ne voit pas croître la récolte en raison du nitrate employé, comme dans l'expérience précédente, le poids de matière organique formée augmente dans une si forte proportion, quant aux éléments minéraux fournis s'ajoute l'acide azotique, que l'efficacité de cette forme de matière azotée devient évidente :

Matières introduites dans le sol.	Poids de la récolte sèche, la graine étant = 1.	Matière végétale élaborée.	Acide carbonique décomposé en 24 heures.	Acquis par les plantes en 86 jours de végétation.	
				Carbone.	Azote.
A. Le sol n'ayant rien reçu. .	3,6	gr. 0,285	c. c. 1,45	gr. 0,114	gr. 0,0023
B. Le sol ayant reçu : phosphate, cendres, nitrate de potasse	198,3	21,111	182,00	8,446	0,1666
C. Le sol ayant reçu : phosphate, cendres, bicarbonate de potasse.	4,6	0,291	3,42	0,156	0,0027

A ces expériences, qui ont porté sur des soleils, nous pouvons ajouter celles qui ont été exécutées au Muséum sur des betteraves ; semées au nombre de trois, dans de grands tonneaux renfermant un sol artificiel, formé de sable, de calcaire et d'argile, elles ont donné un poids de 1.777 grammes quand elles ont reçu de l'azotate de soude, du superphosphate de chaux et du chlorure de potassium, de 225 grammes quand elles n'ont eu que du superphosphate et du chlorure de potassium, et de 111 grammes quand elles n'ont reçu aucun engrais (1).

Il est à remarquer, en outre, que l'expérience agricole s'est nettement prononcée sur l'influence très marquée qu'exercent les nitrates, et le commerce du nitrate de soude prend chaque jour plus d'extension ; dans les terres qui ne craignent pas la sécheresse c'est un engrais précieux ; sur le sol de Grignon, qui est très perméable, employé seul il ne donne que des résultats médiocres, mais, au contraire, il fournit d'excellentes récoltes quand il est associé au fumier de ferme.

On en jugera par les chiffres suivants :

	Hectolitres d'avoine récoltés à l'hectare.			
	1878	1879	1880	1881
Sans engrais.	51,1	27,9	53,7	31,0
5.000 k. de fumier de ferme, 200 k. azotate de soude.	56,2	66,3	82,5	53,0

(1) *Ann. agron.*, t. I, p. 160.

La nature de la base à laquelle est uni l'acide azotique paraît en général indifférente; on a essayé, comparativement au Muséum, l'emploi du salpêtre et celui de l'azotate de soude sur la culture des pommes de terre et on a obtenu exactement à l'hectare le même poids de tubercules; il est naturel qu'il en soit ainsi, les sels existant dans le sol, réagissent sur les engrais salins ajoutés, et comme la potasse très habituellement ne fait pas défaut, l'azotate de soude se métamorphose en azotate de potasse qui seul est assimilé.

Quand les fumures ont été abondantes, la formation des nitrates dans le sol peut être assez énergique pour que les plantes ne transforment pas toute la quantité assimilée et on rencontre parfois du salpêtre en quantités considérables dans leurs tissus. La calcination des vinasses de betteraves donne souvent des explosions dues à la réaction violente des nitrates sur la matière organique. M. Peligot, M. Barral, M. Ladureau, ont de plus attiré l'attention sur les quantités considérables de salpêtre qu'on rencontre dans les racines qui sont employées communément à la nourriture humaine ou à celle des animaux; les graminées et particulièrement le sorgho se chargent également de quantités notables de nitrates dont l'influence fâcheuse s'est fait souvent sentir sur les animaux nourris de foin de prairies trop abondamment fumées avec de l'azotate de soude.

Il est probable que c'est à la présence d'une quantité exagérée de nitrate contenue dans le sorgho qu'il faut reporter les accidents qui sont survenus après la consommation de cette plante et ont fait supposer, que dans certaines circonstances, elle était vénéneuse.

Il est très important pour les analyses (1) de se rappeler que les plantes four-

(1) M. Fausto Sestini (*Ann. agron.*, t. IV, p. 630), M. Church (*Ann. agron.*, t. IV, p. 631), ont appelé l'attention sur le dosage des matières albuminoïdes mélangées à des nitrates, et M. Pellet a donné une méthode complète d'analyse dont nous reproduisons les points principaux (*Ann. Agron.*, t. VI, p. 120) :

« On rencontre, dans les végétaux, l'azote sous quatre formes différentes : azote ammoniacal, nitrique, albuminoïdal, alcaloïdal. — L'azote ammoniacal est séparé, en traitant la matière sèche, par la magnésie à l'ébullition. Pour doser l'azote nitrique, on lave la matière sèche à l'alcool à 80°; on chasse cet alcool et l'on décompose les nitrates par l'action de l'acide sulfurique et du bioxyde de manganèse, on sépare ainsi l'acide azotique par distillation et on le dose soit par l'indigo, soit en achevant par le permanganate de potasse la transformation en perchlorure d'une solution de perchlorure de fer titrée, sur laquelle on fait agir l'acide azotique à rechercher.

« On dose l'azote albuminoïdal en traitant 5 grammes de matière sèche par 100 c. c. d'eau bouillante et 1/4 de cent. cube d'acide acétique, on coagule ainsi les albuminoïdes tandis qu'on dissout l'asparagine, la leucine, etc.; on filtre, on dessèche et l'on pèse, de façon à pouvoir ramener le poids sur lequel on va opérer à la matière sèche primitive. La matière lavée et desséchée donne son azote par la chaux sodée; en procédant enfin à un dosage d'azote total sur la matière sèche primitive, on a un nombre d'où on retranche l'azote nitrique, ammoniacal et albuminoïdal pour avoir l'azote correspondant aux amides qui se rencontrent souvent dans les végétaux. »

Le dosage de l'azote total par la chaux sodée présente toutefois cette incertitude qu'il peut rester quelques doutes sur la transformation complète des nitrates en ammoniaque, aussi est-il préférable de doser l'azote total à l'état gazeux; au Muséum, nous exécutons ce dosage à l'aide de la trompe à mercure; comme l'indique M. Schlœsing, elle permet de faire un vide complet dans le tube, et en décomposant un peu de bicarbonate de soude au commencement de l'opération, puis en faisant le vide de nouveau, on arrive à ne pas laisser une trace d'azote dans le tube. Nous nous trouvons bien de lier le tube de verre à la trompe au moyen d'un tube de plomb, qui est luté au verre avec de la cire.

ragères renferment parfois des proportions notables de nitrates qui peuvent leur faire commettre de grosses erreurs de dosage.

On évalue, en effet, les matières azotées contenues dans les fourrages destinés aux animaux par un dosage d'azote exécuté à l'aide de la chaux sodée; or les nitrates mélangées à des matières organiques donnent de l'ammoniaque qui s'ajoute à celle qui provient des matières albuminoïdes, et l'on attribuerait à ces substances un poids tout à fait inexact si on les calculait d'après la quantité d'ammoniaque dégagée.

§ 28. — Assimilation de l'azote sous forme de sels ammoniacaux.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, il y a quarante ans on croyait que l'ammoniaque était la seule forme sous laquelle l'azote pénétrait dans les plantes. « Il y a donc, dit Liebig, aucune raison pour attribuer l'augmentation de l'azote dans les graines, les feuilles et les tiges à une autre source que l'ammoniaque... » (1). Aujourd'hui quelques agronomes professent une opinion diamétralement opposée et ne seraient pas éloignés de l'idée que la seule source d'azote des plantes fut l'acide azotique; l'ammoniaque, dont on ne saurait nier l'efficacité, comme engrais n'étant, d'après eux, assimilée, qu'après sa transformation dans le sol en acide azotique.

Cette opinion nous paraît exagérée si, en effet, la nitrification s'opère facilement dans le sol, il est aisé de montrer, comme l'ont fait MM. Lawes et Gilbert, que la quantité de nitrates contenue dans les eaux de drainage croît en proportion des sels ammoniacaux ajoutés comme engrais, etsi par suite on pouvait déduire de là que les sels ammoniacaux ne servent que comme source d'acide azotique; il est certains cas dans lesquels cette nitrification n'a pu se produire d'une façon complète et dans laquelle cependant les sels ammoniacaux ont été efficaces.

Dans les expériences exécutées au Muséum dans une terre artificielle, les betteraves qui n'ont reçu que de l'eau ont pesé 111 grammes tandis qu'elles ont présenté un poids de 1.552 grammes quand elles ont reçu du superphosphate de chaux, du chlorure de potassium et du sulfate d'ammoniaque; or il est peu probable que dans ces conditions la transformation en nitrates ait pu avoir lieu, puisque vraisemblablement dans ces terres artificielles le ferment nitrique faisait défaut.

Au reste, on peut démontrer dans les plantes même la présence d'ammoniaque toute formée, ce qui semble un argument solide de l'assimilation directe de cette base.

Quoiqu'il en soit, il n'est pas douteux que l'emploi des sels ammoniacaux ne soit dans beaucoup de cas moins favorable que celui des nitrates, surtout lorsque sur une terre légère et un peu calcaire comme celle de Grignon la dose employée excède la moyenne. Il est souvent arrivé qu'une parcelle qui avait reçue 1.200 kilog. de sulfate d'ammoniaque donnait des récoltes de pommes de terre ou de betteraves plus faibles que les parcelles restées sans engrais.

(1) *Chimie appliquée à l'agriculture*, 1844, p. 312.

Dans les terres argileuses, au contraire, l'emploi des sels ammoniacaux comme engrais paraît être aussi avantageux que celui des nitrates.

§ 29. — Assimilation des matières azotées autres que les sels ammoniacaux et les nitrates.

Nous avons déjà indiqué dans un paragraphe précédent les raisons qui nous portent à admettre que les matières organiques complexes contenues dans le sol sont susceptibles d'être absorbées directement par les racines.

Aux expériences exécutées au Muséum sur l'alimentation de jeunes végétaux à l'aide de l'ulmate de chaux qui renferme toujours une certaine quantité d'azote combiné, viennent s'ajouter les observations de la grande culture relatives aux légumineuses.

Tous les cultivateurs savent qu'on ne peut pas maintenir les légumineuses sur le même sol pendant un temps prolongé; à Rothamsted, tandis que la culture du blé a pu être continuée sur les mêmes pièces pendant quarante ans, on n'a pu conserver le trèfle que durant quelques années; dans une très petite plate-bande de terre de jardin seulement, il a pu être maintenu, durant plus de vingt ans, mais actuellement il commence à faiblir.

En outre, il suffit habituellement d'ajouter à un sol fatigué des engrais appropriés pour le voir reprendre sa vigueur première; il n'en est pas ainsi pour les légumineuses, et au lieu d'enrichir le sol par des fumures, tous les cultivateurs préfèrent le laisser reposer et attendre quinze ou vingt ans pour rétablir une luzerne à la place où elle a d'abord séjourné. Ce sont évidemment des arguments en faveur de l'opinion d'une absorption directe des matières organiques azotées qui ont besoin d'un temps assez long pour se produire dans le sol.

L'étude attentive qui a été faite de l'influence de divers engrais azotés sur la nature des espèces végétales qui composent la prairie naturelle, a été exécutée par MM. Lawes et Gilbert, il y a quelques années (1).

Or, ils arrivent à cette conclusion fort importante que l'emploi des engrais azotés, sels ammoniacaux ou nitrates, diminue la quantité des légumineuses en favorisant au contraire la croissance des graminées; on ne saurait attribuer cette différence d'action à la pénétration incomplète dans le sous-sol de ces éléments qui profiteraient davantage aux racines traçantes des graminées qu'aux racines pivotantes des légumineuses, car les azotates filtrent facilement et atteignent les profondeurs du sous-sol, ce qui les rend particulièrement précieux dans le cas d'une sécheresse prolongée (2), et il en faut conclure que les sels azotés ne sont pas l'aliment de préférence des légumineuses.

En outre la matière organique du fumier n'exerce pas davantage une influence heureuse sur leur abondance, elle favorise encore le développement des graminées; quand au contraire les fumures sont déjà anciennes, leur influence sur les légumineuses est très remarquable.

(1) *Ann. agron.*, t. VI, p. 608.

(2) *Ann. agron.*, t. I, p. 231 et 551. Influence de la sécheresse de 1870 sur les récoltes de Rothamsted.

En 1879 on a ensemencé en sainfoin des parcelles qui avaient porté, de 1875 à 1877, une culture continue de betteraves remplacée en 1878 par du maïs fourrage. Les parcelles avaient reçu pour soutenir la végétation des racines et du maïs des engrais variés; or il s'est trouvé que la récolte a été bien supérieure sur les sols qui avaient eu du fumier que sur ceux qui, les années précédentes, avaient été amendés avec des engrais chimiques, surtout lorsque ce fumier avait été enterré, et que par suite les matières carbonées abondaient dans le sol; on en peut juger par les chiffres suivants :

Culture du sainfoin.

Fourrage sec obtenu sous l'influence de divers engrais distribués les années précédentes. Moyenne des trois récoltes 1879, 1880, 1881.

Fumier enterré.	8.269 kilogr.
Fumier en couverture.	5.931
Azotate de soude.	6 269
Sulfate d'ammoniaque.	5.109
Sans engrais.	5.860

En outre à diverses reprises on a constaté une influence marquée des engrais de potasse; ainsi en 1880, les parcelles au fumier en couverture ont donné un produit égal à celui des parcelles au fumier enterré, quand elles ont été amendées avec des engrais de potasse.

Cette influence des engrais minéraux a été particulièrement mise en relief à Rothamsted dans une étude remarquable sur les prairies naturelles; en employant un mélange de sulfate de potasse, de soude et de magnésie, le premier en excès, et de superphosphates, MM. Lawes et Gilbert ont constaté que les légumineuses avaient considérablement augmenté; si en effet on fait l'analyse botanique des parcelles ainsi traitées, et qu'on compare le poids des légumineuses à celle des graminées et à celle des autres familles, qui se sont développées sur la parcelle sans engrais, on arrive aux résultats suivants :

	Kilogrammes de foin récoltés à l'hectare.		
	Graminées.	Légumineuses.	Autres familles.
Sans engrais.	1.788	204	679
Engrais minéraux.	2.782	878	774

Sous l'influence des engrais minéraux, le poids des légumineuses a quadruplé, tandis que celui des graminées n'a pas doublé.

Quelle interprétation donner de ces résultats ?

Dira-t-on que la présence de la potasse à favorisé la nitrification et que c'est là la cause du développement considérable des légumineuses ? Cette opinion ne saurait se soutenir puisque l'addition directe des nitrates provoque au contraire un développement exagéré de graminées, et il semble que l'opinion de Mulder, bien qu'abandonnée par presque tous les agronomes, mérite une sérieuse attention.

D'après lui, les matières organiques carbonées qui se forment dans la terre arable, par la décomposition lente des détritux végétaux, éprouve une série de

métamorphoses avant d'être transformées en acide carbonique ou en nitrates. Il suppose que parmi ces composés complexes quelques-uns sont acides, insolubles dans l'eau, mais solubles dans l'eau chargée d'alcalis, et que ces acides organiques seraient directement assimilés par certaines espèces et notamment par les légumineuses dont elles formeraient la nourriture préférée.

Rien ne démontre, en effet, que tous les végétaux à chlorophylle vivent exactement de la même façon et n'aient pas une tendance à choisir dans le sol certaines matières organiques au détriment de certaines autres comme ils choisissent des matières minérales; l'analyse des cendres démontre clairement que si les graminées prennent des quantités notables de silice, cette matière n'est assimilée qu'en très faible proportion par les légumineuses; le choix est ici évident et il est clair qu'il n'est nullement impossible qu'il s'étende aux matières organiques. Nous savons, en outre, que les végétaux microscopiques qui vivent dans les infusions, ne sont nullement indifférents à leur nature et qu'en ensemençant avec un mélange de germes, telle dissolution ou telle autre, on verra se développer tel organisme ou tel autre suivant la nature de la matière organique dans lequel aura lieu l'ensemencement.

Il paraît donc probable, bien que cela ne soit pas encore démontré d'une façon complète, que certaines espèces végétales prennent leur azote, sous forme de matière organique complexe.

Des expériences déjà anciennes dues à M. G. Ville, viennent au reste appuyer dans une certaine mesure cette manière de voir. Le savant professeur du Muséum a soumis des plantes à l'action de diverses matières azotées bien définies, de façon à comparer l'action de chacune d'elles: on a employé du nitrate de potasse, de l'urée, de l'acide urique, de l'urate de chaux, du sel ammoniac et de l'oxalate d'ammoniaque renfermant des quantités d'azote égales, et les récoltes ont été assez différentes. La méthylamine et l'éthylamine ont fourni des résultats analogues à ceux donnés par l'ammoniaque elle-même, l'urée a produit des effets supérieurs à ceux du carbonate d'ammoniaque, mais on n'a rien obtenu de l'éthylurée.

§ 30. — Intervention de l'azote libre dans la végétation.

M. Reiset, puis MM. Lawes et Gilbert ont reconnu que des matières organiques azotées exposées à l'action de l'air, se décomposent avec dégagement d'azote libre; l'analyse des eaux de drainage, celle des rivières, des fleuves, accuse des proportions sensibles d'acide azotique qui viennent se déverser dans l'Océan, il est naturel qu'il en soit ainsi: toutes les matières organiques qui existent à la surface du globe sont soumises à une oxydation énergique, qui après diverses transformations amènent l'azote à l'état de nitrates, ceux-ci n'étant pas retenus par la terre arable finissent par disparaître dans les eaux souterraines, qui les conduisent à la mer, et il devient évident qu'il existe des causes nombreuses de déperdition au profit de l'atmosphère ou de l'Océan, d'une fraction importante des quantités d'azote combiné qui existent à la surface du sol.

Comme jusqu'à présent, la chimie est impuissante à faire entrer l'azote en

en combinaison, que nous profitons des composés azotés qui existent sur le globe, sans savoir les renouveler, il est du plus haut intérêt de rechercher dans quelles conditions les végétaux peuvent bénéficier soit de l'azote libre, soit des combinaisons que les eaux météoriques leur apportent.

§ 31. — Assimilation de l'azote libre par les végétaux.

Cette question a été l'objet de discussions approfondies; elle a été abordée d'abord par M. Boussingault qui, dans ses premières recherches datant de 1838, avait cru observer cette fixation d'azote; nous résumons ici les résultats qu'il avait obtenus, par une méthode dont le principe est facile à saisir: on analyse un certain nombre de graines semblables à celles qui seront mises en expériences; on prépare un sol stérile absolument dépouillé d'azote combiné, on sème les graines, on les arrose d'eau distillée exempte d'ammoniaque, et quand on met fin à l'expérience on cherche si les plantes obtenues renferment plus d'azote que n'en renfermaient les graines mises en expériences.

Résultat des premières expériences de M. Boussingault pour déterminer si les plantes assimilent l'azote libre de l'atmosphère.

ESPÈCES EN EXPÉRIENCES.	AZOTE EN GRAMMES.			AZOTE dans les produits p. 1,00 introduit.
	Dans les graines, les plantes ou les engrais.	Dans les produits.	Gain ou perte.	
1838. <i>Sol calciné, eau distillée, air pur dans une serre fermée.</i>				
Trèfle.	0,1100	0,1200	+ 0,0100	1,09
Trèfle.	0,1140	0,1560	+ 0,0420	1,35
Blé.	0,0430	0,4000	— 0,0030	0,93
Blé.	0,0570	0,0600	+ 0,0030	1,05
1839. <i>Mêmes conditions qu'en 1838.</i>				
Pois.	0,0460	0,1010	+ 0,0550	2,20
Trèfle (plants).	0,0330	0,0560	+ 0,0230	1,70
Avoine.	0,0390	0,0330	— 0,0060	0,90

M. Boussingault indiquait dans ces expériences que les plantes avaient emprunté de l'azote à l'atmosphère, mais il se gardait bien d'affirmer que le gain était dû à la fixation de l'azote libre de l'atmosphère; on ignorait alors les quantités d'ammoniaque contenues dans l'air, et on pouvait penser que cette ammoniaque atmosphérique était l'origine du gain constaté.

Quelques années plus tard, en 1830, M. G. Ville commença la longue série de recherches dans lesquelles il s'efforça de montrer que les plantes sont capables de s'emparer de l'azote libre de l'atmosphère; l'ensemble des chiffres trouvés est résumé dans le tableau ci-joint :

Résultats des expériences de M. G. Ville pour déterminer si les plantes assimilent l'azote libre.

ESPÈCES EN EXPÉRIENCES.	AZOTE EN GRAMMES.			AZOTE dans les produits pour 1 d'azote fourni.
	Dans les graines, dans l'air et dans les engrais.	Dans les produits.	Gain ou perte.	
1850. Courant d'air non purifié renfermant 0^r,10 azote sous forme d'ammoniaque.				
Cresson.	0,0260	0,1470	0,1210	5,6
Grands lupins.	0,0640	0,0640	0,0000	1,0
Petits lupins.	0,0640	0,0470	0,0170	0,7
	0,1550	0,2580	0,1030	1,7
1850. Courant d'air non purifié apportant 0^r,0017 d'azote sous forme d'ammoniaque ¹.				
Plants de colza.	0,0260	1,0700	1,0440	41,1
Blé.	0,0160	0,0310	0,0150	1,9
Riz.	0,0130	0,0370	0,0240	2,8
Mais.	0,0290	0,1280	0,0990	4,4
	0,0837	1,2660	1,1803	14,8
1851. Courant d'air pur ¹.				
Soleil.	0,0050	0,1570	0,1520	34,4
Tabac.	0,0040	0,1750	0,1710	43,7
Tabac.	0,0040	0,1620	0,1580	40,5
1852. Courant d'air pur ¹.				
Colza d'automne.	0,0480	0,2260	0,1780	4,7
Blé de printemps.	0,0290	0,0650	0,0360	2,2
Soleil.	0,0160	0,4080	0,3920	25,5
Colza d'été.	0,1730	0,5960	0,4220	3,4
Colza d'été.	0,1050	0,7010	0,5960	6,7
1854. Courant d'air pur, sous la surveillance d'une commission.				
Cresson.	0,0099	0,0097	-0,0002	1,0
—	0,0038	0,0330	0,0492	13,9
—	0,0039	0,0110	0,0071	2,8
1854. Courant d'air purifié, sous la surveillance d'une commission ².				
Cresson.	0,0063	0,0330	0,0287	5,6
1855 et 1856. Dans l'air pur avec 0,5 de salpêtre renfermant 0,069 azote ³.				
Colza.	0,0700	0,0700 ^b	0,0000	1,0
—	0,0700	0,0660 ^b	-0,0040	0,9
—	0,0700	0,0680 ^b	-0,0020	1,0
1855 et 1856. A l'air libre avec 1 gramme salpêtre renfermant 0,138 azote ¹.				
Colza.	0,1400	0,1970 ^b	0,0570	1,41
—	0,1400	0,3740 ^b	0,2340	2,67
—	0,1400	0,2160 ^b	0,0760	1,54
—	0,4400	0,2500 ^b	0,1100	1,79
1856. A l'air libre avec 0,790 salpêtre renfermant 0,110 azote.				
Blé.	0,1260	0,2180 ^b	0,0920	1,7
Blé.	0,1260	0,2240 ^b	0,0980	1,8
1855. A l'air libre avec 1,72 salpêtre renfermant 0,238 azote.				
Blé.	0,2530	0,3080 ^b	0,0490	1,2
1856. A l'air libre avec 1,765 de salpêtre renfermant 0,244 azote.				
Blé.	0,2650	0,2170 ^b	-0,0480	0,8
Blé.	0,2650	0,3500 ^b	+0,0850	1,3

1. Recherches expérimentales sur la végétation, par M. G. Ville, Paris, 1853. — 2. Comptes rendus, 1855. — 3. Recherches expérimentales sur la végétation, 1857. — 4. Dans les plantes seulement.

Dans les premières expériences qu'il a publiées en 1850 et 1852, M. G. Ville avait trouvé que la fixation de l'azote par les plantes était considérable, même lorsqu'on n'avait donné aucun engrais ; ces résultats furent contrôlés par une commission et bien que les chiffres constatés aient été favorables à l'opinion du savant professeur du Muséum, S. Cloëz, qui avait été chargé de surveiller les essais, n'hésitait pas à déclarer publiquement qu'il ne croyait pas que les plantes pussent assimiler l'azote libre des végétaux (1).

Dans les expériences plus récentes les gains d'azote constatés sont plus faibles, M. G. Ville attache toutefois une grande importance aux différences constatées entre la végétation soutenue par une faible quantité de nitrates ou par une proportion plus forte ; tandis qu'en donnant au colza 0^m50 de salpêtre on a obtenu dans la plante que des quantités d'azote égales à celles qui existaient à la fois dans la graine et dans l'engrais, on a trouvé un gain sensible quand la proportion de salpêtre est montée à 1 gramme.

M. Boussingault reprit également ce sujet et se livra à une longue série d'expériences que nous résumons dans le tableau ci-joint. En 1851, 1852 et 1853, les expériences eurent lieu dans des atmosphères confinées où les plantes recevaient l'acide carbonique pur nécessaire à leur alimentation aérienne ; en 1856, les plantes vécutent dans un courant d'air pur, additionné d'acide carbonique ; en outre pendant cette longue série d'épreuves, quelques expériences furent faites à l'air libre, les plantes étant seulement soustraites à l'action de la pluie ; enfin en 1838 au lieu de maintenir les plantes dans un sol sans engrais azoté, on donna de l'azotate de potasse, et les résultats furent toujours dans le même sens ; dans toutes les expériences on constata des pertes sensibles ou des gains atteignant à peine quelques milligrammes, et seulement quand les plantes pouvaient glaner dans l'air les traces d'ammoniaque qui s'y trouvent.

Après vingt ans d'essais variés et laborieux sur ce sujet, M. Boussingault arrive à cette conclusion : que les plantes n'ont pas le pouvoir d'assimiler l'azote libre de l'atmosphère, et, dans une lettre adressée aux agronomes de Rothamsted, après avoir discuté les différents aspects de cette question, il ajoute :

« S'il y a un fait parfaitement démontré en physiologie, c'est celui de la non assimilation de l'azote libre par les plantes ; et je puis ajouter, par les plantes appartenant aux ordres inférieurs, tels que les mycodermes et les champignons. »

(1) « Les expériences authentiques faites en 1854, au Muséum, ont été favorables à l'assimilation de l'azote libre ; mais à cette époque, il est bon de le rappeler, il n'était pas question des nitrates comme source directe de l'azote des plantes, et comme nous avons la conviction qu'il a dû se former une petite quantité de nitrates dans les expériences auxquelles nous avons assisté, nous attribuons à ces sels l'excès d'azote trouvé dans la récolte. *Leçons professées devant la Société chimique de Paris en 1861*, p. 164. »

Résultats des expériences de M. Boussingault pour déterminer si les plantes assimilent l'azote libre de l'atmosphère.

ESPÈCES EN EXPÉRIENCES.	AZOTE EN GRAMMES.			AZOTE dans les produits p. 1,00 introduit.
	Dans les graines, les plantes ou les engrais.	Dans les produits.	Gain ou perte.	
1851 et 1852. Pierre ponce lavée et calcinée avec des cendres, de l'eau distillée¹, atmosphère limitée, sous abri vitré avec acide carbonique.				
Haricot 1851.	0,0349	0,0340	— 0,0009	0,97
Avoine 1851.	0,0078	0,0067	— 0,0011	0,86
Haricot 1852.	0,0210	0,0189	— 0,0021	0,90
Haricot 1852.	0,0245	0,0226	— 0,0019	0,92
Avoine 1852.	0,0031	0,0030	— 0,0001	0,97
1853. Pierre ponce préparée ou brique calcinée, avec cendres, eau distillée, atmosphère limitée sous une cloche de verre avec acide carbonique².				
Lupin blanc.	0,0480	0,0483	+ 0,0003	1,01
—	0,1282	0,1246	— 0,0036	0,97
—	0,0349	0,0339	— 0,0010	0,97
—	0,0200	0,0204	+ 0,0004	1,02
—	0,0399	0,0397	— 0,0002	1,00
Haricot nain.	0,0354	0,0360	— 0,0006	1,02
—	0,0298	0,0277	— 0,0021	0,93
Cresson.	0,0013	0,0013	— 0,0000	1,00
Lupin blanc.	0,1827	0,1697	— 0,0130	0,93
1856. Ponce préparée avec cendres, eau distillée, courant d'air purifié, acide carbonique dans une cage de verre³.				
Lupin.	0,0196	0,0187	— 0,0009	0,95
Haricot nain.	0,0322	0,0125	+ 0,0003	1,01
—	0,0335	0,0341	+ 0,0006	1,02
—	0,0339	0,0329	— 0,0010	0,97
—	0,0676	0,0666	— 0,0010	0,99
Lupin.	0,0180	0,0334	— 0,0334	0,94
—	0,0175			
Cresson.	0,0046	0,0052	+ 0,0006	1,13
1851, 52, 53, 54. Sol préparé ou ponce avec cendres, eau distillée, air libre, sous un abri vitré⁴.				
Haricot nain 1851.	0,0349	0,0380	+ 0,0031	1,09
Haricot 1852.	0,0213	0,0238	+ 0,0025	1,12
Haricot 1853.	0,0293	0,0270	— 0,0023	0,92
Haricot nain 1854.	0,0318	0,0350	+ 0,0032	1,10
Lupin blanc 1853.	0,0214	0,0256	+ 0,0042	1,20
Lupin 1854.	0,0199	0,0229	+ 0,0030	1,15
Avoine 1852.	0,0367	0,0387	+ 0,0020	1,05
Blé 1853.	0,0031	0,0041	+ 0,0010	1,32
Cresson.	0,0064	0,0075	+ 0,0011	1,17
	0,0259	0,0272	+ 0,0013	1,05
1858. Nitrate de potasse comme engrais⁵.				
Helianthus.	0,0144 ⁵	0,0130	— 0,0014	0,90
	0,0255 ⁵	0,0245	— 0,0010	0,66

1. Ann. chim. et phys., 3^e série, t. XLI, 1855. — 2. Ann. chim. et phys., 3^e série, t. XLIII, 1855. — 3. Ann. chim. et phys., 3^e série, t. XLIII, 1855. — 4. Comptes rendus, t. XLVII, 1858. — 5. Azote dans la graine et le nitrate.

M. Boussingault arrive donc à une opinion diamétralement opposée à celle de M. G. Ville, sans cependant réussir à le convaincre. M. Ville n'a jamais accepté les conclusions de son adversaire et s'est efforcé de les combattre non seulement à l'aide de ses propres expériences, mais encore en tirant de celles de M. Boussingault des arguments favorables à sa thèse ; il intitule une des parties de son mémoire sur le rôle des nitrates dans l'économie des plantes (1) : « Comment la nature des produits qui se forment pendant la décomposition des fumiers prouve que les plantes absorbent l'azote gazeux de l'atmosphère. » L'auteur, après avoir rappelé que M. Reiset a montré que le fumier exposé à l'action de l'air peut perdre de l'azote libre, que MM. Lawes et Gilbert ont reconnu également que des graines en décomposition abandonnent à l'état libre une partie de l'azote de leurs matières albuminoïdes, discute l'expérience suivante due à M. Boussingault. Trois graines de lupin semées dans du sable calciné reçurent comme engrais six graines de lupin blanc privées de leur faculté germinative par leur immersion dans l'eau bouillante. Dans ces conditions, les lupins poussèrent beaucoup mieux que dans le sable calciné pur ; la récolte accusa un gain considérable ; elle renfermait plus d'azote que la semence dont elle provenait ; mais tout compte fait, l'engrais se trouva avoir perdu un peu plus d'azote que les plantes n'en avaient gagné. S'il était démontré que tout l'azote provenant des lupins en voie de décomposition a été émis sous forme d'ammoniac, la conclusion que M. Boussingault tire de son expérience, à savoir qu'il n'y a pas eu d'azote gazeux absorbé serait inattaquable ; mais comme d'après les travaux cités plus haut et d'après les expériences même de M. G. Ville, une partie importante de l'azote contenue dans les lupins servant d'engrais a dû se dégager à l'état d'azote libre, qu'enfin la quantité d'azote dégagée à l'état d'ammoniac est bien inférieure à celle qui a été fixée par la plante, il faut, d'après M. G. Ville, en conclure que cet azote a été absorbé à l'état gazeux.

Cette conclusion n'est que spéculative, rien ne démontre, en effet, que la décomposition des graines donne constamment la même quantité d'azote gazeux ; dans l'expérience de M. Boussingault, les graines vivantes et mortes renfermaient 0^{gr},1827 d'azote, les plantes récoltées en contenaient 0^{gr},1165 et le sol 0^{gr},0332 ; la somme de ces deux quantités est 0^{gr},1697, inférieure de 0^{gr},0130 à la quantité introduite ; est il certain que les graines mortes ont dégagé à l'état gazeux plus de 8 p. 100 de leur azote, évidemment non, le taux d'azote dégagé variant d'une expérience à l'autre.

M. G. Ville a notamment appuyé à diverses reprises sur l'influence qu'exerce sur l'assimilation de l'azote gazeux de l'atmosphère par les plantes l'introduction dans le sol d'une dose un peu notable de nitrate, un gramme par exemple, affirmant que dans ces conditions les plantes se développaient vigoureusement et devenaient capables d'utiliser l'azote atmosphérique.

La question exigeait donc de nouvelles études auxquelles se livrèrent les savants agronomes de Rothamsted, elles furent commencées en 1857, et un jeune chimiste américain, feu le D^r Pugh, du Collège agricole de l'État de Pensylvanie consacra de deux à trois ans à ces recherches exécutées à

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 1837, t. XLIX, p. 185.

Rothamsted. Les conditions des expériences et les résultats obtenus ont été publiés dans les *Mémoires des philosophical Transactions* pour 1859 et dans le *Journal of the Chemical Society* en 1863; nous avons résumé ces résultats dans le tableau ci-joint :

Résultats des expériences exécutées à Rothamsted pour déterminer si les plantes assimilent l'azote libre.

		AZOTE EN GRAMMES			AZOTE dans les produits p. 1,00 introduit.	
		dans la graine et dans l'engrais.	dans les plantes les vases et le sol.	gain ou perte.		
<i>Sans autre azote que celui de la graine.</i>						
Graminées.	1857	Blé.	0,0080	0,0072	- 0,0008	0,90
		Orge.	0,0056	0,0072	+ 0,0016	1,11
		Orge.	0,0056	0,0082	+ 0,0026	1,46
	1858	Blé.	0,0678	0,0081	+ 0,0003	1,04
		Orge.	0,0057	0,0058	+ 0,0001	1,02
		Avoine.	0,0063	0,0056	- 0,0007	0,89
Légumineuses.	1858	Blé.	0,0078	0,0078	- 0,0000	1,00
		Avoine.	0,0064	0,0063	- 0,0001	0,98
Autres familles.	1857	Fèves.	0,0796	0,0791	- 0,0005	0,99
		Fèves.	0,0750	0,0757	+ 0,0007	1,01
Autres familles.	1858	Pois.	0,0188	0,0167	- 0,0021	0,89
		Sarrasin.	0,0200	0,0182	- 0,0018	0,91
<i>Avec azote combiné introduit en excès sur celui de la graine.</i>						
Graminées.	1857	Blé.	0,0329	0,0383	+ 0,0054	1,16
		Blé.	0,0329	0,0331	+ 0,0002	1,01
		Orge.	0,0326	0,0328	+ 0,0002	1,01
		Orge.	0,0268	0,0337	+ 0,0069	1,25
		Blé.	0,0548	0,0536	- 0,0012	0,98
	1858	Orge.	0,0496	0,0464	- 0,0032	0,94
		Avoine.	0,0312	0,0216	- 0,0096	0,69
		Blé.	0,0268	0,0274	+ 0,0006	1,02
		Orge.	0,0257	0,0242	- 0,0015	0,94
		Avoine.	0,0260	0,0198	- 0,0062	0,76
Légumineuses.	1858	Pois.	0,0227	0,0211	- 0,0016	0,93
		Trèfle.	0,0712	0,0665	- 0,0047	0,93
Autres familles.	1858	Fèves.	0,0711	0,0655	- 0,0056	0,92
		Sarrasin.	0,0308	0,0292	- 0,0016	0,95

La première partie du tableau donne les poids obtenus, quand les plantes ne reçoivent d'autre azote que celui qui était contenu dans les graines. La récolte fut, dans tous les cas, extrêmement faible; et on n'obtint jamais un gain supérieur à 3 milligrammes d'azote. Dans beaucoup de cas, on constata un gain beaucoup plus faible ou même une perte légère.

La seconde partie du tableau donne les résultats obtenus, quand les plantes

reçoivent des quantités connues d'azote combiné sous forme d'une dissolution de sulfate d'ammoniaque appliquée au sol. Les gains ou les pertes sont un peu plus fortes dans ces expériences quand les quantités d'azote augmentent, mais elles sont toujours représentées par des milligrammes, et les pertes surpassent les gains. En outre, les gains, quand il s'en produit, sont tous imputables aux graminées, tandis qu'il y eut dans tous les cas des pertes dans les cultures de légumineuses et dans celle du sarrasin.

Les cultures des graminées furent toujours au reste meilleures que celles des légumineuses, qui, même en plein champ, sont très sensibles aux variations de chaleur et d'humidité et le deviennent encore davantage, quand elles sont enfermées dans des cages de verre.

En résumé, MM. Lawes et Gilbert tirent de leurs expériences des conclusions identiques à celles que Boussingault avait déduit des siennes, à savoir que l'expérience se prononce nettement contre l'hypothèse que les graminées ou les légumineuses soient susceptibles d'absorber directement l'azote gazeux de l'atmosphère.

Influence de l'azote effluvé. — Il reste cependant un point à éclaircir : dans ces dernières années, un travail dû à M. Berthelot, a semblé, au premier abord, apporter quelque appui à l'idée de la fixation directe de l'azote gazeux par les végétaux et il importe de discuter l'interprétation qu'on doit donner des expériences de l'éminent professeur du collège de France.

En soumettant l'azote à l'influence des effluves, M. Berthelot a réussi à obtenir sa fixation sur des hydrates de carbone tels que la dextrine et la cellulose; les recherches récentes, que nous avons exécutées, M. Maquenne et moi, rendent vraisemblable que lorsque les effluves présentent quelque énergie cette fixation se fait à l'état d'acide azotique ou d'ammoniaque; en effet, la vapeur d'eau est facilement dissociée sous l'influence des effluves et quand on agit en présence d'une matière capable de prendre l'oxygène, l'hydrogène, restant en présence de l'azote, forme de l'ammoniaque qui peut s'unir à la matière organique pour fournir un composé amidé, quand au contraire l'effluve traverse l'air il se forme aisément de l'acide azotique (1).

M. Berthelot ne s'est pas contenté d'observer cette fixation d'azote sur des matières carbonées en modifiant le gaz en expérience à l'aide de fortes effluves, il a construit un appareil qui lui a permis de montrer que la fixation de l'azote par la matière organique avait encore lieu sous l'influence de l'électricité atmosphérique; voici, en effet, les expressions mêmes de M. Berthelot. :

« Dans tous les tubes, sans exception, qu'ils contiennent de l'azote pur ou de l'air ordinaire, qu'ils fussent clos hermétiquement ou en libre communication avec l'atmosphère, l'azote s'est fixé sur la matière organique (papier ou dextrine), en formant un composé amidé, que la chaux sodée décompose vers 300 ou 400° avec régénération d'ammoniaque. »

Ainsi les effluves électriques produits par les simples différences de tension qui existent entre l'air et le sol suffisent à modifier si profondément l'azote que

(1) Berthelot, *Mécanique chimique*, t. II, p. 316, et Dehérain et Maquenne, *Comptes rendus* t. XCIII, p. 4023.

ce gaz inerte, si difficile à faire pénétrer en combinaison, acquiert tout à coup la propriété de s'unir à des matières telles que la cellulose ou la dextrine, à des substances identiques ou analogues à celles qui forment les tissus des végétaux et les matières carbonées de la terre arable; or, l'électricité atmosphérique étant mise en jeu presque constamment, on conçoit que cette action continue amène l'azote à une forme favorable à la combinaison, et il reste à déterminer si cette fixation a lieu en effet, et si elle se produit sur les tissus des plantes vivantes ou sur la matière organique du sol.

M. Berthelot n'a pas pu constater que l'électricité déterminât dans l'azote une modification présentant quelque durée comme celle qu'on obtient quand on soumet l'oxygène à l'action des étincelles ou des effluves; il semble qu'il faille que l'azote soit modifié par l'électricité au contact même de la matière avec laquelle il doit s'unir pour que la combinaison se produise; si l'union a lieu entre les tissus des végétaux vivants et l'azote atmosphérique effluvé, on ne devra pas observer cette fixation sur des végétaux soustraits à l'influence de l'électricité et nous sommes conduits à rappeler brièvement l'état actuel d'une question qui, après avoir vivement préoccupé les physiologistes du XVIII^e siècle, avait été complètement négligée pendant nombre d'années, quand elle a été reprise récemment par M. L. Grandeau, doyen de la Faculté des sciences de Nancy.

§ 32. — Influence de l'électricité sur le développement de la plante.

Il est difficile de se faire une idée de la masse d'expériences contradictoires auxquelles donna naissance la recherche de l'influence de l'électricité sur la végétation pendant la seconde moitié du siècle dernier, cependant un résumé assez complet se trouve dans la traduction d'un mémoire du physiologiste anglais Solly, que nous avons inséré dans le tome VI des *Annales agronomiques*; on trouvera en outre quelques-uns des mémoires les plus importants publiés sur ce sujet dans le *Journal de physique de l'abbé Rozier*, de 1785 à 1790.

Les partisans de l'influence de l'électricité sur la végétation, bien qu'ils aient fait preuve de plus d'imagination que de rigueur scientifique, avaient réussi à entraîner un grand nombre d'esprits amis du merveilleux, quand intervint le célèbre physiologiste hollandais Ingen Housz, fixé à cette époque à Vienne; il fit voir par des expériences rigoureuses que l'électricité atmosphérique était loin d'exercer sur la végétation toute l'influence que ses prédécesseur lui avaient attribuée.

L'un d'entre eux, le sénateur italien Quirini, avait remarqué que des jasmins sauvages situés dans le voisinage d'un tuyau métallique de grande dimension avaient acquis une hauteur beaucoup plus grande que leurs voisins; Quirini attribuait ce développement considérable à l'influence de l'électricité parcourant ce tuyau métallique.

« J'ai cru ne pouvant mieux imiter cette expérience dit Ingen Housz, qu'en plaçant des conducteurs métalliques sur les arbres mêmes, car alors toute l'électricité qui serait attirée ou condensée dans ces conducteurs doit absolument passer au travers de l'arbre pour arriver dans le sein de la terre. En

conséquence, j'attachai au mois de février 1787, au sommet de plusieurs arbres de différentes espèces, des perches de bois entortillées d'un fil de cuivre, dont l'extrémité supérieure très pointue surpassait la perche d'environ un demi-pied et de plusieurs pieds la plus haute branche de l'arbre. Je notai d'un numéro chaque arbre ainsi surmonté d'un conducteur et je mis le même numéro, sur un arbre de la même espèce et autant que possible de la même grandeur, le dernier devait me servir de terme de comparaison. Sans cette précaution on aurait pu décider pour ou contre l'effet de ces conducteurs en choisissant après coup ceux qu'on trouverait s'accorder le mieux au système qu'on avait adopté. »

« Le résultat de tous ces essais fut que les conducteurs n'avaient contribué en rien pour faire déployer plus tôt les feuilles ou pousser les fleurs des arbres qui en furent garnis.... »

Ingen Housz voulut non seulement reconnaître si l'appel du fluide électrique à l'aide de conducteurs avait une influence sur le développement des végétaux, mais si, en soustrayant des plantes à l'action des fluides on avait quelque chance de retarder leur végétation. Cette expérience exécutée dans l'été de 1786 est rapportée par l'auteur dans les termes suivants : « J'érigeai au jardin botanique un poteau assez haut pour que son sommet dépassât d'environ 8 à 9 pieds tous les arbres les plus voisins. Je surmontai ce poteau d'un fil de cuivre dont la pointe très effilée surpassait le sommet du poteau de plus d'un pied. De ce fil de cuivre je fis descendre quatre autres fils de cuivre à une distance égale. Je fixai chacun de ces quatre fils à un pieu de bois entortillé d'un fil de cuivre et enfoncé en terre de quelques pieds de profondeur, les quatre pieux formaient un carré et laissaient un espace quadrangulaire tout parsemé de *calamintha mentana*, qui ne formaient alors que de très petites plantes.

« Du bout de ces quatre pieds dont la hauteur au-dessus de la terre était d'environ trois pieds, je tendis horizontalement d'autres fils de cuivre pour enfermer cet intervalle carré. Ces fils tendus d'un pied à l'autre étaient encore en communication avec un grand nombre d'autres fils métalliques tendus en tout temps au-dessus des plantes et de même latéralement, de façon que les plantes interceptées dans ce carré se trouvaient comme enveloppées d'un treillage de fils de métal en forme d'une cage d'oiseau.

« Le résultat de cette expérience s'accorda encore entièrement avec celui que j'obtins des autres expériences déjà citées. Les plantes ainsi destituées de toute influence électrique ont crû fleuri et semencé exactement comme toutes les autres de la même espèce qui se trouvaient en plusieurs endroits du même jardin. »

Dans ces dernières années M. L. Grandeau a exécuté une série d'expériences en employant une disposition absolument semblable à celle qu'avait imaginée Ingen Housz, près de cent ans auparavant. M. Grandeau ignorait évidemment qu'il ne faisait que reproduire une expérience ancienne, car ayant ajouté à son mémoire un aperçu historique (1), il ne fait aucune mention des mémoires insérés au *Journal de physique* de l'abbé Rozier.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 5^e série, t. XVI, p. 145.

Le savant doyen de la Faculté de Nancy a mis en comparaison des plantes maintenues pendant toute la durée de leur végétation sous une cage métallique qui devait les soustraire à l'action de l'électricité atmosphérique, et des végétaux de même espèce restant en l'air libre et pouvant ainsi bénéficier de l'influence de l'électricité, contrairement à ce qu'avait observé Ingen Housz, M. Grandeau a trouvé des différences de poids notables, les plantes soustraites à l'action de l'électricité, étaient moins fortes que celles qui avaient crû à l'air libre; les mêmes expériences répétées à Mettray, par M. Leclerc, ont donné des résultats analogues. M. Grandeau a conclu de ces expériences que l'électricité atmosphérique avait une influence marquée sur le développement des végétaux.

Avant d'admettre ces conclusions opposées à celles de l'illustre physiologiste hollandais, il importe de savoir si elles s'appuient sur des faits bien observés. Or, il faut bien se rappeler que rien n'est plus difficile que d'obtenir deux pieds de la même espèce qui se développent absolument avec la même vigueur, on a beau prendre toutes les précautions imaginables de telle sorte que les sols, les engrais soient identiques; on a beau choisir des graines du même poids, il arrive constamment qu'au moment de la récolte, les pesées indiquent entre deux plantes, qui devraient être identiques, des différences notables qu'on ne sait à quelles causes attribuer.

Il faut donc dans ces sortes d'expériences multiplier les essais, surtout quand les différences à constater sont minimales. Les essais de M. Grandeau furent répétées à Vincennes, au Muséum pendant plusieurs saisons sans qu'on pût en tirer la preuve que l'électricité atmosphérique eût la moindre action; M. Naudin, à Antibes, a également essayé en vain de reproduire les expériences de M. Grandeau; en outre il est bon de rappeler qu'un grand nombre d'essais analogues ont été tentés il y a déjà plusieurs années sans succès. M. Warmann, professeur à l'Université de Genève, a fait, en 1849, une série d'expériences qui l'a conduit à déclarer qu'aucune différence notable n'a pu être constatée entre les plantes soumises ou soustraites à l'action de l'électricité atmosphérique. Enfin quelques années auparavant, on avait annoncé avoir obtenu en Amérique des effets merveilleux de l'électroculture; M. Solly répéta les expériences en Angleterre, elles échouèrent absolument.

De cet ensemble d'essais négatifs, il faut conclure que les plantes ne paraissent pas fixer directement l'azote efflué, et que les conclusions qu'avaient tiré de leurs essais dans des cages de verre, M. Boussingault ou MM. Lawes, Gilbert et Pugh, subsistent complètement.

§ 33. — Influence de l'ammoniaque atmosphérique.

Ainsi de la découverte de M. Berthelot, de la fixation de l'azote efflué sur les hydrates de carbone, il ne semble pas qu'on puisse conclure que l'azote libre de l'atmosphère soit directement utilisé par les végétaux; mais avant d'abandonner l'action de l'atmosphère sur les plantes, il importe de rechercher l'influence que peut exercer l'ammoniaque atmosphérique.

On a constaté en effet à diverses reprises de petites quantités d'ammoniaque dans l'air, et il convient de discuter :

- 1° Si l'ammoniaque est susceptible d'être absorbée par les feuilles ;
- 2° Quelle est la quantité de cette ammoniaque qui existe dans l'air ;
- 3° Quelle est l'action qu'exerce sur la végétation l'ammoniaque atmosphérique.

Absorption de l'ammoniaque gazeuse par les feuilles. — Il y a déjà longtemps que M. G. Ville a reconnu que des plantes maintenues dans une serre où l'on répandait de faibles quantités de carbonate d'ammoniaque s'y étaient développées plus vigoureusement que celles qui n'avaient pas rencontré d'ammoniaque dans l'atmosphère où elles étalaient leurs feuilles ; il importe, quand on veut répéter cette intéressante expérience, d'opérer avec la plus extrême prudence : une dose un peu forte de carbonate d'ammoniaque tuerait les plantes infailliblement.

M. Sachs a observé également que des haricots maintenus sous une cloche où s'exhalaient des vapeurs ammoniacales avaient acquis un plus grand développement que ceux qui séjournèrent dans une atmosphère normale : à l'analyse ils ont montré une plus grande richesse en azote combiné.

Plus récemment M. Schlœsing a repris cette intéressante question ; ses expériences ont porté sur des tabacs, les plantes étaient maintenues sous des cloches traversées par un courant d'air renfermant environ un centième d'acide carbonique, le sol d'une des cloches portait un vase dans lequel était placée une dissolution très étendue de carbonate d'ammoniaque.

Voici les résultats obtenus pour l'azote dans 100 parties de matière sèche :

	N° 1. Atmosphère ammoniacale.	N° 2. Sans ammoniaque.
Feuilles écotées.	3,18	2,62
Tiges et côtes réunies.	2,08	1,62
Racines.	1,33	1,09

M. Schlœsing ne s'est pas contenté d'exécuter ces dosages d'azote total ; il a reconnu que l'azote en excès contenu dans la plante n° 1 ne s'y trouvait ni à l'état d'ammoniaque, ni à celui d'acide azotique, ni même à l'état de nicotine, l'ammoniaque gazeuse avait donc formé des principes albuminoïdes.

Quantités d'ammoniaque existant dans l'air. — L'étincelle électrique qui traverse l'atmosphère y provoque la formation de l'acide azotique ; d'autre part tous les nitrates formés dans le sol et entraînés par les eaux de drainage sont charriés par les fleuves jusqu'à l'Océan, et les quantités qui y arrivent ainsi sont considérables. H. Sainte-Claire Deville a trouvé près de 4 milligrammes par litre dans l'eau du Rhin, prise à Strasbourg, et 8 milligrammes dans l'eau du Rhône, prise à Genève ; les chiffres trouvés par M. Boussingault, pour le Rhin, sont plus faibles ; mais dans la Seine, au pont Notre-Dame, on a souvent dosé de 5 à 8 milligrammes d'acide azotique ; dans les sources même l'acide azotique est en

quantité sensible, parfois considérable, et enfin dans les puits creusés dans le sol du vieux Paris, les quantités surpassent parfois 1 gramme par litre (1).

Si l'on multiplie les chiffres représentant les nitrates trouvés dans les fleuves par le débit correspondant, on peut se faire une idée de la masse de nitrates qui sont ainsi conduits à la mer : pour le Rhin elle dépasse annuellement 50 millions de kilogrammes.

L'azote combiné reçu par l'Océan n'y persiste pas sous la forme d'acide azotique; on a signalé depuis longtemps, en effet, la présence de l'ammoniac dans l'eau de mer, tandis qu'on n'y a pas découvert d'acide azotique. M. E. Marchand, de Fécamp, a dosé dans l'eau de la mer 0^{mm},57 par litre. M. Boussingault, 0^{mm},2. En citant ces chiffres l'éminent agronome ajoute immédiatement : « Ces proportions sont bien faibles, sans doute, mais l'Océan recouvre plus des trois quarts du globe, et si l'on envisage sa masse, il est permis de le considérer comme un immense réservoir des sels ammoniacaux où l'atmosphère réparerait les pertes qu'elle éprouve continuellement.

Cette idée émise depuis longtemps déjà (1853), a été reprise par M. Schlœsing, qui a déterminé dans une importante série de recherches comment se répartit entre les eaux, les terres et l'atmosphère, l'ammoniac dont l'analyse décele la présence dans l'eau de la mer.

Les dosages exécutés par M. Schlœsing avec les appareils très ingénieux qu'il a employés, l'ont conduit à admettre qu'il existe au maximum 0^{mm},06 d'ammoniac dans un mètre cube d'air, c'est-à-dire dans 1.293.000 milligrammes d'air, la proportion est donc bien faible et au premier abord on pourrait juger qu'elle n'exerce qu'une influence insignifiante; en réfléchissant cependant à la grande quantité d'eau que les plantes renferment, à la solubilité du gaz ammoniac dans l'eau, on pourrait avoir une opinion différente et il importe de recourir à l'expérience directe et de rechercher si l'ammoniac atmosphérique exerce une action quelconque sur la végétation.

Influence de l'ammoniac atmosphérique. — Tandis que M. Schlœsing montrait que des plantes mises au contact d'une atmosphère ammoniacale s'enrichissent en azote, M. Mayer, d'Heidelberg, tout en répétant ces mêmes essais, s'efforçait de découvrir en outre l'influence de l'ammoniac atmosphérique sur la végétation.

Les plantes furent soumises par cet habile physiologiste aux essais suivants :

1° Quelques-unes, maintenues à l'air libre devaient montrer si l'ammoniac atmosphérique exerce une influence marquée sur la végétation ;

2° Un autre groupe de plantes était maintenu dans une atmosphère contenant des vapeurs ammoniacales ;

3° Le troisième groupe était absolument soustrait à l'influence de ces vapeurs ;

4° On humectait les feuilles du quatrième groupe avec de l'eau pure ;

5° Celles du cinquième groupe avec de l'eau renfermant de très faibles quantités de carbonate d'ammoniac.

Les choux-raves mis en expériences plongeaient leurs racines dans des disso-

(1) Les nitrates dans le sol et dans les eaux. *Chimie agr.*, t. II, p. 44.

lutions minérales exemptes d'azote; on reconnut que les plantes obtenues, assez chétives au reste, étaient plus fortes et renfermaient plus d'azote quand elles avaient été soumises à l'action de l'air ammoniacal.

Quant aux plantes dont les feuilles furent baignées par les dissolutions ammoniacales, elles renfermaient un peu plus d'azote total que celles qui avaient été badigeonnées d'eau pure, mais le poids de matière sèche fut un peu plus faible.

En résumé, M. Mayer, comme ses prédécesseurs, reconnaît que l'ammoniaque gazeuse est assimilée par les plantes; il insiste avec raison sur les conditions de réussite de l'expérience; si l'on veut forcer la dose de carbonate d'ammoniaque dans l'atmosphère où sont placés les végétaux, on les fait infailliblement périr.

Quant à l'action de l'ammoniaque atmosphérique, M. Mayer n'a obtenu que des résultats négatifs; des plantes exposées à l'air libre, mais protégées contre la pluie et enracinées dans des dissolutions nutritives exemptes d'azote, renfermaient, quand on mit fin à l'expérience, exactement la quantité d'azote que contenait la semence dont elles étaient issues; il n'y avait eu aucun gain d'azote, l'ammoniaque atmosphérique n'avait par suite, exercé aucune action.

Dans une seconde série d'essais, M. Mayer avait introduit des nitrates dans les liquides nourriciers : sur du blé en 1873, sur des pois en 1874, les dosages exécutés avec grand soin, ont montré que les plantes renfermaient exactement la somme de l'azote contenu dans la graine et dans la solution nutritive.

De ces résultats négatifs, M. Mayer a tiré les conclusions suivantes : « L'absorption d'ammoniaque par les feuilles est possible théoriquement; mais vu la parcimonie avec laquelle les sources atmosphériques l'offrent aux plantes, ce phénomène n'a pas une importance pratique considérable. Les papillonacées ne semblent pas jusqu'ici offrir des différences bien grandes sous ce rapport avec les autres familles végétales. »

Nous arrivons donc à conclure, après avoir discuté les faits précédents, que si l'atmosphère fournit à la plante tout ou partie de son carbone, c'est dans le sol qu'elle puise l'azote nécessaire à la constitution de quelques-uns des principes qu'elle renferme et qu'il ne semble pas que l'azote gazeux ou les petites quantités d'ammoniaque répandues dans l'air aient une influence sensible sur la végétation.

CHAPITRE IV

LE SOL SOURCE D'AZOTE DES PLANTES

Des considérations exposées dans le chapitre précédent, on peut déduire que les plantes n'empruntent directement à l'air ni azote ni ammoniac, et que tout l'azote qu'elles renferment provient du sol, et il reste à discuter : si les terres abandonnées à la végétation spontanée tendent à s'épuiser peu à peu des quantités qu'elles renfermaient à l'origine, à rechercher si les apports d'engrais azotés sur les terres cultivées sont suffisants pour combattre l'appauvrissement dû aux récoltes ; si enfin il existe des causes naturelles, de pertes et de gain qui, lorsqu'elles s'équilibrent, tendent à maintenir les sols dans un état de fertilité moyenne, mais déterminent leur stérilité quand les pertes l'emportent, ou l'accroissement de leur richesse, si au contraire les grains surpassent les déperditions.

§ 34. — Des causes d'épuisement des sols par la culture.

Les prairies abandonnées à la vaine pâture, et qui ne reçoivent jamais d'engrais comme le sont celles des montagnes, où les animaux viennent passer la belle saison, perdent chaque année une certaine quantité d'azote qui est utilisée par les animaux à élaborer du lait, de la laine ou des muscles ; une forêt qui est exploitée régulièrement, perd également de l'azote avec le bois qu'elle fournit.

Une terre régulièrement cultivée est soumise également à des pertes, puisqu'on lui enlève chaque année sous forme de grains, de paille, de racines, de fourrages, de l'azote qui, nous l'avons vu, n'a d'autre origine que le sol lui-même.

Quelle est l'étendue de ces pertes, c'est ce que nous devons d'abord rechercher ; en distinguant les pertes dues aux prélèvements des plantes de celles qu'on peut attribuer à d'autres causes.

Déperditions dues à la plante. — Les analyses de végétaux cultivés sont nombreuses ; on sait très approximativement les quantités d'azote qu'ils ren-

ferment et on conçoit qu'en multipliant la quantité d'azote contenue dans 100 parties de la récolte, par le poids de cette récolte, on puisse arriver à déterminer approximativement les pertes qu'occasionne l'enlèvement des récoltes.

Cette recherche a été exécutée d'abord par M. Boussingault et on peut tirer de ses travaux le tableau suivant :

Azote enlevé par hectare et par an par diverses récoltes soumises à un assolement régulier.

M. Boussingault (Bechelbronn).

Nature des récoltes.	Poids.	Azote à l'hectare.
	kil.	kil.
Froment	{ Grains 1.343	} 35,4
	{ Paille 3.052	
Froment..	{ Grain 1.659	} 43,4
	{ Paille 3.770	
Avoine.	{ Grain 1.344	} 28,4
	{ Paille 1.800	
Pommes de terre.	Tubercules. 12.800	46,3
Betteraves.	Racines. 26.000	53,9
Trèfle.	Foin. 5.100	64,6
Luzerne.	Moyenne de 3 ans. 8.800	227,0
Topinambours. 26.440	88,0

Les quantités d'azote contenues dans les récoltes précédentes sont peu élevées, ce qui est dû à la faiblesse des rendements constatés.

Il en est de même des chiffres suivants dus à MM. Lawes et Gilert qui se rapportent à des plantes développées sur des sols cultivés sans engrais azotés.

On remarquera cependant que le trèfle a prélevé sur le sol qui l'a porté une quantité notable d'azote, beaucoup plus élevée que celles que prennent les graminées, on remarquera également que malgré ce prélèvement énorme de 169 kilogrammes, le trèfle a laissé le sol qui l'a porté dans un état tel que l'orge qui le suit renferme 77 kilogrammes d'azote, tandis que celle qui a été récoltée sur une portion voisine du même champ n'en contient que 43,8. Il est impossible de trouver un plus bel exemple de l'influence des plantes nommées *améliorantes* par les cultivateurs.

Proportion d'azote par hectare et par an, dans différentes récoltes obtenues à Rothamsted, sans engrais azoté.

RÉCOLTES.	ENGRAIS.	DURÉE de l'expérience.	MOYENNE de l'azote par hectare et par an.		
		8 ans 1844-51	28,2		
Blé.	Sans engrais.	12 — 1852-63	25,3		
		12 — 1864-75	17,6		
		24 — 1852-75	21,6		
		32 — 1844-75	23,2		
		12 — 1852-63	30,2		
		12 — 1864-75	19,2		
Orge	Engrais minéral complet.	24 — 1852-75	24,7		
		12 — 1852-63	14,6		
		12 — 1864-75	15,3		
		24 — 1852-75	20,5		
		12 — 1852-63	29,1		
		12 — 1864-75	21,0		
Racines.	Engrais minéral.	24 — 1852-75	25,0		
		8 — 1845-52	47,0		
		3 — 1853-55	27,1		
		15 — 1856-70 ¹	20,7		
		5 — 1871-75	14,7		
		5 — 1876-80	17,4		
Pois.	Engrais minéral.	36 — 1845-80	28,2		
		12 — 1847-58	53,8		
		12 — 1859-70 ²	16,3		
		24 — 1847-70	35,0		
		12 — 1847-58	68,9		
		12 — 1859-70 ²	33,0		
Trèfle.	Engrais minéral.	24 — 1847-70	50,9		
		22 — 1849-70 ³	34,1		
Orge.	Sans engrais.	22 — 1849-70 ³	44,5		
Trèfle.	Sans engrais.	1 — 1873	41,7		
		1 — 1873	169,4		
Orge.	Sans engrais.	1 — 1874	43,8		
		1 — 1874	77,7		
		L'orge après le trèfle renferme en excès sur l'orge après l'orge.	"	33,9	
Assolement 7 rotations.	1. Navets. 2. Orge. 3. Trèfle ou pois. 4. Blé.	Sans engrais.	28 — 1848-75		
				Avec superphosphate.	
					28 — 1847-75

1. Douze récoltes, deux ont manqué. — 2. Pois neuf ans, une année en blé, deux en jachère. — 3. Six ans en trèfle, une année en blé, trois ans en orge, douze ans en jachère.

Le tableau suivant nous fournit les chiffres relatifs aux quantités d'azote enlevées par les plantes de la prairie.

Moyenne de l'azote dans le foin des prairies de Rothamsted.

PARCELLES.	ENGRAIS.	PRODUIT MOYEN PAR HECTARE et par an, pendant 20 ans, 1856-1875, calculé d'après les moyennes constatées en 1862-67-71-72-74 et 75.			AZOTE MOYEN par hectare et par an.		
		Grami- nées.	Légumi- neuses.	autres espèces.	10 ans 1856-65.	10 ans 1866-75.	20 ans 1856-75.
		kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
3	Sans engrais.	1.831	245	592	39,3	34,6	36,9
4-1	Superphosphate.	1.871	167	753	40,0	33,2	37,6
8	Engrais minéral.	2.735	330	715	60,9	42,6	51,7
7	— —	2.888	902	641	61,8	62,7	62,2

Les trois premières colonnes indiquent approximativement comment les espèces de la prairie furent modifiées sous l'influence des quatre conditions différentes dans lesquelles elles se sont développées. Sans engrais ou sous l'influence du superphosphate de chaux seulement, la proportion et la composition de l'herbage ne sont pas sensiblement modifiées. La parcelle 8, avec un engrais minéral, renfermant de la potasse, pendant les six premières années, présente un accroissement considérable de graminées et de légumineuses, tandis que la parcelle 7, avec un engrais minéral complet, comprenant chaque année pendant les vingt ans d'expériences une forte dose de potasse, donna surtout un accroissement considérable de légumineuses.

Enfin, des recherches spéciales auxquelles se sont livrés les éminents agronomes Rothamsted sur les diverses espèces de légumineuses susceptibles d'être employées en grande culture, il résulte que le melilotus leucanta ou trèfle de Bokhara a fourni les chiffres les plus élevés.

Il prélève sur une parcelle, qui n'a pas reçu d'engrais azoté depuis plus de trente ans, 78^k,1 d'azote par hectare et par an.

A l'exception de ceux que fournissent les récoltes de légumineuses les chiffres précédents sont faibles, et il est naturel qu'il en soit ainsi puisqu'ils ont été calculés sur les rendements de parcelles qui n'avaient pas reçu d'engrais azoté.

Sous l'influence de ceux-ci, les récoltes augmentent beaucoup et les quantités d'azote suivent naturellement cette progression.

De 1875 à 1879, la récolte moyenne d'avoine, à Grignon, a été sur des fumures directes :

Grain.	2.248 kilogr., renfermant azote	44 ^k ,9	} 69 ^k ,9
Paille.	5.100 — — —	25,0	

De 1880 et 1881. Blé sur d'anciennes fumures :

Grain.	2.420 kilogr., renfermant azote	48 ^k ,4	} 65 ^k ,7
Paille.	3.440 — — —	17,3	

Sainfoin. — 1879.-1880.-81.

Récolte moyenne. 6:287 kilogr., renfermant azote 144^k,5

Maïs fourrage. — 1876.-77.-78.-79.-80.

Récolte verte moyenne. . . . 62.800 kilogr., renfermant azote 171¹/₁

Aux pertes d'azote que déterminent les prélèvements de récoltes, il convient d'ajouter les déperditions que subissent les matières azotées du sol lui-même.

En effet, les nitrates qui se produisent par l'oxydation des matières azotées du sol ou de l'ammoniaque qui en provient ne sont pas entièrement absorbés par les végétaux, on en retrouve des quantités notables dans les eaux de drainage; en outre ces nitrates peuvent être détruits avec dégagement d'azote libre ou de protoxyde d'azote, ainsi que cela a été établi par une série de recherches récentes (MM. Schloësing, Gayon et Dupetit, Dehérain et Maquenne).

Cette cause de perte doit être cependant limitée; en effet, la fermentation butyrique qui par sa production d'hydrogène provoque la réduction des nitrates se produit très bien dans un milieu renfermant des substances sucrées, mais les matières organiques de la terre arable ne nourrissent pas le ferment butyrique avec la même énergie que le sucre, et pour assister à la réduction des nitrates, il faut opérer dans une atmosphère absolument dépouillée d'oxygène; or cette condition doit être rarement remplie dans le sol, de telle sorte que la réduction des nitrates avec dégagement d'azote libre ou de protoxyde d'azote est sans doute un phénomène assez rare dans les conditions ordinaires et nous pouvons n'en pas tenir compte dans la recherche des causes des pertes qui nous occupent actuellement.

§ 35. — Pertes dues à la nitrification.

Les pertes d'azote des sols cultivés, dues à la nitrification, sont constatées par l'analyse des eaux de drainage.

Cette étude a été poursuivie avec le plus grand zèle à Rothamsted par MM. Vœlcker, Frankland, et enfin par MM. Lawes, Gilbert et Warington (1). Ces messieurs ont non seulement déterminé rigoureusement les rapports existant entre la quantité d'eau tombée et celle qui passe dans les drains, mais ils ont de plus analysé les eaux de drainage; ils y ont déterminé les diverses formes sous lesquelles l'azote s'y rencontre, et ont reconnu que la plus grande partie de l'azote qui disparaissait dans le sous-sol y était amenée sous forme de nitrates.

Le champ d'expériences consacré à Rothamsted de puis quarante ans à la culture du blé est drainé, chaque parcelle reçoit chaque année la même quantité d'engrais, distribué sous la même forme, les récoltes sont pesées avec soin, on a donc entre les mains tous les éléments pour savoir comment se répartit l'azote des engrais entre les plantes et les eaux de drainage; c'est ce que représente le tableau ci-joint: les chiffres y expriment des kilogrammes par hectare et par an.

(1) Recherches sur la composition des eaux de pluie et de drainage, *Ann. agron.*, t. VII et VIII.

Répartition de l'azote des engrais, par hectare et par an, entre la récolte et l'eau de drainage.

ENGRAIS REÇUS PAR LES DIVERSES PARCELLES	AZOTE de la récolte.	AZOTE dans l'eau de drainage.	TOTAL.	AZOTE de l'engrais.	DIFFÉRENCE.
	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
3-4. Sans engrais.	13	17	30	0	+ 30
5. Engrais minéraux.	18	19	37	0	+ 37
6. 224 k. sels ammoniacaux et engrais minéraux . . .	30	25	55	49	+ 6
7. 448 k. — —	45	31	76	98	- 22
8. 672 k. — —	55	48	103	148	- 45
9. 616 k. nitrate de soude, demi-fumure minérale. . .	36	65	101	96	+ 5
10. 448 k. sels ammoniacaux seulement.	16	56	72	98	- 26
11. — sels ammoniacaux et superphosphates.	32	44	76	98	- 22
12. — sels ammon., superph. et sulfates de soude.	36	39	75	98	- 23
13. — sels ammon., superph., et sulfates de potasse.	43	36	78	98	- 20
14. — sels ammon., superph., et sulf. de magnésie.	41	41	83	98	- 15
15. — sels ammoniacaux et engrais minéraux.	36	83	119	98	+ 21
17. Sans engrais depuis 1865.	16	18	34	0	+ 34

Quand le sol ne reçoit pas d'engrais azoté, il est clair que ce qu'il fournit à la récolte et à l'eau de drainage provient de ses réserves; nous voyons qu'à Rothamsted il perd dans ces conditions de 30 à 40 kilos d'azote; or si on compare cette quantité à celle qu'il reçoit des eaux météoriques sous forme d'ammoniaque et d'acide azotique, environ 6^h,832 en quantité totale dont 0^h,829 pour l'acide azotique, et 7^h,664 pour l'ammoniaque (1), on voit que son appauvrissement est notable, et, en effet, la récolte de blé qui renfermait 28^h,2 d'azote de 1844 à 1851, n'en a plus contenu que 25^h,3 de 1852 à 1863 et 17^h,6 de 1864 à 1875 (2). Il peut encore arriver que l'azote du sol intervienne, quand la fumure renferme outre des engrais azotés des engrais minéraux, c'est ce qu'on observe sur les parcelles 6, 9 et 21; mais très habituellement la somme de l'azote de la récolte et celle de l'eau de drainage ne représente pas celle de la fumure, et on doit rechercher si cet azote est resté fixé dans le sol et a contribué à son enrichissement.

§ 35. — Azote dans les sols diversement cultivés.

Pour élucider cette question, MM. Lawes et Gilbert ont prélevé, en 1865, des échantillons du sol de onze parcelles du champ d'expériences. Ces échantillons ont été pris à huit places différentes, sur chaque parcelle et dans chaque cas à trois profondeurs variant de 0^m,23 à 0^m,68; les huit échantillons pris à la même

(1) *Ann. agron.*, t. VII, p. 439.(2) *Ann. agron.*, t. IX, p. 393.

profondeur ont ensuite été mélangés avec soin au laboratoire; enfin, on y a dosé l'azote à trois ou quatre reprises différentes.

Le tableau suivant donne la moyenne des analyses effectuées sur la terre sèche et tamisée jusqu'à la profondeur de neuf pouces (0^m,23 environ); on y a joint la quantité d'azote existant dans un hectare de la même terre, pesant environ 2.576.000 kilos, pour la même épaisseur et les mêmes conditions de finesse et d'humidité.

Azote existant dans le sol des différentes parcelles en octobre 1865.

NOMBRES des parcelles,	ENGRAIS DISTRIBUÉS.	POUR	PAR	DIFFÉ- RENCE sur 5.
		100.	hectare.	
2	35.000 k. fumier de ferme.	0,1882	4.848	1.966
3	Sans engrais.	0,1090	2.808	— 75
5	Engrais minéraux seulement.	0,1119	2 883	*
7	448 k. sels ammoniacaux et engrais minéraux.	0,1230	3.168	286
9-a	616 k. azotate de soude et engrais minéraux.	0,1232	3.174	291
10	448 k. sels ammoniacaux depuis 1843.	0,1108	2.854	— 29
11	448 k. sels ammoniacaux et superphosphate de chaux.	0,1171	3.016	133
12	448 k. sels ammon., superphosphate et sulfate de soude.	0,1208	3.111	228
13	448 k. sels ammon., superphosphate et sulfate de potasse.	0,1206	3.107	224
14	448 k. sels ammon., superphosphate et sulfate de magnésie.	0,1197	3.083	200
16	896 k. sels ammoniacaux et engrais minéraux.	0,1264	3.256	373

Il est clair que les différences constatées entre les parcelles qui reçoivent chaque année des engrais azotés et la parcelle 5, qui n'est amendée qu'avec des engrais minéraux, sont insuffisantes pour qu'on puisse admettre que l'azote non retrouvé dans la récolte ou dans l'eau de drainage a été fixé dans le sol; on est d'autant plus convaincu que les dosages exécutés en 1881, c'est-à-dire quand la distribution des engrais précédents avait duré trente ans, n'ont pas donné des chiffres très différents des précédents. La totalité de l'azote des engrais ne se retrouve ni dans les récoltes ni dans les eaux de drainage recueillies, après avoir discuté les causes auxquelles il faut rapporter sa disparition, les auteurs arrivent à conclure que les évaluations des quantités d'eau de drainage ont été inexactes. En effet, la nature même du sol du champ de blé qui repose sur la craie est favorable à un drainage naturel, et les drains ne fonctionnent qu'après une pluie violente ou longtemps continuée; d'autre part, le calcul des quantités de chlore contenu dans l'engrais et retrouvé dans les récoltes ou les eaux de drainages, conduit à un résultat analogue à celui qui vient d'être constaté dans le cas des nitrates; il y a encore un déficit considérable et d'autant plus fort que l'engrais renfermait une plus grande quantité de chlorures; il est évident que ces sels n'ont pu disparaître que dans les profondeurs du sous-sol, entraînés par un drainage naturel qu'il n'a pas été possible d'apprécier; les nitrates éminemment diffusibles, comme les chlorures sont soumis au même en-

trainement, et il est probable que le déficit constaté n'a d'autre origine qu'une captation incomplète des eaux qui traversent le sol.

§ 37. — Discussion sur l'engrais en terre. Résultats constatés à l'École de Grignon.

Des nombreuses analyses exécutées à Rothamsted résumées dans les tableaux précédents, on peut déduire que dans les cas les plus favorables la moitié de l'azote de l'engrais passe dans la récolte; habituellement la proportion d'azote retrouvée, dans le supplément de récolte obtenu sous l'influence de l'engrais n'est qu'un tiers de la quantité distribuée, le reste est presque entièrement perdu.

On voit combien cette dernière conclusion est contraire à ce qu'enseignaient les anciens agronomes au sujet de l'engrais en terre; ils supposaient implicitement que la portion de l'engrais non retrouvée dans la récolte restait dans le sol; s'il en était ainsi, il est clair qu'en analysant un sol au commencement d'une série de cultures, en analysant en outre les engrais et les récoltes, qui l'un et l'autre sont pesés, puis enfin en déterminant la composition du sol à la fin de la série, on devrait trouver en appelant :

A, azote du sol au commencement des expériences;

E, azote contenu dans l'engrais distribué;

R, azote contenu dans les récoltes enlevées pendant la période des observations;

S, azote contenu dans le sol à la fin des observations.

$A + E = S + R$. Cette équation serait exacte, si rien n'était perdu.

Mais si, comme on l'a constaté à Rothamsted, l'azote des sels ammoniacaux transformé en nitrates s'écoule dans le sous-sol, si les matières organiques se décomposent avec émission d'azote libre, l'équation précédente ne se vérifie pas, et on trouve :

$$A + E > S + R.$$

La différence $(A + E) - (S + R) = P$ la perte que le sol a fait pendant la durée des expériences. Si au contraire les apports atmosphériques, les prélèvements exécutés par les plantes à racines pivotantes dans le sous-sol déterminaient un enrichissement de la couche superficielle sur laquelle porte les analyses, on trouverait :

$$A + E < S + R$$

et la différence $(S + R) - (A + E) = G$ le gain d'azote que fait le sol.

Il est clair qu'un système de culture ne sera décidément prospère que si pendant la durée de l'assolement c'est la dernière équation qui est exacte, puisqu'elle prouvera que les gains surpassent les pertes.

Nous nous sommes efforcés, à l'École de Grignon, de résoudre cette question par l'expérience, et de 1875 à 1881, on a soumis plusieurs des parcelles du champ d'expériences à des cultures continues : les unes ont porté du maïs fourrage, les autres des pommes de terre pendant cinq ans, puis du blé, les dernières des bette-

rayes pendant quatre ans, du maïs fourrage et enfin du sainfoin. On avait pris un échantillon de terre au commencement des essais, en 1875, on en préleva en 1878, puis en 1881 (1), et des nombreux dosages exécutés, il résulta clairement que les sols labourés chaque année avaient perdu une quantité d'azote bien supérieure à celle qui avait été prise par les récoltes, que le système de culture suivie avait eu pour effet d'appauvrir considérablement le sol de sa richesse primitive, et que les prélèvements des récoltes étaient tout à fait insuffisants pour expliquer les pertes considérables que constatait l'analyse.

De 1875 à 1879, le sol cultivé en betteraves avait perdu environ le quart de son azote primitif; de 1879 à 1881, cette terre fut maintenue en sainfoin; on trouva que pendant cette période où elle n'avait reçu aucun engrais, la richesse en azote était restée stationnaire ou même avait légèrement augmenté, bien qu'elle eût fourni trois bonnes récoltes de sainfoin.

Les analyses du sous-sol exécutées en 1879 et en 1881, montrèrent, en outre, que le sous-sol n'avait subi aucune perte sensible.

Il résulte clairement de ces dosages que les prélèvements des plantes n'exercent qu'une action médiocre sur la richesse du sol et qu'on ne peut en aucune façon déduire l'état dans lequel il se trouve des quantités d'azote contenues dans les récoltes. En effet, nous voyons que de toutes les plantes celles qui renferment le plus d'azote sont les légumineuses et cependant c'est après leur culture que le sol est le plus riche, tandis qu'il s'est considérablement appauvri quand il a porté des plantes peu exigeantes, comme les pommes de terre.

C'est bien, au reste, ce que les cultivateurs avaient reconnu depuis longtemps; ils avaient distingué les plantes en épuisantes et améliorantes, suivant que leur culture laissait le sol dans un état fâcheux ou favorable à la culture des céréales, mais attribuaient à tort à l'action de la plante ce qui semble dû surtout au mode de culture.

Il est clair si la déperdition de l'azote combiné des sols arables est due surtout à une nitrification exagérée, toutes les causes qui tendront à favoriser cette nitrification entraîneront des pertes. Or, la nitrification est essentiellement un phénomène d'oxydation; elle sera énergique dans les sols labourés retournés, soumis à de nombreuses façons, elle sera faible au contraire quand le sol sera laissé en repos.

Toute culture qui exigera des façons nombreuses et fréquentes sera épuisante, quelle que soit la plante cultivée; toute culture qui laissera le sol en repos sera améliorante; c'est ainsi qu'on trouve que les sols de prairie, qu'ils portent des céréales ou des légumineuses, présentent des richesses exceptionnelles.

M. Boussingault trouve 5 grammes d'azote combiné par kilogramme d'une terre provenant d'un herbage d'Argentan. M. Truchot, 9 grammes dans les prairies hautes des montagnes d'Auvergne, qui ne reçoivent jamais d'engrais. M. Joulie, dose jusqu'à 10 grammes dans une prairie de Seine-et-Marne. Bien que moins riches, les prairies de Rothamsted présentent sans engrais une richesse de 2^{gr},5 d'azote combiné par kilogramme, et avec du fumier de ferme de 2^{gr},8. Ce dernier chiffre est particulièrement intéressant; en effet, la dose d'engrais fournie est la

(1) *Ann. agron.*, t. IV, p. 418; t. VIII, p. 321.

même que celle qu'a reçu la parcelle qui a porté du blé pendant toute la durée des expériences, et cependant la terre qui est restée en repos donnant 2^{gr},8, celle qui a été labourée chaque année n'en fournit que 1^{gr},8.

Sur nos sols de Grignon l'influence d'une culture continue de sainfoin sur la richesse du sol a été très sensible: en 1879, la terre était tombée à 1^{gr},45 environ d'azote; en 1881, on y a trouvé 1^{gr},5, et en 1883, 1^{gr},7 d'azote combiné, bien qu'on eût obtenu pendant toute la durée des expériences de bonnes récoltes de sainfoin et qu'on n'eût ajouté aucun engrais.

L'expérience suivante, due aux éminents agronomes de Rothamsted, est particulièrement intéressante et nous avons déjà appelé sur elle l'attention du lecteur (p. 80) Elle a porté sur deux portions d'un champ d'où l'on avait tiré six récoltes de grains consécutives soutenues seulement par des engrais artificiels; la division eut lieu en 1873; sur une moitié on sema de l'orge et sur l'autre on récolta du trèfle semé l'année précédente. Le trèfle renfermait à l'hectare 169^{gr},5 d'azote et l'orge seulement 41^{gr},7. Pendant l'année suivante, 1874, de l'orge ayant été semé sur les deux parties, on trouva que sur celle qui avait porté du trèfle l'orge contenait 77^{gr},7 d'azote, tandis que sur celle qui avait porté de l'orge l'année précédente, l'orge récolté renfermait seulement 43^{gr},8.

En octobre 1873, après que le trèfle et l'orge eurent été récoltés et avant que la terre eût été labourée, on préleva des échantillons de terre (1) et on trouva 1^{gr},578 dans un kilogramme de la terre qui avait porté du trèfle et 1^{gr},450 dans celle qui avait été emblavée en orge. En 1867, on prit de nouveaux échantillons, les différences étaient encore sensibles. On chercha si le sous-sol s'était particulièrement appauvri, mais cet appauvrissement n'était pas sensible jusqu'à 0^m,675.

Il est à remarquer que toujours les sols riches en azote le sont également en carbone; c'est qu'en effet l'azote contenu dans le sol s'y rencontre à l'état de matière organique, et que la présence de l'azote entraîne fatalement celle de cette matière et par suite du carbone. Cette matière organique azotée provient des résidus laissés par les récoltes antérieures, et on conçoit dès lors qu'ils soient d'autant plus abondant que ces récoltes elles-mêmes ont présenté un poids plus élevé; c'est ce qui résulte nettement des faits cités plus haut relatifs à la richesse des sols de prairie, c'est ce qu'ont observé également MM. Lawes, Gilbert et Wasington dans leurs analyses de Rothamsted (2); ils résument, en effet, leurs résultats par les lignes suivantes: « On peut conclure de nos analyses que la richesse en azote des sols étudiés est liée bien plus à l'abondance des récoltes qu'elles ont fournies qu'à la richesse même de l'engrais qui leur a été appliqué. »

Les faits précédents présentent un intérêt de premier ordre; il en résulte nettement que contrairement à ce que supposait l'ancienne école agronomique, les réactions qui se produisent dans le sol ont sur sa richesse une influence infiniment plus grande que les prélèvements des plantes.

Que par suite, il est absolument impossible de calculer la richesse d'une terre en ne tenant compte que de ce que les engrais lui apportent et de ce que les plantes lui enlèvent.

(1) Voyez, pour plus de détails, le mémoire des auteurs, *Ann. agron.*, t. IX, p. 453.

(2) *Ann. agron.*, t. VII, p. 444.

Qu'il faut abandonner les termes : plantes épuisantes et plantes améliorantes et leur substituer ceux de cultures épuisantes et cultures améliorantes.

Que les premières seront celles qui exigeront des labours fréquents, car dans ces conditions la nitrification des matières azotées déterminera leur entraînement dans le sous-sol, et qu'au contraire, il faudra considérer comme cultures améliorantes, celles qui, occupant le sol pendant plusieurs années, retardent la pénétration de l'oxygène atmosphérique.

Tandis que les cultures des racines, des tubercules, des céréales, sont épuisantes, celles des prairies de graminées ou de légumineuses sont améliorantes, et l'on reconnaît quel progrès a été accompli dans l'agriculture européenne quand on a introduit dans l'assolement habituellement pratiqué une prairie temporaire qui occupe le sol pendant dix-huit mois.

L'expérience enseigne que pendant sa durée, le sol, loin de s'appauvrir, s'enrichit, et il importe d'en rechercher les causes.

§ 38. — Discussion sur l'origine de l'azote combiné des sols arables.

Trois hypothèses différentes peuvent être proposées pour expliquer l'origine de l'azote des sols arables.

La première fait remonter la combinaison de l'azote aux combustions vives dont le globe a été le théâtre aux époques géologiques; s'appuyant sur les quantités sensibles d'acide azotique que produisent les combustions vives, la combustion de l'hydrogène, celle des matières organiques, celle du magnésium, MM. Muntz et Aubin pensent qu'au moment où les éléments qui existaient dans la masse incandescente de la terre, se sont combinés, une certaine quantité d'azote est entrée en combinaison; nous vivrions sur ce stock d'azote combiné, comme nous vivons sur la houille des époques géologiques et nous serions exposés à voir cette quantité d'azote combiné décroître sous l'influence des causes qui rendent à l'état gazeux l'azote qui avait servi à la formation des tissus des êtres vivants à moins que l'apport dû à l'électricité atmosphérique ne soit une cause de réparation suffisante.

MM. Lawes, Gilbert et Warington, dans les nombreuses analyses qu'ils ont exécutées, ont vu les sols qu'ils ont étudié s'appauvrir d'azote à peu d'exception près, et en comparant le sol à une *mine*, ils laissent entendre qu'on finira par l'épuiser, comme on épuise un gisement minéral qu'on exploite.

La seconde hypothèse est due à M. Schloesing, elle repose sur la richesse en ammoniacque de l'eau de la mer; les dosages exécutés par M. E. Marchand, par M. Boussingault, par M. Schloesing lui-même, ont montré que l'eau de mer renferme une petite quantité d'ammoniacque susceptible de se diffuser dans l'atmosphère; on trouve en effet que l'air atmosphérique renferme des traces d'ammoniacque, et M. Schloesing estime que cette ammoniacque est fixée sur le sol et peut contribuer à l'enrichir. Cette question étant discutée avec détails par M. Schloesing lui-même, dans une autre partie de l'*Encyclopédie*, il est inutile d'y insister.

La dernière hypothèse est celle qui suppose que l'azote libre de l'atmosphère

est susceptible de se fixer sur les matières organiques du sol, et les expériences de M. Berthelot sur l'azote effluvé lui apportent un solide appui.

Bien qu'il manque encore à cette manière de voir des preuves décisives, que les anciennes expériences que nous avons exécutées sur ce sujet en 1871 et 1872, ont été impuissantes à fournir, il faut bien reconnaître que c'est la seule hypothèse qui soit d'accord avec les faits observés par la pratique.

Des nombreuses analyses de terre que nous avons citées, découle cette conséquence capitale : les terres ne sont riches en azote que lorsqu'elles sont riches en matières carbonées, et cette abondance de matières carbonées n'existe que dans les sols non remués. Si l'azote modifié par les échanges électriques qui se produisent dans l'atmosphère s'unit aux matières carbonées, leur abondance est déjà une chance de fixation ; en outre, il est clair que si cette combinaison de l'azote déterminant l'enrichissement du sol a lieu en effet, elle est constamment combattue par la nitrification qui tend à faire disparaître l'azote à l'état soluble ; quand la nitrification sera active, les pertes surpasseront les gains ; ceux-ci, au contraire, deviendront manifestes si la nitrification est retardée.

Bien que le mécanisme de cet enrichissement du sol en azote ne soit pas encore complètement établi, l'expérience acquise par les cultivateurs est assez nette pour qu'on en puisse déduire des conclusions pratiques du plus haut intérêt.

Une terre mise en prairie s'enrichit, bien qu'elle fournisse d'abondantes récoltes, tel est le point acquis ; rien n'est donc plus avantageux pour un cultivateur que d'augmenter la surface consacrée aux cultures fourragères, non seulement comme le professaient nos prédécesseurs, parce que la masse de fourrages obtenue permet d'entretenir un nombreux bétail dont le fumier est utilisé mais en outre parce que par le jeu même des forces naturelles, une terre non remuée acquiert assez d'azote pour nourrir sa récolte, tout en se conservant une provision qui assure plusieurs cultures de céréales sans qu'on soit obligé de leur fournir une nouvelle dose d'engrais azoté.

Ces considérations ont encore un intérêt plus élevé en ce sens qu'elles dictent nettement dans quelle direction doivent s'engager les pouvoirs publics quand ils sont désireux de favoriser l'agriculture d'une contrée méridionale : rien ne saurait lui être plus avantageux que le bon aménagement des eaux, que la construction de canaux d'irrigation qui permettent l'établissement de prairies dans des sols qui naturellement seraient incapables d'en porter.

CHAPITRE V

COMPOSITION DES CENDRES DES VÉGÉTAUX

Nous venons d'indiquer, dans les chapitres précédents, à quelles sources les plantes puisent le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote nécessaires à la formation de leurs tissus ou à celle des principes immédiats contenus dans leurs cellules; mais ces tissus, ces principes immédiats laissent, à la calcination des parties fixes, des cendres, et l'expérience de la culture a montré que quelques-uns des principes minéraux qui existent dans la plante sont indispensables à son complet développement. L'étude de la nutrition ne serait donc pas complète si nous n'exposions pas ici la composition des cendres des plantes et le mécanisme de l'assimilation des substances minérales. C'est là l'objet du présent chapitre et du suivant.

§ 40. — Détermination des cendres.

La détermination des cendres des végétaux présente plusieurs difficultés sur lesquelles il est bon d'insister.

Les plantes renferment habituellement des sels de chaux à acides organiques qui se décomposent par la calcination et peuvent donner, soit du carbonate de chaux si la température de l'incinération n'est pas très élevée, soit de la chaux vive si on a chauffé jusqu'au point de décomposition du carbonate de chaux.

Quand on aura à déterminer les cendres dans des matières riches en chaux, il sera bon, après que les cendres auront été obtenues, de les mouiller avec une dissolution de carbonate d'ammoniaque concentrée puis de dessécher avant la pesée, de façon à métamorphoser la chaux et la magnésie en carbonates; on pourra recommencer deux ou trois fois l'opération en chauffant au rouge sombre après l'addition du carbonate d'ammoniaque jusqu'à ce que le poids des cendres soit constant.

La présence des chlorures peut encore occasionner des erreurs; ils sont assez volatils pour que leur perte soit sensible si l'incinération a eu lieu à une température élevée; quand il s'agit de doser les cendres dans des végétaux qui renferment une proportion considérable de chlorures, tels que les plantes marines

ou les betteraves, il faudra incinérer à une température aussi basse que possible.

Enfin, la préparation des cendres des grains est toujours difficile : les phosphates qui s'y trouvent fondent aisément, recouvrent d'une couche imperméable à l'air les parcelles de matières non encore brûlées, et la prolongation de l'incinération est sans avantage ; dans ce cas, le mieux est de laisser refroidir la capsule, de laver les cendres avec un peu d'eau distillée qu'on décante dans un verre ; on enlève ainsi les cendres solubles, on dessèche la capsule, puis on recommence l'incinération ; en répétant ces opérations à deux ou trois reprises différentes, on réussit à obtenir des cendres blanches ; on réunit enfin dans la capsule toutes les eaux de lavage, on évapore doucement et on pèse.

Il est bien important de ne jamais entasser dans une capsule de platine une quantité notable de matières végétales, car les phosphates chauffés en présence de matière organique se réduisent aisément, et le platine est attaqué ; la capsule, percée de petits trous, est hors de service.

Préparation des cendres sulfuriques. — Quand la détermination des cendres doit être faite rapidement et qu'on se préoccupe davantage de leur poids que de leur composition, ainsi que cela arrive, par exemple, dans l'analyse des sucres bruts, on mouille la matière à incinérer avec de l'acide sulfurique, puis on chauffe doucement ; on donne seulement un coup de feu à la fin de l'opération pour décomposer les bisulfates. Par cette méthode, on transforme les carbonates et les chlorures en sulfates ; cette substitution de l'acide sulfurique (40) au chlore (35,5) et à l'acide carbonique (22) donne pour les cendres un chiffre trop fort, aussi retranche-t-on un peu arbitrairement du poids des cendres trouvé un dixième.

§ 41. — Quantités de cendres laissées par les divers organes des végétaux.

Le poids des cendres varie avec la nature des organes incinérés, avec leur âge, et naturellement avec leur état de dessiccation.

Cendres dans les feuilles. — D'après Th. de Saussure et M. L. Garreau, la quantité de cendres augmente dans les feuilles avec l'âge des organes incinérés. (*Ann. sciences nat.*, 4^e série, 1860, t. XIII, p. 163.) Ce dernier naturaliste a incinéré dans dix-sept espèces végétales différentes les deux premières feuilles du bourgeon ; puis, quinze jours après l'épanouissement, les deux premières feuilles de l'axe ; puis enfin les deux premières feuilles de l'axe prises le 1^{er} juillet et le 30 septembre : il a vu les quantités de cendres, pour 100 de matière sèche, passer de 7,115 à 7,875, à 8,790 et enfin à 10,08. Les mêmes faits ressortent encore très nettement du dosage des matières minérales fixes contenues dans chaque feuille d'une pousse de l'année recueillie le 30 septembre : on trouve toujours que les feuilles les plus anciennes sont les plus riches en matières minérales. Ainsi, dans un tilleul, la première feuille prise à la base du rameau renfermait, pour 100 de matière sèche, 9,60 de cendres, et la huitième 7,60. Dans un orme,

la feuille la plus ancienne renfermait 16, et la plus jeune 9,50 de cendres. Dans un abricotier, la différence a été encore plus considérable, puisque les cendres ont passé, pour 100 de matière sèche, de 14,38 à 7,65. M. le docteur Zoeller, de son côté, a analysé des feuilles de hêtre provenant du jardin botanique de Munich à différentes périodes de leur développement, tandis que les feuilles cueillies le 16 mai renfermaient après dessiccation une quantité de cendres variant de 4,65 à 5,76; les feuilles prises le 18 juillet en accusaient 7,57, et, le 13 octobre, 10,15. (*Les Lois naturelles de l'agriculture*, par le baron Justus de Liebig, t. II, Appendice.)

M. Garreau a signalé aussi ce fait très intéressant, que dans les végétaux aquatiques submergés, où par conséquent il n'y a pas d'évaporation, les feuilles les plus anciennes sont encore les plus chargées de cendres; la différence est souvent considérable : habituellement de moitié entre les feuilles de la région moyenne de l'axe et celles de la partie supérieure, elle peut être parfois du triple.

Th. de Saussure avait montré que les feuilles des arbres verts, qui évaporent moins que celles des arbres à feuilles caduques, renferment moins de cendres; toutefois cette quantité va en augmentant avec l'âge, et cela dans une proportion assez considérable.

Cendres dans le bois. — Quand on incinère le bois en distinguant l'écorce, l'aubier et le cœur, on trouve des quantités de cendres très différentes. Ainsi, d'après Th. de Saussure, 1000 parties de bois de chêne sec séparé de l'aubier renfermeraient seulement 2 de cendres; l'aubier en donnerait 4, et l'écorce des troncs de chêne précédents, 60; 1000 parties de tronc écorcé de peuplier renfermeraient 8 de cendres, tandis que l'écorce en donnerait 72.

Nous avons eu nous-même occasion de vérifier le fait. Ainsi nous avons trouvé 0,287 de cendres pour 100 de cœur de chêne, 0,550 de cendres pour 100 d'aubier du même chêne; tandis que l'écorce renfermait, sur 100 parties, 5,637, quantité vingt fois et dix fois plus forte que celles qu'on trouve dans le cœur et dans l'aubier.

Cendres dans les racines. — Les quantités de cendres contenues dans les racines sont, en général, plus faibles que celles fournies par les organes aériens. Ainsi le professeur Johnston a trouvé que, pour 1 kilogramme de matière sèche, les racines de turneps fournissaient 80 de cendres et les feuilles 130; les tubercules de pommes de terre 40, et les feuilles 180; les racines de tabac 70, et les feuilles 230. M. Garreau a remarqué que les cendres diminuaient dans les racines terrestres avec l'âge : ainsi les fibrilles âgées de topinambour fournissaient 12,70 de cendres, tandis que les jeunes en donnaient 15,90. On trouvait des résultats analogues pour le *Ribes rubrum* et le *Mercurialis annua*; mais le fait devenait encore plus saillant quand il était observé sur des racines de noyer : une jeune racine de 5 10 de millimètre de grosseur laissait 4,30 de cendres, et une racine de 1 décimètre de grosseur, 1,56 seulement.

Dans les betteraves, la recherche des cendres a un grand intérêt, car on sait que les matières salines qui s'y rencontrent empêchent la cristallisation du sucre.

Habituellement, les racines de betterave à l'état normal renferment par kilogramme 6 grammes de cendres; mais quand les betteraves ont été amendées avec les engrais chimiques, cette quantité peut atteindre 8 grammes.

Cendres dans les tiges. — Les tiges des plantes vertes renferment plus de cendres que l'aubier et le bois; les proportions s'élèvent facilement à 1/100 des plantes vertes et à près de 1/10 des plantes sèches. Si l'on étudie la manière dont varient les cendres à mesure que la plante devient plus âgée, il importe, pour se mettre à l'abri des erreurs, de tenir compte de l'humidité des parties incinérées et de l'augmentation de la matière organique qui a lieu pendant la végétation. Si l'on dose simplement sur les plantes normales, il semble au premier abord que la quantité de cendres augmente : c'est ainsi que Th. de Saussure a trouvé 16 grammes de cendres dans 1 kilogramme de fèves vertes, le 23 mai, et que cette proportion avait atteint 20 grammes le 23 juin; dans un kilogramme de tournesol vert, le 10 juillet, on avait trouvé 13 grammes de cendres; la proportion était devenue 23 grammes à la fin de septembre, au moment de la maturité. Mais cette augmentation n'est pas réelle, elle est due à la dessiccation qui s'est opérée dans la plante entière, et, si l'on fait les dosages non plus sur les plantes vertes, mais bien sur les plantes sèches, on trouve que la proportion de cendres a diminué au contraire. Le 23 mai, 1 kilogramme de fèves sèches renfermait 150 grammes de cendres, et seulement 122 grammes le 22 juin; 1 kilogramme de tournesol sec donnait 187 grammes de cendres le 23 juillet, et seulement 163 grammes à l'époque de la maturité. Cette diminution est toutefois purement relative, et la quantité réelle de cendres contenue dans la plante entière augmente au contraire jusqu'à la maturité; mais les principes hydrocarbonés détruits au moment de la calcination augmentent encore davantage, et la proportion centésimale de cendres se trouve ainsi plus faible : c'est ce qui apparaît très nettement dans le mémoire de M. Isid. Pierre sur le colza (*Étude sur le colza*, dans *Ann. de chim. et de phys.*, 1860, t. XL, p. 151). La richesse en principes minéraux des sommités des rameaux portant leurs fleurs ou leurs siliques pleines éprouve une diminution sensible pendant tout le cours de la végétation, puisque 1 kilogramme de matière sèche renferme, le 22 mars, 102 grammes de cendres, et seulement 75 grammes le 20 juin; et cependant, si l'on détermine la quantité de cendres laissées par la récolte d'un hectare, on trouve que la proportion due aux sommités des rameaux est de 21 kilogrammes au 22 mars, et de 377 kilogrammes le 20 juin.

Cendres dans une plante entière. — Dans un travail publié il y a quelques années, nous avons cherché, M. Breal et moi, comment variait la proportion de cendres dans une plante entière pendant toute la durée de sa croissance; nous donnerons comme exemple les chiffres suivants trouvés pour le *Sinapis alba* (1).

(1) *Ann. agron.*, t. VII, p. 161.

	Cendres	
	Dans 100 de matière sèche.	Dans la plante entière moins la racine.
	gr.	gr.
29 mai.	21,3	0,127
6 juin.	21,5	0,358
16 juin.	17,2	1,893
24 juin.	15,1	1,630
12 juillet.	13,6	1,800
31 juillet.	11,6	2,880
11 août.	8,9	2,150

On voit facilement que bien que la proportion centésimale des cendres aille en diminuant, l'assimilation est cependant continue; mais l'élaboration de la matière combustible croissant plus vite que l'assimilation des matières minérales, la quantité que contiennent 100 parties de matière sèche est de plus en plus faible.

La diminution observée du 31 juillet au 11 août dans la quantité de cendres est due évidemment à la chute d'un certain nombre d'organes arrivés à maturité.

§ 42. — Nature des substances qui constituent les cendres.

Les substances minérales que renferment les végétaux sont assez nombreuses. Les analyses précises exécutées sur les végétaux terrestres ont montré qu'on rencontre dans leurs cendres, en quantités notables, de la chaux et de la magnésie; la potasse y existe en proportions souvent considérables, elle est même habituellement retirée des cendres des plantes terrestres; et les anciens chimistes la désignaient sous le nom d'*alcali terrestre*, par opposition à la soude, qu'ils appelaient *alcali marin*, parce qu'ils l'extraient des plantes marines.

Les importants travaux de M. Péligot ont montré que la soude est beaucoup moins abondamment répandue dans les végétaux qu'on ne le croyait généralement. On sait qu'on apprécie habituellement la soude par différence, c'est-à-dire qu'après avoir déterminé la somme des alcalis et dosé la potasse par le chlorure de platine, on considère comme due à la soude la différence entre la somme des alcalis et la potasse. Mais on conçoit que si l'on a laissé, ce qui arrive souvent, de la magnésie dans les alcalis, on peut croire à la présence de la soude, tandis qu'il n'y aura qu'une simple erreur d'analyse.

M. Péligot veut d'abord qu'on s'assure que la soude existe en effet dans les cendres étudiées, il propose, pour caractériser cet alcali d'éliminer toutes les bases alcalino-terreuses au moyen de la baryte, d'enlever l'excès de celle-ci par un courant d'acide carbonique, de saturer la liqueur filtrée après ébullition par de l'acide azotique, et de faire cristalliser par refroidissement la plus grande quantité de l'azotate de potasse. L'azotate de soude, qui est, comme on sait, beaucoup plus soluble, se trouve dans l'eau mère qui accompagne les cristaux de nitre. C'est donc dans celle-ci que la soude doit être cherchée.

Dans ce but, cette liqueur est traitée par l'acide sulfurique. Le résidu provenant de cette évaporation est fortement calciné, de manière à avoir les sulfates à l'état neutre. On reprend par l'eau et l'on sépare à l'état cristallisé la majeure partie du sulfate de potasse; l'eau mère qui reste après la séparation de ces cristaux est abandonnée à l'évaporation spontanée. Si les cendres sont exemptes de soude, elles fournissent des prismes transparents de sulfate de potasse; dans le cas contraire, le sulfate de soude, qui cristallise le dernier, apparaît sous forme de cristaux qui s'effleurissent peu à peu et qui, par leur aspect mat et farineux, se distinguent facilement des cristaux limpides de sulfate de potasse. Quelquefois, la soude a été cherchée dans le résidu insoluble dans l'eau; elle pouvait en effet s'y rencontrer sous forme de silicate. Pour l'en séparer, on a fait usage d'acide sulfurique concentré qu'on a ensuite précipité par l'eau de baryte. Le résultat a toujours été négatif.

En soumettant à ce mode particulier de recherches un certain nombre d'échantillons de cendres provenant de végétaux variés, M. Péligot n'a pas trouvé de soude dans les cendres provenant des produits végétaux qui suivent :

Le blé (grain et paille examinés séparément); l'avoine (*id.*); la pomme de terre (tubercules et tiges); les bois de chêne et de charme; les feuilles de tabac, de mûrier, de pivoine, de ricin; les haricots, le souci des vignes, la pariétaire, le *Gypsophila pubescens*; le panais (feuilles et racines).

Il est à remarquer qu'en incinérant des plantes sans avoir la précaution de les laver d'abord, on constate de la soude dans les cendres; mais celle-ci paraît être surtout à l'état de sel marin disséminé sur les organes extérieurs, et ne pas faire partie intégrante de la plante elle-même.

Un certain nombre de plantes appartenant à la famille des atriplicées et des chénopodées renferme au contraire de la soude; on a trouvé cette base dans les cendres de l'arroche, de l'*Atriplex hastata* du *Chenopodium murale*, de la tétragone, ainsi que dans les betteraves.

L'élégant procédé de l'analyse spectrale a permis de constater dans un certain nombre de végétaux la présence de la lithine. Cette base a été signalée dans la cendre de tous les bois de l'Odenwald, dans les potasses commerciales de la Russie, dans les cendres des feuilles de vigne, de tabac, de raisin, dans les cendres des céréales du Palatinat. On a trouvé aussi des traces d'un nouvel alcali, l'oxyde de rubidium, dans les cendres d'un grand nombre de variétés de tabac; on l'a rencontré encore dans le café et dans la betterave (*Ann. de chim. et de phys.*, 1863, t. LXVII : *Recherches du rubidium et du cæsium dans les eaux minérales, les végétaux et les minéraux*, par M. L. Grandcau). Si la présence de l'alumine dans les cendres est douteuse, celle des oxydes de fer et de manganèse y est parfois très évidente, et il est rare de brûler du bois, des fruits ou des feuilles, sans voir les cendres présenter une teinte rougeâtre due à l'oxyde de fer, ou verdâtre qu'il faut attribuer à la formation de petites quantités de caméléon minéral (manganate de potasse). MM. Nobb Erdmann et Schrader ont reconnu cependant que la lithine exerce une influence fâcheuse sur certaines espèces notamment sur le *Fagopyrum*, *Tartaricum* (Sarrazin). (1).

(1) *Ann. agron.*, t. 1, p. 172.

Le manganèse et le fer paraissent être plus abondants encore dans les plantes aquatiques. Le docteur Zoeller a constaté la présence de ces métaux dans les *Nymphaea caerulea*, *dentata* et *lutea*, l'*Hydrocharis Humboldti*, le *Nelumbium asperifolium*, le *Victoria regina*, qui renferment du manganèse dans le pétiole, et du fer, surtout dans les feuilles.

Le zinc même existe, dit-on, dans les cendres de quelques espèces végétales, et l'on assure que le *Viola calaminaria* est si caractéristique pour les gisements de zinc des environs d'Aix-la-Chapelle, que ses stations ont servi de guide dans la recherche des mines de ce métal (*Les lois naturelles de l'agriculture*, t. II, p. 66) (1). L'oxyde de zinc exerce également une action avantageuse sur le développement de l'*Aspergillus niger* (Raulin), mais en revanche il fait périr un grand nombre d'espèces végétales (*Ann. agron.*, t. X, p. 47).

M. Meyer, de Copenhague, affirme que les graines de froment et de seigle renferment, comme élément constant, une trace de cuivre, et M. L. Grandeau a reconnu par l'analyse spectrale que le cuivre se rencontre, en effet, dans les cendres de plusieurs espèces végétales. Il n'est pas bien démontré, toutefois, que ce métal n'a pas été entraîné dans les cendres par les flammes du gaz léchant d'abord des brûleurs de cuivre.

Au nombre des acides, on trouve dans les plantes : l'acide silicique, où il affecte quelquefois la forme de concrétions transparentes ayant quelque analogie avec l'opale, ainsi que l'a annoncé M. Guibourt, qui a consacré, il y a quelques années, une notice intéressante à l'étude du tabaschir, excroissance siliceuse du grand bambou des Indes (*Journal de pharmacie*, mars, avril 1855). L'acide sulfurique est toujours en bien plus faible proportion dans les cendres ; on sait, en effet, que les sulfates ne persistent pas longtemps dans la terre arable, mais y sont rapidement réduits, puis amenés à l'état de carbonates.

Depuis que l'attention des chimistes s'est portée sur l'acide phosphorique, on n'a pas tardé à le trouver en quantité notable dans diverses parties des végétaux, et notamment dans les graines. L'acide carbonique se trouve aussi dans les végétaux : ce serait cependant une faute grave que de supposer que tous les carbonates qu'on rencontre dans les cendres préexistaient dans les plantes ; ces carbonates proviennent surtout de la décomposition par le feu des acides organiques unis dans la plante avec les alcalis.

Le chlore et l'iode se trouvent dans les végétaux unis aux métaux alcalins, et l'on sait qu'aujourd'hui encore, l'iode employé dans les arts est presque entièrement extrait des cendres des plantes marines, où il ne se rencontre cependant qu'en faible quantité.

Si l'on compare les unes aux autres les analyses de cendres provenant de végétaux d'une seule et même espèce ayant crû sur des sols différents, on trouve que la composition des cendres ne varie que médiocrement, surtout si l'analyse porte sur des végétaux cultivés qui se sont développés sur des sols toujours amendés à peu près d'une façon analogue : c'est ainsi qu'en faisant l'analyse de la cendre de la paille de froment, on trouve toujours qu'elle renferme de 65 à

(1) Cette observation, qui aurait sans doute besoin de confirmation, est attribuée à Alex. Braun.

70 pour 100 de silice (1). En examinant les cendres de la graine de cette même céréale, on les trouve encore à peu près uniquement formées de phosphates ; mais les différences deviennent plus sensibles quand on examine des plantes entières venues sans culture sur des sols de diverses origines.

La composition des cendres présente cependant une constance suffisante pour qu'on ait admis que les plantes de certaines familles ont une préférence marquée pour tel ou tel principe minéral.

C'est ainsi que les analyses de MM. Malaguti et Durocher établissent que les graminées, les fougères et les bruyères renferment des quantités considérables de silice. Cet acide diminue considérablement dans les légumineuses, tandis qu'au contraire la potasse s'y accumule, et que, dans des terrains calcaires, la chaux y atteint une proportion énorme, analogue à celle qui existe dans les arbres (Voyez, dans le travail de MM. Malaguti et Durocher, *Ann. de chim. et de phys.*, 2^e série, 1838, t. LIV, le tableau D, p. 296).

Les anciens agronomes ont attaché à la composition des cendres des végétaux une importance que nous ne leur accordons plus aujourd'hui. La théorie de la restitution au sol des substances enlevées par les récoltes, basait la nature et la quantité des engrais nécessaires à chaque culture, sur la composition minérale des récoltes dont la détermination prenait dès lors un intérêt de premier ordre.

Aujourd'hui nous déduisons la nature des engrais à fournir, non plus de la composition des cendres des plantes, mais de celle du sol qui doit les porter, refusant absolument d'ajouter des phosphates ou des sels de potasse à des sols qui en sont fournis en quantités telles que les additions de ces matières n'auraient aucune influence sur les récoltes.

Il ne nous a donc pas paru utile de transcrire ici les nombreuses analyses de cendres qui ont été faites depuis quarante ans ; nous nous bornerons à placer sous les yeux du lecteur les tableaux indiquant la richesse des cendres de différents organes en certains principes minéraux déterminés.

On reconnaîtra, à la lecture des tableaux ci-joints, que les phosphates dominent singulièrement dans les graines ; que les substances insolubles dans l'eau pure, mais soluble dans l'eau chargée d'acide carbonique, telles que le carbonate de chaux ou la silice, existent en proportions très notables dans les feuilles, et qu'elles y augmentent avec l'âge ; qu'il en est de même dans les bois ; mais qu'au contraire il est impossible d'établir rien de précis quant à la composition des cendres des tiges herbacées ou des racines.

(1) Nous disons *paille* et non *tige*, car les jeunes feuilles et les jeunes tiges renferment moins de silice (Voyez Isidore Pierre, *Mémoire sur le développement du blé*, Paris, 1866).

TABLEAU N° 1. — Richeesse en phosphates de 100 parties de cendres.
(Analyses de M. Berthier.)

DÉSIGNATION des phosphates.	GRAINS A L'ÉTAT NATUREL.												GRAINS DÉCORTIQUÉS.		
	Blé blanc dit Bléchartrain.	Blé d'Égypte.	Seigle.	Orge.	Avoine.	Riz de la Camargue.	Mais de Nemours.	Haricots de Soissons.	Haricots dageolets.	Pois verts.	Lentilles de la grande espèce.	Montarde Blanche.	Gran.	Orge perlé.	Riz de la Caroline.
Phosphate de potasse. . .	50,00	51,70	48,50	52,50	7,50	24,10	41,50	42,70	76,80	66,70	61,70	26,30	50,00	36,60	57,00
Phosphate de chaux. . . .	22,00	20,00	29,20	15,00	16,50	24,10	18,50	8,40	9,70	22,20	6,50	39,80	15,40	25,00	21,00
Phosphate de magnésie. .	28,00	28,30	18,30	23,00	20,00	24,10	38,00	14,30	6,40	6,60	19,60	23,90	33,10	21,60	20,00
Phosphate de manganèse. .															
Total des phosphates. . .	100,00	100,00	96,00	92,50	44,00	72,30	98,00	65,40	92,90	95,50	87,80	90,00	98,50	83,20	98,00

TABLEAU N° 2. — Richeesse en carbonate de chaux et en silice de 100 parties de cendres.
(Analyses de M. Berthier et de M. Zoeller.)

SUBSTANCES dosées.	BOIS.		FEUILLES VIVANTES.					FEUILLES MORTES.					SUBSTANCES dosées.				
	Mirrèr Moretti.	Pin de Bordeaux.	Mirrèr Lhou.	Pin de Bordeaux.	Vigne de Nemours.	Mais à bec. de Nemours.	Mirrèr Lhou.	Pin de Bordeaux.	Moyr de Nemours.	Marronnier d'Inde.	Platane.	Peuplier suisse.	Vigne de Nemours.	Carbonate de chaux.	Silice.	Acide phosphorique.	
Carbonate de chaux.	47,93	68,74	53,00	65,82	51,00	41,00	53,73	84,90	73,47	48,30	54,00	84,80	62,62	17,55	47,25	60,80	60,94
Silice.	6,43	27,70	2,60	2,60	10,20	33,00	26,19	1,60	4,74	24,00	7,00	7,00	6,63	1,19	13,37	20,68	24,37
Total.	47,93	75,17	80,70	68,42	61,20	44,00	79,92	86,50	77,91	72,80	54,00	91,80	69,25	24,21	5,18	3,48	1,95

TABLEAU N° 3. — Composition des cendres de quelques racines et tubercules.

SUBSTANCES DOSÉES.	RACINE de garance.	TUBERCULES.		
		Topinam- bours.	Pommes de terre.	Oignons.
Carbonate de potasse et de soude.	31,11	31,50	42,43	21,60
Chlorure de potassium.	3,14	7,50	4,00	2,20
Chlorure de sodium.	"	"	"	"
Sulfate de potasse.	3,93	6,00	2,80	4,00
Phosphate de potasse.	"	30,00	34,70	"
Carbonate de chaux.	35,01	"	2,80	12,00
Carbonate de magnésie.	4,13	"	"	10,00
Phosphate de chaux.	9,71	16,50	6,78	38,00
Phosphate de magnésie.	"	8,50	2,50	"
Phosphate de fer.	5,09	"	1,70	"
Silice.	7,88	"	2,50	"

SUBSTANCES DOSÉES.	POMMES de terre.	BETTERAVES champêtres.	NAVETS.	TOPINAM- BOURS.
Acide sulfurique.	7,11	1,6	1,6	2,2
Acide phosphorique.	11,3	6,0	6,1	10,8
Chlore.	2,7	5,2	2,9	1,6
Chaux.	1,8	7,0	10,9	2,3
Magnésie.	7,4	4,4	4,3	1,8
Potasse.	51,5	39,0	33,4	44,5
Soude.	traces	6,0	4,1	traces
Silice.	5,6	8,0	6,4	13,0
Oxyde de fer.	0,5	2,5	1,2	5,2
Charbon, humidité, perte.	0,7	4,2	5,5	7,6

TABLEAU N° 4. — Analyses de différentes tiges (100 parties de cendres).
(Analyses de M. Berthier.)

SUBSTANCES DOSÉES.	VIGNES de Nemours.	MILLET à épis.	LIN.	LIN ROUI.	ROSEAUX de Nemours.	PAILLE de froment.	PAILLE de seigle.	POIN de Nemours.	LUZERNE de Nemours.	HARICOTS du Canada.	CANNES à sucre.
Carbonate de potasse et de soude.	16,40	29,40	32,68		"	"	18,50	12,20	14,44	15,52	"
Chlorure de potassium.	2,20	1,10	1,64		0,78	2,90	3,00	3,64	1,90	1,94	"
Sulfate de potasse.	4,40	4,00	6,68		3,40	0,30	5,00	1,30	2,66	1,94	"
Phosphate de potasse.	"	2,00	"		"	"	0,40	"	"	"	"
Silicate de potasse.	"	"	"		4,00	"	"	"	"	"	"
Chaux.	"	"	"		"	15,70	"	"	"	"	10,00
Carbonate de chaux.	49,82	8,20	33,04		6,00	"	0,50	22,62	64,26	63,38	"
Carbonate de magnésie.	3,85	"	3,54		"	"	"	7,29	6,07	"	"
Acide carbonique.	"	"	"		1,00	"	"	"	"	"	"
Oxyde de fer.	"	"	"		"	2,60	"	"	"	"	"
Phosphate de chaux.	15,70	7,40	20,06		6,60	9,00	9,10	11,31	8,43	5,80	"
Phosphate de magnésie.	"	"	"		"	"	"	"	"	2,17	"
Phosphate de fer.	1,83	0,90	"		"	"	"	1,64	"	1,45	"
Phosphate de manganèse.	"	"	"		"	"	"	"	"	"	"
Acide phosphorique.	"	"	"		"	1,20	"	"	"	"	"
Silice.	5,80	43,20	2,36	Le lin roui ne contient plus de substances minérales.	78,22	73,90	61,50	39,80	2,24	5,80	68,00

Nous rappellerons que les analyses des cendres végétales sont très nombreuses, et que les recueils de chimie en renferment de très intéressantes; outre celles qu'a donné M. Boussingault des végétaux récoltés en Alsace et qui sont insérées dans son *Économie rurale*, M. Eugène Marchand a analysé avec le plus grand soin les plantes de grande culture du pays de Caux (*Ann. de chim. et de phys.*, 4^e série, t. VIII, p. 320). Enfin Malaguti et Durocher se sont livrés à une étude très étendue de la composition minérale d'un grand nombre d'espèces végétales (*Ann. de chim. et de phys.*, 3^e série, t., LIV., p. 257).

Il y a quelques années un agronome éminent, M. P. de Gasparin, a donné, dans les *Mémoires de la Société centrale d'agriculture* (année 1875, p. 267), un travail d'où il résultait que les cendres de blé renfermeraient parfois une quantité énorme d'oxyde de fer s'élevant parfois jusqu'au cinquième de leur poids.

M. F. Meunier, qui travaillait à cette époque au laboratoire de physiologie végétale du Muséum, a repris ces analyses; il a dosé l'oxyde de fer par trois méthodes différentes qui ont donné des résultats concordants, mais toujours très faibles, ne se montant qu'à 1,11 pour 100 de cendres.

Voici, au reste, la composition des cendres de blé, due à différents chimistes, on voit que l'analyse de M. de Gasparin diffère tellement de celles de tous les autres observateurs que ses résultats peuvent être considérés comme tout à fait fortuits (*Ann. agron.*, t. VI, p. 259).

Composition des cendres du grain de blé.

MATIÈRES DOSÉES.	BOUSSINGAULT.	FRÉSENIUS.	DE GASPARIN.	F. MEUNIER.
Silice.	1,31	»	2,06	1,85
Acide phosphorique.	48,30	49,21	38,21	49,34
Acide sulfurique.	1,01	»	traces	traces
Chlore.	traces	»	»	»
Potasse	30,12	33,84	23,50	28,58
Chaux	1,00	3,00	2,90	3,06
Magnésie.	16,16	13,54	12,68	15,37
Sesquioxyde de fer	»	0,31	20,68	0,70
Oxyde de Manganèse.	»	»	»	0,09
Total.	100,00	99,96	100,00	98,99

Tout récemment enfin, MM. Lawes et Gilbert ont consacré un travail très étendu à la détermination de la composition des cendres des pailles et des grains de blé récolté à Rothamsted dans des conditions de fumure très variées. (Voy. *Ann. agron.*, t. X, p. 484. — Le mémoire original est publié dans *The Journal of the Chemical Society*, t. XIV. Août 1884.)

CHAPITRE VI

ASSIMILATION DES SUBSTANCES MINÉRALES
PAR LES PLANTES

§ 42. — De l'état des substances minérales dans les végétaux.

Pour arriver à pénétrer le mécanisme de l'assimilation des substances minérales par les plantes, il ne nous suffit pas d'avoir rappelé les travaux des analystes qui ont établi la composition des cendres et de les avoir groupées de façon à montrer que des organes semblables renfermaient souvent des principes identiques ; il nous faut aller plus loin, et chercher à déterminer à quel état ces principes minéraux se trouvent contenus dans les plantes.

Les essais auxquels nous nous sommes livrés sur cette question nous ont conduit à distinguer les substances minérales engagées dans de véritables combinaisons ou retenues par simple affinité capillaire, de celles qui paraissent déposées par l'évaporation de l'eau chargée d'acide carbonique qui les tenait en dissolution.

Nous passerons successivement en revue les substances minérales les plus abondantes dans les plantes, en cherchant à déterminer l'état sous lequel on les y rencontre.

Potasse. — Elle se rencontre souvent dans les plantes combinée avec les acides végétaux : on la trouve dans les *Rumex Acetosa* unie à l'acide oxalique ; dans les raisins, à l'acide tartrique ; dans les pommes de terre, combinée sans doute avec l'acide citrique ; dans les betteraves, unie à l'acide oxalique et à l'acide malique. Ces combinaisons sont souvent assez abondantes dans les végétaux pour donner lieu à une exploitation fructueuse.

La potasse se rencontre encore dans les plantes unies à l'acide phosphorique, le phosphate de potasse est particulièrement abondant dans les grains ; en outre, plusieurs plantes renferment des quantités notables d'azotate de potasse. MM. Berthelot et André ont insisté récemment sur leur répartition dans plusieurs plantes à divers époques de la végétation (*Comptes rendus*, t. XCIX).

Pendant la calcination le plus grande partie de la potasse passe à l'état de carbonate et c'est à cet état qu'on la tire des cendres des végétaux.

Chaux. — La chaux, comme la potasse, se trouve aussi très souvent combinée avec les acides végétaux, suivant Turpin (*Mémoires sur les Biforines*, 1836) et M. Schleiden (*Beitrag zur Anatom. der Cacteen*, 1839); on la rencontre notamment à l'état d'oxalate. M. Payen a fait de cette question une étude approfondie, et il a reconnu l'oxalate de chaux dans un grand nombre de plantes phanérogames (*Cinquième Mémoire sur le développement des végétaux : Concrétions et incrustations minérales*, par M. Payen, dans *Mémoires des savants étrangers*). « On rencontre ordinairement, dit-il, l'oxalate de chaux en cristaux transparents, irradiés ou groupés en sphéroïdes, hérissés de pointes, appartenant en apparence à des rhomboédres, des octaédres ou des prismes rectangulaires, et terminés soit par des pyramides à quatre faces, soit par des faces irrégulières ou gradins anguleux. Ces cristaux ne sont pas régulièrement déterminables. » L'oxalate de chaux a été reconnu dans les feuilles des *Citrus* et *Limonium*, dans celles du *Juglans regia*, du *Juglans nigra* et du *Juglans cinerea*. M. Payen assure avoir trouvé, dans un cactus desséché, 7 p. 100 du poids net en oxalate de chaux.

Un grand nombre d'auteurs s'est occupé des cristaux d'oxalate de chaux contenus dans les plantes; on trouve l'énumération de ces travaux dans un mémoire très intéressant publié, il y a quelques années, par M. J. Vesque (1).

Ce botaniste distingué remarque que dans les végétaux on rencontre l'oxalate de chaux sous les deux variétés que présente le sel préparé dans les laboratoires, tantôt il est cristallisé dans le système prismatique carré droit, et il renferme alors six équivalents d'eau, tandis que lorsqu'il appartient au système clinorhombique il ne contient que deux parties d'eau.

D'après M. Vesque, les formes diverses que présentent les cristaux naturels, sont dues à la nature du milieu dans lequel a lieu la cristallisation, et, en effet, en faisant varier celui-ci, l'auteur a pu reproduire artificiellement plusieurs des formes les plus fréquentes dans les plantes, c'est ainsi que les raphides se forment en présence de la glycose et de la dextrine, tandis qu'on obtient de gros cristaux irréguliers à arêtes vives et des prismes obliques simples dans des dissolutions nettement acides, tandis qu'enfin dans de l'eau distillée l'oxalate de potasse et le chlorure de calcium placés séparément dans de petits dialyseurs donnent, par leur rencontre, les prismes hexagonaux obliques ou les octaédres carrés très plats, dits en enveloppe de lettre, qui sont communs dans les végétaux.

La chaux se rencontre souvent dans les plantes à l'état de carbonate, et il suffit de placer des fragments de feuilles entre les deux lames de verre du microscope et d'y faire pénétrer quelques gouttes d'acide chlorhydrique pour voir le carbonate de chaux se dissoudre, et le gaz enfermé dans les méats presser et entourer les cellules; cette expérience s'exécute facilement sur les feuilles du noyer ou des pommes de terre.

La présence du carbonate de chaux, en grande quantité dans le sol, exerce une influence marquée sur la distribution des espèces végétales; un certain nombre d'entre elles ne s'accoutume pas d'un sol dans lequel les eaux dissolvent

(1) *Ann. des sciences natur. (Botan.)*, 5^e série, t. XIX, p. 300.

facilement le carbonate de chaux, et il suffit de parcourir les environs de Paris pour être convaincu que les bruyères, les ajoncs, les châtaigniers sont abondants dans les terrains siliceux, tandis qu'on rencontre des labiées et des buis dans les parties calcaires.

Parmi les espèces arborescentes, le châtaignier est particulièrement sensible à la présence du carbonate de chaux dans le sol où il végète. D'après M. Chatin, quand la terre renferme 3 p. 100 de chaux, le châtaignier disparaît en même temps que les fougères impériales et les bruyères. Quelquefois la disparition précède même cette limite, et, dans tous les cas, sa croissance se ralentit beaucoup.

MM. Fliche et Grandeau ont établi que le pin maritime, bien qu'il renfermât dans ses cendres, lorsqu'il végète régulièrement, une quantité notable de chaux, ne supporte pas cependant les terrains calcaires. Quand le pin maritime y est semé, il s'y développe mal, et la quantité de chaux que ses cendres renferment devient énorme, en même temps que baissent les proportions de tous les autres éléments, et il semble résulter des discussions auxquelles se sont livrés plusieurs botanistes distingués, que les plantes qui paraissent affectionner les terrains siliceux, n'y recherchent pas tant la silice qu'elles ne fuient le calcaire qui nuit à leur développement.

On sait, d'autre part, que l'addition de cet élément a souvent une influence décisive sur la récolte de certaines plantes de grande culture qui, cependant, ne renferment pas sensiblement de chaux; on sait que, grâce à l'emploi de la chaux, la culture du froment est devenue possible dans des sols qui, autrefois, ne portaient que des seigles.

Silice. — La silice ne se rencontre plus dans les plantes engagées dans des combinaisons nettement définies comme la potasse ou la chaux, elle s'y trouve à deux états différents: tantôt elle semble engagée dans une combinaison assez fixe pour résister à l'action des réactifs faibles; tantôt, au contraire, ceux-ci la dissolvent parfaitement.

On a d'abord étudié l'état de la silice dans des tiges de diverses natures. Elles ont été soumises à l'action d'une dissolution de soude ou de potasse étendue marquant 1 degré au pèse-sel et bouillante; on avait soin de renouveler l'eau à mesure qu'elle s'évaporait; ou terminait l'opération par un lavage à l'acide chlorhydrique étendu pour enlever l'alcali, et enfin par des lavages à l'eau pure jusqu'à disparition de la réaction acide. On a ainsi trouvé les résultats suivants:

Silice contenue dans différentes tiges avant et après les lavages avec une dissolution de potasse étendue et bouillante.

Noms des plantes en expérience.	Silice dans 100 de cendres de la plante normale.	Silice dans 100 de cendres de la plante lavée.
Seigle en fleur (mai 1865)	38,2	68,00
Blé vert non encore en fleur (mai 1865)	40,0	87,00
Paille de froment (août)	70,0	93,00
Bois de chêne	21,0	0,00
Bagasse de canne à sucre	67,6	25,92
Bagasse de canne à sucre	67,6	53,42

On voit que les tiges des céréales ont abandonné à la lessive de soude et à l'acide chlorhydrique étendu, employés dans les lavages, presque toutes les matières minérales autres que la silice, mais que celle-ci au contraire a persisté jusqu'à former presque la totalité des cendres. On voit en même temps que le bois de chêne a au contraire perdu toute la silice qu'il renfermait, et que la bagasse de canne à sucre a perdu une quantité notable de cette silice, qui a disparu plus rapidement que les autres éléments. Comme les expériences ont été tout à fait comparatives, qu'elles ont duré le même temps et qu'on a employé les mêmes dissolutions, on peut conclure que la silice se trouve dans les pailles des céréales, dans le bois et dans la canne à sucre, sous des états très différents. Est-on autorisé à admettre que la silice est combinée avec la cellulose dans un des cas, ou au moins retenue par *affinité capillaire*, tandis qu'elle ne l'est pas dans l'autre ? ou bien peut-on croire que cette silice qui affecte, comme chacun sait, de nombreux états isomériques, est dans la paille d'une nature différente de celle qu'elle affecte dans le bois ou dans la bagasse ? Nous penchons pour la première hypothèse, car cette silice se dissout très facilement dans la potasse ou dans la soude en dissolution un peu plus concentrée ; si l'on attaque la paille avec une lessive marquant 4 à 5 degrés, il ne reste bientôt plus de cendres dans la fibre désagrégée qui résiste à cette action.

Toutefois il est vraisemblable que l'évaporation, dans les feuilles, de l'eau chargée d'acide carbonique favorise le dépôt de la silice, qui est ensuite retenue par la cellulose des céréales plus énergiquement que par les tissus des autres végétaux.

En examinant, en effet, la quantité de silice contenue dans les cendres des feuilles et dans celles des tiges, et notamment des entre-nœuds, M. Isidore Pierre nous a fourni les éléments d'une comparaison des plus intéressantes : la quantité de silice va en augmentant assez régulièrement des feuilles supérieures aux inférieures ; les plus anciennes sont les plus chargées de silice. Ainsi on trouve que, sur 100 de cendres, les premières feuilles, à partir du sommet, renferment 68 p. 100 de silice ; les deuxièmes, 60 ; les troisièmes, 63 ; les quatrièmes, 67 ; les cinquièmes, 75 : quantités, comme on le voit, considérables et qui s'accroissent régulièrement, à une exception près. Or, les entre-nœuds, les tiges, ne renferment qu'une proportion de silice moindre : car les premiers entre-nœuds donnent, sur 100 de cendres, 50 de silice ; les seconds, 27 ; les troisièmes, 20 ; les quatrièmes, 20. Ces résultats s'accorderaient bien avec l'idée que si une partie de la silice est combinée avec la matière végétale, l'autre a été d'abord simplement déposée par évaporation ; les tiges, en effet, ne paraissent pas avoir une puissance évaporatoire comparable à celle des feuilles, et dès lors la silice qu'y s'y accumule à mesure qu'elles avancent en âge n'y atteint jamais une quantité aussi grande que dans les feuilles.

La paille d'avoine renferme moins de silice que celle du blé, de plus la quantité dosée varie avec l'âge de la plante ; c'est ce qui résulte nettement des chiffres suivants constatés en 1880 (*Ann. agron.*, t. VII, p. 216) :

CHAUMES D'AVOINE (1880).

	Cendres dans 100 de matières sèches.	Silice dans 100 de cendres.	Silice dans 100 de matières sèches.
6 juillet	7,27	33,95	2,46
12 id.	6,91	31,95	2,19
18 id.	6,00	42,92	2,57
6 août	6,68	43,79	2,92

Dans une année tardive comme en 1879, on n'a trouvé dans les chaumes au moment de la moisson que 38,19 de silice dans 100 de cendres, tandis qu'en 1878, où la maturation a été plus rapide, 100 de cendres renfermaient 54,48 de silice.

On rencontre dans les feuilles des poids de silice très variables : tandis que cet acide est très abondant dans les fougères, il n'existe qu'en proportion plus faible dans les feuilles d'autres plantes, bien qu'il s'y accumule à mesure que leurs feuilles vieillissent. Il importait donc de soumettre ces organes aux essais analytiques qui nous avaient donné des résultats importants sur les tiges des céréales, et après nous être procuré des feuilles de diverses provenances, nous les avons fait encore bouillir avec la lessive de soude caustique à 1 degré, en observant les précautions signalées plus haut.

On a obtenu ainsi les résultats suivants :

Détermination des quantités de cendres et des quantités de silice

qui existent dans 100 grammes de feuilles normales séchées à l'air, et dans 100 grammes des mêmes feuilles lavées avec de la soude caustique étendue et bouillante.

ESPÈCES auxquelles appartiennent les feuilles incinérées.	CENDRES		SILICE		SILICE dans 100 de cendres.	
	dans les feuilles normales.	dans les feuilles lavées.	dans les feuilles normales.	dans les feuilles lavées.	de feuilles normales.	de feuilles lavées.
Chêne.	6,40	1,00	0,80	0,00	12,5	0,0
Lilas.	5,00	1,00	0,50	0,03	10,0	3,0
Sapin (<i>Abies Picea</i>).	2,44	2,24	0,26	0,13	10,0	5,0
Marronnier.	7,40	0,80	1,40	0,30	18,0	37,0
Fougère (<i>Pteris aquilina</i>).	12,70	2,60	4,10	1,93	32,3	74,2
Fougère.	12,70	2,70	4,10	1,80	32,3	66,6

La silice paraît donc être dans les feuilles à deux états différents : tandis que celle qui existe dans le chêne cède facilement à l'action de la soude caustique, celle au contraire qu'on trouve dans le marronnier, et surtout dans la fougère commune, résiste beaucoup mieux ; et pendant que les autres éléments sont en partie enlevés par la lessive alcaline, la silice persiste et se trouve en définitive plus abondante dans 100 parties de cendres des feuilles lavées que dans les cendres des feuilles normales.

Phosphates. — Tous les chimistes qui ont dosé à la fois l'azote et les phosphates dans les graines ont été frappés de voir ces deux matières augmenter à peu près parallèlement. Le lecteur qui voudra se reporter au tableau de la page 75 reconnaîtra que les graines, qui sont la partie de l'organisme végétal la plus riche en matières azotées, ont des cendres presque complètement composées de phosphates. Aussi, dans son *Économie rurale*, M. Boussingault s'exprime ainsi : « On aperçoit une certaine relation entre la proportion d'azote et celle de l'acide phosphorique contenus dans les substances alimentaires : généralement, les plus azotées sont aussi les plus riches en acide ; ce qui semble indiquer que dans les produits de l'organisation végétale, les phosphates appartiennent particulièrement aux principes azotés et qu'ils les suivent jusque dans l'organisme des animaux. »

B. Mayer arrive aux mêmes conclusions dans un mémoire important, publié en extrait dans les *Ann. de chimie et de phys.*, 3^e série, 1857, t. LVI, p. 183.

M. Corenwinder, enfin, énonce la même opinion dans son mémoire *Sur les migrations du phosphore dans les végétaux* (1). « Depuis longtemps, dit-il, on a constaté que les bourgeons naissants et les jeunes végétaux sont riches en matières azotées. Celles-ci sont toujours accompagnées d'une proportion relativement considérable de phosphore, et il n'est pas douteux que ces deux éléments sont unis dans le tissu végétal suivant un mode de combinaison encore mystérieux. »

La démonstration de cette combinaison sera faite si l'on reconnaît que l'acide phosphorique, au contact des matières albuminoïdes, ne présente plus ses réactions habituelles. Si nous faisons voir, par exemple, que l'acide phosphorique reste en dissolution, en présence de la chaux, dans une liqueur neutre, nous comprendrons que la matière organique doit intervenir ; si, en lavant des farines, nous entraînon, en même temps que de l'acide phosphorique, de la chaux, et que ces deux éléments restent en présence dans une liqueur limpide sans se précipiter, nous croirons à cette intervention de la matière organique, qui sera encore évidente quand nous montrerons que l'acide phosphorique combiné avec des bases qui forment avec lui des sels solubles résiste cependant à l'action de lavages multipliés.

Or, si l'on râpe des tubercules de pommes de terre, puis qu'on passe le jus au travers d'un linge, et enfin qu'on filtre, il sera aisé de constater dans le liquide la présence de la chaux et de l'acide phosphorique, qui restent en dissolution tant que la matière albuminoïde est soluble ; mais si l'on coagule celle-ci par la chaleur, une grande partie du phosphate de chaux se précipite, et si on lave la matière albuminoïde jusqu'à ce qu'elle ne cède plus rien à l'eau, puis qu'on la calcine, on trouve des cendres à peu près exclusivement composées de phosphate de chaux.

Ainsi ce sel est resté en dissolution tant que la matière albuminoïde a été maintenue liquide ; mais il se précipite au contraire avec celle-ci, et devient en partie insoluble aussitôt que la coagulation a lieu, en participant toujours de

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 1860, t. LX, p. 105, et *Ann. des sciences nat.*, 4^e série, t. XIV, p. 39.

l'état de la matière azotée et l'accompagnant sous les différents états qu'elle prend.

On ne s'est pas au reste contenté de ces expériences qualitatives ; nous rapporterons ici différents essais qui montrent encore que les phosphates contenus dans les farines ne présentent pas les réactions qu'ils possèdent lorsqu'ils ne sont plus en présence des matières organiques.

Pour reconnaître si les phosphates sont, dans les graines, unis aux matières végétales, on a déterminé d'abord la quantité de chaux et d'acide phosphorique contenue dans 100 grammes de diverses farines ; on voulait ainsi connaître non seulement quelle était la proportion d'acide phosphorique renfermée dans ces graines, mais encore déterminer la proportion de cet acide phosphorique qui, uni à la chaux, aurait dû être insoluble dans l'eau, s'il avait présenté ses propriétés habituelles. On sait, en effet, que le phosphate de magnésie, qui existe dans toutes les graines, est loin d'être insoluble dans l'eau pure ; et comme les 100 grammes de graines employés étaient traités au moins par un litre d'eau qui devait dissoudre seulement de 0^{gr},5 à 2 grammes de phosphate, on pouvait compter que le phosphate de chaux seul serait insoluble. Il s'est trouvé, au reste, que cette prévision était inexacte, car dans l'eau de lavage de graines qui ne renfermaient d'autre acide que l'acide phosphorique, on a trouvé plusieurs fois des quantités assez notables de chaux. On déterminait généralement l'acide phosphorique entraîné par l'eau de lavage en le précipitant à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien. On pouvait, ou bien calciner la matière organique entraînée, ou bien former le phosphate ammoniaco-magnésien dans le liquide renfermant une petite quantité de matière organique, car on a reconnu, dans les deux expériences suivantes, qu'en dosant dans la cendre des résidus d'évaporation ou dans l'eau de lavage elle-même, on obtenait des résultats semblables.

On a en effet divisé en deux parties égales l'eau de lavage de la farine de froment ; on a évaporé l'une des portions du liquide à sec, on a brûlé le résidu et dosé 0^{gr},055 d'acide phosphorique ; on a, d'autre part, dosé ce même acide dans la liqueur non évaporée, on a obtenu 0^{gr},058, c'est-à-dire précisément la même quantité. En divisant en deux parties égales l'eau de lavage de farine de pois, on a trouvé 0,028 dans les cendres de l'eau de lavage normale, et 0,023 dans les cendres de l'eau de lavage évaporée et privée de matière organique par la calcination.

Pour s'assurer encore plus complètement de l'exactitude de la méthode employée dans ces expériences, on a dosé comparativement l'acide phosphorique dans les cendres d'un poids déterminé de farine normale, puis dans l'eau de lavage et dans le résidu lavé d'une quantité de farine égale à la première. Une expérience faite dans ces conditions a conduit aux résultats suivants : on a trouvé dans 100 grammes de farine de froment 0^{gr},800 d'acide phosphorique ; l'eau de lavage d'une quantité de farine semblable avait entraîné 0,566 d'acide et il en restait 0^{gr},215 dans le résidu. 0^{gr},215 + 0^{gr},566 = 781 au lieu de 0^{gr},800 ; la perte est donc assez faible pour qu'on puisse considérer ces expériences comme exactes.

Dans 100 grammes de farine de haricots, on trouve 0^{gr},870 d'acide phosphorique et 0,300 de chaux ; dans l'eau de lavage provenant de 100 grammes de

cette même farine on a dosé 0^{rs},474 d'acide phosphorique et 0^{rs},151 de chaux : il est donc resté 0^{rs},396 d'acide phosphorique dans la graine. Cet acide phosphorique n'était pas rendu insoluble seulement par sa combinaison avec une base, car la combinaison la moins soluble sous laquelle il se présente dans les végétaux est le phosphate de chaux, et nous venons de voir que la moitié de la chaux avait passé dans l'eau de lavage; en admettant même que les 0^{rs},149 de chaux restant dans la farine lavée eussent retenu une quantité correspondante d'acide phosphorique, comme ces deux corps se combinent dans le rapport de $\frac{\text{PhO}^5}{3\text{CaO}} = \frac{71}{84}$, il resterait toujours 0^{rs},271 d'acide phosphorique à l'état de phosphate soluble qui aurait été cependant retenu par les principes végétaux de la graine.

Dans 100 grammes de chènevis, on a dosé 2^{rs},09 d'acide phosphorique et 0^{rs},19 de chaux; l'eau de lavage a enlevé 0^{rs},351 et 0^{rs},079 de chaux : il est donc resté encore plus des trois quarts de l'acide phosphorique dans la graine lavée avec un litre d'eau (1).

Ces premières expériences, où nous trouvons l'acide phosphorique résistant à l'action de l'eau, bien qu'il soit engagé en combinaison avec une base qui le laisse à l'état soluble, où nous trouvons au contraire de la chaux et de l'acide phosphorique entraînés par les lavages, encore que les phosphates de chaux à réaction neutre soient complètement insolubles, démontrent que les phosphates sont combinés avec quelques-uns des principes immédiats de la graine. On ne révoquera pas en doute la conclusion que nous tirons de ces essais, car elle nous paraît identique avec celle qu'a déduite M. Chevreul d'expériences très analogues insérées dans ses recherches sur la teinture : « Quant à la matière colorante qui restait adhérente aux ligneux, dit l'illustre doyen du Museum, il me serait impossible d'affirmer que la totalité y était combinée; cependant j'affirmerai qu'une grande partie s'y trouvait dans cet état, car en recourant à l'alcool froid et à l'alcool bouillant, à l'eau bouillante, à l'eau de potasse, et en faisant concourir avec ces moyens les moyens mécaniques, je ne parvins pas à décolorer le coton. »

M. Chevreul, on le voit, ne se contente pas, pour reconnaître la combinaison d'un principe immédiat avec une matière colorante, d'employer les réactifs neutres; il fait encore usage de substances plus actives. Nous avons, de notre côté, pour démontrer plus complètement l'adhérence des phosphates aux substances végétales, attaqué les farines obtenues de différents grains, non plus seulement avec de l'eau pure, mais avec de l'acide chlorhydrique étendu (1 partie d'acide chlorhydrique fumant pour 9 parties d'eau), et nous avons prolongé ensuite les lavages à l'eau pure jusqu'à ce que toute trace d'acide chlorhydrique ait été enlevée. Nous ne prétendons pas, au reste, que la seule quantité de phosphate qui soit combinée avec les principes immédiats de la

(1) Ces résultats indiquant qu'une partie des phosphates existant dans les graines peut être entraînée par l'eau, confirment une communication intéressante faite par M. Terreil à la Société chimique, le 15 mai 1862 (voy. *Bulletin de la Société chimique*, 1862, p. 56). Ce même fait a été encore observé récemment par M. Calvert, qui, à tort, le donne comme nouveau (*Comptes rendus*, 1867, t. LXV, p. 1150).

graine soit celle qui persiste après ces lavages; nous voulons seulement montrer que les phosphates solubles sans exception dans l'acide chlorhydrique, lorsqu'ils sont isolés, ne se dissolvant plus entièrement lorsqu'ils appartiennent à l'organisme végétal, doivent exister dans cet organisme à l'état de combinaison.

Or, on a trouvé que sur 0^{sr},800 d'acide phosphorique contenus dans 100 grammes de farine de froment, l'eau acidulé n'enlevait que 0^{sr},566 dans un cas et 0^{sr},718 dans un autre; que sur 1^{sr},400 d'acide phosphorique contenus dans la farine de pois, il en restait, après un lavage prolongé à l'acide chlorhydrique, 0^{sr},205.

On arrive encore à constater que les phosphates sont retenus parfois avec une grande énergie dans les graines, en constatant leur présence dans le résidu lavé à l'acide chlorhydrique : on trouve ainsi que 100 grammes de farine de lentilles lavée à l'acide chlorhydrique renfermaient 3^{sr},099 d'acide phosphorique; que 100 grammes de farine de froment donnaient 1^{sr},596 d'acide phosphorique, et qu'il en existait 0^{sr},573 dans 100 grammes de farine de haricots également lavée à l'acide chlorhydrique. Dans une autre circonstance cependant, le résultat n'a pas été le même, et l'on n'a plus retrouvé d'acide phosphorique dans la farine d'avoine lavée à l'acide chlorhydrique.

Ainsi, dans ces dernières expériences, il s'est produit un fait très curieux : la matière organique a disparu en plus grande quantité que les phosphates, de telle sorte qu'on arrive à ce résultat qui semble paradoxal, que, après les lavages à l'acide chlorhydrique, on trouve dans les farines une proportion d'acide phosphorique plus grande que celle qui se trouvait dans la farine normale.

Tous les résultats précédents sont résumés dans les tableaux suivants :

Sur l'état de l'acide phosphorique et de la chaux dans les graines.

NOMS des graines expérimentées.	ACIDE phosphorique dans 100 de graine.	CHAUX dans 100 de graine.	ACIDE phosphorique enlevé par l'eau.	CHAUX enlevée par l'eau.	ACIDE phosphorique dans la graine lavée.	CHAUX dans la graine lavée.
Froment	0,800	»	0,566	»	0,215	»
Haricots	0,870	0,300	0,474	0,151	0,396	0,149
Chênevis.	2,090	0,190	0,351	0,079	1,658	0,111
Pois	1,400	»	1,195	»	0,205	»

Acide phosphorique contenu dans 100 de graines lavées avec une dissolution d'acide chlorhydrique (1 d'acide fumant pour 10 d'eau).

Noms des graines.	Acide phosphorique.
Froment	1,596
Lentilles	3,099
Haricots	0,573

Iodures. — Quand les végétaux marins renferment des iodures en quantités assez notables pour qu'il soit possible d'y reconnaître l'iode sans traiter des masses trop considérables, on trouve cet iode dans les cendres; mais il est

impossible de le caractériser dans l'extrait aqueux obtenu de la plante. En calcinant le *Fucus vesiculosus*, on peut, à l'aide du chlore, puis du chloroforme ou du sulfure de carbone, obtenir la coloration caractéristique de l'iode ; mais il n'a pas été possible d'obtenir la moindre réaction en traitant de la même façon l'extrait aqueux. Ainsi l'iodure de potassium est engagé, dans ces plantes, dans une combinaison assez intime pour résister à l'action de l'eau bouillante ; on sait cependant que ce sel est tellement soluble dans l'eau, qu'il est déliquescant.

Sulfates et chlorures. — C'est surtout en étudiant l'état des sulfates et des chlorures dans les végétaux marins, que nous pourrions constater que les principes minéraux sont parfois liés aux fibres végétales par simple affinité capillaire. Quand on compare les analyses de l'eau de mer à celles des cendres d'un *Fucus*, un fait frappe d'abord : tandis que les deux tiers du résidu salin laissé par l'eau de mer sont formés de chlorure de sodium, les cendres des *Fucus* n'en renferment qu'un quart de leur poids au plus, et parfois seulement un sixième ; le sulfate de magnésic est bien moins abondant dans l'eau de mer que le chlorure de sodium, et cependant les sulfates sont en quantités considérables dans les cendres des *Fucus*.

Il est facile de montrer que toutes ces matières ne se trouvent pas au même état dans toutes les plantes marines. Si, en effet, on prend quelques-unes de celles-ci et qu'on les coupe, puis qu'on les fasse bouillir avec de l'eau, de façon à enlever les sels solubles, on est parfois très frappé de voir que l'eau enlève des chlorures et presque pas de sulfates. L'expérience a été faite sur le *Fucus vesiculosus* : on a trouvé, dans un essai fait d'abord sur 0^{gr},944 de cendres provenant de la plante lavée, une si faible quantité de chlore, qu'il a été impossible de faire le dosage ; dans un autre essai, 6^{gr},332 de plante sèche ont donné 0,980 de cendres, dans lesquelles on n'a dosé que 0^{gr},007 de chlore, tandis qu'elles contenaient une proportion notable d'acide sulfurique.

Dans un essai qui a porté sur le *Fucus serratus*, on a trouvé que 100 parties de plante lavée à l'eau bouillante et séchée donnaient 8^{gr},10 de cendres. Le *Fucus serratus* normal donnait, pour 100 de cendres, 22,222 d'acide sulfurique et 6,040 de chlore ; tandis qu'après le lavage on trouvait 34,5 d'acide sulfurique pour 100 de cendres, et que les chlorures y étaient devenus complètement indissolubles. Nous ne saurions trop insister sur ce fait qui nous paraît capital : l'eau enlève au *Fucus vesiculosus* presque tous les chlorures en laissant les sulfates ; l'eau enlève de même au *Fucus serratus* tous ses chlorures, et ne laisse que des sulfates. Il est donc certain que les chlorures et les sulfates n'existent pas dans ces plantes au même état, et que les uns y sont en combinaison, tandis que les autres, au contraire, semblent y être encore dissous dans l'eau qui gorgé la plante.

Toutes les fucacées ne donnent pas des résultats semblables ; dans toutes, les sulfates ne sont pas retenus par la matière organique plus énergiquement que les chlorures. On verra, au contraire, d'après les chiffres suivants, que le *Hali-drys siliquosa* perd au lavage une plus grande quantité de sulfate que de chlorure.

On a trouvé dans la plante normale séchée à l'air 10,650 de cendres, et seule-

ment 5,585 dans la plante lavée ; celle-ci avait donc perdu plus de cendres que de matières végétales. Au reste, l'acide sulfurique y avait été enlevé en quantité aussi considérable que le chlore ; 100 de cendres de la plante normale renfermaient, en effet, 24,252 d'acide sulfurique et 1,190 de chlore, et 100 de cendres de la plante lavée renfermaient 20,415 d'acide sulfurique et 0,900 de chlore.

Ces résultats si différents donnés par ces deux fucacées sont résumés dans le tableau suivant :

NOMS DES PLANTES expérimentées.	SUR L'ÉTAT DU CHLORE ET DE L'ACIDE SULFURIQUE dans les plantes marines			
	NORMALES.		LAVÉES.	
	chlore dans 100 de cendres.	acide sulfurique dans 100 de cendres.	chlore dans 100 de cendres.	acide sulfurique dans 100 de cendres.
<i>Fucus serratus</i>	6,040	22,222	indosable	34,500
<i>Halidrys siliquosa</i>	1,190	24,252	0,900	20,415

Si nous résumons maintenant les faits établis dans les pages précédentes, nous reconnaissons que les substances minérales existent dans les végétaux à des états très différents :

1° Elles peuvent y être simplement déposées par évaporation : tel paraît être le carbonate de chaux dans les feuilles ; il disparaît, en effet, par un simple lavage à l'acide chlorhydrique ; tel il paraît être aussi dans les arbres, où il cède encore sans difficulté aux acides. La silice, dans les feuilles d'un grand nombre d'arbres, se dissout encore dans les alcalis étendus.

2° Elles peuvent être retenues en combinaison :

A. Avec des principes immédiats à réactions parfaitement tranchées. M. Payen a vu l'oxalate de chaux dans les cactus. Chacun sait qu'on extrait de l'oxalate de potasse des oseille, le tartrate de potasse et de chaux des raisins, le citrate de potasse des citrons. Nous avons extrait nous-même l'acide citrique des pommes de terre, où il était vraisemblablement combiné avec la potasse, de même que l'acide oxalique dans les betteraves.

B. Mais les substances minérales peuvent être aussi unies aux principes immédiats neutres, les phosphates aux matières albuminoïdes, la silice à la cellulose des tiges de graminées ou de fougères, les sulfates et les iodures aux tissus des fucacées. Ces dernières combinaisons n'ont plus le caractère nettement défini des précédentes ; l'adhérence des principes minéraux aux tissus végétaux est variable ; tantôt capable de résister à l'action des réactifs énergiques, elle peut parfois céder à des lavages multipliés, ainsi que nous l'avons remarqué pour les sulfates et les chlorures dans quelques plantes marines. Des exemples de ces combinaisons encore mal définies, dans lesquelles les éléments peuvent être retenus, non plus par la force énergique qui est mise en jeu par

le contact d'une base ou d'un acide, mais par cette force affaiblie et dégénérée, jusqu'à devenir, suivant l'expression de M. Chevreul, une simple affinité capillaire, nous sont fournis à profusion par l'art de la teinture. Nous savons que les mordants adhèrent aux tissus et résistent aux lavages; nous savons que les matières colorantes se fixent également sur ces tissus mordancés, et ces alliances durables après le mordantage, éphémères, au contraire, quand la matière colorante est mise directement en contact avec la fibre végétale, nous paraissent avoir de profondes analogies avec les unions plus ou moins stables que contractent les substances minérales avec les tissus appartenant aux plantes encore vivantes.

§ 42. — Examen des anciennes hypothèses proposées pour expliquer la composition des cendres.

L'analyse des cendres démontre que les plantes choisissent, dans la dissolution complexe que renferme le sol, certaines substances minérales, et s'en emparent, se les assimilent à l'exclusion de certaines autres. Qu'on sème dans la même terre du trèfle et du blé, ainsi qu'on le fait souvent, et à l'analyse on ne trouvera pas aux cendres la même composition : le blé renfermera surtout de la silice et des phosphates, le trèfle de la potasse et de la chaux. Quel est le mécanisme de cette sélection ? c'est ce qui nous reste à étudier.

Examen des organes d'absorption. — L'hypothèse la plus simple qu'on puisse faire pour expliquer le choix qu'exécutent les végétaux consiste à supposer que les tissus des racines ne présentent pas la même structure dans les espèces différentes; que les organes d'absorption du blé sont aptes à se laisser pénétrer par la silice ou les phosphates, tandis que ceux du trèfle, qui refuseront la silice, absorberont au contraire la potasse et la chaux. Il suffit presque d'énoncer cette hypothèse pour voir combien elle est singulière et peu d'accord avec ce qu'enseigne la science actuelle, ennemie des causes occultes. La répugnance qu'inspire cette hypothèse est, au reste, justifiée par l'examen des faits : en soumettant à un examen microscopique attentif les organes d'absorption de ces deux espèces, il est impossible d'y découvrir les moindres différences, bien que la composition des cendres des plantes auxquelles ils appartiennent montre qu'ils ont absorbé des principes qui sont loin d'être identiques. (Voyez, sur l'absorption des liquides par les racines, Duchartre, *Traité de botanique*, page 237, qui relève une erreur généralement répandue.) Au reste, pour démontrer qu'il n'existe pas dans les racines une faculté de sélection suffisante pour produire les effets constatés par l'analyse des cendres, on peut avoir recours, comme l'a fait depuis longtemps Trinchinetti, à des expériences directes (*Sulla facoltà assorbente delle radice de vegetabili*, Milano, 1863).

Les racines absorbent tous les éléments solubles qui sont mis en contact avec elles. — Ce naturaliste a reconnu, en plongeant pendant quelque temps des plantes munies de leurs racines en bon état dans des dissolutions

salines variées, que toutes les matières dissoutes pénétraient dans les tissus. Ces expériences paraissent mériter toute confiance, car Trinchinetti eut soin de caractériser, à l'aide de réactifs appropriés, les sels qui avaient pénétrés dans la plante, et le fait de l'absorption d'une dissolution saline quelconque pourra être considéré comme démontré, quand nous aurons signalé la cause d'une anomalie connue depuis longtemps.

Si l'on fait l'analyse des cendres des plantes qui ont végété dans un sol plâtré, on reconnaît que celles-ci renferment plus de chaux et de potasse que les plantes qui se sont développées dans un sol non amendé avec du sulfate de chaux, mais que la proportion d'acide sulfurique qui existe dans les cendres est loin d'être suffisante pour saturer la chaux et la potasse, et l'on pourrait avoir quelque peine à comprendre un fait semblable et être tenté, par suite, de l'attribuer encore à une faculté particulière aux racines, si l'on n'avait constaté, d'une part, qu'une plante semée dans du coton et arrosée avec de l'eau chargée de sulfate de chaux absorbe très bien ce sel, et, d'autre part, que le sulfate de chaux enfoui dans le sol ne tarde pas à s'y transformer en carbonate. C'est sous cette nouvelle forme que les bases pénètrent dans la plante; de telle sorte que si l'on ne remarque pas habituellement de sulfate de chaux dans les cendres d'une plante développée sur un sol plâtré, c'est tout simplement parce que ce sulfate de chaux n'y persiste que pendant peu de temps.

Excrétion des racines. — Nous reconnaissons donc, d'une part, que tous les sels pénètrent dans les plantes; de l'autre, que ces principes ne sont pas tous simplement en dissolution dans l'eau qui gorge la plante, mais que quelques-uns d'entre eux sont combinés avec les divers principes immédiats. Si nous pouvions reconnaître dans les plantes la faculté d'excrétion, nous arriverions facilement à comprendre le mécanisme suivant lequel se fait le choix constaté par l'analyse. Supposons, en effet, qu'une dissolution complexe, comme celle qui existe dans le sol, pénètre dans la plante et se répande dans tout l'organisme, elle arrive au contact de différents tissus; quelques-unes des substances minérales introduites perdent leur solubilité, et les autres, après un séjour plus ou moins long dans le végétal, sont expulsées au dehors par les racines: de telle sorte que lorsqu'on analyse la plante, on n'y trouve plus, bien que tous les éléments solubles contenus dans le sol y aient pénétré, que ceux qui sont capables de contracter quelque combinaison.

Pour que nous puissions admettre cette hypothèse, il nous faudrait démontrer que les plantes sont capables d'excrétion. Cette idée n'est pas nouvelle; elle a été soutenue par plusieurs esprits distingués, et notamment par De Candolle (1), qui avait cru pouvoir baser une théorie des assolements sur cette pro-

(1) *Physiologie*, p. 248, etc. — Il faut remarquer que s'il est impossible de constater l'excrétion d'une substance minérale par les racines, il est vraisemblable que celles-ci émettent un acide fixe au moment de la germination, et très habituellement de l'acide carbonique. En faisant germer des graines sur du papier de tournesol, on reconnaît facilement que celui-ci se teint en rouge dans tous les points où il a été en contact avec les racines; de plus, celles-ci exercent une action dissolvante remarquable sur les calcaires.

Les expériences qui tendent à le montrer sont insérées par M. J. Sachs dans son *Traité de*

priété hypothétique ; toutefois toutes les expériences directes qui ont été faites sur ce sujet ont conduit à des conséquences négatives.

On sait que Walter, notamment, a contribué à faire rejeter l'idée de l'existence d'une exosmose régulière, en faisant végéter une plante munie de plusieurs racines dans deux vases différents, de sorte que quelques-unes des racines plongeaient dans l'un des vases renfermant de l'eau distillée, les autres pénétraient dans une dissolution saline. Si les racines sont des organes de sécrétion, si elles peuvent rejeter quelques-uns des principes qu'elles ont pris d'abord, il est probable que la dissolution saline absorbée par l'une des racines se répandra dans toute la plante, puis sera rejetée au dehors, et qu'on retrouvera dans l'eau pure le sel contenu dans l'autre vase. Les expériences furent faites à l'aide du sel marin, du sulfate de soude et de l'acétate de plomb, et conduisirent toujours à des résultats négatifs ; dans le dernier cas, il fut facile de reconnaître le sel de plomb dans la plante et même dans les racines plongées dans l'eau pure, mais on ne put en retrouver dans cette eau.

Nous avons nous-même exécuté quelques expériences analogues. Des plantes aquatiques, des lentilles d'eau (*Lemna minor*) furent placées dans des dissolutions très étendues de sulfate de cuivre et de sel ammoniac ; on y laissa les plantes quatre ou cinq jours ; puis, après les avoir bien lavées, on les remit dans l'eau distillée, qui fut examinée après quelques jours. Il fut impossible d'y découvrir la moindre trace du sel de cuivre ou de chlorure, et l'on sait cependant qu'il existe, pour reconnaître ces substances, des réactifs d'une admirable sensibilité.

Avant d'abandonner ce sujet des excrétiens des matières minérales par les racines envisagées au point de vue particulier où nous nous plaçons, c'est-à-dire pour essayer d'expliquer l'assimilation élective des principes minéraux, il convient de discuter les faits relatifs aux pertes de matières minérales constatées dans les végétaux herbacés pendant la maturation.

Quand, ainsi que l'a fait Isidore Pierre pour le colza (1) et pour le blé (2), on détermine non seulement la composition centésimale de la plante, mais de plus le poids que présente la récolte développée sur une surface donnée, on constate souvent une perte de matière minérale sensible. C'est ainsi que pour le colza l'éminent chimiste a trouvé les chiffres suivants :

physiologie végétale (p. 210), et l'on a pu en voir les résultats à l'Exposition de 1867. Des graines de différentes plantes (*Phaseolus multiflorus*, *Cucurbita Pepo*, *Triticum vulgare*, etc.) ont semées dans du sable contenu lui-même dans de petites caisses de marbre ; les racines se développent et atteignent bientôt le marbre, sur lequel elles rampent dans différents sens. Quand on met fin à l'expérience, on voit très distinctement, sur la surface polie du marbre, la trace de plusieurs racines et de leurs ramifications : les limites de ces empreintes sont nettes ; elles sont en moyenne larges d'un demi-millimètre et ressemblent à un trait légèrement marqué avec un burin à pointe large. Les empreintes sont aussi visibles sur la dolomie ; mais sur le plâtre, au lieu d'être en creux, elles sont en relief : les racines ont protégé le plâtre contre l'action dissolvante de l'eau.

Cette expérience a été répétée avec plein succès au museum il y a déjà plusieurs années.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3^e sér., t. LX, p. 129.

(2) *Recherches expérimentales sur le développement du blé*, Delagrave, 1866, in-4^o.

	QUANTITÉS DE CENDRES (COLZA)	
	pour 100 de matière sèche.	à l'hectare.
22 mars 1859.	10,7	400 ^g ,6
2 avril.	10,4	447,3
6 mai.	11,0	941,2
6 juin.	9,7	880,9
20 juin.	7,2	664,0

On conçoit très bien que la proportion centésimale des cendres ait baissé par suite d'un développement plus rapide de la matière végétale, mais on reconnaît à l'inspection des chiffres de la seconde colonne que cette cause n'est pas la seule qui ait déterminé la diminution centésimale des cendres et qu'elle est due également à une véritable perte de matière minérale.

Nous n'hésitons pas à attribuer cette perte, non pas à une excrétion des racines mais à une véritable chute d'organe; en effet, Isidore Pierre a distingué la matière minérale contenue dans les diverses parties de la plante; or, tandis que, le 6 mai, les feuilles vertes d'un hectare renfermaient 483^g,63 de cendres et les feuilles mortes 254^g,84, le 6 juin les feuilles vertes n'en contenaient plus que 18^g,69 et les feuilles mortes 266^g,56; enfin, au moment de la récolte, toutes les feuilles ont disparu entraînant avec elles la matière minérale qu'elles renfermaient.

On peut encore mieux se rendre compte des causes qui amènent la disparition des matières minérales dans l'exemple suivant emprunté au mémoire sur la maturation de quelques plantes herbacées auquel nous avons déjà plus haut quelques emprunts (1).

	COLINSIA BICOLOR.	
	Cendres dans 100 parties de matière sèche.	Cendres dans la plante entière moins la racine.
11 juin.	21,2	0 ^g ,023
20 juin.	15,1	0,052
30 juin.	11,8	0,173
12 juillet.	11,1	0,109
22 juillet.	12,2	0,104
29 juillet.	10,5	0,090
25 août.	11,1	0,050

Le 30 juin la plante entière renferme 0^g,173 de cendres et seulement 0^g,109 le 12 juillet; si les matières minérales avaient disparu par excrétions par les racines, nous devrions trouver que la composition centésimale des cendres a diminué. Or, elle est restée sensiblement constante, ce qui n'arriverait pas si les matières minérales avaient quitté la tige; dans ce cas, en effet, la proportion centésimale des cendres aurait été en diminuant, puisqu'on aurait brûlé des organes dépouillés des matières minérales qu'ils renfermaient d'abord.

(1) *Ann. agron.*, t. VII, p. 170.

Ainsi l'explication de l'accumulation dans les plantes d'un principe minéral à l'exclusion d'un autre, ne peut s'appuyer sur l'idée que les principes non combinés, non retenus dans la plante sont éliminés par les racines, et une autre manière de voir doit être proposée.

§ 43. — Des phénomènes de diffusion.

Pour arriver à la solution, il nous faut maintenant abandonner l'étude directe des plantes et rappeler les faits découverts par Dutrochet et Th. Graham, relatifs à l'endosmose et à la diffusion. Cette marche, qui paraît détournée, est celle cependant qui nous conduira le plus rapidement au but que nous nous proposons d'atteindre.

Rappelons d'abord une des expériences fondamentales de Th. Graham. On sait que ce savant a démontré que si, au fond d'une éprouvette étroite remplie d'eau, on dépose une dissolution concentrée d'un sel soluble, celui-ci finit par se répandre dans toute la masse : les molécules salines, triomphant de la force de pesanteur, qui semblait devoir les maintenir près du fond du vase, s'élèvent jusqu'en haut de l'éprouvette ; elles sont animées d'un mouvement de transport tout à fait indépendant du mouvement du liquide lui-même, et tendent à se répandre dans tout le liquide, comme un gaz se répand dans tout l'espace qui s'offre à lui.

Une paroi poreuse n'oppose qu'une très faible résistance à cette diffusion ; on peut s'en assurer par l'expérience suivante. Dans un vase de verre renfermant une dissolution saline, on immerge un vase poreux semblable à ceux qu'on emploie dans la pile de Bunsen. Ce vase renferme de l'eau distillée, et le niveau du liquide est le même des deux côtés de la paroi ; il n'y a, par conséquent, aucun transport de liquide, et cependant l'analyse a démontré que le sel se diffuse au travers de la paroi poreuse, et après quelques jours, si l'on emploie des dissolutions étendues, on trouve que des quantités égales d'eau prises dans le vase poreux ou en dehors renferment des quantités de sels semblables : l'équilibre est établi.

La présence d'un sel dans l'eau du vase poreux s'oppose à la diffusion du même sel, mais n'apporte qu'un très faible obstacle à la diffusion d'un sel d'une autre nature. Supposons, pour préciser les idées, que nous ayons placé une dissolution de chlorure de potassium dans le vase de verre et dans le vase poreux ; cette dissolution présente, des deux côtés de la paroi poreuse, la même concentration, et, par suite, il ne se fait aucun mouvement de sel d'un vase vers l'autre. On ajoute alors dans le vase extérieur une certaine quantité de sulfate de soude solide : celui-ci se dissout, et bientôt chemine au travers de la paroi poreuse et pénètre dans le vase intérieur.

Plaçons maintenant dans le vase extérieur un mélange de deux sels, et, par un moyen quelconque, amenons l'un des deux à l'état insoluble aussitôt qu'il aura pénétré dans le vase poreux, nous prévoyons facilement ce qui arrivera : les deux sels se diffusent d'abord dans l'eau du vase poreux en quantités

égales; après quelques jours, l'eau intérieure se trouve avoir une concentration semblable à l'eau extérieure, et les choses persistent dans cet état si aucune cause perturbatrice n'intervient. Mais nous supposons, au contraire, que l'un des deux sels est amené à l'état insoluble, l'eau intérieure est débarrassée de ce sel, et dès lors la diffusion en entraîne dans le vase poreux une nouvelle proportion pour remplacer celle qui a disparu; une nouvelle précipitation sera bientôt suivie d'un nouvel afflux destiné à rétablir l'équilibre toujours détruit. L'un des deux sels appelé par ces précipitations successives entrera donc dans le vase poreux à différentes reprises, et l'expérience terminée, on l'y trouvera en plus forte proportion que le sel non précipité, qui a cessé de pénétrer dans l'eau intérieure aussitôt qu'elle a été chargée au même degré que l'eau extérieure.

Cette accumulation d'un sel dans le vase intérieur se réalise, par exemple, très aisément avec du sulfate de cuivre, auquel on ajoute peu à peu, à mesure qu'il se diffuse dans l'eau du vase poreux, du lait de baryte. Dans une expérience où le vase extérieur renfermait au commencement 0^{gr},990 de sulfate de cuivre, on a trouvé à la fin, dans le vase extérieur 0^{gr},293, et dans le vase intérieur 0^{gr},697. Dans un autre essai, l'eau du vase extérieur renfermait d'abord 4^{gr},082 de sulfate de cuivre, et à la fin 0^{gr},464, tandis qu'il y avait dans le vase intérieur 0^{gr},718 de sulfate de cuivre.

§ 44. — Explication de l'accumulation des principes combinés à l'état insoluble dans les végétaux.

Cette expérience va nous permettre d'expliquer facilement l'accumulation des principes minéraux qui sont fixés en combinaison par les matières végétales. Nous avons vu que, dans le *Fucus serratus*, les sulfates sont retenus à l'état insoluble, tandis que les chlorures sont facilement enlevés par l'eau. Or, nous pouvons comparer la mince pellicule qui recouvre les tissus de la plante à la paroi poreuse de notre vase de porcelaine dégourdie, et admettre qu'il y avait diffusion des sels contenus dans l'eau au travers de cette paroi, comme il y avait diffusion des sels de la dissolution extérieure dans l'eau du vase poreux. Les tissus du fucus vont dès lors exercer leur action sur ces sels; les sulfates se combinent; solidifiés par cette union, ils sont soustraits à la dissolution, comme l'était le sel précipité dans l'expérience précédente, et, par suite, une nouvelle quantité de sulfate pénétrera par diffusion dans l'eau qui gorge le tissu, tandis que le chlorure non combiné, se trouvant au même degré de concentration dans l'eau de la mer et dans le liquide de la plante, n'y pénétrera pas de nouveau. On comprend donc que, bien qu'il y ait dans l'eau de la mer plus de chlorures que de sulfates, les sulfates puissent s'accumuler dans le fucus en plus grande quantité que les chlorures.

Ce même raisonnement peut encore s'appliquer aux iodures, qu'on trouve toujours engagés dans des combinaisons insolubles avec les tissus des fucacées, tellement que, pour les caractériser dans ces plantes, il faut d'abord les brûler ou les désorganiser par l'action oxydante de l'acide azotique.

Assimilation de la silice combinée. — L'accumulation des principes minéraux combinés dans les plantes terrestres peut être expliquée par un mécanisme analogue. Supposons qu'un grain de froment germe. L'amidon, d'abord liquéfié par la diastase, transformé en dextrine, puis en glucose, éprouve enfin une dernière transformation, et donne naissance à de la cellulose; celle-ci possède une certaine affinité pour la silice, est capable de la rendre insoluble, et nous avons vu qu'une dissolution de soude étendue et bouillante est impuissante à détruire la combinaison formée. Si donc une dissolution complexe, appelée par l'évaporation qui se produit dans la jeune feuille, pénètre par endosmose dans les tissus, la silice qu'elle renferme va être solidifiée. Que cette combinaison se forme au moment même où la cellulose s'organise, ou bien qu'elle se fixe sur la cellulose déjà filée ou tissée, peu importe : le point qu'il faut mettre en lumière, est que la sève est appauvrie de silice, et que, dès lors, un nouvel afflux de la silice contenue dans l'eau qui baigne les racines va pénétrer dans la plante pour remplacer celle qui est devenue insoluble, de la même façon que dans l'expérience citée plus haut, la matière précipitée était bientôt remplacée par une nouvelle quantité fournie par le liquide extérieur. Aussitôt donc que l'équilibre est rompu, que l'eau qui gorge la plante ne renferme plus la même quantité de silice que l'eau extérieure, une nouvelle quantité doit pénétrer pour remplacer celle qui a été précipitée.

Certainement, en même temps que la silice sont entrées dans la jeune plante, avec l'eau qu'appelle l'évaporation, les diverses matières solubles contenues dans la terre arable, mais si celles-ci ne forment aucune combinaison, elles restent en dissolution dans la sève, et opposent, par leur présence, un obstacle invincible à l'arrivée de nouvelles quantités.

Ce dernier point est important et nous y insistons. Nous pensons que le lecteur est convaincu qu'une matière qui devient insoluble dans la plante, par suite de la combinaison qu'elle y contracte avec un tissu ou un principe immédiat, doit s'y accumuler, et l'expérience faite avec le sulfate de cuivre et la baryte est, à ce point de vue, démonstrative, mais si nous avons démontré par l'expérience un des points relatifs à la question que nous traitons actuellement, à savoir, que la présence dans un vase poreux d'un sel en dissolution aussi concentré que la dissolution extérieure formée, s'oppose absolument à l'arrivée d'une nouvelle quantité de ce sel, nous n'avons pas encore indiqué d'expérience démontrant que si l'eau qui tient le sel en dissolution s'évapore peu à peu, de telle sorte que la dissolution intérieure se concentre, l'eau pourra pénétrer pour remplacer celle qui a disparu, en laissant au dehors le sel qu'elle tenait en dissolution.

Ainsi, dans les expériences précédentes, nous avons vu le sel se déplacer sans que l'eau l'accompagnât dans son mouvement; maintenant nous devons assister encore à une séparation entre le corps dissous et le dissolvant, mais le dissolvant seul se déplacera, abandonnant le corps dissous.

Expériences de Th. de Saussure. — La preuve de cette séparation nous est donnée par Th. de Saussure dans ses expériences classiques sur l'absorption des diverses dissolutions par les plantes (*Recherches chimiques sur la végéta-*

tion, p. 247). On sait que l'illustre physiologiste plaça des pieds de *Polygonum Persicaria* ou de *Bidens cannabina*, bien pourvus de leurs racines, dans des dissolutions, et qu'il les y a maintenus jusqu'au moment où ils avaient fait disparaître par évaporation la moitié de l'eau dans laquelle ils végétaient. Th. de Saussure analysa l'eau restant dans les vases, quand l'expérience fut terminée; il constata que « les plantes avaient absorbé toutes les substances qui leur avaient été présentées, mais qu'elles avaient sucé l'eau en beaucoup plus grande raison que les corps qui étaient dissous ». Cette expérience nous donne donc la démonstration dont nous avons besoin; elle nous prouve que lorsqu'un sel se trouve dans les liquides qui gorgent la plante en quantité égale à celle qui existe dans la dissolution extérieure, il cesse de pénétrer dans la plante, sans que cependant le mouvement de l'eau soit interrompu.

Il est bien clair que, plus les sels qui se trouvent dans l'eau y sont en dissolution concentrée, plus aussi la quantité qui pénètre dans la plante est grande : aussi rencontre-t-on dans les plantes tropicales des quantités parfois considérables de salpêtre; les betteraves venues sur des terres très salées se chargent également de sel; et enfin, lorsque les eaux que renferme le sol se concentrent par évaporation, les plantes cessent de pouvoir y vivre.

Les très nombreuses expériences exécutées sur la végétation soutenue par des solutions nourricières ont, au reste, montré d'une façon complète l'indépendance absolue de la matière dissoute et du dissolvant.

Si dans l'expérience de Th. de Saussure les plantes ont pris plus d'eau que de sel dissout, c'est tout simplement parce que la dissolution présentait une concentration assez forte et que les sels employés étaient mal utilisés; mais MM. Knop et Dworzak (1) ont montré que des maïs et des haricots élevés dans des dissolutions à 0,5 pour 1000 absorbaient relativement plus de sel que d'eau.

Dans les expériences que nous avons exécutées sur des haricots encore munis de leurs cotylédons, nous avons pu les voir également absorber plus de chlorure que d'eau, et on conçoit d'après cela qu'avec des tâtonnements prolongés, on puisse réussir à trouver pour une plante déterminée une solution qui soit absorbée sans changement de composition.

Diffusion des matières solubles au travers des colloïdes. — Dans les pages précédentes nous étendons à une plante fixée dans la terre par ses racines les résultats obtenus avec des dissolutions; l'assimilation est-elle possible? Peut-on admettre que la diffusion aura lieu au travers de la terre arable et au travers des tissus de la plante, comme au travers de l'eau et d'un vase poreux? Pour être convaincu que cette assimilation est légitime, on n'a qu'à rappeler un des faits constatés par Th. Graham dans ses mémorables recherches sur la diffusion. On sait qu'il a été conduit à diviser, par rapport à cette propriété, tous les corps en deux grandes classes : les matières colloïdes, telles que la gomme, la gélatine, etc., et les matières cristalloïdes, qui, ainsi que leur nom l'indique, sont susceptibles de prendre des formes cristallines. Les corps cristalloïdes se diffusent, non seulement très bien dans l'eau, c'est-à-dire qu'ils

(1) *Ann. agron.*, t. II, p. 582.

s'y déplacent, comme nous l'avons dit déjà, en dehors de tout mouvement du liquide, mais encore ils se diffusent également bien dans les colloïdes. Ainsi, qu'on place, à l'imitation de Th. Graham, dans une éprouvette étroite, une gelée d'amidon, puis qu'on dépose au fond du vase une dissolution colorée, et l'on verra cette dissolution monter dans l'amidon et le colorer peu à peu; dans toute autre matière gélatineuse, la dissolution eût cheminé de même, et l'on est en droit d'affirmer que la plupart des sels se diffusent encore avec la même facilité dans un sol argileux.

Il est un point, cependant, sur lequel il importe d'insister : les colloïdes en dissolution ne se diffusent pas au travers des masses colloïdales comme au travers de l'eau. Ainsi, s'il est possible de faire cheminer du chromate de potasse au travers de la gelée d'amidon, on ne réussirait pas à y diffuser de la gomme, et l'on pourrait se demander si la silice, facile à obtenir en gelée, n'est pas un colloïde, et, par suite, si la terre argileuse, colloïdale elle-même, n'opposera pas un obstacle absolu à sa diffusion. Cette objection serait sérieuse pour une dissolution concentrée de silice; mais on voit, dans les expériences de dialyse de Th. Graham (*Ann. de chim. et de phys.*, 3^e série, 1862, t. LXV, p. 169), que l'acide silicique soluble et très dilué a toujours traversé la membrane colloïdale, et cette expérience suffit à expliquer comment les dissolutions extrêmement étendues, répandues dans la terre arable, peuvent y circuler.

Une objection plus spécieuse peut être faite à la théorie que nous proposons. Nous attribuons l'accumulation de la silice, dans les graminées, à la combinaison que cette silice contracte avec la cellulose, et l'on peut se demander pourquoi tous les végétaux ne renferment pas de la silice, puisque tous renferment de la cellulose. Pour que cette objection fût fondée, il faudrait admettre que le squelette de toutes les plantes est formé par la même variété de cellulose; mais cette opinion n'est plus soutenable, aujourd'hui que M. Fremy a constaté que les tissus des végétaux sont constitués par des matières isomériques, mais non identiques, et très diversement attaquées par le réactif de Schweïzer, obtenu en dissolvant le cuivre dans l'ammoniaque.

Il nous paraît donc probable que si les graminées se chargent de silice, tandis que les légumineuses n'en prennent pas, cette différence est due à l'existence, dans les premières, d'une cellulose capable de se combiner avec la silice, tandis que la cellulose des légumineuses, isomère, mais non identique à la précédente, ne peut contracter une union semblable.

§ 45. — Assimilation dans les végétaux des phosphates et des bases.

Si les bases se rencontraient toujours dans les végétaux à l'état insoluble, comme la chaux à l'état d'oxalate ou de carbonate, leur accumulation serait produite par des causes semblables à celles qui déterminent l'assimilation de la silice par les graminées; mais, en réalité, il n'en est pas ainsi, et l'on rencontre souvent dans les tissus des matières minérales en quantités notables, bien qu'elles y soient en dissolution : le tartrate de potasse dans les raisins, le citrate et l'oxalate de potasse dans les pommes de terre, l'oxalate de potasse encore dans les

betteraves et dans les oscilles, sont en dissolution dans les liquides qui gorgent les cellules; il en est de même des phosphates, qui, dans les feuilles ou dans les tubercules, restent solubles, et ne se précipitent que lorsque l'albumine qu'ils accompagnent se coagule.

Pour comprendre le mécanisme de l'assimilation des matières minérales qui sont en combinaison dans les végétaux, mais qui y forment des combinaisons solubles, nous allons recourir encore une fois aux expériences exécutées à l'aide de vases inertes.

Supposons qu'on place de l'eau distillée dans un vase poreux de la pile de Bunsen, et qu'on immerge celui-ci dans une dissolution complexe, formée, par exemple, de bicarbonate de soude et de chlorure de potassium : on reconnaîtra, après quelques jours, que les deux sels sont entrés en quantités égales dans l'eau intérieure, ils se sont diffusés avec la même rapidité. Changeons maintenant le liquide contenu dans le vase poreux et plaçons à l'intérieur un acide, et voyons ce qui arrivera. L'expérience a porté sur un mélange de 3^{gr},414 de bicarbonate de potasse et de 3^{gr},414 de sel marin dissous dans les 150 centim. cubes du vase extérieur; intérieurement, on avait placé 50 centimètres cubes d'acide sulfurique très dilué. Après vingt-quatre heures, on a trouvé que la liqueur extérieure avait perdu 0^{gr},825 de bicarbonate de potasse et seulement 0^{gr},210 de sel marin; on a reconnu que la diffusion avait eu lieu du vase extérieur vers l'acide intérieur, car la liqueur extérieure ne renfermait que des traces d'acide sulfurique.

On peut conclure de ces essais que la présence dans le vase poreux d'une substance capable de se combiner avec l'un des sels contenus dans le vase extérieur détermine la diffusion plus abondante de celui-ci. Cette cause perturbatrice modifie donc profondément les lois de la diffusion; tous les éléments solubles n'entrent plus avec la même vitesse: l'un s'accumule rapidement dans le vase poreux, tandis que l'autre, sollicité seulement par la force de diffusion, n'y pénètre qu'avec une certaine lenteur; et si l'on met fin à l'expérience après un certain temps, on pourra dire que le vase poreux renfermant un acide a fait une sorte de choix dans les substances qu'il avait à sa disposition, et qu'il a pris l'une en plus grande quantité que l'autre.

Revenons maintenant aux plantes, et considérons une pomme de terre dont les tubercules sont enfouis dans une terre meuble suffisamment humide et renfermant, par exemple, du carbonate de potasse et du sel marin. Par suite probablement d'un phénomène d'oxydation de l'amidon contenu dans les tissus, des acides, tels que l'acide citrique ou l'acide oxalique, apparaissent; ils s'unissent au carbonate de potasse qui a pénétré par diffusion dans les cellules de la pomme de terre, comme l'acide sulfurique s'unirait au carbonate de potasse qui est entré dans le vase poreux. Aussitôt, au reste, que la combinaison est faite, l'eau qui gorge les tissus du tubercule est moins riche en carbonate de potasse que l'eau du sol, et une nouvelle quantité doit pénétrer par diffusion pour remplacer celle qui a contracté une combinaison avec les acides formés.

On expliquerait par des considérations analogues l'assimilation des phosphates qui se rencontrent à l'état soluble dans les jeunes feuilles, dans les tubercules, et qui s'y trouvent en combinaison, ainsi que nous l'avons vu plus

haut, § 25. On se rappelle qu'on trouve, en effet, dans du jus de pomme de terre par exemple, avant que l'albumine ait été coagulée par l'ébullition, une proportion sensible de chaux et d'acide phosphorique, qui ne pourraient rester en dissolution dans une liqueur neutre, s'ils n'y étaient maintenus par une combinaison ; et c'est précisément à l'existence de celle-ci que nous attribuons la pénétration des phosphates qu'on rencontre toujours associés aux matières azotées et qui sont peut-être nécessaires à leur formation.

§ 46. — Accumulation dans les feuilles de substances solubles dans l'eau chargée d'acide carbonique et insoluble dans l'eau pure.

Il existe un certain nombre de matières susceptibles de se dissoudre dans l'eau chargée d'acide carbonique, mais insolubles dans l'eau pure ; ce sont précisément ces matières qui finissent par former entièrement les cendres contenues dans les feuilles, et il était important de reconnaître ce qui arriverait lorsqu'on soumettrait à l'évaporation spontanée un mélange d'une de ces matières et d'un sel soluble dans l'eau pure. On se servit comme appareil d'évaporation d'une bande de gaze ou d'une mèche de coton, dans lesquelles le liquide monte rapidement par capillarité, ainsi qu'il est facile de le constater en mouillant la bande de gaze et en la plaçant dans une dissolution colorée.

Pour reconnaître si cette évaporation pouvait faciliter le dépôt des substances insolubles dans l'eau, mais solubles dans l'acide carbonique, on dispose l'expérience suivante : Dans deux vases de verre de forme semblable on plaça respectivement des dissolutions de bicarbonate de chaux et de sel marin ; des bandes de gaze plongeant par l'une de leurs extrémités dans les liquides, et les deux sels s'élevaient dans le tissu.

L'expérience fut arrêtée après quelques jours, et l'on dosa les sels restant dans les deux dissolutions. On connaissait le titre primitif, on put ainsi déterminer quelles étaient les quantités de sels qui s'étaient fixées sur les bandes ; on reconnut que la dissolution de sel marin avait perdu 27 p. 100 du sel primitif, et le bicarbonate de chaux 62 p. 100. La raison de cette différence nous paraît analogue à celle que nous avons donnée plus haut : pour que l'équilibre d'une dissolution soit établi, il faut que le sel obéissant à la force de diffusion existe en quantité semblable dans tous les points du liquide ; si cet équilibre est rompu par une cause quelconque, si le sel disparaît en un point, une nouvelle quantité de sel se dirige vers le point où s'est manifesté la cause perturbatrice. Or, le bicarbonate de chaux en dissolution dans l'eau est un corps très facile à décomposer : exposé à l'évaporation, l'acide carbonique en excès se dégage et du carbonate de chaux se précipite ; les stalactites, si abondantes dans les grottes des pays calcaires, n'ont pas une autre cause. Le sel marin, au contraire, est très stable et ne se décompose nullement par l'évaporation. On conçoit donc que, dans les deux vases, il se produise des effets très différents. Dans l'un, l'eau chargée d'acide carbonique et de carbonate de chaux va s'élever dans les bandes de gaze ; mais bientôt l'acide carbonique, abandonnant le carbonate de chaux, celui-ci devient insoluble et se précipite. Dès lors l'équilibre

est rompu ; de l'eau plus pauvre en carbonate de chaux que celle de la dissolution existe dans les bandes de gaze, et une nouvelle quantité de bicarbonate de chaux va être attirée pour combler le vide qu'a causé l'évaporation. Cette nouvelle quantité de carbonate de chaux se précipitera à son tour, et le même phénomène se reproduisant constamment, la liqueur s'appauvrira rapidement au profit des bandes de gaze qui se chargent d'une quantité croissante de carbonate de chaux.

Il n'en sera pas de même du sel marin : l'eau, en s'évaporant dans les bandes de gaze, va y laisser une dissolution plus concentrée que celle qui existe dans l'eau même, et cette concentration retardera l'arrivée d'une nouvelle quantité de sel ; il y aura même reflux du sel marin des bandelettes vers la liqueur, et, si celle-ci s'appauvrit, c'est probablement par suite d'une sorte d'adhérence capillaire exercée par la gaze sur le sel marin.

Si nous mélangeons dans le même verre des dissolutions de sel marin et de bicarbonate de chaux, et que nous y disposions des bandes de gaze comme il a été dit plus haut, nous obtiendrons encore des résultats semblables à ceux de l'expérience précédente : sur 100 parties de bicarbonate de chaux contenues dans la dissolution, 22 disparaissent, tandis que la liqueur ne perd dans le même temps que 5 de sel marin.

Dans une troisième expérience, on a trouvé que la dissolution avait perdu par l'évaporation dans les bandelettes 14 p. 100 de bicarbonate de chaux qu'elles renfermaient et 7 p. 100 de sel marin.

Des résultats analogues furent encore obtenus avec la silice et le sel marin placés dans un vase de verre garni de bandelettes de gaze : pendant que la liqueur ne perdait que 2,2 p. 100 du sel marin qu'elle renfermait, elle s'appauvrissait de 26 p. 100 de silice.

Enfin, le phosphate de chaux et le sel marin donnent encore des résultats semblables : tandis que la liqueur renfermait à la fin de l'expérience la même quantité de sel qu'au commencement, car on avait eu soin de tordre la mèche de coton servant d'organe d'évaporation pour en exprimer la dissolution concentrée qu'elle renfermait, on trouva que 11 p. 100 du phosphate de chaux avait disparu.

Nous avons donné la composition des feuilles de hêtre à diverses époques de sa croissance, et nous avons reconnu que dans les vieilles feuilles il n'existe que du carbonate de chaux et de la silice. Examinons d'abord comment cette accumulation peut avoir lieu, nous reviendrons plus loin sur la disparition des phosphates et de la potasse, qui, abondants dans les cendres des jeunes feuilles, font défaut au contraire dans les cendres des feuilles plus âgées.

Le raisonnement que nous avons appliqué à la concentration dans les mèches de coton et dans les bandes de gaze des matières insolubles dans l'eau pure, mais solubles dans l'eau chargée d'acide carbonique, s'appliquera également à leur accumulation dans les feuilles ou dans l'écorce. Qu'une dissolution de silice ou de bicarbonate de chaux pénètre en effet dans un végétal, elle tendra à se répandre uniformément dans toute sa masse ; elle arrivera aux feuilles, là elle éprouvera une modification particulière. En effet, l'acide carbonique, qui tenait les sels en dissolution, sera évaporé ou décomposé, et par suite le carbonate ou la silice seront précipités ; la liqueur qui gorge la feuille ou l'écorce sera donc

appauvrie de ces sels solubles dans l'eau chargée d'acide carbonique, mais insolubles dans l'eau pure, et à mesure que la feuille aura plus longtemps fonctionné comme appareil d'évaporation, à mesure elle se sera enrichie de silice ou de carbonate de chaux.

Nous pouvons encore tirer des faits précédents l'explication d'une ancienne observation de Th. de Saussure : « Les cendres de l'écorce contiennent, dit-il, une beaucoup moins grande proportion de sels alcalins que les cendres du bois et de l'aubier. » — « Les cendres de l'écorce contiennent une énorme proportion de carbonate de chaux », ajoute-t-il plus loin. Et enfin, quand il s'agit d'interpréter ce fait, il écrit : « L'écorce ne se renouvelle que très lentement; elle est exposée pendant toute l'année au lavage de la pluie et des rosées, elle doit plus qu'aucune partie être dépouillée de sels solubles. » Th. de Saussure reconnaît que cette explication est suffisante; mais nous n'aurons pas de peine à tirer de nos expériences précédentes la raison du fait qu'il énonce.

L'écorce, comme les feuilles, fonctionne comme un appareil d'évaporation; c'est donc là que l'acide carbonique va se dégager et abandonner le carbonate de chaux qu'il tenait en dissolution; et comme c'est dans l'écorce que la sève s'appauvrit de carbonate de chaux, c'est vers ce point que le carbonate de chaux se dirigera pour venir rétablir un équilibre à chaque instant rompu. Il n'en sera pas de même des dissolutions alcalines; elles ne se décomposent que par l'évaporation, elles ne subissent dans l'écorce qu'une concentration encore accusée par la quantité d'alcalis que laisse cet organe à la calcination, mais qui ne forme qu'une faible fraction de la masse totale des cendres. A l'intérieur du bois, la sève est soustraite à toute cause d'évaporation, et elle doit renfermer surtout les principes solubles, dont la proportion centésimale se trouve singulièrement augmentée par suite du transport dans l'écorce des principes insolubles dans l'eau pure, mais solubles dans l'eau chargée d'acide carbonique.

On voit donc que l'explication de l'accumulation du carbonate de chaux dans l'écorce, du partage inégal des sels alcalins et des sels de chaux entre l'écorce et le bois, peut encore être tirée des expériences exécutées avec le bicarbonate de chaux et le sel marin dans les vases où plongeaient les bandelettes de gaze.

§ 47. — Sur l'accumulation dans les végétaux de quelques sels solubles.

Le travail que nous venons de résumer (1) laisse sans interprétation précise quelques cas particuliers, intéressants à discuter.

On trouve parfois dans les plantes des quantités notables de certains sels dont le mode d'assimilation est difficile à expliquer; les racines de betteraves renferment dans les terrains bien fumés des masses de salpêtre qui parfois gênent singulièrement la cristallisation du sucre. J'ai eu occasion d'analyser une betterave provenant d'un terrain très fumé du département du Nord, on y trouvait

(1) *Ann. des sciences naturelles*, 5^e série, tome VII, p. 145, 1867. — Le mémoire couronné par l'Académie a été remis au secrétariat en juin 1865.

5 p. 100 d'azote sur 100 de matière sèche; si tout cet azote eut été à l'état de salpêtre; la betterave desséchée en eut contenu le tiers de son poids; il est probable que ce chiffre est exagéré, et cependant après dessiccation, elle fusait au feu avec décrépitation. On trouve parfois dans le maïs et le sorgho des quantités notables de nitrates, et les accidents survenus à diverses reprises dans l'emploi comme fourrage de cette dernière plante sont dus sans doute à l'influence de ces nitrates. Enfin quelques végétaux sont connus pour les proportions de salpêtre qu'on y rencontre, tel est l'*Amarantus blitum*, qui, après dessiccation, détone quand on veut le calciner.

Dans une série de travaux récents MM. Berthelot et André ont montré que toutes les plantes renferment des quantités de nitrates, parfois considérables, d'après leurs dosages l'*amarantus giganteus* calculé à 100 pieds par arc, contiendrait dans la récolte obtenue d'un hectare 320 kilogrammes de salpêtre.

MM. Berthelot et André ont reconnu que le sol qui avait porté ces amarantes s'était appauvri en azote combiné et en potasse, mais qu'au contraire la proportion de nitrates était restée simplement constante, ce résultat les a conduits à supposer que le salpêtre est formé dans le végétal même, les cellules végétales agissant comme le protoorganisme du sol qui provoque la nitrification.

S'il n'en était pas ainsi il resterait à rechercher le mécanisme de l'assimilation de quantités notables de ces sels solubles; il reste également à reconnaître comment quelques matières solubles qui sont absolument repoussées par les végétaux sans qu'on puisse saisir la raison de la préférence qu'ils accordent à des corps doués de propriétés analogues. On sait notamment, depuis les travaux de M. Péligot, que la soude ne pénètre pas dans la plupart des végétaux cultivés.

L'emploi du nitrate de soude comme engrais ne peut être considéré comme une objection, car par suite des doubles échanges qui se font dans le sol, son acide azotique pénètre seulement dans les plantes sous forme de nitrate de potasse. J'ai donné, il y a déjà quelques années, une preuve décisive de ces transformations. Des haricots d'Espagne furent semés dans un grand pot à fleur contenant de la bonne terre de jardin; puis, quand ils furent bien développés, on les arrosa de dissolutions de sel marin de plus en plus concentrées jusqu'à les faire périr. La plante fut alors analysée; on y trouva des quantités considérables de chlore, mais pas une trace de soude; le haricot était mort d'une pléthore de chlorure de potassium.

Il est possible cependant de faire pénétrer dans les haricots de très petites quantités de sel de soude; pour y réussir, il faut enraciner les haricots dans l'eau, et les alimenter avec des dissolutions ne renfermant que des sels de soude, ou contenant ces sels en excès sur les autres matières minérales; l'appétence de la jeune plante pour les matières dissoutes est assez vive pour qu'elle absorbe les sels de soude et même pour qu'elle les prenne dans une dissolution étendue en plus grande proportion que l'eau qui les tient en dissolution.

On conçoit, en effet, que trois cas puissent se présenter quant une plante est enracinée dans une dissolution. Ou bien la dissolution est concentrée, et alors, comme dans les expériences de Th. de Saussure, les plantes prennent plus d'eau que de matière dissoute et la dissolution s'enrichit, ou bien la dissolution est

plus étendue, et dissolvant et matière dissoute pénètrent simultanément, tellement que la concentration de la dissolution ne change pas, ou bien encore la dissolution est très étendue : la matière dissoute est prise alors en plus grande quantité que l'eau et la dissolution l'appauvrit; c'est le cas qu'on peut observer quand on place des haricots encore munis de leurs cotylédons dans une dissolution étendue d'un sel de soude; mais il semble qu'il n'en soit plus ainsi dans une plante adulte et qu'aussitôt qu'elle peut choisir entre différents sels, elle prenne toujours les sels de potasse ou de chaux en repoussant absolument les sels de soude.

Dans l'état actuel de nos connaissances, on ne voit aucune hypothèse à émettre pour expliquer ce choix absolu et la préférence de la plupart des végétaux pour les sels de potasse, leur répugnance pour les sels de soude reste absolument inexplicquée; ce fait intéressant, dont on doit l'entière découverte à M. Péligot, est resté jusqu'à présent sans aucune interprétation.

§ 48. — De l'utilité et du rôle des matières minérales.

Quand on constate que dans les feuilles qui avancent en âge, les proportions de carbonate de chaux et de silice augmentent, tandis que la potasse et l'acide phosphorique disparaissent, on est déjà tenté de supposer que toutes les matières minérales n'ont pas la même utilité pour le végétal, et que les substances qui restent dans les organes destinés à une chute prochaine ont moins d'importance que celles qui sont résorbées et vont s'accumuler dans les organes destinés à survivre; toutefois pour arriver à connaître le degré d'utilité des diverses matières minérales, l'analyse des diverses parties de la plante à différentes époques de son développement est insuffisante, il faut avoir recours à l'expérience directe : il convient d'élever des plantes en les privant de celles des matières minérales dont on cherche à déterminer le rôle.

Silice. — Nous avons vu plus haut que les analyses d'Isidore Pierre avaient montré que la silice n'a pas pour les céréales l'intérêt qu'on lui avait accordé *a priori*, et que notamment son abondance ne paraît avoir aucune influence sur leur résistance à la verse.

M. von Hohuel a exécuté sur l'importance de la silice quelques expériences intéressantes (1). On rencontre chez quelques espèces de *lithospermum* des fruits recouverts d'un épiderme complètement silicifié, et il importait de savoir si l'accumulation de la silice dans cette enveloppe est nécessaire au développement de la plante et si elle est incapable de mûrir ses fruits dans un milieu exempt de silice.

L'auteur a réussi à élever une plante dans une dissolution nutritive privée de silice. Après une végétation de deux mois, la plante fructifia et donna en tout neuf péricarpes mûrs; elle ne différait pas sensiblement de la plante normale, cependant les poils qui recouvraient la tige de la plante sans silice étaient moins durs que ceux de celle qui avait végété dans une dissolution pourvue de silice.

(1) *Ann. agron.*, t. III, p. 633.

Les petits fruits mûrs avaient une couleur d'un blanc grisâtre; ils avaient la dureté du spath calcaire, et leur surface était rugueuse comme légèrement tuberculeuse. Traités par l'acide chlorhydrique, ils produisirent une vive effervescence. L'analyse ne dévoila aucune trace de silice; ainsi, malgré l'abondance avec laquelle cet acide se rencontre habituellement dans le *lithospermum arvense*, cette plante peut arriver à maturité en étant complètement privée de silice.

M. F. Wolf (1) réussit à élever de l'avoine dans une dissolution nutritive exempte de silice, mais les plantes ne furent jamais aussi vigoureuses que lorsqu'elles rencontrèrent cet élément dans l'eau où plongeaient leurs racines.

Ainsi, dans le cas le plus favorable, quand les dissolutions nutritives renfermaient 0^{sr},5 par litre, on obtint 4^{sr},162 de grains avec une dissolution privée de silice; 5^{sr},408 quand cette matière entra pour 27 p. 100 dans les substances dissoutes et 7^{sr},693 quand elle fut dans la proportion de 42 p. 100 de la matière dissoute. Dans ces mêmes dissolutions les poids de paille furent respectivement 21^{sr},480, 23^{sr},908 et 27^{sr},891. Si la silice n'est pas nécessaire elle est donc avantageuse à l'avoine.

M. Victor Jodin (2) a encore exécuté sur ce sujet une série d'expériences du plus grand intérêt. Il a élevé dans une dissolution exempte de silice, un pied de maïs dont il a obtenu 9 graines fertiles, tandis qu'une plante normale renfermant pour 100 de matière sèche 3^{sr},27 de silice, celle qui avait été cultivée dans l'eau n'en contenait que 0^{sr},4; les graines provenant de cette première génération furent élevées dans une dissolution nutritive encore exempte de silice; la plante sèche pesait 8^{sr},996 et renfermait 12 grains fertiles, pour 100 de matière sèche elle contenait 0^{sr},2 de silice; les graines semées donnèrent une troisième génération et de celle-ci on obtint des graines, qui furent élevées encore dans une dissolution exempte de silice. Les graines provenant de la troisième génération furent élevées les unes dans la terre, et les autres dans une dissolution exempte de silice; les cendres de ces deux plantes furent analysés; la plante enracinée dans la terre reprit une proportion de silice considérable, mais une quantité de potasse bien inférieure à celle que contenait la plante élevée dans l'eau, bien qu'on eût employé la même dissolution nutritive pour l'arrosage de la plante en terre et pour l'alimentation de la plante dans l'eau.

De ces expériences, l'auteur conclut que non seulement une graine de maïs cultivée dans une dissolution minérale convenable peut végéter et former une plante normale sans fixer dans ses tissus une proportion notable de silice, mais encore que cette privation de silice, si contraire aux habitudes spécifiques de la plante, peut être prolongée pendant plusieurs générations successives, sans que cette descendance anormale manifeste une dégénérescence physiologique attribuable à la continuité de cette privation.

Si laissant de côté la silice, dont la fonction physiologique est obscure et discutable, l'on considère un élément essentiellement actif, comme l'acide phosphorique ou la potasse, on trouve qu'un plant de maïs cultivé dans l'eau peut par-

(1) *Ann. agron.*, t. VII, p. 467.

(2) *Ann. agron.*, t. IX, p. 385.

courir toutes les phases d'une évolution complète, y compris la production de graines fertiles, en mettant en œuvre et retenant dans ses tissus seulement un quart de l'acide phosphorique et la moitié de la potasse, qui furent trouvés dans une plante de même espèce et de même poids cultivée en pleine terre. Bien plus, une graine issue de quatre générations dans l'eau sans silice, semée dans un peu de terre végétale abondamment arrosée, a pu donner une plante très vigoureuse et fertile qui, à poids égal, ne contenait pas même $\frac{1}{6}$ de la potasse fixée par une plante normale en pleine terre.

Chaux. — La chaux est extraordinairement abondante dans les cendres des végétaux, mais d'après les faits précédents, il est évident qu'on ne saurait en conclure *a priori* que cette matière soit nécessaire à l'évolution des plantes qui la renferme.

L'observation est un procédé d'investigation tout à fait insuffisant pour résoudre ce genre de question, et on ne peut arriver à constater le degré d'utilité d'une matière minérale que, par une série de cultures expérimentales entreprises avec des dispositions telles qu'on peut reconnaître si la présence de tel ou tel principe est nécessaire, favorable ou indifférent.

Nous avons vu plus haut § 7 que la présence de la chaux est éminemment favorable à la plupart des jeunes plantes au moment où elles commencent leur évolution; nous avons reconnu avec M. J. Boehm, puis M. von Liebenberg, qu'un grand nombre de graines vident bien mieux leurs cotylédons au profit des jeunes racines et des tiges dans une eau renfermant des sels calcaires que dans l'eau distillée, mais que cependant l'évolution est encore possible dans l'eau distillée à condition que la température soit plus élevée, et que par suite la chaux est favorable mais non nécessaire.

Au reste, la question n'a qu'un intérêt physiologique, car la chaux est tellement répandue à la surface de la terre, qu'il est bien rare qu'elle fasse défaut; quand les terrains n'en renferment pas, elle est amenée par les eaux souterraines, et les amendements calcaires n'ont pas pour but de fournir aux plantes les matières calcaires qui leur sont nécessaires, mais de modifier la composition du sol et notamment d'en exclure les plantes calcifuges qui l'occupent.

Acide phosphorique. — L'importance de l'acide phosphorique est telle, qu'on pourrait n'avoir pas recours aux méthodes délicates des laboratoires pour reconnaître son utilité; son addition dans les sols où il est rare, ou bien où il fait défaut, est suivie d'un tel progrès dans la végétation qu'on reconnaît immédiatement qu'il est nécessaire à la vie même du végétal.

Dans les terrains siliceux de Bretagne notamment, l'influence qu'exercent les phosphates est tout à fait remarquable. M. Roussille a obtenu 3,352 grammes, dont 1,354 de grains d'une récolte de sarrasin développée sur une parcelle sans engrais, de 6,103, dont 2,142 de grains sur une parcelle voisine qui avait été amendée avec des superphosphates. Ainsi dans le sol en expériences, la seule addition des phosphates a doublé la récolte.

Dans les sols mêmes où les phosphates ne font pas absolument défaut, mais où ils sont peu abondants, leur addition donne aux engrais azotés une remarquable efficacité. A Rothamsted, la parcelle 10 du champ de blé ne reçoit que des sels ammoniacaux (448 kilogrammes à l'hectare chaque année); elle a donné de

1867 à 1881, en moyenne, 3.522 kilogrammes de récolte, dont 16^{hectol},2 de graines : tandis que la parcelle voisine (n° 11), qui recevait la même dose de sels ammoniacaux, mais en outre des superphosphates fournit 4.162 kilogrammes de récolte et 20 hectolitres de grain ; de plus les eaux de drainage de la parcelle 10 entraînent chaque année 65 kilogrammes d'azote, dont la plus grande partie s'écoule sous forme d'acide azotique, tandis que la parcelle 11, qui reçoit du phosphate de chaux, n'en perd que 56 kilogrammes.

A ces observations de grande culture, il convient d'ajouter les expériences décisives suivantes exécutées par M. Boussingault, en 1856 : tandis qu'un helianthus planté dans un sol stérile amendé avec du salpêtre et pas de phosphate pesait, après dessiccation, 1^{er},175, une plante analogue âgée de 86 jours et semée dans une terre renfermant à la fois du phosphate et du salpêtre, pesait après dessiccation, 21^{er},22.

Nous avons vu déjà que ces expériences ne prouvent pas cependant que toujours et partout, il soit avantageux de donner au sol des phosphates, il existe un grand nombre de terrains qui renferment une quantité de ces sels suffisante pour qu'une nouvelle addition soit inutile et n'exerce aucun effet. Contrairement à ce qu'enseignait Liebig, ce n'est pas la composition de la plante qui détermine la nature des engrais à lui fournir, c'est la composition du sol sur lequel cette plante doit être semée.

L'expérience se prononce donc très nettement, l'acide phosphorique est un élément indispensable au développement de la plante, ce point est acquis ; il est même probable que l'acide phosphorique qu'on voit toujours accompagner les matières azotées dans leur migration, qui passe avec elle dans leurs dissolvants, fait partie intégrante de ces matières azotées, mais cette dernière manière de voir n'est encore établie que par des observations, et il resterait à entreprendre une série de recherches expérimentales pour préciser le rôle que remplissent les phosphates dans la vie végétale.

Potasse. — Il faut répéter pour la potasse, ce qui a été dit pour l'acide phosphorique ; cette base paraît indispensable au développement de la plante et cependant, son emploi comme engrais reste très limité. Elle n'exerce en effet une influence utile que dans un nombre de sols assez restreint ; à Grignon, nous n'avons pu l'utiliser ni pour la culture des pommes de terre, ni pour celle des betteraves ; elle a produit parfois un accroissement sensible de récolte sur le blé et aussi quelque amélioration dans la culture du maïs ; enfin les cultivateurs méridionaux affirment avoir employé avec profit la potasse dans leurs vignobles, mais il faut reconnaître que, très habituellement, le sol renferme une quantité de potasse suffisante pour qu'il ne soit pas avantageux d'en ajouter de nouvelles doses.

Le rôle que remplit la potasse dans l'organisation végétale a été mis en évidence par le travail classique de MM. Nobbe Erdmann et Schœder (1).

Ces habiles physiologistes ont cultivé du sarrasin dans des dissolutions nutritives dont ils ont fait varier la composition ; de façon à éclairer par l'expérience les trois questions suivantes :

1° Comment se comporte la plante dans une solution d'ailleurs complète,

mais privée de potasse, et quelles sont les causes des phénomènes particuliers qui apparaissent dans cette culture?

2° Comment se comporte la plante dans des solutions où la potasse est engagée dans des combinaisons différentes, et quelles sont les causes d'une action plus ou moins favorable à l'un ou l'autre de ces sels?

3° La soude et la lithine peuvent-elles remplacer physiologiquement la potasse?

L'examen microscopique, la pesée des plantes, leur analyse, conduisirent à des conclusions dignes d'intérêt.

Lorsque la potasse manque, l'accroissement de la plante est arrêté : ni la soude, ni la lithine ne peuvent remplacer la potasse dans ses fonctions physiologiques; la lithine exerce même une action délétère. L'arrêt de développement est dû à l'incapacité de la chlorophylle de produire de l'amidon; la jeune plante végète d'abord aux dépens de l'amidon de réserve contenu dans la graine; mais celui-ci consommé, elle persiste dans un état d'inanition parfait qui rend même inutiles les autres aliments minéraux. Quand on ajoute ensuite de la potasse à la solution nutritive, la plante commence immédiatement à se ranimer; il se forme de l'amidon dans les cellules à chlorophylle; et les auteurs répondent à la première question posée en disant que les grains de chlorophylle n'engendrent d'amidon autochtone que sous l'influence de la potasse, quelle que soit d'ailleurs la forme sous laquelle cette base se présente.

Il ne suffit pas pour que la végétation suive son cours régulier que les cellules à chlorophylle élaborent de l'amidon, il faut encore que cet amidon se dissolve, chemine à travers les tissus pour aller former des organes nouveaux après avoir subi une série de métamorphose qui l'amène à l'état de cellulose; or la forme sous laquelle la potasse est présentée à la plante n'est pas indifférente; l'expérience a montré que le chlorure de potassium est la combinaison de potassium la plus favorable à la végétation du sarrasin. L'azotate de potasse s'en rapproche le plus : le sulfate et le phosphate de potasse causent tôt ou tard une maladie particulière qui consiste dans l'accumulation passive de l'amidon dans les feuilles.

Il faut bien reconnaître, au reste, que cette dernière conclusion n'est pas absolument certaine; en effet, les dissolutions salines employées étant fort complexes, il s'y est fait certainement des échanges de bases et d'acides, de telle sorte que la dissolution ne présente pas la composition que les auteurs leur assignent d'après les sels qu'ils ont mélangé, et il est probable, ainsi que l'a fait observer M. J. Vesque, dans la traduction qu'il a donné aux *Annales agronomiques* (tome I^{er}), que la maladie observée quand les plantes ont été enracinées dans des dissolutions renfermant du phosphate ou du sulfate de potasse, tient, moins à la forme de la combinaison qu'à la quantité considérable d'acide phosphorique ou d'acide sulfurique introduits.

Chlorures. — Quelques faits de grande cultures sont de nature à montrer que les chlorures ont une influence heureuse sur la migration des principes immédiats. M. de Gasparin a observé que sur une terre légèrement salée des environs d'Orange, les récoltes de grains étaient en général excellentes, si les pluies avaient été assez abondantes au moment des semailles pour que les jeunes plantes n'eussent pas à souffrir de la concentration de la dissolution saline qui abreuve

leurs racines. Quand la levée est bonne, en général, les plantes accomplissent très régulièrement toutes les phases de leur évolution et notamment mûrissent bien leurs graines.

Dans une série d'expériences exécutées en 1866 et 1867 sur l'emploi agricole des sels de potasse, j'ai reconnu que si le sulfate de potasse épuré ne produisait pas d'effet avantageux sur la culture du blé : la matière vendue par les usines allemandes sous le nom d'engrais de potasse, très chargée de chlorures, a déterminé au contraire un surcroît de récolte considérable; dans une des séries d'expériences, la parcelle sans engrais ayant fourni 16 hectolitres de grains, on en obtint 30, par l'addition de l'engrais de potasse.

Les effets du chlorure de potassium ne sont pas très réguliers, pendant plusieurs années, je l'ai essayé sans succès sur la culture de l'avoine, mais en 1884, le mélange d'azotate de soude et de chlorure de potassium m'a fourni à l'hectare sur une parcelle : 32 quintaux métriques de grain et sur une autre 34. Comme le prix du sel marin ou même celui du chlorure de potassium sont peu élevés, que les quantités à employer sont faibles, les praticiens devront essayer l'action de ces chlorures qui, ainsi qu'il vient d'être dit, est parfois très favorable.

Leur rôle est-il seulement de favoriser la migration des principes immédiats d'un point de la plante à l'autre, ou bien au contraire exercent-ils sur le sol lui-même une transformation favorable, nous l'ignorons. Aujourd'hui que le rôle prédominant des organismes inférieurs qui existent dans le sol sur les métamorphoses qui s'y produisent commence seulement à être entrevu, les interprétations du rôle des agents employés deviennent singulièrement délicates et il est sage d'enregistrer seulement les faits dont l'explication est sans doute infiniment plus complexe qu'on le croyait naguère.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

GERMINATION

	Pages
<i>Évolution des graines.</i> — § 1. — Du choix de la graine.	1
Qualité de la graine.	2
2. — Préparation des graines.	3
3. — Des conditions de la germination.	5
Oxygène.	5
Quantité d'oxygène nécessaire à la germination.	5
Mélanges gazeux.	6
Influence de la température.	7
Influence de la lumière.	8
Influence de l'électricité.	8
4. — Échanges gazeux observés pendant la germination.	9
Nature des gaz dégagés pendant la germination.	10
Rapport entre l'oxygène absorbé et l'acide carbonique émis.	11
5. — Des transformations que subissent les graines pendant la germination.	12
Transformations des principes immédiats pendant la germination.	12
6. — Composition immédiate de graines et de plants de maïs développés dans l'obscurité.	13
Transformation de l'amidon.	13
Transformation des matières grasses.	15
Transformation des matières azotées.	15
7. — Influence des matières minérales sur le développement de la jeune plante.	17
Résumé des phénomènes de germination.	20
8. — Évolution des tubercules.	20
Modifications présentées par les vieux tubercules de pommes de terre pendant quatorze semaines.	21
9. — Évolution des bourgeons.	22
10. — Évolution des jeunes organes à l'obscurité.	24

CHAPITRE II

ASSIMILATION DU CARBONE

	Pages
11. — Apparition de la chlorophylle.	26
Influence de l'énergie des radiations.	26
Influence de la nature des radiations.	26
Influence de la chaleur.	27
12. — Composition de la chlorophylle.	27
Spectre de la chlorophylle.	28
Altérations de la chlorophylle.	28
13. — Dispositions des grains de chlorophylle dans les cellules.	29
14. — Décomposition de l'acide carbonique par les plantes vertes.	30
Démonstration expérimentale	31
15. — Influence de la composition de l'atmosphère dans laquelle sont placées les feuilles.	33
15. — Pénétration de l'acide carbonique dans la feuille.	33
16. — Influence de l'état de la feuille.	36
17. — Volumes de l'acide carbonique décomposé et de l'oxygène dégagé par les feuilles insolées.	37
18. — De l'action qu'exercent diverses radiations sur la décomposition de l'acide carbonique par les feuilles.	39
19. — Décomposition à l'aide des lumières artificielles.	41
20. — Influence des diverses parties du spectre solaire.	52
21. — Principes immédiats formés par la décomposition de l'acide carbonique.	56
22. — Influence de l'intensité de l'éclairage sur la production de l'amidon	56
24. — Influence d'une atmosphère chargée d'acide carbonique.	49
25. — La présence de l'acide carbonique est une condition d'existence de la plante verte.	51
26. — Importance du phénomène de réduction de l'acide carbonique par les plantes vertes insolées.	52
27. — Assimilation des matières carbonées de la terre arable.	53

CHAPITRE III

ASSIMILATION DE L'AZOTE

27. — Assimilation de l'azote sous forme de nitrates.	59
28. — Assimilation de l'azote sous forme de sels ammoniacaux.	62
29. — Assimilation des matières azotées autres que les sels ammoniacaux et les nitrates.	63
Culture du sainfoin.	64
30. — Intervention de l'azote libre dans la végétation.	65

	Pages
31. — Assimilation de l'azote libre par les végétaux	69
Résultat des premières expériences de M. Boussingault, pour déterminer si les plantes assimilent l'azote libre de l'atmosphère.	66
Expériences de M. G. Ville	67
Nouvelles expériences de M. Boussingault.	69
Expériences exécutées à Rothamsted.	71
Influence de l'azote efflué	72
32. — Influence de l'électricité sur le développement de la plante	73
33. — Influence de l'ammoniaque atmosphérique.	75
Absorption de l'ammoniaque gazeuse par les feuilles	76
Quantités d'ammoniaque existant dans l'air	76
Influence de l'ammoniaque atmosphérique	77

CHAPITRE IV

LE SOL SOURCE D'AZOTE DES PLANTES

34. — Des causes d'épuisement des sols par la culture.	79
Déperditions dues à la plante.	79
Azote enlevé par hectare et par an, par diverses récoltes soumises à un assolement régulier.	80
Proportion d'azote par hectare et par an, dans différentes récoltes obtenues à Rothamsted, sans engrais azoté.	81
Moyenne de l'azote dans les prairies de Rothamsted	82
35. — Pertes dues à la nitrification.	83
Répartition de l'azote des engrais, par hectare et par an, entre la récolte et l'eau de drainage.	84
36. — Azote dans les sols diversement cultivés.	84
Azote existant dans le sol des différentes parcelles, en octobre 1865.	85
37. — Discussion sur l'engrais en terre. Résultats constatés à l'école de Grignon.	86
38. — Discussion sur l'origine de l'azote combiné des sols arables.	89

CHAPITRE V

COMPOSITION DES CENDRES DES VÉGÉTAUX

39. — Détermination des cendres.	91
40. — Quantités de cendres laissées par les divers organes des végétaux.	92
Cendres dans les feuilles.	92
Cendres dans le bois.	93
Cendres dans les racines	93
Cendres dans les tiges.	94
Cendres dans une plante entière	94

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
41. — Nature des substances qui constituent les cendres.	95
Richesses en phosphates de 100 parties de cendres	99
Richesse en carbonate de chaux et en silice de 100 parties de cendres	99
Composition des cendres de quelques racines et tubercules	100
Analyse des cendres de différentes tiges	100
Composition des cendres de blé.	101

CHAPITRE VI

ASSIMILATION DES SUBSTANCES MINÉRALES PAR LES PLANTES

42. — De l'état des substances minérales dans les végétaux.	102
Silice contenue dans différentes tiges avant et après les lavages avec une dissolution de potasse étendue et bouillante	104
Détermination des quantités de cendres et des quantités de silice.	106
Sur l'état de l'acide phosphorique et de la chaux dans les graines.	110
43. — Examen des anciennes hypothèses proposées pour expliquer la composition des cendres.	113
Examen des organes d'absorption	113
Les racines absorbent tous les éléments solubles qui sont mis en contact avec elles.	113
Excrétion des racines.	114
44. — Des phénomènes de diffusion.	117
45. — Explication de l'accumulation des principes combinés à l'état insoluble dans les végétaux.	118
Expériences de Th. de Saussure.	119
Diffusion des matières solubles au travers des colloïdes.	120
Assimilation dans les végétaux des phosphates et des bases.	121
46. — Accumulation dans les feuilles de substances solubles dans l'eau chargée d'acide carbonique et insolubles dans l'eau pure.	123
47. — Sur l'accumulation dans les végétaux de quelques sels solubles.	125
48. — De l'utilité et du rôle des matières minérales.	127
Silice.	127
Chaux.	129
A. phosphorique.	129
Potasse.	130
Chlorures.	131

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES