

43558

Septet

G. ANDRÉ

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES  
DES SOLS  
EN AGRICULTURE



COLLECTION ARMAND COLIN

G. ANDRÉ  
PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES  
DES SOLS  
EN AGRICULTURE

COLLECTION ARMAND COLIN N° 24



BIBLIOTECA  
FUNDATIVNEI  
UNIVERSITARE  
CAROL I.



Nº Curent 43558 Format

Nº Inventar A. 20213 Anul

Sectia Depozit II Rastul

*Propriétés générales*  
*des Sols*  
*en Agriculture*



1956

DU MÊME AUTEUR

---

Chimie agricole, Chimie du sol, 2<sup>e</sup> édition, 1921, J.-B. Baillière  
et fils.

Chimie agricole, Chimie végétale, 2<sup>e</sup> édition, 1914, J.-B. Baillière  
et fils

3<sup>e</sup> édition en préparation.

*Ouvrages couronnés  
par l'Académie des Sciences.*

442141

COLLECTION ARMAND COLIN

*Inscr. A. 20.213* (Section de Chimie)

*Propriétés générales*  
*des Sols*  
*en Agriculture*

par

**Gustave ANDRÉ**

Professeur à l'Institut Agronomique,  
Agrégré de la Faculté de Médecine.

44876



LIBRAIRIE ARMAND COLIN  
103, Boulevard Saint-Michel, PARIS

—  
1923

Tous droits réservés.

194

CO: 1953

Biblioteca Centrală Universitară  
"Carol I" București  
Cota 43558

PC 110/09

B.C.U. Bucuresti



C44876

Tous droits de reproduction,  
de traduction et d'adaptation  
réservés pour tous pays.

Copyright 1923, by Max Leclerc  
et H. Bourrelier.

## PRÉFACE

*Ce petit ouvrage s'adresse aux personnes qui sont déjà familiarisées avec les problèmes généraux de l'Agriculture. Nous estimons, cependant, étant donné son caractère élémentaire, qu'il peut également rendre service à tous ceux qui sont désireux d'acquérir quelques notions exactes sur un sujet qui présente, sans qu'il soit besoin d'insister, un intérêt de premier ordre. C'est, en effet, le sol qui nourrit la plante. Le rendement des récoltes est en rapport étroit avec la qualité et la quantité des principes fertilisants que contient ce milieu solide dont il est possible, dans bien des cas, d'améliorer la valeur alimentaire par un emploi judicieux des engrais et des amendements. Cet emploi judicieux relève directement de l'examen méthodique des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.*

*L'étude physico-chimique de la terre arable a été l'objet d'un nombre incalculable de travaux. Elle constituait la seule base de l'Agronomie jusque vers l'année 1875. A partir de cette époque, sous l'influence des découvertes de Pasteur, on a commencé à envisager le sol, non plus comme une masse minérale inerte dont les changements de composition dépendaient exclusivement des seules forces physico-chimiques, mais comme un milieu vivant, peuplé d'une foule de microorganismes. La matière minérale, qui forme plus des neuf dixièmes de la terre arable proprement dite, est toujours en contact intime avec l'humus, c'est-à-dire avec les débris organiques des végétations antérieures. Cet humus — dont le carbone et l'azote servent de substratum alimentaire aux microorga-*



*nismes — subit de façon incessante une série de transformations dont l'étude a pris un développement toujours croissant depuis une cinquantaine d'années.*

*Le rôle que jouent ces microorganismes est capital dans la suite des réactions qui, au sein de la masse du sol, amènent les éléments minéraux insolubles à l'état soluble en leur communiquant ainsi une forme propre à l'absorption par les racines des plantes.*

*Ce sont ces différents phénomènes — d'ordre physique, chimique et microbiologique — dont nous avons tenté de faire un rapide exposé dans les pages qui suivent, en nous efforçant de montrer les relations qui les rattachent les uns aux autres.*

10 mai 1922.

# PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES SOLS EN AGRICULTURE

---

## CHAPITRE PREMIER

### LES CONSTITUANTS DE LA MATIÈRE VÉGÉTALE

#### Premier aperçu sur la composition des végétaux.

— Si nous voulons définir la nature des problèmes que soulève l'étude du sol arable et montrer l'utilité que présente cette étude au point de vue de la connaissance de la production végétale, nous procéderons à quelques expériences très simples.

Prenons une plante verte quelconque que nous venons de déraciner en pleine végétation et abandonnons-la à elle-même après avoir eu soin de la peser. Cette plante se flétrit peu à peu et perd sa rigidité. Si nous la reportons au bout de quelques heures sur le plateau de la balance, nous trouverons que son poids a diminué. La substance que la plante a perdue n'est autre chose que de l'eau. Cette perte d'eau se prolongera plus ou moins longtemps : nous pouvons l'accélérer en portant la plante dans une étuve chauffée à 100°.

La perte d'eau ainsi observée est un phénomène constant ; tous les végétaux et tous les organes d'un végétal la subissent. Mais *la quantité d'eau perdue varie* avec l'organe considéré et avec son âge, les organes jeunes perdant beaucoup plus d'eau que les mêmes

organes plus âgés. En règle assez générale, la perte d'eau d'un organe vivant varie entre 60 et 90 pour 100 du poids de la matière fraîche.

La vie végétale, comme la vie animale, est donc étroitement liée à la présence, dans les tissus de l'être vivant, d'une grande quantité d'eau.

D'où vient cette eau ? elle provient en presque totalité du sol où plongent les racines de la plante.

Soumettons maintenant cette plante desséchée à l'action de la chaleur. Au fur et à mesure que la température s'élève, on voit les tissus noircir, puis s'enflammer. Si cette action de la chaleur est suffisamment prolongée, il ne reste plus, dans le vase où nous avons effectué cette combustion, qu'un petit amas d'une matière grise que l'on appelle communément *cendres*.

Au point de vue *qualitatif*, toutes les plantes et tous les organes d'une plante fournissent le même résultat. Mais, au point de vue *quantitatif*, il n'en est plus de même. Le poids de ces cendres varie avec la plante considérée et, chez une même plante, varie, dans d'assez grandes limites parfois, avec son mode de culture. Il varie également avec l'organe considéré : les feuilles, par exemple, laissent un poids de cendres plus considérable que celui qu'abandonnent les autres organes.

Si maintenant nous comparons le poids de ces cendres au poids de la plante que nous avons desséchée à l'étuve, nous trouverons que ce poids est une fraction assez faible du poids de cette plante : un cinquième à un dixième le plus souvent.

Cette expérience très simple nous montre donc que toute plante comporte *trois séries d'éléments* indispensables à son développement : 1° de l'eau, 2° des matières que l'action d'une température élevée fait disparaître ; 3° des matières fixes résistant à la chaleur.

**Origine des matières combustibles et des matières fixes contenues dans les végétaux.** — L'origine et la composition de l'eau nous sont connues. Il nous reste à chercher l'origine et la composition : 1° de la matière qui s'est volatilisée sous l'influence de la chaleur ; 2° de la matière qui a résisté à cette action et que nous avons appelée *cendres*.

L'analyse chimique révèle dans la partie volatile de la plante l'existence de quatre corps simples : *carbone*, *hydrogène*, *oxygène*, *azote*. Le carbone provient du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère. La matière verte de la feuille (chlorophylle) décompose, en effet, ce gaz : le carbone est assimilé tandis que l'oxygène se dégage. Cette source de carbone est suffisante, ainsi que le montrent une foule d'essais synthétiques.

L'oxygène et l'hydrogène proviennent de l'eau. L'azote reconnaît une double origine. Certaines plantes (légumineuses, quelques algues vertes) l'absorbent à l'état gazeux et le font entrer en combinaison avec le carbone, l'hydrogène et l'oxygène. D'autres, au contraire, retirent cet élément du sol où il existe sous forme de composés multiples dont nous examinerons plus tard les différents états.

Telles sont l'origine et la composition de la partie *combustible* du végétal. Quant aux *cendres*, elles proviennent exclusivement du sol dans lequel plongent les racines du végétal. Quelle est leur composition ? On y rencontre, en réalité, un très grand nombre de corps simples, les uns sous des poids assez élevés, les autres sous des poids beaucoup plus faibles.

La première catégorie comprend les corps simples suivants : phosphore, potassium, calcium, magnésium, silicium, soufre ; dans la seconde se rencontrent : sodium, fer, chlore, manganèse, zinc, bore, iode, arsenic, fluor, cuivre.



**Rôle des matières fixes.** — L'analyse chimique des cendres ne nous renseigne nullement sur *l'état* dans lequel les corps simples qu'elles renferment existent dans le végétal vivant. On comprend, en effet, que l'action brutale de la chaleur a dû modifier de façon complète l'arrangement que possédaient ces matières minérales dans le corps de l'être vivant. Ainsi, pour ne citer qu'un exemple, la potasse se rencontre en grande partie dans les cendres sous forme de carbonate. Or, jamais les tissus d'une plante vivante ne renferment ce sel caustique. Celui-ci provient uniquement de la destruction par la chaleur des sels de potassium formés par certains acides organiques (acides oxalique, citrique, tartrique, malique).

Avant de poursuivre notre étude, arrêtons-nous un instant sur cette richesse des cendres en éléments variés. Et, d'abord, ces matières fixes sont-elles indispensables à la vie de la plante, ou bien ne montent-elles dans ses tissus que parce qu'elles sont charriées par l'eau venue du sol? Les expériences faites à cet égard depuis quatre-vingts ans montrent que la plupart au moins de ces matières fixes sont aussi indispensables à l'évolution de la plante que les quatre éléments volatils que nous avons appris à connaître précédemment.

En ce qui concerne le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium, le fer, le soufre, le chlore, le manganèse, aucun doute n'est possible, ainsi que la chose a été démontrée à l'aide de cultures synthétiques faites dans des milieux aqueux de composition déterminée. Et, d'ailleurs, le rôle physiologique de ces substances est relativement assez bien connu. On connaît mal, par contre, le rôle du silicium et celui du sodium dont les proportions varient énormément suivant les différents végétaux. Quant aux substances telles que le zinc, le bore, l'iode, l'arsenic, le fluor, le cuivre et

quelques autres encore, ce n'est que dans ces dernières années, et grâce à l'emploi de méthodes analytiques très sensibles, que l'on a pu manifester leur présence de façon certaine chez un assez grand nombre de végétaux, tant est faible la quantité que l'on y rencontre. Il est probable — et l'on pourrait même dire démontré — que quelques-uns de ces derniers éléments jouent un rôle indispensable dans la vie végétale.

**La notion de l'engrais.** — Il résulte de cet exposé que nous nous trouvons en face de deux problèmes fondamentaux quand il s'agit d'étudier le mécanisme de la nutrition de la plante : 1° étude des phénomènes en vertu desquels les quatre corps simples, carbone, hydrogène, oxygène, azote concourent à la formation des principes que nous avons appelés *volatils* ; 2° étude du substratum dans lequel la plante puise les éléments fixes qui composent ses cendres ; c'est-à-dire *étude du sol*.

Tels sont les deux grands problèmes qui se posent devant nous et qui délimitent exactement le domaine de la chimie appliquée à la physiologie des végétaux. Mais un troisième problème surgit dont la solution présente un intérêt théorique et pratique considérable.

Lorsqu'un végétal est parvenu à maturité, on procède à sa récolte et on exporte, par conséquent, hors du champ sur lequel il s'est développé, tous les corps simples que nous avons appris à connaître plus haut et que le végétal avait fixés dans ses tissus. Le sol, auquel ces matières ont été empruntées, éprouve donc une perte qui sera d'autant plus sensible que la récolte aura été plus forte : d'où l'obligation où l'on se trouve de *restituer à ce sol les matières que la plante y a puisées*.

En ce qui concerne le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, cette restitution ne saurait s'imposer, puisque ces éléments ont été pris dans l'atmosphère et que nous

n'avons aucune action sur celle-ci. Il n'en est plus de même de la matière fixe à laquelle nous avons reconnu un rôle alimentaire indispensable : elle disparaît du sol de façon définitive.

Il est donc de toute nécessité de réintroduire dans le sol, sous une forme qu'il restera à déterminer, une quantité de matière fixe, au moins égale à celle que la récolte a enlevée, si l'on veut maintenir la fécondité de ce sol à un niveau satisfaisant : d'où la *notion de l'engrais*. On peut définir celui-ci : la matière qui manque au sol et que la plante réclame.

Cette nécessité de la restitution qui saute aux yeux n'a été définitivement acceptée qu'à partir de l'époque où l'analyse chimique a été appliquée de façon rationnelle à l'étude de la nutrition végétale. C'est Liebig (1840) qui, le premier, montra que les matières qui composent les cendres des plantes ne sont pas fortuites ; que ces matières sont toujours les mêmes, au moins au point de vue qualitatif, et que si l'une d'elles seulement vient à manquer totalement, alors que les autres se rencontreraient en quantités suffisantes, il n'y a pas de végétation possible.

On est en droit de s'étonner que cette vérité ait été si tardivement énoncée, car, à l'époque où parut le livre de Liebig, l'essor que la Chimie avait pris était déjà considérable ; mais peu d'hommes de science avaient abordé l'étude systématique des phénomènes de la nutrition en général.

En effet, avant cette époque, la plupart des agronomes étaient encore imbus des anciennes idées relatives au rôle que jouait l'*humus*, rôle que les expériences de Théodore de Saussure — d'ailleurs souvent très bien conduites — n'avaient cessé de mettre en honneur. Dans tous les sols, ainsi que nous le verrons par la suite, existe toujours une certaine quantité de ma-



tière organique, constituée par les débris des végétations antérieures : c'est à cette matière que l'on donnait (et que l'on donne encore aujourd'hui) le nom d'*humus*.

Les anciens agriculteurs estimaient que l'aliment principal, sinon exclusif, de la plante était précisément cet humus lequel, étant issu de la vie, devait de nouveau servir de nourriture à la plante. Ils avaient sans doute observé la présence constante des cendres lors de l'incinération de tous les organes végétaux, mais ils croyaient, étant donné le poids toujours faible de ces matières fixes, que leur présence était un effet du hasard et qu'elles ne concouraient vraisemblablement pas à l'édification des tissus. Leur rôle était secondaire et paraissait se borner à permettre une meilleure utilisation de l'humus.

Liebig, à la suite de ses recherches systématiques sur la nutrition en général, montre que l'alimentation de la plante est une alimentation *exclusivement minérale*, et qu'il appartient à la plante verte de faire rentrer dans le cycle de la vie les déchets de la vie animale : eau, acide carbonique, ammoniacque, phosphates, sulfates, etc.

Ainsi que nous l'avons déjà dit plus haut, toutes les expériences de cultures artificielles exécutées depuis quatre-vingts ans confirment d'une façon absolue cette manière de voir.

Une conséquence très importante découlait naturellement de cette révolution dans les idées admises jusque-là. La *théorie de la restitution* renversait complètement la doctrine de l'humus : l'épandage, sur un sol appauvri par la culture, des mêmes matières que celles dont se nourrissent les plantes s'imposait donc de façon définitive.

*En résumé*, si le domaine de la chimie appliquée à l'agriculture comporte l'étude de la formation de la



trame organique du végétal et celle du sol dans lequel ce végétal puise la matière inorganique, il doit comprendre également la recherche des moyens propres à assurer à la plante, par l'apport des engrais, un approvisionnement suffisant de nourriture.

La connaissance approfondie de la nutrition végétale réclame, en réalité, le concours des sciences les plus variées. Si la Chimie joue ici un rôle prépondérant puisqu'elle nous offre le moyen de définir la nature des matières qui entrent dans la constitution des tissus végétaux, ainsi que la structure et la composition du sol qui fournit à la plante les éléments fixes, la Physique nous guide dans l'étude des radiations lumineuses dont dépend le phénomène de la photosynthèse. Elle nous permet, de plus, de juger des qualités du sol au point de vue de sa perméabilité à l'eau et aux gaz, et de suivre le mouvement de ces fluides au travers des particules de nature si variée dont il se compose. Or, l'étude des phénomènes chimiques dont la plante et le sol sont le théâtre serait incomplète, et souvent sans portée, si on négligeait de définir le milieu dans lequel ces phénomènes ont lieu et dont ils dépendent étroitement.

La composition d'un sol est toujours le reflet de celle des roches qui lui ont donné naissance : c'est donc à la Géologie qu'il convient de demander les notions relatives à l'origine, à la structure, au mode de destruction de ces roches dont la poussière, plus ou moins fine, constitue la terre arable. C'est encore à la Géologie qu'il faut s'adresser lorsqu'il s'agit d'établir une classification des principaux sols.

Mais ces sols eux-mêmes, quelle que soit leur infinie variété, ne constituent pas une masse purement minérale. Dans la très grande majorité des cas ils renferment, ainsi que nous l'avons reconnu plus haut, une

certaine dose de matière organique ou *humus*. Cet humus est peuplé d'une flore microscopique extraordinairement variée : algues, moisissures, bactéries qui jouent un rôle de premier plan dans la transformation incessante de cette matière organique. La plupart de ces êtres ont une influence capitale sur la fertilité des terres : microbes fixateurs de l'azote gazeux, bactéries de la nitrification, pour ne citer que ceux qui ont été, avec raison, les mieux étudiés. Aussi le concours qu'apportent à l'étude de la nutrition végétale, la botanique microscopique et la bactériologie est-il des plus précieux.

L'Agronomie ne constitue donc pas une science unique ; elle doit nécessairement faire appel à toutes les connaissances humaines susceptibles de l'éclairer lorsqu'il s'agit d'améliorer les rendements d'une culture donnée.

**L'étude du sol est la base de l'agronomie.** — La plante puise donc dans le sol des éléments minéraux dont la présence est indispensable à l'élaboration de ses tissus. La privation totale ou partielle de l'un de ces éléments est incompatible avec son développement. Chaque fois qu'il s'agit d'orienter la production végétale vers un but déterminé, il est nécessaire de modifier la composition du sol de façon telle qu'il puisse suffire aux exigences de la culture envisagée. Nous devons être en mesure, soit par des apports judicieux de matières fertilisantes, soit par l'emploi d'agents spéciaux appelés *amendements*, de diriger une exploitation agricole dans un sens défini. L'étude approfondie des propriétés physiques, chimiques et biologiques de la terre arable est donc d'une importance capitale : c'est à cette étude exclusivement que sont consacrées les pages qui suivent.

## CHAPITRE II

### GÉNÉRALITÉS SUR LE SOL ET FORMATION DE LA TERRE ARABLE

**Aspect général du sol.** — Chacun peut se rendre compte au cours d'un voyage, ou même d'une simple promenade, combien est changeante dans ses aspects cette surface solide que l'on appelle vulgairement *la terre*. Sa couleur est très variable : blanche ou d'un blanc grisâtre ; le plus souvent d'un jaune brun ou rougeâtre ; parfois noire. Les végétaux qui se développent sur ces divers milieux y rencontrent donc toutes les substances indispensables que nous avons mentionnées plus haut, puisque la plupart d'entre eux sont susceptibles de fleurir et de fructifier. La Botanique nous apprend qu'à ces colorations différentes de la terre correspond assez généralement une *flore* spéciale.

Une terre blanche, riche en calcaire, porte certaines plantes que nous ne rencontrerons pas sur une terre noire, riche en matière organique, et réciproquement. Les mêmes éléments minéraux indispensables à la vie végétale se trouvent cependant dans ces deux sortes de terres, mais leur *structure chimique* n'est pas identique dans les deux cas, et la *réaction du milieu* n'est pas la même. Nous nous expliquerons là-dessus dans la suite de ces pages. Telle est la principale raison de la diversité des deux flores.

Une autre particularité nous frappe lorsque nous examinons les différentes terres. Les unes sont composées d'éléments relativement assez fins, alors que



d'autres comportent des masses plus ou moins volumineuses connues sous les noms vulgaires de *pierres*, *cailloux*, *graviers*.

En réalité, on trouve dans toutes les terres des éléments de grosseur variable. Il suffit pour s'en convaincre de passer quelques centaines de grammes de terre sèche au travers de tamis à mailles de plus en plus serrées. A côté de fragments assez gros, d'un poids notable, nous rencontrerons des éléments d'une extrême finesse. Ainsi, couleur et grosseur des éléments sont des qualités qui peuvent différer beaucoup d'une terre à une autre.

**Structure du sol ; pénétration des racines.** — Puisque la terre fournit aux végétaux les éléments que ceux-ci réclament, cherchons à nous rendre compte, au moins de façon sommaire, comment les racines d'une plante cheminent dans l'épaisseur du sol. S'il s'agit d'un grand arbre, chacun sait que ses racines s'enfoncent le plus souvent assez profondément dans le sol. Certains végétaux annuels possèdent également des racines qui peuvent visiter les couches profondes, alors que le système radical de beaucoup d'autres s'étale seulement au-dessous de la surface du sol. Pour que ce cheminement soit possible, il faut que les racines ne rencontrent pas d'obstacles tels que ceux que présente une roche compacte. Cependant, il est fréquent d'observer le cas de racines se frayant un chemin au travers des fissures d'une roche qu'elles ont agrandies peu à peu par suite de l'augmentation de leur diamètre.

La profondeur à laquelle pénètrent les racines a une grande importance en matière d'agriculture. On conçoit, en effet, que plus le cube de terre exploité par les racines est considérable, plus la plante dispose de ressources alimentaires. Il faut, cependant, remarquer que la plupart des matières nutritives n'existent le plus



souvent en quantités notables que dans les couches superficielles du sol; la richesse en ces matières décroît rapidement avec la profondeur. Tel est le cas de l'azote et celui des phosphates.

Le travail du sol à la charrue ou à la bêche porte sur une épaisseur de terre assez faible, deux ou trois décimètres ordinairement; et cependant les racines pénètrent presque toujours dans des couches beaucoup plus profondes. Les engrais qu'il est nécessaire de fournir à un sol appauvri ne sont enfouis par le labour qu'à une profondeur peu considérable. Lorsqu'il s'agit de plantes de la grande culture, cet enfouissement superficiel est suffisant en général, car les racines du jeune végétal trouvent à leur portée les matières fertilisantes nécessaires. Or, c'est principalement dans les premiers stades de son développement que la jeune plante emprunte au milieu solide les éléments minéraux dont elle a besoin. Nous verrons d'ailleurs plus tard que les *dissolutions minérales* pénètrent plus ou moins loin dans l'épaisseur du sol.

**Sous-sol.** — Quand on pratique une tranchée à la surface d'un champ, on remarque très fréquemment que la couche de terre superficielle, de couleur brunâtre le plus souvent, surmonte une autre couche d'une coloration moins foncée. La couche superficielle possède une structure physique et une composition chimique qui souvent ne sont pas celles de la couche sous-jacente. Elle est, dans la grande majorité des cas, mieux approvisionnée en principes fertilisants que celle-ci. A la couche superficielle on réserve le nom de *terre arable* : ce qui signifie que les instruments aratoires peuvent l'atteindre. A la couche sous-jacente, on donne le nom de *sous-sol*. D'après ce qui a été dit plus haut, les racines de la plupart des végétaux visitent presque toujours le sous-sol.

**Étude méthodique du sol.** — Nous avons reconnu que la terre était formée de fragments rocheux de dimensions très variables. Nous devons donc chercher, en premier lieu, quels sont les phénomènes *mécaniques* qui ont donné naissance à ces fragments à partir de la roche initiale.

L'expérience montre que telle terre est d'un travail facile, alors que telle autre est d'un travail plus malaisé; que telle terre retient l'eau qu'elle a reçue, que telle autre, au contraire, est très perméable et retient mal ce liquide; que telle terre s'émiette sous l'influence du labour alors que telle autre demeure en masses compactes. La première présentera donc une large surface aux gaz de l'atmosphère; la seconde sera mal aérée. Or, l'eau et l'oxygène sont deux facteurs de première importance vis-à-vis de la végétation.

D'où la conclusion suivante : les sols possèdent certaines qualités physiques de *perméabilité* ou *d'imperméabilité* à l'égard des fluides tels que l'eau et les gaz de l'atmosphère, qualités qui diffèrent d'une terre à une autre. Le mode de pénétration de l'eau n'est pas le même chez tous les sols; leur aptitude à la dessiccation, la façon dont ils s'échauffent ou se refroidissent présentent également de notables variations.

L'eau, l'oxygène, le gaz carbonique sont en contact intime avec les particules minérales qui constituent la terre arable. Ces particules subissent, de façon incessante, des phénomènes de dissolution, d'oxydation, de carbonatation. Les solutions ainsi engendrées réagissent les unes sur les autres en vertu des lois de la Chimie et elles donnent naissance à des liqueurs, très diluées sans doute, mais dont les racines des plantes s'emparent aisément.

Il en résulte que la connaissance de *la constitution et de la composition chimique* de la terre présente une

importance de premier ordre vis-à-vis de la nutrition végétale.

Tous les sols contiennent de la matière organique (humus) issue des végétations antérieures ou provenant du développement de végétaux inférieurs à leur surface. Cette matière est, dans les conditions normales, peuplée d'une infinité de microorganismes qui lui font subir les transformations les plus variées. L'action bienfaisante qu'exercent la plupart de ces microorganismes n'était guère soupçonnée il y a une cinquantaine d'années. A l'heure actuelle — et avec raison — on doit leur assigner un rôle capital : les uns portent l'oxygène sur le carbone de l'humus et sont des agents d'oxydation qui donnent naissance à du gaz carbonique, d'autres fixent l'azote gazeux sur le sol, d'autres décomposent le noyau azoté complexe de l'humus et en libèrent de l'ammoniaque, d'autres oxydent cette ammoniaque et la transforment en azote nitrique.

On s'aperçoit de suite des avantages immenses que procure à la végétation la présence de ces infiniment petits. La *minéralisation* de l'humus est leur œuvre; sans eux cet humus persisterait très longtemps sous sa forme première et l'azote, entre autres substances qu'il renferme, ne serait d'aucun profit immédiat pour les végétaux de la grande culture. Ce n'est que lorsque cet azote a revêtu la forme simple et diffusible d'azote nitrique qu'il peut concourir à l'alimentation du végétal.

Il résulte de cet exposé que l'étude rationnelle et systématique du sol doit comprendre l'examen des quatre points suivants : *formation mécanique, propriétés physiques, constitution et composition chimique, action des microorganismes.*

**Formation mécanique des sols.** — Sur un très grand nombre de points de la surface du globe, on rencontre des masses dures, de dimensions souvent



considérables et de coloration variable. Ces masses, qui sont parfois enfouies à une profondeur plus ou moins grande, se nomment *roches*. L'analyse chimique montre la diversité de leur composition. Elles constituent des mélanges, en proportions quelconques, de substances cristallisées et de matières amorphes ; mais le nombre des espèces minérales qu'elles renferment est généralement assez faible. On distingue deux catégories de roches.

1° Les *roches cristallines*, dont les minéraux silicatés forment la base. Ces roches elles-mêmes se subdivisent en *roches éruptives* et *roches cristallines stratifiées* ou *crystallophylliennes*.

Les roches éruptives semblent provenir de la solidification d'une matière, d'abord liquide, sortie des profondeurs du globe. Les roches crystallophylliennes comportent des éléments cristallisés disposés par couches (*schistes cristallins*).

2° Les *roches sédimentaires*, qui se forment par suite de l'action des eaux sur les précédentes ; elles sont, le plus souvent, disposées par couches superposées les unes aux autres.

Cherchons quelle est la constitution de chacune de ces deux catégories de roches.

A. *Les roches éruptives* sont principalement formées de silicates provenant de l'union de la silice avec un petit nombre de bases : alumine, potasse, soude, chaux, magnésie, oxyde de fer. Une certaine quantité de silice, à l'état de liberté, entre dans la composition de beaucoup de ces masses rocheuses dont la grande variété résulte des proportions différentes des silicates dont elles sont composées.

Ces roches éruptives doivent être distinguées en *roches acides*, renfermant une dose de silice supérieure à 65 pour 100 : elles sont, en effet, constituées par un mélange de silicates et de silice libre. L'alumine, la potasse,



la soude en sont les éléments basiques prédominants.

Les roches *lourdes ou basiques*, au contraire, comportent une proportion de silice moindre, généralement inférieure à 54 pour 100. Elles ne contiennent pas de silice libéré, et leurs éléments basiques fondamentaux sont la chaux, la magnésie, l'oxyde de fer, accompagnés d'alumine, de potasse et de soude. Un assez grand nombre de ces roches sont plus ou moins fissurées, et les fentes qui les sillonnent sont fréquemment remplies de matériaux non silicatés (oxydes, sulfates, fluorures, carbonates) : on est alors en présence de *gîtes minéraux*.

Comme nous ne devons pas perdre de vue que les seuls éléments qui doivent ici retenir notre attention sont ceux qui servent de nourriture à la plante, ou qui assurent au substratum certaines qualités physiques que nous définirons plus loin, examinons sommairement la composition des roches éruptives principales.

Le *granite* est une roche acide, cristalline, dans la composition de laquelle entre un assemblage de cristaux de quartz, de feldspaths (orthose principalement) et de mica. La grosseur des grains du granite est variable. Parmi les éléments fondamentaux que contient cette roche il faut citer, indépendamment de la silice, l'alumine, la potasse et la soude que l'on rencontre dans les feldspaths; l'alumine, la magnésie, l'oxyde de fer et la potasse que l'on trouve dans les micas.

Il existe une grande variété de granites qui diffèrent entre eux, par leur structure physique d'abord, et, de plus, par la substitution de telle espèce de mica à telle autre, ou, par la présence à côté de l'orthose, de silicates tels que l'oligoclase, la hornblende, l'augite, etc. Ces roches granitoïdes portent les noms de *granulite*, *porphyre*, *syénite*, *diorite*, etc.

Les *roches volcaniques* possèdent une tout autre composition. Elles sont formées d'éléments cristallins,

noyés le plus souvent au sein d'une substance amorphe. Les principales de ces roches sont les *trachytes*, les *basaltes* et les *laves*, constituées en principe par des feldspaths accompagnés d'amphibole, de pyroxène, d'augite, de hornblende, de micas. Ce qui, au point de vue chimique, les différencie des roches granitiques, c'est leur richesse relative en éléments ferro-magnésiens et calciques. Elles renferment de l'apatite (phosphate tricalcique cristallisé).

Les basaltes contiennent parfois, comme éléments accidentels, des carbonates et de la pyrite.

Une différence fondamentale, et dont l'importance est grande vis-à-vis de la nutrition végétale, sépare donc les roches granitiques et granitoïdes des roches volcaniques. Chez les premières, on ne rencontre en général que des traces de chaux et de phosphate tricalcique : chez les secondes, au contraire, ces éléments existent en proportions notables. Ces différences de composition sont mises en évidence dans le tableau suivant qui contient un certain nombre d'exemples typiques à cet égard.

COMPOSITION CENTÉSIMALE	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Granite de Flamanville (Manche)	67.5	14.5	4.6	2.6	1.2	1.8	4.3	3.0	
Granite du Colorado . . . . .	74.4	14.4	0.2	0.9	0.07	0.58	1.7	6.5	
Porphyre du Colorado . . . . .	68.1	15.0	2.7	1.1	1.1	3.04	3.46	2.93	0.16
Basalte du Colorado . . . . .	46.7	18.0	2.6	6.2	5.7	8.2	3.0	3.9	0.81
Basalte des Açores . . . . .	45.4	17.0	9.9	3.2	5.0	10.7	3.2	1.1	1.27
Lave du Vésuve (Leucittéphrite).	47.8	18.0	2.0	6.7	4.1	9.0	2.7	7.4	0.56

44876

B. *Roches sédimentaires*. — Les principales de ces roches sont les suivantes :

1° *Grès*. Ce sont des roches essentiellement siliceuses dont les grains sont soudés les uns aux autres par des *ciments* de nature variée : siliceux, ferrugineux, calcaires.

2° *Argiles*. L'argile pure ou *Kaolin* est un silicate hydraté d'aluminium  $Al^2O^3 \ 2 \ SiO^2 \ 2 \ H^2O$ , de couleur blanche. La plupart des argiles communes renferment des éléments sableux qui trahissent leur origine, ainsi que nous le verrons ultérieurement. Leur couleur est très variable, grise le plus souvent, parfois rouge, verte ou jaune. Parmi les éléments étrangers au silicate d'aluminium contenus dans ces argiles communes, il faut citer : la silice, la potasse, la soude, le fer, le manganèse. Les argiles qui contiennent du calcaire sont appelées *marnes*. *L'argile plastique ou grasse* est onctueuse et douce au toucher, elle happe à la langue, absorbe bien l'eau et forme avec ce liquide une pâte liante.

3° *Roches calcaires*. Elles sont surtout composées de carbonate de calcium. Celui-ci, à l'état pur, se présente soit sous la forme de cristaux rhomboédriques (spath d'Islande), soit sous la forme de prismes orthorhombiques (Aragonite). Les calcaires ordinaires ou *grossiers* renferment toujours une quantité variable de substances étrangères : silice, phosphates, oxyde de fer, argile, matières schisteuses, et, parfois, bitumineuses. Ces calcaires sont souvent cristallins, avec des grains d'une extrême finesse. La *craie* est un calcaire qui renferme une infinité de carapaces de foraminifères,

4° *Roches dolomitiques*. Elles sont principalement formées d'un carbonate double de calcium et de magnésium (*Dolomie*) : elles admettent dans leur structure des impuretés analogues à celles que contiennent les calcaires grossiers.



5° *Gypse*. Le gypse ou  *pierre à plâtre*  cristallise en prismes clinorhombiques; c'est du sulfate de calcium bihydraté  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Sa structure peut être fibreuse, lamellaire ou saccharoïde. Il est fréquemment mélangé de silice, d'argile et de calcite.

6° *Apatite*. On nomme ainsi un fluo-phosphate de calcium cristallisé (prismes hexagonaux) dans lequel le fluor peut être remplacé par du chlore. Peu abondant, en général, dans les roches éruptives, il se rencontre en quantités assez importantes dans les roches volcaniques.

**Phénomènes qui provoquent la destruction des roches.** — Les phénomènes à la suite desquels les roches se divisent en fragments plus ou moins menus, et qui doivent être regardés comme la cause originelle de la formation de la terre arable, sont au nombre de trois,

A. *Phénomènes mécaniques et physiques.* — Une action destructive très puissante est celle de la *gelée*. Lorsque l'eau liquide passe à l'état de glace, elle augmente de  $\frac{1}{11}$  de son volume. Si fines que soient les fissures d'une roche compacte, on conçoit que si ces fissures sont remplies d'eau et que la température s'abaisse au-dessous de  $0^\circ$ , il en résultera un éclatement de la masse solide. Des effets analogues se produisent sur les fragments résultant de cette première action, et ainsi de suite. Ce phénomène de la congélation de l'eau, qui se répartit sur d'énormes surfaces, possède donc une action très puissante quant à l'émiettement des roches.

Les effets mécaniques produits par le *déplacement des glaciers* doivent être regardés comme une seconde cause de la pulvérisation des roches. Les glaciers cheminent dans leur lit d'un mouvement très lent, mais continu. Ils avaient, autrefois, des dimensions infini-



ment plus considérables que celles de nos glaciers actuels. Par suite de la descente progressive de ces glaciers, les blocs rocheux provenant de l'arrachement des parois du lit, et enchâssés dans la glace, usent les bords du lit du glacier et contribuent ainsi à la formation des vallées.

Ces masses de glace, dans leur descente, poussent devant elles des blocs qui forment une muraille ou *moraine frontale* d'une hauteur parfois considérable. Cette moraine est composée de fragments de grosseur très variable.

Aux époques reculées, cette action des glaciers a été une cause très puissante de pulvérisation des roches et de formation de la terre arable. Actuellement, elle est beaucoup moins importante; elle est limitée à quelques régions élevées où la température est assez basse pour que des masses considérables de neige puissent y persister. Cette puissance des anciens glaciers est attestée par ce fait qu'au bas de nombre de vallées actuelles, débarrassées de glaces depuis très longtemps, on rencontre des moraines, et que, sur les parois rocheuses de ces vallées, on observe des traces de striation parfois assez profondes.

Si les phénomènes glaciaires ont perdu aujourd'hui de leur importance, en tant que générateurs de la terre arable, il n'en est plus de même de l'action des *torrents*. Lorsque leur pente est un peu forte et que le volume de l'eau qu'ils charrient est considérable, les torrents produisent, par effets mécaniques sur les roches et sur les fragments qui roulent dans leur lit, des phénomènes de trituration très remarquables pouvant aller jusqu'à la pulvérisation de la partie, au moins la plus vulnérable, de ces roches.

Des phénomènes de dissolution par l'eau entrent simultanément en jeu, ainsi que des actions plus pro-

fondes d'oxydation et de carbonatation qui portent sur certains éléments : nous y reviendrons plus loin.

Enfin, un effet mécanique de destruction, accompagné presque toujours d'une action chimique, doit être rapporté à l'influence des végétaux. Si, dans une fissure rocheuse, une graine vient à tomber, il est fréquent d'observer que la racine du végétal agit à la manière d'un coin pour élargir peu à peu cette fissure.

D'autre part, le développement, à la surface de beaucoup de roches, de végétations cryptogamiques (algues, lichens), est une cause d'effritement de la roche par le fait que ces plantes empruntent au substratum, grâce à l'humidité et aux sécrétions acides de leurs racines, une certaine quantité de matière minérale, laquelle se retrouve sous forme de poussière après la mort de ces végétaux. Cette poussière est peu à peu entraînée par les pluies et ce phénomène se renouvelle de façon continue.

**B. Phénomènes chimiques.** — Les phénomènes chimiques qui interviennent dans la destruction des roches sont imputables à l'action de l'eau et à celle des gaz carbonique et oxygène. L'eau, si elle était absolument pure et privée de gaz, n'exercerait sur la plupart des roches qu'une action dissolvante très minime. Seul, le sulfate de calcium, et surtout le sel gemme, sont capables de s'y dissoudre.

Cependant l'eau pure peut agir sur certaines roches en se combinant à quelques espèces minérales : anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) changée en gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). L'origine des silicates hydratés (*zéolithes*) doit être cherchée dans l'action de l'eau sur des silicates primitivement anhydres.

L'action de l'eau sur les roches est, en réalité, bien plus marquée dans les conditions naturelles où cette eau contient toujours en dissolution du gaz carbonique et de l'oxygène. C'est Fournet (1833) qui, le premier, à

montré que l'eau chargée de gaz carbonique était capable de décomposer les roches silicatées primitives.

Voici comment les choses semblent se passer. Le gaz carbonique s'empare de toutes les bases : chaux, magnésie, potasse, soude, oxyde de fer et les entraîne à l'état de carbonates. Seule, l'alumine résiste et demeure combinée à la silice. Le silicate d'aluminium, ainsi isolé, s'unit à l'eau et forme l'argile. A ce mode de décomposition on donne le nom de *kaolinisation* pour rappeler que l'argile possède quelques unes des propriétés physiques du *kaolin* ou *silicate d'aluminium hydraté pur*.

La chaux et la magnésie, combinées au gaz carbonique, demeurent dissoutes tant que la proportion de ce gaz est suffisante. Au fur et à mesure qu'il se dégage, les bases précédentes se déposent sous forme de carbonates neutres : telle est l'origine des dépôts calcaires et dolomitiques. Le fer entre également en dissolution grâce à l'excès de gaz carbonique ; mais, lorsque l'excès de ce gaz se dégage, le carbonate ferreux subit l'action de l'oxygène ambiant et passe à l'état d'oxyde ferrique. Quant aux carbonates alcalins (potasse et soude), très solubles et très diffusibles, ils sont entraînés par l'eau. Cependant, en ce qui concerne le carbonate de potassium (et les sels de potassium en général), une propriété très remarquable de la terre arable, connue sous le nom de *pouvoir absorbant*, intervient pour en retenir la majeure partie.

Ce premier aperçu des actions chimiques qui président à la formation des sols nous montre déjà quelle doit être l'infinie variété des terres arables. En effet, à côté d'une portion de la roche silicatée primitive et massive, qui n'a pas encore subi ces actions chimiques dont nous venons de parler, se rencontreront des fragments moins volumineux ayant pour origine les effets mécaniques antérieurement étudiés. Ces fragments,



offrant une plus large surface, seront attaqués par l'eau et le gaz carbonique; ils fourniront, comme produits d'altération, des carbonates alcalins et terreux, ainsi que de l'argile. Ces produits d'altération pourront demeurer en contact avec les fragments non encore altérés de la roche primitive si l'inclinaison du sol est nulle. Mais les produits solubles, ainsi que les constituants de l'argile, en suspension très fine, seront entraînés par le travail des eaux à une distance d'autant plus grande de la roche initiale que la pente du sol sera plus accentuée.

Cette façon d'envisager la décomposition des roches silicatées et de considérer l'argile, définie ainsi que nous l'avons fait, comme un produit d'altération de ces roches, est confirmée par une foule d'observations. Ebelmen (1845) a examiné à ce point de vue un certain nombre de roches basaltiques dont la surface présentait une couleur et une friabilité différentes de celles de la partie centrale par un passage graduel. L'analyse montra que la région superficielle s'était fortement appauvrie en chaux, magnésie et alcalis, par rapport à la région profonde, et qu'elle s'était, par contre, enrichie en eau. Il semble que la première période d'attaque de la roche réponde à l'entraînement des alcalis résultant de la destruction des feldspaths.

La décomposition des roches silicatées qui s'accompagne d'une formation d'argile est parfois plus complète, ainsi qu'il arrive dans les régions tropicales. L'argile elle-même abandonne la majeure partie de la silice à laquelle elle était combinée et laisse un mélange d'hydrate d'alumine (*hydrargyllite*) et d'hydrate ferrique, mélange qui porte le nom de *latérite* (*later*, brique).

Cette analyse immédiate des roches peut d'ailleurs être réalisée, partiellement au moins, par des expériences synthétiques, ainsi qu'il résulte des essais bien connus de Daubrée à cet égard. Si on triture longue-

ment au contact de l'eau des fragments de roches silicatées, cette eau se charge peu à peu d'une petite quantité de potasse. Lorsque l'eau est saturée de gaz carbonique, l'attaque est encore plus nette. On peut même exalter cette action décomposante en opérant sous pression avec quelques grammes de roche pulvérisée, ainsi que l'ont pratiqué beaucoup d'expérimentateurs. Dans ces conditions, on remarque que tous les éléments, sauf l'alumine, entrent en dissolution et se combinent au gaz carbonique.

De plus, dans les conditions naturelles, les eaux qui circulent dans l'épaisseur du sol ne contiennent pas seulement de l'oxygène et du gaz carbonique en dissolution. Lorsque ces eaux renferment des sels de sodium et de calcium ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$ ), leur pouvoir dissolvant est singulièrement accru. Des phénomènes de double décomposition, donnant le plus souvent lieu à des équilibres, se manifestent, à la suite desquels il y a substitution de certaines bases, contenues dans la roche, par le sodium ou le calcium. Un contact prolongé de solutions, même très étendues, de certains sels ( $\text{NO}_3\text{Na}$ ,  $\text{SO}_4$  ( $\text{NH}_4$ )<sup>2</sup> par exemple) avec des fragments finement pulvérisés de roches feldspathiques est capable de solubiliser des doses importantes de potasse.

Le mécanisme de la kaolinisation des roches primitives que nous venons d'examiner n'exclut pas d'autres modes de production de l'argile. Certains auteurs estiment que les eaux minérales acides seraient, dans certains cas, des agents énergiques de formation de cette substance. D'autres pensent qu'il convient d'attribuer à la matière organique elle-même un rôle fort important.

C. *Phénomènes biologiques.* Nous avons déjà parlé incidemment de ces phénomènes à propos des actions mécaniques. Parmi les végétaux inférieurs, les algues

et les lichens, si communs à la surface de beaucoup de roches, trouvent sur ce milieu spécial, les éléments de leur développement. S'ils possèdent de la chlorophylle, ils décomposent le gaz carbonique de l'air. L'azote ammoniacal de l'atmosphère est la source de l'azote qu'ils contiennent : d'ailleurs, nombre d'algues peuvent fixer directement l'azote gazeux. Quant aux éléments minéraux indispensables, ces organismes les trouvent dans la roche elle-même. Il en est de même des très nombreuses espèces microbiennes qui vivent à la surface des roches. Ne pouvant fixer le carbone du gaz carbonique (exception faite pour les microbes nitrificateurs), elles vivent aux dépens du carbone que renferment les poussières organiques de l'atmosphère ou de celui que contiennent les algues sur lesquelles elles se développent. Leur nutrition minérale se fait aux dépens des éléments de la roche.

Si faible que soit cet effritement causé par la présence des organismes inférieurs, il s'exerce sur d'énormes surfaces et se renouvelle sans cesse. Il n'est donc pas exagéré de regarder les infiniment petits comme les artisans de la destruction des roches et de la formation de cette poussière minérale qui constitue la terre végétale. D'ailleurs, lorsqu'ils attaquent une surface rocheuse, ces infiniments petits provoquent la formation de fissures, d'abord très étroites, mais qui vont peu à peu en s'élargissant et facilitent ainsi la pénétration de l'eau avec toutes les conséquences qui s'ensuivent.

Ce dernier mode de formation de la terre arable nous explique également pourquoi tous ou presque tous les sols renferment, à côté d'éléments purement minéraux, des matières organiques, c'est-à-dire des matières issues de la vie. Ces débris de végétaux (tant supérieurs qu'inférieurs) que nous avons déjà qualifiés du



nom d'*humus*, constituent un élément très important de sol arable dont nous développerons le rôle prochainement.

Il est évident que l'*humus* représente des degrés d'altération très variables des végétaux morts d'où il provient. Suivant la structure physique du sol, sa composition chimique et la nature des phénomènes microbiologiques dont il est le théâtre, cet *humus* persiste plus ou moins longtemps. A l'inverse de la matière minérale qui demeure indéfiniment, tout en éprouvant dans sa composition des modifications lentes mais incessantes, l'*humus* disparaît peu à peu sous l'influence d'actions oxydantes d'intensité variable. Il se *minéralise* à son tour et, finalement, fournit du gaz carbonique et de l'azote sous une forme susceptible de nitrifier quand certaines conditions de milieu, que nous définirons plus tard, sont réalisées.

**Sols formés sur place ; sols de transport.** — Lorsqu'on examine un sol, en commençant cet examen à une certaine profondeur, là où l'on rencontre la roche compacte, on remarque que cette roche est massive et peu fissurée. Si l'on se rapproche de la surface du sol, cette roche apparaît sillonnée de fissures plus nombreuses, délimitant des blocs de moindres dimensions dont les fentes sont très fréquemment visitées par les racines des arbres. A un niveau encore plus élevé, on ne trouve plus que des fragments de moins en moins volumineux de la roche initiale, souvent très friables, surmontés finalement par cette couche de menus débris minéraux qui constituent ce que nous avons appelé *la terre arable*. Ici, à n'en pas douter, on se trouve en présence d'un *sol formé sur place* : la composition chimique de la couche superficielle rappelle assez fidèlement celle de la couche profonde, c'est-à-dire de la roche massive sous-jacente. L'homogénéité de composition chimique sur

une grande hauteur caractérise donc ce genre de sols.

Dans le second cas, nous observons une tout autre disposition. La roche massive n'existe plus, ni à la surface ni même souvent à une grande profondeur. Lorsque l'on rencontre enfin la roche en creusant suffisamment, on remarque que celle-ci possède une composition très différente de celle de la matière qui la surmonte. On en conclut que cette dernière provient de la destruction de roches étrangères à la région, et qu'elle a été déposée par le travail des eaux à l'endroit où nous la trouvons. A de pareils sols, on donne le nom de *sols de transport*.

La grosseur de leurs éléments varie avec la vitesse du courant qui en a charrié les matériaux : les plus gros de ces éléments se déposent les premiers à une distance de la roche génératrice qui peut n'être pas très considérable ; les éléments les plus fins restent en suspension dans l'eau et se précipitent en un point d'autant plus éloigné de leur lieu d'origine que leur finesse est plus grande.

**Formes principales des éléments minéraux utiles aux plantes.** — Connaissant maintenant la genèse de la terre arable, nous devons chercher sous quelles formes habituelles on y rencontre les éléments minéraux que la plante réclame.

On peut classer ces éléments en deux groupes.

1<sup>o</sup> **Éléments acides.** — *α. Silice et silicates.* — La silice et les silicates composent la majeure partie des terres arables. La silice libre y est très commune. Elle ne constitue pas un élément de fertilité, bien qu'elle entre dans la composition des cendres de presque tous les végétaux. D'ailleurs son rôle physiologique est à peu près inconnu.

A côté de la silice, la terre arable renferme une grande variété de silicates, dont la grosseur des fragments et le degré d'altération sont très variables. Les

bases de ces silicates (chaux, magnésie, potasse, soude, etc.) sont libérées plus ou moins rapidement suivant les conditions de milieu : ce sont elles qui servent à la nutrition de la plante.

β. *Acide phosphorique et phosphates.* — L'acide phosphorique est uni au calcium, au magnésium, au fer, à l'aluminium. Ces phosphates ne se rencontrent qu'en très faibles quantités dans les sols dérivés des roches éruptives (granites, schistes) ; ils sont plus abondants dans les sols issus des roches volcaniques : d'où la nécessité absolue de fournir aux premiers l'acide phosphorique qui leur fait défaut.

La forme la plus fréquente que revêt dans le sol l'acide phosphorique est celle de phosphate tricalcique. Lorsque celui-ci est cristallisé (*apatite*, résultant de dépôts formés par les eaux thermales), il est très peu attaquable par les agents naturels (eau, gaz carbonique). Il se dissout mieux lorsqu'il se trouve à l'état de nodules, de rognons, de craies phosphatées. Les phosphates de fer et d'aluminium ne semblent pas être directement assimilables par les plantes ; ils demeureraient inertes si, à la suite de phénomènes de double décomposition, au contact du calcaire notamment, ils ne se transformaient pas en phosphate tricalcique.

γ. *Acide sulfurique et sulfates.* — L'acide sulfurique se rencontre dans le sol sur la forme principale de sulfate de calcium, sel peu soluble dans l'eau (1/388), plus soluble dans l'eau chargée de gaz carbonique. Un certain nombre de matières employées comme engrais introduisent dans le sol des quantités importantes d'acide sulfurique (sulfates d'ammonium, de potassium, de magnésium). Le soufre, comme le phosphore, est un élément indispensable à l'évolution de la cellule végétale.

δ. *Acide chlorhydrique et chlorures.* — Le sol con-



tient toujours des traces de chlorures solubles (chlorures de potassium, de sodium). Au voisinage du bord de la mer, et souvent même à des distances assez grandes du rivage, on rencontre des terres qui renferment des doses notables de sel marin. Bien que le rôle des chlorures soit assez obscur vis-à-vis de la nutrition végétale, on peut néanmoins admettre que des traces de chlore sont indispensables aux plantes. Par contre, un excès de sel marin paralyse toute végétation.

2° **Éléments basiques.** — *α. Potasse.* — Abondamment répandue dans une foule de sols où elle se trouve combinée à des silicates complexes, la potasse, sous cette forme, est peu assimilable étant donnée la lenteur des réactions qui sont capables de la solubiliser. Aussi convient-il d'introduire fréquemment dans le sol des sels potassiques solubles (chlorure, sulfate) lorsqu'on exige de certaines plantes des rendements élevés. Nous verrons ultérieurement combien il est difficile de définir les différents états sous lesquels on rencontre cette base.

*β. Soude.* — La plupart du temps cette base est associée à la potasse dans nombre de silicates. Son rôle physiologique est fort obscur, car, s'il existe des plantes qui peuvent en absorber de notables quantités, il en est, par contre, d'autres qui n'en renferment pas.

*γ. Chaux.* — La forme primitive sous laquelle se rencontre cette base, est la forme de silicate. Sous cet état, elle pourrait concourir à la nutrition végétale. Toutefois, les sols qui ne renferment de la chaux que sous cette forme ne portent qu'une végétation très spéciale, impropre le plus souvent à l'alimentation. Mais lorsque ces silicates calciques ont subi l'action de l'eau chargée de gaz carbonique, la chaux, ainsi que nous l'avons vu antérieurement, passe à l'état de carbonate. Or, ce carbonate joue dans les sols un triple rôle :

physique, chimique et physiologique que nous examinerons plus loin.

Une terre ne peut porter de récoltes rémunératrices que si elle renferme du carbonate de calcium. Les proportions sous lesquelles celui-ci se rencontre dans les sols, ainsi que son degré de division, varient énormément d'une terre à une autre. Il est indispensable, en matière de culture, de s'assurer qu'un sol renferme du calcaire, d'en estimer la quantité et d'en définir le degré de finesse.

δ. *Magnésie*. — La forme primitive de cette base est, comme dans le cas de la chaux, celle de silicate. Les mêmes réactions qui transforment le silicate de calcium en carbonate interviennent pour changer le silicate de magnésium en carbonate. Le rôle que joue le carbonate magnésien est, à certains points de vue, le même que celui que joue le carbonate de calcium.

Beaucoup moins abondant que ce dernier, il est notablement plus soluble dans l'eau, surtout en présence de gaz carbonique. Ainsi que la chaux, la magnésie est indispensable à la plante.

ε. *Oxyde de fer*. — Une foule de roches renferment de l'oxyde ferrique, soit comme élément principal, soit comme impureté. Il n'est guère de sol qui ne contienne d'oxyde ferrique lequel joue, auprès des végétaux, un rôle mal connu, mais indispensable.

ζ. *Oxyde de manganèse*. — La présence du manganèse à l'état d'oxydes divers, et sous des proportions très variables, est constante dans tous les sols et ce métal est l'agent actif qui entre dans la constitution des ferments solubles appelés *oxydases* (G. Bertrand).

Tels sont les éléments minéraux de la terre arable qui participent à la nutrition végétale.

### CHAPITRE III

## CONSTITUTION ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS

Avant d'étudier la constitution chimique des sols au point de vue spécial des éléments actifs qu'ils renferment vis-à-vis de la nutrition de la plante, il est indispensable de connaître leur *constitution physique*, c'est-à-dire la structure des éléments si variés dont ils sont formés, indépendamment de la composition chimique de ces éléments.

En effet, c'est de cette structure physique que dépendent avant tout les mouvements des deux fluides les plus nécessaires à la vie végétale, l'air et l'eau.

Au seul point de vue de leur structure physique, on distingue dans les sols quatre sortes d'éléments : *le sable, l'argile, le calcaire et l'humus*.

Voici de quelle façon très simple on peut mettre en évidence la présence de ces quatre constituants.

**I. Sable.** — On prend à la surface d'un sol quelconque quelques centaines de grammes de terre d'où on éloigne, à la main ou par tamisage, les cailloux les plus volumineux.

Cela fait, on jette cette terre dans un grand bocal plein d'eau et l'on agite le tout avec une baguette de verre pendant quelques instants. Lorsque le mouvement de l'eau a cessé, on voit tomber de suite au fond du bocal des éléments grossiers auxquels se superposent bientôt des éléments de plus en plus menus. L'eau qui



surmonte ces fragments restera parfois trouble pendant un temps plus ou moins long ; elle finira presque toujours par s'éclaircir. Nous observerons alors à la partie supérieure du dépôt solide la présence d'une poussière minérale très fine. Nous avons affaire ici à un *dépôt très inhomogène quant à sa structure physique et à sa composition chimique.*

Cette masse a reçu le nom de *sable* qui ne préjuge en rien de ses qualités chimiques. Ce sable constitue la partie la plus importante de tous ou de presque tous les sols. Il est formé principalement de silice et de silicates dont la composition varie évidemment avec la nature de la roche d'où dérive l'échantillon examiné. Il est stérile par lui-même s'il a été lavé par de grandes quantités d'eau qui ont enlevé peu à peu leurs bases aux silicates. Mais, dans la plupart des cas, ces silicates renferment des bases qui seront la source des matières auxquelles la plante emprunte sa nourriture.

**II. Argile.** — Beaucoup de terres, lorsqu'elles sont humectées, forment, quand on les pétrit à la main, une masse cohérente, susceptible de recevoir telle forme que l'on désire. Si on abandonne cette masse à elle-même, elle se dessèche au bout d'un temps variable, puis on voit apparaître à sa surface des fissures plus ou moins profondes.

Inversement, il existe des terres qui fournissent, lorsqu'on les mélange avec une petite quantité d'eau, un résultat tout différent : on n'observe aucune cohésion de la masse qui s'effrite facilement entre les doigts.

Il existe donc dans les premières une substance qui communique à l'ensemble un certain degré de consistance que nous ne trouvons pas chez les secondes et qui, par dessiccation, subit un *retrait*. L'élément qui provoque ainsi l'agglutination des particules terreuses, c'est *l'argile*. Celle-ci peut manquer dans certaines

terres. Il y a une infinité de transitions entre les premières et les secondes.

III. **Calcaire.** — Mettons dans un verre une poignée de terre sur laquelle nous verserons un acide tel que l'acide chlorhydrique. Parfois une vive effervescence se manifeste ; des bulles gazeuses viennent crever à la surface du liquide et le gaz qui se dégage ainsi éteint une allumette enflammée. La terre en question contient donc un carbonate : c'est le carbonate de calcium.

Parfois l'effervescence causée par l'action de l'acide est peu vive, parfois même douteuse : il faut alors recourir à des procédés plus délicats pour reconnaître la présence ou l'absence du calcaire.

Enfin il existe des terres qui ne renferment pas trace de calcaire.

Remarquons ici combien est inhomogène ce constituant de la terre que nous avons appelé *sable*. Celui-ci, avons-nous dit, est formé de débris de roches silicatées de grosseur très variable. Chez les terres calcaires, les fragments de carbonate de calcium sont intimement mélangés aux débris silicatés. Quant à l'argile, dont les grains sont extrêmement fins, elle se trouve répartie dans toute la masse terreuse sous une forme spéciale que nous définirons bientôt.

IV. **Humus.** — Lorsqu'une terre présente, surtout lorsqu'elle est humide, une coloration brune plus ou moins accentuée, et lorsque, à l'œil nu et mieux encore avec le secours d'une loupe, on y constate la présence de débris amorphes noirâtres, ayant antérieurement appartenu à des végétaux, on peut être assuré que cette terre renferme de la matière organique, c'est-à-dire de l'*humus*.

Voici d'ailleurs une expérience très simple qui lèvera tous les doutes à cet égard. On prend deux ou trois grammes de terre sèche que l'on introduit dans un petit

tube à essai; on chauffe doucement ce tube. Si la terre renferme quelques millièmes seulement de matière organique, on observe le noircissement de la masse; il se manifeste en même temps une odeur de brûlé.

Cette épreuve, dans le cas d'un noircissement peu prononcé, doit être complétée par la suivante. On mélange la terre avec une pincée de chaux sodée pulvérisée et l'on chauffe. On approche alors de l'orifice du tube un papier de tournesol rouge légèrement humecté d'eau. Le papier bleuit: il s'est donc dégagé un gaz alcalin, c'est de l'ammoniaque. Celle-ci provient de la décomposition de l'humus, lequel renferme toujours de l'azote.

L'humus manque très rarement dans les terres, mais les proportions sous lesquelles il se rencontre varient énormément d'une terre à une autre.

#### *CONSTITUTION SPÉCIALE DE CHACUN DE CES QUATRE ÉLÉMENTS*

Cherchons maintenant quelle est la constitution de ces quatre éléments, quelle est l'importance relative de chacun d'eux, et de quelle façon ils se comportent les uns vis-à-vis des autres.

I. **Sable.** — Défini comme il a été dit plus haut, le sable est l'élément de beaucoup le plus abondant dans les sols. Il est formé de grains de grosseurs très inégales. C'est le degré de finesse de ces grains qui commande la perméabilité ou la compacité des sols. On voit donc quelle est l'importance de cet élément au point de vue du travail du sol et au point de vue de la façon dont les racines pourront cheminer dans son épaisseur.

La calcination de la masse sableuse d'un sol en change presque toujours la couleur. Cela tient, en grande



partie, à ce fait que les grains sableux sont revêtus, comme par un phénomène de teinture, d'une couche très mince de matière organique.

II. *Argile*. — Nous savons que cette substance — qui peut manquer dans certains sols — est caractérisée par la propriété de donner au contact de l'eau une pâte plus ou moins liante, et que sa composition, quand elle est pure, répond à celle d'un *silicate d'aluminium hydraté*. La plupart du temps, ce silicate est mélangé de beaucoup d'impuretés qui lui communiquent une couleur grise, jaune ou verte, suivant la nature de celles-ci.

L'importance de l'argile est considérable, et sa *structure physique* est très intéressante à étudier. Procédons, pour la connaître, à un essai très simple.

Prenons quelques grammes (8 ou 10) d'argile dite *grasse*, nommée encore *terre glaise*, et malaxons fortement cette argile dans un mortier au contact d'une cinquantaine de centimètres cubes d'eau distillée, de façon que le liquide pénètre bien dans toute la masse. Laissons reposer la liqueur trouble pendant quelques instants et décantons la partie fluide dans un verre. Après avoir renouvelé cette opération deux ou trois fois, il restera dans le mortier un dépôt sableux plus ou moins abondant. Examinons d'abord la composition de ce dépôt avant de passer à l'étude de la liqueur trouble. L'analyse nous montrera qu'il est formé de silice et de silicates (à base de potasse, de soude, de chaux, de fer). L'argile grasse comportait donc, en quelque sorte, deux parties : l'une qui, à la suite d'un broyage énergique au contact de l'eau, a fourni un liquide trouble et une autre, plus dense, qui renferme des éléments sableux. Ces deux constituants étaient intimement mélangés dans l'échantillon primitif.

L'importance de cette partie sableuse est grande.

D'abord, elle permet d'appuyer la théorie que nous avons invoquée de la formation de l'argile comme dérivant de l'action de l'eau chargée de gaz carbonique sur les roches primitives. Cette partie sableuse représente, en quelque sorte, le squelette initial de la roche dont l'argile n'est que le dérivé. Au point de vue pratique, il faut noter qu'un sol qui ne serait composé que d'argile *pure* serait absolument infécond puisqu'il ne renfermerait pas d'éléments nutritifs pour les plantes. Mais le fait est rare, et les sols dits *argileux*, bien que souvent difficiles à travailler en raison de leurs qualités physiques très spéciales, portent cependant des végétaux. Or, ceux-ci ne peuvent s'alimenter qu'aux dépens de certains éléments contenus dans le sable qui se trouve englobé dans l'argile.

Voyons maintenant quelle est la *nature* du liquide trouble que nous avons décanté. Si nous abandonnons à lui-même ce liquide pendant quelques heures, il s'éclaircit quelque peu ; et si nous le versons avec précaution dans un autre verre, nous remarquons qu'il abandonne un léger dépôt de sable très fin. Répétons encore cette opération un certain nombre de fois : nous obtiendrons des dépôts de plus en plus fins et de moins en moins abondants. Mais le liquide lui-même demeurera trouble.

Dans ce liquide existe en suspension une certaine matière dont nous pouvons, à son tour, provoquer le dépôt. Il suffit, en effet, d'y verser quelques gouttes d'une solution saline quelconque (chlorure de potassium, de calcium, etc.). Peu à peu, des *flocons* apparaissent dans toute la masse ; au bout de quelques minutes, la partie supérieure du liquide s'éclaircit complètement, et bientôt la totalité de la liqueur devient limpide. A ce moment, les flocons se sont rassemblés au fond du vase.

La substance qui s'est ainsi coagulée sous l'influence

du sel ajouté est l'*argile colloïdale*. Cette substance n'était pas dissoute dans l'eau à la manière d'un sel; elle affectait un état spécial, dit *état colloïdal*, que nous avons détruit par l'addition d'un *électrolyte*. C'est là, comme l'on sait, une propriété qui caractérise essentiellement les solutions colloïdales — appelées également *pseudo ou fausses solutions* — de perdre cet état de suspension au contact d'un électrolyte quelconque.

Il résulte de ce qui précède que l'argile brute renferme bien deux matières distinctes : l'une sableuse dont les grains peuvent être extrêmement fins et ne se séparer du liquide avec lequel cette argile a été malaxée qu'au bout d'un temps parfois très long; l'autre qui ne se dépose pas et demeure en suspension, mais dont on obtient la coagulation, c'est-à-dire la précipitation, par l'addition d'un électrolyte.

— Transportons maintenant, dans l'examen de la terre arable, les notions que nous venons d'acquérir sur la structure de l'argile.

A cet effet, faisons l'expérience suivante, indiquée, il y a longtemps déjà, par Schlœsing. Prenons deux tubes de verre de 2 à 3 centimètres de diamètre intérieur et de 30 centimètres environ de longueur, bouchés à leur partie inférieure par un petit morceau de toile. Emiettons dans ces deux tubes une centaine de grammes de terre et versons sur la terre du premier tube de l'eau ordinaire, sur celle du second tube de l'eau distillée. Le liquide qui, au bout d'un certain temps, s'écoulera à la partie inférieure du premier tube sera limpide et demeurera toujours tel, quel que soit le volume d'eau que nous versions. Au contraire, le liquide qui s'écoulera du second tube, d'abord limpide, deviendra légèrement trouble au bout de quelque temps; puis ce trouble augmentera tandis que l'écoulement de l'eau deviendra de plus en plus lent.



La seule différence que présentent ces deux essais tient uniquement à la *nature* de l'eau employée. Dans le premier cas l'eau, étant de l'eau ordinaire, contient des sels en dissolution et notamment des sels de calcium ; dans le second cas l'eau est exempte de sels. Il paraît donc bien probable que la limpidité persistante du liquide qui s'écoule du premier tube doit être attribuée à la présence des sels, tandis que l'apparition d'un liquide trouble dans le second cas tient précisément à l'absence totale de sels.

Il est facile de démontrer la justesse de cette interprétation. Pour cela, on dispose dans une terrine quelques centaines de grammes de terre arable sur laquelle on verse de l'acide chlorhydrique dilué ; on remue la masse avec une spatule jusqu'à cessation d'effervescence. Après quelques minutes de repos, on décante le liquide clair qui surmonte le dépôt terreux et on verse sur celui-ci de l'eau distillée.

On agite le tout et on laisse reposer ; on décante ensuite la liqueur surnageante.

Mais, après un certain nombre d'opérations analogues, cette liqueur, d'abord parfaitement limpide, devient de plus en plus trouble. Si nous décantons une partie de ce liquide dans une éprouvette à pied, nous remarquons qu'il abandonne peu à peu un dépôt sableux très fin : il se conduit en cela comme l'argile brute dans l'expérience citée plus haut.

Procédons à une seconde décantation dans une nouvelle éprouvette, les mêmes faits se reproduisent : un nouveau dépôt se formera, encore plus fin que le premier ; mais le liquide qui le surmonte demeurera toujours trouble.

Nous sommes donc en présence d'une substance qui demeure en suspension et qui se conduit comme l'argile colloïdale de notre première expérience. En effet,

il suffit, pour faire cesser cette suspension, de verser dans le liquide quelques gouttes d'une solution d'un sel quelconque, de calcium par exemple. Au bout de quelques minutes, la coagulation commence, le liquide s'éclaircit rapidement, et les flocons du coagulum tombent au fond du vase.

Recueillons ce coagulum, séchons-le à l'air, et nous remarquerons qu'il éprouve, par le fait de la dessiccation, un retrait qui se traduit par l'apparition de fentes à sa surface. Nous sommes donc bien en présence d'argile, dont nous venons de vérifier les propriétés caractéristiques : état de suspension colloïdale dans de l'eau distillée exempte de matières salines, précipitation de cette suspension par addition d'un électrolyte, fendillement de la masse lorsqu'elle se dessèche à l'air.

La coagulation de l'argile peut s'effectuer, non seulement par l'addition d'un sel, mais encore de tout autre électrolyte (HCl,  $\text{SO}^4\text{H}^2$ , etc.). Il suffit de faibles quantités d'un électrolyte pour provoquer cette coagulation : 1/5000 de chaux, libre ou combinée, donne, d'après Schlœsing, un précipité immédiat ; 1/10000 au bout de quelques jours ; 1/20000 semble inefficace.

En général, et sans entrer ici dans le détail, les sels d'ions monovalents (K, Na) coagulent l'argile moins rapidement que les sels d'ions bivalents (Ba, Ca) et ceux-ci, à leur tour, sont moins actifs que les sels d'ions trivalents (Al).

— Nous pouvons maintenant interpréter aisément l'expérience des deux tubes décrite plus haut. Dans le premier cas, l'eau que nous avons versée, étant de l'eau ordinaire, contenait en dissolution un ou plusieurs électrolytes (sels de calcium généralement) qui maintenaient l'argile en coagulation : d'où écoulement constant d'un liquide parfaitement clair. Dans le second cas, nous avons fait usage d'eau distillée. Celle-ci dis-

solvait, lors de son passage au travers de la masse terreuse, le calcaire contenu dans la terre : d'où, pendant un certain temps, écoulement d'un liquide limpide. Mais lorsque, malgré sa faible solubilité, le calcaire a été éliminé ainsi par lavage prolongé, l'argile, qui jusque là demeurait coagulée, entre peu à peu en suspension. Nous observons alors que l'écoulement se ralentit et que l'eau devient trouble. A un moment donné, l'argile en suspension bouche les interstices qui existent entre les particules terreuses et l'écoulement s'arrête presque complètement.

Lorsqu'on veut mettre aisément en suspension l'argile que contient une terre, il est préférable, ainsi que nous l'avons fait plus haut, de traiter d'abord cette terre par l'acide chlorhydrique étendu. On enlève ainsi rapidement le calcaire à l'état de chlorure de calcium, sel très soluble que des lavages ultérieurs à l'eau distillée éliminent complètement. L'emploi de l'eau distillée seule, pour provoquer cette élimination, demanderait parfois un temps très long, surtout lorsque la terre contient une dose notable de calcaire.

Ce sont les sels calcaires contenus dans la terre arable qui maintiennent l'argile en état de coagulation. Cette argile réunit entre eux les grains sableux ; elle joue le rôle de ciment en les agglomérant en petites masses. Il existe donc entre ces grains sableux, ainsi réunis, des espaces libres au sein desquels peuvent circuler l'air et l'eau.

Ces données, relatives à la constitution et au rôle de l'argile dans les sols, sont d'une extrême importance en ce qui concerne la connaissance de la structure de la terre arable. Ajoutons, pour terminer, que beaucoup de sols, dépourvus d'argile, possèdent néanmoins une division particulière stable qui assure chez eux la libre circulation des gaz et de l'eau. Un autre ciment



intervient alors dont nous allons bientôt nous occuper.

III. **Calcaire.** — Si la richesse du sol en calcaire est très variable, le degré de finesse de ce calcaire est également sujet à de grandes variations. Or, seul le calcaire fin joue un rôle actif puisqu'il occupe alors une grande surface et qu'il est plus accessible aux agents naturels de dissolution (eau et gaz carbonique).

Nous connaissons le rôle éminemment utile du calcaire vis-à-vis du maintien de la coagulation de l'argile, et l'on doit conclure à la nécessité d'en réintroduire dans le sol lorsqu'il tend à disparaître à la suite d'un lavage prolongé.

IV. **Humus.** — Au point de vue physique, l'humus joue un rôle de premier plan dans certaines terres, rôle bien mis en évidence par Schlœsing.

Nous savons que l'argile, lorsqu'elle est coagulée par les sels calcaires, est un ciment des terres arables qui assure chez ces terres le maintien de la division particulière. Un assez grand nombre de sols ne renferment pas ou presque pas d'argile (terres de forêts, de landes, de bruyère); et cependant ces sols, souvent couverts de végétation, sont perméables à l'air et à l'eau et conservent cette perméabilité même après des pluies prolongées.

Si on arrose un échantillon d'une pareille terre, disposée dans une allonge, avec de l'eau alcaline (ammoniacale, par exemple), il s'écoule un liquide brun. Au fur et à mesure que cette substance brune disparaît par dissolution, les particules terreuses se rapprochent jusqu'à entraver, à un moment donné, le passage du liquide. La terre considérée contient donc une substance qui sert de ciment à ses particules et que l'action de l'eau alcaline a dissoute.

Cette substance, c'est l'*humus*. Sa réaction en l'absence de calcaire est acide. Si l'on précipite le liquide

ammoniacal par un sel de calcium, il se forme des flocons bruns que l'on désigne souvent sous le nom d'*humate de chaux*, bien qu'il ne s'agisse pas ici d'une véritable combinaison au sens chimique du mot. C'est d'ailleurs sous cette forme d'humate de chaux que se rencontre l'humus dans les bonnes terres arables suffisamment pourvues de calcaire.

L'humate de chaux, obtenu comme il vient d'être dit, se présente, après dessiccation à l'air, sous l'aspect d'une substance amorphe, brune, fendillée. Lorsque l'on malaxe cet humate, encore imbibé d'eau, avec du sable, même dans la proportion de 1 pour cent. le mélange demeure cohérent après malaxage, et si l'on émiette ce mélange dans une allonge de verre et qu'on l'arrose d'eau calcaire, ou même d'eau distillée, il ne se délaie pas et garde sa forme. D'où cette expression : *l'humus donne du corps aux terres légères.*

Remarquons que l'humus est une substance colloïdale. Si, en effet, on dialyse une solution potassique ou ammoniacale d'humus, il reste sur le dialyseur un liquide brun foncé, limpide, coagulable par l'addition d'un électrolyte quelconque, avec production de flocons bruns, presque complètement exempts de potasse ou d'ammoniaque.

L'humus, s'il donne du corps aux terres légères, est également susceptible d'ameublir, au contraire, les terres fortes, c'est-à-dire de communiquer à ces terres un certain degré de perméabilité qui leur manque. En effet, si on mélange de l'humus avec de l'argile grasse, la cohésion de l'argile diminue d'autant plus que la proportion de l'humus est plus grande. D'où cette expression : *le terreau ameublir les terres fortes.*

Ainsi ces deux colloïdes, argile et humus, loin d'ajouter leurs effets, c'est-à-dire de fournir une masse encore plus cohérente et plastique que l'argile seule, se

combattent réciproquement. Ces deux colloïdes sont dits *de noms contraires*.

L'humus constitue donc un ciment des particules sableuses chez les terres qui ne renferment pas d'argile : il assure ainsi leur perméabilité. Mais, d'autre part, il tempère les propriétés excessives de plasticité et d'imperméabilité des terres dites *fortes*.

Cependant, comme il disparaît peu à peu par combustion lente, il est nécessaire d'en réintroduire de temps en temps sous forme de fumier ou d'engrais verts dont la décomposition lente engendre peu à peu de la matière humique.



## CHAPITRE IV

### LACUNES DU SOL

#### MOUVEMENTS DE L'EAU ET DE L'AIR DANS LE SOL ÉCHAUFFEMENT DU SOL

Nous venons de montrer quels étaient les agents (argile, humus) qui, dans les conditions normales, maintenaient la terre dans un état particulier de division propre à la circulation de l'eau et de l'air et au cheminement des racines.

S'il n'existait pas d'espaces libres dans l'épaisseur d'une terre, toute végétation serait impossible.

On peut se rendre compte de bien des façons combien sont nombreuses les lacunes dans un sol normal.

**Lacunes du sol.** — Prenons, par exemple, un vase cubique d'un décimètre de côté, dont la contenance est, par conséquent, d'un litre, et après en avoir pris la tare sur le plateau d'une balance, introduisons dans ce vase de la terre que nous aurons grossièrement tamisée, puis tassons légèrement la masse que nous nivellerons au moyen d'une règle. Prenons de nouveau la tare du vase. Si la terre est moyennement humide (15 pour 100 d'eau, par exemple), nous aurons un poids de terre voisin de 1200 grammes. Or, si l'on détermine par la méthode rigoureuse du flacon le *poids spécifique réel* d'un grand nombre d'échantillons de terres arables sèches, on trouve en moyenne le chiffre de 2,6.

Notre décimètre cube de terre devrait donc peser

2600 grammes. La différence  $2600 - 1200 = 1400$  montre combien sont nombreux les espaces lacunaires qui existent dans la masse terreuse. Il nous est, d'ailleurs, facile d'en estimer exactement le volume.

Supposons que l'échantillon actuel renferme 15 pour 100 d'eau, le poids de la terre sèche sera donc de  $1200 - 180 = 1020$  grammes ; notre vase dont la capacité est égale à  $1000^{\text{cc}}$  contient par conséquent :

$$1000^{\text{cc}} = \text{vol. terre} + \text{vol. eau} + \text{vol. air} = 392^{\text{cc}} + 180^{\text{cc}} + \text{vol. air},$$

d'où :  $\text{vol. air} = 1000^{\text{cc}} - 392^{\text{cc}} - 180^{\text{cc}} = 428^{\text{cc}}$ .

Ce cube de terre renferme donc  $428^{\text{cc}}$  d'air, soit 42,8 pour cent de son volume total.

C'est là un chiffre qui peut sembler considérable, mais qui, en réalité, est absolument normal.

Le travail du sol, à la charrue ou à la bêche, augmente encore les espaces lacunaires qui, dans bien des cas, peuvent atteindre 50 pour 100 de la masse terreuse. Or les volumes de l'air et de l'eau sont complémentaires : on voit, dans le cas de l'arrosage, quel volume énorme d'eau peut retenir la terre, au moins momentanément.

Les espaces lacunaires sont donc nombreux dans une bonne terre arable ; les façons qu'on lui donne sont encore susceptibles de les accroître pour le plus grand bien de la culture.

En effet, lorsque la terre n'est pas travaillée, elle se tasse peu à peu ; son volume apparent peut diminuer d'un cinquième. Les espaces libres se rétrécissent, la capacité de cette terre vis à vis des fluides, eau et air, diminue.

Le travail de la terre joue donc un rôle capital dans le maintien de sa porosité.

Il existe aussi une cause naturelle de formation des espaces lacunaires. Lorsqu'une plante meurt, ses ra-

cines pourrissent dans le sol et, au fur et à mesure que les combustions et fermentations de toute sorte font disparaître la trame organique de cette plante, il se produit peu à peu des espaces vides là où cheminaient les racines.

### Montée et descente de l'eau dans le sol. —

A. Considérons d'abord le sol à l'état de repos. Dans les conditions normales où se trouve la terre arable, avec une teneur de 15 pour 100 d'eau par exemple, chaque particule terreuse est entourée d'une mince pellicule de liquide dont la tension superficielle contrebalance l'effet de la pesanteur. Dans le sol, l'eau se transporte d'une région humide vers une région sèche jusqu'à ce que la tension de la pellicule liquide située autour des particules soit partout la même.

Certains auteurs admettent que les substances solubles dans l'eau, employées comme engrais, augmentent la tension superficielle de l'eau. Il paraîtrait cependant que les variations de cette tension, provoquée par l'application de sels fertilisants, seraient trop faibles pour affecter les conditions d'humidité du sol.

B. Examinons maintenant la *montée de l'eau dans le sol*. Supposons que la terre considérée repose sur une couche argileuse imperméable au-dessus de laquelle s'étend une nappe d'eau : celle-ci, en vertu des phénomènes capillaires, va monter dans l'épaisseur de la couche terreuse. Si nous supposons le cas idéal dans lequel toutes les particules auraient les mêmes dimensions et seraient également tassées, et où, par conséquent, les canaux capillaires posséderaient le même diamètre, l'eau s'élèvera à une hauteur d'autant plus grande que le diamètre de ces tubes sera plus petit. Donc les sols à éléments fins se chargent d'humidité sur une hauteur plus grande que les sols à éléments grossiers. Cependant la *vitesse* d'ascension sera d'au-



tant plus faible que les éléments seront plus fins, car il faut tenir compte du frottement de l'eau sur les parois du tube capillaire, frottement d'autant plus grand que le diamètre de celui-ci est plus petit.

Nous venons de raisonner dans le cas d'une terre parfaitement homogène. Or un pareil cas ne se présente jamais, et les canaux capillaires qui sillonnent la terre ont, en raison même de sa structure irrégulière, des diamètres forcément inégaux.

Le travail auquel on soumet le sol par les labours accroît le nombre des espaces libres et crée de la sorte des vides nombreux. Dans ces conditions, les canaux capillaires sont détruits et l'eau s'élève à une hauteur plus faible que lorsque le sol est naturellement ou artificiellement tassé.

*En pratique*, cette ascension de l'eau dépend de l'existence d'une couche liquide qui ne doit pas être située à une trop grande profondeur. En effet, si le sol considéré se compose d'éléments grossiers, il pourra ne pas bénéficier dans ses couches supérieures de cette source d'humidité ; s'il est composé d'éléments fins, l'ascension sera souvent si lente que les plantes exposées à la sécheresse ne retireront aucun profit de la présence de l'eau sous-jacente. De plus, l'air emmagasiné entre les particules terreuses entrave le mouvement ascensionnel de l'eau.

C. Enfin, — et c'est là le cas le plus fréquent — l'eau s'infiltré dans le sol de haut en bas, par suite de la chute de la pluie ou de l'emploi des eaux d'arrosage ou d'irrigation. Il s'agit de savoir comment se produit alors le mouvement de l'eau et quelle est la quantité de ce liquide susceptible d'être retenue dans des conditions déterminées.

L'eau ne peut s'introduire dans un sol que si ce sol possède un certain degré de porosité ou de perméabi-

lité. Celle-ci est mesurée par la rapidité avec laquelle l'eau chemine de haut en bas. Il ne serait possible de donner une mesure exacte de la perméabilité que dans le cas, tout théorique, d'une terre absolument homogène. Cette perméabilité, qui dépend du diamètre des canaux capillaires et de la hauteur de la couche d'eau qui surmonte la masse, pourrait être alors estimée de façon assez exacte. Mais un pareil cas ne se rencontre jamais dans la pratique. En effet, chez les terres réputées les plus homogènes, on observe toujours la présence de crevasses, fissures, espaces demeurés vides à la suite de la pourriture des racines, galeries de vers, etc., qui rendent le plus souvent illusoire les mesures que l'on est tenté d'exécuter sur le degré de perméabilité. On peut avancer avec certitude que si le frottement de l'eau joue un rôle capital dans la rapidité ou la lenteur de l'ascension de ce liquide venu des couches profondes, ainsi que nous l'avons dit antérieurement, la même influence se fera sentir dans le mouvement inverse lorsque l'eau s'infiltrera de haut en bas. Le frottement est considérable sur les particules de l'argile dont les grains sont excessivement fins : la perméabilité de l'argile est donc très faible.

Telle est la nature du mouvement de l'eau. Examinons maintenant les quantités de ce liquide susceptibles, suivant les circonstances, de demeurer dans le sol.

Si on suppose un sol reposant sur une couche argileuse imperméable, l'eau que ce sol aura reçue, après avoir chassé la majeure partie de l'air inclus entre ses particules, séjournera longtemps dans son intérieur puisque, ne pouvant s'écouler par le bas, elle n'abandonnera le sol que très lentement par le seul jeu de l'évaporation à la surface. De semblables sols, aux époques où ils sont gorgés d'eau, constituent des milieux asphyxiants pour les racines.

Imaginons maintenant le cas où le sol repose sur un sous-sol perméable; il nous faut alors distinguer deux sortes de capacité pour l'eau. On appelle *capacité maximum* celle qui correspond au cas où l'eau, après avoir chassé l'air confiné dans tous les espaces libres, remplit aussi bien les espaces capillaires situés entre les particules que les cavités ou *pores* qui se trouvent à l'intérieur de ces particules. Mais, sous l'influence de la pesanteur, l'eau s'écoule peu à peu et, du moins dans les couches supérieures, les capillaires se vident.

L'humidité de la terre est alors représentée seulement par la pellicule d'eau qui entoure chaque grain et qui est retenue à sa surface par la force appelée *tension superficielle* : c'est ce que l'on nomme la *capacité minimum* du sol pour l'eau. De plus, les cavités (ou *pores*) qui sont creusées dans l'épaisseur des particules, demeurent pleines de liquide, car elles n'ont à soutenir que des colonnes de très faible longueur. La dose *normale* d'eau que contient un sol doit être regardée, d'après Schlœsing, comme répondant à sa capacité minimum.

Il en résulte que la capacité minimum correspondra à un taux d'eau, rapporté à 100 parties de terre, d'autant plus élevé que les éléments seront plus fins.

Nous venons de raisonner dans le cas de terres dont la structure serait très homogène. Mais, dans les conditions naturelles, cette homogénéité parfaite ne saurait exister puisqu'une terre est toujours composée de cailloux, de graviers, autour desquels est répandue de façon irrégulière une poussière minérale qui est, en somme, l'élément actif du sol au point de vue chimique.

Il est donc difficile, sinon impossible, de fixer par des chiffres les capacités maximum et minimum des



différents sols pour l'eau. La capacité maximum répond bien à un cas réel où l'eau, ayant chassé la totalité de l'air, remplit par conséquent tous les espaces vides. Mais la capacité minimum échappe à toute définition; car un sol, principalement au voisinage de sa surface, éprouve des variations continuelles quant à sa teneur en eau, variations imputables à l'agitation de l'air ambiant, au réchauffement ou au refroidissement de cet air, à son état hygrométrique, à la chute de la pluie et à la condensation de la rosée.

Au point de vue pratique, ce qu'il importe de connaître pour un sol déterminé, c'est la quantité d'eau au-dessus et au-dessous de laquelle une plante ne peut plus vivre soit, dans le premier cas, par suite de la présence au contact de ses racines d'un volume d'air trop faible, soit, dans le second cas, par suite d'une quantité de liquide insuffisante pour subvenir aux exigences de la nutrition.

Il est admis que la quantité d'eau optimum capable d'assurer le bon fonctionnement de la vie végétale correspond à un taux de 40 à 60 pour 100 de la quantité nécessaire pour remplir de ce liquide tous les espaces lacunaires. Ceux-ci sont susceptibles d'être accrus dans une large mesure à la suite des façons culturales auxquelles on soumet la terre. Ces façons culturales — et le binage en particulier — ayant pour but de détruire la continuité de la surface du sol, suppriment les canaux capillaires et retardent ainsi l'ascension de l'eau venant des parties profondes : on peut donc, par ce moyen, lutter contre la sécheresse.

Réciproquement, lorsque la sécheresse de la surface devient trop grande, on devra, en vue de faire remonter l'eau qui se trouve à une certaine profondeur, rétablir la continuité du sol par un tassement : c'est en cela que consiste le travail du rouleau.

**Imbibition des terres par l'eau; mesure de la capacité d'imbibition.** — Après avoir défini ce que l'on doit entendre par *capacité maximum* et *capacité minimum* d'une terre pour l'eau, nous devons chercher comment on peut *mesurer* la quantité d'eau dont une terre est capable de se charger normalement; c'est-à-dire quelle est la quantité de liquide que retient une terre donnée lorsqu'après avoir été mouillée complètement, elle s'est dépouillée du liquide qui remplissait tous ses espaces libres : on dit, dans ce cas, que la terre s'est ressuyée.

L'idée qui vient la première à l'esprit, pour effectuer cette mesure, est la suivante :

On dispose sur un filtre soutenu par un entonnoir, ainsi que l'a fait il y a bien longtemps Schübler, un poids connu de terre sèche, on verse de l'eau en excès sur cette terre, et lorsque l'excédent du liquide s'est complètement écoulé par la douille de l'entonnoir, on pèse de nouveau l'appareil. La différence de poids, défalcation faite de ceux de l'entonnoir et du filtre, est égale au poids de l'eau retenue par la terre.

Schlœsing a démontré que cette manière de procéder est incorrecte, et que l'on ne peut déterminer ainsi que la capacité maximum de la terre pour l'eau, mais nullement la dose de ce liquide qui constitue l'approvisionnement normal de la terre.

Prenons un tube de verre de 4 à 5 centimètres de diamètre et de 40 centimètres de longueur environ, bouché à l'une de ses extrémités par un morceau de toile fixé sur ses bords. Immergeons ce tube dans une grande éprouvette à pied renfermant de l'eau colorée, par du carmin, par exemple. Lorsque le niveau de l'eau sera le même à l'extérieur et à l'intérieur du tube, versons doucement dans celui-ci du sable fin bien tamisé. Ce sable, tombant ainsi lentement dans le liquide, se

répartit en couches sensiblement homogènes ; ce qui n'aurait pas lieu si l'on avait d'abord rempli le tube de sable et qu'on l'eût ensuite immergé dans l'eau colorée. Retirons ensuite le tube de l'éprouvette et suspendons-le verticalement. L'excès de liquide s'écoule peu à peu ; la partie supérieure de la colonne sableuse se décolore sensiblement. Mais, après quelques minutes, quand l'égouttage est terminé, le tube est divisé en deux régions bien nettes : une région supérieure peu colorée et une région inférieure dont la coloration est presque aussi intense que celle que présentait la colonne sableuse au moment où elle a été retirée du bain.

L'interprétation de cette expérience est très simple. Entre les grains de sable, que nous supposerons d'égale grosseur après tamisage, existent des canaux capillaires ayant sensiblement même diamètre. Tous ces canaux sont remplis du liquide coloré lorsque le tube sort du bain. Au fur et à mesure que le liquide s'égoutte, ces canaux capillaires se vident peu à peu à la partie supérieure. Mais, à la partie inférieure, ils demeurent pleins sur une hauteur égale à celle des colonnes d'eau auxquelles la capillarité peut faire équilibre. Les grains de sable, dans la partie ressuyée, retiennent encore de l'eau, mais cette eau est simplement retenue par l'attraction de leur surface sous la forme d'une mince pellicule. On comprend pourquoi la coloration de ces grains est beaucoup moins intense que celle des grains de la partie inférieure.

Si maintenant on exécute la même expérience en faisant usage d'un sable plus fin que le précédent, on obtiendra le même résultat *qualitatif*, c'est-à-dire qu'il existera encore deux régions dans le tube, différentes quant à leur coloration ; mais, dans le second cas, la longueur de la région inférieure sera plus grande que



dans le premier cas : ce qui tient à l'exiguité plus grande des tubes capillaires.

On comprend maintenant pourquoi le procédé employé par Schübler est incorrect.

La terre, gorgée d'eau, étant donnée la forme de l'entonnoir, ne s'égoutte pas, ne se ressuie pas. Les chiffres obtenus seront donc beaucoup trop élevés.

L'expérience de Schlœsing met encore en évidence ce fait intéressant. Admettons que l'on prenne, comme *taux normal de l'humidité*, la dose de l'eau retenue par les grains sableux dans la partie supérieure ressuyée des tubes, là où les capillaires sont vides : on remarque que cette dose varie avec la grosseur des éléments. Elle est d'autant plus élevée que, pour un poids déterminé de sable, les éléments de celui-ci sont plus fins. Ces éléments, en effet, pour un même poids de matière, ont une surface d'autant plus grande qu'ils sont plus petits.

Au point de vue pratique, on doit donc conclure qu'une terre bien ressuyée retiendra une quantité d'eau d'autant plus grande, pour un poids donné, que les éléments de cette terre seront plus fins.

Faisons maintenant une expérience analogue avec la terre arable elle-même.

Plongeons un grand tube dans de l'eau ordinaire (non colorée, car les différences de teintes ne pourraient être perçues), et émiettons dans ce tube de la terre moyennement argileuse. Laissons ensuite égoutter le tube, et étudions la répartition de l'humidité en pesant des prises d'échantillon effectuées à différentes hauteurs. Nous remarquerons, en procédant ainsi, que le contenu du tube comprend trois régions. Une région supérieure dans laquelle la quantité d'eau est constante, mais faible ; une région moyenne dans laquelle le taux de l'eau, variable, croît de la partie supérieure à la partie

inférieure ; enfin, une région inférieure dans laquelle le taux de l'eau est constant et plus élevé que celui de la région supérieure.

L'existence des régions supérieure et inférieure, avec leurs taux uniformes d'humidité, s'explique de la même façon que dans le cas du sable. Lorsqu'il s'agit de la terre arable, celle-ci, n'ayant pas été tamisée, comporte des éléments de grosseurs variables entre lesquels les canaux capillaires sont forcément de diamètres inégaux. La région moyenne répond précisément à la présence de ces capillaires inégaux ; c'est dans cette région, ainsi que nous venons de le dire, que la quantité d'eau retenue augmente du haut vers le bas.

Voici, pour illustrer cette démonstration, les chiffres que fournissent comparativement, avec le sable et avec des terres de différente constitution, les procédés de Schübler et de Schlöesing.

*Quantités d'eau retenues par 100 parties de sable ou de terre.*

	D'après la méthode de Schübler.	D'après la méthode de Schlöesing.	
Sable fin . . . . .	20	7.3	
Sable grossier. . . . .	16	3.0	
	<div style="display: flex; justify-content: space-around; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;"> <span>Terre délayée dans l'eau et jetée sur filtre.</span> <span>Terre émietée sur filtre et arrosée d'eau.</span> </div>		
Terre argileuse . . . . .	47.7	49.0	35.0
Terre argilo-calcaire meuble .	43.5	51.7	30.0
Terre argilo-sableuse . . . . .	45.7	54.7	37.5
Terre de forêt, composée de sable très fin . . . . .	57.7	61.8	42.0
Terre calcaire sableuse. . . . .	40.0	41.0	32.0

La détermination *pratique* de la quantité d'eau retenue par la terre devra être faite de la façon suivante. Sur une terre lavée par les eaux de la pluie et bien resuyée, on prélèvera des échantillons à diverses hauteurs que l'on séchera à l'étuve à la même température.

On obtiendra de la sorte le véritable taux de l'humidité pour chaque couche.

Schlœsing fait remarquer que les terres qui retiennent le plus facilement l'eau, et qui se ressuient mal, sont les terres à éléments sableux très fins chez lesquelles la division particulière n'est pas assurée par la présence d'une quantité suffisante d'argile ou d'humus. Lorsque ces terres sont mouillées, leurs canaux capillaires sont d'une telle finesse qu'ils retiennent l'eau avec une grande énergie.

**Aptitude des terres à la dessiccation.** — S'il est très important de connaître la capacité que l'on pourrait appeler *normale* d'une terre pour l'eau, il est non moins utile, au point de vue pratique, d'étudier le mécanisme par lequel une terre humide se dessèche en perdant de l'eau par sa surface.

Sans nous attarder à reproduire les procédés défectueux antérieurement mis en usage, voyons, d'après Schlœsing, comment on doit déterminer correctement la perte d'eau par dessiccation.

Deux phénomènes concomitants interviennent ici : la perte d'eau par évaporation à la surface, perte qui se produit au contact d'une atmosphère sans cesse renouvelée et qui n'est jamais complètement saturée ; en second lieu, le transport de l'eau de la profondeur de la masse terrestre vers la surface.

Prenons trois vases de mêmes dimensions. Dans le premier introduisons du sable grossier, dans le second du sable plus fin, dans le troisième du sable très fin. Supposons que ces trois échantillons renferment même taux d'humidité (15 pour 100 environ). Les trois vases, exposés dans une pièce dont la température oscille entre 15 et 20°, sont pesés tous les deux jours pendant un mois. Au bout de ce temps, on extrait de chacun d'eux le sable par couches horizontales, d'épaisseur



connue, on détermine la dose de l'eau contenue dans chacun des lots prélevés et on figure la marche de la dessiccation en portant, en abscisses, les taux d'eau pour cent du sable sec et, en ordonnées, les hauteurs correspondantes des couches de sable de chaque vase (fig. 1).

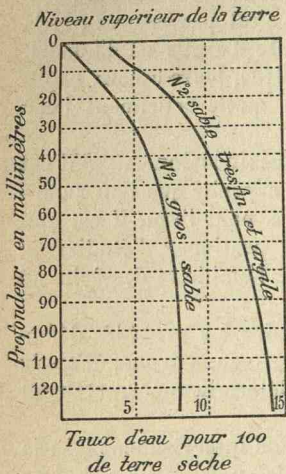


Fig. 1.

nant à l'origine 15,9 pour 100 d'eau, on remarque que la teneur en eau a varié de 5,3 à 4,25 pour 100 depuis le fond du vase jusqu'à une distance de 4 centimètres environ au-dessous de la surface. La courbe, presque parallèle à l'axe des ordonnées, montre que la dessiccation s'est produite dans cette région d'une façon presque identique pour toutes les couches, et que le mouvement de l'eau s'y est effectué facilement. Dans le cas du sable très fin (courbe n° 2) contenant à l'état initial 15,1 pour 100 d'eau, la courbe est beaucoup plus inclinée que la précédente. Au fond du vase, le taux de

Après 27 jours d'expérience, on trouve que les pertes d'eau ont été en décroissant, du sable grossier au sable le plus fin. On en conclut déjà que la finesse des éléments est un obstacle au transport de l'eau, de la profondeur vers la surface. La répartition de l'eau suivant les diverses couches est figurée, dans le diagramme ci-joint (en ne tenant compte que des premier et troisième échantillons).

Dans le cas du sable grossier (courbe n° 1), conte-

l'humidité est encore très voisin du taux initial, la finesse des éléments a donc été un obstacle au mouvement de l'eau, et ce sable s'est mal desséché.

Examinons maintenant ce qui se passe dans la région supérieure des vases. Lorsqu'on se rapproche de la surface, le taux de l'humidité s'abaisse beaucoup, mais dans des proportions différentes, suivant la grosseur des grains sableux, et la dessiccation se ralentit par le fait même de cet abaissement.

Il est d'observation courante de constater à la surface de la terre l'existence d'une *croûte* peu perméable qui protège les couches sous-jacentes contre l'évaporation. L'existence de cette croûte est subordonnée aux conditions suivantes. Lorsque l'eau monte facilement des couches inférieures vers la surface, celle-ci demeure humide parce que l'eau qu'elle perd est remplacée au fur et à mesure par celle qui vient de la profondeur. Mais si cette ascension de l'eau se ralentit, l'évaporation l'emporte; la surface se dessèche et l'eau ne la traverse plus que très lentement. Cette croûte protège donc les parties sous-jacentes contre une dessiccation excessive.

Lorsque l'air est à une température élevée et qu'il se renouvelle constamment par suite de l'action d'un vent continu, la croûte se formera alors même que le taux de l'humidité dans l'épaisseur de la terre sera encore élevé. Si, au contraire, l'atmosphère est humide et tranquille, la croûte ne se formera pas, même si la terre est peu riche en eau.

Étant donné l'état particulier que présente la terre arable, même lorsqu'elle n'a pas été travaillée, la surface de cette terre est incomparablement plus grande qu'une égale surface d'eau, et cette surface, ouverte à l'atmosphère, croîtra en raison des façons aratoires qui lui seront données. L'ameublissement facilite la perte d'eau par évaporation; mais, ainsi que nous

l'avons dit plus haut, cet ameublissement ayant pour but de détruire les canaux capillaires, s'oppose à la montée vers la surface de l'eau contenue dans les parties profondes.

Ajoutons que, d'après Schlœsing, si l'on prend plusieurs échantillons d'une même terre, additionnés de quantités d'eau croissantes, et qu'on les dispose dans des vases analogues à ceux que nous avons utilisés précédemment, on trouve que, pour un même intervalle de temps, les quantités d'eau évaporées seront d'autant plus considérables que la terre sera plus humide. La terre perdra des quantités d'eau proportionnelles au temps, jusqu'à ce que son humidité moyenne tombe à 15 pour 100. La dessiccation se ralentira beaucoup par la suite.

Quelles conséquences, au point de vue de la végétation, doit-on tirer de ce mouvement de l'eau suivant qu'il aura lieu dans telle ou telle terre dont la dimension des grains sera variable? Il semble qu'une terre à éléments grossiers, perdant plus rapidement l'eau qui l'imbibe qu'une terre à éléments fins, fournira de l'eau aux végétaux qu'elle porte pendant un temps plus court que dans le cas d'une terre à éléments fins. Or, nous savons que l'eau circule plus aisément dans la première terre que dans la seconde : c'est donc la première qui alimentera le mieux les végétaux. Dans une expérience déjà ancienne, Sachs a montré qu'un pied de tabac, planté en sol argileux, se fane dès que la teneur en eau s'abaisse au-dessous de 8 pour 100; dans un sable à gros grains, cette même plante ne se fane que lorsque le taux de l'eau est inférieur à 1,5 pour 100.

**Échauffement du sol.** — L'échauffement du sol sous l'influence des rayons solaires, et son refroidissement pendant la nuit, dépendent étroitement de la chaleur spécifique de la terre. Or, si l'on suppose que les éléments



dont se compose la terre sont absolument secs, leur chaleur spécifique serait d'importance secondaire. En effet, ces éléments sont toujours plus ou moins humides : d'où augmentation de la chaleur spécifique.

Un sol, quelle qu'en soit la nature, renfermant une forte dose d'eau, exigera pour s'échauffer une quantité de chaleur beaucoup plus grande que si ce sol était sec.

La chaleur spécifique des éléments du sol est faible, ainsi qu'il résulte de l'inspection des chiffres suivants :

Sable = 0.196;	Calcaire = 0.214;
Argile = 0.233;	Humus = 0.477.

En rapportant la chaleur spécifique, non plus à l'unité de poids, mais à l'unité de volume (en multipliant les chiffres ci-dessus par les poids spécifiques correspondants des mêmes éléments, lesquels varient en raison inverse des chaleurs spécifiques), on obtient des valeurs assez voisines les unes des autres :

Sable = 0.490;	Calcaire = 0.556;
Argile = 0.549;	Humus = 0.586.

Il en résulte, ces quatre éléments étant supposés secs, qu'il faut à peu près la même quantité de chaleur pour échauffer de 1 degré une couche d'égale épaisseur.

Mais, d'après Mitscherlich, si on fait entrer en ligne de compte l'air interposé entre les éléments, c'est-à-dire si l'on se place en réalité dans les conditions naturelles, la chaleur spécifique, rapportée à l'unité de volume, est fortement modifiée. Si, par exemple, on admet que du sable sec, occupant le volume apparent de 1 litre, renferme 41,5 pour cent d'air (donc 58,5 de sable) sa chaleur spécifique rapportée à l'unité de volume deviendrait égale à 0,286; celle de l'humus (avec 75,4 pour cent d'air et 24,6 de matière) serait égale à 0,144.

Si l'on tient compte non seulement de l'air, mais aussi de l'eau renfermée dans la masse, les chiffres obtenus sont très différents des précédents. On peut dire, de façon générale, que la chaleur spécifique d'une terre se rapproche d'autant plus de l'unité qu'elle est plus riche en eau.

**Conductibilité du sol.** — La conductibilité d'un sol pour la chaleur est faible ; elle dépend de la grosseur de ses grains, de leur structure, de leur teneur en eau. La conductibilité d'une masse de matière pulvérisée s'accroît en raison du degré de compacité de cette masse. Une terre bien ameublie, riche en espaces lacunaires, emmagasine plus de chaleur que la même terre non travaillée ou comprimée. Dans le premier cas, en effet, les éléments sont séparés les uns des autres par une couche d'air conduisant mal la chaleur. Si, par le tassement, on diminue le volume de l'air et que l'on rapproche ainsi les particules terreuses, on rend celles-ci plus conductrices de la chaleur.

La teneur en eau d'une terre influe beaucoup sur sa conductibilité. Même faiblement humide, la terre conduit mieux que lorsqu'elle est sèche. En effet, l'eau remplace dans le premier cas un égal volume d'air ; or l'eau, assez mauvaise conductrice de la chaleur, est cependant meilleure conductrice que l'air.

**Variations normales de la température du sol.** — Le sol s'échauffe à peu près exclusivement par l'action solaire ; car si les fermentations nombreuses qui se passent dans sa masse dégagent de la chaleur, la production de cette chaleur est, en général, assez lente et se dissipe par rayonnement. Ce n'est que lorsqu'il s'agit de surfaces restreintes qu'une élévation notable de température peut être appréciable : c'est ce que l'on observe dans le cas de couches de fumier entassées dans un coffre de bois protégé par un châssis vitré.

Le soleil chauffe d'abord la surface du sol; la chaleur gagne peu à peu les couches profondes par conductibilité. Plus longue sera la durée de l'échauffement et plus profondément pénétrera l'action calorifique. Inversement, pendant la nuit, la surface du sol perd de la chaleur par rayonnement, et un retour inverse de chaleur a lieu des régions profondes vers la surface.

A partir d'une certaine profondeur, variable avec la conductibilité du sol considéré, la température est à peu près constante pendant le cours de l'année.

La quantité de chaleur que retient la terre dépend de sa conductibilité, de son degré d'humidité, de sa couleur. Elle varie également avec l'intensité de l'action solaire, c'est-à-dire avec la durée du jour et avec l'inclinaison des rayons sur la surface. D'après Wollny, de tous les constituants du sol, c'est le quartz qui s'échauffe le plus; viennent ensuite le calcaire, l'argile et l'humus. On observe des relations inverses lorsque la température s'abaisse: c'est le quartz qui se refroidit le plus vite et l'humus le plus lentement. En effet, les éléments du sol diffèrent entre eux quant à leur capacité calorifique, leur conductibilité, et la façon dont ils perdent de la chaleur par émission.

La capacité calorifique du sable est moindre que celle de l'argile qui retient beaucoup d'eau: aussi le sable s'échauffe-t-il plus vite que l'argile; il conduit également mieux la chaleur. Les sols siliceux sont souvent qualifiés de *sols chauds*. Mais, pendant la nuit, ou pendant la saison froide, la température du sable s'abaisse davantage que celle de l'argile, le sable conduisant mieux la chaleur et possédant une capacité calorifique moindre que celle de l'argile. L'humus, avec sa faible conductibilité et son pouvoir absorbant considérable vis-à-vis de l'eau, s'échauffe pendant le jour plus



lentement que les autres éléments du sol; pendant la nuit il se refroidit plus lentement.

D'après Flammarion, les variations de la température du sol, prise à différentes profondeurs, suivent celles de l'air. Pendant les mois de décembre, janvier et février, la température croît avec la profondeur; l'inverse a lieu pendant les mois de mai, juin, juillet. A 13 mètres de profondeur, la température est à peu près constante pendant toute l'année (environ 11 degrés).

L'étude de la constitution physique des sols nous a montré le rôle respectif des quatre éléments fondamentaux que l'on rencontre dans les terres arables et la façon dont ces éléments se comportent les uns vis-à-vis des autres. Nous avons vu que ces éléments n'étaient pas en état d'indépendance, mais qu'ils réagissaient au contraire les uns sur les autres. L'examen sommaire des propriétés physiques des sols, en appelant notre attention sur l'importance des mouvements de l'eau et de l'air au sein de la masse terreuse, nous a fait voir de quels facteurs dépendaient la perméabilité ou la compacité d'une terre. Chaque élément de celle-ci possède donc sa caractéristique spéciale : aussi convient-il de connaître quels sont les procédés susceptibles de nous renseigner sur le poids relatif de chacun d'eux. Tel est l'objet du chapitre suivant, consacré à l'étude de l'*analyse physique* de la terre.

## CHAPITRE V

### ANALYSE MÉCANIQUE ET PHYSIQUE DE LA TERRE ARABLE

Cette analyse a pour but d'estimer les poids de sable, d'argile, de calcaire et d'humus contenus dans un échantillon de terre donné.

La connaissance des *dimensions respectives* de certains de ces éléments présente, en outre, une grande importance.

En effet, au point de vue physique, de ces dimensions doit dépendre la facilité plus ou moins grande avec laquelle l'eau et les gaz circuleront dans le sol. Si donc l'analyse physique nous renseigne sur la *quantité* de ses constituants, l'analyse *mécanique* nous permettra de classer ces derniers par ordre de grandeur.

Il nous est impossible ici de discuter la valeur des très nombreux procédés dont on a préconisé l'emploi pour atteindre ce double but. Nous nous bornerons à signaler sommairement ceux d'entre ces procédés qui sont capables, quand on interprète convenablement les chiffres qu'ils fournissent, de nous indiquer quelle est la *nature* de la terre soumise à notre examen, quel est son degré de perméabilité et quelle sera la conduite à tenir lorsqu'il s'agira d'en modifier la composition en vue de lui permettre de porter telle culture déterminée.

Qu'il soit question d'une analyse physique — aussi bien d'ailleurs que d'une analyse chimique de la terre — la première opération qui s'impose est celle d'une bonne prise d'échantillon, lequel devra représenter,

aussi fidèlement que possible, la composition de la terre en question.

**Prise d'échantillon.** — En s'adressant à une époque de l'année où le sol est couvert de végétation, on peut se rendre compte assez facilement de l'homogénéité d'une terre d'après l'aspect des récoltes qu'elle porte.

Si les plantes ont à peu près la même hauteur, si leur coloration est uniformément verte, le sol doit être considéré comme homogène dans sa composition.

Lorsque la végétation fait défaut, on examinera d'abord la couleur du sol, et l'on verra si cette couleur est partout la même. On pourra également, si la terre est humide, en prendre sur plusieurs points quelques poignées et se rendre compte, au toucher, de la plasticité de la masse. Dans le cas où l'on suppose que l'homogénéité n'est pas parfaite, on devra prélever des échantillons qui correspondront autant que possible à des portions de terrains sensiblement homogènes ; on débarrasse ensuite la surface du sol des plantes ou de leurs débris, on éloigne les cailloux volumineux, et on pratique avec une bêche une tranchée verticale que l'on doit pousser *jusqu'au sous-sol*, c'est-à-dire jusqu'à cette région où la couleur de la terre est généralement moins foncée. On pourra parfois rencontrer une roche dure, impénétrable au fer de l'instrument. On enlèvera ensuite la terre, sur la hauteur de cette tranchée, suivant un prisme qui aura la largeur du fer de la bêche, et on jettera cette terre dans une brouette.

La même opération sera poursuivie dans les autres points du champ.

Il sera bon, très souvent, de procéder de même avec le sous-sol sur une hauteur de deux ou trois décimètres.

Le contenu de la brouette sera versé sur une aire plane ; on mélangera intimement toutes les parties de la



masse en mettant à part les pierres les plus faciles à recueillir dont on estimera grossièrement le poids afin de le comparer à celui de l'échantillon total. Cela fait, on prendra deux ou trois kilogs de matière que l'on abandonnera à l'air en couche peu épaisse afin qu'elle se dessèche.

Si l'on a affaire à une terre franche, meuble, celle-ci s'émiettera facilement sous la pression des doigts quand elle sera sèche; il en est de même d'une terre sableuse. Mais si la terre est forte, c'est-à-dire argileuse, elle durcit par la dessiccation, et il est difficile de l'émietter. On devra alors écraser les mottes avec un maillet de bois ou bien les soumettre à l'action d'un rouleau, sans toutefois briser les cailloux. Schlœsing a conseillé, dans le cas de terres argileuses — et même dans le cas de toutes les terres — de procéder de la façon suivante en vue de préparer des échantillons très homogènes. On délaie 1 kilogramme, par exemple, de matière dans l'eau de façon à obtenir une bouillie semi-fluide. On verse cette bouillie sur un tamis dont nous indiquerons bientôt la grandeur de mailles, le tamis étant disposé au-dessus d'une terrine. On fait ensuite couler un filet d'eau ordinaire sur la terre en malaxant bien la masse. On arrive ainsi à entraîner toutes les parties fines tandis que le tamis retient les cailloux et graviers. Au bout de 24 heures on décante le liquide clair qui surmonte le dépôt terreux et on introduit celui-ci dans une capsule que l'on chauffe au bain-marie. On rendra ultérieurement la masse bien homogène par pétrissage à la main. Les cailloux et les graviers demeurés sur le tamis seront desséchés et pesés. Par une convention, qui se justifie d'ailleurs, on fait usage d'un tamis en toile de laiton à 10 fils par centimètre; l'écartement entre chaque fil est, par conséquent, un peu inférieur à 1 millimètre.

La terre qui a passé au travers d'un pareil tamis est qualifiée *terre fine*.

C'est sur cette terre que devront porter les analyses physique et chimique.

Il est indispensable de prendre le rapport entre le poids de la terre tamisée, puis desséchée, et le poids des éléments grossiers qui sont restés sur le tamis.

**Procédés de l'analyse mécanique.** — Nous avons déjà dit que le but de cette analyse consistait essentiellement à classer les éléments du sol par ordre de grosseur. Elle comporte deux façons d'opérer.

1° *Par sédimentation.* — Le principe de cette méthode est le suivant. On laisse tomber au sein d'une masse d'eau un poids déterminé de terre fine : les éléments les plus gros tombent les premiers au fond du vase, puis ceux de dimensions moindres, etc. Si, à l'aide d'un dispositif quelconque, on recueille au bout de temps déterminés les dépôts successifs, on pourra définir une terre d'après les poids respectifs de ses éléments ainsi classés par ordre de grosseur.

Nous donnons ici, à titre de renseignement, les dénominations adoptées par Kopecky pour classer les éléments sableux :

Graviers ou cailloux. . . . .	diamètre > 2 millimètres.
Sable grossier . . . . .	compris entre 1 et 2 millimètres.
Sable demi-fin . . . . .	— 1 et 0,5.
Sable fin . . . . .	— 0,5 et 0,3.
Sable très fin. . . . .	— 0,3 et 0,1.
Poussière sableuse . . . . .	— 0,1 et 0,05.
Poussière. . . . .	— 0,05 et 0,01.
Particules très fines. . . . .	inférieures à 0,01.

2° *Par déplacement.* — Voici le principe de cette méthode. On dispose un certain poids de terre dans une allonge de diamètre connu et, par la partie inférieure de l'allonge, on fait pénétrer un courant d'eau de

vitesse déterminée. Il est évident que, suivant la vitesse de ce courant et la dimension des éléments de la terre, les plus fins de ceux-ci seront d'abord soulevés et s'écouleront par la partie supérieure de l'allonge, où, à l'aide d'un dispositif convenable, on pourra les recueillir. Les éléments les plus lourds demeureront, au contraire, au fond de l'allonge.

Sur ce principe sont fondés un grand nombre d'appareils. Mais il convient de remarquer qu'un classement parfait des éléments, ainsi soulevés automatiquement, n'est possible que dans les cas, purement théoriques, où tous les éléments seraient sphériques et auraient même poids spécifique. Aussi peut-on constater que ces méthodes par déplacement fournissent pratiquement, pour une vitesse déterminée du courant d'eau, des particules d'inégales grosseurs. Nous ne nous étendrons pas davantage sur ce mode opératoire.

L'analyse mécanique doit toujours être suivie d'une analyse *minéralogique* dont le but est de définir la nature des grains sableux de différentes grosseurs que cette analyse mécanique a séparés. Les opérations principales auxquelles on soumettra les grains sableux consisteront à déterminer leur poids spécifique, à mesurer les angles des cristaux (lorsque cette mesure sera praticable), à mesurer leur indice de réfraction et à en faire l'examen microscopique en lumière ordinaire et en lumière polarisée.

**Procédés de l'analyse physique.** — Les méthodes de l'analyse mécanique, intéressantes en ce qui concerne le classement des éléments de la terre par ordre de grosseur, ne nous renseignent que d'une manière incomplète sur sa structure physique puisqu'elles nous laissent dans l'ignorance relativement aux proportions d'argile et de calcaire que renferme cette terre. Or,



nous avons vu quelle importance très grande possédaient ces deux éléments dans la constitution particulière de la terre en général.

L'analyse physique va nous éclairer sur ce point spécial.

Nous décrirons sommairement le procédé employé par Schœsing. Ce procédé ne donne certainement pas entière satisfaction quant à la détermination exacte du poids des quatre constituants des sols arables, mais il possède l'avantage d'être d'une exécution facile et de fournir des indications de réelle valeur.

On prend 10 grammes de terre fine que l'on met dans une capsule de porcelaine de 10 centimètres environ de diamètre et sur laquelle on verse 20 centimètres cubes d'eau distillée. On fait pénétrer le liquide dans toutes les parties de la masse en la frottant avec l'index. S'il y a de l'argile dans l'échantillon ainsi traité, le liquide se trouble bientôt. On cesse l'agitation et on abandonne au repos pendant 10 secondes (par convention). Au bout de ce temps, on décante avec précaution cette liqueur trouble dans un grand vase de verre, sans entraîner le dépôt, assez dense, qui se trouve dans la capsule.

On renouvelle cette opération autant de fois qu'il est nécessaire, et l'on ne s'arrête que lorsque l'eau qui surmonte le dépôt est parfaitement claire : preuve que l'argile colloïdale contenue dans l'échantillon a été complètement éloignée. Le nombre de ces opérations dépend avant tout de la quantité d'argile présente.

Le liquide trouble contient l'argile colloïdale, le sable fin (demeuré en suspension), le calcaire, sous la forme de grains très ténus, et l'humus que le frottement de l'index a détaché (en partie au moins) des particules sableuses auxquelles il adhérerait. Quant au contenu de la capsule, il consiste en sable dit *grossier*. On sèche

celui-ci et on le pèse. Il est bon ensuite de s'assurer de la présence, ou non, du calcaire dans ce sable grossier en l'additionnant de quelques gouttes d'acide chlorhydrique.

Le liquide trouble (dont le volume est variable suivant le nombre des décantations effectuées) est additionné d'acide nitrique jusqu'à réaction nettement acide. Le calcaire fin se dissout et, comme conséquence de la formation du nitrate de calcium, la liqueur s'éclaircit par suite de la coagulation de l'argile. Remarquons que, même en l'absence de calcaire, la liqueur s'éclaircirait pareillement ; l'acide nitrique étant un électrolyte qui coagulera l'argile.

Après un certain temps, on décante sur filtre le liquide éclairci, on y fait ensuite tomber le précipité qui comprend *l'argile coagulée, le sable fin, et l'humus*. On lave ce précipité à l'eau distillée jusqu'à ce que le liquide de lavage devienne trouble en s'écoulant par la douille de l'entonnoir. A ce moment, l'argile rentre légèrement en suspension : ce qui prouve que le précipité est bien exempt de sels calcaires et d'acide.

Dans la liqueur limpide on dose la chaux par les procédés usuels.

Le filtre étant étalé ensuite sur une lame de verre, on fait tomber, à l'aide du jet d'une pissette, son contenu dans un vase de verre. La liqueur est trouble ; on favorise la suspension de l'argile en agitant le vase et en y versant un peu d'ammoniaque qui favorise la suspension de l'argile et dissout l'humus.

Après une attente de 24 heures, on admet que le sable fin s'est déposé seul. Cependant il faut remarquer que ce n'est là qu'une convention, car son dépôt *complet* demanderait un temps beaucoup plus long, incompatible avec les exigences d'une analyse courante.

On décante le liquide trouble par siphonnement. On

verse de l'eau distillée et quelques gouttes d'ammoniaque sur le dépôt ; on agite, on abandonne encore au repos pendant 24 heures et on décante de nouveau. Le sable fin est recueilli, séché et pesé.

On réunit les liquides troubles provenant des décantations, lesquels renferment l'argile en suspension et l'humus dissous à la faveur de l'ammoniaque, et on les additionne d'une solution de chlorure d'ammonium. L'argile se coagule. Lorsque les flocons sont réunis au fond du vase, on décante la partie claire sur filtre taré, sur lequel on fait ensuite tomber l'argile. On lave le filtre à l'eau distillée, on le sèche à 100° et on le pèse. Enfin on précipite l'humus de sa solution alcaline par addition d'un acide. On recueille les flocons bruns sur filtre taré, on sèche à 100° et on pèse. Notons que le poids de l'humus ainsi obtenu est toujours inférieur au poids véritable de cette matière contenue dans la terre examinée. En effet, ainsi que nous l'avons dit antérieurement, l'humus adhère avec une grande force aux grains sableux. Le meilleur mode d'estimation de la matière organique consiste à pratiquer une analyse élémentaire sur un échantillon de terre primitive, comme on opère pour un composé carboné quelconque. Nous reviendrons plus tard sur ce point spécial.

L'analyse physique nous renseigne donc sur les quantités de sable grossier, de sable fin, de calcaire et d'argile que renferme une terre. Il s'agit maintenant d'*interpréter* les chiffres obtenus, c'est-à-dire de savoir si la terre examinée est légère ou compacte, si elle peut être cultivée telle quelle, ou bien s'il faut lui fournir des amendements destinés à augmenter ou à diminuer sa perméabilité.

**Interprétation de l'analyse physique d'une terre.**  
— Pour faire une interprétation rationnelle, il faut comparer les chiffres que fournit telle analyse de terre



avec ceux que donne une terre type, douée de qualités que l'observation seule permet de reconnaître. Or, le type le plus parfait d'une terre arable — et tous les expérimentateurs sont d'accord sur ce point — est représenté par la terre dite *terre franche*.

Celle-ci, en effet, au point de vue de ses qualités physiques, est perméable à l'eau et aux gaz de l'atmosphère, elle se laisse aisément travailler ; elle ne se présente pas en masses compactes soit à la suite de la sécheresse, soit, au contraire, à la suite de pluies prolongées. L'eau ne la délaie pas, la gelée ne la soulève pas ; elle n'est pas enlevée par le vent et ne présente pas de crevasses à sa surface lorsque survient la sécheresse.

Or, la moyenne d'un grand nombre d'analyses de terres franches fournit les chiffres suivants, pour 1000 parties de terre fine définie comme précédemment :

Sable grossier : 600 à 700 parties ; sable fin : 200 à 300 parties ; argile : 60 à 100 parties ; calcaire (réparti à peu près également entre le sable grossier et le sable fin) : 50 à 150 parties.

Chaque élément joue ici un rôle bien déterminé. Le *sable grossier* est un élément de division et de perméabilité. Il figure pour une forte proportion dans le tableau qui précède. Les racines, en effet, exigent la présence de fragments suffisamment volumineux laissant entre eux des espaces qui leur permettent de cheminer avec facilité, espaces au sein desquels l'air peut aisément circuler. Si la dose de sable grossier atteint 800, on est en présence de terres dites *légères*, surtout lorsque la dose d'argile descend au-dessous de 100 : de pareilles terres retiennent mal l'eau.

L'influence du *sable fin* sur la structure du sol varie avec les proportions de l'argile. Dans le cas, assez rare

d'ailleurs, où l'argile n'existe qu'en très faibles quantités, ou même est absente, le sable fin, quand il est entraîné par les eaux de la pluie, s'insinue entre les grains du sable grossier et bouche les espaces libres qui assuraient la libre circulation des gaz. Les travaux du labourage pourront améliorer cet état de choses et rendre momentanément à la terre un degré convenable de perméabilité. Cependant, à la suite d'une nouvelle chute d'eau, cette terre retournera à son état primitif.

Mais si le sable fin est accompagné d'une dose suffisante d'argile, la division particulière subsistera : il suffit pour cela de 50 à 70 pour 1000 d'argile.

Lorsque le taux de cette argile s'élève à 150 et au-dessus, la terre devient très compacte, difficile à travailler. Elle se réunit en mottes volumineuses au sein desquelles les racines pénètrent avec beaucoup de peine. On est alors en présence de *terres fortes*.

Lorsque la dose de sable fin atteint 500, l'argile demeurant aux environs de 150, la terre devient *asphyxiante* et ne peut guère être travaillée avec profit.

Toutefois — et l'on ne saurait trop insister sur ce point important — il faut se souvenir que ce que nous avons appelé *argile* est une substance assez mal définie, comprenant en réalité deux éléments : du sable très fin dont le dépôt complet exigerait un temps extrêmement long, et de l'*argile colloïdale véritable*, dont les proportions sont généralement assez faibles.

Quoi qu'il en soit, les comparaisons tirées des chiffres du tableau ci-dessus sont susceptibles de fournir des renseignements intéressants dont on peut tirer bon parti quand il s'agit de l'emploi des engrais et des amendements.

## CHAPITRE VI

### CONSTITUTION CHIMIQUE GÉNÉRALE DE LA TERRE ARABLE ANALYSE CHIMIQUE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX

Après avoir examiné la structure physique des sols de laquelle dépendent étroitement les mouvements de l'air et de l'eau dans leur masse, il convient maintenant d'étudier la *constitution chimique* de la terre arable.

Cette étude doit être conduite de telle façon qu'elle nous éclaire sur les transformations que subissent les matières minérales pour être mises sous une forme assimilable par les végétaux.

**Dissolutions des sols.** — Une terre quelconque renferme toujours, au moins en petite quantité, des substances solubles dans l'eau ou qui deviendront solubles au bout d'un temps plus ou moins long. C'est là un fait qu'il est facile de mettre en évidence.

L'eau des rivières peut être considérée comme une eau qui a traversé des épaisseurs variables de terre ; cette eau renferme toujours des matières solides en dissolution. On démontre aisément la présence de substances solubles en disposant sur un entonnoir 1 ou 2 kilogs de bonne terre arable sur laquelle on verse de l'eau distillée. Si l'on évapore à sec le liquide écoulé, celui-ci laisse un résidu teinté de brun. Calciné, ce résidu noircit d'abord et se décolore ensuite sensiblement. Il existe donc, dans les eaux de lavage de la terre arable, une petite quantité de matière organique que



l'action de la chaleur détruit. De plus, ces eaux renferment des substances fixes dans lesquelles l'analyse révèle la présence de certaines bases : chaux, magnésie, et de certains acides : sulfurique, chlorhydrique, nitrique, silicique, pour ne parler que des corps les plus faciles à caractériser. On rencontre aussi presque toujours des traces de potasse et d'acide phosphorique.

Or, toutes ces substances se trouvent dans les cendres des plantes vis-à-vis desquelles elles jouent un rôle physiologique capital.

On objectera à cette façon d'opérer que les dissolutions ainsi obtenues sont forcément beaucoup plus diluées que les véritables dissolutions telles qu'elles doivent se rencontrer dans le sol. En effet, nous avons vu que, lorsque la terre est ressuyée, c'est-à-dire lorsque les espaces interstitiels sont vides, l'eau n'entoure chaque élément que d'une simple pellicule liquide.

Il y a donc avantage à connaître le *véritable degré de concentration saline* tel qu'il existe dans cette eau répartie à la surface des grains terreux. Schlœsing est parvenu à *déplacer*, sans les dénaturer, ce que l'on pourrait appeler les *dissolutions normales du sol* en faisant usage d'eau distillée et en procédant ainsi.

Si l'on humecte 1 kilog de sable placé dans un long tube avec une solution de sel marin de titre connu, et si on verse de l'eau distillée dans le tube, l'expérience montre que les trois quarts au moins du liquide qui s'écoule conservent le même titre en sel marin que celui que possédait la solution initiale. L'eau distillée a donc *déplacé* en grande partie le liquide salin sans en altérer la composition.

En opérant de même sur la terre arable, mais dans un appareil plus vaste, avec des poids de matière plus considérables, et en employant un dispositif qui permet de répartir sur chaque unité de surface exactement la

même quantité d'eau, on arrive à déplacer une liqueur qui conserve un titre salin constant.

Cependant, il n'est plus possible, comme dans le cas du sable, de recueillir, sans changement de concentration, les trois quarts de la dissolution, mais seulement le tiers ou le quart suivant la hauteur de la terre et l'abondance de la dissolution.

Voici, d'après Schlœsing, les chiffres qu'ont fournis un certain nombre de terres traitées par ce procédé (poids en milligrammes des substances contenues dans 1 litre de dissolution) :

	Terre argilo-calcaire de Boulogne		Terre argilo-calcaire d'Issy.		Cinq terres argilo-siliceuses de Neauphle-le-Château (Seine-et-Oise).
	Sans engrais depuis dix ans et cultivée en tabac.	Fortement fumée et ayant reçu des engrais de potasse.			
			I	II	
CO <sup>2</sup> . . . . .	117	199	480	1438	138 à 200
NO <sup>5</sup> H . . . . .	305	332	154	231	15 à 600
Cl. . . . .	7	6	6	4	12 à 46
SO <sup>4</sup> H <sup>2</sup> . . . . .	58	75	50	50	22 à 50
P <sup>2</sup> O <sup>5</sup> et fer. . . . .	0.8	2.8	0	0	0.5 à 1.5
SiO <sup>2</sup> . . . . .	29	32	26	34	23 à 48
NH <sup>5</sup> . . . . .	traces	traces	traces	traces	0 à 0.8
CaO. . . . .	264	227	301	694	130 à 311
MgO. . . . .	13	20	21	47	15 à 33
K <sup>2</sup> O. . . . .	7	157	3	46	0 à 5
Na <sup>2</sup> O . . . . .	8.8	14	27	38	18 à 42
Matière organique. . . . .	37	90	64	87	24 à 50

On voit, en examinant ces chiffres, que l'on peut classer en trois catégories les substances qui font partie des dissolutions normales des sols : 1° substances rela-

tivement abondantes telles que  $\text{CO}^2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{NO}^5\text{H}$ ,  $\text{Na}^2\text{O}$ ,  $\text{SO}^5$ ,  $\text{Cl}$ ; 2° substances ne se rencontrant qu'en quantités assez faibles, telles que  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}^2\text{O}$ ; 3° substances ne se rencontrant qu'à l'état de traces, telles que  $\text{P}^2\text{O}^5$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{NH}^5$ .

Si donc il existe des substances qui se déplacent facilement sous l'action de l'eau distillée, il en est d'autres, au contraire, qui demeurent solidement fixées sur les particules terreuses, soit par le fait de leur propre insolubilité, soit par suite de quelque combinaison particulière. Nous verrons ultérieurement quelle est la nature spéciale de ce pouvoir fixateur.

Une autre remarque importante doit être faite. Ces dissolutions sont très étendues et, semble-t-il, incapables de subvenir aux besoins des végétaux. Cependant ces dissolutions se reforment au fur et à mesure de leur absorption. Il est très probable néanmoins que les racines des plantes sont capables de saisir, par contact direct avec les éléments rocheux, les matières minérales qu'elles réclament.

**Phénomènes chimiques qui provoquent la formation des dissolutions normales des sols.** — Si l'on admet que la plante n'utilise que des substances *dissoutes*, cherchons quel est le mécanisme de cette dissolution dans le cas de quelques-uns des éléments minéraux indispensables à la vie végétale.

I. **Acide phosphorique.** — Cet acide se rencontre, ainsi que nous le savons, sous la forme de phosphates de chaux, de magnésie, de fer, d'alumine; le phosphate tricalcique est généralement le plus abondant de ces phosphates. Il est très peu soluble dans l'eau pure (0 gr. 00074 par litre), plus soluble dans l'eau chargée de gaz carbonique à la pression ordinaire (0 gr. 153). Cependant, il ne paraît pas que, dans les sols nor-



maux, l'influence dissolvante du gaz carbonique ait quelque importance.

En effet, d'après Schlœsing, ce gaz n'augmente pas la solubilité du phosphate tricalcique lorsqu'il est associé à la quantité de bicarbonate calcique qui répond à sa tension : c'est ce qui a lieu dans les sols tant soit peu calcaires. D'autre part, la présence de certains sels accroît légèrement la solubilité de ce phosphate : sel marin, nitrate de sodium, par exemple, employés comme engrais directement ou bien se trouvant mélangés à des substances fertilisantes.

L'acide phosphorique, indispensable à l'évolution végétale, se rencontre donc sous des concentrations tellement faibles qu'il doit exister quelque autre cause de solubilisation susceptible d'approvisionner la plante.

Or, Schlœsing fils a montré, par des expériences synthétiques, que les doses très faibles d'acide phosphorique que contient le sol sont en mesure de pourvoir aux exigences des végétaux. Lorsque cet acide est absorbé, quelle que soit la dilution de sa solution, une nouvelle quantité entre en dissolution. L'auteur précité, en faisant usage, pour l'extraction des dissolutions du sol, du procédé indiqué plus haut (page 74) a mis en évidence ce fait remarquable : dans une même terre, considérée à une même époque, le titre de la solution d'acide phosphorique, c'est-à-dire la quantité de cet acide contenu dans un litre de liqueur, est *presque constant* et indépendant de la teneur en eau du sol. On en peut conclure que la quantité d'acide phosphorique dissoute dans un sol résulte d'un équilibre entre des réactions chimiques très complexes, mais qui sont telles que, lorsque la proportion de cet acide tend à diminuer par suite de l'absorption végétale, le titre primitif (qui peut d'ailleurs varier beaucoup d'une terre à une autre) tend à se rétablir.

De façon inverse, lorsque la solution se concentre par suite de l'abaissement du taux de l'humidité de la terre, une certaine quantité d'acide phosphorique redevient insoluble. Schlœsing fils regarde ce taux constant d'acide dans la dissolution qui imprègne une terre donnée comme une *caractéristique* de cette terre. Tel paraît être le mécanisme de l'absorption des solutions phosphatées et celui de leur régénération.

Toutefois — et ainsi que nous l'avons déjà signalé — ce mode d'alimentation aux dépens de solutions phosphatées n'exclut pas la possibilité pour la plante de dissoudre directement les phosphates insolubles sur lesquels viennent s'appliquer les poils radiculaires.

D'après Pouget et Chouchak, il existerait dans le sol deux formes différentes d'acide phosphorique. L'une dans laquelle cet acide se trouverait en combinaison avec la matière organique (*humophosphates*), beaucoup plus soluble que la seconde forme, représentée par les phosphates minéraux. Lorsqu'on épuise une terre par l'eau, c'est la première forme qui se dissout d'abord et qui possède une influence prépondérante sur les débuts de la végétation. L'action de la seconde forme, beaucoup moins soluble, porte sur l'élaboration de la récolte finale.

Il convient d'ajouter que certains microorganismes, générateurs d'acides (butyrique, lactique) dissolvent les phosphates minéraux. Les composés phosphoorganiques que contient presque toujours le sol seraient de *véritables phosphatides*, issus de la vie microbienne (Stoklasa).

II. *Acide sulfurique*. — A l'inverse de l'acide phosphorique, cet élément est très mobile dans le sol. Celui-ci renferme presque toujours du sulfate de calcium très peu soluble dans l'eau (1/400 environ), mais facilement entraîné dans les eaux de drainage. De plus, beaucoup

de sels employés comme engrais dissolvent des quantités de sulfate de calcium plus grandes que celles que pourrait dissoudre l'eau seule. La mobilité de l'acide sulfurique apparaît dans ce fait que, lorsqu'on répand sur la terre arable du sulfate d'ammonium ou du sulfate de potassium, par suite de phénomènes de double décomposition l'ammoniaque est fixée en totalité et la potasse en majeure partie, alors que l'acide sulfurique passe dans les eaux de drainage à l'état de sulfate de calcium.

III. *Potasse*. — Cette base, ainsi qu'il ressort des chiffres du tableau de la page 75, ne se rencontre qu'en faibles quantités dans les dissolutions du sol obtenues par déplacement. Comme la potasse existe dans la plupart des roches primitives en proportions souvent élevées, on en conclut que la forme qu'elle revêt dans le sol est une forme très peu soluble.

Cependant, on connaît de nombreux végétaux qui, même dans les sols n'ayant jamais reçu d'engrais potassiques solubles, extraient de fortes doses de potasse. Schlœsing fils a montré que ces solutions naturelles, très pauvres, lorsqu'elles sont absorbées par les plantes, se renouvellent constamment, et que les plantes sont capables d'enlever l'alcali dissous dans une masse d'eau considérable. Nous retrouvons donc ici les mêmes phénomènes que ceux que nous avons étudiés à propos de l'acide phosphorique. On a également avancé qu'il y avait une relation entre la vitesse avec laquelle certains minéraux s'effritent et se kaolinisent, et l'aptitude qu'ils possèdent à céder leur potasse aux végétaux (Ssamojlov).

Parmi les phénomènes de double décomposition qui intéressent les sels de potassium dans le sol, il faut citer celui qui concerne les changements qu'éprouve le nitrate de sodium employé comme engrais. La plante absorbe l'acide nitrique, mais les bases auxquelles cet



acide est alors combiné sont la potasse et la chaux : les eaux de lavage du sol (eaux de drainage) contiennent d'autant plus de sodium que l'on a fait usage d'une plus grande quantité de nitrate de sodium. On constate donc ici l'intervention bien nette d'un phénomène de double décomposition. D'ailleurs, la plupart des plantes ne renferment que très peu de soude. Si on incorpore du nitrate de potassium à un sol dépourvu de végétation et qu'on examine les eaux de lavage de ce sol au bout d'un certain temps, on y rencontre peu de nitrate de potassium, mais surtout du nitrate de sodium, accompagné de nitrate de calcium.

La terre arable est donc susceptible de fixer la potasse, propriété remarquable sur laquelle nous reviendrons plus loin.

IV. **Chaux. Magnésie.** — Le gaz carbonique joue dans la solubilisation de ces bases un rôle très important. Le tableau de la page 75 nous montre que la chaux est relativement abondante dans les dissolutions du sol.

En effet, si le carbonate de calcium est très peu soluble dans l'eau pure (0 gr. 0131 par litre à 10°), il se dissout d'autant mieux que l'eau renferme une plus grande proportion de gaz carbonique. Schlœsing a donné, de cette solubilité, les chiffres suivants :

Pression de CO <sup>2</sup> en centimètres de mercure.	CO <sup>2</sup> Ca dissous dans un litre d'eau.
0.05	0 gr. 0726
5.00	0 gr. 3600
72.90	0 gr. 9720

La solubilité du carbonate de calcium augmente en présence des sels ammoniacaux ; elle diminue au contact des sels alcalins.

Le carbonate de magnésium est notablement plus soluble dans l'eau pure que celui de calcium : 0 gr. 97 par litre ; cette solubilité est encore plus considérable

dans l'eau chargée de gaz carbonique. Sous la pression ordinaire, un litre d'eau chargée de ce gaz dissout 28 gr. 45 de carbonate de magnésium, à 13°.

On comprend donc pourquoi les liquides du sol sont relativement riches en carbonates de calcium et de magnésium puisque, ainsi que nous l'établirons plus tard, les gaz confinés dans la terre renferment toujours une dose de gaz carbonique très supérieure à celle que l'on trouve normalement dans l'air atmosphérique.

Les eaux pluviales qui ont traversé le sol arable s'enrichissent en bicarbonates alcalino-terreux : il suffit de les chauffer pour que ces bicarbonates se dissocient et abandonnent un dépôt de carbonate neutre.

Tels sont les phénomènes chimiques qui provoquent les dissolutions normales des substances utiles aux végétaux.

**Action de quelques réactifs sur les éléments minéraux utiles aux plantes.** — Bornons-nous à la recherche des formes assimilables de l'acide phosphorique et de la potasse.

1. *Acide phosphorique.* — Nous avons vu que cet élément revêt deux formes principales dans le sol : une forme *organique* complexe (humophosphates) et une forme *minérale*. Cette dernière se présente même sous les deux états de phosphates amorphes et phosphates cristallisés.

En mettant de côté la forme *organique*, souvent assez abondante, il s'agit de trouver un réactif artificiel capable, dans des conditions déterminées de concentration et de température, de dissoudre une proportion d'acide phosphorique aussi voisine que possible de celle que la plante emprunte d'elle-même à la terre arable. Les acides forts, employés à chaud, s'ils donnent des résultats intéressants au point de vue de la quan-

tité *totale*, ou à peu près, de l'acide phosphorique existant dans le sol, ne permettent pas d'atteindre le but envisagé. Aussi a-t-on eu, il y a déjà longtemps, recours à l'action de certains acides faibles. Deux tentatives méritent à cet égard d'être signalées.

Dyer (1894) a préconisé l'emploi de l'acide citrique à raison de 1 gramme par litre, en se basant sur les considérations suivantes. Le suc des racines est acide, avons-nous dit; et cette acidité paraît imputable à la présence de l'acide citrique. La moyenne du titre acide fourni par les racines d'un grand nombre de plantes est égale à 0,85 pour 100 d'après l'auteur précité, ce qui justifie l'emploi de cet acide à la concentration de 1 pour 100. Des essais qu'il a exécutés sur de nombreuses terres, Dyer tire la conclusion que, si on compare la quantité d'acide phosphorique extraite d'un échantillon donné par un acide fort (nitrique) agissant à chaud avec la quantité d'acide phosphorique extraite d'un échantillon de cette même terre par l'acide citrique à 1 pour 100, le sol considéré livrera aux plantes d'autant plus d'acide phosphorique que la fraction de cet acide dissoute par l'acide citrique sera plus grande. Il faut noter que Dehérain (1880) avait antérieurement préconisé dans le même but l'emploi de l'acide acétique.

Schlœsing fils a montré que l'usage des acides forts eux-mêmes, convenablement dilués, pouvait donner des renseignements intéressants quant à la nature des phosphates utilisables par les plantes. Le procédé, très simple, utilisé par cet auteur permet, en effet, de spécifier la nature des phosphates auxquels les plantes s'adressent de préférence.

On introduit un certain poids de terre (10 à 20 gr.) dans un litre d'eau contenant une quantité exactement connue d'acide nitrique et on agite mécaniquement le



mélange pendant 10 heures. On dose ensuite dans le liquide l'acide phosphorique dissous et, en même temps, on détermine le titre acide final lequel peut différer beaucoup du titre initial par suite de la présence du calcaire dans l'échantillon examiné. On remarque que, lorsque le titre de l'acide nitrique croît à partir de zéro, la quantité d'acide phosphorique qui s'est dissoute croît d'abord assez rapidement. Le titre de l'acide nitrique continuant à augmenter, la quantité d'acide phosphorique dissous demeure stationnaire, puis croît de nouveau. On traduit facilement ces observations en portant en abscisses le taux de l'acide nitrique et, en ordonnées, la quantité d'acide phosphorique dissous. La courbe, d'abord fortement inclinée sur l'axe des abscisses, lui devient ensuite parallèle et se relève finalement. Ce *palier* sépare donc nettement l'acide phosphorique en deux parties : l'une qui s'est dissoute dans des liqueurs d'acidité nitrique très faible (1 à 2 dix-millièmes), l'autre qui ne s'est dissoute que lorsque l'acidité nitrique atteint 1 millième.

Si, maintenant, on dose le fer qui s'est dissous concurremment dans ces liqueurs acides, on remarque l'absence presque complète de ce métal dans la portion qui correspond à la partie ascendante de la courbe. Le fer apparaît au voisinage du palier et se rencontre en doses sensibles dans la seconde partie ascendante de la courbe. On en conclut que les premières portions de l'acide phosphorique dissoutes dans les liqueurs très faiblement acides sont combinées aux bases alcalines et alcalino-terreuses (potasse, chaux, magnésie), et que les phosphates qui sont présents dans les solutions naturelles du sol et alimentent de préférence les plantes sont les phosphates des bases précitées. Les phosphates à base de fer et d'aluminium semblent donc moins aptes à concourir à la nutrition végétale.

II. *Potasse*. — La fraction de cet alcali immédiatement absorbable par les plantes est difficile à préciser. Il n'existe d'ailleurs qu'un seul procédé pour connaître la quantité *totale* de potasse que renferme un échantillon donné de terre : c'est d'opérer sur cet échantillon de terre comme on opérerait sur une roche, c'est-à-dire d'éliminer le silice à l'état de fluorure de silicium volatil en traitant la matière bien pulvérisée par l'acide fluorhydrique.

On trouve alors, en utilisant ce procédé, que la plupart des sols arables renferment des quantités énormes de potasse : 5 à 10 pour 1000, et parfois davantage.

Or, la pratique démontre que les engrais potassiques, introduits dans le sol sous une forme soluble ( $KCl$ ,  $SO^4 K^2$ ), rendent fréquemment de grands services aux végétaux qui se développent sur de pareilles terres, suffisamment pourvues, semblerait-il, d'éléments potassiques.

Par conséquent — et nous retrouvons ici les mêmes notions que celles que nous avons développées à propos de l'acide phosphorique — le chiffre qui indique la quantité *totale* de potasse ne nous fournit aucun renseignement précis sur le degré d'assimilabilité de cette base.

D'autre part, les acides énergiques ( $HCl$ ,  $NO^5H$ , eau régale), même avec l'aide de la chaleur, ne dissolvent jamais qu'une fraction de la potasse — et une fraction quelconque — variable suivant la durée du traitement. Les acides faibles (acide acétique, par exemple), en dissolvent très peu.

Dumont a signalé un fait intéressant, relativement à la fraction de la potasse qui, dans les sols, paraît susceptible de fournir aux végétaux l'alcali dont ils ont besoin. Il est très probable que le degré de finesse des particules terreuses doit jouer un rôle important dans

la nutrition végétale. Pour un même poids de matière, plus un élément sera fin, plus grande sera la surface sur laquelle s'exercera l'action des agents naturels de dissolution. Si l'on veut se rendre compte des besoins d'une terre en potasse, on dosera, au moyen de l'acide fluorhydrique, la totalité de cet alcali dans chacun des lots que l'analyse physique aura séparés (sable grossier, sable fin, argile). On sera alors souvent amené à faire la remarque suivante. Deux terres contenant même quantité de potasse *totale* seront très inégalement influencées par l'apport d'engrais potassiques. L'une n'en retirera aucun bénéfice : l'analyse, en effet, montrera que, dans cette terre, la potasse prédomine dans les éléments fins (sable fin, argile). L'autre, au contraire, chez laquelle la potasse est plus abondante dans les éléments grossiers, profitera de l'épandage des engrais potassiques.

Cette remarque peut d'ailleurs être étendue à toutes les substances nutritives.

Tels sont les enseignements qui découlent de l'étude attentive de la constitution minérale des sols. L'exposé succinct que nous venons de présenter montre avec quelle prudence il faut interpréter les résultats que l'on obtient en traitant la terre par des agents chimiques dont le mode d'action diffère totalement de celui qu'emploient les végétaux.

**Analyse chimique des éléments minéraux.** — La détermination *globale* des éléments minéraux ne présente pas, en général, de difficultés. Il n'en est plus de même lorsqu'on veut apprécier la *fraction* de ces éléments immédiatement ou prochainement assimilables par les plantes. Nous nous sommes expliqués sur ce point, et nous avons vu, à propos du phosphore et de la potasse, quels services on pouvait



attendre de l'emploi de certains réactifs peu énergiques.

Dans un grand nombre d'analyses de terre — et beaucoup de méthodes *officielles* sont encore malheureusement dans ce cas — on attaque la terre, d'une manière conventionnelle, par des acides forts ( $\text{NO}^3\text{H}$ ) ; l'attaque ayant lieu à chaud et pendant un espace de temps déterminé. Cette façon irrationnelle de procéder permettrait, croit-on, d'indiquer la quantité des éléments fertilisants qu'un échantillon donné est susceptible de fournir aux plantes pendant un certain nombre d'années. On ne saurait trop insister sur le point suivant : les résultats fournis par de semblables analyses ne s'accordent qu'assez rarement avec ceux de la pratique agricole. On voit, par exemple, des terres qui cèdent facilement leur potasse aux acides et en cèdent, au contraire, très peu aux plantes.

Passons rapidement en revue les procédés analytiques qui, sans être parfaits, semblent néanmoins présenter quelques garanties de précision.

*α. Acide phosphorique.* — On a proposé, surtout à l'étranger, de procéder à l'attaque de la terre au moyen de l'acide chlorhydrique ( $D = 1.125$ ), non seulement pour doser l'acide phosphorique, mais aussi la chaux, la magnésie et la potasse.

L'effet dissolvant maximum serait obtenu avec un acide ayant la concentration que nous venons d'indiquer : cet acide, à la température de  $100^\circ$ , garde une composition constante, sa teneur en  $\text{HCl}$  est de 22,9 pour cent. Après cinq jours de contact à  $100^\circ$ , cet acide ne dissout plus rien.

Si l'emploi de l'acide citrique pour estimer la fraction de l'acide phosphorique assimilable semble assez rationnelle (page 82), Brioux (1922) fait néanmoins remarquer avec raison que la méthode de Dyer n'est pratique que dans le cas de terres non calcaires ou très

peu calcaires. Car si la terre est calcaire, et si on ajoute à la solution citrique à 1 pour 100 une quantité supplémentaire de cet acide pour saturer d'abord le calcaire, on arrive à des erreurs considérables dans la solubilisation de l'acide phosphorique.

Aussi convient-il de renoncer à cette méthode qui, dans le cas de terres très calcaires, fournit du citrate de calcium peu soluble, enrobant les grains de carbonate calcique et rendant leur attaque longue et difficile. De plus, la méthode de Dyer dissout trop facilement les phosphates de fer et d'aluminium, considérés comme moins accessibles aux plantes que ceux de calcium et de magnésium.

Brioux, avec expériences à l'appui, préconise l'emploi d'une méthode due à von Sigmond (1906) qui dérive de celle de Schløsing fils (page 82). On doit faire en sorte que l'acidité finale de la solution obtenue soit comprise entre 0 gr. 2 et 1 gr.  $N^2O^5$  par litre. Une acidité finale de 0 gr. 5 est à recommander.

β. *Chaux*. — La totalité de cette base, sous forme de carbonate, peut être obtenue en traitant la terre par l'acide nitrique chaud.

Le dosage du calcaire en bloc, ou plutôt des carbonates terreux totaux, s'exécute souvent en recueillant le gaz carbonique que dégage un poids connu de matière mis au contact de l'acide chlorhydrique à froid. Il existe, à cet égard, plusieurs modèles de *calcimètres*.

Mais, ce qu'il importe de connaître, c'est la proportion de *calcaire actif* que renferme une terre, c'est-à-dire de calcaire à un état de finesse tel qu'il maintienne la coagulation de l'argile, qu'il neutralise l'humus et communique au sol un certain degré d'alcalinité, permettant à la matière organique azotée de nitrifier. Ce dernier point est essentiel.

P. de Montdésir a préconisé l'emploi d'une méthode

de dosage du *calcaire actif*, défini comme nous venons de le dire. Cette méthode consiste à attaquer un poids connu de l'échantillon par un acide peu énergique, tel que l'acide tartrique, et pendant un temps assez court pour que le calcaire fin seul, et seulement la surface des plus gros fragments, soient décomposés. Cette méthode a été instituée en vue d'estimer la dose du calcaire actif contenu dans les terres pauvres en carbonate. Comme il serait difficile, dans la pratique courante, de peser le gaz carbonique dégagé, ou même d'en mesurer le volume, l'auteur a imaginé un appareil qui permet de doser ce gaz *en tension*, et dont voici le principe. La réaction de la terre sur l'acide tartrique, en présence d'eau, s'effectue en vase clos. Le gaz carbonique mis en liberté exerce une pression sur un petit ballon de caoutchouc plein d'eau communiquant avec un tube de verre servant de manomètre. Sous l'influence de la pression qu'exerce le gaz carbonique, l'eau monte dans le tube manométrique. On gradue l'appareil par une série d'opérations préliminaires en prenant des poids connus de carbonate de calcium pur. Le volume de l'eau introduit dans le flacon doit toujours être le même.

Il n'existe pas de procédés permettant d'estimer la magnésie active.

γ. *Potasse*. — Nous avons déjà appelé l'attention sur ce fait que l'attaque de la terre par les acides forts, et à chaud, ne donnait aucun renseignement utile relativement à la dose de potasse assimilable. Le procédé de Dyer à l'acide citrique rend ici quelques services. Beaucoup d'expérimentateurs ont préconisé l'emploi de l'eau chargée de gaz carbonique pour essayer de définir le fraction de la potasse utilisable par les plantes. Ce mode d'attaque paraît être le plus rationnel; mais il convient de remarquer que la solubilité de la potasse



varie avec la concentration de l'eau en gaz carbonique. Or, dans le sol, cette concentration est très variable. Bieler-Chatelan a montré que si l'on ne pouvait pas compter sur les renseignements fournis par l'emploi des acides forts, tels que l'acide chlorhydrique, l'emploi de l'eau chargée de gaz carbonique permettait, au contraire, de formuler la proposition suivante : plus la dose de potasse soluble dans le réactif carbonique augmente, moins sont sensibles les effets des engrais potassiques.

On doit également à E. H. Mitscherlich une étude très détaillée de l'action de l'eau saturée de gaz carbonique sur la solubilisation des principaux éléments nutritifs contenus dans le sol : potasse, chaux, acide phosphorique. Les résultats obtenus par cet auteur, indiquant la quantité de ces trois éléments susceptibles d'entrer en dissolution dans des conditions déterminées de pression, de température et de durée de contact ont une valeur très supérieure à celle des résultats que fournissent les autres méthodes.

Cependant si on calcule, d'après les chiffres obtenus, quel serait le poids total des éléments solubles à la disposition des plantes se développant sur la surface de 1 hectare, on trouve des nombres certainement encore trop élevés : ce qui tient au mode opératoire lui-même.

En effet, dans le procédé analytique indiqué ci-dessus, le rapport du poids de l'eau à celui de la terre est beaucoup plus grand que dans les conditions naturelles. De plus, l'auteur opère avec de l'eau saturée de gaz carbonique, c'est-à-dire dans un cas qui ne se présente que très rarement.

**Réaction du sol.** — Un sol qui manque de calcaire ou qui n'en contient qu'une proportion insuffisante est qualifié de *sol acide*. Un sol riche en humus présente presque toujours une réaction acide. La présence de certains silicates hydratés (Zéolithes) communique éga-

lement aux sols un certain degré d'acidité. En outre, l'emploi des engrais peut modifier la réaction du sol : le sulfate d'ammonium entraîne à la longue l'acidité, le nitrate de sodium l'alcalinité. Dans le cas du sulfate d'ammonium, le rapport entre les bases et les acides est modifié. La place occupée normalement par les bases fortes (chaux, magnésie) est prise par les bases plus faibles (alumine, oxyde ferrique). De neutre qu'il était, le sol devient acide en raison de la dissociation des sels à bases faibles.

Cette réaction du sol peut souvent être constatée à l'aide d'un papier bleu de tournesol sensible que l'on trempe dans l'eau au sein de laquelle on a broyé quelques grammes de terre. Parfois cette épreuve est douteuse. On doit soupçonner une terre d'être acide chaque fois qu'elle ne produit pas d'effervescence bien nette au contact de l'acide chlorhydrique. La détermination de l'acidité est fort importante : en effet, une terre acide est, en principe, incapable d'alimenter convenablement les végétaux de la grande culture ; le chaulage ou le marnage s'imposent alors.

Il a été proposé, surtout depuis quelques années, un grand nombre de procédés pour estimer quantitativement le degré d'acidité d'une terre ; nous citerons seulement les suivants.

On évalue souvent l'acidité d'un sol en faisant bouillir un poids connu de terre avec du carbonate de calcium ; on recueille le gaz carbonique qui se dégage.

La méthode, assez suivie, de Hutchinson et Mac Lennan est basée sur le pouvoir absorbant d'une terre vis-à-vis du carbonate de calcium dissous dans l'eau saturée de gaz carbonique. On agite un poids connu de terre avec une solution de carbonate de calcium  $\frac{N}{50}$  dans le gaz carbonique. On filtre, puis on prend le titre

alcalin du liquide filtré sur un volume connu : la différence entre le titre initial et le titre final donne la quantité de chaux que la terre a retenue.

Beaucoup d'expérimentateurs, mesurent le degré d'acidité d'une terre en traitant un poids connu de cette terre par de l'eau distillée très pure, puis ils déterminent la conductibilité électrique de cette solution. Le symbole  $P_H$ , connu sous le nom d'*exposant des ions hydrogène* ou *exposant de Sørensen* est le logarithme décimal de l'inverse du facteur qui exprime le degré de normalité d'une solution relativement aux ions hydrogènes. Par exemple,  $P_H = 1, 2, 3, 4, \dots$  correspondra à des concentrations de  $10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, \dots$  d'ions grammes par litre. Ainsi, quand on écrit  $P_H = 5.9$ , cela veut dire que la concentration en ions hydrogène de l'extrait aqueux de la terre est égale à  $\frac{1}{10^{5.9}}$  ou  $10^{-5.9}$  : ce qui répond à une solution acide ; la neutralité parfaite étant représentée par l'exposant 7. La diminution de l'exposant indique une augmentation de concentration des ions hydrogène dont la présence, à l'état libre, détermine l'acidité d'un milieu donné.

La *flore spontanée* qui se développe sur une terre peut souvent indiquer, grossièrement du moins, quelle est la réaction de cette terre. Une terre alcaline, c'est-à-dire calcaire, porte la plupart des légumineuses vulgaires, le trèfle blanc en particulier. Une terre acide nourrit des bruyères, des ajoncs, des fougères.

**Détermination de l'eau.** — On convient souvent de sécher la terre sur l'acide sulfurique à la température ordinaire. L'échantillon ainsi traité renferme encore de l'eau dite *fortement combinée*. La dessiccation à 100-110° altère un peu la composition de la terre ; en effet, l'eau fortement combinée, unie aux colloïdes du sol, ainsi qu'à certains silicates hydratés (zéolithes), se dégage



partiellement. De plus, la matière organique azotée subit, dès cette température, des transformations dont il est difficile d'apprécier l'intensité. Si on calcine un échantillon de terre vers le rouge sombre, on détruit la totalité de la matière organique, et l'eau des silicates est presque complètement chassée. Une certaine quantité de gaz carbonique, variable avec la température, se dégage par le fait de la dissociation du carbonate de calcium et, surtout, de magnésium; les composés organiques sulfurés et phosphorés se changent, par oxydation, en sulfates et phosphates.

**Interprétation de l'analyse chimique.** — Essayons maintenant d'interpréter les chiffres que fournit l'analyse chimique d'une terre, ainsi que nous l'avons fait à propos de l'analyse physique (page 70). Les notions que nous venons d'acquérir sur les difficultés que présente la recherche du degré d'assimilabilité d'une matière alimentaire donnée nous indiquent déjà avec quelle prudence il conviendra de formuler des conclusions sur la quantité de substances fertilisantes dont peuvent disposer les plantes.

Il semble que ce sont les plantes elles-mêmes qui font le mieux l'analyse du sol. On peut, en effet, en se guidant sur les très nombreuses déterminations qui ont été exécutées sur les cendres des végétaux de la grande culture, connaître les besoins particuliers de telle ou telle espèce végétale.

Cependant la même plante n'a jamais en tous lieux — même dans un endroit déterminé — la même composition minérale. La composition du sol doit être, avant tout, prise en considération. Lorsque le sol est riche soit en chaux, soit en potasse, soit en azote, la même plante absorbera plus de chaux, de potasse ou d'azote. En outre, les influences extérieures jouent un

rôle prépondérant. La quantité d'eau qui tombe sur un même point varie beaucoup d'une année à l'autre, et comme l'eau est le dissolvant par excellence des principes minéraux, il faut s'attendre à trouver, dans la composition quantitative des cendres d'une même plante, de fortes variations suivant le degré d'humidité de l'année considérée.

On peut dire que, le plus souvent, les végétaux ne tirent du sol que ce que le régime des eaux de l'année envisagée leur permet d'absorber. Il en résulte que l'analyse du sol par la plante ne renseigne l'agriculteur que d'une façon imparfaite sur ses véritables besoins. On ne doit formuler à cet égard de conclusions certaines — et c'est d'ailleurs ainsi que l'on procède — qu'en prenant une moyenne des analyses de cendres résultant d'expériences exécutées pendant plusieurs années. Il est donc nécessaire, pour obtenir un supplément d'informations, d'avoir recours à l'analyse chimique du sol lui-même. Voici ce que l'on peut avancer quant aux résultats fournis par cette analyse.

Prenons, ainsi que nous l'avons fait à propos de l'analyse physique, un type de terre : ce sera la *terre franche*, qui possède les qualités que nous lui avons reconnues antérieurement. La richesse *moyenne* d'une pareille terre donne les chiffres suivants, par kilogramme de matière sèche :

Acide phosphorique	= 1 gr. ;	Chaux	= 10 à 50 gr.
Potasse	= 2 gr. ;	Azote	= 1 gramme.

Si une terre renferme un de ces éléments sous une proportion inférieure à celle qui est inscrite, il ne faut pas en conclure que cette terre ne peut pas être l'objet d'une culture intensive, mais qu'elle n'y deviendra apte qu'au prix d'une amélioration foncière plus ou moins importante, c'est-à-dire plus ou moins coûteuse et dont

les effets pourront ne se faire sentir qu'au bout d'un certain nombre d'années.

Voyons maintenant quelle est la valeur relative de tel élément de fertilité par rapport aux autres.

Il est indispensable, pour les raisons que nous avons données plus haut (page 87) de fixer une attention particulière sur la présence du calcaire et, surtout, sur son degré de finesse. En effet, une terre pourrait renfermer un taux élevé d'azote (2, 3... pour mille et même davantage) sans fournir pour cela des récoltes rémunératrices si une dose suffisante de calcaire, en rendant le milieu alcalin, n'accompagnait pas cet azote. L'azote, dans ce cas, demeure inerte et ne profite qu'à des plantes de valeur alimentaire très faible puisqu'il est incapable de nitrifier. L'activité chimique d'un sol dépend de la dose de calcaire qu'il renferme : 10, 20 et même 50 pour mille de calcaire ne sont pas à redouter quand le taux de l'azote est d'au moins 1 pour mille. Si, par contre, le taux de l'azote descend beaucoup au-dessous de ce chiffre, il faut craindre une combustion trop rapide de la matière organique, avec les inconvénients qu'entraîne cette disparition quant à la structure physique de la terre. Il faut également craindre une nitrification trop intense qui exposerait le sol à des pertes graves d'azote nitrique au moment où ce sol est lavé par les eaux de pluie à l'arrière-saison. L'emploi du fumier de ferme ou des engrais verts s'impose pour remédier à l'appauvrissement en humus.

En ce qui concerne le taux de l'acide phosphorique, on peut classer les terres de la façon suivante : les *terres riches* qui renferment un taux d'acide phosphorique supérieur à 1 pour 1000, les *terres moyennement riches*, avec un taux de 0,5 à 1 ; les *terres pauvres*, avec un taux inférieur à 0,1. Si une terre renferme une quantité d'acide phosphorique supérieure à 2 pour 1000



— les autres éléments de fertilité étant en dose convenable — il est inutile de lui fournir des engrais phosphatés; le stock de phosphore est suffisant pour assurer, pendant de longues années, les besoins des végétaux. Une exportation de 50 kilogs par an et par hectare, du fait de la culture, est déjà un chiffre assez élevé.

Mais si la terre renferme moins de 0,6 à 0,7 pour 1000 d'acide phosphorique, on peut affirmer que l'emploi des engrais phosphatés sera avantageux.

Dans le cas de doses intermédiaires (0,6 à 1), la conduite à tenir sera la suivante : il faut ici faire confiance à l'analyse chimique, malgré ses imperfections, et s'en rapporter aux résultats que fournit l'emploi de l'acide citrique ou celui de l'acide acétique (page 82). Lorsque ces réactifs indiquent que, sur la surface d'un hectare, il existe une proportion d'acide phosphorique voisine de 4 à 500 kilogs seulement, on devra conclure à l'utilité de l'apport des engrais phosphatés.

L'interprétation du chiffre relatif à la potasse (2 pour 1000) est difficile. Ce chiffre provient d'une moyenne de résultats obtenus en attaquant la terre par l'acide nitrique concentré et chaud : il ne représente donc qu'un nombre conventionnel. En dehors des procédés à l'acide citrique ou à l'eau chargée de gaz carbonique, il n'existe aucun moyen de connaître la fraction de l'alcali dont peuvent disposer facilement les végétaux. Les besoins en potasse des plantes de la grande culture varient d'ailleurs dans des limites très étendues. On peut avancer que les plantes-racines et les tubercules en réclament de fortes quantités, et que l'épandage d'engrais potassiques solubles leur est généralement très profitable. Du reste, l'excès de potasse non utilisée demeure dans le sol et n'est enlevé que d'une façon insignifiante par les eaux qui le traversent. Nous reviendrons ultérieurement sur ce point.

## CHAPITRE VII

### CONSTITUTION CHIMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS

Nous avons défini antérieurement le rôle physique de l'humus : il nous reste maintenant à étudier sa constitution chimique.

**Propriétés générales de l'humus.** — Les phénomènes chimiques, mais surtout les manifestations microbiennes qui s'exercent sur les tissus morts des végétaux, sont les agents principaux de la production de l'humus.

Il est indispensable d'ajouter qu'un certain nombre d'animaux appartenant aux classes inférieures (insectes, crustacés, mollusques, rhizopodes, lombrics) travaillent également à son élaboration. Ces animaux, après avoir divisé mécaniquement les matières organiques, en font leur nourriture et, dans les excréments qu'ils rejettent, se rencontrent des substances qui ont été fortement modifiées par l'action des sucs digestifs.

Le corps le plus intéressant que contient l'humus est assurément l'*azote*.

La forme sous laquelle il figure n'est pas immédiatement assimilable par la plupart des plantes, celles, en particulier, de la grande culture. L'azote humique doit subir des métamorphoses profondes avant de revêtir la forme soluble, essentiellement simple et diffusible, à laquelle les végétaux pourront s'adresser : l'acide nitrique. Ces métamorphoses sont d'ordre chimique, mais elles ont pour agents principaux un grand nombre

d'espèces microbiennes, sur le travail desquelles nous reviendrons ultérieurement.

Quels sont les rôles multiples que l'humus est appelé à jouer dans le sol ?

L'humus n'est pas une substance homogène, puisqu'il représente des degrés de décomposition plus ou moins avancée de la matière végétale.

Nous venons de signaler l'importance du noyau azoté qu'il renferme toujours ; mais, en tant que matière carbonée colloïdale, si l'humus joue un rôle physique très remarquable sur la nature duquel nous sommes fixés, il est, en outre, susceptible de contracter facilement des combinaisons dites d'*absorption* avec la plupart des éléments minéraux utiles aux plantes.

Tant que ces combinaisons subsistent, en raison de ses propriétés colloïdales l'humus se maintient dans les couches supérieures du sol. Lorsque son noyau carboné disparaît par la combustion, les matières minérales qu'il retenait sont mises à la disposition des plantes.

Cette disparition lente de la matière organique par oxydation aboutit à la production de gaz carbonique et d'ammoniaque : c'est un processus essentiellement aérobie que l'on désigne souvent du nom d'*érémacausis* (ἑρέμα, lentement ; καύσις, combustion). Ce processus est sous la dépendance immédiate de trois facteurs : air, humidité, température.

L'humus ne retient pas seulement certains éléments minéraux avec lesquels il se trouve en contact dans le sol, ou qui ont fait partie intégrante des tissus végétaux dont il n'est lui-même qu'un produit en voie d'évolution régressive, il est en outre capable de s'unir aux sels de potassium ou d'ammonium employés comme engrais et, par conséquent, de maintenir ces matières fertilisantes dans les couches supérieures du sol. Il les soustrait ainsi aux effets des eaux pluviales qui, sans sa présence,



enfonceraient rapidement ces sels dans les profondeurs du sol, hors de la portée des racines.

Enfin, on peut avancer que si l'humus, ou du moins certains de ses constituants, doit être regardé comme l'aliment carboné et azoté de tous les végétaux, tant supérieurs qu'inférieurs qui ne possèdent pas de chlorophylle, il est très probable qu'il peut être absorbé, dans certaines conditions, par les plantes vertes elles-mêmes. Le fait ne semble par douteux dans le cas des végétaux qui se développent sur les terres acides (tourbières, par exemple), ainsi que dans le cas de ceux chez lesquels la répartition de la chlorophylle est irrégulière.

Tels sont les rôles multiples de l'humus. Nous devons donc conclure que lorsqu'il disparaît par érémacausis, plus ou moins rapidement suivant le degré d'alcalinité de la terre considérée et l'intensité des oxydations, il est nécessaire d'en réintroduire dans le sol (enfouissement du fumier ou des engrais verts).

**Propriétés chimiques de l'humus.** — L'humus doit être considéré comme une sorte de matière albuminoïde, ou plutôt, comme un mélange d'albuminoïdes avec des corps ternaires ne contenant que carbone, hydrogène et oxygène. On a, d'ailleurs, réussi à isoler de l'humus certaines substances à poids moléculaire peu élevé (acides aminés, par exemple), en utilisant les méthodes mêmes que l'on met en œuvre pour dédoubler les matières albuminoïdes proprement dites.

L'humus naturel contient en moyenne (cendres déduites) :

Carbone = 59,00 pour 100 ; hydrogène = 4,5 ; oxygène = 33,5 ; azote = 3.

Il est donc plus riche en carbone que la moyenne des albuminoïdes (C = 53,6 pour 100), mais beaucoup moins riche en azote (N = 15,6 pour 100).

L'humus possède toutes les propriétés d'un colloïde ;

il se dissout peu dans l'eau, au contact de laquelle il augmente de volume. Il est soluble partiellement dans les liqueurs alcalines (potasse, ammoniacque). Cette partie soluble reçoit souvent le nom d'*acide humique*; la partie insoluble est appelée *humine*.

Si on verse un acide quelconque dans une solution alcaline d'humus, il se forme des flocons bruns. Lorsqu'on dialyse cette solution alcaline jusqu'à disparition totale de la réaction basique, on obtient un liquide brun foncé, transparent, précipitable par les électrolytes : ce qui vérifie bien la nature colloïdale de l'humus (page 42).

Etant donnée son origine végétale, l'humus abandonne toujours des matières fixes quand on l'incinère : silice, phosphates, sulfates, alumine, oxyde ferrique. Cependant, il faut remarquer avec Wolny que les variations de composition minérale des divers humus proviennent de ce fait que ces humus sont toujours mélangés intimement avec la terre elle-même.

De quelle nature sont les combinaisons que contracte l'humus avec les matières minérales? Nous avons dit plus haut qu'il s'agissait de combinaisons d'absorption, c'est-à-dire de combinaisons non en proportions définies, voisines de celles que peuvent fournir beaucoup de colloïdes avec certaines matières minérales.

On désigne fréquemment sous le nom d'*adsorption* le phénomène que l'on observe lorsqu'une substance dissoute se fixe sur un solide sans que l'on puisse invoquer l'existence d'une réaction chimique proprement dite. Tel est le cas du charbon et celui de l'argile, par exemple, auxquels les matières colorantes, ainsi que beaucoup de substances salines, sont susceptibles d'adhérer.

Toutefois, dans ces dernières années, un grand nombre d'auteurs admettent, non sans raison, que l'hu-

mus contracte de véritables combinaisons avec certaines bases, c'est-à-dire en proportions définies.

**Noyau azoté de l'humus.** — Cherchons maintenant sous quel état se présente l'azote dans l'humus. La question est très importante, puisque cet azote humique subit — quand certaines conditions de milieu sont réalisées — des transformations profondes à la suite desquelles il devient soluble et diffusible, apte ainsi à servir à la nutrition des végétaux.

L'azote existe dans l'humus *sous forme amidée*. Pour le démontrer, on traite un poids connu de terre végétale par un acide, tel que l'acide chlorhydrique, sous divers degrés de concentration, pendant des temps variables et à des températures variables. Cela fait, on jette le magma sur un filtre et on lave le précipité jusqu'à absence d'acidité. Le liquide filtré est additionné de magnésie en excès, puis distillé; on recueille l'ammoniaque qui se dégage dans un acide titré. Le résidu de la distillation est séché, puis calciné avec de la chaux sodée : on recueille l'ammoniaque qui provient de cette calcination. Cette ammoniaque est issue de ce que l'on peut appeler l'*azote amidé soluble*.

Or, on constate que la dose d'azote ammoniacal, obtenu par distillation dans la première opération, augmente : 1° avec la richesse en acide chlorhydrique du liquide employé à l'attaque de la terre, 2° avec la durée du contact de la terre avec la liqueur acide (pour une même dose d'acide et une même température); 3° avec la température elle-même (pour une même concentration de l'acide et pour une même durée du contact).

Parallèlement, l'azote ammoniacal, qui provient de ce que nous avons appelé l'*azote amidé soluble*, augmente sous l'influence des mêmes facteurs.

Cette expérience montre donc que le noyau azoté de



l'humus se comporte comme un amide ou un mélange d'amides. En effet, un amide proprement dit (tel l'urée) se transformerait, sous l'influence de l'hydrolyse, dans le sel ammoniacal correspondant, d'autant plus rapidement que la dose de l'acide mise à son contact serait plus forte, la durée de ce contact plus longue, la température plus élevée.

On doit maintenant se demander sous l'influence de quels agents a lieu dans le sol cette hydrolyse des amides de l'humus. Ces agents sont d'*ordre chimique* et, surtout, d'*ordre microbien*.

En ce qui concerne les agents chimiques, il faut remarquer que la *réaction du milieu* possède une influence capitale. Ce n'est que dans les sols *alcalins*, c'est-à-dire calcaires, que l'ammoniaque peut prendre naissance et se changer ultérieurement en acide nitrique. Tel est, d'ailleurs, le but du chaulage et du marnage, agents qui sont destinés, soit à communiquer au milieu une réaction basique si ce milieu ne présente pas cette réaction, soit à renforcer cette basicité au cas où elle serait insuffisante.

Boussingault a montré autrefois l'influence de l'addition de la chaux sur la production d'ammoniaque par la terre végétale en dosant l'alcali volatil qui se dégage dans ces conditions. Ici, c'est la réaction chimique qui domine.

Mais, le plus ordinairement, si l'influence chimique n'est pas négligeable, l'hydrolyse, et l'on doit dire l'*ammonisation*, de l'azote complexe du milieu humique est surtout l'œuvre de certains microorganismes. Nous établirons la réalité de cette transformation en parlant des propriétés biologiques du sol (page 121).

Quant à l'*analyse chimique de la matière organique* des sols, cette analyse comporte le dosage du carbone

total, de l'azote total (procédé Dumas, procédé Kjeldahl ou calcination avec la chaux sodée), et de l'azote nitrique. Nous ne décrirons pas ici les manipulations qu'exigent ces dosages, on les trouvera décrites dans tous les traités d'analyse chimique. Remarquons que le dosage de l'azote total est particulièrement important.

**Interprétation du dosage de l'azote.** — Indiquons maintenant rapidement l'*interprétation* que l'on doit donner aux chiffres que fournit le dosage de l'azote total.

Si on suppose que la richesse d'un sol en calcaire soit suffisante et que le degré de perméabilité de celui-ci soit convenable, on peut, au point de vue de leur teneur en azote, classer ainsi qu'il suit les terres arables. On remarquera qu'il y a de grandes analogies entre ce classement et celui que nous avons adopté pour l'acide phosphorique (page 94).

1° *Terres très riches*, contenant 2 pour 1000 et au-dessus d'azote total. Si la nitrification est assurée dans de pareils sols, il sera inutile d'avoir recours aux engrais azotés. En effet, au taux de 2 pour 1000, et en supposant que la terre active d'un hectare s'étende sur une profondeur de 40 centimètres, cette masse pèserait environ 4 000 tonnes et renfermerait 8 000 kilogs d'azote. Il est vrai qu'il faudrait également supposer que la richesse en azote fût *uniforme* sur cette hauteur de 40 centimètres, ce qui n'est pas toujours vrai.

2° *Terres riches*, contenant de 1 à 2 pour 1000 d'azote : ces terres en général ne réclament pas davantage d'engrais azotés, si les autres éléments de fertilité sont en proportions suffisantes.

3° *Terres moyennement riches*, contenant de 0,8 à 1,2 pour 1000 d'azote. Ces terres (en supposant une moyenne de 1 pour 1000) renfermeraient 4 000 kilogs d'azote à l'hectare. En admettant que la centième partie

de cet azote nitrifié dans le courant d'une année, les plantes n'auraient à leur disposition que 40 kilogs d'azote nitrique, quantité insuffisante pour celles dont le développement est rapide et qui exigent la présence de fortes proportions de ce principe dès le début de leur végétation (céréales, par exemple). De plus, les plantes n'empruntent jamais au sol la totalité de l'azote nitrique que celui-ci contient. D'où la nécessité où l'on se trouve le plus souvent de fournir à de pareils sols des nitrates en nature.

4° *Terres pauvres*, contenant de 0,5 à 0,8 pour 1000 d'azote.

5° *Terres très pauvres*, contenant moins de 0,5 pour 1000 d'azote.

Dans ces deux dernières catégories de sols, l'emploi, soit du fumier, soit des nitrates s'impose, suivant la constitution physique de la terre.



## CHAPITRE VIII

### POUVOIR ABSORBANT DES SOLS VIS-A-VIS DES MATIÈRES FERTILISANTES

#### Constatation de l'existence du pouvoir absorbant.

— Il est très facile de mettre en évidence la faculté que possèdent la plupart des sols d'absorber certaines substances salines et de les retenir.

Remplissons de bonne terre arable un tube de verre légèrement étiré par le bas, ayant 30 centimètres de hauteur et 20 millimètres de diamètre environ. Versons avec précaution sur cette terre une solution de phosphate de potassium très étendue (1 gramme au litre), de façon qu'il ne s'écoule pas de liquide par la partie inférieure du tube. Au bout d'une heure, versons sur cette terre de l'eau distillée pour déplacer la solution saline que nous y avons introduite. Un essai qualitatif exécuté sur le liquide écoulé nous montrera que les deux constituants du sel, acide phosphorique et potasse, ont été à peu près complètement retenus par la terre.

Faisons la même expérience avec une solution de sulfate d'ammonium de même concentration, puis déplaçons ensuite, comme précédemment, cette dissolution par de l'eau distillée. Le liquide écoulé ne contient plus que des traces d'ammoniaque; il renferme, par contre, une autre substance, facile à caractériser, le sulfate de calcium. Ici, la base du sel, l'ammoniaque, a été retenue par la terre, alors que l'acide (acide sulfurique) ne l'a pas été. Une double décomposition s'est produite entre le carbonate de calcium que contenait la terre et

le sulfate d'ammonium ajouté : d'où formation de sulfate de calcium qui a filtré et de carbonate d'ammonium qui a été fixé.

Dans le premier cas, le calcaire est également intervenu pour changer le phosphate de potassium en phosphate tricalcique; la potasse a vraisemblablement pris la forme de carbonate. Celui-ci, bien que très soluble, a été énergiquement retenu.

Ces essais, très simples, montrent donc que certaines substances sont arrêtées par la terre arable. Nous allons voir que cette faculté de fixation dépend de la présence de *trois facteurs* que l'on peut définir ainsi : 1<sup>o</sup> phénomènes de *double décomposition* d'ordre purement chimique; 2<sup>o</sup> phénomènes *d'absorption* entre sels ou bases cristalloïdes et colloïdes minéraux (silice, silicates zéolithiques) ou organiques (humus); 3<sup>o</sup> phénomènes *d'adsorption* ou *d'affinité capillaire*, tels que ceux que l'on observe dans la fixation d'une matière colorante sur les fibres animales ou végétales.

Le concours de ces trois facteurs assure à la terre arable la propriété de fixer, souvent à un haut degré, certaines matières salines dont la plante a besoin. Il en résulte que leur absence, totale ou relative, en abaissant ce pouvoir fixateur, sera une cause de stérilité plus ou moins marquée de la terre. On devra donc, par des moyens appropriés, créer ou renforcer le pouvoir fixateur, soit par addition de calcaire, soit par l'emploi de marnes argileuses, soit par l'épandage des fumiers ou des engrais verts.

Étudions maintenant la fixation des trois éléments de fertilité les plus importants : acide phosphorique, ammoniacque, potasse.

**Fixation de l'acide phosphorique.** — Sous la forme tricalcique, extrêmement peu soluble dans l'eau, l'acide

phosphorique est très stable dans le sol. Les eaux de lavage des terres n'en renferment que des traces. Dans le cas où un sol reçoit du superphosphate, c'est-à-dire du phosphate monocalcique  $(\text{PO}^4)^2 \text{Ca H}^4$ , très soluble dans l'eau, le calcaire intervient pour faire *retrograder* ce superphosphate et le convertir en phosphate bi- puis tricalcique.

On voit parfois, à la suite de l'emploi du superphosphate, apparaître dans les eaux de lavage de faibles traces d'acide phosphorique. Il faut alors admettre que les divers facteurs du pouvoir absorbant, saturés momentanément d'acide phosphorique, en laissent échapper un peu. La chose est d'ailleurs assez rare, dans les sols nettement calcaires principalement, surtout si la végétation s'empare du phosphore soluble mis à sa disposition.

Lorsque le sol est acide, par manque de calcaire ou par abondance d'humus, le phosphate monocalcique s'unit aux oxydes de fer et d'aluminium et aux silicates colloïdaux. En fait, les eaux de lavage de pareilles terres sont très pauvres en acide phosphorique ; elles en contiennent quelquefois des quantités appréciables à la suite d'un lavage excessif par l'eau de la pluie. Dans ces circonstances, on doit penser que la neutralisation du phosphate étant plus lente qu'au contact du calcaire, ici absent, le passage au travers de la terre de grandes quantités d'eau a pu soustraire ce phosphate acide aux réactions qu'il aurait dû subir si le sol n'avait pas été lavé à l'excès.

En général, on admet que les engrais phosphatés incorporés au sol ont une très faible tendance à descendre profondément. Ce sont donc les couches supérieures du sol qui, en somme, sont les plus riches en cet élément.

**Fixation de l'ammoniaque.** — Lorsqu'un sol reçoit



du sulfate d'ammonium, ou lorsque l'ammoniaque prend naissance aux dépens de la matière organique azotée par suite de certaines fermentations, l'humus et les silicates colloïdaux retiennent cette ammoniaque avec une grande énergie. Les eaux de lavage des terres ne renferment jamais que de très faibles quantités de cet alcali.

**Fixation de la potasse.** — Cette base se rencontre dans les eaux de lavage des terres en proportions très variables, mais toujours assez faibles. Lorsque le sol reçoit d'abondantes fumures de sels de potassium, les eaux de lavage accusent une perte de quelques kilogrammes seulement de potasse pour une surface de 1 hectare.

Quels sont les facteurs qui interviennent ainsi pour retenir cet alcali? S'il s'agit du carbonate de potassium, que le fumier et le purin apportent en proportions notables, c'est l'humus qui s'empare de ce sel comme il le ferait de la base libre elle-même. Les silicates colloïdaux sont également de bons absorbants de la potasse par suite de phénomènes de déplacement dont nous parlerons plus loin.

Mais lorsqu'il s'agit de l'épandage, si fréquent, du chlorure et du sulfate de potassium, il convient de chercher une autre explication.

En effet, le calcaire ne semble pas décomposer une solution étendue de chlorure de potassium. Cependant si l'on arrose une colonne de terre arable avec une solution très diluée de ce sel, et si le contact est suffisamment prolongé, la potasse est retenue presque intégralement par la terre. En fait, la réaction :  $K^2CO^3 + CaCl^2 = CO^3Ca + 2KCl$  donne lieu à un phénomène d'équilibre. Si peu qu'il se forme de carbonate de potassium quand on fait agir du chlorure de potassium sur du carbonate calcaire, ce carbonate de potassium est

immédiatement absorbé par l'humus ou par les silicates colloïdaux. L'équilibre étant rompu, une nouvelle quantité de carbonate de potassium prend naissance, et ainsi de suite.

De sorte que, une solution très diluée de chlorure de potassium, de l'ordre de celles qui se rencontrent dans le sol à la suite de l'épandage d'un pareil engrais, peut être totalement changée en carbonate : donc complètement absorbée par la terre. C'est ce qui permet d'expliquer pourquoi la potasse ne passe, en réalité, dans les eaux de drainage qu'en faibles quantités. Souvent même on ne l'y rencontre qu'à l'état de traces.

Il faut ajouter, et ceci est très important, qu'il existe toujours au sein de la terre arable une atmosphère beaucoup plus riche en gaz carbonique que l'air ordinaire, et que la production de carbonate de potassium est favorisée par la présence de cet excès de gaz carbonique.

Examinons maintenant le rôle que jouent dans les réactions d'absorption les colloïdes minéraux et organiques.

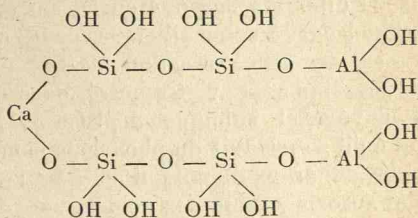
**Rôle des colloïdes dans l'absorption.** — La présence des colloïdes minéraux et des silicates hydratés (zéolithes) dans tous les sols arables possède une importance très grande dans les phénomènes de fixation et d'échanges des bases.

Il faut remarquer, en effet, que, dans les silicates hydratés, l'eau n'est pas, en grande partie du moins, de l'eau comparable à l'eau d'hydratation de la plupart des sels : c'est de l'eau de constitution. On sait, d'ailleurs, avec quelle énergie cette eau est retenue, puisqu'il est nécessaire, pour l'expulser complètement, d'employer une température élevée.

On peut donc imaginer, quand on traduit la composition de pareils silicates en une formule de structure

rationnelle, qu'au silicium et à l'aluminium sont attachés un certain nombre de radicaux oxhydriles (OH).

Prenons comme exemple la *chabasie* (silicate hydraté d'aluminium et de calcium). Sa formule brute,  $4\text{SiO}^2$ .  $\text{Al}^2\text{O}^3$ .  $\text{CaO}$ .  $6\text{H}^2\text{O}$ , peut s'écrire :



On saisit facilement ici la raison pour laquelle ce silicate est capable de fixer, soit des radicaux acides, soit des radicaux basiques, suivant que ces radicaux prennent la place d'un oxhydrile uni au silicium ou d'un oxhydrile uni à l'aluminium.

En fait, traité à froid par une solution étendue de carbonate ou de chlorure de sodium, ce minéral échange une partie de la chaux qu'il contient contre la soude; traité de même par une solution étendue de chlorure de potassium, il échange partiellement la chaux contre la potasse. L'ammoniaque peut également se substituer à la chaux.

Mais quelle que soit la concentration de la liqueur saline employée, il n'y a jamais un déplacement total de tel ou tel élément du silicate primitif. La réaction donne lieu à un équilibre entre les substances présentes, soit qu'on opère avec les silicates hydratés seuls, soit avec la terre elle-même. Cet équilibre dépend des proportions dans lesquelles se rencontrent les différentes bases dans le sol et dans les solutions salines réagissantes, ainsi que du rapport entre la quantité



totale des bases contenues dans le sol et la quantité totale des bases présentes dans la solution. Tel est le mécanisme général de la fixation des bases sur la terre arable.

Van Bemmelen avait étudié plusieurs types de ces combinaisons dites *d'absorption* en faisant réagir, par exemple, l'hydrogel d'acide silicique sur les carbonates alcalins ou sur des sels à réaction alcaline tels que le phosphate bisodique. Il avait montré, dans ce dernier cas, que l'hydrogel silicique déplace un atome de sodium, et qu'il se produit du phosphate monosodique. Les colloïdes minéraux du sol qui affectent la forme de *gel* peuvent absorber, soit des acides, soit des bases, directement ou à la suite d'une double décomposition.

La plupart des auteurs estiment actuellement que le pouvoir absorbant des silicates n'est pas attribuable à un phénomène d'absorption, c'est-à-dire à une sorte d'adhérence physique de tel corps à tel autre — ainsi qu'on l'avait cru pendant longtemps — mais bien à une véritable combinaison chimique subordonnée à la loi d'action de masse.

Il semble que cette interprétation soit la seule rationnelle en présence des résultats obtenus avec un silicate hydraté aluminosodique artificiel que l'on prépare en fondant de l'argile avec du carbonate de sodium et reprenant ensuite la masse par l'eau (*permutite*). Ce silicate donne lieu à des phénomènes de déplacement de bases quand on le traite par des solutions salines variées.

Les faits que nous venons d'exposer comportent certaines remarques intéressantes. Ils nous montrent que la présence du calcaire n'est pas indispensable (cas de la chabasia et de tous les silicates hydratés) pour qu'il y ait substitution de bases, et que, par exemple, dans

les terres dépourvues de carbonate de calcium, les échanges de bases peuvent s'effectuer par un contact suffisamment prolongé entre une solution saline employée comme engrais et telle base contenue dans le silicate hydraté.

Lorsqu'on traite par l'acide chlorhydrique chaud une terre arable, elle perd en grande partie la faculté de fixer la potasse, non seulement par suite de l'enlèvement du calcaire, mais parce que les silicates zéolithiques sont décomposés, et que leur destruction a pour conséquence de faire perdre à cette terre le pouvoir qu'elle possède normalement de fixer certaines bases.

Les silicates zéolithiques qui renferment de la soude et de la chaux abandonnent plus facilement ces bases que s'ils contiennent de la magnésie et, surtout, de la potasse. Aussi les eaux de lavage des terres renferment-elles de notables proportions de soude et de chaux, indépendamment de la perte de cette dernière base résultant de la solubilité du calcaire dans l'eau chargée de gaz carbonique.

**Rôle de l'humus.** — Si les réactions que nous venons d'étudier affectent un caractère chimique, il ne semble pas que l'on retrouve ce caractère d'une manière aussi nette lorsqu'on examine le rôle que jouent les complexes de l'humus dans le pouvoir absorbant. L'humus se borne à fixer les bases libres et les carbonates alcalins avec une grande énergie.

A cet égard, la présence de l'humus dans le sol est donc précieuse puisqu'elle permet la fixation des carbonates d'ammonium et de potassium apportés par le fumier de ferme et le purin, ainsi que celle du carbonate de potassium qui prend naissance d'une façon continue par l'action du gaz carbonique sur les éléments feldspathiques. Toutefois, malgré le nombre et

la variété des travaux exécutés sur ce point, il est difficile de faire rentrer cette fixation des alcalis sur l'humus dans le cadre des combinaisons en proportions définies. L'humus est un complexe, et l'on ne peut savoir actuellement sur lequel de ses éléments viennent ainsi se fixer les bases. D'après plusieurs auteurs, l'humus acide (de la tourbe, par exemple) serait capable de décomposer certains sels à acides faibles et de s'emparer de leurs bases. On est allé plus loin dans cette voie, et on a supposé que l'acidité du sol nuisible aux végétaux ne devait pas être imputée à l'acide humique libre, mais aux acides minéraux que l'humus aurait mis en liberté.

Nous concluons donc que le rôle de l'humus dans le pouvoir absorbant, s'il est moins important que celui des silicates hydratés, n'est nullement négligeable puisqu'il s'exerce sur deux substances fertilisantes de premier ordre : ammoniacque et potasse.

Il faut enfin mentionner cette propriété spéciale de l'humus d'après laquelle la matière organique est capable de se fixer mécaniquement sur les particules terreuses. L'examen attentif des grains sableux montre que ceux-ci sont toujours revêtus d'un enduit, très mince souvent, dont la nature est facile à découvrir. Lorsqu'on chauffe ces grains, ils noircissent d'abord, puis leur couleur devient plus claire parce que l'action de la chaleur a fait disparaître la matière organique qui leur était adhérente. On peut comparer cette adhésion à celle qui se manifeste lorsqu'une matière colorante imprègne une étoffe : certains solvants appropriés sont susceptibles d'enlever la teinture. De même, les alcalis, libres ou carbonatés, dissolvent la couche brune qui est appliquée sur les particules sableuses (affinité capillaire).



Etant donnée la très faible solubilité de l'humus dans l'eau, les liquides qui ont traversé le sol sont, en général, peu colorés, même dans le cas d'une terre riche en matière organique. L'affinité que possède l'humus vis-à-vis des éléments minéraux se manifeste d'une façon remarquable dans le cas suivant. La majeure partie des espèces microbiennes qui habitent la terre arable se développent dans les couches supérieures du sol, ainsi que nous le verrons bientôt; certaines d'entre elles s'attaquent à l'humus auquel elles font subir une série de transformations qui l'amène à des formes de plus en plus simples. Les eaux de la pluie entraînent celles de ces matières qui ont pris l'état soluble et qui s'enfoncent d'autant plus dans la profondeur qu'elles possèdent un poids moléculaire moins élevé. Les grains sableux interviennent alors pour arrêter, par suite de l'attraction qu'ils exercent sur elle, cette fraction de la matière organique qui se trouve encore sous forme colloïdale, peu diffusible. C'est à ce phénomène de *teinture ou d'adsorption* qu'il convient de rapporter le fait que l'on observe couramment lorsqu'on pratique une tranchée verticale dans un sol. La couche superficielle est toujours la plus colorée, puis la teinte se dégrade peu à peu au fur et à mesure que l'on descend. Finalement, ce que nous avons appelé le *sous-sol* possède une coloration propre, blanchâtre, rouge, grise, et ne renferme, le plus souvent, que des traces de matière organique.

## CHAPITRE IX

### PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES DU SOL; GÉNÉRALITÉS

Nous avons, jusqu'ici, examiné une série de phénomènes purement chimiques dans lesquels les matières minérales si variées que contient la terre arable entraînent en conflit. Comme conséquence des doubles décompositions qui en résultent, nous avons noté la formation de substances, tantôt solubles, tantôt insolubles.

Mais le sol est encore le théâtre de réactions d'un ordre particulier. Dans les conditions naturelles où elle se trouve placée, la terre arable contient des êtres vivants en quantité prodigieuse. Les uns sont facilement visibles : insectes, crustacés, mollusques, etc ; les autres — et ce sont de beaucoup les plus nombreux — ne peuvent être découverts qu'avec le secours du microscope. Ils trouvent leur nourriture hydrocarbonée et azotée dans l'humus lui-même dont ils modifient, avec une intensité variable, dépendant de la température, du degré d'humidité et de la réaction du milieu, la nature chimique d'une façon continue. Les substances auxquelles ils donnent naissance ont, la plupart du temps, une importance considérable en raison des changements qu'elles produisent dans la composition du sol et, par conséquent, une répercussion immédiate sur le milieu nutritif auquel les plantes s'adressent.

Aussi ne faut-il pas s'étonner que les efforts des chimistes et des bactériologistes se soient, depuis une quarantaine d'années, concentrés dans la recherche

approfondie de ce monde des infiniment petits du sol.

Le présent chapitre est consacré à l'étude sommaire du travail des microorganismes dans le sol, en tant que ces microorganismes élaborent pour la plante des substances propres à son développement. Quel que soit le rôle bienfaisant que jouent nombre de bactéries — en simplifiant les matières complexes auxquelles elles s'attaquent et en détruisant certains édifices moléculaires dont elles extraient finalement des substances solubles ou diffusibles (eau, gaz carbonique, ammoniaque, acide nitrique) — leur présence n'est cependant pas indispensable à la vie végétale. Une plante, en effet, supérieure ou inférieure, possédant ou non de la chlorophylle, est susceptible de se développer dans une solution nutritive minérale *stérilisée*, pourvu que les matières mises à sa disposition soient sous une forme telle qu'elles puissent être absorbées avec profit par cette plante. Un nombre considérable d'expériences faites dans cette direction démontrent qu'il en est bien ainsi. Les microorganismes du sol, dont on ne peut éviter l'action dans les conditions naturelles, travaillent d'une manière incessante à la simplification de l'humus dans un sens précisément favorable à l'élaboration des matières nutritives que réclame la plante, matières que l'on serait obligé de leur fournir sous forme simple et diffusible si les réactions microbiennes n'existaient plus.

**Microbes aérobies et anaérobies.** — On rencontre dans le sol deux sortes de microorganismes. Les *aérobies* sont des microorganismes oxydants, capables de fournir aux végétaux certains composés simples dont ceux-ci tirent parti directement ou non : eau, gaz carbonique, acide nitrique. Quelques-uns de ces microorganismes sont des agents d'hydrolyse. Les *anaérobies*, au contraire, se développent au sein d'une atmos-



phère peu ou pas oxygénée. Ils s'attaquent à certaines matières organiques qu'ils simplifient avec dégagement de gaz, parmi lesquels on compte le plus souvent l'anhydride carbonique, accompagné parfois d'hydrogène, de méthane, et, dans quelques cas, d'azote et d'oxyde azoteux. Mais cette particularité que possèdent les anaérobies de dégager du gaz carbonique en l'absence de l'air n'est pas une propriété générale de la cellule; elle dépend essentiellement de la nature des aliments dont dispose cette cellule.

La *réaction du milieu* joue un rôle capital dans l'activité microbienne — et cela dans des limites souvent fort étroites. Il suffit que l'acidité, par exemple, augmente de quelques dix-millièmes pour que l'activité de tel microorganisme s'accroisse ou diminue, et même s'annule. Un exemple remarquable est fourni par la façon dont l'humus se comporte dans les tourbières. Cet humus persiste et s'accumule, même au contact de l'oxygène de l'air, en raison de ce fait que les seules espèces microbiennes qui peuvent vivre dans un pareil milieu acide ont un pouvoir oxydant assez faible. La nitrification ne peut s'établir dans ce milieu que s'il devient alcalin à la suite d'une addition de calcaire. Enfin, s'il existe des aérobies et des anaérobies *obligatoires ou stricts*, de nombreux microorganismes présentent, au contraire, suivant les conditions de milieu, une aérobiose ou une anaérobiose facultative.

**Distribution des microorganismes dans le sol.** — Les microorganismes du sol adhèrent facilement aux substances solides qui les entourent. Comme les couches supérieures de la terre arable sont plus chargées en matières organiques, on doit s'attendre à trouver dans cette région un nombre très grand de microorganismes appartenant à des espèces très variées. Le nombre de ces infiniment petits décroît, le plus souvent, avec la

profondeur, quoique, parfois, on constate à cet égard certaines irrégularités imputables à des changements locaux dans la constitution du sol.

Quant au nombre absolu de ces microorganismes, il varie à la surface du sol dans d'énormes proportions : il n'est pas rare de rencontrer, dans le cas de terres cultivées, plus d'un million de ces êtres dans un gramme de terre.

La stérilité relative des couches profondes du sol est parfois plus apparente que réelle, bien que la terre se comporte comme une sorte de filtre. Cela tient à ce que les microbes qui peuplent ces couches profondes refusent de proliférer sur les milieux artificiels qu'on leur offre, parce que ces milieux ne sont pas adaptés à leur développement.

En ce qui concerne la température nécessaire à la manifestation de l'activité bactérienne, cette température est assez variable. On peut avancer que, en général, les espèces qui intéressent le plus la production végétale ne se développent guère au-dessous de  $+5^{\circ}$  et au-dessus de  $+45^{\circ}$ . Cependant, ainsi qu'il résulte des recherches, de Dehérain et Demoussy (1896), si l'on prend comme critérium approximatif, pour apprécier l'intensité de la vie microbienne, la quantité de gaz carbonique qui se dégage d'une terre chauffée à des températures sans cesse croissantes, on constate que le maximum de ce dégagement a lieu aux environs de  $65^{\circ}$ , pour diminuer ensuite rapidement lorsque la température dépasse ce chiffre. On sait d'ailleurs que, dans une masse de fumier de ferme en pleine fermentation, il est possible d'observer, à la partie supérieure du tas, une température de  $75^{\circ}$ .

— Nous étudierons dans l'ordre suivant les phénomènes qui dépendent de l'activité microbienne :

- 1° Phénomènes de combustion complète qui portent sur le carbone et l'hydrogène avec production de gaz carbonique et de vapeur d'eau;
- 2° Phénomènes d'hydrolyse de la matière azotée avec formation d'ammoniaque;
- 3° Phénomènes de fixation de l'azote gazeux sur la matière organique des sols;
- 4° Phénomènes d'oxydation qui changent l'ammoniaque en acides nitreux et nitrique;
- 5° Phénomènes de réduction des nitrates.



## CHAPITRE X

### PHÉNOMÈNES DE COMBUSTION COMPLÈTE QUI PORTENT SUR LE CARBONE ET L'HYDROGÈNE; PHÉNOMÈNES D'HYDROLYSE DE LA MATIÈRE AZOTÉE; FIXATION DE L'AZOTE GAZEUX

**Atmosphères confinées des sols.** — Nous avons déjà parlé de l'*érémacausis* (page 97), c'est-à-dire de la disparition lente du carbone, de l'hydrogène et de l'azote contenus dans l'humus avec formation de gaz carbonique, d'eau et d'ammoniaque. L'*érémacausis* est sous la dépendance immédiate de l'activité des micro-organismes du sol. Ceux-ci tirent de la matière organique à laquelle ils s'attaquent les éléments indispensables à la construction de leurs tissus et l'énergie nécessaire à l'entretien de leur existence.

La caractéristique essentielle des microbes aérobies qui participent aux phénomènes de destruction de la matière organique c'est de fournir d'emblée des composés de formule très simple :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , inoxydables.

Les anaérobies détruisent également l'humus, mais certains des corps auxquels ils donnent naissance renferment encore une dose d'énergie : acides butyrique, lactique, acétique ; acides aminés, formés aux dépens des albuminoïdes de la matière organique. Si le gaz carbonique est le produit le plus constant dont on observe le dégagement, il est souvent accompagné, comme nous l'avons dit antérieurement, d'hydrogène, de méthane, d'hydrogène sulfuré. Le rôle des aérobies

consiste à détruire ultérieurement les composés ternaires et quaternaires fournis par les anaérobies et à les résoudre finalement en eau, gaz carbonique et ammoniaque.

Les deux catégories de microbes, anaérobies et aérobie, travaillent dans le sol d'une manière concomitante. On peut même avancer avec certitude qu'il existe entre eux des phénomènes de *symbiose* : les aérobie, en soustrayant l'oxygène du milieu ambiant, provoquent et favorisent le travail des anaérobies. Les exemples de symbiose sont d'ailleurs nombreux.

Cependant, lorsque, par suite de certaines circonstances l'atmosphère intérieure est privée d'oxygène, le rôle des anaérobies devient prépondérant, et les réactions auxquelles ces anaérobies donnent alors naissance peuvent conduire à la destruction de matières utiles aux plantes : tel est le cas qui se présente dans les phénomènes de la dénitrification.

Au sein des couches de terre superficielles qui constituent le champ d'activité des microbes du sol, parce qu'elles sont les plus riches en humus, il y a donc formation constante de gaz carbonique. Aérobie et anaérobies en produisent de façon continue, et l'intensité de cette production varie avec plusieurs facteurs parmi lesquels la température et le degré d'humidité du milieu jouent un rôle prépondérant. On doit donc s'attendre à rencontrer, à l'intérieur de la masse du sol, des atmosphères plus ou moins chargées de gaz carbonique dont la composition ne saurait être la même que celle de l'air normal.

Il résulte, en effet, des expériences déjà anciennes de Boussingault et Lewy (1852) que l'air confiné dans le sol, à 35 centimètres de profondeur, et au delà, possède une composition qui diffère notablement de celle de l'air ordinaire. La production de gaz carbonique est

particulièrement nette dans le cas où le sol a reçu depuis peu une fumure au fumier de ferme. La moyenne de ce gaz renfermé dans les sols cultivés, mais n'ayant pas été additionnés d'engrais organiques depuis une année, s'élevait à 9 litres par mètre cube d'air confiné, soit 22 à 23 fois autant que dans l'air normal.

Une foule d'expériences ultérieures ont appuyé ces conclusions. Nous citerons, entre autres, celles de Schlœsing fils sur les terres labourables et celles de Mangin sur les gaz confinés dans les différents points du sol d'un jardin public et sous les trottoirs des boulevards plantés d'arbres, soit au voisinage du pied de ces arbres, soit à une certaine distance, sous le bitume qui recouvre les trottoirs.

Cependant, si, dans ces circonstances, la dose de gaz carbonique dépasse de beaucoup celle que contient l'air normal, la proportion de l'oxygène ne descend presque jamais au-dessous de 10 pour 100; la plupart du temps elle est même très supérieure à ce chiffre.

Il faut en conclure que de pareils sols sont convenablement aérés et qu'ils renferment encore une quantité suffisante d'oxygène capable d'assurer la respiration des racines.

**Phénomènes d'hydrolyse de la matière azotée avec production d'ammoniaque.** — Nous avons antérieurement examiné la constitution du noyau azoté de l'humus (page 100), et montré qu'en traitant cet humus par des réactifs énergiques ce noyau azoté fixait de l'eau et fournissait de l'ammoniaque.

Au sein de la terre arable, les agents purement chimiques, producteurs d'ammoniaque (action de la chaux vive sur la terre dans le cas du chaulage) n'ont qu'une importance de second ordre comparée à celle des micro-organismes qui s'attaquent au complexe azoté de l'humus.



**Microbes ammonisants.** — Tous les sols renferment un nombre immense de microbes *ammonisants* dont l'action a été bien mise en évidence par Müntz (1890). Si, en effet, on prend des échantillons de terres acides, incapables de nitrifier, et qu'on les mélange à des matières riches en azote : sang desséché, rognures de corne, etc., on observe la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal. Des échantillons de terres compactes, chez lesquelles la nitrification est lente, fournissent des résultats analogues.

Le ferment nitrique ne résiste pas à une température de 70°; or, si on chauffe une terre à 90° et si on anéantit ainsi son action à coup sûr, on constate encore la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal. Mais si on élève la température jusqu'à 120°, l'ammonisation n'a plus lieu; elle reprend lorsqu'on réensemence la terre chauffée avec une parcelle de terreau.

Ce qui caractérise essentiellement cette genèse de l'ammoniaque, c'est qu'elle est réalisée par une foule de microorganismes très communs dans le sol : tous les auteurs sont d'accord sur ce point. Dans les terres arables contenant du calcaire, c'est l'action des bactéries qui domine; dans les terres acides c'est celle des mucédinées. Parmi les espèces les plus aptes à produire cette ammonisation, il faut citer le *Bacillus mycoïdes* (Marchal, 1893). Les mucédinées les plus communes qui possèdent cette faculté sont les *Aspergillus*, le *Mucor racemosus*, le *Fusarium Muntzii*, etc. Il s'agit donc, en somme, d'une *fonction banale* qui est l'œuvre des aérobies les plus divers, mais qui se rencontre également chez beaucoup d'anaérobies.

L'ammonisation rapide du noyau azoté de l'humus est une circonstance favorable au point de vue de la nutrition végétale lorsque l'ammoniaque ainsi produite se trouve dans les conditions requises pour sa nitrifica-

tion. Toutes les variétés d'humus ne fournissent pas de l'ammoniaque avec une égale facilité. A cet égard, l'emploi des engrais verts est de nature à donner des résultats satisfaisants si l'enfouissement des plantes a lieu lorsque leurs tissus sont jeunes et contiennent encore beaucoup de principes amidés susceptibles d'une prompt transformation en ammoniaque; aussi faut-il enterrer ces plantes à l'époque de leur floraison.

Lorsque le sol est calcaire et bien aéré, l'ammonisation est rapide.

L'ammoniaque ainsi formée peut persister dans le sol pendant un certain temps, surtout si la température est basse comme en hiver. A cette époque de l'année, la nitrification, qui exige une température un peu élevée, est presque suspendue.

D'autre part, le pouvoir absorbant s'exerce très largement vis-à-vis de l'ammoniaque, et l'on ne saurait craindre que les pluies, souvent abondantes à ce moment de l'année, entraînent cette base dans les profondeurs du sol où elle serait perdue pour la végétation.

Il est bon d'ajouter que l'ammoniaque et les sels ammoniacaux, sous certaines concentrations très faibles, peuvent fournir *directement* aux végétaux l'azote que ceux-ci réclament, indépendamment de toute nitrification.

**Fixation de l'azote gazeux.** — L'ammonisation du noyau azoté de l'humus ne constitue en réalité qu'une transformation de l'azote albuminoïde en azote ammoniacal : ce n'est pas une création de matière azotée.

Lorsque, dans les conditions normales, cette ammoniaque est oxydée et se change en acide nitrique, il s'agit encore ici d'une transformation et non d'une création de matière azotée. Si les eaux de la pluie traversent le sol, les nitrates que celui-ci contient, non retenus par le pouvoir absorbant, passent dans le sous-

sol, puis dans les eaux de drainage et dans les rivières où il sont perdus pour la végétation.

En vue d'expliquer le maintien du stock de l'azote combiné à la surface du globe, Schlœsing avait autrefois émis une théorie ingénieuse qui reposait sur les faits suivants. L'eau de mer ne s'enrichit pas indéfiniment en nitrates, bien qu'elle reçoive continuellement des quantités énormes de ces sels par l'intermédiaire des fleuves. Ces nitrates, dans la profondeur des océans où l'atmosphère est peu oxygénée, subirait une réduction avec production d'ammoniaque. Celle-ci, en vertu de sa tension, passerait dans l'air. Elle serait absorbée par la terre arable, puis changée en acide nitrique, et ainsi de suite.

Pour compenser les pertes d'azote combiné qui se produisent dans toutes les combustions vives d'une part et, d'autre part, dans le phénomène de la dénitrification que nous étudierons plus loin, il faut faire intervenir les décharges électriques qui sillonnent l'atmosphère et qui donnent naissance à une certaine quantité d'azote nitrique que l'on retrouve dans l'eau de la pluie.

Cependant cet apport d'azote combiné est peu considérable dans nos régions et ne permet pas d'expliquer ce fait — reconnu depuis que l'on sait exécuter des dosages exacts sur la terre arable — d'un enrichissement azoté progressif des sols en jachère.

Boussingault a montré, il y a longtemps, que la quantité d'azote contenu dans les récoltes est supérieure à celle que contiennent les engrais que l'on a distribués au sol. De plus, malgré l'exportation, hors des forêts, au moment d'une coupe, d'une quantité d'azote combiné très notable, le sol de ces forêts demeure indéfiniment fertile. Il y a donc lieu de se demander si, à la surface du globe il n'existe pas, en



dehors de la nitrification d'origine électrique, quelque cause de formation synthétique de l'azote combiné.

Il était tout naturel de penser que l'azote gazeux, contenu dans l'atmosphère en quantités prodigieuses, devait intervenir en se fixant *directement* soit sur la plante, soit sur la terre elle-même. Cette fixation qui présente un si haut intérêt agricole, a eu, pendant plus de soixante ans, des partisans et des détracteurs acharnés. La plupart des physiologistes s'étaient néanmoins rangés à l'opinion de Boussingault dont les expériences très soignées (1852) concluaient à la non-absorption de l'azote gazeux.

C'est Berthelot qui, le premier, montra en 1885 que la terre était susceptible de fixer *directement* l'azote gazeux de l'air, que cette fixation était indépendante du phénomène de la nitrification, et qu'il fallait considérer cette fixation, non pas comme un phénomène purement chimique, mais comme une manifestation microbienne.

Depuis cette époque, un nombre considérable de travaux sont venus appuyer cette manière de voir. Il s'agit ici, en effet, de l'intervention de microorganismes à action spécifique : les uns sont des anaérobies, les autres des aérobies.

Les physiologistes de tous les pays étaient d'autant plus portés à entreprendre une étude minutieuse des rapports entre l'azote et le sol que l'apparition du travail de Berthelot coïncidait avec la publication du mémoire fameux de Hellriegel et Wilfarth sur la fixation de l'azote gazeux par les légumineuses. On se trouvait donc en présence de deux causes spontanées d'enrichissement en azote dont on avait, à maintes reprises, reconnu les effets, mais dont la démonstration rigoureuse avait jusque-là fait défaut : ce qui autorisait les doutes ou les dénégations des partisans de l'école de Boussingault.

**Recherches de Berthelot (1885)** — Les sols mis en œuvre par Berthelot étaient des sols stériles, très pauvres originellement en azote et ne renfermant que de 1 à 3 grammes de carbone au kilogramme. Les résultats obtenus furent particulièrement nets pour deux sables argileux jaunes dont l'un contenait, à l'état initial, 0 gr. 0709 d'azote par kilog.

Cinq échantillons de l'un de ces sables furent soumis aux épreuves suivantes (les autres échantillons ont été traités de même façon) : 1° conservation en vase ouvert dans une pièce close ; 2° séjour au milieu d'une prairie sous abri ; 3° séjour au haut d'une tour de 29 mètres, avec apport des eaux pluviales et des poussières de l'air ; 4° conservation en vase clos ; 5° même disposition ; mais le vase, d'abord chauffé au bain-marie à 100°, fut ensuite bouché et abandonné à lui-même.

Dans les quatre premiers cas, on observe une fixation d'azote très notable au bout d'un certain temps, fixation indépendante du phénomène nitrificateur, puisque la dose initiale de l'azote nitrique, très faible d'ailleurs, s'était à peine accrue.

Citons les chiffres qui se rapportent à l'une des expériences : azote total à état initial (pour 1 kilogramme de sable) = 0 gr. 0709 ; au bout de 5 mois, azote = 0 gr. 0933 ; au bout de 13 mois 1/2, azote = 0 gr. 1109 ; au bout de 17 mois, azote = 0 gr. 1179. Le gain total de l'azote se monte donc à : 0 gr. 1179 — 0 gr. 0709 = 0 gr. 0470, soit 66 pour 100 de l'azote initial.

Ainsi que le fait remarquer Berthelot, ce gain d'azote ne saurait être illimité ; il est subordonné à la quantité de matière organique contenue dans le sol, très faible dans le cas des échantillons mis en expérience.

Par contre, la cinquième expérience, dans laquelle le vase contenant le sable avait été porté à une température de 100°, ne donna lieu à aucune fixation ; la dose

initiale de l'azote avait même légèrement diminué, probablement en raison de la réaction de la vapeur d'eau sur la matière azotée sous l'influence de la chaleur, avec départ d'un peu d'ammoniaque.

Ces essais montrent donc de façon irréfutable que certains sols peuvent fixer l'azote gazeux de l'atmosphère : la dernière expérience met en évidence ce fait que cette fixation, n'ayant pas eu lieu par suite du chauffage de la matière, ne peut être mise que sur le compte de la présence de certains organismes vivants et universellement répandus dans le sol.

Nous passons sous silence un certain nombre d'essais secondaires, ou douteux, destinés à isoler les êtres vivants agents du phénomène, et nous arrivons aux travaux des bactériologistes qui ont spécifié la nature et étudié le mode d'existence de ces microorganismes fixateurs.

On connaît avec certitude trois catégories de microorganismes fixateurs : des bactéries anaérobies, des bactéries aérobies et, probablement, certains champignons.

**Bactéries anaérobies ; expériences de Winogradsky.** — Le savant bactériologiste russe a, le premier (1895), mis en évidence de façon magistrale la présence dans le sol de bactéries anaérobies fixatrices d'azote en ensemençant avec une trace de terre un liquide complètement dépourvu d'azote et composé de la façon suivante : eau = 1000 grammes, phosphate bipotassique 1 gramme, sulfate de magnésium 0 gr. 5, chlorure de sodium et sulfate de fer 0 gr. 01 à 0 gr. 02. 100 grammes de ce liquide reçoivent de 2 à 4 grammes de glucose et un peu de calcaire. Les vases, stérilisés avant ensemencement, sont additionnés d'une trace de terre ; un courant d'air filtré les traverse jour et nuit.

Après un certain nombre de cultures dans ce milieu, on ne rencontre plus que trois organismes : 1° un *Clos-*



*tridium* (voisin des ferments butyriques), et deux micro-organismes aérobies, nommés simplement par l'auteur  $\alpha$  et  $\beta$ . Le calcaire se dissout, et l'on voit se développer une fermentation butyrique qui consomme le glucose.

Le point capital qui résulte de ce travail réside dans le fait suivant : seul le *Clostridium*, anaérobie, est capable de fixer l'azote gazeux de l'air ; mais, pour cela, il doit être protégé contre l'action de l'oxygène par les deux aérobies satellites  $\alpha$  et  $\beta$ . Ces deux dernières espèces, rencontrées dans le sol, et isolées en même temps que le *Clostridium*, parce qu'elles peuvent vivre dans des milieux très pauvres en azote, n'ont pas d'action spécifique. Elles peuvent, en effet, être remplacées par une mucédinée quelconque, aérobie, susceptible de soustraire l'oxygène au milieu ambiant.

On voit donc se manifester ici un bel exemple de *symbiose*. Cette symbiose n'est d'ailleurs pas indispensable, car la culture pure du *Clostridium*, suivie de la fixation de l'azote de l'air, peut être effectuée en l'absence de tout microbe aérobie si on opère dans un courant de gaz azote pur. Ce *Clostridium* a reçu de Winogradsky le nom de *C. Pasteurianum*.

Les cultures de cet anaérobie renferment les acides butyrique et acétique ; les gaz qui se dégagent sont formés d'un mélange d'hydrogène et d'anhydride carbonique.

D'après les expériences de l'auteur, le microorganisme fixerait, pour 1 gramme de glucose consommé, de 0 gr. 0025 à 0 gr. 0030 d'azote gazeux. On peut imaginer cette fixation comme résultant de la rencontre de ce dernier gaz avec l'hydrogène naissant : une production d'ammoniaque en serait la conséquence.

Depuis cette importante découverte, il a été rencontré dans le sol plusieurs anaérobies très voisins de ce *Clostridium*. Les dépôts de feuilles mortes en ferment toujours, et l'on doit admettre que le gain

d'azote qui, d'après Henry (1897), accompagne leur humification, est imputable à un microbe de ce genre.

D'après Bredemann (1908), les espèces fixatrices décrites sous les noms de *Clostridium*, *Granulobacter*, etc., devraient être rapportées au *Bacillus amylobacter* dont elles ne seraient que des variétés.

**Bactéries aérobies fixatrices d'azote.** — On doit, principalement à Beijerinck, la connaissance de ces bactéries très répandues. Elles portent le nom générique de *Azotobacter*. D'après cet auteur, l'espèce la plus commune est l'*A. chroococcum*, diplocoque de 3 à 5  $\mu$  de diamètre que l'on rencontre dans le terreau et dans toutes les terres fertiles. S'il ne semble pas exister dans les sols acides, on le trouve, par contre, dans l'eau douce et dans l'eau de mer où il vivrait en symbiose avec certaines algues. Sa culture est facile sur les milieux qui renferment, comme source de carbone, des hydrates de carbone, solubles ou non, de la mannite ou des propionates de potassium, de sodium, de calcium.

Ce microbe est capable de fixer sept milligrammes d'azote gazeux par gramme de substance carbonée détruite, et cet azote est facilement nitrifiable.

Les *Azotobacter* se développent très bien dans les sols chaulés ; les limites de température entre lesquelles leur activité se manifeste sont situées entre  $+ 5^{\circ}$  et  $+ 50^{\circ}$ , avec un optimum voisin de  $+ 28^{\circ}$ .

Quelle est, dans les conditions habituelles, la source de carbone à laquelle ils s'adressent ? L'humus bien consommé ne fournissant pas d'hydrates de carbone solubles par saccharification, il est probable que les débris cellulosiques de végétaux non encore humifiés constituent la base de leur alimentation carbonée.

Toutefois, les divers humus naturels ne se comportent pas de même vis-à-vis des *Azotobacter*. Une source

de carbone importante pour ces microorganismes doit être cherchée dans la symbiose qu'ils contractent avec certaines algues vertes susceptibles, par le jeu de la fonction chlorophyllienne, de leur fournir cet élément.

Il est presque superflu de s'étendre sur le rôle éminemment utile que jouent ces microorganismes dans la fécondité des terres arables. L'enrichissement lent, mais continu, en azote des sols en jachère s'explique par leur présence universelle dans les terres arables à la surface desquelles ils se multiplient de préférence en raison des travaux d'ameublissement qui y favorisent la pénétration de l'air. En outre, l'humus est plus abondant à la surface du sol recouverte, d'ailleurs, par une infinité d'algues vertes.

En vue d'exprimer l'enrichissement en azote imputable aux bactéries fixatrices, on a donné des chiffres variant de 10 à 50 kilogs par an et par hectare de terre soumise à la jachère. On ne saurait accorder une confiance absolue à ces évaluations; la fixation de l'azote gazeux dépend, en effet, d'un grand nombre de variables: température, humidité, réaction du sol, degré d'aération, nature et proportions de l'humus.

*Mucédinées fixatrices d'azote.* — Il est encore difficile de se prononcer d'une manière catégorique sur le point de savoir si, parmi les très nombreuses mucédinées que l'on rencontre à la surface du sol, il en est quelques-unes capables de fixer l'azote gazeux. *L'Aspergilles niger* a été regardé par beaucoup d'expérimentateurs comme un fixateur; pour d'autres, cette propriété serait très douteuse. Les mucédinées suivantes: *Mucor stolonifer*, *Microsporium commune*, *Hormodendron cladosporoides*, *Cladosporium herbarum* ont été rangées parmi les fixateurs d'azote gazeux. Il semble nécessaire que de nouvelles recherches soient entreprises pour éclaircir ce sujet:



## CHAPITRE XI

### OXYDATION DE L'AMMONIAQUE : NITRIFICATION DÉNITRIFICATION

Ainsi que nous l'avons dit plus haut (page 123), les végétaux peuvent absorber l'ammoniaque qui prend naissance dans le sol, et en assimiler l'azote avec profit. Ils sont également capables d'absorber l'ammoniaque des solutions artificielles, pourvu que cette base leur soit offerte sous de très faibles concentrations. Il n'est donc pas nécessaire que l'ammoniaque soit nitrifiée pour que la nutrition azotée soit assurée.

En outre, les plantes qui vivent dans les terrains acides (dépourvus de calcaire ou riches en humus) empruntent vraisemblablement, d'une façon directe, l'azote qu'elles réclament au noyau azoté complexe de l'humus.

Or, il est d'observation courante que l'ammoniaque ne persiste pas dans le sol lorsque certaines conditions de milieu sont réalisées. Lorsque le milieu est alcalin (calcaire) — ce qui doit être le cas de toute bonne terre arable — l'ammoniaque s'oxyde et se change en acide nitrique que neutralise la chaux du calcaire. Ce phénomène de la nitrification, d'une importance capitale pour la nutrition d'un nombre considérable de végétaux, ceux de la grande culture en particulier, fournit aux plantes l'azote sous une forme essentiellement soluble et diffusible.

Alors que l'ammoniaque produite par les bactéries les plus banales (page 122), aux dépens de l'azote de

l'humus, est énergiquement fixée par le pouvoir absorbant, l'azote oxydé, c'est-à-dire l'acide nitrique ou plutôt les nitrates, se diffuse dans le sol avec une grande rapidité : il s'enfonce dans les profondeurs à la suite de la pénétration des eaux pluviales lorsque les plantes n'ont pu s'en emparer.

Le phénomène de la nitrification est connu depuis très longtemps ; la présence du *nitre* (mélange de nitrates de potassium et de calcium) est constante dans les endroits où se rencontrent des matières azotées animales ou végétales et des sels calcaires (caves, décombres). Le nitre s'effleurit à la surface du sol dans les pays chauds. Il existe, enfin, au Chili et au Pérou, de très vastes gisements de nitrate de soude auxquels l'agriculture s'adresse tous les jours.

**Historique.** — Avant que l'on soupçonnât l'existence de microorganismes capables d'oxyder l'ammoniaque, on avait mis en avant bien des théories pour tenter d'expliquer l'apparition du nitre, soit dans le sol, soit dans certaines localités chaudes du globe. Sans vouloir traiter ici ce sujet à fond, disons cependant que, indépendamment de la nitrification atmosphérique produite par les décharges électriques, on admettait le plus souvent autrefois que la rencontre de l'azote gazeux et de l'oxygène au sein de la terre, agissant comme corps poreux (catalyseur), engendrait de l'acide nitrique.

Lorsque les expériences de Köhlmann et celles de Schönbein eurent montré qu'il y avait formation de cet acide quand on faisait passer un mélange d'ammoniaque et d'oxygène sur de la mousse de platine chauffée à 300°, on imagina que la nitrification naturelle consistait, non plus en une oxydation de l'azote libre, mais en une oxydation de l'ammoniaque par simple contact avec la terre arable.

Si l'on ignorait la cause première du phénomène, les

moyens ne manquaient pas pour provoquer la nitrification des matières azotées complexes. La fabrication des *composts* en est une preuve. Chaque fois, en effet, que les matières organiques les plus variées (feuilles mortes, déchets de substances alimentaires, résidus de toute nature) sont mises au contact du calcaire et remuées de temps en temps pour favoriser l'accès de l'air, l'azote que ces matières renferment se change peu à peu en azote nitrique si on a soin, toutefois, de maintenir au sein de la masse un certain degré d'humidité.

La question de la nitrification prit un très grand intérêt lorsque, à la suite des recherches de Boussingault principalement, il fut démontré que les végétaux s'assimilaient très bien l'azote des nitrates, et qu'il n'était pas nécessaire — ainsi qu'on l'avait avancé souvent — que ces nitrates se transformassent d'abord en ammoniacque pour concourir au développement végétal.

A cette époque déjà lointaine, où l'essence même du phénomène était inconnue, et où on lui attribuait encore des origines multiples et purement chimiques, on se demandait si l'azote de l'air n'entrait pas, plus ou moins directement en jeu, et si, en somme, la nitrification n'était pas créatrice, à la surface du globe, d'un stock important d'azote combiné, prélevé directement sur l'atmosphère.

Ce fut Boussingault qui, par des mesures très précises, démontra, il y a 60 ans, que l'azote gazeux de l'air ne participait pas directement au phénomène nitrificateur.

**Conditions de la nitrification.** — Mais si la cause véritable de la nitrification demeurait encore inconnue, on pouvait néanmoins conclure des expériences de Boussingault que la marche régulière de ce phénomène exigeait la réalisation des cinq conditions suivantes, très bien étudiées par Schlœsing (1873).



1° *Présence d'une matière organique azotée* prise dans son état naturel; la quantité d'acide nitrique formée est, en effet, proportionnelle au poids de l'azote de la matière organique présente; 2° *Présence de l'oxygène*; si on fait varier la dose de ce gaz dans les vases où se font les expériences, on remarque que l'activité du phénomène est proportionnelle à la dose de l'oxygène qui y est enfermée. Au sein d'une atmosphère d'azote pur, la nitrification n'a plus lieu et, de plus, les nitrates préexistants sont détruits; 3° *Présence d'une base capable de saturer l'acide nitrique*; dans les milieux acides il n'y a pas de nitrification; 4° *Présence d'une certaine dose d'humidité*; le phénomène nitrificateur possède son intensité la plus grande quand la terre est imbibée d'eau au maximum et bien ressuyée; 5° *Un certain degré de température*; nulle à  $+ 5^{\circ}$ , la nitrification cesse aux environs de  $+ 57^{\circ}$ , elle est maximum vers  $+ 37^{\circ}$ .

**La nitrification est corrélative de la présence d'un être vivant.** — Si les conditions énumérées ci-dessus sont indispensables à la production du nitre, la cause elle-même du phénomène reste encore cachée. C'est à Schlœsing et à Müntz (1877) que l'on doit cette notion fondamentale : *la nitrification est corrélative de la présence d'un être vivant.*

Ces auteurs font remarquer que l'idée directrice qui les a guidés dans la recherche de la cause première de la nitrification est toute entière dans cette opinion que Pasteur émettait en 1862, et que l'on peut formuler ainsi : l'action de l'oxygène de l'air sur les matières organiques est singulièrement bornée lorsque cette action s'exerce en l'absence de microorganismes; beaucoup d'êtres inférieurs possèdent, au contraire, le pouvoir de fixer l'oxygène sur les matières organiques complexes qu'ils résolvent finalement en eau, gaz carbonique, azote, ammoniacque, acide nitrique.

Le problème de la nitrification se posait d'une façon particulièrement intéressante dans la question de l'épuration des eaux d'égoût. Schlœsing et Müntz se demandèrent si la combustion de la matière organique n'avait lieu qu'au sein de la terre végétale (comme dans les expériences de Boussingault), ou bien si cette combustion pouvait s'opérer simplement dans une masse de sable dépourvue de matière organique. A cet effet, dans un large tube d'un mètre de longueur, fermé par une toile métallique à son extrémité inférieure, on introduit 5 kilogs de sable quartzeux calciné et mélangé avec 100 grammes de calcaire. Le sable est arrosé chaque jour avec une quantité constante d'eau d'égoût, calculée de telle sorte que la descente s'effectue en huit jours. Un courant lent d'air circule dans la masse, introduit par refoulement de haut en bas. Remarquons que les cinq conditions que nous avons reconnues indispensables sont ici réalisées : la matière organique azotée est apportée par l'eau d'égoût, la masse sableuse a été rendue alcaline par addition de calcaire, l'oxydation est assurée par le passage du courant d'air, la température est la température ambiante.

L'eau qui s'écoula pendant les vingt premiers jours était simplement filtrée, elle contenait un taux invariable d'ammoniaque, mais pas d'acide nitrique. Au bout de ce temps, l'acide nitrique apparut à mesure que disparaissaient peu à peu l'ammoniaque et l'azote organique. Schlœsing et Müntz font remarquer que s'il s'agissait d'un simple phénomène de combustion, on ne comprendrait pas pourquoi celle-ci aurait demandé un temps aussi long avant de se manifester. On saisit mieux la cause de ce retard en admettant la présence d'un être vivant ayant exigé un certain temps pour se développer et exercer ensuite sa fonction comburante.

Si l'on se rappelle que les êtres vivants, en général,

sont anesthésiés par les vapeurs de chloroforme et que leurs fonctions sont suspendues, ainsi que Müntz l'avait montré quelques années auparavant, l'existence présumée de pareils êtres dans l'expérience actuelle peut se changer en certitude. A cet effet, il suffit de placer à la partie supérieure du grand tube un vase contenant du chloroforme dont les vapeurs, entraînées par le courant d'air, pénétreront peu à peu dans la masse sableuse.

Dix jours après cette intervention, les eaux qui s'écoulent ne renferment plus d'acide nitrique, et l'on voit réapparaître l'ammoniaque et l'azote organique : la preuve est ainsi faite de l'existence d'un organisme vivant capable d'oxyder l'ammoniaque.

Schlœsing et Müntz démontrèrent facilement la présence de cet être dans la terre arable elle-même. Pour cela, on remplit deux allonges avec une même terre, au travers de laquelle on fait circuler un courant d'air flambé. L'une des allonges est munie d'un récipient contenant du chloroforme. La nitrification se poursuit régulièrement dans l'allonge sans chloroforme, elle est suspendue dans celle où les vapeurs de l'anesthésique se sont répandues.

Que l'on prenne encore deux allonges contenant une même terre et que l'on chauffe l'une d'elles à 100° pendant un temps suffisant : on remarquera que la nitrification se poursuit dans l'allonge non chauffée, alors que dans l'autre elle est suspendue. Toutes ces expériences sont parfaitement concordantes ; elles autorisent donc à affirmer que la nitrification est bien corrélative de la présence d'un être vivant.

Schlœsing et Müntz tentèrent ensuite d'isoler, à l'état de pureté, cet être vivant, en ensemençant une trace de terre sur un milieu artificiel comportant un sel ammoniacal et une substance carbonée. Le résultat, positif



dans la majorité des cas, ne laisse aucun doute sur les propriétés oxydantes de l'organisme ainsi isolé ; mais, étant donnée l'imperfection des méthodes bactériologiques à cette époque déjà lointaine, et, surtout, le mode de nutrition carbonée très particulier de cet organisme que nous examinerons bientôt, la nitrification s'établissait parfois de façon irrégulière dans ces milieux artificiels. De plus, on voyait apparaître tantôt des nitrites dont la formation précédait celle des nitrates, tantôt, les nitrates, après avoir d'abord pris naissance, semblaient être réduits et se changeaient en nitrites.

Un agronome anglais de haute valeur, Warington (1879), avait essayé d'interpréter ces résultats bizarres en les mettant sur le compte de la température du milieu, ou bien de la dilution, ou de la concentration trop grande des liqueurs, ou bien encore de la facilité plus ou moins grande d'accès de l'oxygène atmosphérique.

Vers cette même époque, certains expérimentateurs, parmi lesquels il faut citer Munro, P. et G. Frankland, avaient noté des irrégularités de même nature dont l'explication paraissait malaisée. D'autres enfin (Heræus, Hueppe, Löw) remarquèrent que la nitrification semblait se produire d'autant mieux que le milieu de culture renfermait moins de substances carbonées.

**Travaux de Winogradsky (1890-92).** — Toutes ces incertitudes devaient se dissiper à la suite des travaux remarquables entrepris par Winogradsky. Le premier, cet auteur fit voir — ce qui avait été soupçonné avant lui, mais non démontré — que l'oxydation biologique de l'ammoniaque se passe en deux temps : 1° Dans un premier stade, l'ammoniaque s'oxyde et donne naissance à l'acide nitreux ; ce stade se produit sous l'influence d'un microorganisme spécial, à action spéci-

fique. Dans un second stade, l'oxydation porte sur l'acide nitreux et engendre de l'acide nitrique; ce stade se produit sous l'influence d'un autre microorganisme, à action spécifique, différent du premier et incapable à lui seul d'oxyder l'ammoniaque.

De plus, les microbes nitreux et nitrique — car c'est ainsi que l'on doit appeler maintenant les deux agents qui oxydent l'ammoniaque — absorbent le gaz carbonique aérien et en assimilent le carbone, bien qu'ils soient dépourvus de chlorophylle.

Il faut, à ce propos, faire remarquer ici que Schlœsing et Müntz avaient montré, à l'aide de leurs cultures artificielles, que si les microorganismes qui oxydent la matière organique sont très nombreux dans la nature, la nitrification n'est cependant pas une fonction oxydante banale. En effet, les mucédinées que l'on rencontre si communément (*Mucor mucedo*, *M. racemosus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium glaucum*, etc.), sont incapables d'oxyder l'ammoniaque; elles empruntent facilement leur azote aux nitrates, faisant ainsi disparaître ceux-ci du milieu où ils se forment.

Revenons maintenant aux expériences de Winogradsky.

Dès le début de ses recherches, cet auteur se heurta à la difficulté d'obtenir une nitrification régulière en présence d'une matière organique. Il semblait cependant naturel d'introduire dans le milieu de culture artificiel une substance carbonée capable de subvenir aux besoins de la nutrition de microbes dépourvus de chlorophylle. Or, si l'on enseme une goutte d'un liquide en pleine nitrification sur une solution *purement minérale* (contenant pour 1000<sup>cc</sup> d'eau, 1 gr. de sulfate d'ammonium, 1 gr. de phosphate de potassium et 1 gr. de carbonate de magnésium), on obtient, au bout de quatre jours, une réaction très nette avec le sulfate

de diphénylamine, qui se colore en bleu intense (notons que cette réaction indique aussi bien la présence des nitrites que celle des nitrates).

La plupart des espèces qui peuvent se développer dans ce milieu très spécial vivent à la surface des liquides de culture : or, si on les isole, et si on les ensemece sur gélatine, aucune d'elles n'est capable d'oxyder l'azote ammoniacal. Ce procédé d'isolement est donc impropre à mettre en évidence la présence du microbe nitrificateur.

L'observation suivante révéla à la fois son existence, et mit sur la voie de son mode très particulier de nutrition carbonée.

Lorsque la nitrification est intense, la couche de carbonate de magnésium, qui occupe le fond des matras de culture, se trouble et se couvre d'un enduit gélatineux. Si on prélève une goutte de liquide au sein même de cette masse gélatineuse, et si on l'ensemence sur un milieu analogue à celui dont la composition a été donnée plus haut, on obtient d'emblée une nitrification intense.

On comprend maintenant les irrégularités observées au début de ces recherches : le liquide prélevé à la *surface* d'une culture en voie de nitrification pouvait ne pas contenir le microbe nitrificateur puisque celui-ci semble contracter une sorte d'adhérence spéciale avec le carbonate de magnésium auquel il emprunte en réalité, comme nous le verrons, le carbone indispensable à son développement.

Il fut donc possible, à la suite de cette remarquable observation, de préparer une série de cultures dans lesquelles la nitrification ne subissait aucun retard et acquerrait en quelques jours son maximum d'intensité.

**Acide nitreux.** — Si on examine maintenant la nature du composé oxygéné de l'azote qui prend nais-



sance ainsi, on constate la présence à peu près *exclusive* d'acide nitreux. L'insuffisance de l'aération pourrait être incriminée par suite de l'épaisseur trop grande de la couche liquide : il en résulterait une oxydation incomplète. Or, si on diminue cette épaisseur en la réduisant à quelques millimètres, on observe encore la même chose. Étant donnée la constance du phénomène, Winogradsky fut amené à reprendre une idée, émise plusieurs années auparavant par Munro, d'après laquelle la nitrification exigerait le concours de deux êtres distincts, l'un produisant des nitrites, l'autre des nitrates.

S'étant procuré des échantillons des terres les plus variées et les ayant ensemencés dans le milieu ammoniacal, l'auteur résolut de laisser se développer *librement* tous les êtres capables de croître dans ce milieu de culture purement minéral. La période d'incubation variait de trois à vingt jours, suivant la terre employée, et l'on constatait toujours les particularités suivantes : d'abord apparition d'azote nitreux, puis, disparition graduelle, coïncidant avec l'apparition d'azote nitrique. On en conclut donc que les organismes nitrificateurs, transportés directement de leur milieu naturel dans un milieu facilement nitrifiable, donnent d'abord de l'acide nitreux ; puis, quand l'ammoniaque a totalement disparu, de l'acide nitrique. Il est même des cas où, à l'aide de certains artifices de culture, l'apparition de l'acide nitreux est si fugace, que l'on constate du premier coup la formation de l'acide nitrique.

Il faut donc admettre que l'oxydation de l'ammoniaque est l'œuvre de *deux microorganismes distincts*. Le ferment nitreux — facile à isoler à l'état de pureté sur des liquides qui ne renferment que des sels ammoniacaux — conservé pendant très longtemps sur de pareils milieux, est incapable de fournir un produit d'oxydation plus avancée. Winogradsky nomme ce fer-

ment *Nitrosomonas* (ferment de l'ancien monde) et *Nitrosococcus* (ferment du nouveau monde). Il se présente sous la forme d'une ellipse dont le grand diamètre a une longueur de 1.1 à 1.8  $\mu$ , et le petit diamètre une longueur de 0.9 à 1  $\mu$ .

**Acide nitrique.** — Si l'oxydation de l'ammoniaque, avec production d'acide nitreux, est une fonction spécifique dévolue à un organisme spécial, l'oxydation de l'acide nitreux avec production d'acide nitrique est également l'œuvre d'un ferment spécifique (*Nitromonas*, *Nitrobacter*). Le ferment nitrique est un organisme d'une extrême petitesse, son diamètre moyen est de 0.5  $\mu$ . On peut l'isoler à l'état de pureté en faisant usage de liqueurs également minérales, mais contenant, non plus un sel ammoniacal, mais un nitrite tel que celui de potassium. On observe alors la formation régulière de l'acide nitrique. Ce ferment nitrique ensemencé dans un milieu minéral contenant un sel ammoniacal ne fournit pas traces d'azote oxydé.

La conclusion que nous avons formulée plus haut s'impose donc d'une façon absolue : il faut l'intervention de deux microorganismes à action spécifique pour changer l'azote de l'ammoniaque en acide nitrique.

**Nitrification dans la terre arable.** — Le phénomène nitrificateur évolue, dans le milieu naturel où il a lieu, c'est-à-dire dans la terre arable, d'une façon un peu différente. Si on stérilise un certain nombre d'échantillons de terre et, après les avoir additionnés de sulfate d'ammonium, si on les ensemence, 1<sup>o</sup> avec du ferment nitreux pur, 2<sup>o</sup> avec du ferment nitrique pur, 3<sup>o</sup> avec un mélange des deux ferments (un échantillon, témoin non stérilisé permettant de suivre la marche de la nitrification naturelle), on constate que, dans le troisième cas, il y a formation exclusive de nitrates ; les nitrites n'ont qu'une existence passagère. Si on

ajoute des quantités notables de sulfate d'ammonium, l'oxydation des nitrites par le ferment nitrique n'est pas entravée, alors que, dans les solutions artificielles, la présence de l'ammoniaque en excès met un obstacle à l'oxydation des nitrites.

Dans le premier cas il ne se produit que des nitrites, dans le second on n'observe la présence d'aucun composé oxygéné de l'azote.

**Nutrition carbonée des organismes nitrificateurs.** — La difficulté d'obtenir des cultures pures de microbes nitrifiants en présence de matières organiques, suivie d'un succès complet lorsqu'on éloigne du milieu artificiel toute trace de carbone, faisait pressentir que ces microbes devaient avoir un mode de nutrition très spécial. Cette particularité remarquable avait d'ailleurs déjà attiré l'attention de Heræus (1886). Winogradsky, en vue de rendre le fait indiscutable, prépara des milieux rigoureusement exempts de matières organiques. Le microbe nitreux, aussi bien à la lumière qu'à l'obscurité, s'y développe régulièrement. En outre, le dosage du carbone, exécuté sur des cultures en pleine activité, montre que l'assimilation de 1 milligramme de carbone correspond, en moyenne, à l'oxydation de 35 milligrammes d'azote. On se trouve donc ici en présence d'un microorganisme incolore, capable d'extraire d'un milieu purement minéral le carbone dont il a besoin.

Winogradsky avait pensé que ce carbone provenait du carbonate minéral avec lequel le microbe était en contact dans le milieu de culture. Godlewski (1893) fit voir que, en réalité, c'est le gaz carbonique lui-même qui constitue l'origine du carbone. En effet, si l'on fait passer au travers des ballons de culture un courant d'air bien dépouillé de gaz carbonique, le microbe nitreux ne se développe pas : il n'en est plus de même



en présence de l'air ordinaire. D'ailleurs, la dose initiale de gaz carbonique libre peut être très faible car, au fur et à mesure que la nitrosomonade produit de l'acide nitreux, celui-ci décompose les carbonates et met en liberté du gaz carbonique.

**Remarques sur les propriétés biologiques des organismes nitrificateurs.** — Les travaux de Winogradsky que nous venons d'exposer ont reçu, depuis leur apparition, une confirmation presque complète de la part des nombreux expérimentateurs qui se sont occupés de ce sujet. On comprend facilement l'intérêt qui s'attache à l'étude approfondie de la nitrification si l'on songe que ce phénomène joue un rôle de premier ordre dans l'épuration des eaux d'égoût et des eaux résiduelles en général.

Nous mentionnerons ici quelques faits complémentaires destinés à élucider certains points spéciaux.

Parmi les auteurs qui ont récemment contribué aux progrès de cette question, il faut mentionner, en France, Boullanger et Massol.

Le ferment nitreux ne peut être isolé que sur milieu purement minéral; le ferment nitrique, au contraire, peut être isolé sur gélose. Le ferment nitreux est polymorphe; il se présente, soit sur la forme de bactéries sphériques, immobiles, ayant  $3 \mu$  de diamètre (*Nitrosococcus*), soit sous la forme de batonnets courts, elliptiques, mobiles (*Nitrosomonas*).

Le ferment nitrique n'est connu que sous une forme, celle de petits bâtonnets immobiles de  $0.5 \mu$  de long sur  $0.25 \mu$  de large.

Le ferment nitreux est capable d'oxyder l'ammoniaque tant que la concentration du milieu ne dépasse pas 30 à 50 grammes de sulfate d'ammonium par litre : cette transformation est possible en présence de presque tous les carbonates!

L'activité du ferment nitrique est susceptible de s'exercer dans des milieux contenant jusqu'à 20 grammes de nitrite par litre. Si le travail de ce ferment est gêné par la présence de matières organiques, sa sensibilité est cependant moindre à cet égard que celle du ferment nitreux (il peut être, en effet, cultivé sur gélose, ainsi que nous l'avons dit plus haut). Par contre, il présente une sensibilité très grande vis-à-vis de l'ammoniaque (Winogradsky). Boullanger et Massol ont montré, par la suite, que l'action de l'ammoniaque est préjudiciable au ferment nitrique *végétal*, dont elle entrave la multiplication, mais que cette action n'a qu'une faible influence sur la *fonction oxydante* du microbe développé.

On peut estimer que l'action nocive des matières organiques sur les microbes nitrificateurs est du même ordre : ces matières mettent obstacle à leur multiplication, mais n'ont guère d'influence sur le travail des microbes bien développés.

**Nitrification naturelle.** — L'expérience montre qu'au sein de la terre arable la nitrification aboutit d'emblée à la formation de nitrates. La présence de nitrites est, le plus souvent, difficile à constater. Ce n'est que dans le cas de l'épandage exagéré de sels ammoniacaux, ou dans le cas de submersion temporaire d'un sol, que l'on peut rencontrer l'acide nitreux.

Or, dans les cultures artificielles de microbes nitrificateurs, on remarque, comme nous l'avons déjà dit, presque toujours deux phases distinctes : l'ammoniaque passe d'abord à l'état d'azote nitreux ; puis, quand cette phase nitreuse est terminée, la phase nitrique commence.

Ainsi que le font remarquer Boullanger et Massol, Winogradsky et Oméliansky se sont appuyés sur cette observation, ainsi que sur l'extrême sensibilité du fer-

ment nitreux vis-à-vis des matières organiques, pour expliquer les phénomènes de la nitrification naturelle. Entravé dans son développement par la présence des matières organiques, le ferment nitreux ne fait sentir son action oxydante que lorsque la décomposition de ces matières par les microbes ammonisants est déjà très avancée. Quant au ferment nitrique, si sensible à l'action de l'ammoniaque, il demeure à l'état de repos pendant toute la durée de la phase nitreuse : il ne commence à oxyder l'acide nitreux qu'après la disparition des dernières traces d'ammoniaque.

Comment peut-on concilier ces deux modes différents d'oxydation ? D'après Boullanger et Massol, les choses se passeraient ainsi. Dans les cultures artificielles, on ensemece les deux ferments en petite quantité sur un milieu riche en ammoniaque. Le ferment nitrique se développe mal ou pas du tout, et la phase nitreuse prend fin avant que la phase nitrique ait débuté. Mais si on ajoute de l'ammoniaque, même à forte dose, après une première période de nitrification qui a permis le développement progressif des deux microorganismes, l'action de cette ammoniaque devient insensible : les deux ferments travaillent simultanément et le phénomène se poursuit comme dans les conditions naturelles. Il ne se forme que des traces d'acide nitreux.

En présence des matières organiques, la multiplication du ferment nitreux est difficile au début. Lorsque ce ferment s'est développé, on peut ajouter d'assez grandes quantités de matière organique sans que la marche du phénomène soit modifiée. Or, dans la terre arable, on se trouve en présence de conditions identiques. Le sol (et les lits bactériens d'épuration des eaux d'égout) sont des supports en voie de nitrification continue ; les doses habituelles de matière organique



et d'ammoniaque qu'ils renferment sont à peu près sans action sur la marche normale du phénomène qui aboutit à la formation de l'acide nitrique. La nitrification, telle qu'elle se passe dans la nature, résulte donc d'une *symbiose*, ou d'un travail commun, des ferments nitreux et nitrique; elle ne comporte pas deux périodes séparées d'oxydation, telles que celles que l'on observe dans les cultures artificielles.

**Facteurs qui influencent la nitrification naturelle.** — La *teneur en eau* d'un sol joue un rôle capital dans la bonne marche d'une nitrification naturelle, en supposant que le sol contienne une dose suffisante de calcaire. On ne peut, à l'égard de l'eau, fixer *à priori* aucun chiffre, car la dose optimum d'humidité dépend avant tout de la structure physique de la terre considérée.

Si on suppose que les éléments grossiers dominant, une dose d'eau, relativement faible, assurera la marche d'une nitrification régulière. Si les éléments fins l'emportent, la teneur en eau devra être plus élevée.

Pour un même taux d'humidité, chez une terre resuyée — c'est-à-dire une terre dont les espaces capillaires ne renferment pas de liquide, et où la seule humidité consiste dans la présence d'une pellicule aqueuse qui entoure chaque particule — l'épaisseur de cette couche aqueuse sera d'autant plus petite que la finesse des particules sera plus grande. Il peut même arriver que cette épaisseur soit si faible qu'elle apporte une entrave à la vie microbienne.

C'est là un fait très important sur lequel Schløesing fils (1897) a appelé l'attention. Il suffit, en effet, d'augmenter, souvent dans de très petites proportions, la dose initiale de l'eau, incapable jusque là de pourvoir à l'exercice normal de la nitrification, pour assurer la marche régulière du phénomène. C'est ce que l'on

observe couramment dans le cas des terres dites *fortes*. On a tendance à croire parfois que le défaut principal de ces terres consiste en un manque d'aération ; il n'en est rien. Car, en augmentant quelque peu leur degré d'hydratation, on diminue évidemment le volume de l'air compris entre leurs particules, et cependant l'expérience montre que l'on favorise ainsi largement l'activité des ferments nitrificateurs.

*La nature de l'azote organique* que contient une terre possède également une influence très grande sur la marche de la nitrification. On comprend qu'il doive en être ainsi. Nous savons, en effet, que l'humus est une matière très hétérogène et que, de l'ammonisation plus ou moins rapide de tel de ses noyaux dépend, toutes choses égales d'ailleurs, le travail des ferments nitrificateurs.

Ces arrêts ou ces retards dans la nitrification s'observent couramment sans qu'on puisse les mettre sur le compte d'une autre cause : on les a souvent même notés dans la période la plus chaude de l'année, à une époque où, par conséquent, l'activité microbienne est particulièrement intense.

**Nitrification dans les terres acides.** — Il semble que la nitrification ne puisse s'établir dans les terres dépourvues de calcaire, puisqu'une des conditions essentielles du phénomène, l'alcalinité du sol, fait ici défaut. Aussi la présence de nitrates dans un pareil milieu a-t-elle été niée par beaucoup d'auteurs. Cependant les ferments nitrifiants existent dans les terres acides — que celles-ci doivent leur acidité à un excès d'humus (tourbières, terres de prairies), ou à leur constitution minérale (terres granitiques). Il suffit, en effet, d'introduire dans ces sols de la chaux ou une marne calcaire pour faire sortir l'azote complexe de son inertie.

Les terres chargées de matières organiques supportent cependant une flore très variée. Les végétaux qui s'y développent empruntent certainement leur azote de façon directe à la matière humique. Les racines de ces plantes sont pourvues de champignons symbiotes (*mycorhizes*) destinés à digérer l'humus ou, du moins, certains de ses constituants, et à pourvoir ainsi aux besoins du végétal en azote.

**Dénitrification; phénomènes généraux.** — Si dans les conditions normales où se trouve la terre arable on assiste d'abord à l'ammonisation de l'azote humique, puis à l'oxydation totale de l'ammoniaque avec formation d'acide nitrique, il se produit, par contre, dans telles circonstances que nous allons définir, une série de phénomènes inverses dans lesquels on observe successivement le retour de l'azote nitrique à l'état nitreux. Souvent même la réduction va plus loin et elle aboutit à un dégagement d'azote gazeux. Il y a donc ici perte d'azote combiné. C'est à cette série de phénomènes réducteurs que l'on donne le nom de *dénitrification*.

L'oxydation de l'ammoniaque dépend de la présence dans le sol de certains microorganismes dont nous avons étudié le mode de fonctionnement dans les pages précédentes; la réduction de l'acide nitrique est également subordonnée à la présence de microorganismes particuliers. Le nombre de ceux-ci paraît être assez grand et leur existence dans la terre est constante. Mais, bien que des travaux très nombreux aient été consacrés depuis près de 40 ans à leur identification, l'étude de leurs propriétés biologiques présente encore beaucoup d'obscurité.

On saisit cependant l'importance du sujet; car si l'agriculteur a le plus grand intérêt à provoquer et à accélérer la nitrification en vue d'augmenter la produc-



tion végétale, il convient, par contre, de connaître dans quelles conditions les nitrates sont susceptibles de disparaître et quelles sont les mesures à prendre pour mettre obstacle à ce phénomène réducteur qui prive les plantes d'un aliment de premier ordre.

Il est un point sur lequel il convient d'appeler l'attention. Lorsqu'il s'agit de la putréfaction des matières azotées exemptes de nitrates, on peut avancer que les gaz qui se dégagent ne renferment pas d'azote libre ou, du moins, n'en renferment que très peu. C'est ce qui ressort nettement des expériences de Schlœsing (1889). La nature de l'azote subit de profondes modifications; il se produit le plus souvent des quantités notables d'ammoniaque; mais l'azote gazeux n'apparaît qu'à l'état de traces, soit que l'on opère en présence ou en l'absence d'oxygène. La putréfaction du sang enfermé dans un vase clos en est un exemple. Mais, si, à un milieu en voie de putréfaction, on ajoute un nitrate, l'azote gazeux apparaît, en même temps que l'on observe, assez souvent, la présence de composés oxygénés inférieurs de l'azote.

**Ubiquité des ferments dénitrificateurs.** — Les expériences méthodiques de Gayon et Dupetit (1882-1885) montrèrent, pour la première fois, qu'il existe des ferments dénitrificateurs dans l'atmosphère elle-même. Si, en effet, on abandonne à l'air libre du bouillon dans lequel on a dissous de l'azotate de potassium, le liquide, qui se trouble peu à peu et se peuple d'organismes microscopiques, contient bientôt de l'azotite de potassium.

De cette culture spontanée les auteurs purent isoler quatre espèces microbiennes, anaérobies, auxquelles cette réduction était imputable. Certains organismes pathogènes : microbe du choléra des poules, vibrion septique, bactériidie charbonneuse possèdent le même

pouvoir réducteur que l'on retrouve aussi chez certains organismes vivant dans les eaux d'égout (*Bacterium denitrificans*  $\alpha$  et  $\beta$ , anaérobies). Le terreau et la terre végétale en referment également, et l'on peut obtenir une réduction des nitrates contenus dans ces deux milieux en opérant au sein d'une atmosphère d'azote.

Il résulte de cette dernière observation que si la présence des dénitrificateurs est constante dans la terre arable, leur action doit être nulle ou peu efficace dans les conditions normales d'un bon sol, suffisamment aéré, et ne contenant pas une dose d'eau excessive.

En fait, la présence des nitrites est rare lorsque l'oxygène ne fait pas défaut. Mais, si par suite d'une compacité trop grande ou par suite de la présence d'une couche d'eau à la surface du sol, la libre circulation de l'oxygène n'est plus assurée, on peut constater l'apparition des nitrites; parfois même la réduction porte sur ces derniers et il se dégage de l'azote gazeux.

Les phénomènes de dénitrification ont été également observés dans les circonstances suivantes. L'apport dans le sol d'une quantité exagérée de fumier de ferme, surtout de fumier frais, provoque, en effet, un arrêt de la nitrification et la destruction même des nitrates préexistants. Les microbes dénitrificateurs sont alors véhiculés par les excréments dans lesquels on les rencontre de façon constante, ainsi que l'ont montré beaucoup d'expérimentateurs. Dans ces conditions, la présence d'une masse considérable de matière organique ralentit les oxydations en général, celle de l'ammoniaque en particulier; et le milieu, jusque là favorable à la nitrification, se transforme en milieu réducteur. Dans le cas de l'apport de fumier consommé — et à des doses qui excèdent rarement soixante tonnes à l'hectare — les phénomènes réducteurs n'ont plus lieu, et la nitrifi-

cation, conformément d'ailleurs à l'observation de tous les jours, se poursuit de façon régulière.

D'après les expériences que nous avons rapportées plus haut, il semble qu'il existe deux stades dans le phénomène dénitrificateur. Le premier engendrerait, par désoxydation partielle, des nitrites ; le second donnerait naissance à de l'azote gazeux par suite d'une réduction totale. Le premier stade n'aurait — au point de vue de la nutrition végétale et du maintien du stock de l'azote combiné — que peu d'inconvénients. En effet, lorsque les conditions d'aération redeviendraient normales, les nitrites se transformeraient de nouveau en nitrates.

De plus, il a été démontré que l'azote nitreux, au même titre que l'azote nitrique, était assimilable par les plantes, au moins en solution très diluée.

Au contraire, par suite des phénomènes qui se passent dans le second stade, les nitrates disparaissent par réduction totale, et sont ainsi perdus pour la végétation.

Voyons si, à ces deux stades, correspond le travail d'agents microbiens uniques ou différents.

**Ferments dénitrifiants vrais ; ferments dénitrifiants indirects.** — Il est impossible, dans ces courtes pages, de donner un aperçu, même sommaire, des controverses nombreuses qu'a suscitées l'étude des ferments dénitrifiants. Nous nous contenterons d'exposer les résultats des recherches déjà anciennes de Grimbert (1898-1899) dont les conclusions, confirmées par des travaux ultérieurs, nous paraissent très nettes.

Grimbert distingue deux catégories de bactéries dénitrifiantes. La première comprend les microbes, tels que le *Bacillus pyocyaneus*, qui s'attaquent directement aux nitrates dont ils utilisent l'oxygène pour brûler le carbone de substratum. Le gaz carbonique libéré se

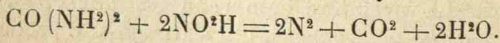


fixe sur la base devenue libre du nitrate, et le milieu prend une réaction alcaline.

En effet, ensemencé sur une solution de peptone nitratée, ce bacille ne dégage que de l'azote pur, exempt de gaz carbonique, et le volume de cet azote est égal à celui que contient le nitrate détruit. Le bacille pyocyanique, ainsi que ceux qui produisent une réaction semblable, constituent les *dénitrifiants vrais*.

La seconde catégorie comprend les microbes qui réduisent d'abord les nitrates en nitrites (*Bacterium coli commune*, *Bacillus typhosus*). Cultivés sur l'eau peptonée à 1 pour 100, contenant 1 pour 100 de nitrates, ces microbes réduisent partiellement ceux-ci avec formation de nitrites, sans qu'il y ait dégagement gazeux.

Mais si on cultive ces mêmes microbes sur du bouillon de bœuf peptoné et nitraté, il se dégage des gaz en abondance. La substitution d'un milieu à un autre occasionne donc un changement profond dans les fonctions de ces deux microorganismes. Dans ce dernier cas, la réaction du milieu demeure neutre, et le volume de l'azote qui se dégage est le double de celui qui répond à l'azote du nitrate. Grimbert admet que la moitié de cet azote vient du nitrate, et l'autre moitié de l'azote des principes amidés du bouillon : ces principes étant décomposés par les bactéries au contact des produits de réduction des nitrates, c'est-à-dire de l'acide nitreux. A cette catégorie de microbes on réserve le nom de *ferments dénitrifiants indirects*. En effet, le dégagement de l'azote est l'œuvre d'une *réaction secondaire* que l'on peut formuler ainsi, en prenant l'urée comme type d'amide :



La destruction totale des nitrates par les bactéries dénitrifiantes indirectes se passe donc de la façon sui-

vante. Il y a d'abord réduction du nitrate en nitrite ; puis, si le milieu de culture contient à la fois des substances amidées et des aliments carbonés susceptibles d'être attaqués par le microbe en fournissant des acides, ceux-ci décomposent le nitrite.

L'acide nitreux mis en liberté entre en réaction avec les amides : d'où résulte un dégagement d'azote, ainsi que l'indique l'équation ci-dessus.

## CHAPITRE XII

### POISONS DU SOL. AUXIMONES

Nous venons d'étudier l'évolution des microorganismes qui travaillent de façon continue à la destruction de la matière organique. Les bactéries qui brûlent le carbone de ces matières, celles qui fixent l'azote gazeux, celles qui simplifient le noyau azoté complexe de l'humus avec production d'ammoniaque, celles enfin qui oxydent l'ammoniaque sont des agents qui favorisent au plus haut point les phénomènes de la végétation.

A côté de ces bactéries, essentiellement bienfaisantes, nous avons signalé la présence des microbes dénitrificateurs, susceptibles de détruire tout ou partie de l'azote nitrifié.

Mais, étant données leurs propriétés réductrices, on peut lutter avec avantage contre ces derniers en assainissant le sol par des labours profonds, en le débarrassant des eaux superflues, en lui distribuant des engrais calcaires : toutes pratiques destinées à favoriser les phénomènes d'oxydation.

Cependant l'observation montre que beaucoup de terres arables convenablement travaillées, et auxquelles l'apport régulier de fumures n'a pas manqué, refusent à un moment donné de porter certaines plantes qui jusque-là avaient fourni des récoltes rémunératrices. Tel est le cas bien connu d'un certain nombre de légumineuses ; celles-ci ne devant reparaître sur la parcelle qui les a nourries qu'au bout d'un temps au moins égal à celui où ces végétaux ont occupé le sol. Nous suppo-



sons — répétons-le — que le sol ne doit pas être mis en cause par suite d'un apport insuffisant de matières fertilisantes ou de l'emploi de mauvaises méthodes de culture.

Il s'agit donc bien ici d'un problème nouveau : le sol, qui est le théâtre d'une prodigieuse activité microbienne, ne peut-il pas renfermer, normalement ou non, des *substances toxiques* issues soit de quelques microbes particuliers, soit de certaines excrétiens qui proviendraient des plantes elles-mêmes que ce sol aurait portées ?

A l'époque, déjà assez lointaine, où cette question de l'*intoxication du sol* s'était posée, beaucoup d'auteurs en avaient nié la réalité. On comprend mal, en effet, que les prétendues *toxines* émises par telle plante ne soient préjudiciables qu'à celle-ci seulement et n'empêchent pas le développement sur la même parcelle d'une autre espèce végétale, souvent très voisine. De plus, si les conditions d'une bonne aération sont réalisées, les toxines devraient disparaître du sol ainsi infecté.

A la suite d'un nombre considérable de travaux, exécutés surtout dans ces dernières années, et qui présentent toutes les garanties d'exactitude que commande un pareil sujet, on peut avancer aujourd'hui que la *fatigue du sol* est un phénomène dûment constaté qu'il faut mettre, en partie, sur le compte de la présence de certains organismes antagonistes des microbes que nous avons appelés bienfaisants.

Les toxines qu'ils excrètent n'ont sans doute pas été isolées à l'état de pureté. Mais, par contre, on a mis en évidence la présence dans le sol de *substances toxiques définies* auxquelles on peut rapporter la déchéance de certaines plantes. Si ce point de vue est exact, on devra s'efforcer de combattre l'intoxication de la terre

par l'emploi d'agents physiques ou chimiques, capables soit de détruire les microorganismes reconnus nuisibles, soit d'annuler les effets des poisons que les végétations antérieures ont accumulés dans la masse du sol.

Il semble que la *fatigue des sols* soit imputable à deux causes principales.

**1<sup>o</sup> Présence dans le sol de certains protozoaires nuisibles.** — D'après Russell et ses collaborateurs, une forte dose d'humidité coïncidant avec l'accumulation des matières organiques favoriserait le développement des protozoaires, d'où résulterait une diminution du nombre des bactéries bienfaisantes (microbes ammonisants, microbes fixateurs d'azote, microbes nitrificateurs). Comme les protozoaires se développent plus lentement que ces dernières, et résistent moins bien qu'elles aux effets de la chaleur et de certains agents chimiques, on a proposé de renforcer le développement des bactéries soit par l'application d'une température de 96 à 98° pendant deux heures, ou de 55° pendant trois heures, soit par l'emploi d'antiseptiques tels que le toluène.

L'augmentation du nombre des bactéries coïncide toujours avec la suppression des protozoaires, suppression que l'on réalise par une stérilisation partielle au moyen de la chaleur.

Si cette manière de voir, appuyée par des résultats de valeur indiscutable, est souvent d'accord avec la plupart des faits, elle rencontre cependant des adversaires. C'est ainsi que, pour certains auteurs (Hills, 1918), la présence d'un grand nombre de protozoaires ne porte préjudice qu'aux seules bactéries fixatrices d'azote (*Azotobacter*), et seulement dans les milieux artificiels de culture. L'influence néfaste de ces protozoaires dans le sol, à l'état naturel, serait douteuse.

D'après Shermann (1918), des types variés de terre

renferment en moyenne, par gramme, dix mille protozoaires, dont mille pour les ciliés et les amibes, le reste pour les flagellés.

2° **Substances toxiques isolées du sol.** — Il a été isolé du sol plusieurs substances organiques définies auxquelles on a pu attribuer des effets toxiques sur les jeunes plantes ou sur leurs semences : *acide picoline-carbonique*  $\text{CH}^5$ .  $\text{C}^5\text{H}^5\text{N}$ .  $\text{CO}^2\text{H}$ , *acide dioxystéarique*  $\text{C}^{18}\text{H}^{36}\text{O}^4$ , celui-ci nettement vénéneux à la dose de 1/50 000. D'après Schreiner et Lathrop (1911), il y aurait une relation évidente entre la présence de ce dernier acide et l'infécondité des terres. Certains sols renferment de l'acide  $\alpha$  *oxystéarique*  $\text{C}^{18}\text{H}^{34}\text{O}^5$  et de l'acide *lignocérique*  $\text{C}^{24}\text{H}^{48}\text{O}^2$ .

Schreiner et Shorey ont également rencontré dans le sol des *carbures parafféniques*, une cholestérine spéciale : l'*agrostérine*, de l'*arginine*, de l'*histidine*, des dérivés *pyrimidiques*, des bases puriques : *xanthine* et *hypoxanthine*.

Le sol renferme, en outre, des *toxines* qui proviennent des plantes elles-mêmes. Molliard a montré que si on cultive dans de l'eau distillée stérilisée des graines de pois également stérilisées et que, si, au bout de quelques jours, on enlève ces graines et qu'on les remplace par des graines neuves stérilisées, cette deuxième culture fournit des plantules dont le poids de matière sèche est inférieur à celui des premières. Les racines du pois auraient donc secrété des substances qui se montreraient toxiques vis-à-vis de l'organe même qui les a produites. Ces substances, assez stables, puisqu'elles résistent à une température de  $120^{\circ}$ , *ne sont pas spécifiques* du pois, car elles agissent sur le maïs que l'on sème après le pois, et réciproquement. Cette absence de spécificité a été notée par beaucoup d'expérimentateurs.



Ces toxines, peu sensibles à l'action d'une température relativement élevée, seraient fixées par le charbon : des solutions aqueuses de terres fatiguées abandonnent, en effet, à cet agent leurs principes vénéneux. La désintoxication du sol par l'emploi du charbon a d'ailleurs été préconisée, et serait susceptible de fournir des résultats avantageux.

Cependant il semble que certaines catégories de plantes possèdent, à l'égard des toxines radicales, une immunité relative : ce que l'on pourrait expliquer en remarquant que le sol subit, quant à sa composition et à sa réaction, de fréquentes variations qui peuvent avoir une influence sur la résistance des plantes vis-à-vis de ces matières toxiques. On sait, en effet, que la fécondité de certains sols s'abaisse lorsqu'il y a accroissement du taux de la matière humique, c'est-à-dire quand la réaction du sol change de nature.

**Désinfection du sol.** — Quoi qu'il en soit de la nature et de l'origine des poisons du sol, on s'est efforcé, depuis plusieurs années déjà, de lutter contre les causes réelles de fatigue dont nous venons d'établir la réalité. Examinons rapidement les moyens propres à rétablir la fécondité compromise des terres. Ces moyens sont au nombre de deux : application de la chaleur, emploi de certains antiseptiques.

**Chaleur.** — L'*écobuage*, pratique très ancienne, consiste à brûler les herbes ou les parties ligneuses qui couvrent le sol et à enterrer la couche superficielle qui a subi ainsi l'action d'une température assez élevée. Cette manière d'opérer fournit aux plantes des matières salines plus assimilables ; elle a, en outre, l'avantage de détruire les spores des cryptogames et les œufs des insectes.

Plus récemment, on a préconisé l'emploi de températures moins élevées que celles qui résultent de la pra-

tique de l'écobuage. En chauffant la terre à 60-70°, on détruit les protozoaires, tout en respectant les bactéries fixatrices d'azote. Si l'on porte la température à 120°, toutes les bactéries sont tuées, et il est nécessaire de procéder ensuite à un réensemencement de la terre chauffée. A la température de 120°, la matière azotée naturelle des sols subit une transformation profonde qui se traduit par la simplification du noyau complexe azoté de l'humus : les phénomènes qui accompagnent l'ammonisation sont plus rapides chez une terre ainsi traitée.

**Antiseptiques.** — Le *sulfure de carbone*, utilisé depuis longtemps dans la destruction de certains cryptogames, est entré dans la pratique courante de la stérilisation des terres.

On emploie également les substances suivantes : *soufre* (20 grammes par mètre carré), *sulfate de cuivre* (10 grammes), *permanganate de potassium* (5 grammes), *charbon de bois* (20 grammes), *hypochlorite de chaux* (10 grammes), *eau oxygénée*, *formol*, *toluène*, *lysol* (5 cc.).

Citons, parmi les essais concluants qui ont été effectués avec divers antiseptiques, les expériences récentes faites en plein champ par Miège sur les pommes de terre. Les résultats favorables portent sur l'activation de la maturité et sur l'amélioration de la qualité des tubercules. C'est à la suite de l'application du soufre que les meilleurs rendements ont été observés. Le sarrasin se comporte comme la pomme de terre. Les haricots et les tomates ont profité de l'emploi du permanganate, de l'hypochlorite et du charbon.

Truffaut fait usage, avec succès, d'une émulsion savonneuse de sulfure de carbone à la dose de 500 kilogs à l'hectare. Le sulfure de calcium (200-300 kilogs à l'hectare), la benzine, le toluène, l'anthracène, la naphtha-

line (200 kilogs) ont également fourni des résultats encourageants.

On doit à Gainey (1918) des expériences intéressantes relatives à la *dose maniable* des antiseptiques en général. Cette dose varie beaucoup suivant le degré d'humidité du sol. Une application excessive d'un antiseptique risque de détruire les *Azotobacter* et les ferments nitrificateurs : les premiers sont, à cet égard, les plus susceptibles.

Nous ne parlerons pas des réactifs violents (acide sulfurique, sulfate de zinc, acide chlorhydrique, sulfate ferreux, etc.) destinés à la destruction des mauvaises herbes ; leur emploi dans le but d'anéantir les parasites du sol demanderait une grande surveillance.

**Mode d'action de ces divers agents.** — La chaleur détruit évidemment beaucoup de parasites dangereux, mais le degré de température où les espèces microbiennes utiles sont elles-mêmes respectées est difficile à préciser. Ce même agent physique modifie favorablement la nature de la matière azotée, ainsi que nous l'avons rappelé plus haut.

Le soufre et ses dérivés (sulfites, sulfates, sulfures) introduisent dans le sol un élément de fertilité, parfois trop négligé.

D'après certains auteurs, l'emploi des antiseptiques proprement dits serait capable de modifier la réaction du milieu dans un sens défavorable à telle espèce bactérienne et favorable à telle autre : les antiseptiques *réducteurs* (formol, toluène, sulfure de carbone, sulfites, charbon) entraveraient le développement des aérobies ; les antiseptiques *oxydants* (permanganate, hypochlorites, eau oxygénée) s'opposeraient à celui des anaérobies.

Les recherches dont nous venons d'exposer très sommairement les résultats principaux présentent donc



un très grand intérêt ; elles ouvrent la voie à une série de méthodes nouvelles qui formeront la base de l'*hygiène du sol*.

**Auximones.** — Il est indispensable, à la suite de l'étude que nous avons faite des propriétés biologiques du sol, d'introduire ici quelques notions sur un sujet nouveau, appelé peut-être à jouer dans l'avenir un rôle important.

On sait que, pour assurer son développement, la plante exige la présence dans le sol de certains éléments minéraux qui se retrouvent dans ses différents tissus en quantités notables (acide phosphorique, chaux, potasse, azote). De plus, il est démontré que l'organisme végétal renferme — sous des poids minimes sans doute, mais qui n'échappent pas cependant aux procédés les plus rigoureux de l'analyse — des substances minérales telles que manganèse, fer, zinc, bore, iode, substances dont la présence est probablement liée d'une manière intime à l'exercice des fonctions diastasiques.

La question qui se pose maintenant peut être ainsi formulée : existe-t-il des *infinitement petits organiques*, mais non vivants, susceptibles, comme les infinitement petits minéraux, de pénétrer dans la plante et d'intervenir favorablement dans le processus de sa nutrition ?

A la suite de travaux récents exécutés dans le domaine de la nutrition animale, on a été conduit à admettre, en ce qui concerne les albuminoïdes d'une ration alimentaire notamment, que certains acides aminés doivent figurer dans leur molécule. Si la matière albuminoïde ingérée ne contient pas ces acides, elle ne saurait concourir avec profit à l'alimentation.

Le besoin d'azote, vis-à-vis de l'organisme animal, est donc à la fois *quantitatif* et *qualitatif*. Mais il y a plus ; la croissance d'un sujet et son maintien en équilibre physiologique exigent que le régime alimentaire

renferme *certaines autres éléments organiques, sous des poids très faibles*, que Funk a appelés *vitamines*.

L'absence de ces éléments — dont le rôle et la nature demeurent encore mal déterminés — est incompatible avec le développement normal de l'individu.

Or, ces infiniment petits organiques semblent exister dans le monde végétal.

Un physiologiste anglais, Bottomley (1814), a montré qu'en soumettant la tourbe à certains traitements on lui confère le pouvoir de condenser des substances capables de stimuler la croissance des plantes. A ces substances il a donné le nom d'*auximones*, (ἄξιμος, qui fait croître). Voici en quoi consiste le traitement de la tourbe.

On humecte cette matière fraîche avec un bouillon de bactéries aérobies susceptibles de solubiliser l'acide humique; la masse est maintenue à 26° pendant deux semaines. On la stérilise ensuite à l'autoclave et on l'ensemence avec une culture mixte d'*Azotobacter chroococcum* (page 129) et de *Bacillus radicicola* (ce microbe est l'hôte des tubercules radicaux des légumineuses). On maintient à une température de 26° pendant quelques jours.

La matière que l'on prépare ainsi, nommée *tourbe bactérisée*, renferme jusqu'à 2,7 pour 100 d'azote soluble et 4,3 pour 100 d'azote total. Elle contient — en dehors des substances nutritives habituelles — un élément spécial capable de communiquer aux végétaux une vigueur particulière. Soluble dans l'eau et dans l'alcool, cet élément se montre très actif sous des poids très faibles. En effet, si on épuise par l'alcool la tourbe bactérisée et que, après évaporation du solvant, on reprenne le résidu par l'eau distillée, il suffira d'ajouter quelques gouttes de cet extrait aqueux à une culture en milieu minéral d'*Azotobacter chroococcum*

pour obtenir une fixation d'azote très supérieure à celle que donnerait cette bactérie cultivée en milieu minéral ordinaire.

Cette curieuse substance excitatrice, qui résiste à une température de 134°, ne se rencontre pas dans la tourbe brute. Elle se montre très active sur les jeunes pousses du blé et possède une influence remarquable sur le développement de la lentille d'eau.

D'après Mlle Mockeridge (1917), l'extrait de tourbe bactérisée favorise non seulement les phénomènes de fixation de l'azote, mais aussi ceux de la nitrification; cet extrait ralentirait l'action des bactéries dénitrifiantes.

Quant à l'origine des auximones, on pense qu'elles prennent naissance au moment de la décomposition de la matière organique de la tourbe soumise à l'influence des bactéries du sol, c'est-à-dire pendant la formation elle-même de l'humus.

Les résultats, parfois encourageants, parfois contradictoires, obtenus jusqu'ici par l'emploi de la tourbe bactérisée appellent évidemment de nouvelles recherches.



## CHAPITRE XIII

### EAUX DE DRAINAGE. CULTURES DÉROBÉES

**Importance de cette étude.** — On donne le nom d'*eaux de drainage* aux eaux qui, à la suite de la chute des pluies, traversent complètement le sol et s'écoulent, soit dans des drains artificiels, soit dans les drains naturels, c'est-à-dire les rivières. Leur étude, qui est en quelque sorte le complément nécessaire des notions que nous avons acquises jusqu'ici, ne pouvait être entreprise qu'après celle des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Les recherches sur les dissolutions normales du sol, que nous avons précédemment exposées (page 73), nous ont montré que ces dissolutions renfermaient des substances minérales que l'on pouvait répartir, en général, en deux groupes. Les unes se rencontrent en proportion notable : *acide nitrique, chaux, acide sulfurique, chlore, soude*; les autres n'existent le plus souvent qu'à l'état de traces : *potasse, acide phosphorique, ammoniacque*.

L'intérêt qui s'attache à l'étude des eaux de drainage est très grand puisque nous pouvons déduire de leur analyse les pertes qu'éprouve le sol par suite du lavage qu'il a subi du fait des eaux de pluie. Or, les deux substances les plus abondantes que l'on rencontre toujours, dans le cas des terres arables proprement dites, sont l'azote nitrique et la chaux. Il est inutile d'insister sur la gravité de ces pertes puisque nous avons reconnu à maintes reprises le rôle essentiel que joue la chaux vis-

à-vis de la structure physique des sols et vis-à-vis des réactions que cette base indispensable exerce sur la matière organique dont elle assure la simplification graduelle.

Quant à l'azote nitrique, il constitue un aliment de premier ordre pour tous les végétaux de la grande culture.

Nous devons donc, en conséquence, restituer au sol la chaux qu'il a perdue, à moins que l'on soit en présence d'une terre très riche en calcaire et que la fraction de ce calcaire éliminée par les eaux de drainage soit insignifiante par rapport à la masse totale du carbonate de calcium.

Il nous faudra également restituer au sol l'azote qui s'est échappé sous forme d'acide nitrique. Nous pourrions même, dans une certaine mesure — et c'est là le but de la pratique des *cultures dérobées* — restreindre ces pertes d'azote nitrique : soit que la culture dérobée absorbe les nitrates à une époque où ceux-ci sont abondants et où le sol ne porte plus les végétaux de la culture principale, soit que la culture dérobée ralentisse la formation elle-même des nitrates en évaporant beaucoup d'eau et, par conséquent, en desséchant partiellement le sol.

Dans ce qui va suivre, nous envisagerons principalement l'élimination de l'azote nitrique et celle de la chaux.

**Observations préliminaires.** — Voici, sommairement indiquées, quelles sont les questions principales que soulève l'étude des eaux de drainage.

La *quantité* d'eau récoltée dans les drains dépend avant tout de la perméabilité du sol. L'eau qui tombe sur une surface déterminée ne traverse pas la terre en totalité : une partie de cette eau disparaît par évaporation et cette fraction est d'autant plus grande que la

température est plus élevée; elle varie évidemment avec les saisons.

Si le sol est très perméable, l'eau s'infiltrera rapidement; les quantités de liquide soustraites à l'évaporation seront d'autant plus grandes que la filtration sera plus rapide, et inversement.

La température joue un rôle très important vis-à-vis de l'évaporation de l'eau qui tombe à la surface d'un sol. Nous savons également l'influence que ce facteur exerce sur le phénomène nitrificateur. Celui-ci présente son maximum d'activité dans la saison chaude et son minimum dans la saison froide. Or, les nitrates ne sont pas retenus par le pouvoir absorbant; un lavage prolongé suffit à les entraîner.

Demandons-nous si, *à priori*, on peut se rendre compte de la richesse des eaux de drainage en acide nitrique.

Deux cas se présentent. S'il s'agit d'une terre *nue*, c'est-à-dire dépourvue de végétaux mais réalisant les conditions nécessaires à une bonne marche du phénomène nitrificateur, c'est à la fin de l'été que nous devons rencontrer le maximum d'azote nitrique par suite de la température élevée qui en a favorisé la production. Cependant les eaux de drainage sont généralement rares à ce moment, en raison de l'évaporation active qui règne à la surface du sol. Il en résulte que les pertes d'azote nitrique seront faibles. Elles ne deviendront notables qu'à une date ultérieure où, la température s'étant abaissée, l'évaporation sera moindre. Les chutes de pluie, assez fréquentes en automne suivant les climats, entraîneront dans les eaux de drainage les nitrates accumulés dans le sol durant la période estivale.

Le dosage de ces nitrates servira de mesure à l'intensité du travail des microbes.



S'il s'agit, au contraire, d'une terre cultivée normalement, la question est plus complexe. Beaucoup de plantes, en effet, soutirent au sol des doses importantes d'azote nitrique. De plus, elles émettent par transpiration de fortes quantités d'eau au cours de leur végétation. Il en résulte que l'on peut, dans ces circonstances, ne récolter qu'un faible volume d'eaux de drainage et que ces eaux seront pauvres en azote nitrique. Parfois même le sol se dessèche à tel point que la nitrification est entravée, ainsi que nous le faisons remarquer plus haut. Les eaux de drainage d'une terre cultivée seront donc, en principe, peu chargées de nitrates, et d'autant moins que les plantes occuperont le sol pendant un plus long espace de temps.

L'étude de la richesse des eaux de drainage en acide nitrique présente encore un autre intérêt. Nous venons de supposer que le sol, pourvu ou non de végétation, était un sol auquel on n'avait confié aucun engrais azoté. Or, dans la pratique, on doit fournir à la plupart des sols une dose d'engrais azotés souvent considérable pour subvenir aux exigences des plantes à végétation rapide auxquelles on demande un rendement élevé. L'azote que l'on pourrait appeler *naturel* est : ou bien trop peu abondant, ou bien, la plupart du temps, peu apte à nitrifier de façon suffisante.

Nous voici donc en présence d'une terre à laquelle nous avons été dans l'obligation de fournir soit des nitrates, soit des sels ammoniacaux, soit des engrais azotés complexes (fumier, tourteaux, sang desséché, etc.). Or l'évaluation de la richesse des eaux de drainage en acide nitrique, faite à différentes époques de l'année, nous renseignera sur la rapidité avec laquelle : 1° les nitrates ajoutés auront filtré au travers de la terre ; 2° les sels ammoniacaux se seront transformés en nitrates ; 3° l'azote des engrais complexes aura pris la

forme soluble d'azote nitrique. On pourra, dans ce dernier cas, dresser un tableau de la valeur de ces engrais complexes d'après la vitesse avec laquelle ils auront fourni de l'acide nitrique. Cette vitesse variera beaucoup suivant l'engrais considéré et suivant la structure et la composition physique et chimique du sol qui aura reçu cet engrais.

**Evaluation des pertes par eaux de drainage.** — Une évaluation très exacte de ces pertes présente d'assez sérieuses difficultés. Les drains naturels du sol sont les rivières; il faudrait donc connaître l'étendue des surfaces arrosées ayant déversé leurs eaux dans tel cours d'eau. De plus, ces eaux sont très diluées. Aussi les travaux les plus intéressants, et les plus fructueux, sont-ils ceux dans lesquels on ne s'adresse qu'à une surface restreinte de terrain dont on capte intégralement les eaux d'écoulement. En disposant un pluviomètre au voisinage, on a tous les éléments nécessaires pour évaluer correctement, et en toutes saisons, le rapport entre la quantité d'eau qui tombe et celle qui, traversant le sol, se rend dans les drains. La différence représente la quantité d'eau qui s'est évaporée.

On atteint ce but en construisant de grandes *cases de végétation* rendues étanches par un enduit de ciment, et que l'on remplit de terre. A l'aide d'un pareil dispositif, il est facile de recueillir les eaux qui s'écoulent. Ce mode opératoire a fourni d'excellents résultats; il a été mis en usage, pour la première fois, par Lawes et Gilbert en Angleterre, puis par Dehérain en France. Mais il présente cependant un inconvénient. Par le fait même du remplissage de la case, la terre se trouve dans un grand état d'émiettement; elle est, par conséquent, peu tassée. Les phénomènes d'oxydation sont donc fortement accélérés, et la nitrification, en particu-

lier, sera très active jusqu'au moment où cette terre, se tassant peu à peu, acquerra une structure plus voisine de celle qui se présente dans les conditions normales.

### Quantités d'eau tombées sur une surface donnée.

— Pour nous en tenir à une région déterminée sur laquelle on possède des renseignements très exacts, nous donnons, dans le tableau de la page suivante, la hauteur de la pluie (en millimètres) tombée pendant une période de trente ans (1891-1920) à l'Observatoire du Parc Saint-Maur (banlieue est de Paris). Ces chiffres nous ont été obligeamment fournis par M. Angot.

La hauteur maximum a été observée en 1910, soit 751 millimètres; la hauteur minimum en 1899, soit 418 millimètres. La surface d'un hectare aurait donc reçu, dans le premier cas, 7 510 mètres cubes d'eau et, dans le second, 4 180 mètres cubes. Une année moyenne donne 5 810 mètres cubes. (Signalons ce fait, sans précédent, que la quantité d'eau de pluie tombée pendant l'année 1921 n'a atteint qu'une hauteur de 278 millimètres.)

Quelle est maintenant la *fraction* de cette eau qui traverse le sol? On admet que la surface totale de la France (528 000 kilomètres carrés) reçoit en moyenne annuellement 417 milliards de mètres cubes d'eau, pour une hauteur moyenne de 700 millimètres. Les fleuves en débitent, dans le même temps, 180 milliards de mètres cubes. Le rapport  $\frac{180}{417} = \frac{43}{100}$ . Le sol de la France absorbe donc 43 pour 100 de l'eau tombée; le reste, soit 57 pour 100, repasse dans l'atmosphère par évaporation.

Le rapport entre la quantité d'eau qui s'écoule dans les drains et celle qui tombe sur le sol varie beaucoup suivant les saisons. Les facteurs qui influent sur ce rapport sont la température de l'air et celle du sol, l'in-



Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Total
1891.	21	5	61	45	84	80	74	41	30	48	44	55	588
1892.	21	69	57	11	10	38	56	38	34	150	54	49	587
1893.	49	56	10	1	46	58	58	19	40	103	32	52	524
1894.	48	23	25	39	40	33	50	55	93	31	18	38	493
1895.	43	2	38	44	44	61	65	42	0	56	57	56	508
1896.	20	5	48	20	7	94	45	25	118	159	50	63	654
1897.	42	36	86	101	29	67	57	84	57	5	10	46	620
1898.	5	65	53	28	95	85	30	51	25	46	44	26	553
1899.	63	11	11	52	27	32	42	13	48	37	19	63	418
1900.	66	58	19	15	38	22	33	66	19	27	56	25	444
1901.	30	27	47	56	20	40	45	30	66	37	15	52	465
1902.	14	60	27	64	82	48	18	75	50	47	39	16	540
1903.	56	9	33	29	43	31	72	64	54	81	37	27	536
1904.	43	74	32	51	42	44	30	29	85	18	11	59	518
1905.	25	24	73	21	43	107	55	77	62	34	92	25	638
1906.	67	39	36	60	56	9	47	64	19	48	100	50	595
1907.	18	31	25	58	86	54	28	35	17	124	24	46	546
1908.	13	47	46	28	88	70	58	40	72	20	46	40	568
1909.	38	12	64	33	46	72	96	48	50	105	31	71	666
1910.	74	67	20	46	82	96	70	36	19	81	114	46	751
1911.	14	11	31	19	46	78	31	9	27	66	52	97	481
1912.	53	41	42	17	54	82	78	83	9	58	48	44	609
1913.	71	20	48	56	71	26	75	61	47	34	70	66	645
1914.	36	24	60	21	39	77	92	56	84	35	34	68	626
1915.	58	34	23	55	38	63	46	88	50	22	45	134	656
1916.	25	82	43	47	74	51	63	76	72	64	44	64	705
1917.	26	26	71	60	32	74	72	52	27	75	33	25	573
1918.	42	17	53	52	68	17	54	35	84	26	70	60	578
1919.	74	89	66	66	18	11	67	21	28	36	93	80	649
1920.	70	12	28	64	39	43	120	21	20	69	27	35	548

Moyenne de cinquante ans (1871-1920)

39	36	40	43	49	58	58	53	48	58	49	50	581
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

tensité des vents, l'état des surfaces (pourvues ou non de végétation). Lawes et Gilbert ont indiqué comme moyenne, pour la période avril-septembre, 26 pour 100 d'eau de drainage, donc 74 pour 100 d'eau évaporée; pour la période octobre-mars, 62 pour 100 d'eau de drainage, donc 38 pour 100 d'eau évaporée. Mais d'une année à l'autre, les écarts sont parfois considérables : 100 parties d'eau tombée pendant l'été ont fourni de 7,9 à 47,6 parties d'eau de drainage; pendant l'hiver, 100 parties d'eau ont fourni de 39 à 80 parties d'eau de drainage. Dehérain a noté des variations du même genre dans les observations qu'il a faites à Grignon.

**Richesse des eaux de drainage en éléments fertilisants.** — 1° *Terres non cultivées et terres sans engrais.* — D'après Lawes et Gilbert, ce sont les eaux des premiers drainages d'automne qui renferment le maximum d'acide nitrique. Peu à peu, les eaux s'appauvrissent, et on observe un minimum de nitrates au printemps. En effet, grâce à la température plus élevée de l'été, les nitrates se sont accumulés dans les régions superficielles du sol en raison de la teneur plus grande en azote organique de ces régions. A Rothamsted, d'après les observations de Warrington, une moyenne provenant de neuf années d'expériences a fourni, par an et par hectare, les quantités suivantes d'azote nitrique :

Mars-juin.	Juillet-septembre.	Octobre-février.
7 kil. 5	8 kil. 7	27 kil.

Soit, en tout, 43 kilogrammes.

Les observations de Dehérain, faites sur des terres nues soumises à de nombreuses façons qui renouvellent les surfaces et activent la nitrification, fournissent des chiffres encore plus élevés. Les pertes en azote nitrique sont donc notables, surtout à la suite du drainage de l'automne. On peut les réduire dans une forte propor-

tion en installant sur le sol, à cette époque de l'année, une culture dérobée.

A côté des pertes d'azote nitrique, il faut signaler celles qui portent sur la chaux.

La solubilité du carbonate de calcium dans l'eau pure est sans doute très faible, mais elle augmente du fait de la présence constante dans la masse du sol d'une proportion de gaz carbonique généralement très supérieure à celle que contient l'air normal. On doit donc s'attendre à rencontrer dans les eaux de drainage une quantité de chaux (sous forme de bicarbonate) d'autant plus élevée que la teneur de l'atmosphère du sol en gaz carbonique sera elle-même plus élevée. La quantité de calcaire dissous dépend de la tension du gaz carbonique et non pas de la richesse absolue du sol en carbonate de calcium. Toutes les causes physiques, chimiques ou physiologiques qui sont susceptibles d'augmenter dans le sol la dose du gaz carbonique (perméabilité de la terre, élévation de la température, richesse en engrais organiques ou en humus) favorisent la dissolution du calcaire et, par conséquent, son départ dans les eaux de drainage.

A cette perte de chaux, sous forme de bicarbonate, il faut ajouter celle de la chaux sous forme de sulfate et de chlorure. Le sulfate de calcium n'est pas, en effet, retenu par le pouvoir absorbant. De plus, chaque fois que l'on répand sur un sol arable du sulfate d'ammonium, une quantité de sulfate de calcium correspondante prend naissance par suite d'une double décomposition avec le calcaire.

L'emploi des engrais potassiques (sulfate, chlorure) aboutit également à une élimination de chaux (à l'état de sulfate ou de chlorure).

Il en résulte que les pertes de chaux que l'on observera dans le cours d'une année, rapportées à la surface



d'un hectare, seront très notables. Elles seront d'autant plus élevées que la dose de gaz carbonique incluse dans le sol sera plus forte et que le poids des engrais sulfatés ou chlorurés, dont on aura enrichi la terre, sera plus élevé.

Lawes et Gilbert ont noté à Rothamsted, pour une parcelle sans engrais, la dose de 98 gr. 1 de chaux dans 1 mètre cube d'eau de drainage. Il tombe sur ce domaine une moyenne de 786 millimètres d'eau, dont les  $\frac{44}{100}$  centièmes s'écoulent dans les drains : la perte à l'hectare s'élève dans ce cas à 338 kilogrammes de chaux.

Stoklasa a trouvé pour les sols de Bohême des chiffres bien plus forts, pouvant monter jusqu'à 1200 kilogs. Une semblable élimination définitive de la chaux appelle l'attention. Dans le cas de terres suffisamment calcaires il n'y aurait sans doute pas lieu d'en tenir compte ; mais quand il s'agit de sols peu riches en carbonate de calcium, pour lesquels l'emploi des amendements calcaires est indiqué, il faudra, au bout d'un certain nombre d'années, restituer au sol la chaux qu'il a ainsi perdue.

**2° Terres cultivées et terres ayant reçu des engrais.** — La perte en nitrates dans les eaux de drainage des terres cultivées est extrêmement variable ; elle dépend de la nature des végétaux qui croissent sur le sol et de l'intensité de leur développement. Lorsque ces végétaux restent longtemps en place, jusqu'à l'arrière-saison par exemple, les pertes en nitrates seront faibles pour les raisons suivantes : 1° la plante aura absorbé les nitrates, origine des albuminoïdes qu'elle renferme ; 2° elle aura desséché partiellement le sol par suite de la transpiration active de ses organes foliacés ; 3° le sol ainsi desséché pourra contenir une proportion d'eau telle que, par suite de son insuffisance, le travail des microbes nitrificateurs sera entravé.

Quand le sol, supposé renfermer une dose convenable de calcaire, a reçu des engrais azotés variés, l'étude des eaux de drainage permet de suivre de façon très nette le temps nécessaire à la transformation de cet azote en azote nitrique. C'est ainsi que l'on a pu classer les engrais complexes d'après la vitesse de la nitrification de l'azote qu'ils renferment : le sang desséché et les engrais verts se placent en première ligne. Il faut, bien entendu, que la dose d'humidité du sol soit suffisante pour assurer la bonne marche des transformations imputables aux microbes, qui commencent avec l'ammonisation et se terminent avec la production des nitrates.

Pendant la saison froide, l'azote des sels ammoniacaux et celui des engrais organiques nitrifient d'une manière insignifiante. Cependant on ne constate pas, dans les eaux de drainage, la présence de l'ammoniaque, celle-ci étant bien retenue par le pouvoir absorbant.

Il est des cas où la lenteur de la nitrification des engrais complexes présente certains avantages. Ainsi, lorsqu'on enfouit du fumier dans un sol, une fraction de l'azote de ce fumier se trouve déjà sous la forme ammoniacale, susceptible de fournir de l'azote nitrique aussi rapidement que s'il s'agissait d'un sel d'ammonium proprement dit. Mais la majeure partie de l'azote du fumier est encore engagée dans des combinaisons complexes dont la simplification exige souvent un temps assez long. Les propriétés physiques du sol, au point de vue de sa perméabilité, jouent un grand rôle dans la rapidité ou la lenteur avec lesquelles s'effectuera cette simplification. De plus, certains fumiers sont mélangés de litières provenant de végétaux ligneux (fougères, bruyères) dont la décomposition dans le sol est difficile. Par suite de la lenteur avec laquelle l'azote du fumier

nitriée, on n'a pas à craindre de fortes pertes d'azote nitrique dans les eaux de drainage.

**Substances fertilisantes, autres que les nitrates et la chaux, rencontrées dans les eaux de drainage.**

— Nous n'avons parlé que d'une manière incidente de la teneur des eaux de drainage en ammoniacque, acide phosphorique, chlore, acide sulfurique, potasse.

En ce qui concerne l'ammoniacque et l'acide phosphorique, les pertes sont minimales et il n'y a pas lieu d'en tenir compte.

Le chlore — d'autant plus abondant dans les eaux de drainage que le sol aura reçu plus d'engrais chlorurés — s'élimine sous forme de chlorure de calcium. Il suffit d'ailleurs de très faibles quantités de chlore pour subvenir aux besoins des végétaux.

A propos des pertes en acide sulfurique, il y a lieu de faire les observations suivantes. De même que le chlore, l'acide sulfurique s'élimine en quantités d'autant plus considérables (sulfate de calcium) que l'on a employé une dose plus forte d'engrais sulfatés (plâtre, sulfates de potassium et d'ammonium). Il peut arriver, si le sol est naturellement pauvre en sulfates, que cette élimination du soufre soit préjudiciable à la végétation. Le soufre est, en effet, indispensable aux végétaux puisqu'il entre toujours dans la constitution de la matière albuminoïde. Les plantes qui réclament beaucoup d'azote pour fournir de fortes récoltes (légumineuses, entre autres) ont des exigences assez grandes en soufre. Il conviendra donc de tenir compte de cet appauvrissement du sol et d'y remédier par l'apport de matières appropriées.

Quant à l'élimination de la potasse dans les eaux de drainage, elle ne porte que sur une fraction très faible du stock de cet alcali contenu dans le sol ou distribué sous forme d'engrais. Elle s'élève à quelques kilo-



grammes seulement par an et par hectare. Elle est d'autant plus forte que la dose d'engrais potassiques employée est plus élevée; le sulfate de potassium semble moins bien retenu dans le sol que le chlorure.

**Cultures dérobées.** — L'utilité de la pratique des cultures dérobées découle des notions que nous venons de développer. Après l'enlèvement d'une récolte, la terre demeure nue, c'est-à-dire privée de végétaux pendant un temps plus ou moins long. S'il pleut abondamment à l'automne, l'eau pluviale dissoudra les nitrates qui se sont accumulés dans le sol à la suite du travail microbien de la saison d'été, nitrates que les végétaux auront pu assimiler en partie, mais non en totalité. Ces nitrates passeront donc dans les eaux de drainage où ils seront perdus.

Il est donc nécessaire pour éviter ces pertes ou, du moins, pour les atténuer, d'installer sur le sol, à ce moment de l'année, une culture *intercalaire* capable de fournir en peu de temps une plante vigoureuse qui s'emparera des nitrates et qui, par suite des phénomènes de transpiration, rejettera dans l'atmosphère de fortes quantités d'eau.

Dehérain, auquel on doit à cet égard des expériences suivies, conseille l'emploi de la moutarde blanche et de la vesce. Le premier de ces végétaux possède un feuillage épais et sa croissance est rapide. Le second, en sa qualité de légumineuse, fixe l'azote gazeux de l'air.

La quantité de matière végétale que fournit une culture dérobée varie beaucoup d'une année à l'autre suivant les conditions climatiques. Elle est plus forte dans les années humides.

Nous envisagerons l'utilisation la plus générale de ces cultures, celle qui consiste à les enfouir *sur place*, soit au début de la mauvaise saison, soit au printemps suivant

Quel est le bénéfice que l'on retire de cette pratique, et quelle est l'époque la plus favorable à l'enfouissement de la matière verte? C'est ici que l'emploi des cases de végétation rend les plus grands services pour la solution de ce problème. Il suffira, en effet, de comparer la teneur en nitrates des eaux qui ont filtré au travers des cases ayant porté des cultures dérobées avec celles des eaux qui auront traversé des cases de même surface, mais sans végétation.

Les expériences poursuivies dans ce sens, pendant plusieurs années à Grignon, ont montré qu'il y avait tout avantage à enfouir l'engrais vert *avant l'hiver* sans attendre le début du printemps. Pendant l'hiver, en effet, la matière organique du végétal subit déjà une décomposition dont la rapidité est fonction de la structure physique du sol et de l'intensité du travail des microbes, lequel dépend de la température. Quelle que soit l'activité microbienne à cette époque de l'année, une fraction importante de l'azote a néanmoins éprouvé une simplification assez avancée pour qu'elle soit en mesure de nitrifier dès que les premières chaleurs du printemps se feront sentir.

Il en résulte que cet azote nitrique se trouvera dès lors à la disposition des plantes que l'on sèmera à ce moment.

Si la culture dérobée était enfouie au printemps seulement, le travail préparatoire à l'ammonisation de la matière azotée, puis à la nitrification, exigerait un certain temps : d'où un retard plus ou moins marqué dans la solubilisation définitive de l'azote.

La première façon d'opérer est donc la meilleure : ce qui d'ailleurs est confirmé par les observations de la pratique courante.

## CONCLUSIONS

La terre végétale est un milieu essentiellement discontinu, formé par un mélange des matières minérales les plus variées quant à leur composition chimique et à leur structure physique. A ce mélange vient s'ajouter une substance organique, l'*humus* ; ses particules sont de grosseur très variable, et les plus menues d'entre elles demeurent en contact intime avec les fragments minéraux auxquels elles forment une sorte de revêtement.

A l'état normal, lorsque la masse n'est pas gorgée d'eau, les éléments constitutants de la terre végétale sont séparés les uns des autres par des espaces lacunaires qui permettent une libre circulation des gaz et de l'eau.

Cette division particulière, essentiellement favorable au cheminement des racines, est assurée grâce à la présence de *ciments* qui rassemblent la masse terreuse en petits agglomérats de forme irrégulière. Ces ciments sont au nombre de deux : l'*argile* et l'*humus*.

Au point de vue chimique, la matière minérale n'est jamais à l'état de repos. Au contact de l'eau et du gaz carbonique se produisent, de façon continue, une série de phénomènes de dissolution qui se complètent par des phénomènes de double décomposition : c'est ainsi que s'élaborent les solutions nutritives utilisables par les végétaux.

Ces réactions purement chimiques sont accompagnées de phénomènes biologiques ayant leur origine dans le développement des infiniment petits de toute



nature qui peuplent le sol. La matière organique, au sein de laquelle ils évoluent, subit à leur contact : des phénomènes de combustion totale avec production d'eau et de gaz carbonique ; des phénomènes de combustion partielle avec formation de certains acides qui jouent vis-à-vis de la matière minérale un rôle dissolvant très actif ; des phénomènes de dédoublement avec simplification du complexe que représente l'humus et dont l'ammoniaque est un des termes les plus importants ; des phénomènes d'oxydation portant sur cette ammoniaque avec production d'acide nitrique, c'est-à-dire de l'élément azoté diffusible par excellence ; des phénomènes de fixation de l'azote gazeux avec production de composés azotés complexes.

Tel est le bilan des opérations dont la masse de la terre arable est continuellement le siège.

Le rôle de l'homme consiste à favoriser ces divers processus en remuant la terre pour y accroître les espaces lacunaires : c'est le travail de la bêche et de la charrue. Si la plante ne rencontre qu'une nourriture insuffisante dans le milieu où elle se développe, la main de l'homme intervient pour restituer au sol les substances que les récoltes antérieures ont enlevées et que réclameront les récoltes futures.

La terre arable, dans son incessante activité, est donc en perpétuel état de transformation.

## BIBLIOGRAPHIE

LIEBIG : *Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture*, traduction Gerhardt, 2<sup>e</sup> édition, Paris, 1844.

BOUSSINGAULT : *Economie rurale*, Paris, 1851.

BOUSSINGAULT : *Agronomie, Chimie agricole et physiologie*, Paris, 1860-1891.

SCHLÆSING : *Contribution à l'étude de la chimie agricole* (Encyclopédie Frémy), Paris, 1885.

DEHÉRAIN : *Traité de chimie agricole*, Paris, 1902.

LAGATU et SICARD : *Guide pratique et élémentaire pour l'analyse des terres et son utilisation agricole*, Paris, 1901.

WOLLNY : *La décomposition des matières organiques et les formes de l'humus*, traduction Henry, Paris, 1902.

HALL : *Le sol en agriculture*, traduction Demolon, Paris, 1906.

HARVEY W. WILEY : *Principles and Practice of agricultural analysis*, Easton, 1906.

KÖNIG : *Die Untersuchung landwirtschaftlich und gewerblich wichtiger Stoffe*, Berlin, 1906.

MAYER : *Lehrbuch der Agrikulturchemie*, Heidelberg, 1911.

RAMANN : *Bodenkunde*, Berlin, 1911.

E.-A. MITSCHERLICH : *Bodenkunde für Land-und Forstwirte*, Berlin, 1904.

LÖHNIS : *Handbuch der landwirtschaftlichen Bakteriologie*, Berlin, 1910.

CHAMBERLAIN : *Organic agricultural Chemistry*, New-York, 1916.

NEWMANN AND NEVILLE : *Practical Chemistry for agricultural Students*, Londres, 1920.

LYON, FIPPIN AND BUCKMANN : *Soils; their properties and Management*, New-York, 1919.

E.-T. RUSSELL : *Soil conditions and plant growth*, Londres, 1917.

VERIFICAT  
1987



## TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

<p><b>CHAPITRE I. — Les constituants de la matière végétale . . . . .</b></p> <p>Premier aperçu sur la composition des végétaux, p. 1. — Origine des matières combustibles et des matières fixes contenues dans les végétaux, p. 3. — Rôle des matières fixes, p. 4. — La notion de l'engrais, p. 5. — L'étude du sol est la base de l'agronomie, p. 9.</p>	1
<p><b>CHAPITRE II. — Généralités sur le sol et formation de la terre arable. . . . .</b></p> <p>Aspect général du sol, p. 10. — Structure du sol; pénétration des racines, p. 11. — Sous-sol, p. 12. — Étude méthodique du sol, p. 13. — Formation mécanique des sols, p. 14. — Phénomènes qui provoquent la destruction des roches, p. 19. — Sols formés sur place, sols de transport, p. 26. — Formes principales des éléments minéraux utiles aux plantes, p. 27.</p>	10
<p><b>CHAPITRE III. — Constitution et propriétés physiques des sols. . . . .</b></p> <p>Sable, p. 31. — Argile, p. 32. — Calcaire, p. 33. — Humus, p. 33. — Constitution spéciale de chacun de ces quatre éléments, p. 34.</p>	31
<p><b>CHAPITRE IV. — Lacunes du sol. Mouvements de l'eau et de l'air dans le sol; échauffement du sol . . . . .</b></p> <p>Lacunes du sol, p. 44. — Montée et descente de l'eau dans le sol, p. 46. — Imbibition des terres par l'eau; mesure de la capacité d'imbibition, p. 51. — Aptitude des terres à la dessiccation, p. 55. — Échauffement du sol, p. 58. — Conductibilité du sol, p. 60. — Variations normales de la température du sol, p. 60.</p>	44
<p><b>CHAPITRE V. — Analyse mécanique et physique de la terre arable. . . . .</b></p> <p>Prise d'échantillon, p. 64. — Procédés de l'analyse mécanique,</p>	63

p. 66. — Procédés de l'analyse physique, p. 67. — Interprétation de l'analyse physique d'une terre, p. 70.

**CHAPITRE VI. — Constitution chimique générale de la terre arable; analyse chimique des éléments minéraux . . . . . 73**

Dissolutions des sols, p. 73. — Phénomènes chimiques qui provoquent la formation des dissolutions normales des sols, p. 76. — Action de quelques réactifs sur les éléments minéraux utiles aux plantes, p. 81. — Analyse chimique des éléments minéraux, p. 85. — Réaction du sol, p. 89. — Détermination de l'eau, p. 91. — Interprétation de l'analyse chimique, p. 92.

**CHAPITRE VII. — Constitution chimique de la matière organique des sols. . . . . 96**

Propriétés générales de l'humus, p. 96. — Propriétés chimiques de l'humus, p. 98. — Noyau azoté de l'humus, p. 100. — Interprétation du dosage de l'azote, p. 102.

**CHAPITRE VIII. — Pouvoir absorbant des sols vis-à-vis des matières fertilisantes . . . . . 104**

Constatacion de l'existence du pouvoir absorbant, p. 104. — Fixation de l'acide phosphorique, p. 105. — Fixation de l'ammoniaque, p. 106. — Fixation de la potasse, p. 107. — Rôle des colloïdes dans l'absorption, p. 108. — Rôle de l'humus, p. 111.

**CHAPITRE IX. — Propriétés biologiques du sol; généralités. . . . . 114**

Microbes aérobies et anaérobies, p. 115. — Distribution des microorganismes dans le sol, p. 116.

**CHAPITRE X. — Phénomènes de combustion complète qui portent sur le carbone et sur l'hydrogène; phénomènes d'hydrolyse de la matière azotée; fixation de l'azote gazeux. . . . . 119**

Atmosphères confinées des sols, p. 119. — Phénomènes d'hydrolyse de la matière azotée avec production d'ammoniaque, p. 121. — Microbes ammonisants, p. 122. — Fixation de l'azote gazeux, p. 123. — Recherches de Berthelot, p. 126. — Bactéries anaérobies, expériences de Winogradsky, p. 127. — Bactérie aérobies fixatrices d'azote, p. 129.

CHAPITRE XI. — Oxydation de l'ammoniaque : nitrification. Dénitrification. . . . . 131

Historique, p. 132. — Conditions de la nitrification, p. 133. — La nitrification est corrélatrice de la présence d'un être vivant, p. 134. — Travaux de Winogradsky, p. 137. — Acide nitreux, p. 139. — Acide nitrique, p. 141. — Nitrification dans la terre arable, p. 141. — Nutrition carbonée des organismes nitrificateurs, p. 142. — Remarques sur les propriétés biologiques des organismes nitrificateurs, p. 143. — Nitrification naturelle, p. 144. — Facteurs qui influencent la nitrification naturelle, p. 146. — Nitrification dans les terres acides, p. 147. — Dénitrification, phénomènes généraux, p. 148. — Ubiquité des ferments dénitrificateurs, p. 149. — Ferments dénitrifiants vrais, ferments dénitrifiants indirects, p. 151.

CHAPITRE XII. — Poisons du sol; auximones . . . . 154

Présence dans le sol de certains protozoaires nuisibles, p. 156. — Substances toxiques isolées du sol, p. 157. — Désinfection du sol, p. 158. — Chaleur, p. 158. — Antiseptiques, p. 159. — Mode d'action de ces divers agents, p. 160. — Auximones, p. 161.

CHAPITRE XIII. — Eaux de drainage. Cultures dérobées. . . . . 164

Importance de cette étude, p. 164. — Observations préliminaires, p. 165. — Évaluation des pertes par eaux de drainage, p. 168. — Quantités d'eau tombées sur une surface donnée, p. 169. — Richesse des eaux de drainage en éléments fertilisants, p. 171. — Substances fertilisantes, autres que les nitrates et la chaux, rencontrées dans les eaux de drainage, p. 175. — Cultures dérobées, p. 176. — Conclusions, p. 178. — Bibliographie, p. 180.

