

Encyclopédie agricole

G. ANDRÉ

CHIMIE AGRICOLE

★★

CHIMIE DU SOL

II

PARIS
J.-B. BAILLIÈRE et FILS

~~U. G. M.~~

~~3707 A~~

~~2^o volume~~

~~RGM. 2000-A~~

RGM. 2611



2000
36K

BIBLIOTÉCA

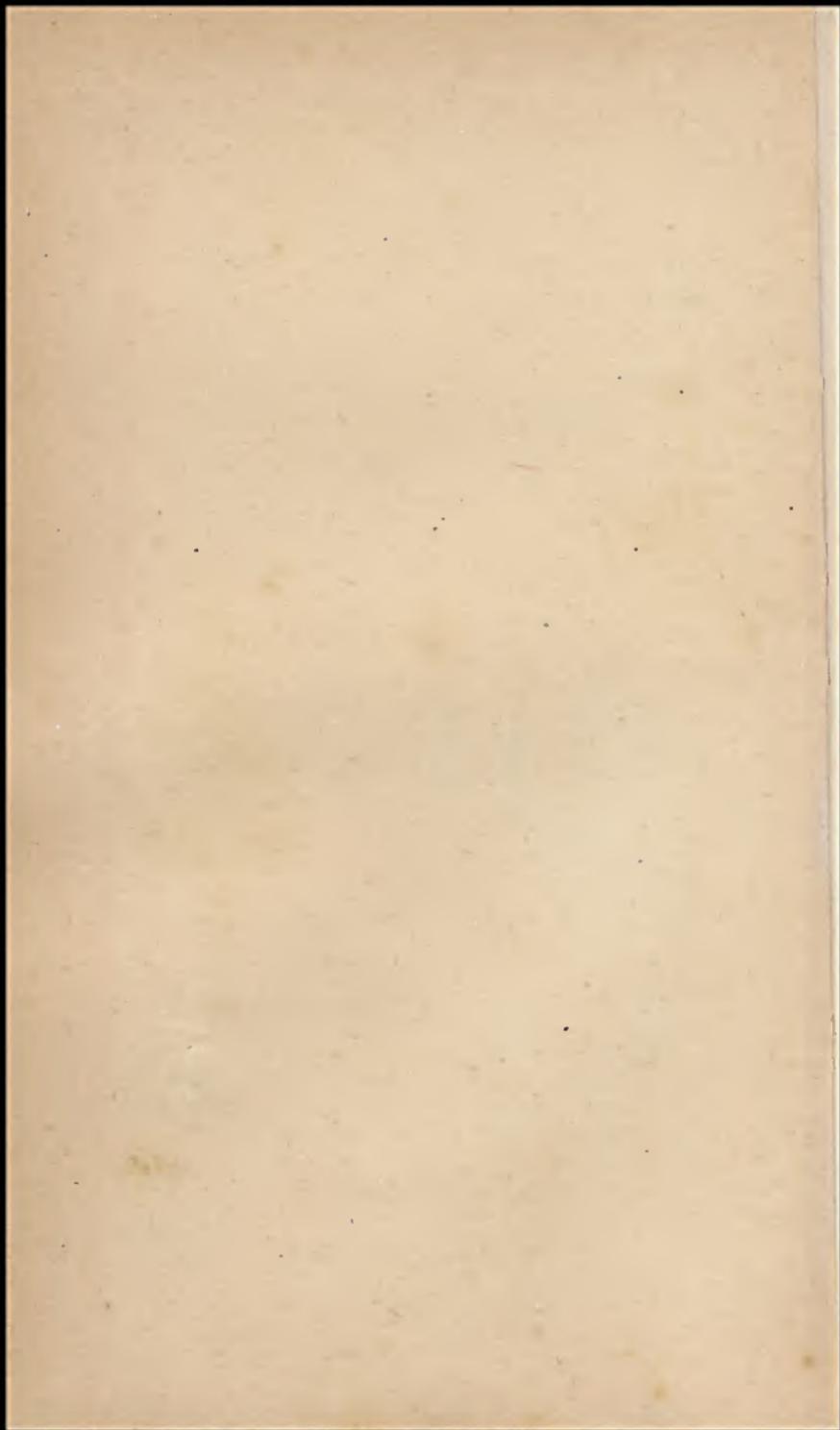
Nº ~~1078~~

147

Data 22 Fevereiro 1940

Estação Experimental Central de Café
BOTUCATÚ - Estado de São Paulo - Brasil





ENCYCLOPÉDIE AGRICOLE

Publiée sous la direction de G. WERY

Couronnée par l'Académie des Sciences morales et politiques
et par l'Académie d'Agriculture

GUSTAVE ANDRÉ

CHIMIE AGRICOLE

★ ★

CHIMIE DU SOL

II



Encyclopédie Agricole

Chaque volume : 10 fr.

Botanique agricole.....	MM. SCHRIBAUX et NANOT, prof. à l'Inst. agron.
Chimie agricole 4 vol.	M. ANDRÉ, prof. à l'Inst. agron.
Géologie agricole.....	M. CORD, professeur d'agriculture.
Hydrologie agricole.....	M. DIENEET, ingénieur agronome.
Microbiologie agricole 2 vol.	M. KAYSER, maître de conf. à l'Inst. agron.
Zoologie agricole, 2 vol.	M. G. GUÉNAUX, répétiteur à l'Inst. agron.
Entomologie et Parasitologie ...	M. G. GUÉNAUX, répétiteur à l'Inst. agron.
Analyses agricoles, 2 vol.	M. GUILLIN, dir. du lab. de la S. des ag. de France
Agriculture générale, 4 vol.	M. P. DIFFLOTH, professeur d'agriculture.
Engrais.....	
Céréales.....	
Prairies et plantes fourragères....	M. GAROLA, dir. des serv. agr. d'Eure-et-Loir.
Plantes industrielles.....	
Plantes sarclées.....	M. HITIER, maître de conf. à l'Inst. agron.
Cultures potagères.....	M. L. BUSSARD, prof. à l'Ec. d'hort. de Versailles.
Arboriculture fruitière.....	MM. L. BUSSARD et G. DUVAL.
Sylviculture.....	M. FRON, inspecteur des eaux et forêts.
Viticulture.....	
Cultures de serres.....	M. PACOTTET, chef de lab. à l'Inst. agron.
Cultures méridionales.....	MM. RIVIÈRE et LEOQ, insp. de l'agric. à Alger.
Amélioration des plantes.....	M. COQUIDÉ.
Maladies des plantes cultivées, 2 v.	MM. DELAORIX et MAUBLANC.
Zootecnie générale, 3 vol.	
— Races bovines.....	
— Races chevalines.....	M. P. DIFFLOTH, professeur d'agriculture.
— Moutons.....	
— Chèvres, Porcs, Lapins....	
Aviculture.....	M. VOITELLIER, maître de conf. à l'Inst. agron.
Apiculture.....	M. HOMMELL, professeur d'apiculture.
Pisciculture.....	M. G. GUÉNAUX, répétiteur à l'Inst. agron.
Sériciculture.....	M. VIEL, insp. de la séricic. de l'Indo-Chine.
Alimentation des animaux 2 vol. ...	M. R. GOUIN, ing. agronome.
Hygiène et maladies du bétail ...	MM. CAONY, méd. vétér. et R. GOUIN.
Hygiène de la ferme.....	MM. REGNARD et PORTIER
Elevage et dressage du cheval ...	M. G. BONNEFONT, officier des haras.
Chasse, Elevage du gibier, Piégeage	M. A. DE LESSE, ing. agronome.
Pratique du Génie rural.....	MM. ROLLEY, PROVOST, ing. des amél. agric.
Machines agricoles, 2 vol.	M. COUPAN, chef de travail à l'Inst. agronom.
Matériel viticole.....	
Matériel vinicole.....	M. BRUNET, introduction par M. VIALA.
Constructions rurales 2 vol.	M. DANOUY, dir. des études de l'Ec. de Grignon.
Arpentage et Nivellement.....	M. MURET, professeur à l'Institut agronomique.
Irrigations et Drainages.....	MM. RISLER et WERY.
Électricité agricole.....	M. PETIT, ingénieur agronome.
Météorologie agricole.....	M. KLEIN, ingén. agronome, docteur ès-sciences.
Meunerie.....	M. L. AMMANN, prof. à l'Ec. de Grignon.
Sucrerie.....	M. SAILLARD, prof. à l'École des ind. agr.
Brasserie 2 vol.	
Distillerie.....	M. BOULLANOER, ch. de lab. à l'Inst. Past. de Lille.
Pomologie et Cidrerie.....	W. WAROOLIER, dir. de la stat. pomol. de Caen.
Vinification.....	
Vins mousseux.....	
Eaux-de-vie et Vinaigres.....	M. PACOTTET, chef de lab. à l'Inst. agron.
Laiterie.....	M. Ch. MARTIN, anc. dir. de l'École d'ind. lait.
Cons. de Fruits et de Légumes, 2 v.	M. ROLET, professeur d'agriculture à Antibes.
Indust. et Com. des Engrais.....	M. PLUVINAGE, ingénieur agronome.
Économie rurale.....	
Législation rurale.....	M. JOUZIER, prof. à l'École d'agric. de Rennes.
Comptabilité agricole.....	M. CONVERT, professeur à l'Institut agron.
Commerce des Produits agricoles.	M. POHER, insp. commercial à la Cie d'Orléans.
Comment exploiter un domaine....	M. VUIGNIE, ingénieur agronome.
Valeur de la terre en France.....	
Expertises agricoles.....	M. P. CAZIOT, inspecteur du Crédit Foncier.
Le Livre de la Fermière.....	M ^{me} O. BUSSARD.
Précis d'Agriculture.....	
Lectures agricoles.....	M. SELTENSPERGER, professeur d'agriculture.
Dictionnaire d'agriculture, 2 vol. }	

ENCYCLOPÉDIE AGRICOLE
Publiée par une réunion d'Ingénieurs agronomes
SOUS LA DIRECTION DE G. WERY

CHIMIE AGRICOLE

★ ★

CHIMIE DU SOL

II

PAR

Gustave ANDRÉ

PROFESSEUR A L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
AGRÉGÉ DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

OUVRAGE COURONNÉ PAR L'ACADÉMIE DES SCIENCES



2^e Édition

PARIS

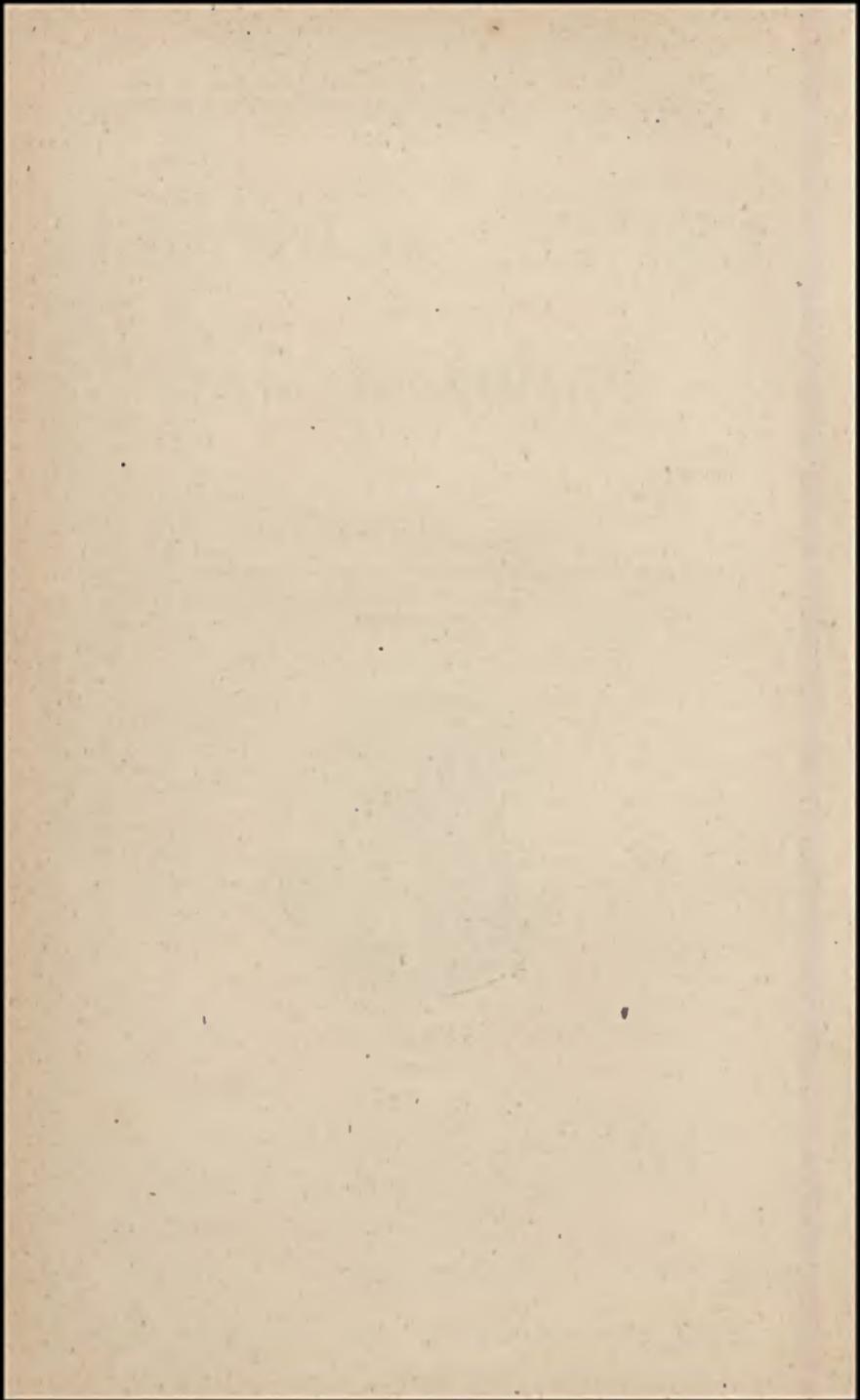
LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

19, rue Hautefeuille, près du Boulevard Saint-Germain

1921

Tous droits réservés





CHAPITRE IX

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

Définition du pouvoir absorbant ; nature des phénomènes qui entrent en jeu. — Premiers travaux relatifs au pouvoir absorbant. — Doubles décompositions d'ordre chimique. — Fixation de l'ammoniaque, de l'acide phosphorique, de la potasse. — Phénomènes d'absorption attribuables à la présence des colloïdes minéraux et organiques ; phénomènes d'équilibre, loi d'action de masse. — Affinité capillaire ; actions de surface ; phénomènes d'adsorption.

Définition du pouvoir absorbant ; nature des phénomènes qui entrent en jeu. — Lorsqu'on étudie la composition des dissolutions du sol, ainsi que nous l'avons fait antérieurement (tome 1, p. 241), et celle des eaux de drainage que nous exposerons plus loin, on constate immédiatement le fait suivant. Certaines substances fixes se rencontrent dans ces eaux en quantité relativement notable : telle la *chaux* sous forme de bicarbonate, de nitrate, de sulfate, de chlorure. D'autres, au contraire, sont peu abondantes : *potasse* ; d'autres, enfin, n'existent qu'à l'état de traces : *acide phosphorique, ammoniaque*. Si, de plus, on analyse les eaux de drainage de sols ayant reçu des engrais chimiques variés, solubles dans l'eau (sels d'ammonium ou de potassium, superphosphates, etc.), on observe des faits analogues. Les eaux qui ont traversé les terres ainsi enrichies sont parfois mieux pourvues de matières fixes que dans le premier cas, mais ces matières peuvent encore être rangées dans le même ordre sous le rapport de la quantité que l'on y rencontre. Il en résulte



que le sol, ou du moins certains sols, *sont capables de retenir énergiquement la plupart des matières utiles à la plante*. C'est à cette propriété particulière que l'on donne ordinairement le nom de *pouvoir absorbant*. Quelques auteurs — et avec raison — ont proposé de remplacer cette expression par celle de *pouvoir sélectif*, car il s'agit bien ici en réalité d'un *choix* de substances. En effet, tous les sels ne sont pas également absorbés par le sol, et, pour un sel donné, il y a le plus souvent absorption sélective de l'un de ses ions.

Schlœsing donne, *a priori*, de ce choix l'explication suivante : la potasse, l'ammoniaque, l'acide phosphorique sont des éléments primordiaux vis-à-vis de la nutrition de la plante ; aussi le sol est-il, par le fait de la culture, plus ou moins complètement privé de ces substances. On comprend alors pourquoi il est toujours apte à les fixer lorsqu'on les lui présente sous forme d'engrais. La soude ne pénètre qu'en faibles proportions dans le végétal ; quant à la chaux, elle abonde généralement dans les terres arables. Aussi un sol, largement pourvu de ces deux dernières bases, n'a-t-il aucune tendance à en absorber de nouvelles quantités.

L'intensité de l'absorption est une fonction de la valeur des ions absorbés. Qu'il s'agisse de cations ou d'anions, l'absorption augmente avec leur valence. L'ordre dans lequel les cations d'une part, les anions de l'autre se suivent relativement à l'absorption est identique pour toutes les terres. Le pouvoir absorbant varie d'une terre à une autre, en même temps que varie la nature des colloïdes et de la solution qui les imbibent (Mammano et Diaferia, 1916).

Mais il est d'autres raisons, d'ordre physique et *surtout chimique*, qui règlent ce pouvoir sélectif, ainsi que nous allons l'établir.

L'intérêt qui s'attache à l'étude des phénomènes qui font l'objet de ce Chapitre est facile à saisir. Déterminer la nature des facteurs qui entrent en jeu pour retenir les substances alimentaires ; modifier, s'il se peut, ces facteurs afin d'accroître l'intensité du pouvoir absorbant et les faire apparaître dans un sol qui en serait dépourvu : tels sont les problèmes dont nous allons chercher la solution ; de cette solution dépendra en grande partie la fécondité d'une terre.

Différentes modalités du pouvoir absorbant. — L'expression de *pouvoir absorbant*, qui date des premières constatations



faites sur la faculté que possède le sol de retenir telles substances à l'exclusion de telles autres, semble indiquer que, dans l'exercice de ce phénomène, les seules propriétés physiques du sol interviennent. En effet, l'influence des surfaces, l'adhésion capillaire, jouent ici un rôle qui n'est pas négligeable.

On sait que le charbon de bois absorbe certains gaz dissous dans l'eau et fixe, par exemple, les gaz odorants (H^2S , NH^3), de telle façon qu'une eau qui en contiendrait devient inodore après un contact ou une agitation plus ou moins prolongés. Le noir animal et l'argile décolorent beaucoup de liquides organiques dans lesquels le colorant est une substance colloïdale. Le charbon divisé absorbe, dans une dissolution où on le plonge, certains sels métalliques, tels que l'acétate de plomb : en général, un grand nombre de corps solides, surtout lorsqu'ils sont poreux, retiennent dans une dissolution quelque peu de la substance dissoute. De semblables phénomènes, d'ordre physique, peuvent être évidemment comptés au nombre des facteurs multiples qui interviennent pour retenir dans le sol les principes fertilisants. Cependant, nous montrerons que certaines actions purement chimiques doivent être prises en considération lorsqu'il s'agit d'expliquer le mécanisme par lequel telles substances solubles se fixent sur les éléments terreux.

En réalité, l'étude du pouvoir absorbant des sols est une question extrêmement complexe, étant donné le grand nombre de facteurs qui entrent en jeu et la nature, souvent indéfinie, des réactions physiques ou chimiques dont on constate les effets.

Si nous voulons nous faire une idée sommaire de la variété des phénomènes que nous allons examiner dans le courant de ce Chapitre, il suffit d'exécuter quelques expériences très simples.

Constatation du pouvoir absorbant. — Que l'on prenne, par exemple, un tube de 15 à 20 millimètres de diamètre intérieur et de 30 centimètres de longueur, qu'on le remplisse d'une bonne terre arable tamisée au tamis de 1 millimètre et que l'on verse avec précaution sur cette terre une solution très étendue (1 à 2 grammes au litre) de phosphate de potassium, de façon qu'il ne s'écoule pas de liquide par la partie inférieure du tube. Après avoir abandonné l'expérience à elle-même pendant une heure ou deux, on versera de l'eau distillé dans le tube de



manière à *déplacer* la solution phosphatée introduite. Un examen, même qualitatif, du liquide écoulé montrera que les deux constituants du sel ont été presque totalement retenus par la terre ; le liquide recueilli est, en effet, beaucoup plus pauvre en phosphate que le liquide initial.

Répétons la même expérience avec une solution de sulfate d'ammonium très étendue (0 gr. 05 au litre), et, après un contact suffisant avec la terre, déplaçons cette solution par l'eau distillée. Nous ne trouverons guère plus d'ammoniaque dans le liquide écoulé, mais nous y constaterons la présence d'une matière nouvelle, *le sulfate de calcium*. Ici l'absorption n'a pas porté sur les deux éléments du sel, comme dans le premier cas : *la base seule a été retenue* ; l'acide, au moins en grande partie, ne l'a pas été. Une double décomposition entre le sel d'ammonium introduit et le calcaire contenu dans l'échantillon de terre employée a donc eu lieu, et l'un des produits de ce double échange, le sulfate de calcium, s'est échappé. Quoi qu'il en soit, ce qui rapproche l'un de l'autre ces deux essais *e'est qu'une action chimique véritable semble être entrée en jeu* dans les deux cas. Il apparaît comme vraisemblable que, dans la première expérience, la présence du calcaire est nécessaire pour donner naissance par double décomposition à du phosphate tricalcique insoluble ; mais on doit alors se demander pourquoi le carbonate de potassium, très soluble, ne s'est pas éliminé en presque totalité lors du passage de l'eau distillée, et pourquoi le carbonate d'ammoniaque, très soluble également, qui s'est formé dans la seconde expérience, ne s'est pas écoulé en même temps que le sulfate de calcium, incomparablement moins soluble.

Ces essais très simples nous indiquent qu'il y a intervention évidente de quelque facteur nouveau capable d'arrêter au passage les substances très solubles auxquelles les phénomènes de double décomposition ont donné naissance. Si, dans un milieu aussi inhomogène que la terre arable, il faut tenir compte de la présence de ceux des éléments minéraux capables de produire au contact des matières salines apportées par les engrais une réaction chimique véritable, c'est-à-dire une réaction chimique qui suit la loi des proportions définies, il est également indispensable d'envisager la possibilité — et nous dirons plus loin *la réalité* — de certaines actions qu'exercent les colloïdes de la



terre arable vis-à-vis des sels dissous qui baignent ses particules. Ainsi que nous l'avons déjà établi (tome 1, p. 235), il ne s'agit plus ici de combinaisons en proportions définies, mais de combinaisons d'*absorption* dans lesquelles les lois ordinaires de la chimie se trouvent en défaut, mais dont l'existence est prouvée, entre autres choses, par le fait de la précipitation réciproque de certains colloïdes ou par celui de l'union avec la matière humique de bases alcalines libres ou combinées à l'acide carbonique (tome 1, p. 305). De plus, les solutions salines du sol, extrêmement étendues, sont fortement *ionisées* (tome 1, p. 264); elles possèdent donc une activité particulière qui peut se traduire par la fixation plus facile de l'ion positif (métallique) sur tel élément du sol à l'exclusion de l'ion négatif (radical acide).

Indépendamment de l'existence de réactions chimiques proprement dites et de combinaisons d'absorption provoquées par la présence des colloïdes, il faut faire également une part aux phénomènes d'*affinité capillaire*, analogues à ceux que l'on observe dans la fixation d'une matière colorante sur les fibres végétales. C'est en vertu de cette propriété spéciale que les substances organiques qui se rencontrent dans le sol, à des degrés de décomposition très variée, peuvent fixer certains sels.

L'expérience suivante, très classique, montre bien l'*adhérence* particulière que contractent certaines bases, avec la cellulose, par exemple. On prend une goutte d'une solution d'acétate de plomb de concentration moyenne (10 p. 100 environ), et on fait tomber cette goutte au centre d'un disque de papier à filtre. Lorsque la goutte a cessé de s'étaler, on place le disque sur un verre contenant une solution d'hydrogène sulfuré : tout le cercle humide se colore en noir par suite de la formation de sulfure de plomb. Si on dilue la solution plombique précédente de 10 volumes d'eau et que l'on répète la même expérience avec un nouveau disque de papier à filtre, on remarquera que le cercle humide ne se colorera pas en noir sur la totalité de sa surface. Seul un cercle concentrique au premier, et d'un diamètre d'autant plus petit que la solution sera plus étendue, subira l'action de l'hydrogène sulfuré. Dans la solution primitive à 10 p. 100, l'acide et la base étaient combinés de telle façon que la matière du papier à filtre ne présentait pas plus d'affinité pour l'un que pour l'autre : la solution était homogène, ainsi qu'en témoigne l'uniformité de coloration obtenue par l'acide sulfhydrique. Dans la solution très diluée, *le sel est hydrolysé*; le papier à filtre a fixé l'hydrate de plomb par absorption au point même où la goutte est tombée, et l'eau seule s'est diffusée bien au delà de l'endroit où cette fixation a eu lieu.

On peut donc concevoir que la faculté que possède la terre arable de retenir certaines substances est attribuable : 1° à des *phénomènes d'ordre chimique*, parmi lesquels la double décomposition saline joue le rôle principal; 2° à des *phénomènes*

d'absorption entre cristalloïdes et colloïdes minéraux et organiques ; 3° à des phénomènes dans lesquels interviennent des actions de surface (attraction capillaire). Si ces trois ordres de phénomènes doivent marcher de pair pour assurer le fonctionnement du pouvoir absorbant dans une terre qui renferme à la fois du calcaire, des silicates colloïdaux, de la silice et de l'hydrate ferrique colloïdal, de l'humus colloïdal — conditions qui se trouvent réalisées dans les bonnes terres arables — il est évident, par contre, que l'absence totale ou relative de l'une des substances précédentes annulera ou abaissera la faculté que possédera le sol de retenir les matières fertilisantes. D'où l'utilité, reconnue empiriquement, d'introduire dans ces sols moins bien partagés les éléments actifs du pouvoir absorbant, tels que : marnes argileuses dans les sols légers, engrais verts dans les sols argileux.

Il se confirme d'ailleurs de plus en plus que le pouvoir absorbant des sols vis à vis des matières fertilisantes est soumis, avant tout, aux lois qui régissent les équilibres chimiques.

Division du sujet. — D'après ce qui précède, il est naturel d'examiner le mécanisme du pouvoir absorbant en étudiant séparément chacun des facteurs probables qui entrent en jeu dans le phénomène. Nous employons à dessein le mot de *probables*. On ne saurait trop le répéter, le phénomène en question, fort complexe, passe par une succession de phases souvent difficiles à définir. Nous adopterons l'ordre suivant.

I. *Premiers travaux relatifs au pouvoir absorbant, dans lesquels apparaissent les multiples influences qui entrent en jeu.* II. *Doubles décompositions d'ordre purement chimique.* III. *Phénomènes d'absorption attribuables à la présence des colloïdes minéraux et organiques.* IV. *Affinité capillaire ; actions de surface ; phénomènes d'adsorption.* V. *Résumé et conclusions pratiques.*



I

PREMIERS TRAVAUX RELATIFS
AU POUVOIR ABSORBANT DES SOLS

Ces travaux sont bien résumés dans un mémoire publié en 1859 par Brüstlein, élève de Boussingault, auquel nous empruntons la plupart des détails qui suivent.

Expériences de Way ; rôle des silicates du sol ; travaux de Liebig. — Un agronome italien, Gazzeri (1819), paraît être le premier qui ait observé l'action qu'exerce la terre argileuse sur le purin. La combinaison *insoluble* qui prend naissance lorsqu'on agite ensemble ces deux matières est décomposée par les plantes qui y trouvent une source de substances alimentaires. Longtemps après, Huxtable et Thompson (1848) remarquent que le purin filtré sur de la terre fournit un liquide incolore et inodore, et que la terre possède cette curieuse faculté de retenir à l'état insoluble l'alcali d'une dissolution ammoniacale, même lorsque l'ammoniaque n'est pas libre, mais se trouve engagée en combinaison avec les acides sulfurique, nitrique ou chlorhydrique.

Way (1850) recherche la cause et les conditions de cette absorption. Il trouve que celle-ci n'est pas limitée à l'ammoniaque, mais que toutes les bases alcalines ou terreuses, potasse, soude, chaux, magnésic, indispensables au développement de la plante, se comportent de même : que ces bases soient libres ou combinées à un acide.

Cette absorption est-elle toujours du même ordre de grandeur pour une même base ? En ce qui concerne l'ammoniaque, Way montre qu'une même terre absorbe des quantités d'alcali identiques ; mais que l'absorption dépend essentiellement de la nature des terres et varie, par kilogramme de substance, entre 1 gr. 57 et 3 gr. 921. Il remarque, de plus, que ces chiffres n'ont rien d'absolu ; ils varient avec le degré de concentration de la liqueur employée et les proportions dans lesquelles cette liqueur est prise par rapport à la terre. L'absorption est rapide, aussi complète après une demi-heure qu'après quinze heures de contact. Les sels ammoniacaux sont décomposés ; la base seule est fixée, tandis que l'acide s'élimine à l'état de sel calcaire dans le liquide décanté. La cause elle-même du phénomène parut obscure à Way. Quel rôle jouent la chaux, l'alumine, les matières organiques dans ce phénomène ? Il semblait à l'auteur précité que ces matières n'étaient pas indispensables, car l'absorption n'augmentait pas lorsqu'on additionnait de calcaire une argile qui en était presque dépourvue. En outre, la calcination de l'argile n'abolit pas complètement la faculté absorbante, pas plus que le traitement préalable de la terre par l'acide chlorhydrique.

Etant donnée la rapidité de l'absorption, Way estima qu'il devait se former une combinaison chimique : dans ce cas, si on remplace l'ammoniaque par la potasse, l'absorption se fera dans le rapport des poids équivalents de ces deux bases. Or, si le poids de la potasse absorbée est plus grand que celui de l'ammoniaque, le chiffre théorique n'est cependant pas atteint. Les sels de chaux en dissolution filtrent tels quels au travers de la terre ; mais l'eau de chaux, suivant la proportion employée, abandonne une quantité de base qui varie, par kilogramme de terre, de 2 gr. 31 à 14 gr. 68. L'absorption de cette base est très faible lorsqu'elle est employée sous forme de bicarbonate. Les sels de sodium et de magnésium se conduisent comme les sels alcalins, sans donner lieu à une absorption aussi prononcée. Quant à l'acide phosphorique, qui forme avec la chaux un sel insoluble, il est retenu par le sol.

Way conclut de ces essais que les matières minérales et les sels ammoniacaux peuvent être distribués au sol sous une forme quelconque, puisque la terre végétale les ramène à un état spécial, sous lequel ces substances sont présentées aux plantes. L'épandage des engrais devra être aussi uniforme que possible, car, en raison même de leur insolubilité, les substances fertilisantes ne sauraient se diffuser. Etant donnée cette insolubilité, on pourra fournir au sol de fortes fumures ; en effet, une bonne terre peut retenir 60 fois autant de principes fertilisants que l'on en introduit ordinairement par les engrais.

Nous avons cité, d'après Brüstlein, les principales conclusions du travail de Way. Nous retrouverons dans la suite plusieurs des notions que cet expérimentateur a mises en évidence, et nous en vérifierons souvent la justesse.

Le point le plus curieux des expériences tentées par Way pour expliquer le mécanisme du pouvoir absorbant se rapporte à la préparation d'un silicate double artificiel analogue à celui que l'auteur supposait exister dans le sol et auquel il attribuait les propriétés absorbantes. En précipitant un sel d'alumine par le silicate de sodium, Way obtenait un silicate double d'aluminium et de sodium, à plusieurs molécules d'eau, dans lequel la soude peut être déplacée en totalité par la chaux, celle-ci pouvant être à son tour déplacée par la potasse, et celle-ci, enfin, par l'ammoniaque. Ce déplacement réciproque des bases dans les silicates colloïdaux complexes constitue, comme nous le verrons plus loin, l'un des caractères les plus nets du pouvoir absorbant.

D'ailleurs, l'emploi d'un silicate artificiel, analogue aux zéolithes, a été préconisé récemment par Gans (1913), sous le nom de *permutite*. Celle-ci se prépare en fondant du feldspath ou du kaolin avec des hydroxydes ou des carbonates alcalins. Beaucoup d'expériences sur le déplacement réciproque des bases ont été exécutées avec ce silicate artificiel.

Henneberg et Stohmann, puis Liebig, confirmèrent les recherches de Way. Liebig, en particulier, montra, conformément aux vues de ce dernier auteur, que les diverses bases ne sont pas fixées par la terre.

arable dans les mêmes proportions. Le purin abandonne plus de potasse que de soude dans son passage au travers de la terre ; celle-ci retient la totalité de l'ammoniaque. Quelques années après Voelcker arrivait à des conclusions analogues. Si on met au contact de terres de nature très variée des solutions de potasse et de soude à l'état de chlorure, on trouve toujours que les terres retiennent plus de potasse que de soude.

Comme les eaux de drainage sont très pauvres en principes fertilisants, puisque le sol fixe ces principes et les rend insolubles, Liebig estime que les racines doivent posséder une force spéciale qui leur permet de choisir et d'assimiler les matières qui leur sont indispensables mais qu'elles ne trouvent pas en dissolution. Les plantes aquatiques (*Lenuma minor*), dont les racines nagent dans l'eau, seraient, d'après Liebig, soumises à d'autres lois et pourraient prendre leurs aliments directement à une dissolution.

En réalité, le mécanisme de l'absorption est le même dans les deux cas ; nous avons vu précédemment qu'il circulait dans le sol de véritables dissolutions salines, très étendues sans doute, mais pouvant se reformer d'une manière continue au fur et à mesure de leur disparition.

Expériences de Brüstlein sur la fixation de l'ammoniaque. — Brüstlein se borne à l'étude de l'absorption de l'ammoniaque en raison de la facilité du dosage de cette base. Il utilise trois terres dont les caractères physiques sont très différents. La première, prise à Bechelbronn, est une argile ténue, compacte, assez riche en calcaire ; la seconde (provenant du Mittelhausbergen) peu plastique, très homogène, riche en calcaire ; la troisième est une terre du potager du Liebfrauenberg, formée de sable quartzeux, très riche en débris organiques, restes d'anciennes et fortes fumures. 50 grammes de ces diverses terres sont introduits dans un flacon avec 100 grammes de dissolution ammoniacale. On bouche le flacon et on l'agite. Après repos, on prélève 50 centimètres cubes du liquide éclairci et on y dose l'ammoniaque ; on aura, par différence, la quantité de base fixée par la terre. Voir à la page suivante, la moyenne fournie par un grand nombre d'expériences.



	NH ³ dans 100 cc. de la dissolution	Concentrat. relative de NH ³	NH ³	
			absorbée par 50 gr. de terre	p. 100 de NH ³ fournie
Terre de Bechelbronn ...	0 gr. 355	1	0 gr. 056	15,7
— ...	0 gr. 117	$\frac{1}{3}$	0 gr. 032	27,3
— ...	0 gr. 029	$\frac{1}{12}$	0 gr. 014	48,2
Terre du Mittelhausber- gen	0 gr. 355	1	0 gr. 024	6,7
—	0 gr. 117	$\frac{1}{3}$	0 gr. 017	14,5
—	0 gr. 029	$\frac{1}{12}$	0 gr. 008	27,6
Terre du Liebfrauenberg	0 gr. 355	1	0 gr. 035	10,0
—	0 gr. 117	$\frac{1}{3}$	0 gr. 026	22,2
—	0 gr. 059	$\frac{1}{6}$	0 gr. 019	32,1
—	0 gr. 029	$\frac{1}{12}$	0 gr. 011	37,9

Ainsi que le fait remarquer Brüstlein, ces nombres n'ont rien d'absolu ; ils sont principalement modifiés par la force de la dissolution et varient avec le temps du contact ; car, si on prolonge l'expérience, la terre fixe une nouvelle quantité d'ammoniaque.

Il ne semble donc pas que l'on soit ici en présence d'une combinaison chimique en proportions définies. Cependant les mêmes essais répétés avec un sel ammoniacal conduiraient à faire admettre peut-être l'existence d'une véritable combinaison, car l'absorption pour une même terre est plus régulière dans des conditions identiques. Conformément aux expériences de Way, la base seule est fixée et l'acide reste dissous à l'état de sel de calcium. Si la concentration du sel ammoniacal varie, la quantité d'ammoniaque fixée change ; un contact prolongé augmente l'absorption, mais dans une plus faible mesure que s'il s'agit de l'ammoniaque libre.

Brüstlein est ainsi amené à rejeter l'idée d'une combinaison chimique proprement dite. Il estime que l'humus pourrait



bien jouer un rôle actif dans l'absorption de l'ammoniaque. En effet, du terreau, retiré d'un chêne creux, fixait cette base et donnait un mélange inodore ; la tourbe se comportait de même. L'indifférence chimique du corps absorbant est démontrée par ce fait que le noir animal lui-même est également capable de fixer l'ammoniaque.

Les trois substances que nous venons de mentionner, si elles absorbent l'alcali libre en quantités plus grandes que la terre végétale, sont, à l'inverse de celle-ci, incapables de fixer l'ammoniaque engagée dans une combinaison saline. Aussi Brüstlein pensa-t-il que cette inertie était due à l'absence du carbonate de calcium. En effet, la terre de Bechelbronn, traitée par l'acide chlorhydrique, puis lavée et séchée, conserve la propriété de fixer l'ammoniaque libre, mais ne l'absorbe plus lorsque cet alcali est engagé dans une combinaison saline. On rend à la terre sa propriété fixatrice en la mélangeant avec du calcaire, ce que l'on réalise pour le mieux en faisant bouillir cette terre décalcifiée avec une solution de bicarbonate de calcium : le calcaire se précipite alors sur les grains sableux dans un grand état de division. Préparé ainsi, le nouvel échantillon fixe l'ammoniaque d'une solution de chlorure d'ammonium et le liquide renferme, après contact, du chlorure de calcium. Le noir animal lavé aux acides, puis calciné et mélangé de calcaire, se conduit comme la terre qui a recouvré son carbonate de calcium. Ainsi, d'après Brüstlein, le pouvoir absorbant de la terre arable vis-à-vis de l'ammoniaque est sous la dépendance presque exclusive de la constitution physique des éléments minéraux et même des substances organiques que cette terre renferme. La présence dans le sol d'un carbonate (calcaire ou magnésien) est indispensable pour la fixation de l'ammoniaque engagée dans une combinaison saline. La formation corrélativo d'un sel calcique soluble montre qu'il y a eu, dans ce cas, double décomposition.

Les conclusions de ces premiers travaux sont fort intéressantes ; elles résument très bien les points principaux de l'histoire du pouvoir absorbant. Nous voyons, en effet, que, dans le mécanisme du phénomène, il entre en jeu, d'après Way, des facteurs minéraux, tels que certains *silicates* à la présence desquels on doit attribuer une grande



part dans les phénomènes d'absorption de l'ammoniaque libre et des bases en général. Le carbonate de calcium (ou celui du magnésium) intervient pour décomposer les sels ammoniacaux dont l'acide passe à l'état de sel de calcium ; la base étant fixée, soit par les silicates, soit par l'humus (Way-Brüstlein).

En vue de n'exposer ici que les faits principaux et les mieux observés qui caractérisent le pouvoir absorbant, nous devons, dès maintenant, énoncer les trois propositions suivantes dont nous établirons la réalité dans les pages qui vont suivre.

1° Le calcaire intervient lorsqu'il s'agit d'insolubiliser l'acide phosphorique ; de plus, au contact des sels d'ammonium ou de potassium ajoutés comme engrais, il provoque une double décomposition avec formation des carbonates correspondants.

2° Ces carbonates alcalins se conduisent comme les bases libres elles-mêmes : pour qu'ils soient retenus par la terre arable, il faut qu'ils rencontrent des absorbants à caractère acide, tels que l'humus, ou qu'ils soient fixés par les silicates colloïdaux dont ils saturent les oxyhydriles OH libres.

3° On constate dans le sol des phénomènes d'absorption qui sont indépendants de la présence du calcaire. Le métal d'un sel soluble peut, par contact avec un silicate zéolithique, déplacer un autre métal contenu dans ce silicate. En d'autres termes il y a échange de bases entre le sel soluble et le silicate zéolithique insoluble.

II

DOUBLES DÉCOMPOSITIONS D'ORDRE CHIMIQUE

Fixation de l'acide phosphorique. — Supposons d'abord le cas d'un sol n'ayant jamais reçu d'engrais phosphatés. Dans un pareil sol, les liquides qui circulent sont très pauvres en acide phosphorique ; leur concentration doit être, au plus, égale à celle qui correspond à la solubilité du phosphate tricalcique dans l'eau contenant, naturellement, une proportion variable de gaz carbonique. Mais diverses causes tendent à réduire encore cette solubilité. Si la terre est calcaire, l'eau, chargée de gaz carbonique, dissout beaucoup moins d'acide phosphorique que l'eau pure (tome I, p. 71). De plus, les phénomènes d'*adsorption*, c'est-à-dire d'adhérence des corps dissous autour des particules solides, soustraient aux liquides normaux



du sol une certaine dose d'acide phosphorique (Voy. plus loin).

On comprend donc pourquoi la terre arable retient très bien l'acide phosphorique et s'oppose à son départ dans les eaux souterraines.

Supposons maintenant que le sol reçoive du superphosphate de chaux, c'est-à-dire du phosphate monocalcique très soluble dans l'eau. Si le sol en question est calcaire, l'insolubilisation de ce phosphate sous l'état bicalcique, puis tricalcique, est rapide.

Il s'agit donc ici d'un phénomène chimique de neutralisation d'un acide polybasique par un excès de base. Toutefois, après une addition de superphosphates, on voit apparaître dans les eaux de drainage de minimes quantités d'acide phosphorique dont la présence était douteuse avant cette addition. Ce fait est imputable évidemment à une diminution du pouvoir absorbant dont les divers facteurs, saturés d'acide phosphorique à un moment donné, en laissent alors échapper l'excédent. Mais, lorsque la végétation s'empare du phosphore au fur et à mesure des besoins de la plante, le taux de l'acide phosphorique des eaux de drainage diminue souvent au point de devenir négligeable.

Si le sol sur lequel on a répandu le superphosphate est acide (sols riches en humus, dépourvus de calcaire ; sols granitiques), le phosphate monocalcique rencontre des oxydes de fer et d'aluminium et des silicates colloïdaux qui le retiennent énergiquement par insolubilisation. Celle-ci exige parfois un certain temps avant de se produire, et l'on sait que les graines, semées dans de pareils sols peu après l'épandage d'un superphosphate, risquent de rencontrer une solution fortement acide qui peut entraver ou même annuler leur évolution. Cette insolubilisation, si lente qu'elle soit, se produit toujours, à moins que le sol ne reçoive une quantité d'eau suffisante, capable de soustraire assez rapidement une partie au moins du sel soluble à toute neutralisation chimique. Le fait a, d'ailleurs, été constaté bien des fois.

Ainsi, en raison du contact du phosphate monocalcique avec les éléments ferriques et alumineux, il se produit des phosphates ferrique et aluminique, insolubles dans l'eau chargée de gaz carbonique, très dif-



ficilement utilisables par la végétation sous cette forme nouvelle, si, à un moment donné, on n'additionne pas le sol d'une dose suffisante de calcaire capable de les transformer, par double décomposition, en phosphate tricalcique. Donc, par le fait de l'existence de ces diverses réactions, l'acide phosphorique n'a qu'une très faible tendance à descendre dans la profondeur du sol. Dyer a comparé deux terres calcaires dont l'une avait reçu pendant cinquante ans des superphosphates, et il a examiné la répartition du phosphore suivant la profondeur. En tenant compte de la quantité de cette substance enlevée par les récoltes, on pouvait calculer quel était l'excédent que l'on aurait dû trouver dans celle des deux terres qui avait reçu les superphosphates. Or, plus des $\frac{4}{5}$ de l'acide phosphorique que l'on devait rencontrer dans le sol au bout de cinquante ans étaient localisés dans une couche de terre superficielle de 23 centimètres ; les couches sous-jacentes ne s'étaient pas enrichies.

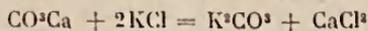
Fixation de l'ammoniaque. — Nous avons dit plus haut (p. 8) que, lorsqu'on mettait au contact d'une terre calcaire une dissolution très étendue d'un sel ammoniacal quelconque, il se produisait une élimination de chaux, laquelle s'unit à l'acide combiné préalablement à l'ammoniaque. Ici l'explication est simple : on sait, en effet, qu'une solution froide et diluée de sulfate d'ammoniaque, par exemple, est décomposée par le carbonate de calcium avec formation de sulfate de calcium et de carbonate d'ammonium. Ce dernier, ou plutôt l'ammoniaque seule, est fixé par l'humus ou par les silicates colloïdaux dont le rôle est de première importance à l'égard de l'absorption, ainsi que nous le verrons plus loin. Il paraît difficile d'admettre toute autre hypothèse dans le cas actuel ; la présence d'un sel soluble de calcium, après double décomposition, indique bien le sens de la réaction. De plus, le poids de l'humus contenu le plus souvent dans un bon sol arable est plus que suffisant pour retenir la quantité d'ammoniaque répondant à 300 ou 400 kilogrammes de sulfate, dose d'engrais employée ordinairement sur la surface d'un hectare. On comprend donc que tant que la saturation de l'humus ou celle des silicates n'est pas atteinte, l'ammoniaque, dégagée de sa combinaison initiale, ne passera pas dans les eaux de lavage du sol : c'est bien ce que l'on observe dans les conditions naturelles ; l'ammoniaque est rare ou même absente dans ces eaux.

Fixation de la potasse. — Arrivons maintenant à l'absorption des *sels de potassium*. Celle-ci est réelle, puisque les eaux de lavage du sol sont pauvres en potasse, un peu plus chargées cependant de cette base que d'ammoniaque. L'expérience montre, en outre, que l'application des engrais potassiques (chlorure ou sulfate de potassium) augmente notablement la teneur des eaux de drainage en potasse. Mais, même dans ce dernier cas, on ne constate guère *au maximum* qu'une perte s'élevant à une dizaine de kilogrammes de cette base par an et par hectare. Les sels de potassium sont donc bien retenus par le sol.

Le sol absorbe et retient bien plus énergiquement l'ion potassium de la solution d'un sel potassique que l'ion Cl ou SO⁴. Cette absorption sélective du potassium augmente avec la concentration jusqu'à une certaine limite pour demeurer ensuite constante. Lorsqu'il s'agit de concentrations très faibles, cette absorption est pratiquement totale. Plus les particules du sol sont petites, plus grande est l'absorption sélective par le sol de l'ion potassium d'une solution de chlorure (Parker, 1913).

Lorsque l'on répand directement sur la terre du carbonate de potassium (cendres végétales), on comprend que l'humus intervienne en partie pour s'unir à ce sel très alcalin. L'humus, à moins qu'il ne soit saturé de chaux, possède en effet des propriétés acides ; il décompose le carbonate de potassium et le gaz carbonique est mis en liberté. Les silicates colloïdaux s'emparent également d'une certaine quantité de ce sel, soit par absorption, soit par combinaison chimique proprement dite. Nous reviendrons sur ce point. En réalité, le carbonate de potassium se comporte comme la potasse libre.

Cependant, il semble qu'il faille chercher une autre explication de la fixation de la potasse lorsqu'on répand sur le sol du sulfate ou du chlorure de potassium. Dans ce cas, comparable à celui de l'épandage du sulfate d'ammonium, une double décomposition intervient-elle entre le calcaire et le sel potassique ? Cherchons d'abord si la double décomposition a lieu dans le sens suivant :



Nous verrons ensuite s'il n'est pas possible d'imaginer un autre mode de fixation de la potasse par le sol.

Lorsqu'on arrose avec une solution très étendue de chlorure de potassium une colonne de terre arable, on constate, si la durée du contact a été suffisante, que le liquide qui s'écoule au bas de la colonne contient, comme dans le cas de l'emploi d'un sel ammoniacal, un sel de calcium soluble; c'est le chlorure dans l'exemple actuel. Quant à la potasse, elle est retenue d'autant mieux que la solution initiale est plus diluée et qu'elle demeure plus longtemps au contact de la terre. En réalité, si on fait bouillir pendant quelques heures une solution de chlorure de potassium avec du carbonate de calcium, il y a formation d'une très petite quantité de carbonate de potassium qui communique au liquide une réaction alcaline. Le même phénomène s'observe quand on opère à froid, au bout d'un temps suffisamment long.

La réaction : $K^2CO^3 + CaCl^2 = CO^2Ca + 2KCl$, qui est réputée pratiquement totale dans le sens de cette équation, pourrait donc cependant donner lieu à un phénomène d'équilibre.

La production des carbonates alcalins au sein de la terre arable semble d'ailleurs favorisée par la présence d'un excès de gaz carbonique libre, ainsi qu'il résulte de l'expérience suivante, due à de Mondésir (1888).

En étudiant la formation des carbonates de soude naturels, cet auteur a été amené à faire l'essai suivant. Un kilogramme d'une terre très riche en humus et en calcaire a été délayé dans 4 litres d'une dissolution à 1 p. 100 de chlorure de sodium. Cette terre a transformé en chlorure de calcium environ 15 p. 100 du sel marin. « *Après des lavages qui ont enlevé la presque totalité des sels, la terre, remise dans l'eau pure, a été traitée par l'acide carbonique et ce traitement a été répété quatre fois. Les dissolutions ont donné par évaporation, après dépôt du carbonate de chaux, une quantité de carbonate de soude correspondante à la transformation du chlorure de sodium.* » L'auteur, en remplaçant dans une opération le sel marin par le chlorure de potassium, et, dans une autre, le bicarbonate calcique par le sulfate de calcium, a obtenu, avec le même kilogramme de terre, d'une part 12 grammes de bicarbonate de potassium et, de l'autre, 13 grammes de sulfate de sodium pesé à l'état anhydre.

Il apparaît donc que la double décomposition entre un sel de potassium soluble et le calcaire peut avoir lieu au sein de la terre arable dans les conditions naturelles, c'est-à-dire dans un milieu qui renferme toujours une certaine dose de gaz carbonique : les agents de la fixation du carbonate alcalin formé étant, comme nous l'avons dit, l'humus et les silicates colloïdaux dont les oxydrides libres sont capables de fixer les bases.



Lorsque le pouvoir absorbant est satisfait, c'est-à-dire lorsque la terre atteint un certain degré de saturation vis-à-vis de la potasse, degré variable avec la nature de cette terre, la double décomposition entre les sels de potassium solubles et le calcaire semble n'avoir plus lieu. C'est ce qui arrive, d'après Dumont, lorsqu'on traite au préalable une terre par du carbonate de potassium : le dédoublement des engrais potassiques ne se produit plus, quelle que soit la dose de calcaire que renferme le sol, tant que l'absorption demeure satisfaite.

Quoi qu'il en soit, si on envisage la question *au point de vue pratique*, on trouve que, si la potasse et l'ammoniaque sont fixées par la terre arable, ces bases le sont d'une manière différente suivant qu'on les fournit au sol sous forme de carbonate ou sous forme de sulfate. Cette différence de fixation a été observée, il y a déjà longtemps, à propos de recherches propres à éclairer la théorie du plâtrage.

On sait que, de tous les avantages reconnus dans l'action du plâtre, le plus réel et le seul qui soit hors de doute consiste dans une solubilisation de la potasse. Cette base se mobilise et descend dans la profondeur du sol où les racines des légumineuses, parfois si longues, peuvent l'absorber. C'est vraisemblablement à l'état de sulfate que la potasse chemine ainsi dans les couches profondes.

Pour étudier l'absorption comparée des carbonates et des sulfates on fait réagir de 50 à 200 grammes de kaolin ou de terre végétale sur des solutions diluées de carbonate et de sulfate de potassium. Le volume de la solution saline est mesuré ; on laisse celle-ci en contact avec la terre pendant quelques heures, puis on filtre, et on dose la potasse ou l'ammoniaque dans le liquide filtré. On connaît ainsi, par différence, ce que l'argile ou la terre ont absorbé. L'expérience montre que, dans le cas de ces deux bases, le carbonate est toujours plus fortement retenu que le sulfate. La moyenne générale des différences obtenues est la suivante, d'après Dehérain :

Sur 100 parties de potasse introduites	}	Carbonate	74
dans une matière absorbante à l'état		Sulfate	32
de :			
Sur 100 parties d'ammoniaque intro-	}	Carbonate.....	80
duites dans une matière absorbante		Sulfate	31,5
à l'état de :			



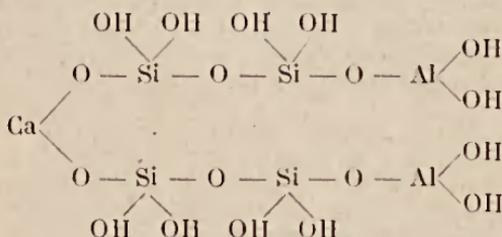
III

**PHÉNOMÈNES D'ABSORPTION ATTRIBUABLES
A LA PRÉSENCE
DES COLLOIDES MINÉRAUX ET ORGANIQUES**

Nous avons vu, quelques pages plus haut, que Way avait déjà pressenti le rôle important des silicates dans l'absorption des matières fertilisantes. L'examen attentif de cette question va nous montrer que certaines classes de silicates (*les zéolithes*) se prêtent avec une grande facilité au remplacement réciproque des bases les unes par les autres.

Déplacement des bases dans un silicate zéolithique. — Eichhorn (1858) a mis nettement en relief la nature de ce remplacement. Il prit de la *chabasie* (silicate double d'aluminium et de calcium hydraté) dont la composition centésimale était la suivante : $\text{SiO}_2 = 47,4$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20,7$; $\text{CaO} = 10,4$; $\text{K}_2\text{O} = 0,7$; $\text{Na}_2\text{O} = 0,4$; $\text{H}_2\text{O} = 20,4$.

On peut traduire cette composition par la formule suivante de constitution (en ne tenant pas compte de la potasse et de la soude) : $\text{Si}^4\text{Al}^2\text{CaO}^{18}\text{H}^{12} = 4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,



formule dans laquelle on a mis en évidence un certain nombre d'oxyhydriles (OH), les uns attachés à l'aluminium, les autres au silicium. Il est facile, à l'aide de cette formule (ou de toute autre analogue), de saisir la raison pour laquelle un pareil silicate



hydraté fixe, soit des radicaux basiques, soit des radicaux acides, suivant que ces radicaux prennent la place d'un oxydride uni à l'aluminium ou au silicium.

Un échantillon de ce minéral pulvérisé fut traité pendant dix jours par une solution de sel marin à 1 p. 100 ; un autre échantillon pendant vingt et un jours par une solution de carbonate de sodium à 4 p. 100 ; un autre, pendant vingt et un jours, par une solution de chlorure de potassium à 1 p. 100. La soude et la potasse déplacèrent une partie de la chaux, et celle-ci apparut en dissolution à l'état de chlorure de calcium. La chaux de la chabasite est également déplaçable par l'ammoniaque, et la nouvelle substance formée ainsi ne perd pas d'ammoniaque à 110°, alors que le silicate primitif commence déjà à s'altérer à cette température.

Il résulte de ces expériences faites en l'absence de calcaire, que les bases peuvent se substituer les unes aux autres dans certains silicates hydratés. Ceux-ci sont, en principe, facilement attaqués par les acides forts et semblent être les seuls qui possèdent cette curieuse propriété d'échanger quelques-uns de leurs constituants basiques contre d'autres bases mises en leur présence sous forme de solutions salines.

Les phénomènes de déplacement des bases dans le sol sont corrélatifs de la présence des silicates hydratés. — Parmi les travaux les plus importants relatifs à cet échange de bases, non plus vis-à-vis d'un minéral déterminé, mais au contact de la terre elle-même, nous citerons les suivants :

Absorption de la potasse en dissolution. — Peters (1859) traite 250 grammes de terre par une liqueur aqueuse renfermant, dans un volume de 230 centimètres cubes, des sels variés de potassium sous les concentrations de 1/5, 1/10, 1/20, 1/40, 1/80, d'équivalent $\left(\frac{K_2O}{2}\right)$.

Après agitation et contact de vingt-quatre heures, on décante, et on dose la potasse dans le liquide décanté. Les divers sels de potassium se comportent, au point de vue de leur absorption, de façon différente. La durée du contact et la température n'ont qu'une faible influence sur le phénomène ; la quantité absolue de la potasse absorbée croît avec la concentration de la liqueur. Cependant la terre emprunte à une solution diluée une dose de cet alcali proportionnellement plus élevée que celle qu'elle soustrait à des solutions plus concentrées. Quelle que soit la dilution des liqueurs, la terre, dans les conditions où Peters s'est placé, ne retient jamais la totalité de la base dissoute. Lorsqu'on examine la composition du liquide décanté, on y trouve, non seulement de la chaux, mais de la magnésie, de la soude et de la silice. Or, si la terre a été traitée au préalable par de l'acide chlorhydrique



chaud, puis bien lavée, elle perd en grande partie sa capacité d'absorption pour la potasse : on voit ici encore le rôle des silicates hydratés solubles dans les acides forts, dont la destruction diminue le pouvoir que possède normalement la terre de fixer certaines bases.

En ce qui concerne les acides contenus dans les sels dont la base est absorbée, ils ne sont retenus par la terre qu'autant qu'ils peuvent former avec la chaux ou la magnésie des composés insolubles (acide phosphorique). Il résulte donc de ces expériences qu'il y a un *remplacement* effectif de certaines bases par d'autres.

D'après Hager (1917), la chaux adsorbée par les colloïdes du sol est susceptible d'échanges avec d'autres bases.

Remarques sur les équilibres. — Rumpler (1901) a fait, à propos des travaux de Eichhorn et de Peters, quelques remarques intéressantes. Il peut sembler inexplicable qu'un silicate, insoluble comme la *chabasie*, échange ses bases lorsqu'on le met en présence de certains sels. Or, il n'existe pas en réalité de substances absolument insolubles dans l'eau, et les remplacements, tels que ceux que nous avons cités à propos de la *chabasie*, sont assez fréquents. La solubilité du phosphate tricalcique, par exemple, est très faible ; elle s'accroît au contact des sels ammoniacaux et alcalins : il y a échange de bases. Le phosphate trinagnésien, très peu soluble, se transforme, au contact du sel ammoniac et de l'ammoniaque, en phosphate ammoniaco-magnésien. Les expériences de Peters montrent qu'il se produit un *équilibre chimique* entre les diverses substances en présence. Cet équilibre dépend des proportions dans lesquelles se trouvent les différentes bases, dans le sol d'une part, dans les solutions salines ajoutées, d'autre part ; ainsi que du rapport entre la quantité totale des bases contenues dans le sol et la quantité totale des bases contenues dans la solution. C'est là une application de la *Loi d'action de masse* (p. 30).

On peut, d'après Rumpler, imaginer cet équilibre de la façon suivante. Représentons-nous un silicate dans lequel, parmi les bases susceptibles d'échange, il n'y ait que de la chaux et de la potasse et dans lequel le rapport pondéral entre la première et la seconde de ces bases soit 99 : 1. Si on met ce silicate au contact d'une liqueur qui ne contiendra que de la chaux et de la potasse (sous forme de nitrates par exemple), mais dans laquelle le rapport de ces bases sera précisément l'inverse du rapport



précédent, 1 : 99, la potasse se combinera au silicate, et la chaux que renfermait celui-ci sera déplacée ; elle entrera en solution jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre entre différents facteurs de la réaction. Si on ajoute alors au mélange une certaine quantité de nitrate de potassium, l'équilibre précédent est détruit ; le silicate perd une nouvelle quantité de chaux qui passe en solution, tandis qu'une nouvelle quantité de potasse se combine au silicate.

Ces remplacements et ces équilibres apparaissent nettement dans les expériences de Peters. Rumpel a calculé que, dans l'échantillon de terre employé par ce dernier auteur, le rapport de la potasse à la somme des autres bases était égal à 1 : 6,46. En agitant avec cette terre des solutions de chlorure de potassium aux titres précédemment indiqués, le rapport de la potasse aux autres bases prend successivement les valeurs suivantes :

	Rapport : $\frac{\text{Potasse}}{\text{Somme des autres bases}}$
Pour une solution de KCl à 1/80 d'équivalent	1 : 1,83
— 1/40 —	1 : 0,70
— 1/20 —	1 : 0,41
— 1/10 —	1 : 0,20
— 1/5 —	1 : 0,17

Pour la même terre, le rapport de remplacement change donc avec la concentration de la solution mise à son contact.

Déplacement des bases par le gaz carbonique. Echange de bases. — Les remplacements de bases chez les silicates sont également très visibles dans les expériences suivantes dues à Lemberg (1876), que nous empruntons à l'ouvrage de Ramann (*Bodenkunde*, 1911, p. 54). Lemberg traite, pendant trois semaines, par l'eau chargée de gaz carbonique, un silicate hydraté dont la composition, abstraction faite de l'eau, est la suivante :

(1)	Silice	=	46,6 p. 100
	Alumine	=	29,3 —
	Potasso	=	22,7 —
	Soudo	=	1,4 —



Après l'action du gaz carbonique, la composition du silicate est modifiée de la façon suivante :

(2)	Silice	=	54,0	p. 100
	Alumine	=	39,6	—
	Potasse	=	5,3	—

La majeure partie de la potasse s'est donc dissoute sous l'influence du gaz carbonique employé en excès. Si l'on met ce silicate ainsi modifié au contact d'une lessive de potasse, sa composition devient :

(3)	Silice	=	46,6	p. 100
	Alumine	=	35,6	—
	Potasse	=	17,7	—

Le silicate a donc repris presque tout l'alcali que lui avait fait perdre le traitement par l'acide carbonique ; mais, traité par l'eau, il perd de nouveau une partie de sa potasse. Il est évident, d'après cela, que les variations de la composition du silicate primitif dépendent de la masse de l'eau employée, d'une part, de celle de la potasse, d'autre part.

Le silicate primitif (1), traité par le chlorure d'ammonium, échange la presque totalité de sa potasse contre l'ammoniaque ; il présente alors la composition suivante :

(4)	Silice	=	56,1	p. 100
	Alumine	=	34,6	—
	Potasse	=	0,9	—
	Ammoniaque (NH ³)	=	8,3	—

Il en résulte que 8,3 d'ammoniaque ont remplacé $22,7 - 0,9 = 21,8$ de potasse ; NH³ = 17 a donc remplacé $\frac{K^2O}{2} = 47,1$: en effet, 8,3 d'ammoniaque NH³ correspondent à $23,14 \frac{K^2O}{2}$ chiffre voisin de 21,8.

Il y a donc équilibre entre l'eau, les constituants du sol et les diverses substances salines dissoutes qui se trouvent au contact de celui-ci : ces déplacements n'ont lieu que lorsqu'on met en présence du silicate un grand excès de solution.

Des conclusions analogues à celles que l'on peut tirer des expériences de Peters ont été formulées par Pillitz (1875). D'après cet auteur, chaque terre possède, sous le rapport de l'absorption de la potasse, de l'ammoniaque, de l'acide phosphorique, un *point de saturation défini*, au-dessus duquel il n'y a plus d'absorption. Une concentration minimum de la solution employée est nécessaire pour saturer une terre donnée ; l'absorption des bases, telles que potasse et ammo-



niaque, a lieu en proportions équivalentes. En ce qui concerne l'ammoniaque, cette base est absorbée indépendamment de la présence du calcaire. Mais, contrairement aux vues de Peters, Pillitz montre que la concentration de la solution ne change pas la grandeur de l'absorption. Lorsqu'on fait agir une solution de phosphate de potassium sur la terre, celle-ci absorbe les deux éléments du sel, acide et base, dans les mêmes proportions où ils existent dans le sel.

Le reproche que l'on a adressé à ces dernières expériences c'est d'avoir été faites avec des solutions trop concentrées, non comparables à celles qui répondent aux concentrations physiologiques (Knop).

Pendant Kellner a confirmé la plupart des faits énoncés par Pillitz, entre autres celui qui a trait à l'absorption *équivalente* de la potasse et de l'ammoniaque. Il montre que, si la richesse d'un sol en matières humiques et en silicates zéolithiques augmente le pouvoir absorbant, il existe aussi un autre facteur qui entre en jeu : c'est la grandeur de la surface offerte par ces matières aux substances destinées à être absorbées.

Conformément aux données de Peters, Kellner, en employant des solutions de sel ammoniac, a pu déplacer la potasse fixée par absorption sur une terre. Ce déplacement fournit une quantité de potasse un peu supérieure à celle que la terre avait empruntée aux solutions : en effet, le sel ammoniac déplace, en outre, une petite dose de la potasse contenue primitivement dans la terre.

Parmi les faits intéressants observés par Kellner il faut citer le suivant. La potasse, la chaux et la magnésie ne contribuent à la nutrition d'une plante qu'autant que ces bases existent dans le sol sous forme dissoute, ou sous forme de combinaisons d'absorption facilement déplaçables. Cette proposition a été vérifiée directement par l'expérience.

La méthode du déplacement des bases par des solutions salines variées, préconisée par Kellner, a été reprise par Prianischnikow (1912). D'après cet auteur, la facilité avec laquelle la potasse peut être déplacée, dans un certain nombre de minéraux, très communs chez la plupart des sols, est, par ordre décroissant, la suivante : néphéline, biotite, muscovite, orthoclase, sanadine, microcline, leucite. Or ces minéraux se prêtent dans le même ordre aux besoins des plantes en potasse. Il y a donc parallélisme entre la facilité avec laquelle les plantes empruntent cet alcali aux minéraux sus-mentionnés et l'aptitude qu'ils possèdent à se prêter aux réactions de déplacement.

Expériences de Van Bemmelen, rôle des hydrogels. — Complétons les données qui précèdent par quelques remarques dues à Van Bemmelen. Parmi les bases que contiennent les silicates zéolithiques, la chaux et la soude se déplacent, au contact d'un sel dissous, avec plus de facilité que la magnésie et, surtout, que la potasse. On comprend donc pourquoi la chaux et la

soude se rencontrent en proportions notables dans les eaux de drainage, indépendamment de la solubilité propre du bicarbonate de calcium dans les liquides du sol. Si on additionne une terre de nitrate de potassium, c'est du nitrate de sodium qui passera dans les eaux de drainage, accompagné de nitrate de calcium. Le faible déplacement de la potasse dans les zéolithes explique la rareté relative de cette base dans les eaux souterraines.

Les *hydrogels*, surtout celui de l'acide silicique, sont capables d'absorber les alcalis et les terres alcalines, sans qu'il y ait combinaison, au sens propre qu'on attribue à ce mot en chimie. Les hydrogels peuvent également retenir certains acides. Graham a montré, il y a longtemps, qu'un hydrogel mis en présence d'un liquide autre que l'eau (alcool, glycérine, etc.) pouvait échanger l'eau qu'il contient contre le nouveau liquide ; il se forme alors un *alcoogel*, un *glycérogel*. Là, encore, il n'y a pas de combinaison chimique.

Un hydrogel absorbe d'autant mieux, en général, une substance donnée, que le corps solide en suspension dans l'hydrogel et la substance au contact de laquelle il se trouve peuvent, dans d'autres circonstances, entrer en combinaison chimique.

Voici quelques types de ces *combinaisons d'absorption* étudiées par Van Bemmelen. L'hydrogel silicique, mis au contact d'une solution de carbonate de potassium, prend une partie de la potasse de ce sel ; le reste de cette base demeure à l'état de bicarbonate. Au contact du phosphate bisodique $\text{PO}_4\text{Na}_2\text{H}$, l'hydrogel silicique s'empare d'un atome de sodium et laisse du phosphate monosodique PO_4NaH^2 . Lorsque l'hydrogel silicique se trouve en présence d'un mélange de carbonate de calcium et de chlorure de potassium, il est probable que la réaction suivante a lieu. Une partie de la chaux est prise par l'hydrogel avec production de bicarbonate de calcium soluble ; ce dernier sel fait ensuite la double décomposition avec le chlorure de potassium, et le carbonate de potassium résultant échange son potassium contre le calcium de l'hydrogel : d'où formation d'un hydrogel de silicate de potassium. La potasse est donc absorbée, et il reste en solution du chlorure et du bicarbonate de calcium. Lorsqu'un hydrogel se transforme peu à peu sous



l'influence du temps et perd ses qualités colloïdales, il n'est plus apte à former de combinaisons d'absorption.

Ainsi, un colloïde minéral qui affecte la forme de *gel* est susceptible d'absorber, ou des bases, ou des acides, soit directement, soit à la suite d'une série de doubles décompositions qui mettent en liberté ces bases ou ces acides. L'hydrogel silicique est également capable de fixer certains sels alcalins (chlorures, sulfates, nitrates) ; ces sels se partagent entre l'eau du gel et l'eau de la dissolution. Toutefois, il ne faudrait pas exagérer l'importance du rôle que peut jouer la silice à l'état de *gel* ; la silice semble, en effet, être peu abondante dans le sol sous cette forme.

On pourrait rapprocher ces phénomènes d'absorption qui se produisent au contact du gel silicique de ceux que l'on observe quand l'argile, en suspension colloïdale, se trouve en présence de divers électrolytes. Nous avons déjà parlé des effets bien connus de ces derniers sur la coagulation de l'argile et appelé l'attention sur le rôle que joue, dans ce phénomène, la concentration de l'électrolyte et la valence de ses ions (tome 1, pages 113, 116, 142). Ainsi, les hydroxydes de potassium et de sodium, de même que les carbonates de ces bases, maintiennent presque indéfiniment l'argile en suspension sous des doses de 1 à 2 millièmes. Les ions potassium en provoquent la coagulation à des doses supérieures à 5 millièmes, alors que les ions sodium sont encore inefficaces. On sait d'ailleurs que l'ion sodium est, à concentration égale, un coagulant moins actif que l'ion potassium.

Au moment où la coagulation se produit, quelle que soit la nature de l'ion précipitant, et jusqu'à ce que le coagulum ait atteint le fond du vase, une certaine quantité des ions de l'électrolyte sont absorbés par ce coagulum de la même manière que le gel silicique s'empare, comme nous l'avons vu plus haut, soit du sel total, qui en a déterminé la coagulation, soit de l'un des ions de ce sel.

Smith (1920) a montré récemment l'influence de la concentration des pseudo-solutions de silice (hydrosols) sur leur coagulation par les sels de potassium et de sodium.

Toutes les données qui précèdent se rapportent à des travaux déjà anciens pour la plupart, et, après la lecture desquels, il est souvent difficile de se prononcer sur la nature physique ou chimique des phénomènes qui entrent en jeu dans la question des échanges de bases. Il résulte, au contraire, de nombreuses expériences faites depuis une dizaine d'années sur ce même sujet que l'on doit regarder les phénomènes de déplacement et de remplacement des bases qui se passent entre les silicates colloïdaux, ou la permutite (page 12), d'une part, et les solutions de sels neutres (K, Na, NH_4 , Ca) d'autre part, comme répondant à une action chimique véritable, réglée par la loi générale des équilibres chimiques (Wiegner, 1912 ; Gans, 1913 ; Ramann et Spengel, 1918).

Plus généralement, d'ailleurs, l'acidité ou l'alcalinité des sols, de la mesure desquelles nous allons nous occuper dans le prochain Chapitre, sont sous la subordination étroite de réactions qui dépendent de cette loi (H. A. Noyes, 1919).

Pouvoir absorbant des colloïdes humiques.— A côté des colloïdes minéraux, on trouve toujours dans le sol des colloïdes humiques. Nous avons étudié antérieurement quelques-unes des réactions auxquelles se prêtent ces substances, particulièrement vis-à-vis des bases libres. Nous répéterons ici que les pseudo-combinaisons qui se forment dans les conditions que nous avons spécifiées ne rentrent pas dans la loi des proportions définies, et que les matières humiques sont des agrégats très complexes, qui échappent à toute formule fixe. D'après Van Bemmelen, beaucoup de matières humiques dissoutes possèdent les propriétés des hydrogels. Lorsqu'on traite par l'eau ou l'alcool les souches de certaines fougères, on obtient une liqueur brun-rouge. Celle-ci est, en grande partie, coagulée par de petites quantités des acides sulfurique, chlorhydrique, oxalique, ainsi que par certaines solutions salines (sulfate de potassium, chlorure d'ammonium). Si on fait agir la potasse sur de la tourbe ou du terreau, on obtient un liquide brun très foncé, qui, soumis à une dialyse prolongée, fournit une liqueur neutre. L'humate alcalin ainsi préparé coagule facilement en présence des acides forts et de certains sels. Les flocons, séparés par filtration et séchés, renferment toujours une certaine dose d'azote et de substances fixes. Parmi celles-ci, on rencontre des matières que l'humus contenait originellement; de plus, une petite quantité du sel qui a servi à produire la coagulation est assez énergiquement retenue.

Les complexes humiques jouent un certain rôle dans le pouvoir absorbant, mais leur activité est bornée aux seules bases libres ou aux carbonates alcalins dissous dans les liquides du sol. Toutefois, d'après nombre d'auteurs, l'humus acide (tourbe) est capable de décomposer plusieurs sels à acide faible et de s'emparer de leurs bases. La quantité de base absorbée est d'autant plus grande que les acides minéraux auxquels sont combinées ces bases sont plus faibles (acide carbonique, acide phosphorique). Quant aux acides sulfurique et chlorhydrique, ils sont très difficilement déplacés. Cependant on a émis l'opinion que l'acidité du sol, nuisible aux végétaux, ne devait pas être mise sur le

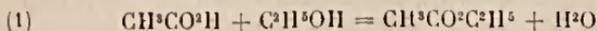


compte de l'acide humique libre, mais bien sur celui des acides minéraux que l'acide humique met en liberté. Quoi qu'il en soit, les phénomènes d'absorption auxquels donne lieu la présence de l'humus sont d'une importance secondaire quand on les compare à ceux qu'exercent les silicates zéolithiques.

Dans les combinaisons que nous avons décrites sous le nom de *combinaisons d'absorption*, il est difficile de faire une part exacte entre le phénomène de l'*absorption* proprement dite, c'est-à-dire de la combinaison de deux substances en proportions non définies, mais qui sont en réalité unies en vertu d'une affinité chimique particulière, et le phénomène de l'*adsorption* qui est d'*ordre physique*, et dans lequel n'entrent en jeu que des actions de surface (Voy. plus loin).

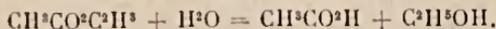
Phénomènes d'équilibre; loi d'action de masse. — Nous avons fait souvent allusion, dans les pages qui précèdent, aux phénomènes d'équilibre chimique : donnons à cet égard quelques explications très simples et très classiques destinées à montrer leur extrême importance, et prenons pour cela un des exemples les plus nets.

Mettons en présence une molécule d'alcool ordinaire et une molécule d'acide acétique ; abandonnons le mélange à lui-même et déterminons, de temps à autre, la *concentration* en acide de ce mélange. Nous constaterons que cette concentration va chaque jour en diminuant, pour atteindre finalement une valeur fixe, la *température restant constante*. L'acide et l'alcool ont réagi pour engendrer un corps neutre, l'éther acétique, avec élimination d'une molécule d'eau :



Mais la réaction n'est pas complète : elle s'arrête à un certain moment, alors qu'il subsiste encore de l'acide et de l'alcool libres en présence.

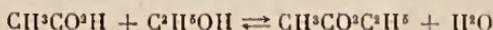
Inversement, prenons une molécule d'eau et une molécule d'éther acétique ; l'eau décomposera progressivement l'éther (saponification) :



Ici encore, la réaction s'arrêtera, et la composition du mélange, à la limite, sera exactement la même que celle qui figure dans l'équation (1). Cette dernière réaction est donc possible dans les deux sens ; elle est dite



réversible, et le mélange, quand toute réaction est terminée, constitue un *système chimique en équilibre* que l'on écrit ainsi :



Dans un pareil système, ajoutons une petite quantité d'acide acétique : l'équilibre est rompu. Une nouvelle portion d'acide agit sur l'alcool resté libre jusqu'à établissement d'un nouvel état d'équilibre. Il en serait de même si, au lieu d'ajouter de l'acide, nous avions ajouté de l'alcool, de l'éther ou de l'eau. Tous les corps qui interviennent dans l'équation ci-dessus sont des *facteurs de l'équilibre*. De même, un système en équilibre dont on modifie la température ou la pression éprouve une modification chimique qui l'amène à un nouvel état d'équilibre : la pression et la température sont donc aussi des *facteurs de l'équilibre*.

Tout système chimique en équilibre satisfait à une loi très importante : la *loi d'action de masse ou de concentration*.

Reprenons l'exemple précédent dans lequel nous avons le système : acide, alcool, éther, eau ; définissons l'état du système en équilibre, à une certaine température, par la *concentration de chacun des corps en présence*, c'est-à-dire par le nombre de molécules contenues dans l'unité de volume.

Solent c , c_1 , c_2 , c_3 , les concentrations moléculaires de l'acide, de l'alcool, de l'éther, de l'eau. La loi d'action de masse nous enseigne que le rapport du produit des concentrations des corps contenus dans le premier membre de l'équation chimique (1), définissant la réaction qui a conduit à l'équilibre, au produit des concentrations des corps contenus dans le second membre de cette même équation est constant pour une même température :

$$\frac{c \times c_1}{c_2 \times c_3} = K$$

K est donc fonction de la température seulement.

Ainsi, si nous laissons la température constante, et si nous ajoutons, par exemple, de l'alcool au mélange en équilibre, le système sera modifié ; il atteindra, après quelque temps, un état d'équilibre différent du premier, et les nouvelles concentrations c' , c'_1 , c'_2 , c'_3 , qui définissent ce nouvel état d'équilibre, satisfont toujours à la relation :

$$\frac{c' \times c'_1}{c'_2 \times c'_3} = K = \frac{c \times c_1}{c_2 \times c_3}$$

Lorsque, dans la réaction chimique qui conduit à un certain état d'équilibre, la formule moléculaire d'un corps est affectée d'un *coefficient*, la concentration correspondante, dans l'expression de la loi d'action de masse, doit être affectée d'un exposant égal à ce coefficient.

Par exemple, l'iode et l'hydrogène, chauffés ensemble en tube scellé,



réagissent en donnant de l'acide iodhydrique, jusqu'à établissement d'un certain état d'équilibre :



Si nous voulons appliquer la loi d'action de masse, nous devons d'abord, dans l'équation correspondante, représenter tous les corps par leur formule moléculaire.



et nous aurons, en vertu de la loi d'action de masse, la relation :

$$\frac{c \times c_1}{c_2^2} = K$$

La concentration c_2 de l'acide iodhydrique doit être affectée de l'exposant 2, égal au coefficient de III dans l'équation (2).

Quand l'un des corps du système en équilibre est *solide*, sa concentration n'intervient pas dans l'expression de la loi d'action de masse. Soit, par exemple, l'action de l'eau sur le fer :



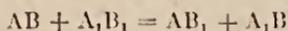
Cette réaction est *réversible* ; elle donne naissance à un état d'équilibre. Considérons donc le système gazeux en équilibre à une certaine température et appliquons-lui la loi d'action de masse : soient c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , les concentrations de la vapeur d'eau, de la vapeur de fer, de la vapeur Fe_3O_4 , de l'hydrogène ; nous aurons :

$$\frac{c_1^4 \times c_2^3}{c_3 \times c_4^4} = K$$

Or, il n'y a pas à tenir compte des tensions de vapeur du fer et de l'oxyde Fe_3O_4 ; l'équation se réduit simplement à :

$$\frac{c_1^4}{c_4^4} = K \quad \text{ou} \quad \frac{c_1}{c_4} = K$$

Considérons maintenant un système de sels dissous dans l'eau et en équilibre :



dont c_1, c_2, c_3, c_4 , sont les concentrations respectives. A l'équilibre, nous aurons :

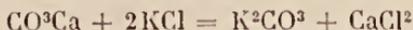
$$\frac{c_1 \times c_2}{c_3 \times c_4} = K$$

Mais un assez grand nombre de sels sont *ionisés* en solution aqueuse ; dans ce cas, il faudra, pour appliquer la loi d'action de masse, introduire la concentration en ne tenant compte que de la portion du ou des sels non ionisés, c'est-à-dire de la fraction du ou des sels existant effectivement dans la solution.

Remarquons que la loi d'action de masse ne s'applique généralement qu'à des systèmes dans lesquels les substances qui réagissent sont à l'état dilué comme les gaz et les corps en solution étendue. Les systèmes qui engendrent les éthers à partir d'un acide et d'un alcool (équation 1) satisfont cependant encore à la loi, bien que ces systèmes contiennent des corps réagissant sous de fortes concentrations.

La loi d'action de masse intervient continuellement pour régler le sens des phénomènes de double décomposition qui ont lieu dans le sol, ainsi que nous l'avons constaté bien des fois au cours de ce chapitre.

En effet, reprenons l'équation :



et transportons-la dans le milieu où nous devons l'étudier ici, c'est-à-dire dans la terre arable. Si faible que soit la quantité de carbonate de potassium qui prend naissance, celui-ci, aussitôt formé, est absorbé par les colloïdes humique et argileux ; il sort, par conséquent, du champ de la réaction. Une nouvelle quantité de ce sel se produit, et ainsi de suite, jusqu'à *transformation totale* du chlorure en carbonate de potassium. Un engrais potassique, tel que le chlorure, pourra donc, dans un sol tant soit peu calcaire, passer presque intégralement à l'état de carbonate.



IV

**AFFINITÉ CAPILLAIRE. ACTIONS DE SURFACE.
PHÉNOMÈNES D'ADSORPTION.**

Le pouvoir absorbant des sols a été quelquefois mis sur le compte de phénomènes purement physiques, analogues à ceux de la teinture. On sait, en effet, que telles matières colorantes adhèrent d'une façon remarquable à certains tissus (coton, chanvre, lin, laine) sans qu'il soit possible de faire intervenir dans cette adhésion la notion de combinaison chimique. C'est par les expressions *d'attraction de surface* ou *d'affinité capillaire* que l'on a désigné souvent les faits bien connus que nous venons de rappeler. Un semblable phénomène se produit certainement dans le sol au contact des éléments de la terre arable avec les solutions qui les entourent. Lorsqu'une pareille solution se trouve en présence des particules terreuses, il y a d'abord *adsorption* du sel, c'est-à-dire adhérence de celui-ci sur le grain solide ; et, par conséquent, le titre primitif de la solution saline s'appauvrit. Parfois le phénomène s'arrête là ; il ne se complète pas d'une action chimique, et, si on lave à l'eau pure les grains imprégnés de sel, celui-ci est totalement entraîné : c'est ce qui a lieu lorsqu'une solution de nitrate de sodium ou de sel marin se trouve en présence de grains uniquement sableux : ces substances ne sont retenues à la surface des grains que par une *attraction de surface* et le sel peut s'y concentrer, mais il n'y a pas de réaction chimique. Encore cette adsorption est-elle très faible. Au contraire, s'il y a échange de bases entre la solution saline et les éléments du sol, ainsi qu'il arrive en présence des silicates colloïdaux, une réaction chimique succède au phénomène d'adsorption, et nous rentrons dans le cas des déplacements examinés plus haut. Les actions de surface ou d'adhésion capillaire précèdent donc toujours la réaction chimique, si celle-ci doit avoir lieu ; plus cette adhésion est puissante, plus elle a de chances de provoquer et de favoriser par un contact prolongé la réaction chimique, lorsque cette réaction est possible.



Parmi les phénomènes remarquables de *teinture* que l'on observe dans le sol, il faut citer celui qui a trait à l'adhérence de la matière organique aux grains sableux. Sans doute, une certaine quantité d'humus se trouve libre dans le sol et peut être assez facilement extraite par lévigation : l'humus, plus léger, flotte à la surface de l'eau dont on imbibe un échantillon de terre que l'on frotte avec le doigt, comme il a été dit à propos de l'exécution de l'analyse physique par le procédé de Schloësing (tome 1, p. 212). Mais si on examine attentivement les grains sableux, on y découvre toujours des traces d'humus qui sont collées à la surface de ces grains. Ceux-ci, desséchés à 100°, puis soumis à l'action d'une faible chaleur, noircissent ; ils se décolorent si l'on chauffe plus fort. La matière organique est donc appliquée sur les grains comme une matière colorante qui imprégnerait une étoffe. Cette adhérence n'est vaincue que lorsqu'on fait agir sur le sable, ainsi teint, un réactif capable de dissoudre l'humus, tel qu'une base (potasse ou ammoniac). On provoque, de même, la disparition de certaines matières colorantes appliquées sur une étoffe par l'emploi de solvants appropriés. Cette adhérence intime de l'humus à la matière minérale rend compte de ce fait, que les eaux qui ont lavé la terre (eaux de drainage) sont en général très peu colorées en brun, alors même qu'elles ont traversé une couche épaisse de terre riche en humus.

Nous verrons ultérieurement que la plupart des espèces microbiennes aérobies qui habitent le sol vivent de préférence à la surface ou à une faible profondeur. Certaines de ces espèces s'attachent à la matière organique complexe et lui font subir une série de transformations qui l'amènent à des états de plus en plus simples. L'eau de pluie entraîne ceux de ces éléments qui se sont solubilisés et qui résultent de cette dégradation ; elle tend à les faire descendre d'autant plus bas qu'ils sont plus diffusibles. Alors intervient le phénomène de teinture ou d'adhésion capillaire ; les grains sableux *adsorbent* la matière organique qui n'a subi qu'un commencement d'altération et la retiennent. Comme le pouvoir adhésif est réparti sur une surface immense qui croît avec la petitesse des grains, on conçoit que cette matière organique ne s'enfonce jamais à une très grande profondeur et reste cantonnée dans les couches superficielles du sol ; on sait, en effet, que l'humus est, en règle générale, toujours localisé dans ces couches. Si la simplification de la matière organique par le travail microbien donne naissance à des substances cristalloïdes, par conséquent très diffusibles, celles-ci, sous l'influence des pluies, s'enfoncent de plus en plus profondément. Elles ne sont pas retenues par l'attraction capillaire — ou du moins elles le sont très peu — on les retrouve finalement dans les eaux de drainage : tels sont les nitrates et les sulfates provenant de l'oxydation de l'azote et du soufre contenus primitivement dans l'humus. Ainsi, tant que la matière organique est sous forme colloïdale, c'est-à-dire voisine de celle qu'elle affectait chez le végétal, elle est très peu diffusible et demeure soudée aux particules sableuses aussi longtemps que se prolonge son état de condensation moléculaire.



Les phénomènes de teinture (attraction capillaire) ne jouent qu'un rôle secondaire dans le pouvoir absorbant des sols vis-à-vis des matières salines.

V

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS PRATIQUES

On peut résumer de la façon suivante les causes qui provoquent, chez les terres arables, mais à des degrés différents, la faculté de retenir les substances fertilisantes.

1^o Lorsqu'un sol contient du calcaire — ce qui est le cas habituel des terres dites *arables* — ce calcaire intervient comme élément basique capable de déplacer l'ammoniaque et, partiellement, la potasse de leurs combinaisons avec les acides sulfurique et chlorhydrique. Il neutralise également les acidités libres de l'acide phosphorique dans le phosphate monocalcique.

L'ammoniaque et la potasse, ou les carbonates de ces bases, mises ainsi en liberté, s'unissent à l'humus, et, de préférence, aux silicates colloïdaux. L'intimité d'une semblable union, dans le cas de l'ammoniaque, est telle que, d'après Pfeiffer et Einecke, les plantes profitent mal de cette forme de l'azote qu'elles ne peuvent dégager de sa combinaison.

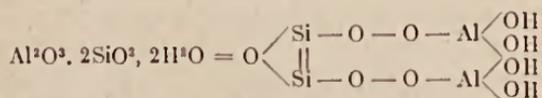
2^o Le phénomène le plus général qui entre en jeu dans l'exercice du pouvoir absorbant est celui qui concerne les déplacements réciproques de bases *entre les silicates colloïdaux et les sels ajoutés sous forme d'engrais*. A la suite de ces déplacements, telle base contenue dans le silicate est mise en liberté et remplacée par la base que renferme le sel ajouté. L'action de masse intervient pour régler l'intensité du déplacement : celui-ci pourra être presque total si, comme il arrive dans les expériences de laboratoire, l'équilibre, qui tend à s'établir d'abord au contact de la solution saline et du silicate, est rompu par suite de l'addition d'un grand excès de cette solution saline. Dans ce cas, le remplacement a lieu équivalent par équivalent comme lorsqu'il s'agit d'une double décomposition chimique entre deux sels dans laquelle l'une des deux bases est capable



de former avec l'un des deux acides un composé insoluble. Mais, pratiquement, le déplacement total de la base d'un silicate n'est jamais atteint, car la masse chimique des solutions salines ajoutées sous forme d'engrais est incomparablement plus petite que la masse des silicates colloïdaux contenus dans presque toutes les terres : les substitutions de bases ne peuvent donc être que partielles.

Peut-on affirmer que ces déplacements de bases dans les silicates colloïdaux soient toujours imputables à des réactions chimiques ? On ne saurait trop répéter, encore une fois, qu'une réserve très grande s'impose à cet égard, et que l'interprétation de ce phénomène ne doit être faite qu'avec beaucoup de prudence. En réalité, — et il convient de bien insister sur ce point — on n'obtient jamais le déplacement de la totalité de la potasse, par exemple, dans un silicate zéolithique, même à la suite d'une agitation prolongée avec une solution saline ; on ne peut pas davantage priver une solution de potasse de la totalité de son alcali en la remuant avec de la terre, quels que soient la durée du contact et l'état de concentration des solutions employées. Rümpler, en agitant plusieurs échantillons de terre avec de l'eau de chaux ou des solutions de chlorure de calcium, a obtenu des résultats qui montrent que la quantité de potasse déplacée dans les deux cas est la même. D'après cet auteur, la potasse ainsi dissoute se trouverait dans le sol sous une forme bien déterminée, appartenant à un silicate zéolithique. Remarquons que, dans toutes les expériences où l'on met en contact la terre avec une dissolution saline, l'alumine des silicates n'entre pas en réaction, en ce sens qu'elle n'est jamais déplacée : ceci confirme l'interprétation que nous avons donnée de la structure des silicates en général (tome 1, p. 61). On doit considérer les silicates renfermant de l'alumine, non pas comme des sels doubles d'aluminium et de potassium, ou d'aluminium et de calcium, etc., etc., mais comme des aluminosilicates de potassium ou de calcium, etc., l'acide commun à tous ces sels étant l'acide aluminosilicique.

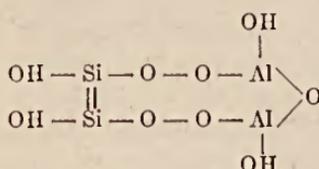
Si l'on admet pour un silicate hydraté, tel que l'argile, soit la formule de constitution de Glinka (tome 1, p. 82), soit la suivante proposée par Maquenne :



on peut penser que cette substance possède à la fois des propriétés basiques et des propriétés acides, et que ces dernières dominent à cause du voisinage du groupe Si^2O^6 .



Pukall (1910) a indiqué pour l'argile la formule suivante :



Ces schémas rendent certainement compte de plusieurs particularités que présentent les phénomènes d'absorption, mais la disposition de leurs groupements est encore très hypothétique.

D'après ces formules, l'argile devrait pouvoir contracter avec les bases et avec les acides des combinaisons que l'eau dissocierait aisément. Or l'argile, si elle est douée de propriétés *adsorbantes* notables, fixe au contraire assez mal les bases, en supposant toutefois qu'elle soit pure et ne constitue qu'un silicate d'aluminium hydraté. En fait, elle renferme toujours de la potasse déplaçable, comme on le sait, par la chaux, dont le calcium remplacerait deux ou plusieurs atomes d'hydrogène des groupes (OH). En généralisant ce raisonnement, on peut imaginer que les silicates zéolithiques renferment un grand nombre d'oxyhydriles, et que leur pouvoir absorbant vis-à-vis des bases est précisément dû à leur caractère polybasique.

3° Tous les phénomènes qui caractérisent le pouvoir absorbant, et dont la plupart affectent une allure chimique, sont toujours précédés de phénomènes purement physiques, attribuables à des actions capillaires ou à des attractions de surface : parfois ces attractions ne se complètent pas d'une combinaison chimique et il y a simplement *adsorption* de la substance saline; parfois aussi à la suite d'un contact prolongé, une réaction se manifeste qui rentre dans l'une des deux catégories précédentes.

On voit donc combien sont nombreux et complexes les facteurs du pouvoir absorbant. Aussi ne doit-on regarder les notions développées dans ce Chapitre que comme des *aperçus théoriques*, capables de faire comprendre le sens de certaines réactions, réalisables dans le laboratoire, où l'on s'efforce de n'introduire qu'un nombre restreint de variables dans un phénomène qui en comporte une infinité.

Au point de vue pratique, on peut affirmer qu'un sol qui renferme une forte proportion de silicates colloïdaux, et qui est riche



en humus, possède un pouvoir absorbant considérable ; les matières fertilisantes qu'on lui confiera demeureront dans les couches supérieures du sol, là où les racines peuvent s'en emparer.

On conçoit qu'à la suite d'un épandage trop copieux d'engrais solubles le pouvoir absorbant soit satisfait et que, si la végétation n'absorbe pas les substances ainsi fixées, le sol atteigne en quelque sorte son point de saturation vis-à-vis des matières qu'il aura empruntées à l'engrais. Tant que cet état de saturation n'est pas dépassé, ce qui d'ailleurs est exceptionnel, le sol résiste bien, comme nous l'avons vu, aux lavages qu'occasionne la chute d'eau de pluie. Cependant la chaux, la magnésie, la soude, l'acide sulfurique, sont des substances qu'il retient mal en général ; le chlore et l'acide nitrique des substances qu'il ne retient pas du tout.

D'après les notions relatives à l'action de masse, il est clair que l'addition répétée de certains sels solubles favorisera, par déplacement réciproque, l'élimination de certaines bases. On sait, en effet, que l'emploi des engrais potassiques et ammoniacaux détermine une perte correspondante de chaux dans les eaux de drainage, perte d'autant plus élevée que les engrais distribués auront été plus abondants.

On voit aussi que certains sels, peu ou pas utiles aux végétaux, comme le chlorure de sodium, provoqueront par leur contact avec certains silicates le déplacement de bases utiles, telles que la potasse, contenues dans ceux-ci. La potasse se trouvera donc à la disposition des racines sous une forme soluble, préférable à celle qu'elle affectait dans le minéral avant qu'elle en fût chassée par l'intervention de la soude. Les bons effets obtenus parfois par l'addition du sel marin, employé seul ou mélangé à d'autres engrais, sont imputables au déplacement de la potasse dans les silicates colloïdaux. Il va sans dire qu'un excès de chlorure de sodium occasionnerait la mort des plantes, et que cette façon de mobiliser la potasse présenterait de très graves inconvénients, d'autant plus que nombre de végétaux sont particulièrement sensibles à l'action malfaisante du sel marin. Si la constitution chimique d'une terre joue un rôle capital vis-à-vis du pouvoir absorbant, il faut également tenir compte de la structure physique de cette terre. Les terres



légères, sableuses ou calcaires, facilement perméables, possèdent un faible pouvoir absorbant : aussi convient-il de ne leur fournir d'engrais qu'à une époque où les végétaux qu'elles portent pourront les utiliser.



CHAPITRE X

ANALYSE CHIMIQUE DE LA TERRE ARABLE

But de l'analyse chimique. — Éléments assimilables. — Difficultés que l'on rencontre lorsqu'on veut définir et déterminer le degré d'assimilabilité d'un élément. — Réaction du sol. — Détermination de l'eau. — Détermination de la matière organique totale et du carbone en particulier. — Détermination de l'azote organique, de l'azote nitrique, de l'azote ammoniacal. — Détermination de la totalité des éléments minéraux. — Substances minérales à caractère acide. — Substances minérales à caractère basique. — Analyse rationnelle des terres par l'eau chargée de gaz carbonique. — Interprétation des analyses physique et chimique des sols.

But de l'analyse chimique. — Dans le présent Chapitre, nous allons chercher quels sont les procédés susceptibles de nous renseigner sur la fertilité d'un sol, et de nous permettre de déterminer la somme des substances utiles à la plante que ce sol renferme.

Il ne faut pas se méprendre sur le but que nous allons poursuivre ; il ne s'agit pas, en effet, d'exposer ici, avec tous les détails propres à leur exécution, les méthodes analytiques qui ont pour objet de reconnaître et de doser avec rigueur tel ou tel élément de fertilité : nous renvoyons à cet égard le lecteur aux nombreux traités d'Analyse chimique appliquée à l'agriculture publiés tant en France qu'à l'étranger. Nous ne parlerons, dans les pages qui suivent, que de l'action sur la terre arable des réactifs capables de déceler et de doser la *fraction*



utile pour la plante d'un élément déterminé, indispensable à son existence, et, cela, sans entrer dans le détail des manipulations souvent assez compliquées qui permettent d'atteindre le résultat cherché. L'exposé actuel sera, avant tout, *une étude critique des procédés employés le plus généralement dans l'analyse chimique des sols.*

Éléments assimilables. — Le problème que se propose de résoudre l'analyse chimique est double. Il est nécessaire, tout d'abord, de reconnaître la présence dans un sol donné des éléments réputés indispensables au développement de la plante, et d'en estimer le poids total. Cette première partie du problème est d'une exécution parfois longue, mais toujours facile. On reprochera immédiatement à ce mode d'analyse de fournir des renseignements peu instructifs, étant donné que les méthodes utilisées pour atteindre le but consistent surtout dans l'emploi de réactifs énergiques, agissant à une température souvent élevée et dans un court espace de temps : ces méthodes paraissent donc, *a priori*, fort éloignées de celles que la plante met en œuvre pour s'emparer des éléments indispensables à son existence.

Cependant, la connaissance de l'approvisionnement *total* des substances nutritives contenues dans le sol peut être fort utile. On sera parfois amené, d'après l'examen des chiffres obtenus, et avant toute addition d'engrais, soit à modifier l'état physique du sol par des procédés mécaniques appropriés, soit à incorporer à ce sol certains *amendements* destinés à vaincre l'inertie de telle substance. Cette méthode d'analyse *globale* des substances minérales appliquée à la terre arable n'est autre, en réalité, que celle que l'on pratique dans l'analyse des roches. Or, comme une terre queleconque n'est qu'un amas de fragments rocheux, il est avantageux, dans bien des cas, de pouvoir comparer son analyse avec celle des roches environnantes, afin de saisir soit les analogies, soit les différences de composition.

La seconde partie du problème est, par contre, d'une exécution très pénible : il s'agit de savoir quelle est, à un moment donné, *la fraction* de ces éléments indispensables sur la présence de laquelle on pourra compter en vue d'une culture déterminée. Il n'est pas téméraire de dire que tel doit être l'objet presque exclusif de l'analyse rationnelle d'une terre. Mais il convient



d'ajouter immédiatement que, malgré les efforts considérables qui ont été tentés dans cette direction depuis plus de soixante ans, et malgré l'ingéniosité des procédés préconisés à cet égard, ce second problème est particulièrement difficile à aborder, et les moyens que nous mettons en œuvre pour le résoudre sont, le plus souvent, d'une imperfection notoire.

Difficultés que l'on rencontre lorsqu'on veut définir et déterminer le degré d'assimilabilité d'un élément. — Lorsqu'il s'agit d'apprécier la fraction assimilable des matières minérales que renferme un sol donné, on a fait, presque toujours jusqu'ici, usage de réactifs énergiques. Les acides forts, en particulier, sont d'un emploi très courant dans ce genre de recherches : acides chlorhydrique, sulfurique, nitrique concentrés, ou dilués suivant certaines conventions. Remarquons de suite combien il est, *a priori*, peu rationnel d'employer de pareils agents dont aucun ne se rencontre normalement dans le sol.

On peut cependant aller au devant de cette objection. En effet, si un réactif, tel que ceux que nous venons de citer, employé dans des conditions fixes de concentration et de température, est capable d'extraire d'un échantillon de terre une quantité d'acide phosphorique par exemple, précisément égale ou voisine de celle qu'une récolte déterminée aura enlevée du sol, ce réactif pourra donner des renseignements intéressants chaque fois qu'il s'agira d'estimer la fraction d'acide phosphorique utilisable actuellement par la plante que l'on désire cultiver. L'emploi de l'analyse chimique, combiné avec l'observation directe sur le champ de culture, constitue, en effet, la pratique la plus recommandable. Aussi de semblables procédés approximatifs ont-ils, sans doute, quelque valeur. Mais il faut savoir les manier avec prudence, car si le réactif en question répond au but vis-à-vis de telle plante, il échouera très probablement lorsqu'on l'appliquera à une autre plante dont les besoins ne seront pas les mêmes que ceux de la première.

Réactifs rationnels. — Nous avons montré, dans plusieurs passages du Chapitre VII relatifs à la constitution chimique de la matière minérale des sols, l'influence qu'exerce, sur la dissolution d'une substance donnée contenue dans un échantillon de terre, la concentration d'un même acide, la durée de son action et l'élévation de sa température. Nous avons constaté quelle était la variabilité des chiffres obtenus suivant l'inten-



sité de ces facteurs. Aussi faut-il se demander, s'il est possible d'imaginer des méthodes d'attaque plus rationnelles, capables de renseigner sur la richesse actuelle d'un sol en matières fertilisantes assimilables. En d'autres termes, peut-on imiter le mécanisme naturel qui donne naissance dans le sol aux matériaux solubles ?

A priori, on devrait répondre par la négative. En effet, les solutions du sol s'élaborent presque toujours en présence de faibles quantités d'eau. Une terre, en dehors des périodes prolongées de pluies, contient le cinquième ou le quart au plus de son poids d'eau. En outre, les réactifs artificiels que nous employons pour dissoudre telle ou telle matière saline entourent complètement les éléments de l'échantillon de terre que l'on met à leur contact, ils les baignent dans toutes leurs parties ; tandis que les racines d'une plante, quel que soit leur degré de finesse, n'entrent jamais en relation avec toutes les particules de la motte de terre dans laquelle elles s'insinuent.

Ces réserves étant faites, il faut convenir que l'emploi de réactifs, tels que ceux qui agissent normalement dans le sol, semble seul rationnel. C'est ainsi que l'eau et le gaz carbonique apparaissent de suite comme les agents principaux, sinon exclusifs, de l'analyse naturelle de la terre arable : c'est donc à ces agents qu'il conviendrait de s'adresser. Nous avons vu le parti que Schloësing avait tiré de leur action pour fixer la composition et la concentration des dissolutions du sol (tome 1, p. 244). Un grand nombre d'expériences ont déjà été tentées dans ce sens, expériences dans lesquelles on a déterminé quelles étaient les proportions d'acide phosphorique, de potasse, de chaux, etc. que l'eau carbonique pouvait déplacer. Une étude méthodique et très intéressante a été faite dans cet ordre d'idées par E. A. Mitscherlich en 1907 : nous en parlerons plus loin.

Cependant, lorsqu'on peut procéder de cette façon, il faut, malgré tout, faire encore quelques conventions. Quoi qu'il en soit, il est à souhaiter que l'on abandonne la plupart des procédés qui reposent sur l'emploi de réactifs énergiques, absolument étrangers au sol, procédés appliqués presque toujours d'une façon uniforme et routinière à l'analyse de n'importe quelles terres. Nous devons reconnaître d'ailleurs que, depuis quelques années, un grand nombre d'analyses ont fait les efforts les plus louables pour débarrasser la science agricole de quelques-unes de ces méthodes surannées.

Nous diviserons l'étude actuelle de la façon suivante :

I. Réaction du sol ; II. Détermination de l'eau ; perte par calcination ; III. Détermination de la matière organique totale et du carbone en particulier ; IV. Détermination de l'azote organique, nitrique et ammoniacal ; V. Détermination de la totalité des élé-



ments minéraux ; VI. Détermination des substances minérales à caractère acide (PO^4H^3 , Cl , SO^4H^2 , SiO^2) ; VII. Détermination des substances minérales à caractère basique (CaO , MgO , K^2O) ; analyse rationnelle des terres par l'eau carbonique ; VIII. Interprétation des analyses physique et chimique des sols. Nous rappellerons que les méthodes d'échantillonnage de la terre arable ont été indiquées à propos de l'analyse physique (tome I, p. 208).

I

RÉACTION DU SOL

Lorsqu'un sol renferme un excès d'humus et manque de calcaire, ou n'en contient qu'une proportion insuffisante, il rentre dans la catégorie des *terres acides*. Cette acidité peut être souvent constatée à l'aide d'un papier sensible de tournesol bleu. Il suffit de broyer avec un peu d'eau une trentaine de grammes de terre et de laisser ensuite reposer quelques instants pour constater que le papier sensible, trempé dans le liquide qui surmonte le magma terreux, prend une teinte lie de vin ou même rouge. D'après beaucoup d'auteurs, cette façon d'opérer qualitativement serait la plus recommandable. Lorsqu'un sol est calcaire, c'est-à-dire donne lieu à une effervescence bien nette au contact d'un acide, le sol possède une réaction généralement neutre, et un papier sensible de tournesol, soit rouge, soit bleu, ne change pas de teinte à son contact.

En fait, l'eau qui a passé au travers de la tourbe est neutre au tournesol : l'acide qui existerait dans cette matière organique serait donc insoluble. Cependant cet acide doit être un acide fort puisqu'il est capable de décomposer les solutions de chlorure de calcium et de nitrate de sodium avec mise en liberté des acides chlorhydrique et nitrique.

La détermination qualitative de l'acidité ou de l'alcalinité d'une terre présente une importance de premier ordre. Toute terre acide sera impropre à la grande culture tant qu'elle n'aura pas été chaulée ou marnée. L'examen de la flore spontanée



permet souvent de juger de la réaction du sol : les *bruyères*, les *fougères*, les *ajones*, les *genêts*, entre autres végétaux, s'installent sur les terres acides.

D'après Stützer (1917), plusieurs maladies des plantes sont dues à une alcalinité ou à une acidité excessives du sol. L'infection de certaines plantes par des champignons semble être en relation avec la réaction du sol.

Les procédés de détermination du degré d'acidité ou d'alcalinité d'une terre sont de deux sortes : procédés *chimiques* et procédés *physiques*. Commençons par la description des procédés chimiques.

*Pour mesurer l'acidité ou l'alcalinité d'une terre, on peut employer le procédé suivant, dû à Pagnoul. Cet auteur définit la réaction de la terre en comparant la quantité d'ammoniaque libre qui se dégage lorsqu'on chauffe, d'abord seule, puis avec 5 grammes de la terre à examiner, une liqueur composée de la façon suivante : à 50 centimètres cubes d'eau, on ajoute une quantité connue, et toujours la même, d'ammoniaque libre et d'un sel ammoniacal quelconque. On commence par distiller à blanc un volume connu du réactif, et on recueille le liquide qui distille dans de l'acide sulfurique titré, employé en excès afin qu'il n'y ait pas de perte d'ammoniaque par évaporation. Un titrage exécuté avec une solution de soude, de force connue, donne la quantité d'acide sulfurique restée libre, et par différence, celle qui a été neutralisée par l'ammoniaque. On fait une opération identique en prenant le même volume du réactif initial auquel on mélange 5 grammes de terre. Si la quantité d'ammoniaque qui s'est dégagée dans cette seconde opération est moindre que dans l'opération faite à blanc, cela signifie qu'une partie de l'ammoniaque a été retenue par une substance acide que contenait la terre. Si, au contraire, il y a plus d'ammoniaque que dans l'opération faite à blanc, il faut penser qu'une certaine quantité du sel ammoniacal a été décomposée par la terre ; or le calcaire seul peut avoir agi sur ce sel pour en déplacer l'ammoniaque à l'état de carbonate volatil. On en conclut que la terre en question est *basique*, c'est-à-dire renferme du carbonate de calcium. On pourrait même, à la rigueur, déduire de ce dosage le poids du calcaire contenu dans l'échantillon analysé. Il est bon, afin que les résultats soient valables, de faire en sorte que le volume du liquide qui distille soit toujours le même.*

Cette opération est très simple à réaliser et elle est toujours instructive. Notons en passant que, dans l'essai à blanc indiqué plus haut, on recueille toujours un peu plus d'ammoniaque qu'il n'en existe à l'état libre dans la liqueur employée : cela tient à l'alcalinité du verre du ballon dans lequel on fait la distillation.

Citons encore les procédés de titrage suivants :



A. Albert (1909) emploie une méthode analogue à la précédente. 20 à 50 grammes de terre, bien répartis dans 200 centimètres cubes d'eau, sont additionnés d'un volume connu d'eau de baryte titrée, puis de 10 grammes de chlorure d'ammonium. On distille et on recueille l'ammoniaque dégagée dans l'acide sulfurique titré. On obtiendra d'autant moins d'ammoniaque à la distillation qu'il restera moins de baryte libre : plus une terre sera acide et plus elle neutralisera de baryte. On peut ainsi connaître le degré d'acidité du sol. Ce procédé est sujet à une critique. L'ébullition d'une terre quelconque, avec une base puissante telle que la baryte même en solution étendue, dégage de petites quantités d'ammoniaque provenant du dédoublement de la matière organique azotée de la terre.

Les sols acides dégagent de l'hydrogène sulfuré quand on les fait bouillir avec de l'eau et du sulfure de zinc. Un papier à l'acétate de plomb permet de reconnaître le dégagement gazeux. Le pourcentage d'acidité peut être évalué à l'aide d'une échelle type de colorations (Truog, 1914).

Süchting, pour déterminer le degré d'acidité d'une terre, évalue la quantité de carbonate de calcium que peut décomposer cette terre. Dans un ballon, on dispose de 10 à 50 grammes de matière avec un excès de calcaire dont le poids est connu ; on remplit la moitié du ballon avec de l'eau distillée et on le fait traverser par un courant d'hydrogène de façon à éliminer le gaz carbonique produit. On introduit ensuite de l'acide chlorhydrique dans le ballon et on chasse le gaz carbonique que l'on recueille dans des tubes absorbants. La différence entre la quantité du calcaire dosé dans cette seconde opération et la quantité de calcaire introduit primitivement, indique la proportion du carbonate de calcium décomposé par les acides naturels du sol, et, par conséquent, le degré d'acidité de celui-ci.

La méthode de Tacke repose, comme la précédente, sur l'emploi de l'eau et du carbonate de calcium pur : on détermine le degré d'acidité de la terre par la quantité de gaz carbonique dégagé. La durée de la réaction ne doit pas être inférieure à 5 ou 10 heures, avec agitation vigoureuse. D'après Stephenson (1912), cette façon de procéder serait la meilleure. Elle a été récemment adoptée par Knight (1920) qui lui a fait subir quelques variantes.

Dans la méthode de Hutchinson et Mac Lennan (1915), basée sur le pouvoir absorbant de la terre vis-à-vis du carbonate de calcium dissous dans l'eau saturée de gaz carbonique, on procède ainsi. 10 à 20 gr. de terre sont introduits dans un flacon de 500 à 1000 cmc. de capacité et mis au contact d'une solution de carbonate de calcium $\frac{N}{50}$ dans le gaz carbonique. On agite le flacon pendant trois heures, on filtre ensuite le liquide dont on prend le titre alcalin sur une partie aliquote.

La différence entre le titre initial et le titre final fournit la quantité de carbonate de calcium absorbé : La solution calcaire $\frac{N}{50}$ s'obtient en



mélangeant volumes égaux d'eau distillé saturée de gaz carbonique et d'eau de chaux (plus exactement 1,1 partie de la première liqueur et 0,9 partie de la seconde). Il est indispensable d'opérer avec une solution de bicarbonate d'un titre voisin de $\frac{N}{50}$ et d'observer toujours le même rapport entre le poids de la terre employée (15 grammes) et le volume de réactif avec lequel on l'agite (300 cmc.).

Von Sigmond (1907) désigne sous le nom de *basicité d'un sol* la quantité d'acide, exprimée en milligrammes d'anhydride azotique N^2O^5 , nécessaire pour titrer 25 grammes de terre.

On peut, d'après Grégoire (1912), employer vis-à-vis de la terre la réaction bien connue d'après laquelle, étant donné un mélange d'iode et d'iodate de potassium, l'action d'un acide met l'iode en liberté. L'iode libre sera titré par l'hyposulfite de sodium. On lira avec intérêt les critiques que l'auteur a faites des divers procédés de dosage de l'acidité des sols, dans le *Bullet. de la Soc. chim. de Belgique*, tome 26, pages 336, 362, 386.

Rice et Osugi (1918) ont proposé de mesurer l'acidité d'une terre d'après la quantité de sucre interverti que produit cette terre mise au contact du saccharose. 5 à 10 grammes de terre sont additionnés de 50 centimètres cubes d'une solution de saccharose à 5 p. 100. On chauffe à 80° pendant deux à trois heures, on filtre et on titre le sucre interverti.

Veitch (1902) recommande un procédé de titrage par l'eau de chaux dont voici seulement le principe. On ajoute des volumes croissants, mais bien mesurés, de ce réactif à une série de lots de terre de même poids, et on cherche par tâtonnement pour quel volume d'eau de chaux apparaît la coloration rose à la phthaléine après un contact de plusieurs heures. On peut de la sorte resserrer le dosage entre des limites très étroites et connaître le degré d'acidité de la terre ; on estimera ainsi quelle est la quantité de calcaire qu'il sera nécessaire d'ajouter à un sol donné pour le rendre alcalin.

Le même auteur distingue deux sortes d'acidités du sol. La première est l'*acidité active*, due à la présence de composés organiques ou inorganiques à réaction nettement acide. Ce degré d'acidité peut être évalué à l'aide du procédé ci-dessus indiqué. La seconde est l'*acidité inactive*, que les indicateurs usuels ne mettent pas en évidence et qui est imputable à la présence dans le sol de silicates hydratés ou colloïdaux (zéolithes) capables de s'unir à des bases alcalines ou alcalino-terreuses dissoutes. Le sol ne devient alcalin que lorsque l'affinité de ces bases est satisfaite par suite de leur union avec les silicates en question.

D'après Noyes (1919), le procédé de Veitch fournit la réaction entre le sol, l'eau et la chaux à la température du bain-marie, mais il ne permet pas d'estimer les besoins du sol en chaux à la température ordinaire.

Christensen (1916) a fait remarquer que la plupart des méthodes proposées pour déterminer quantitativement l'acidité du sol n'indi-



quent nullement le taux réel des substances à caractère acide que ce sol renferme, mais seulement l'aptitude qu'il possède d'absorber des bases, aptitude imputable en partie à la présence de corps à réaction acide, en partie à l'existence de colloïdes non saturés de bases ou d'autres matières, sans réaction acide, susceptibles toutefois d'absorber des bases.

Cette remarque est d'autant plus importante que l'on sait que l'acidité d'un sol peut avoir deux origines, l'une organique, l'autre minérale. En effet, d'après Daikuhara (1914), il existe une cause d'acidité qui provient de la présence de combinaisons du fer et de l'aluminium absorbées par les colloïdes du sol et capables de communiquer au tournesol une réaction acide. Dans de pareils sols, exempts d'acide humique, l'acidité persiste alors même qu'ils ont été lavés. Si on traite ces sols par une solution saline neutre (chlorure, sulfate ou nitrate de potassium, chlorure de sodium, etc.), on constate que le liquide prend une réaction acide et renferme de l'alumine et du fer. Or les acides humiques absorbent, en même temps que les autres colloïdes, des sels d'aluminium et de fer qu'ils remettent ensuite en liberté quand on les traite par des liqueurs salines neutres; il en résulte que l'aluminium et le fer absorbés par les colloïdes doivent jouer un rôle prépondérant non seulement dans l'acidité des sols purement minéraux, mais aussi dans celle des sols humiques. Etant donnée cette propriété que possèdent les combinaisons d'aluminium et de fer absorbées de provoquer chez les solutions salines neutres une réaction acide, l'auteur a imaginé le procédé suivant pour la détermination quantitative de l'acidité des sols en question. On traite 100 grammes de terre séchée à l'air par 250 centimètres cubes d'une solution normale de chlorure de potassium, on laisse en contact pendant cinq jours en agitant de temps en temps. On prélève ensuite 125 centimètres cubes de liquide que l'on fait bouillir pour en chasser le gaz carbonique et que l'on titre avec de la soude décime.

Hopkins avait antérieurement, dans le même but, proposé l'emploi d'une solution de nitrate de potassium.

On peut encore, d'après Daikuhara, procéder de la façon suivante. On dispose, au fond d'une éprouvette, 5 grammes de terre que l'on humecte avec une solution de nitrite de potassium à 10 p. 100. On bouche le vase au moyen d'un tampon de coton qui soutient une bande de papier amido-ioduré. On estimera l'acidité de la terre d'après la coloration que prendra ce papier.

Loew (1914) a également insisté sur cette notion de sols à acidité minérale. Lorsqu'on répand sur de pareils sols des engrais comportant des sels neutres (chlorure de potassium, sulfate d'ammonium), ces sols donnent des résultats inférieurs à ceux qu'ils fourniraient sans aucune addition, car les acides insolubles de l'argile s'unissent aux bases et mettent en liberté les acides chlorhydrique et sulfurique, d'où augmentation du caractère acide du sol considéré.

D'après Plummer (1918), l'emploi du sulfate d'ammonium comme engrais augmente l'acidité d'une terre, celui du nitrate de sodium pro-



duit un effet inverse. L'emploi du sulfate de potassium modifie la réaction du sol dans le même sens que le sulfate d'ammonium, mais de façon moins intense.

Cette réaction acide que communique au sol le sulfate d'ammonium est due à un changement dans le rapport entre les bases et les acides. La place occupée normalement par des bases fortes (CaO, MgO) est prise par des bases plus faibles (Al_2O_3 , Fe_2O_3). La neutralité de la solution du sol n'existe plus puisque les sels qui comportent une base faible se dissocient, et que l'acidité libre qui en résulte s'accompagne d'une concentration définie en ions H (Howard, 1919).

De cette relation, entre l'acidité d'une terre et sa teneur en composés aluminiques et ferriques, Spurway (1917) a tiré les conclusions suivantes. En déterminant le taux du calcium, du fer, de l'aluminium ou du silicium solubles dans l'acide chlorhydrique N/5 pour une série de 29 terres glaciaires, cet auteur a constaté l'existence d'une relation entre le rapport du calcium au fer ou à l'aluminium solubles dans un pareil acide et la réaction de la terre. Toutes les terres chez lesquelles

le rapport $\frac{CaO}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$ aurait une valeur inférieure à 0,77 seraient acides ; elles seraient alcalines lorsque ce rapport aurait une valeur supérieure à 0,77. On peut donc estimer la quantité de chaux nécessaire à la neutralisation des terres acides en calculant le poids de cette base capable de ramener la teneur en calcium soluble au rapport précédent. Les quantités que l'on calcule ainsi se rapprochent beaucoup de celles que l'auteur a obtenues par une méthode indirecte dans laquelle on traite des poids croissants d'une terre par une quantité invariable d'eau de chaux titrée ; on détermine ensuite la réaction des solutions, soit avec la phénolphthaleïne comme indicateur, soit en étudiant leurs résistances électrolytiques respectives.

Au point de vue *pratique*, et pour opérer rapidement, la détermination sommaire de l'acidité ou de la basicité d'un sol peut être effectuée très simplement par les procédés de la *calcimétrie* dont nous parlons plus loin.

Signalons enfin l'emploi d'un réactif simple et suffisamment sensible, indiqué récemment par Rabaté (1919) pour estimer qualitativement l'alcalinité ou l'acidité d'une terre. On dissout de l'extrait solide de campêche à saturation dans l'alcool à 90°. La liqueur, de couleur brune, est conservée en flacons pleins et bouchés. On verse dans un tube à essais 20 centimètres cubes d'eau et 20 gouttes de réactif : le liquide se colore en jaune. On ajoute alors 5 grammes de terre fine, séchée et tamisée ; on agite et on laisse reposer de 15 à 60 minutes, puis on observe la teinte qu'a prise la liqueur surnageante. Les terres alcalines fournissent une coloration mauve ou violette, même lorsque leur degré d'alcalinité est très faible ; les calcaires chlorosants donnent lieu à une coloration violette plus intense, les terres acides à une coloration jaune pâle, suivie de décoloration ou de l'apparition d'une teinte plombée.

En ce qui concerne l'emploi des *procédés physiques* de détermination



du degré d'acidité ou d'alcalinité d'une terre, nous exposerons ici sommairement celui de ces procédés qui porte le nom de *méthode à l'électrode d'hydrogène*.

Il est admis aujourd'hui que les réactions auxquelles participent les solutions acides dépendent, non pas de la concentration absolue de l'acide, mais de son degré de dissociation électrolytique, c'est-à-dire du nombre d'ions H libres que sa solution renferme. Il en est de même des solutions basiques dont la force dépend de leur degré de dissociation électrolytique, c'est-à-dire du nombre d'ions OH libres.

Ces notions ont été appliquées par beaucoup d'auteurs à la détermination de l'acidité ou de la basicité des sols dont on exprime la réaction par le nombre d'ions H ou OH que renferment leurs dissolutions.

L'eau, prise comme type de liquide neutre, est cependant elle-même ionisée, mais dans une très petite mesure : aussi est-elle très faiblement conductrice de l'électricité.

Si on appelle C_H^+ et C_{OH}^- les concentrations respectives des ions H et OH qui constituent l'eau, la loi d'action de masse donne :

$$C_H^+ \times C_{OH}^- = \text{constante.}$$

Cette constante de dissociation est égale à 10^{-14} . Si l'eau est absolument pure, et si les solutions à examiner sont rigoureusement neutres, c'est-à-dire renferment autant d'ions H que d'ions OH, la concentration en ions hydrogène sera égale à 10^{-7} , celle en ions hydroxyle sera aussi égale à 10^{-7} . L'eau renferme donc un dix-millionième d'ions grammes H^+ et, de même, un dix-millionième d'ions grammes OH^- . Toute solution dont la concentration en ions H^+ sera supérieure à 10^{-7} sera acide, toute solution dont la concentration en ions OH^- sera supérieure à 10^{-7} sera alcaline.

Le symbole P_n , employé couramment 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 hydrogène. Ainsi $P_n = 1, 2, 3, 4...$ correspondra à des concentrations $10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}...$ d'ions grammes par litre. Pratiquement, pour une dissolution millinormale d'un acide fort (condition dans laquelle l'ionisation est presque totale), on aurait $P_n = 3$.

Le problème revient, par conséquent, à déterminer expérimentalement la teneur en ions H d'un milieu, et cette détermination s'effectue au moyen de piles à concentration à électrodes d'hydrogène (platine ou palladium saturé d'hydrogène) : tel est le procédé connu sous le nom de *méthode à l'électrode d'hydrogène*.

La force électromotrice d'une pile ayant une électrode à hydrogène plongeant dans un milieu de concentration C en ions H, est égale, en volts, à la température ordinaire, à :

$$E = \text{constante} \pm 0,058 \log_{10} C$$



Les signes \pm répondent au sens dans lequel l'élément est intercalé. C étant toujours plus petit que l'unité, le logarithme est négatif.

Comme nous avons dit plus haut que l'on prenait $P_H = -\log_{10} C$, il en résulte que l'on a finalement la relation :

$$E = \text{constante} \pm 0,058 P_H.$$

Lorsqu'on se propose de déterminer la réaction d'une terre, c'est-à-dire son degré d'acidité ou d'alcalinité, on en prend un échantillon de 10 grammes que l'on traite par 100 centimètres cubes d'eau distillée très pure. On opère sur cette solution. Lorsque l'équilibre sera réalisé, on lira sur un voltmètre la différence de potentiel, d'où, à l'aide de tables, on pourra déduire la concentration de la solution en ions hydrogène.

Un exemple fera comprendre l'utilité de semblables mesures. En effet, cette réaction de la terre est très importante à connaître quand il s'agit de déterminer les conditions favorables à la multiplication de certaines espèces microbiennes, très sensibles aux influences du milieu. Tel est le cas pour le développement des *Azotobacter* (fixateurs d'azote gazeux sur le sol) et pour celui du microbe des nodosités radicales des légumineuses (*Rhizobium leguminosarum*). L'étude des variations de l'acidité d'un milieu de culture donné a mis en évidence ce fait : que les bactéries des nodosités se comportent, vis-à-vis du degré d'acidité de ce milieu, d'une manière différente suivant l'espèce de légumineuses dont elles proviennent. C'est ainsi que l'on a pu répartir ces bactéries en cinq groupes, d'après le point critique ou degré d'acidité intermédiaire entre celui qui entrave leur développement et celui qui le permet encore. Le tableau ci-joint résumo ces observations.

	Point critique	
	P_H	(X_H)
1. Luzerne, mélilot	4,9	(2,1)
2. Pois	4,7	(2,3)
3. Trèfle rouge, fève	4,2	(2,8)
4. Soja	3,3	(3,7)
5. Lupins	3,15	(3,85)

Il en résulte que les bactéries de la luzerne sont les plus sensibles vis-à-vis de l'acidité ; celles des lupins étant, au contraire, les moins sensibles (Gainey, Fred et Davenport, 1918.)

Wherry (1919) a proposé une nouvelle échelle de l'acidité et de l'alcalinité, spécialement applicable aux terres arables. Cet auteur désigne les valeurs pour l'ion hydrogène par le symbole X_H . Ces valeurs sont telles que la neutralité répond à $X_H = 0$; elles sont obtenues en retranchant l'exposant P_H du nombre 7. (Ce sont ces valeurs qui figurent entro parenthèses dans le tableau précédent.)

Ne pouvant citer ici les très nombreux mémoires relatifs à la théo-



rie et aux applications de cette intéressante méthode, nous nous bornerons à signaler seulement les deux travaux suivants qui permettront au lecteur d'en apprécier toute la valeur et de procéder à des essais semblables : Hildebrand, *Journ. amer. chem. Society* (1913), tome 15, pages 847 et 1538 ; Knight, *Journ. of industrial and engineering chemistry* (1920), tome 12, pages 457 et 559.

Conclusions. — Tels sont les procédés que l'on met le plus souvent en œuvre pour déterminer la réaction du sol. Ces procédés sont évidemment susceptibles encore de beaucoup d'améliorations.

Il est presque superflu d'insister, en terminant, sur l'utilité que présente une pareille étude, puisque c'est la réaction du sol qui conditionne les phénomènes de la nutrition végétale. On sait, en effet, combien les microorganismes en général sont sensibles à l'influence du milieu où ils évoluent : des traces d'acides ou d'alcalis suffisent parfois pour favoriser ou entraver le développement de tel ou tel d'entre eux. Or, l'usage de plus en plus fréquent des engrais chimiques modifie forcément, au moins d'une façon temporaire, la réaction du milieu dans lequel ces engrais se diffusent. On risque donc, par suite de l'épandage d'une substance reconnue nécessaire à telle plante, de modifier cette réaction dans un sens défavorable, et d'empêcher ainsi, ou même d'ancantir, le développement d'un microorganisme indispensable. Les insuccès que l'on constate à la suite de l'emploi de certains engrais, dont on a escompté par avance les effets bienfaisants, ne peuvent être expliqués que par le brusque changement qu'ils produisent dans la composition de la masse à laquelle ils se mélangent. On comprend donc l'importance que la plupart des agronomes attachent maintenant à l'examen de plus en plus approfondi de la réaction de ce milieu de la terre arable où les microorganismes jouent un rôle capital dans la production des solutions nutritives auxquelles les plantes empruntent les éléments propres à leur existence.

11

DÉTERMINATION DE L'EAU

Lorsqu'une terre humide demeure quelque temps au contact de l'atmosphère en couche mince, elle perd plus ou moins rapidement la majeure partie de l'eau qui était interposée entre ses particules ; elle atteint, mais souvent au bout de plusieurs jours, un poids à peu près constant qui n'est influencé que par les variations de l'état hygrométrique et de la température de l'air ambiant. Les oscillations de poids, sous l'influence de ces facteurs, dépendent de la nature des constituants de la



terre. Nous avons étudié avec les détails nécessaires cette hygroscopicité de la terre végétale. En principe, la terre est dite *sèche* lorsqu'on la conserve à froid pendant un certain temps sous un dessiccateur à acide sulfurique.

Dessiccation de la terre. — D'après Van Bemmelen, on doit prendre comme terme de comparaison *la terre séchée à une température de 15° environ sur l'acide sulfurique jusqu'à poids constant* ; l'eau qui reste encore dans la terre ainsi traitée est de *l'eau fortement combinée*. Il va sans dire que l'échantillon doit être pesé dans un vase clos afin d'éviter une réabsorption d'humidité pendant l'opération. C'est la terre ainsi préparée que l'on doit soumettre aux différentes manipulations de l'analyse chimique. Quelques auteurs préfèrent employer la terre séchée simplement à l'air, en couche mince, quitte à déterminer sur un échantillon spécial la quantité d'eau hygroscopique dont elle est chargée.

Lorsqu'on veut connaître le degré d'humidité d'un sol en place, il est indispensable, après avoir prélevé le ou les échantillons en divers points du champ et à des profondeurs variées, d'introduire ces échantillons dans des vases bien fermés avant de les porter au laboratoire. On ne devra pas utiliser la terre de la surface dont les variations, sous le rapport de l'humidité, sont trop directement influencées par les conditions extérieures de température et d'agitation de l'air. On creusera le sol sur 5 à 6 centimètres de profondeur, et c'est seulement à ce niveau que l'on prendra l'échantillon.

La dessiccation d'une terre à une température plus élevée (100° à 110°), surtout si l'on maintient longtemps cette température, risque toujours d'altérer quelque peu la matière. En effet, l'eau *fortement combinée* est unie en grande partie aux colloïdes du sol (humus, zéolithes) ; une très petite portion appartient aux silicates cristallisés (Van Bemmelen). On pourra, en principe, sécher la terre à une température d'autant plus élevée qu'elle sera plus pauvre en humus, et, réciproquement, il faudra s'abstenir de chauffer au-dessus de 100° un échantillon riche en matière organique. En effet, dès la température de 100°, la matière organique azotée s'altère ; une certaine quantité d'ammoniaque prend naissance et se dégage d'autant plus aisément que la terre contient plus de calcaire. En outre, la constitution minérale de cette terre se modifie puisque les silicates zéolithiques perdent déjà de l'eau à cette température. Il faut également noter, ainsi que nous l'avons dit antérieurement, que, la plupart du temps, une grande incertitude règne sur la température véritable de l'étuve où l'on procède à la dessiccation. Entre les différents points de cet appareil, il y a souvent des différences notables. En supposant même que la température de la terre dans l'étuve soit rigoureusement de 100° par exemple, la dose d'eau perdue dans ces conditions est toujours un peu moindre que si l'on effectuait la dessiccation, à cette même température, au sein d'un courant d'un gaz inerte sec. On néglige fréquemment l'erreur, assez faible,



qui résulte d'une dessiccation faite dans l'étuve seule, pourvu que l'on connaisse d'une façon aussi précise que possible la température à laquelle la terre a été, en réalité, chauffée.

La dessiccation de la terre est effectuée le plus souvent entre 100 et 120° ; quelques auteurs poussent cette dessiccation à 140°. Mais à cette température, au moins chez certains sols, il y a commencement de décomposition, et, si on opère au contact de l'air, il se dégage déjà de petites quantités de gaz carbonique.

Quant à la méthode électrique destinée à déterminer la teneur en eau du sol, proposée par Whitney et Briggs, elle présente des difficultés d'exécution et un degré d'incertitude tels qu'elle ne saurait être employée d'une façon courante.

Perte par calcination. — En vue de chasser, non seulement la totalité de l'eau, mais d'éliminer également toute matière combustible, on porte la terre, séchée d'abord à 100°, à la température du rouge sombre. La perte ainsi obtenue est la résultante de nombreux phénomènes que nous nous contenterons seulement d'indiquer ici : 1° cette perte comprend une certaine quantité d'eau unie aux silicates zéolithiques et comparable à ces molécules d'eau de cristallisation que renferment nombre de sels hydratés, eau qui ne se dégage qu'à une température parfois assez élevée (au-dessus de 200°) ; 2° la terre calcinée au contact de l'air perd de l'eau qui provient de la combustion de l'hydrogène des matières organiques ; 3° il se dégage du gaz carbonique issu de l'oxydation du carbone ; 4° les carbonates alcalino-terreux (calcium et magnésium) abandonnent, suivant l'élévation plus ou moins grande de la température, une partie de leur gaz carbonique ; 5° les matières organiques azotées sont détruites ; 6° les humates sont changés en carbonates, les sulfures en sulfates, les complexes phosphorés en phosphates.

DÉTERMINATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE TOTALE ET DU CARBONE EN PARTICULIER

A. Dissolution de l'humus. — Il est indispensable, dans la plupart des cas, de connaître la teneur d'un échantillon de



terre donné en matière organique. Avant de décrire quelques-uns des procédés employés pour cette détermination, nous ferons les remarques suivantes. De même qu'il existe dans le sol une fraction, très difficile à définir comme nous le verrons, de l'acide phosphorique, de la potasse, de l'azote, immédiatement utilisable par les végétaux, de même il n'y a dans le sol qu'une fraction de la matière organique que l'on pourrait appeler *active*, c'est-à-dire capable de s'oxyder rapidement au contact de l'air et de certains ferments, en donnant du gaz carbonique. Le reste constitue un stock qui résiste souvent pendant très longtemps aux agents naturels d'oxydation. Or les méthodes employées pour le dosage de l'humus en bloc, ou pour celui du carbone total, sont impuissantes à fournir des indications sur la valeur de cette fraction très oxydable. Néanmoins, comme ce que l'on est convenu d'appeler la *matière noire du sol* joue, vis-à-vis des végétaux, un rôle multiple, direct ou indirect très important, toute méthode qui permettra d'estimer le plus exactement possible le poids total de cette matière pourra rendre de réels services.

Le dosage du carbone par *voie sèche* (voy. plus loin) est la méthode de choix ; mais ce dosage est d'une exécution assez longue et demande beaucoup de soins. Aussi préfère-t-on souvent extraire l'humus par un dissolvant approprié et en prendre le poids.

L'humus est soluble dans les alcalis, potasse et ammoniaque ; c'est à ce dernier agent que l'on s'adresse généralement. Si la terre est calcaire, on traite un poids connu de cette terre, de 10 à 20 grammes suivant sa coloration, par l'acide chlorhydrique étendu afin d'éliminer ce calcaire, on lave ensuite à l'eau distillée jusqu'à disparition d'acidité. L'échantillon étant alors disposé sur un entonnoir dont la douille est obturée par un tampon d'amiante, on l'arrose avec de l'eau ammoniacale (on étend de son volume d'eau l'ammoniaque liquide pur du commerce), et on reçoit dans une capsule tarée la liqueur brune qui s'écoule. Le traitement par l'eau ammoniacale doit être continué tant que le liquide qui passe possède une coloration brune. On évapore à sec la solution ammoniacale, on pèse la capsule, puis on la chauffe jusqu'à disparition de toute matière organique, et, après refroidissement, on la pèse de nouveau. La différence des deux pesées donne le poids de l'humus. L'incinération est indispensable, car l'ammoniaque dissout toujours des matières fixes (Grandeau).



Si l'humus est acide (terres dépourvues de calcaire), on se dispensera de traiter au préalable l'échantillon par un acide. Il suffit, dans ce dernier cas, d'employer un poids relativement faible de substance (2 à 3 grammes).

En supposant que l'humus, cendres déduites, contiennent en moyenne 58 p. 100 de carbone, il suffit, ainsi que l'a indiqué Wolff, de multiplier la teneur en carbone organique total de la terre par le coefficient 1,724 pour avoir sa richesse en humus.

Il convient d'ajouter que ce procédé de dissolution de l'humus par l'ammoniaque, tel qu'il vient d'être indiqué, est loin de fournir toujours la totalité de la matière noire.

On a proposé de distinguer l'humus facilement oxydable de l'humus peu oxydable en traitant l'échantillon de terre par une solution chaude de carbonate de sodium à moitié saturée ; l'humus ainsi dissous constituerait la portion de la matière organique du sol la plus oxydable ; il suffirait de le reprécipiter de la liqueur par un acide. L'humus, dit *insoluble*, serait ensuite enlevé au moyen d'une dissolution de potasse caustique et précipité par un acide. Cette distinction, ou plutôt le procédé qui sert à l'établir, semble quelque peu arbitraire.

Raulin a donné un procédé de dosage de la matière humique reposant sur l'oxydation de cette matière au moyen du bioxyde de manganèse par voie humide.

Voici, enfin, un procédé récent de mesure comparative de la richesse des terres en humus dû à Lapieque et Barbé (1919). L'hypochlorite de soude (eau de Javel), en réagissant sur les terres arables, s'appauvrit en chlore actif dans des proportions très variables. Les auteurs prennent un volume de terre (10 centimètres cubes) bien émiettée et débarrassée de ses cailloux qu'ils mélangent avec un volume connu d'eau de Javel. On agite, et, après une demi-heure de contact, on prélève un volume déterminé du liquide auquel on ajoute de l'iodure de potassium. On acidule ensuite par l'acide chlorhydrique et on titre à l'hyposulfite. La liqueur initiale d'hypochlorite est titrée de même. On remarque que la terre appauvrit d'autant plus la solution en chlore actif qu'elle renferme plus de matière organique.

B. Dosage du carbone total. — Comme il est presque impossible de distinguer entre elles les diverses formes de la matière organique du sol, et que les procédés de dosage de l'humus par dissolution sont assez imparfaits, il est préférable, en vue de déterminer le poids total de l'humus contenu dans un sol donné, d'avoir recours au dosage du carbone total. Du chiffre obtenu il est facile de passer à l'humus en supposant, comme nous l'avons dit un peu plus haut, que cet humus renferme 58 p. 100 de carbone.



On peut doser le carbone total soit *par voie sèche*, soit *par voie humide*.

Voie sèche. — Nous ne décrirons pas le procédé en détail ; il est, de tous points, identique à celui que l'on emploie dans le dosage du carbone d'une substance organique définie. L'échantillon de terre (5 à 10 grammes) étant disposé dans une nacelle, on le sèche à la température ordinaire sous le dessiccateur à acide sulfurique pendant plusieurs jours. La nacelle est ensuite introduite dans un tube à combustion contenant une colonne d'oxyde de cuivre de 40 centimètres de longueur, ou mieux de chromate de plomb, précédée d'une colonne de cuivre métallique en grains de 20 centimètres de longueur. On effectue l'opération dans un courant d'oxygène, et l'on absorbe le gaz carbonique dégagé pendant la combustion dans des tubes à potasse appropriés. Lorsque le contenu de la nacelle ne présente plus de teinte noirâtre, l'opération est terminée. Le poids du gaz carbonique obtenu est généralement un peu supérieur à celui qui correspond à la dose de carbone contenue sous forme d'humus dans l'échantillon examiné. En effet, si la terre soumise à l'analyse contient des carbonates (de calcium et de magnésium), une certaine quantité de l'acide carbonique de ceux-ci se dégage par suite de la température à laquelle la nacelle est portée, et, cela, dans une proportion qui ne peut être estimée *a priori*, car elle dépend essentiellement du degré de chaleur et de la durée de l'opération. Aussi, lorsque le dosage est achevé, on doit faire tomber le contenu de la nacelle dans un petit ballon contenant un peu d'eau et dont le col est fermé par un bon bouchon de caoutchouc à trois trous. Le premier de ces trous est traversé par un tube en relation avec un petit réfrigérant ascendant, suivi lui-même de deux tubes à ponce sulfurique destinés à arrêter la vapeur d'eau, puis d'un tube de Liebig à potasse liquide et d'un tube en U contenant de la chaux sodée. Le second trou du bouchon porte un tube terminé par un entonnoir à robinet, rempli d'acide chlorhydrique étendu. Par le troisième trou du bouchon passe un tube qui plonge jusqu'au fond du ballon et qui est en relation avec un flacon de Mariotte débitant bulle à bulle de l'air dépouillé de gaz carbonique. L'appareil étant monté, on fait circuler l'air afin de s'assurer du bon fonctionnement de toutes les pièces ; puis on ouvre le robinet du tube à entonnoir : l'acide chlorhydrique se répand dans le ballon et attaque les carbonates que n'a pas décomposés la chaleur. On chauffe le ballon doucement jusqu'à l'ébullition de façon à dégager la totalité du gaz carbonique dissous dans l'eau. On supprime le feu, et on laisse circuler le courant d'air pendant quelques minutes. Le petit réfrigérant qui suit immédiatement le ballon est destiné à faire refluer dans celui-ci l'eau qui distille peu à peu ; les tubes à ponce sulfurique arrêtent la vapeur d'eau. La pesée des deux derniers tubes (potasse liquide, chaux sodée) donne le poids du gaz carbonique des carbonates que contenait encore la terre après l'opération de la combustion. Si, d'autre part, on fait la même expérience

avec un échantillon de la même terre, simplement séché sur l'acide sulfurique comme l'échantillon qui a servi à la combustion, on a la *totalité* du gaz carbonique contenu dans les carbonates de la terre. La différence entre les deux dosages de gaz carbonique est exprimée en carbone ($\text{CO}_2 \times \frac{3}{11} = \text{C}$), et ce poids de carbone est retranché de celui qu'a fourni la combustion. On peut donc connaître très exactement le carbone seul de la matière humique.

Le procédé de dosage des carbonates de la terre, que nous venons d'exposer, donne des résultats très corrects et doit être employé chaque fois que l'on veut connaître le poids *total* de ces carbonates (chaux et magnésie), *sans faire la distinction entre la grosseur de leurs grains*. Ce procédé a l'inconvénient d'être un peu long. En vue d'un dosage rapide, on se sert le plus souvent d'appareils appelés *calcimètres* (voir plus loin). On pourrait également utiliser ces petits ballons en verre mince, munis de deux petites allonges, dont l'une est garnie de ponce sulfurique et l'autre remplie d'acide chlorhydrique dilué, ballons dont on fait usage pour doser la quantité de carbonate de calcium que renferme un calcaire naturel (appareil Bobierre).

Relativement au dosage de l'acide carbonique des carbonates dans certaines terres riches en matières humiques, on a conseillé de ne pas chauffer le ballon dans lequel se produit l'action de l'acide, car la matière humique pourrait subir une décomposition partielle qui, donnant par elle-même naissance à une certaine dose de gaz carbonique, fausserait les résultats. Il suffit alors de faire passer plus longtemps le courant d'air dans l'appareil, afin de déplacer à froid la totalité du gaz carbonique contenu dans le ballon après décomposition des carbonates par l'acide chlorhydrique.

B. Voie humide. — Les procédés de dosage du carbone par voie humide reposent essentiellement sur ce fait que l'acide chromique additionné d'acide sulfurique, ou, ce qui revient au même, un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique concentré, dégagent à chaud de l'oxygène : celui-ci brûle les matières carbonées qui sont à son contact. Ces procédés par voie humide ne présentent aucun avantage sur ceux de la voie sèche. Souvent même, la combustion du carbone est incomplète ; dans tous les cas, elle est assez difficile à réaliser et le critérium de la fin de l'opération n'existe pas. Cependant ces procédés sont applicables dans certains cas où ceux de la voie sèche ne le sont plus : par exemple, s'il s'agit d'une terre très humide, ou très riche en humus, que l'on désire ne pas débarrasser de son eau d'imbibition.

On utilise également un pareil dispositif lorsqu'il s'agit de doser le carbone dans certains liquides ayant servi à la culture des microorganismes.

Au lieu d'employer l'acide chromique comme oxydant, on peut faire usage de permanganate de potassium en solution alcaline : pea-



dant le premier stade de l'opération, le carbone de l'humus se change partiellement en gaz carbonique qui se fixe sur l'alcali, et partiellement en oxalate. Dans le second stade, on ajoute de l'acide sulfurique dilué qui dégage le gaz carbonique du carbonate et décompose l'oxalate au contact de l'excès de permanganate (Warrington et Peake). Ce procédé comporte les mêmes incertitudes que le procédé à l'acide chromique.

IV

DÉTERMINATION DE L'AZOTE ORGANIQUE, DE L'AZOTE NITRIQUE, DE L'AZOTE AMMONIACAL.

L'azote jouant vis-à-vis des plantes un rôle capital, il est nécessaire de doser cette substance avec précision. Les méthodes exactes ne manquent pas qui permettent d'arriver au but.

Mais ici, comme pour tous les éléments indispensables à la végétation, se pose encore la question de savoir *quelle est la fraction de l'azote total* d'un sol qui est immédiatement assimilable par la plante. Nous avons étudié antérieurement la nature de l'azote organique des sols, et nous avons vu que cet azote affectait des formes multiples, dont on constate l'existence avec certitude par l'emploi des acides ou des bases, mais qu'il est impossible de définir actuellement et de séparer les unes des autres. On admet que la forme *nitrique* de l'azote est la source principale, sinon exclusive, de l'azote utilisable par la plupart des végétaux de la grande culture. Or, ainsi que nous le dirons dans la suite, la transformation de l'azote organique en azote nitrique dépend de plusieurs facteurs, au nombre desquels il faut placer la présence du calcaire. On en conclut déjà que le dosage de l'azote doit marcher de pair avec celui du calcaire, puisqu'un sol, même très riche en azote, peut ne pas nitrifier si l'élément basique lui fait défaut.

Il existe un grand nombre de végétaux qui se développent dans des sols non calcaires renfermant parfois beaucoup d'azote organique : on ne sait pas actuellement sous quelle forme ces végétaux profitent de l'azote organique, ou quelle est, dans le



complexe azoté de l'humus, la fraction d'azote à laquelle ils s'adressent de préférence.

Quoi qu'il en soit, le dosage de l'azote total est l'un des plus importants que l'on ait à exécuter dans l'analyse chimique. Il fournit des renseignements très intéressants sur la quantité et, souvent, sur la nature des engrais ou amendements qu'il convient de donner au sol, soit pour augmenter le poids de cet élément s'il est trop peu abondant en vue d'une culture donnée, soit pour modifier ses qualités s'il fait partie d'un sol peu ou pas calcaire.

L'azote existe dans le sol sous trois formes : *azote organique*, *azote nitrique*, *azote ammoniacal*. Sous le nom d'*azote organique*, il faut comprendre l'ensemble des noyaux complexes issus, en première ligne, de la métamorphose de l'azote albuminoïde, d'origine végétale ou animale. Nous décrirons séparément le dosage de l'azote sous ces trois formes, sans nous appesantir sur la façon dont on pratique chacun de ces dosages : nous renvoyons le lecteur aux traités spéciaux sur la matière.

α. Azote organique. — Disons de suite que, si on veut connaître le *poids total* de l'azote contenu sous les trois formes précédemment indiquées, il n'existe qu'une seule manière d'opérer correctement : c'est d'employer le procédé bien connu de Dumas qui consiste à brûler la matière organique par l'oxyde de cuivre et à diriger les gaz sur une colonne de cuivre métallique destinée à décomposer les oxydes gazeux de l'azote. On recueille l'azote sur le mercure et on en mesure le volume. Schlœsing a décrit une modification de la méthode de Dumas, qui permet de doser, dans une même opération, le carbone et l'azote totaux d'une terre ou d'une substance organique quelconque. On mesure le volume total des gaz carbonique et azote, et on les sépare par les procédés connus.

Le procédé de Schlœsing est excellent ; on en trouvera la description dans l'ouvrage de cet auteur intitulé : « *Contribution à l'étude de la chimie agricole* » (Encyclopédie chimique de Frémy, Paris, 1885, p. 237). Mais ce procédé est malheureusement d'une exécution longue et difficile et ne saurait entrer dans la pratique courante de l'analyse des sols.



Il permet d'opérer sur un poids de terre notablement supérieur à celui que l'on est obligé de prendre lorsqu'on utilise la méthode de Dumas proprement dite, d'où un avantage appréciable.

Müntz a modifié un peu cette méthode de dosage : le seul reproche qu'on puisse faire à cette modification c'est de nécessiter également le montage d'un appareil compliqué. Toutefois, dans des recherches très exactes, c'est à la méthode de Müntz qu'il faudrait avoir recours (A. Müntz, *Méthodes analytiques appliquées aux substances agricoles* ; Encyclopédie chimique de Frémy, Paris, 1885, p. 159).

Le dosage de l'azote total s'exécute d'une façon particulièrement commode par le procédé dit à la chaux sodée, ou par le procédé de Kjeldahl. Lorsque l'opération est bien conduite, les résultats en sont excellents. On sait que le procédé à la chaux sodée repose sur ce fait que les alcalis, chauffés au rouge naissant avec une substance azotée, en dégagent l'azote à l'état d'ammoniac, pourvu que cet azote se trouve dans la substance en question, soit sous forme de sel ammoniacal, soit sous forme amidée NH_2 , soit sous forme imidée NH . L'azote tertiaire, ou l'azote lié à l'oxygène, ne se transforme qu'incomplètement en ammoniac dans ces conditions. Or, dans la terre arable, l'azote dit *organique* est contenu dans des noyaux comparables à ceux des albuminoïdes, ainsi que nous l'avons montré précédemment ; il pourra donc être transformé en ammoniac au contact des alcalis. Ce qui démontre la justesse de cette manière de voir, c'est que le procédé à la chaux sodée fournit des résultats presque identiques à ceux que donne la méthode de Dumas ou celle de Schloësing. On peut donc l'employer en toute sécurité.

Il est nécessaire de faire usage d'un tube de verre un peu long (80 centimètres) si on veut opérer sur 30 grammes de terre, et il est bon, pendant toute la durée du dosage, de faire passer dans ce tube un courant d'hydrogène. Ce gaz agit comme réducteur et balaye d'une façon complète l'ammoniac qui se dégage. On reçoit celle-ci dans de l'acide sulfurique titré. Nous passerons sous silence les détails de cette analyse bien connue de tous les chimistes.

Le seul reproche que l'on puisse faire à cette méthode c'est de ne pas donner l'azote total, mais seulement l'azote organique et ammoniacal. En effet, les nitrates que contiennent la plupart des terres arables ne



sont réduits, même au rouge, au contact de la soude, que d'une façon très incomplète ; mais l'erreur en moins que l'on commet ainsi est peu importante pour deux raisons. L'expérience montre que si un nitrate pur, chauffé seul avec de la chaux sodée, ne dégage que peu d'azote sous la forme ammoniacale, ce nitrate en dégagera davantage s'il est mélangé avec une matière carbonée, telle que le sucre par exemple. Or dans la terre, il y a toujours du carbone ; aussi, pendant le chauffage, une certaine quantité de l'azote des nitrates passe-t-elle à l'état d'azote ammoniacal ; cependant on n'obtient jamais la totalité de l'azote nitrique par ce procédé. En second lieu, le rapport entre l'azote nitrique et l'azote total du sol (en négligeant l'azote ammoniacal qui existe, comme nous allons le dire, en quantité infime) est presque toujours très petit, même chez les meilleures terres arables ; il est de 1 à 2 p. 100 dans les cas les plus favorables à la nitrification naturelle. Les nitrates n'augmentent dans une large proportion que si on favorise artificiellement le phénomène nitrificateur, ainsi qu'il arrive dans certaines expériences de laboratoire dans lesquelles on maintient constante la température de la terre (30 à 35 degrés) et la dose d'humidité, en prenant soin d'agiter de temps en temps la masse pour l'aérer de façon convenable. Or, aucune de ces conditions ne se trouve réalisée d'une manière aussi parfaite dans la nature. On peut donc admettre qu'il n'y a jamais qu'une très petite fraction de l'azote du sol qui existe à l'état nitrique. Il en résulte que l'erreur que l'on commet dans le dosage par la chaux sodée est presque négligeable, puisqu'une partie de l'acide nitrique passe à l'état d'ammoniac. Suivant certains auteurs, la totalité même de l'azote nitrique serait réduite à l'état d'ammoniac dans ces conditions.

On a d'ailleurs perfectionné le procédé en mélangeant la chaux sodée avec des réducteurs convenables qui permettent d'obtenir la totalité de l'azote. Parmi les réducteurs employés, nous citerons l'acétate de sodium, ou bien un mélange de 6 parties de chaux sodée, 7 parties d'hyposulfite de sodium et un peu de soufre.

Le *procédé de Kjeldahl* repose sur la destruction de la matière organique azotée par l'acide sulfurique concentré au voisinage de la température d'ébullition de cet acide. Tout l'azote passe à l'état de sulfato d'ammonium. Il suffit ensuite d'étendre avec de l'eau le liquide refroidi et de le faire bouillir avec un excès de soude caustique pour en dégager l'ammoniac que l'on recevra dans un acide titré.

Les différentes phases de la réaction sont vraisemblablement les suivantes. L'acide sulfurique déshydrate la matière organique, et l'eau produite dans ces conditions se fixe sur l'azote complexe, à la façon d'une hydrolyse, pour changer



cet azote en azote ammoniacal. De plus, le gaz sulfureux qui prend naissance dans l'action du charbon sur l'acide sulfurique favorise le phénomène de réduction. Afin que l'azote d'une matière organique passe ainsi à l'état ammoniacal, il est nécessaire, comme avec l'emploi de la chaux sodée, que cet azote soit compris dans la molécule sous la forme amidogène NH^2 , ou imidogène NH : ce qui est le cas de la terre arable.

Si, la plupart du temps, le simple chauffage avec l'acide sulfurique suffit pour transformer l'azote organique en azote ammoniacal, sous les réserves que nous avons faites sur la nature du noyau azoté, il est cependant des cas où cette transformation est incomplète. En ce qui concerne la terre arable, que nous avons seule ici en vue, il convient d'opérer comme suit : 10 grammes de terre sont introduits dans un ballon de verre d'Iéna d'une capacité de 150 centimètres cubes environ avec 30 grammes d'acide sulfurique bien pur, mélangé de 1 ou 2 grammes d'anhydride phosphorique. On ajoute ensuite 1 gramme environ de mercure et on chauffe, doucement d'abord, puis progressivement jusqu'à ébullition du liquide. La masse charbonne au début ; peu à peu elle se décolore presque totalement, et l'on arrête l'opération une heure après que le liquide a pris une teinte jaune clair. Le résidu sableux est blanc ou légèrement gris. L'addition de mercure a pour but de créer un milieu réducteur par suite du dégagement du gaz sulfureux ; toutefois, son action, très réelle et très efficace, est assez mal connue ; car, au lieu de mercure, on peut employer l'oxyde de ce métal : la transformation se fait aussi complètement. De violents soubresauts accompagnent souvent le chauffage ; il est bon, en principe, de chauffer le ballon avec une petite couronne de gaz qui ne porte pas l'action de la chaleur directement sur le fond. Il va sans dire que, si la terre à analyser est très calcaire, il faut verser l'acide sulfurique avec beaucoup de précaution au début.

Lorsque la liqueur est refroidie, on l'étend d'eau : on l'additionne, d'après les conseils de Maquenne, d'hypophosphite de sodium pur afin de détruire les composés ammonio-mercuriques qui ont pris naissance dans la réaction et qui ne dégageraient pas à l'état d'ammoniaque, au contact de la soude ajoutée ultérieurement, tout l'azote qu'ils renferment. L'addition de l'hypophosphite produit presque immédiatement dans toute la liqueur une émulsion noire due à la diffusion du mercure métallique colloïdal. Il suffit de chauffer pendant une demi-heure au bain-marie pour rassembler ce mercure. On décante le liquide dans un ballon d'un litre, on lave à plusieurs reprises et on ajoute au liquide décanté de la soude caustique. On fait bouillir, après avoir réuni le ballon à un réfrigérant de Schlœsing, et on reçoit l'ammoniaque dans un acide titré. Les résultats obtenus sont excellents. Cette méthode vaut celle de la chaux sodée au point de vue de l'exactitude ; elle a sur celle-ci l'avantage d'être beaucoup plus rapide, beaucoup moins coûteuse et d'une exécution des plus faciles. Lorsque l'on



veut obtenir des résultats très exacts, il est indispensable de distiller à blanc un poids d'acide sulfurique et de soude égal à celui qui a servi à l'expérience : ces réactifs, même réputés purs, fournissent toujours un peu d'ammoniaque.

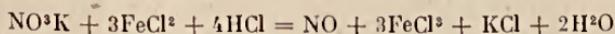
Relativement à la présence des nitrates dans la terre, nous ferons ici les mêmes remarques que celles que nous avons présentées plus haut au sujet de la méthode à la chaux sodée. L'acide nitrique est partiellement chassé dans le procédé Kjeldahl et partiellement réduit. On a modifié la méthode de Kjeldahl, comme on a modifié celle à la chaux sodée, afin d'obtenir en même temps l'azote nitrique. A cet effet, on ajoute au mélange d'acide sulfurique et d'anhydride phosphorique, soit quelques grammes d'acide benzoïque, soit plutôt un peu d'acide phénolsulfurique et quelques grammes de poudre de zinc. L'azote des phénols nitrés qui prennent naissance dans la réaction est réduit par le zinc à l'état d'ammoniaque. Cette modification, importante dans l'analyse des engrais complexes azotés qui peuvent renfermer des nitrates, ne présente pas d'avantages sur la méthode plus simple que nous avons décrite quand il s'agit uniquement des terres arables. Les réducteurs proposés pour transformer l'azote nitrique en azote ammoniacal sont d'ailleurs nombreux.

β. Azote nitrique. — Le dosage de l'azote nitrique peut paraître superflu : en effet, si on suppose que le sol à examiner soit capable de nitrifier, il existe de grandes variations dans les proportions de l'acide nitrique qu'il contient suivant les saisons, le degré de sécheresse ou d'humidité de la terre, la présence ou l'absence de végétaux et l'âge de ceux-ci. Cependant une détermination d'azote nitrique n'est jamais inutile : on peut ainsi se convaincre de la présence de cette forme de l'azote, éminemment utilisable par la plupart des plantes de la grande culture. Le procédé le plus simple et le meilleur, à notre avis, est celui de Scløesing.

L'azote nitrique n'étant pas retenu par le pouvoir absorbant, il suffit de laver un poids connu de terre (100 à 1.000 grammes suivant la quantité présumée de nitrates) avec de l'eau distillée additionnée d'une faible quantité de chlorure de calcium pur afin que le liquide qui s'écoule demeure limpide. Ce lavage peut être pratiqué sur un entonnoir muni d'un filtre sans plis, ou mieux sur un entonnoir de Büchner dont le fond, garni de petits trous, est couvert d'un disque de papier à filtre. On évapore ensuite le liquide de lavage au bain-marie après l'avoir additionné de quelques gouttes de potasse. Lorsque la masse est réduite à une dizaine de centimètres cubes, on la filtre ; on lave le filtre avec un peu d'eau et on évapore dans une petite cap-



sule jusqu'à ce que la liqueur n'occupe plus qu'un volume de 4 à 5 centimètres cubes. On fait agir sur ce liquide, à chaud, un mélange de chlorure ferreux et d'acide chlorhydrique, suivant les précautions connues, et l'on recueille sur le mercure l'oxyde azotique qui se dégage d'après la réaction :



On lit le volume du gaz, après avoir absorbé par la potasse l'anhydride carbonique provenant de l'action de l'acide chlorhydrique sur les bicarbonates qui s'étaient dissous en même temps que les nitrates; de ce volume corrigé on déduit la quantité d'acide nitrique contenu dans le poids de terre soumis à l'expérience.

γ. Azote ammoniacal. — Cette forme de l'azote est de beaucoup la plus difficile à connaître exactement. Le dosage correct de cet alcali présenterait quelque intérêt parce qu'il est démontré que les plantes utilisent très bien l'azote ammoniacal et qu'il est possible que, dans les conditions ordinaires, la plante emprunte au sol à la fois de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal.

On peut affirmer que, presque toujours, une terre normale ne renferme que des traces d'azote ammoniacal. En effet, ainsi que nous le verrons dans l'étude de la nitrification, la transformation de l'azote organique en azote nitrique admet, comme stade intermédiaire, la production d'ammoniaque : mais celle-ci n'a qu'une existence de courte durée ; et, lorsque les conditions de la nitrification se trouvent réalisées, sa transformation en acide nitrique est rapide. Dans quelques circonstances, sans doute, l'ammoniaque peut apparaître dans la terre en quantités que l'on peut qualifier d'anormales. L'épandage excessif d'un sel ammoniacal dans une saison où la nitrification est suspendue, comme à la fin de l'automne ou en hiver ; la submersion d'un sol par suite de pluies abondantes ou d'inondation qui favorisent les phénomènes de réduction des nitrates ; l'addition d'amendements calcaires, principalement de chaux vive, sont autant de causes qui maintiennent ou provoquent la présence de l'ammoniaque dans le sol. Mais, si de pareilles conditions sont parfois réalisées, elles sont, en général, éphémères.



La difficulté du dosage de l'ammoniaque provient de ce fait que cet alcali est fixé par le pouvoir absorbant et qu'il faut détruire celui-ci pour libérer la base. Or, nous avons vu t. I, p. 308, que les réactifs acides ou alcalins (acides ou bases étendus) décomposent la matière azotée avec mise en liberté d'ammoniaque ; celle-ci passe à l'état de sel si le réactif employé pour détruire le pouvoir absorbant est un acide ; elle se dégage à l'état libre si la terre est mise au contact d'une base forte, même diluée. En sorte que *c'est le réactif qui engendre, sinon la totalité de l'ammoniaque que l'on dose, au moins une bonne partie de cette base, et, cela, dans une mesure qu'il est impossible d'apprécier.*

Schlössing a proposé de détruire le pouvoir absorbant par l'emploi de l'acido chlorhydrique étendu et froid jusqu'à décomposition des carbonates et apparition d'une réaction nettement acide. C'est ce liquide acide décanté, suivant certaines précautions qu'il serait trop long d'indiquer ici, que l'on distille avec de la magnésie fraîchement calcinée. Il est bien évident qu'il faut employer de l'eau et des réactifs absolument exempts d'ammoniaque. Toutefois, bien que le contact de l'acide avec la terre ne dure que peu de temps, il est probable que, dans quelques échantillons riches en humus, l'action de l'acide se fait sentir en produisant une certaine dose d'ammoniaque.

Nous conseillons, mais avec quelques réserves cependant, d'avoir recours au procédé suivant qui ménage les amides, et au moyen duquel on ne dégage que l'azote ammoniacal. Longi (1886) a montré que, si on chauffe à 40° pendant quatre heures dans le vide, en présence d'un certain volume d'eau et de magnésie calcinée, un mélange d'amides bien définis (urée, oxamide, etc.) et d'un sel ammoniacal dont le poids est connu, il se dégageait une quantité d'ammoniaque répondant exactement à celle que contient le sel ammoniacal, mais pas davantage : les amides restent inaltérés. Si on suppose que les amides du sol se comportent, à cet égard, comme des amides bien définis, on peut faire usage de ce procédé vis-à-vis de la terre arable.

On introduira donc dans un ballon d'un litre, un peu résistant, une centaine de grammes de terre avec 3 ou 4 grammes de magnésie et 250 centimètres cubes d'eau. Le bouchon de caoutchouc qui ferme le ballon sera percé de deux trous : le premier livrant passage à un tube très effilé pour permettre la rentrée d'un très petit volume d'air destiné à éviter les soubresauts, le second livrant passage à un tube de verre recourbé qui communiquera avec un tube à boules de Will et Warentrapp contenant un acide dilué. On fait le vide par l'extrémité du tube à boules, et on chauffe le ballon vers 40°. Au bout de quatre heures la réaction est terminée. Il ne reste plus qu'à transvaser

le liquide acide dans un ballon, à l'alcaliniser avec de la magnésie, à distiller et à recueillir dans un acide titré l'ammoniaque dégagé. Le titre de l'acide sera bien connu, mais devra être faible, car la dose d'ammoniaque ainsi obtenue est presque toujours fort petite.

Potter et Snyder (1915) proposent de doser l'ammoniaque de la façon suivante. On introduit 25 grammes de terre dans un matras avec 50 centimètres cubes d'eau bien pure et 2 grammes environ de carbonate de sodium ; on ajoute quelques gouttes d'huile lourde minérale afin d'empêcher la formation de l'écume. Le matras communique avec un flacon contenant un volume connu d'acide sulfurique titré. On fait passer, à l'aide d'une trompe à eau, de l'air dans l'appareil à raison de 250 litres à l'heure pendant 15 heures. L'ammoniaque dégagée est absorbée par l'acide dont on prend ensuite le titre. On retrouve, à l'aide de ce procédé, toute l'ammoniaque ajoutée à un sol.

Telles sont, très sommairement exposées, les principales méthodes analytiques permettant de doser les éléments du sol qui s'éliminent par la calcination, *eau, carbone, azote*. La détermination de ces éléments est indispensable dans le cas d'une analyse complète, et les chiffres obtenus sont susceptibles d'une interprétation très nette ; à la condition, ainsi que nous l'avons déjà dit, d'y joindre le dosage du calcaire. Cette dernière substance est seule capable de réagir, suivant la quantité que le sol renferme, dans un sens favorable : 1° sur le carbone de l'humus, avec lequel elle se combine en formant un ciment susceptible d'agglomérer les particules sableuses ; 2° sur l'azote organique, pour la nitrification duquel sa présence ne saurait manquer.

V

DÉTERMINATION DE LA TOTALITÉ DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX

Il est toujours utile de connaître la *totalité des éléments minéraux* que contient une terre donnée. Cette analyse sera exécutée comme s'il s'agissait de l'analyse d'une roche. Après calcination de la terre, on porphyrise celle-ci, et on en traite un poids connu par l'acide fluorhydrique additionné d'un peu d'acide sulfurique, ou bien par un mélange de fluorure d'ammonium et d'acide sulfurique. La réaction doit être effectuée dans une capsule de platine.

Ce traitement a pour effet, comme l'on sait, d'éliminer la silice sous



forme de fluorure de silicium gazeux, et d'amener à l'état de sulfates toutes les bases. A l'aide des procédés connus, on sépare les bases lourdes et terreuses en traitant d'abord le mélange des sulfates par le nitrate de baryum en excès qui élimine l'acide sulfurique, puis, après filtration, par l'ammoniaque et le carbonate d'ammonium qui, à l'ébullition, précipitent toutes les bases (ainsi qu'une partie de la magnésie); la soude et la potasse restent dissoutes. Lorsqu'on a évaporé à sec le liquide filtré, on le soumet à l'action de l'eau régale afin de détruire les sels ammoniacaux; on évapore de nouveau à sec et on ajoute au résidu un peu d'acide oxalique. On calcine légèrement et on insolubilise ainsi la magnésie. Il ne reste que la potasse et la soude que l'on sépare par les méthodes habituelles. Le traitement fluorhydrique a donc pour but *le dosage total de la potasse et de la soude, c'est-à-dire des alcalis.*

Pour doser les autres éléments du sol, on pèse un poids connu de terre calcinée et porphyrisée, et on le mélange intimement dans un creuset de platine avec 3 ou 4 fois son poids de carbonate de sodium sec (ou d'un mélange à parties égales de carbonates de potassium et de sodium) et l'on chauffe, doucement d'abord, tant que la masse se boursouffle, puis plus fortement jusqu'à fusion complète. On sépare ensuite les divers éléments à l'aide des méthodes connues. Sauf les alcalis, on peut, par ce procédé, doser avec une grande exactitude la totalité des substances qui ont une importance particulière vis-à-vis de la structure du sol ou de la nutrition végétale: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , PO_4H^3 , Fe_2O_3 .

Beaucoup d'auteurs conseillent, lorsqu'il s'agit de l'analyse des matières silicatées (roches, terre arable), l'emploi de la méthode de la *voie moyenne* imaginée par H. Sainte-Claire Deville. Le lecteur trouvera une description détaillée de ce procédé dans le *Traité d'analyse des matières agricoles* de Grandeaux; 3^e édition, tome I, p. 106, Paris, 1897.

Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer antérieurement, le dosage complet des éléments minéraux que renferme une terre ne nous renseigne pas sur la quantité de matériaux actuellement ou prochainement assimilables par les plantes, mais il nous donne une idée *des réserves totales* que contient le sol et peut indiquer, dans une certaine mesure, la nature des engrais que ce sol réclame pour telle culture.

Une remarque intéressante trouve ici sa place. Si l'on sépare un sable argileux en ses éléments de différentes grosseurs et que l'on fonde chacun de ces lots avec du carbonate de sodium afin de déterminer la quantité des principes fertilisants contenus dans chacun d'eux, voici ce que l'on remarque. La silice forme la partie principale de toutes ces fractions, puis viennent l'aluminium et le fer. La silice diminue en quantité quand la finesse des éléments augmente, alors que le fer, l'aluminium, l'acide titanique, la potasse et l'acide phosphorique croissent au contraire (Steinkönig, 1914).

Nous allons maintenant décrire, d'une manière succincte, les procédés

les plus usités permettant de déterminer, sur un échantillon de terre, le poids des éléments dont peut disposer la plante à plus ou moins longue échéance.

Nous avons, au début de ce Chapitre, montré quelles étaient les difficultés que l'on rencontrait dans ce genre d'étude : il est nécessaire, à cet égard, de se reporter à ce que nous avons dit tome I, p. 267 relativement à la constitution minérale des sols et à l'action de certains réactifs sur la solubilisation des substances indispensables à la nutrition végétale. Presque toutes les méthodes d'analyse chimique des terres arables, en usage à l'heure actuelle, ne sont que des méthodes de convention ; quelques-unes n'ont de valeur que parce que les chiffres qu'elles fournissent concordent assez bien avec les observations faites directement sur les rendements obtenus avec une culture déterminée sur un sol déterminé. Une plante prend lentement dans le sol les éléments dont elle a besoin, et elle fait un choix parmi ces éléments. Or une analyse chimique de terre doit être rapide ; elle ne peut, pratiquement, demander un grand nombre de jours. Il y a donc antithèse entre les deux façons d'opérer : celle qu'emploie la nature et celle que nous mettons en œuvre dans le laboratoire. C'est pour cette raison que, jusqu'à nouvel ordre, *les procédés rationnels de dissolution* dans lesquels on fait agir l'eau et le gaz carbonique, dans des conditions bien définies de temps et de température, ne peuvent entrer dans la pratique courante, malgré les avantages incontestables que présentent de pareils procédés. Les expérimentateurs, et ils sont nombreux, qui emploient les acides énergiques à l'attaque de la terre et dosent ensuite dans le liquide les principaux éléments de fertilité se proposent seulement d'indiquer *la quantité d'éléments fertilisants qu'un échantillon de terre donné peut fournir aux plantes pendant un grand nombre d'années*. Mais, très souvent, les résultats d'une pareille analyse contredisent ceux de la pratique agricole ; car il est des terres qui cèdent assez facilement de la potasse, par exemple, aux acides et en cèdent peu aux plantes.

C'est presque toujours l'acide nitrique, pur et chaud, que l'on utilise dans l'attaque des terres, parfois l'eau régale ou l'acide chlorhydrique. Aubin et Alla ont préconisé l'emploi de l'acide sulfurique pur et bouillant pendant trois heures : la matière organique est détruite dans ces conditions, l'argile complètement attaquée et le calcaire intégralement transformé en sulfate de calcium. Ces auteurs admettent que les éléments siliceux seront peu attaqués au début et que cette attaque ne se poursuivra guère après trois heures de contact.

De pareils procédés de dosage qui ont, le plus souvent, demandé beaucoup d'études préliminaires, nous laissent parfois dans une incertitude très grande au sujet de la nature des engrais à fournir à un sol déterminé ; il ne nous indiquent jamais *la dose actuelle d'éléments assimilables*.



VI

SUBSTANCES MINÉRALES A CARACTÈRE ACIDE

Nous laissons de côté, dans cette étude du dosage des éléments à caractère acide, tout ce qui concerne la silice. Celle-ci est tellement abondante dans presque tous les sols, et la forme sous laquelle elle peut s'introduire dans le végétal est si mal connue, que son estimation, au point de vue analytique, est ici superflue.

Acide phosphorique. — *Le Comité consultatif des Stations agronomiques et des Laboratoires agricoles (1891)* prescrit la dissolution des phosphates du sol au moyen du procédé suivant; non sans faire remarquer que cette méthode est incapable de renseigner sur l'état dans lequel se trouvent ces phosphates et sur leur degré d'assimilabilité.

20 grammes de terre, calcinée au moufle, sont placés dans une capsule. On humecte avec de l'eau, et on ajoute, par petites quantités et aussi longtemps qu'il se produit une effervescence, de l'acide nitrique à 36° Baumé. On réajoute ensuite 20 centimètres cubes d'acide, et on chauffe au bain de sable pendant cinq heures en agitant la masse de temps en temps et en évitant la dessiccation. On reprend par l'eau chaude, on filtre, on évapore le liquide filtré et on chauffe le résidu vers 120° pour insolubiliser la silice. On humecte ensuite avec de l'eau aiguisée d'acide nitrique, on filtre, on lave et on dose l'acide phosphorique en le séparant à l'état de phospho-molybdate d'ammonium que l'on transforme ensuite en phosphate aminoniaco-magnésien. Cette méthode fournit certainement presque tout le phosphore des phosphates, mais une partie seulement du phosphore organique. Elle peut convenir dans certains cas, et renseigne au moins *sur la richesse globale* d'un sol en acide phosphorique. On admet souvent que la *richesse moyenne* de la plupart des sols en cette substance oscille aux environs de 1 p. 1000: en deçà de ce chiffre, on a coutume d'avoir recours aux engrais phosphatés. La méthode ci-dessus permet d'être fixé à cet égard, mais elle est peu instructive en ce qui concerne la quantité d'acide phosphorique disponible *actuellement* pour le végétal. On peut en dire autant de toutes les méthodes où il est fait usage d'acides forts, ainsi que nous l'avons fait remarquer précédemment. Beaucoup d'auteurs, surtout à l'étranger, font usage de l'acide chlorhydrique pur de densité 1,115, non seulement pour le dosage de l'acide phosphorique, mais aussi pour celui de la potasse, de la chaux et de la magnésie. Il semble que l'effet *dissolvant* sur les éléments d'une terre donnée soit maximum lorsqu'on emploie un acide d'une pareille concentration. A la température

de 100°, l'acide de densité 1,115 garde une composition à peu près constante, et sa teneur en acide réel (HCl) est de 22,9 p. 100. Au bout de 5 jours de contact à 100°, l'acide ne dissout plus rien : si l'on prolonge l'expérience, la solubilité des éléments diminue (Loughridge, Hilgard).

Si l'on passe maintenant à l'examen des méthodes plus rationnelles d'attaque, on trouve encore, suivant les auteurs, des divergences notables quant à l'emploi du solvant acide.

Frap (1910) appelle *acide phosphorique actif* celui qui est enlevé à 200 grammes de terre par une digestion de 5 heures à 40° avec de l'acide nitrique (2.000 centimètres cubes d'acide $\frac{N}{5}$). D'après cet auteur, la quantité d'acide phosphorique extraite du sol par les récoltes est en relation étroite avec la quantité d'acide phosphorique actif qui se trouve dans le sol. Ce procédé n'est qu'une application de la remarque de Schloesing fils, tome I, p. 270, suivant laquelle l'acide nitrique de concentration très faible ne dissout que les phosphates alcalino-terreux dont l'assimilation par les plantes est vraisemblablement la plus facile.

La méthode de Dyer, dont nous avons déjà parlé, réunit beaucoup de suffrages en raison du principe théorique sur lequel elle repose. Nous rappelons que, dans cette méthode, il est fait usage d'acide citrique à 1 p. 100. 200 grammes de terre sont placés dans un flacon avec 2.000 centimètres cubes d'eau contenant 20 grammes d'acide citrique ; il convient d'ajouter un excès d'acide correspondant au carbonate de calcium que renferme la terre. Le contact doit durer sept jours à froid, et la masse doit être fréquemment agitée. Mais, afin que les résultats soient comparables, il est indispensable de suivre exactement les indications de Dyer ; car, si on abaisse la durée du contact, ou si l'on change la concentration, on n'obtient plus les mêmes chiffres. Nous avons signalé antérieurement les relations intéressantes qui existent entre l'acide phosphorique assimilé par les plantes et la quantité de cet acide qui passe dans le liquide citrique, tome I, p. 271. Cependant Hall et Plymen (1902) ont montré que, si l'emploi de l'acide citrique fournit le plus souvent de bons renseignements, il ne faudrait pas se hâter d'en généraliser l'adoption pour toutes les terres, car l'attaque des phosphates par ce réactif varie avec la nature des combinaisons phosphatées que contient le sol. D'après Hall et Amos (1906), la première extraction n'enlève pas tout l'acide phosphorique susceptible de se dissoudre dans le solvant (acide citrique à 1 p. 100, ou eau chargée de gaz carbonique) ; la réaction est réversible, et il se fait un équilibre entre l'acide phosphorique dissous et les bases du sol. Engels (1912) recommande l'usage d'une solution d'acide citrique à 2 p. 100 comme étant mieux appropriée au dosage des éléments nutritifs (PO_4H^3 , CaO , K_2O).

Le citrate d'ammonium, en solution faible, a été utilisé quelquefois dans le même but.



Kudaschew (1905) a préconisé l'emploi d'une solution à 5 p. 100 d'acide oxalique, à la suite d'expériences faites sur les terres noires de Russie, expériences qui lui ont montré que les sols les plus fertiles étaient ceux qui contenaient la plus forte proportion d'acide phosphorique soluble dans l'acide oxalique.

Signalons encore une tentative originale de dosage de l'acide phosphorique assimilable qui consiste à employer, comme dissolvant, une liqueur complexe contenant des sels minéraux et des acides organiques au même titre où se trouvent ces diverses substances dans le suc d'une plante, d'une betterave, par exemple (Plot).

Il résulte de ce très court exposé que la seule méthode qui semble, actuellement, fournir des renseignements valables sur la dose d'acide phosphorique assimilable contenue dans une terre donnée est la méthode à l'acide citrique, avec les réserves que nous avons indiquées. Mais rappelons, encore une fois, que Dehérain, et quelques-uns de ses collaborateurs, avaient, il y a plus de trente ans, signalé tout le parti que l'on pouvait tirer de l'emploi de l'acide acétique pour définir la fraction de l'acide phosphorique du sol immédiatement profitable aux végétaux (tome I, p. 272).

Toutefois, cette action des acides dilués ne présente pas toujours toutes les garanties désirables. Russel et Prescott (1916) ont montré que lorsqu'un échantillon de terre est agité au contact d'acides dilués, de concentrations équivalentes, on remarque que les divers acides (nitrique, chlorhydrique, citrique) se conduisent de même façon. L'acide sulfurique paraît donner des résultats un peu plus élevés. Mais il se produit bientôt une réaction contraire ; une partie de l'acide phosphorique est soustraite à la solution, malgré la présence de l'acide dissolvant. Un processus normal d'absorption a lieu et la limite du phénomène dépend de la nature de l'acide. Il en résulte que la quantité d'acide phosphorique qui passe en solution ne représente qu'une différence entre deux effets contraires : ce qui permet d'expliquer pourquoi la quantité d'acide phosphorique assimilable varie avec les différentes méthodes employées et qu'elle n'est guère en relation avec la quantité dont les plantes peuvent en réalité disposer.

Acide sulfurique. — Le soufre est une substance indispensable à la construction du noyau albuminoïde ; aussi est-il bon de savoir effectuer son dosage. Nous avons vu que le soufre existait dans le sol sous des formes multiples (t. I, p. 272). Sous il forme *organique* qui dérive des tissus végétaux non encore dé-



composés, il est inutilisable par la plante tant qu'il ne se présente pas à l'état complètement oxydé d'acide sulfurique. La seule forme utile est la forme minérale. Or les sulfates minéraux (et celui de calcium en particulier, souvent abondant dans le sol) sont très mobiles.

L'extraction faite par un volume d'eau convenable pourrait renseigner d'une manière suffisante sur la quantité d'acide sulfurique, ou plutôt de sulfates, qui se trouve dans un sol ; mais il vaut mieux laver un poids connu de terre avec de l'acide chlorhydrique à 1 p. 100, à froid, dans lequel le sulfate de calcium est plus soluble que dans l'eau seule. L'acide chlorhydrique peut être employé sans inconvénient à cette extraction ; il ne possède pas de propriétés oxydantes, et l'on est à peu près certain que les seuls sulfates qu'il entraîne préexistent dans le sol comme tels et ne proviennent pas de quelque transformation des composés organiques sulfurés. Si la terre est riche en humus, la solution chlorhydrique prendra une forte coloration brune, et il ne serait pas correct d'y précipiter directement l'acide sulfurique par un sel de baryum. Dans ce cas, le dosage de l'acide sulfurique présente quelque incertitude, car, si après avoir évaporé à sec la liqueur, on détruit à chaud la matière organique, soit par l'acide nitrique, soit par un mélange de carbonate de sodium et de nitrate de potassium, on oxyde forcément le soufre organique qui se trouvait dans l'humus ; d'où un dosage trop élevé.

VII

SUBSTANCES MINÉRALES A CARACTÈRE BASIQUE

(CaO, MgO, K²O)

De ces trois substances, chaux, magnésie, potasse, les deux premières sont d'un dosage facile et instructif. L'estimation de la potasse, au point de vue spécial où nous nous plaçons, est, au contraire, très incertaine.

Chaux. — Le dosage *total* de cet élément ne peut être effectué qu'en faisant usage de l'acide fluorhydrique. Cependant le traitement de la terre à l'acide nitrique, exécuté comme il a été dit plus haut à propos de l'acide phosphorique, qui consiste à chauffer pendant cinq heures au bain de sable en évitant



la dessiccation, permet d'obtenir la totalité de la chaux qui existe dans l'échantillon sous forme de carbonate, de sulfate, de phosphate, de nitrate (et d'humate, si la terre n'a pas été calcinée au préalable). L'attaque de certains silicates, facilement décomposables, peut être notable dans ces conditions.

A l'aide des procédés connus, on séparera la chaux des autres éléments dissous en même temps. Quant à la quantité de matière à soumettre à l'analyse, elle varie de 2 à 40 grammes suivant les divers sols. Mais il faut se souvenir que la *forme* de la chaux la plus utile est celle de *carbonate*; il est superflu de revenir sur les rôles physique et chimique que joue cette matière dans le sol. Il en résulte qu'il convient le plus souvent, quand il s'agit de la chaux, de ne doser dans un échantillon de terre donné que le carbonate de calcium. Cependant il est bon de remarquer que beaucoup de silicates contenant de la chaux, que les acides étendus décomposent avec facilité, cèdent cette base à nombre de végétaux. La plupart des terres dites *fortes* contiennent la majeure partie de leur chaux sous forme de silicates.

Lorsqu'il s'agit de doser le calcaire seul, on doit établir certaines distinctions. Le *calcaire véritablement actif* est le *calcaire fin*. Il ne faut pas se contenter de doser le calcaire total. Il est nécessaire de chercher quelle est la fraction de cette substance qui présente un état de division assez grand pour être facilement dissoute par le gaz carbonique et entrer en jeu dans les réactions chimiques qui modifient si heureusement les propriétés physiques du sol sous le rapport de la perméabilité, s'il s'agit d'un sol compact, ou sous le rapport de la neutralisation des substances humiques s'il est question d'un sol acide.

L'estimation *approximative* du calcaire *total* peut être faite à l'aide d'un acide dilué (acide chlorhydrique à 1/10, par exemple) employé à froid. On aura soin d'agiter fréquemment le mélange. Le chiffre ainsi obtenu, donnant la quantité de chaux dissoute, sera généralement trop fort puisqu'il comprendra la chaux du carbonate, celle du phosphate, celle du sulfate et celle de l'humate. Mais, dans les cas où il n'est pas besoin d'une grande précision, ce dosage suffit si, toutefois, la quantité de chaux sous forme de carbonate est prépondérante, ainsi qu'il arrive dans les sols tant soit peu calcaires. Il est certain que si le calcaire entre dans la proportion de 5 p. 100 dans une terre, le poids de la chaux combinée à l'humate, au phosphate, au sulfate, est généralement très faible par rapport à celui qui est combiné à l'acide carbo-



nique. On pourrait d'ailleurs retrancher du poids de la chaux totale le poids de la chaux unie aux autres acides.

Le dosage de l'*acide carbonique total*, effectué comme nous l'avons dit à la page 59, peut servir de mesure au dosage du calcaire d'une manière assez approchée. Seule, la présence du carbonate de magnésium serait susceptible de vicier l'analyse; il serait facile de retrancher du poids du gaz carbonique total la fraction combinée à la magnésie en faisant, d'autre part, un dosage spécial de cette base. Or, le carbonate de magnésium est, la plupart du temps, en faible proportion par rapport au carbonate de calcium; on ne commettrait donc pas d'erreur grossière en rapportant au calcium seul la totalité du gaz carbonique obtenu dans le dosage. De plus, au point de vue des réactions qu'il exerce dans le sol, le carbonate de magnésium joue le même rôle que le carbonate de calcium.

On peut également doser le gaz carbonique du calcaire en faisant agir un acide sur un poids de terre déterminé, et en recueillant les gaz sur le mercure. A l'aide d'un dispositif bien connu, on fait d'abord, avec une trompe à mercure, le vide dans le ballon qui contient la terre, on y introduit ensuite une certaine quantité d'acide chlorhydrique, et, au moyen du jeu de la trompe aidé de l'action de la chaleur, on extrait la totalité du gaz dégagé.

On dose fréquemment le calcaire, ou les carbonates totaux contenus dans un échantillon donné, au moyen du *calcimètre de Bernard*. A l'aide de cet appareil, on chasse dans un tube gradué le gaz carbonique dégagé d'un poids connu de terre traité à froid par l'acide chlorhydrique. Une opération exécutée avec un poids connu de carbonate de calcium pur permet de graduer l'appareil. Les indications que fournit ce procédé sont satisfaisantes.

Calcaire actif. — Mais il est, le plus souvent, beaucoup plus important de ne doser dans la terre que le *calcaire actif*, c'est-à-dire le calcaire disséminé en grains très fins. On peut réaliser ce dosage à l'aide du procédé de P. de Mondésir, particulièrement recommandable par la simplicité des manipulations. Ce procédé s'applique aux terres peu calcaires que l'on présume devoir être chaulées ou marnées avec avantage.

P. de Mondésir attaque la terre par un acide peu énergique (acide tartrique étendu) et pendant un temps assez court, de façon que, seul le calcaire très fin, et seulement la surface des grains les plus gros,



entrent en dissolution. Le volume du gaz carbonique qui se dégage est mesuré par sa tension. On trouvera dans le livre de Grandeau (*Traité d'analyse des matières agricoles*, tome I, p. 185 et suiv., Paris, 1897) la description du flacon (d'une capacité de 500-600 centimètres cubes) dans lequel la réaction doit être effectuée. Le gaz carbonique qui prend naissance par le contact de l'acide tartrique dilué sur le carbonate de calcium exerce dans le flacon clos une pression sur une petite poche de caoutchouc pleine d'eau, communiquant avec un tube de verre qui sert de manomètre. On graduel l'appareil par une suite d'opérations préliminaires qui consistent à faire une série d'essais avec des poids connus de carbonate de calcium pur en présence de la même quantité de liquide et d'un excès d'acide tartrique. On lit sur le manomètre la hauteur à laquelle s'élève l'eau.

On a également proposé d'estimer le calcaire *actif* en faisant digérer un poids connu de terre pendant trois heures au bain-marie avec une solution à 10 p. 100 de chlorure d'ammonium. On filtre au bout de ce temps, et on dose, dans le liquide filtré, la quantité de chlorure de calcium qui s'est formée par double décomposition : on en déduit le poids du calcaire entré en réaction.

Cependant, dans ce procédé, la chaux du sulfate, et une partie de celle que renferment certains silicates calciques, facilement décomposables, entrent également en dissolution.

Il faut remarquer, en terminant, qu'il n'existe pas de relations entre la teneur d'un sol en gaz carbonique dégageable sous l'influence des acides, sa teneur en chaux et la quantité de cette base que peuvent prendre les végétaux. Lorsque l'attaque aux acides indique la présence d'une notable quantité de gaz carbonique, on peut, en général, affirmer que le sol renferme une dose notable de chaux ; mais, lorsqu'on n'obtient qu'un faible dégagement gazeux, il ne s'en suit pas que ce sol contienne peu de chaux.

Magnésie. — Le dosage de cette substance sera exécuté comme celui de la chaux, en attaquant la terre par un acide dilué. On peut admettre que, par un contact suffisamment prolongé, le carbonate de magnésium se dissout dans ces conditions. Il n'existe pas de procédé permettant de doser la magnésie *active*.

Si on traitait la terre par l'acide nitrique pur à chaud, on risquerait de dissoudre une notable quantité de magnésie combinée à la silice, ainsi que la chose a lieu avec les micaschistes. La magnésie possède une importance considérable vis-à-vis de la nutrition de la plante : on sait qu'elle se concentre de préférence dans les graines où sa présence est constante et son poids, presque toujours, supérieur à celui de la chaux.



Comme la magnésie se rencontre le plus souvent en faible quantité dans la plupart des sols, il est nécessaire de prendre un poids de terre un peu notable pour effectuer le dosage de cette base, et de remarquer que le dosage de la magnésie, en présence de beaucoup de chaux, présente quelques difficultés.

Potasse. — La potasse est l'élément le plus difficile à doser sous sa forme assimilable ; on ne possède à cet égard que des renseignements peu précis. Cette base est, la plupart du temps, assez abondante dans le sol. Les terres siliceuses, celles qui sont issues de la décomposition des roches primitives, en renferment fréquemment de 5 à 15 p. 1000. Or, à moins de traiter l'échantillon de terre par l'acide fluorhydrique qui, seul, solubilise la totalité de la potasse en volatilisant la silice à l'état de fluorure, il n'existe pas de réactifs acides qui soient capables de la dissoudre complètement. La quantité de potasse qui entre en dissolution, lorsqu'on fait usage des acides forts, dépend de la concentration de l'acide, de la durée de la réaction, de l'élévation de la température. Nous avons montré précédemment, t. I, p. 275, les incertitudes inévitables que présente, dans le cas actuel, l'emploi des acides en général. Cette critique s'adresse, par conséquent, au procédé officiel français, d'après lequel l'attaque de la terre doit être faite à l'acide nitrique chaud, pendant une durée de cinq heures.

Parmi les procédés de dosage les plus recommandables, qui semblent se rapprocher quelque peu des conditions naturelles dans lesquelles cet alcali se solubilise, il faut citer les suivants :

Dyer a appliqué à ce dosage la méthode à l'acide citrique qui lui avait fourni de bons résultats pour l'acide phosphorique (p. 73). Il semble que l'on puisse interpréter les chiffres obtenus dans le même sens : la potasse qu'enlève l'acide citrique à un échantillon de terre serait sous une forme immédiatement disponible par les plantes.

Dans le but de dissoudre la potasse assimilable retenue sur les particules terreuses par le pouvoir absorbant, Schlösing a proposé de traiter un poids de 100 grammes de terre, mélangé de 600 à 800 cent. cubes d'eau, par de petites quantités d'acide nitrique jusqu'à cessation d'effervescence, c'est-à-dire jusqu'à destruction du calcaire. On laisse digérer pendant six heures à froid, après avoir ajouté 5 grammes du même acide. Il est évident que ce procédé, moins brutal que celui qui consiste



à faire un traitement à chaud en présence d'un excès d'acide fort, solubilise une quantité d'alcali très inférieure à celle que l'on obtient dans ce dernier cas. Mais il subsiste toujours un doute sur *la nature de la potasse ainsi libérée*, dont la totalité n'apparaît pas forcément comme devant être immédiatement assimilable.

Nous avons signalé antérieurement (t. I, p. 257) les résultats que l'on obtient en traitant la terre par l'eau chargée de gaz carbonique. La quantité de potasse dissoute dans ces conditions est toujours supérieure à celle que fournit l'eau pure : ce qui peut s'expliquer en admettant que l'acide carbonique agit comme un acide faible, qu'il décompose partiellement les silicates zéolithiques, et détruit les combinaisons d'absorption que la potasse a contractées, soit avec ces silicates, soit avec la matière organique. Un semblable traitement des terres en vue de l'analyse paraît, *a priori*, très rationnel et, dans le paragraphe suivant, nous verrons ce qu'il est permis d'en attendre.

Beaucoup d'expérimentateurs ont, à diverses reprises, essayé précisément de définir la quantité de potasse assimilable en faisant usage d'eau chargée de gaz carbonique. Voici, pour ne prendre qu'un exemple récent appuyé sur des essais culturaux, comment Bieler-Chatelan (1910) proposa d'opérer. On traite un échantillon de terre donné : 1° par l'acide chlorhydrique concentré et froid avec contact de quarante-huit heures ; 2° par l'eau saturée de gaz carbonique à la température et à la pression ordinaires, soit *par agitation* (30 grammes de terre additionnés de 500 centimètres cubes d'eau carbonique remués pendant dix heures), soit *par déplacement ou lessivage continu* : 100 grammes de terre sont tassés dans une allonge verticale ; on y verse de l'eau carbonique par petites portions jusqu'à obtenir, dans le flacon situé sous l'allonge, un volume de liquide clair proportionnel à la quantité d'eau qui tombe pendant la période de végétation annuelle à Lausanne, localité où ont été faites les expériences. On dose, à l'aide des procédés connus, la potasse dans ces diverses solutions.

D'autre part, les résultats fournis par ces analyses sont comparés avec les chiffres exprimant l'influence de l'engrais potassique sur les rendements en fourrages secs à l'hectare. Les conclusions auxquelles Bieler-Chatelan est arrivé sont les suivantes. Il n'y a pas proportionnalité (ainsi qu'on devait s'y attendre) entre les doses de potasse soluble dans l'acide chlorhydrique et les chiffres qui expriment l'effet de la fumure potassique. Ainsi, telle terre sur laquelle ce genre d'engrais a produit une action inévidente se trouve être plus riche en potasse soluble dans l'acide chlorhydrique que telle autre où l'effet de l'engrais a été négatif. Au contraire, *plus la dose de potasse soluble à l'eau carbonique augmente, moins l'effet de l'engrais potassique est sensible*. Il en résulte que le traitement des terres par l'eau carbonique donne une mesure de la potasse assimilable d'un sol qui répond aux données des essais culturaux.

Les terres plus ou moins calcaires livrent, proportionnellement, un peu moins de potasse à l'eau carbonique que les terres non calcaires.



Analyse rationnelle des terres par l'eau chargée de gaz carbonique. — Il est inutile d'insister de nouveau sur les avantages que présente l'emploi de l'eau carbonique au point de vue de l'appréciation exacte des éléments de fertilité actuellement assimilables par la plante.

Très supérieure aux procédés dans lesquels on traite un échantillon de terre par des réactifs énergiques, absolument étrangers au sol, la méthode qui consiste à employer l'eau carbonique n'est cependant pas à l'abri de toute critique. Si l'on veut obtenir des résultats comparables, il est nécessaire d'employer une eau carbonique de titre connu, agissant à une température connue. Alors qu'il est facile de rendre constants ces deux facteurs lorsqu'il s'agit d'un essai de laboratoire, il se trouve que, dans la nature, les deux facteurs en question sont essentiellement variables. Dans l'opération analytique, on accélère visiblement le phénomène de dissolution, puisque, la plupart du temps, on agite l'échantillon de terre avec le réactif : chaque particule terreuse arrive donc, à un moment donné, en contact avec le solvant. De pareils contacts sont moins intimes dans le sol et, toutes choses égales d'ailleurs, les dissolutions s'effectueront en un temps beaucoup plus long. Il ne faut pas songer à faire usage d'eau saturée de gaz carbonique, si ce n'est en vase clos : car, pendant les transvasements, une semblable dissolution perd toujours du gaz.

Quoi qu'il en soit, cette méthode qui a été souvent mise en œuvre, plutôt comme terme de comparaison que comme procédé d'analyse proprement dit, mérite, à notre avis, de fixer sérieusement l'attention. Elle est susceptible d'entrer dans la pratique courante à la condition d'en bien préciser tous les détails. Nous ne mentionnerons sur ce point spécial que le mode opératoire de König, et surtout celui, beaucoup mieux étudié, de Mitscherlich.

König procède de la façon suivante. 1.500 grammes de terre séchée à l'air sont mis au contact de 6.000 centimètres cubes d'eau saturée au quart de gaz carbonique. Le flacon dans lequel a lieu la réaction doit être bien clos ; on l'agite d'une façon régulière pendant trois jours. On siphonne, au bout de ce temps, 4.000 centimètres cubes de liquide clair (répondant à 1.000 grammes de terre) ; on abandonne au repos pen-



dant vingt-quatre heures et on filtre en couvrant l'entonnoir. Si le liquide n'est pas limpide, on l'évapore à $\frac{1}{10}$ de son volume initial ; on filtre pour séparer l'argile et on complète avec les eaux de lavage à 500 centimètres cubes. Avec certaines terres il est bon de recommencer plusieurs fois le traitement. On dose ensuite les substances dissoutes à l'aide des procédés ordinaires.

E. A. Mitscherlich a publié, en 1907, un travail d'ensemble sur ce même sujet. Cet auteur applique le procédé de l'acide carbonique à l'analyse de terres de constitution variée, et étudie d'une façon systématique l'influence des divers facteurs de l'expérience. Nous allons indiquer très brièvement quelques-uns des points essentiels de ce travail en priant le lecteur de se reporter au mémoire original pour les détails concernant la grandeur des chiffres obtenus et les corrections à introduire du fait des méthodes analytiques employées (*Landw. Jahrbücher*, t. XXXVI, p. 309 ; 1907).

La solubilité des éléments du sol est fonction de la quantité d'eau que celui-ci renferme : plus la pluie est abondante et plus grandes sont les chances de dissolution. La température joue également un rôle important. De plus, comme on opère en présence d'un excès de gaz carbonique, l'action de masse intervient, de telle façon que ce gaz peut chasser de leurs combinaisons des traces d'acides forts, l'acide phosphorique par exemple. Il est donc indispensable, si on veut obtenir des résultats comparables avec les divers échantillons de terre que l'on se propose d'analyser, de maintenir constants les quatre facteurs : durée du contact, température, titre du gaz carbonique, quantité d'eau employée.

A cet effet, Mitscherlich introduit l'échantillon de terre dans un flacon de 2.500 centimètres cubes contenant 2.000 centimètres cubes d'eau et un peu de chloroforme pour éviter toute fermentation. Le flacon est placé dans un thermostat chauffé à 30°, et son contenu est sans cesse remué au moyen d'un agitateur en argent. L'auteur s'est arrêté à une durée d'action de onze heures et demie. Un courant de gaz carbonique barbote d'une manière régulière au sein de la masse. Le poids de terre employé varie de 80 à 200 grammes (terre séchée à l'air rapportée à la terre séchée à l'étuve). Après expérience, on siphonne directement le liquide au moyen d'un tube de terre poreuse.

Dans des fractions bien déterminées du liquide siphonné, on dose l'azote par la méthode de Kjeldahl, l'acide phosphorique par la méthode au phospho-molybdate, la chaux et la potasse par les procédés usuels. Tous les réactifs sont soigneusement vérifiés quant à leur pureté, et on a fixé, par des expériences nombreuses, le degré de précision que l'on pouvait atteindre dans chaque dosage en particulier.

Voici quelques remarques relatives à l'influence des quatre facteurs énumérés plus haut sur la marche de l'opération. Le rapport du poids



de la terre mise en œuvre dans l'analyse à celui de l'eau varie de $\frac{1}{25}$ à $\frac{1}{10}$ suivant que ce poids de terre est de 80 ou de 200 grammes (le poids d'eau étant de 2.000 grammes); or, dans les conditions naturelles, 1 partie de terre se trouve en contact avec la moitié de son poids d'eau au maximum. Après dix heures d'agitation, comme il a été dit plus haut, on obtient un poids à peu près constant de matière dissoute. En réalité, la concentration devrait augmenter sans cesse jusqu'à ce que la liqueur fut saturée : ce qui n'est pas le cas ici. On a donc affaire à des solutions chez lesquelles on ne perçoit plus guère, au bout d'un certain temps, de changements de concentration parce que la durée du contact de l'eau et de la terre ne peut être pratiquement prolongée au-delà de certaines limites. La potasse, la chaux, l'acide phosphorique se dissolvent en quantités d'autant plus grandes que la richesse du liquide en gaz carbonique est elle-même plus grande. Mais ceci ne semble pas toujours vrai pour l'azote.

Lorsqu'il s'agit d'un sol riche en humus, toutes conditions étant égales, la température n'influence pas sensiblement la solubilité de la chaux et celle de l'acide phosphorique; le maximum de solubilité de ces deux substances se trouve être aux environs de 18°. Quant à la solubilité de la potasse, elle est proportionnelle à la température; celle de l'azote augmente beaucoup au-delà de 18°.

En ce qui concerne l'influence de la quantité d'eau, l'auteur a opéré avec les concentrations suivantes : $\frac{\text{Sol}}{\text{Eau}} = \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{15}, \frac{1}{20}, \frac{1}{25}, \frac{1}{30}$, et il a trouvé que, lorsque la quantité d'eau augmente, la quantité de sels dissous augmente également (les autres facteurs étant constants : T = 30°; eau saturée de gaz carbonique; durée onze heures et demie). Les expériences de Mitscherlich fixent d'une manière très nette les conditions de réussite d'une opération et montrent tous les avantages d'un procédé réalisant, aussi bien que possible, le mécanisme naturel de formation des solutions nutritives.

Afin de donner une idée de la grandeur des chiffres obtenus dans de semblables essais, prenons la moyenne d'une des expériences de l'auteur précitée se rapportant à une terre de jardin riche en humus. 100 grammes de cette terre, additionnés de dix fois leur poids d'eau, ont été agités, pendant onze heures et demie, au sein d'un courant de gaz carbonique, à une température de 30°. La quantité des éléments dissous a été la suivante :

K = 0 gr. 0107 (K₂O = 0 gr. 0128); Ca = 0 gr. 1441 (CaO = 0 gr. 2017);
P₂O₅ = 0 gr. 0093.

Cherchons, d'après ces chiffres, quelle serait la richesse en éléments fertilisants de la masse de terre contenue dans 1 hectare, en supposant



que la couche arable ait une épaisseur de 20 centimètres et pèse 4.000 tonnes. Nous trouverons ainsi :

$$\begin{aligned} \text{K}^2\text{O} &= 512 \text{ kilogrammes ; } \text{CaO} = 8068 \text{ kilogrammes ;} \\ \text{P}^2\text{O}^5 &= 372 \text{ kilogrammes.} \end{aligned}$$

Si les végétaux, même les plus exigeants de la grande culture, rencontraient dans un sol de pareilles quantités d'éléments nutritifs à l'état soluble, il n'y aurait pas lieu de leur distribuer d'engrais. Cette méthode d'analyse à l'acide carbonique fournit donc encore des chiffres le plus souvent trop forts, mais, cependant, infiniment plus rapprochés de la réalité que ceux que l'on obtient par tout autre procédé. En fait, on conçoit sans qu'il soit besoin d'insister que, dans la méthode de Mitscherlich, le rapport du poids de l'eau à celui de la terre est beaucoup plus élevé que dans les conditions naturelles ; d'autre part, cette eau est toujours saturée de gaz carbonique, alors que, en général, cette saturation n'est jamais atteinte normalement.

On en conclut immédiatement que, dans tout sol dont le taux d'humidité pourrait être maintenu constant, qui posséderait une dose élevée d'humus et chez lequel un degré convenable d'aération faciliterait les combustions, les phénomènes de dissolution seraient très actifs. Ce sol pourrait donc subvenir aux besoins de récoltes très exigeantes, alors même que sa richesse en éléments fertilisants totaux serait médiocre.

Il y a également lieu de faire remarquer que, d'après Pfeiffer et Blanck (1912), la concordance trouvée par Mitscherlich, entre l'absorption de l'acide phosphorique par les plantes et la solubilité des phosphorites dans l'eau chargée de gaz carbonique, ne doit pas être généralisée.

VIII

INTERPRÉTATION DES ANALYSES PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES SOLS

Quel que soit le procédé employé pour exécuter l'analyse physique ou l'analyse chimique d'un sol, nous nous trouvons finalement en présence d'un certain nombre de chiffres qu'il s'agit d'interpréter. Ces chiffres doivent nous donner des renseignements précis sur les points suivants : quel est le degré de compacité ou de perméabilité de la terre examinée ; quelles sont les améliorations que nous devons lui faire subir pour



diminuer cette compacité et augmenter la perméabilité, ou réciproquement ; quelles sont les chances de réussite que nous pouvons espérer. Voilà les éclaircissements que nous sommes en droit d'exiger d'une analyse physique. L'analyse chimique, d'autre part, doit nous indiquer, non seulement la *quantité totale* des éléments de fertilité que la plante est susceptible de rencontrer dans le cube de terre qu'elle exploite, mais surtout le *degré d'assimilabilité* de ces éléments, c'est-à-dire la fraction actuellement utilisable pour une récolte donnée. On doit pouvoir se rendre compte, en consultant les chiffres d'une analyse chimique, s'il est utile ou non d'apporter des matières fertilisantes supplémentaires au sol, et quelle est la quantité de ces matières qu'il faut lui confier en vue d'une culture déterminée. L'analyse physique nous dira *sous quelle forme* il est préférable d'incorporer au sol la substance qui manque, parce que cette analyse aura fait connaître le degré de perméabilité du sol considéré et, par conséquent, son degré d'aération, ainsi que la faculté qu'il possède de retenir une dose plus ou moins grande d'humidité. Or, beaucoup d'engrais ne deviennent assimilables (engrais azotés complexes, par exemple) que lorsqu'ils ont subi une décomposition profonde pour la réalisation de laquelle la présence d'une forte proportion d'oxygène est indispensable.

Difficultés des interprétations analytiques. — Si l'interprétation des analyses physique et chimique pouvait toujours être formulée d'une façon aussi catégorique, elle rendrait d'immenses services à l'agriculture, et le problème de l'amélioration de beaucoup de sols serait alors résolu. Malheureusement, il en est rarement ainsi, et il est nécessaire de faire à cet égard de nombreuses réserves, surtout lorsqu'il s'agit des chiffres fournis par l'analyse chimique : ces réserves s'imposent à la suite des considérations que nous avons développées dans le présent Chapitre.

A défaut de méthodes analytiques capables de fournir des renseignements précis relativement au degré de fertilité véritable d'une terre, il semblerait que *l'expérimentation directe sur le sol* fut la seule façon rationnelle de procéder : sur une terre donnée on ne devrait, en



principe, cultiver que la plante qui s'y développe le mieux, et dont on évaluerait les exigences par l'analyse de ses cendres. On substituerait ainsi l'analyse de la plante à celle du sol. Cependant les très nombreuses recherches faites dans ce sens démontrent que la même plante n'a jamais en tous lieux — et même dans un endroit déterminé — une composition minérale uniforme. Celle-ci varie essentiellement avec la composition du sol qui la porte, indiquant par exemple un excès de chaux, de potasse ou d'azote là où le sol est plus riche en chaux, en potasse ou en azote. En outre — et ceci est capital — la *question de climat* joue un rôle prépondérant vis-à-vis de la composition minérale des végétaux. Sous tel climat, c'est-à-dire sous telles influences extérieures d'éclairement, d'humidité, de température, l'analyse d'une plante donnée fournira des chiffres qui présenteront de notables différences avec ceux que cette même analyse indiquerait pour la même plante se développant sous un autre climat.

La quantité d'eau que reçoit le sol varie d'une année à l'autre dans des limites étendues, non seulement sur les différents points du globe qui portent la même plante, mais aussi sur le même point ; ce facteur essentiel dans les phénomènes de dissolution des éléments minéraux produit une répercussion inévitable sur la lenteur ou la rapidité du développement de la plante, donc sur sa richesse en substances fixes et en azote. C'est ce qui résulte, en particulier, des expériences de Wilms et von Seelhorst (1899) relatives aux oscillations que présente la composition des céréales (grains et paille) sous l'influence des engrais mis en présence de quantités d'eau variables. Le régime des eaux occasionne, vis-à-vis du poids de la matière sèche de ces plantes, de telles perturbations que l'on ne peut tirer de l'analyse des cendres aucune conclusion valable sur la richesse du sol en éléments fertilisants.

La composition d'une plante déterminée n'est donc jamais uniforme. Si l'analyse du sol par la plante est parfois capable de nous renseigner sur la composition du sol qui la nourrit, il faut tenir grand compte, en outre, des influences extérieures.

Malgré ses imperfections, l'expérimentation directe sur le sol présente de très nombreux avantages, et nous indiquerons, à la fin de ce chapitre, ce qu'il convient de faire à cet égard.

Ces réserves étant formulées, proposons-nous maintenant de montrer en quelques lignes quels renseignements précieux peut fournir l'interprétation prudente des chiffres donnés par les analyses physique et chimique d'une terre. Mais si l'on veut que ces renseignements aient une valeur, il est indispensable d'observer les règles ci-jointes qui se rapportent à l'échantillonnage d'une terre et ne sont que la répétition abrégée de celles que nous avons indiquées à propos de l'analyse physique des sols (p. 191).



Prise d'échantillons. — Les échantillons de la pièce de terre seront prélevés avec le plus grand soin, et sur autant de points qu'il sera nécessaire si l'homogénéité de la terre paraît douteuse. On fixera la profondeur du sol proprement dit, afin de connaître le eube de terre dont les racines peuvent disposer.

Les analyses physique et chimique ne portant que sur la terre fine (le plus souvent celle qui passe au tamis de 1 millimètre), il est indispensable de calculer *le rapport de cette terre fine à la terre totale*. En effet, dans le cas où la terre fine ne constituerait, par exemple, que la moitié de la terre totale, on serait exposé, si l'on ne faisait pas la correction, à attribuer à la terre totale une richesse qu'elle ne posséderait pas en réalité. C'est là un point fort important sur lequel a insisté Risler. Le sous-sol sera examiné quant à sa structure physique; il sera bon d'en prendre plusieurs échantillons sur une profondeur de quelques décimètres. Bien que sa couleur diffère fréquemment de celle du sol, il arrive souvent que le sous-sol renferme un stock très appréciable de substances fertilisantes. Un bulletin d'analyse devra toujours comporter une étude géologique sommaire de la région; il mentionnera l'inclinaison du sol par rapport à l'horizon et la direction de cette inclinaison; il indiquera enfin la température moyenne du lieu et le régime des eaux.

A. Interprétation de l'analyse physique. — Cette interprétation a été tentée par beaucoup d'auteurs, très souvent dans des cas particuliers. Désirant nous en tenir sur ce point à des généralités, nous nous contenterons de résumer ici les règles formulées à cet égard par Lagatu et Sicard, règles qui nous paraissent à la fois simples et pratiques (1).

Qu'il soit question de l'analyse physique ou de l'analyse chimique d'une terre, *il s'agit de comparer ces analyses à celles d'une terre type*. A cet effet, on prélèvera des échantillons de terres variées qui, *d'après l'observation seule, faite en dehors de toute considération scientifique, possèdent des qualités déterminées, soit au point de vue physique, soit au point de vue du rendement*; on les analysera et on notera ainsi un très grand nombre de coïncidences entre tel ensemble de résultats analytiques et telles qualités agricoles.

(1) *Guide pratique et élémentaire pour l'analyse des terres et son utilisation agricole*, par H. LAGATU et L. SICARD. 1901, pages 175 et suivantes.



Le type le plus parfait d'une terre arable est la terre dite *franche*, sur les propriétés de laquelle il y a unanimité. Au point de vue physique, cette terre est perméable à l'eau et aux gaz, elle se laisse travailler aisément, ne se réunit pas en mottes compactes et ne se fendille pas après la sécheresse; elle ne se délaie pas à la suite de pluies abondantes, ne se soulève pas par la gelée et n'est pas emportée par le vent. Elle repose sur un sous-sol perméable.

Or l'analyse physique d'une pareille terre, faite sur la terre fine passant au tamis de 10 mailles par centimètre, fournit *les chiffres moyens suivants*.

Dans 1.000 parties :

Sable grossier	600 à 700 parties.
Sable fin.....	200 à 300 —
Argile.....	60 à 100 —
Humus	0,1 à 30 —
Calcaire (réparti à peu près également entre le sable fin et le sable grossier)	50 à 150 —

Il faut remarquer de suite qu'une terre peut très bien convenir à telle plante et, cependant, présenter à l'analyse un chiffre plus élevé de sable fin, c'est-à-dire être plus compacte, alors que telle autre plante ne prospérera que dans un sol plus riche en éléments grossiers, c'est-à-dire plus léger. Le tableau précédent ne constitue donc qu'une moyenne de chiffres avantageux, tirés de nombreuses comparaisons entre l'analyse et les rendements culturaux satisfaisants.

Lagatu et Sicard font observer qu'il importe, avant tout, de connaître, pour un sol donné, quel est son degré de compacité ou de perméabilité : il est inutile de reprendre ici la définition de ces termes ; nous en avons maintes fois indiqué la portée.

L'imperméabilité d'une terre reconnaît deux origines. Les particules terreuses peuvent être contiguës parce que les intervalles qui existent entre elles sont très petits ; ou bien les intervalles entre les particules sont remplis par une substance qui se conduit comme un ciment. Compacité et imperméabilité sont donc déterminées par des causes analogues.

Une terre est composée de cailloux et de graviers d'une part, de terre fine d'autre part. « Dans presque tous les cas, la proportion de terre fine est plus que suffisante pour remplir complètement tous les intervalles que laissent entre eux les cailloux et les graviers. Dès lors, c'est seulement la terre fine qui commande la compacité ou la perméabilité ; c'est elle seule, en effet, qui présente, soit aux solides, soit aux fluides, la résistance à vaincre ; car les éléments grossiers, s'ils étaient seuls, ne seraient liés par aucune cohésion et laisseraient entre eux de larges intervalles traversés par les fluides avec une extrême facilité. »

Il en résulte qu'il est possible de déduire le degré de compacité ou



de perméabilité d'une terre de la seule analyse physique de la terre fine.

Le rôle de chacun des constituants de cette terre peut être ainsi défini : *Le sable grossier est un élément de division, c'est-à-dire de perméabilité ; le sable fin, un élément de compacité et d'imperméabilité ; l'argile, un élément de plasticité si l'eau est en faible quantité ; l'humus un élément d'agglutination des particules sableuses s'il s'agit d'une terre légère, un élément de division et d'aération s'il s'agit de terres argileuses.*

Quant au calcaire, son rôle consiste à modifier les propriétés plastiques de l'argile : il devra être d'autant plus abondant que la dose d'argile sera plus élevée. Une terre très peu calcaire et fortement argileuse se délaie sous l'influence de l'eau de pluie, qui demeure longtemps à la surface si celle-ci est horizontale, ou ruisselle, sans pénétrer, si cette surface est inclinée.

Le rôle de chacun de ces éléments étant établi, nous sommes maintenant en mesure d'interpréter les chiffres du tableau de la page précédente, relatifs à la composition moyenne d'une terre franche.

Nous voyons que cette terre doit renfermer de 600 à 700 parties de *sable grossier*. Si ce chiffre paraît élevé, il faut remarquer que les racines exigent la présence dans le sol de fragments suffisamment volumineux qui, laissant entre eux des espaces vides, n'entravent pas leur développement, et qui permettent à l'eau et à l'air de circuler librement. Lorsque la dose du sable grossier atteint 800 p. 1000, l'argile étant inférieure à 100, le sol retient mal les liquides : on entre dans le domaine des terres dites *légères*. Celles-ci deviennent très légères lorsque le chiffre du sable grossier atteint 900 p. 1000.

Le *sable fin* exerce sur la structure du sol une influence qui varie avec la proportion d'argile qui l'accompagne. Si l'argile n'existe qu'en faible quantité, ou si elle est absente, le sable fin est entraîné par les eaux météoriques ; il entre en contact intime avec les éléments grossiers et obstrue tous les espaces libres qui assuraient la circulation des liquides et des gaz. Alors même que l'on modifierait un pareil sol par des travaux de labourage et qu'on lui rendrait ainsi un certain degré de perméabilité, ces améliorations ne seraient que passagères ; car, à la suite d'une nouvelle chute d'eau, ce sol retournerait à son état primitif ; il retrouverait le même degré d'imperméabilité *reconnaissant une cause d'ordre mécanique*. C'est là, d'ailleurs, un cas qui se rencontre rarement. Lorsque, au contraire, le sable fin est accompagné d'argile, la division particulière subsiste, et l'eau circule dans les interstices du sol ; 50 à 70 p. 1000 d'argile suffisent à cet égard. Si la proportion d'argile s'élève à 150 p. 1000, la terre prend un certain degré de cohésion, lequel s'accroît encore avec l'augmentation de cette substance. La terre devient une *terre forte*.

Si la proportion de sable fin atteint 500 p. 1000, et si l'argile reste à 150, la terre est dite *asphyxiante* ; les racines la pénètrent mal et n'y rencontrent plus une dose suffisante d'air. Le travail mécanique de



pareilles terres est très pénible et leur culture très difficile. Dans les couches non atteintes par les instruments aratoires, l'eau séjourne indéfiniment.

Telle est la signification générale que l'on doit attribuer aux chiffres du tableau et les renseignements que l'on peut en tirer.

Toutefois, Lagatu et Sicard font remarquer que cette interprétation n'a pas une précision absolue en raison même des conventions adoptées pour séparer le sable grossier, le sable fin et l'argile. En effet, nous avons vu antérieurement que l'argile, telle qu'elle est définie dans l'analyse physique, est, en réalité, composée de deux éléments : la majeure partie comprend du sable très fin, dont le dépôt complet ne se produirait qu'en un laps de temps incompatible avec les exigences d'une analyse. Quant à la véritable *argile colloïdale*, elle n'existe qu'en proportions très faibles. Le lot dénommé *argile* est donc, en réalité, un lot d'origine assez conventionnelle.

B. Interprétation de l'analyse chimique. — Cette interprétation est assez facile en ce qui concerne l'azote, la chaux et l'acide phosphorique ; elle est plus difficile quand il s'agit de la potasse. Elle exige toujours beaucoup de prudence et comporte certaines restrictions. A un point de vue général, on a souvent coutume de regarder, comme possédant une richesse satisfaisante, une terre qui contiendrait par kilogramme de matière sèche : azote = 1, acide phosphorique = 1, calcaire = 10 à 50, potasse = 2 ; ces déterminations ayant été effectuées à l'aide de l'acide nitrique pur employé à chaud. Lagatu et Sicard font remarquer que ce taux de matières alimentaires ne représente pas une *richesse moyenne*, car beaucoup de sols ne sont pas aussi bien partagés, au moins quant à l'une de ces substances. D'après ces auteurs, la *richesse satisfaisante exprimée par les chiffres ci-dessus* est celle qui permet d'emblée la culture intensive sans amélioration foncière importante ; c'est là ce qui résulte d'un grand nombre de comparaisons. On peut traduire la chose en disant que : entre la composition d'une terre et son degré de fertilité, il existe une relation évidente. Si une terre présente la richesse précédente pour tous les éléments, sauf pour un seul, il ne faut pas en conclure qu'elle est inapte à la culture intensive : elle ne s'y prêtera qu'au prix d'une amélioration foncière dont l'importance pourra dépasser les opérations de la culture usuelle. Il arrive parfois que cette amélioration foncière est



peu coûteuse ; mais, en général, les résultats que l'on est en droit d'en attendre sont lents à se produire.

Si nous entrons maintenant pendant quelques instants dans le détail de l'interprétation de l'analyse chimique, il nous est facile de tirer certaines conclusions intéressantes des discussions que nous avons soulevées dans le présent Chapitre.

Variations du taux des éléments de fertilité. — A. AZOTE ; CALCAIRE. — Il faudra, dans le bulletin d'analyse, consulter avant tout les chiffres qui donnent le taux du carbonate de calcium total et celui du calcaire fin. Ces chiffres, très importants, n'ont cependant qu'une valeur relative si on les examine isolément. On devra les mettre en regard de celui qui représente l'azote total. En effet, l'alcalinité du sol est indispensable à l'évolution des phénomènes de combustion, et à la nitrification en particulier. Une faible dose de calcaire (5 à 10 p. 1000) peut suffire à certaines cultures au cas où l'azote n'atteindrait qu'un taux de 0,5 p. 1000 par exemple. Mais, si l'humus est abondant et, par conséquent, l'azote organique, il faut que le taux du calcaire soit beaucoup plus élevé pour saturer la substance humique, et il est nécessaire que ce calcaire se trouve encore en excès lorsque cette saturation sera obtenue.

Une dose de calcaire s'élevant à 20, 50 et même 100 p. 1000 communique au sol une activité chimique très grande, si le dose de l'azote total est comprise entre 1,5 et 2 p. 1000. L'introduction répétée de fumier de ferme ou d'engrais verts ne peut fournir de résultats cultureux satisfaisants que lorsque la proportion du calcaire atteint un chiffre suffisant. Nous avons indiqué précédemment (page 47) de quelle façon on pouvait déterminer le degré d'acidité d'un sol : il est indispensable que cette acidité ne s'établisse jamais, car un sol acide serait incapable de fournir des récoltes rémunératrices, de céréales par exemple. Ce n'est donc pas le chiffre *absolu* de l'azote qu'il importe d'envisager : il faut savoir si cet azote se trouve dans les conditions où il peut nitrifier et le mettre en état de subir cette transformation. Or l'azote n'est capable de prendre la forme nitrique qu'en présence d'un excès de calcaire. A un sol riche en humus doit correspondre une dose de calcaire d'autant plus forte que le taux de cet humus est lui-même plus élevé.



Réciproquement, lorsque, dans un bulletin d'analyse, nous trouvons un taux de calcaire élevé (100 p. 1000 par exemple) et un taux d'azote assez faible (0,5 p. 1000), l'emploi du fumier de ferme ou celui des engrais verts seront avantageux. Cependant il ne faut pas oublier qu'un excès de calcaire produit une combustion très rapide de l'humus. Il existe donc une sorte d'équilibre entre l'azote et le calcaire; le bulletin d'analyse nous montre quel est le sens des réactions entre ces deux éléments, et il nous guide au sujet des modifications que nous devons faire subir au sol lorsque chaux ou azote (c'est-à-dire humus) prédominent.

Si ce bulletin ne signale que des traces de calcaire avec excès d'humus, le chaulage ou le marnage s'impose. Quand, à côté de traces de calcaire, nous trouvons un faible taux d'azote, ainsi qu'il arrive dans les terrains granitiques, l'addition d'azote soluble (nitrates, sels ammoniacaux) peut rendre de grands services. Nous supposons, pour le moment, que les autres éléments de fertilité (potasse, acide phosphorique) se rencontrent en proportions suffisantes.

Il ne faut pas perdre de vue que le calcaire ajouté artificiellement au sol, dans le cas où les terres manquent de cet élément, se dissout de façon continue et est entraîné dans les eaux de drainage sous forme de bicarbonate calcique. Lorsque, de plus, le sol réclame des engrais; tels que sulfate d'ammonium, sulfate ou chlorure de potassium, un poids de chaux correspondant au poids des acides sulfurique ou chlorhydrique s'élimine également. En sorte qu'il est nécessaire de veiller à la décalcification du sol, et de réintroduire, en temps opportun, une dose de calcaire égale à celle qui disparaît ainsi; car on doit redouter de voir réapparaître l'acidité du sol avec tous ses inconvénients.

Il est nécessaire, toutefois, de remarquer que les conclusions que nous venons de formuler relativement aux rapports qui doivent exister entre l'azote et le calcaire ne sont sensiblement vraies que si la terre est suffisamment perméable. Dans le cas des terres fortes, et surtout dans celui des terres très argileuses, un excès de chaux est encore plus indispensable pour coaguler l'argile et pour communiquer au sol un degré de perméabilité compatible avec la nitrification.

On voit donc, et c'est là un point essentiel, que l'interprétation de l'analyse chimique est subordonnée à celle de l'analyse physique d'une terre. Ainsi que le fait remarquer avec justesse la notice des *Méthodes du Comité consultatif des stations agronomiques*, il est difficile de préciser la limite à laquelle le sol ne contient plus assez de calcaire pour jouir de toutes ses propriétés, puisque cette limite varie avec les proportions des autres éléments.



On peut admettre, en résumé, que, lorsqu'on suppose la richesse en calcaire suffisante et le degré de perméabilité convenable chez un sol donné, il est possible, *au point de vue de leur teneur en azote*, de classer les terres de la façon suivante :

1^o *Terres très riches* contenant 2 p. 1000 d'azote et au-dessus. De pareils sols ne réclament pas d'engrais azotés et peuvent alimenter des récoltes, même exigeantes, pendant un grand nombre d'années ;

2^o *Terres riches*, contenant de 1,5 à 2 p. 1000 ; mêmes conclusions ;

3^o *Terres moyennement riches*, contenant de 0,8 à 1,2 p. 1000 d'azote. De pareilles terres ont souvent besoin d'engrais azotés solubles ou non, suivant leur structure physique. En effet, si on admet qu'une terre renferme 1 p. 1000 d'azote, que son épaisseur soit de 40 centimètres et que le centième de cet azote prenne, dans le cours d'une année, la forme nitrique, les plantes ne pourraient disposer que de 40 kilogrammes d'azote soluble, et de 80 kilogrammes si le cinquantième de cet azote organique nitrifiait. En réalité, on ne connaît que très imparfaitement la fraction de l'azote organique qui devient soluble dans le cours d'une année ; les chiffres précédents représentent à peu près les doses extrêmes. Or, la végétation active de certaines plantes, celle des céréales en particulier, est de courte durée. Un poids de 40 et même de 80 kilogrammes d'azote nitrique est souvent insuffisant pour assurer à ces plantes un développement capable de fournir de grands rendements. De plus, la plante ne prend jamais au sol la totalité de l'azote nitrique que celui-ci contient ; d'où la nécessité fréquente d'introduire des engrais azotés solubles supplémentaires, en supposant, bien entendu, que les autres éléments de fertilité existent en proportions convenables.

4^o *Terres pauvres*, contenant de 0,5 à 0,8 p. 1000 d'azote ;

5^o *Terres très pauvres*, contenant moins de 0,5 p. 1000 d'azote. Dans ces deux derniers cas, l'addition de fumier ou celle d'engrais azotés solubles, suivant la constitution physique de la terre, s'imposent d'une manière absolue.

B. ACIDE PHOSPHORIQUE. — On adopte fréquemment la



nomenclature suivante pour exprimer la richesse relative des terres en acide phosphorique.

Terres très riches, contenant plus de 2 p. 1000 ; *terres riches* contenant de 1 à 2 p. 1000 ; *terres moyennement riches*, contenant de 0,5 à 1 p. 1000 ; *terres pauvres*, contenant de 0,1 à 0,5 p. 1000 ; *terres très pauvres*, contenant moins de 0,1 p. 1000.

On peut affirmer que, si une terre contient 2 p. 1000 d'acide phosphorique, et au-dessus, les autres éléments figurant en quantités convenables, l'addition de phosphates est absolument inutile ; cette terre pouvant fournir pendant de longues années de bonnes récoltes. En effet, les besoins des plantes, même les plus exigeantes en cette substance, sont toujours inférieurs à leurs besoins en azote. Une exportation de 50 kilogrammes d'acide phosphorique par an et par hectare, du fait de la culture, constitue un chiffre élevé. Inversement, on peut affirmer qu'une terre renfermant moins de 0,7 à 0,6 p. 1000 d'acide phosphorique bénéficiera de l'emploi des engrais phosphatés.

Mais, lorsqu'il s'agit de terres renfermant de 0,8 à 1,5 p. 1000 d'acide phosphorique, il y a souvent incertitude sur l'utilité de ces engrais. C'est dans ce cas que l'usage de réactifs, tels que l'acide citrique ou l'acide acétique, sous les concentrations indiquées antérieurement, rend de réels services. On pourra formuler alors une opinion reposant sur le dosage de la fraction d'acide phosphorique que solubiliseront les réactifs précédents en observant les règles que nous avons données à cet égard : 400 à 500 kilogrammes d'acide soluble à l'hectare représentent une richesse alimentaire plus que suffisante dans la plupart des cas.

Enfin l'emploi de l'eau carbonique, si cette méthode de dosage se généralisait ; fournirait des indications encore plus précieuses.

C. POTASSE. — L'interprétation du chiffre qui indique la teneur en potasse d'une terre est plus malaisée que celle des éléments qui précèdent. Ainsi que nous l'avons déjà fait observer, cela tient à ce que les réactifs usuels, tels que les acides forts, ne dissolvent le plus souvent qu'une fraction assez faible de cet alcali. D'ailleurs, la plupart des terres qua-



lifiés de terres arables renferment de fortes doses de potasse. Le chiffre de 1 à 2 p. 1000 de potasse soluble à l'acide nitrique est souvent regardé comme représentant une richesse satisfaisante ; il suffirait alors de ne faire au sol de restitution qu'à l'aide de fumier de ferme. Au-dessous de ce chiffre, l'emploi de sels potassiques serait avantageux. Cette conclusion est, il faut en convenir, assez fragile. L'emploi de l'acide citrique, comme dans le cas du dosage de l'acide phosphorique assimilable, peut encore ici rendre service. Mais rien ne vaut, en pareil cas, l'expérimentation directe sur le sol. En effet, les besoins des plantes en potasse varient dans des limites extrêmement étendues : les plantes-racines et les tubercules sont très exigeants en cet alcali.

Conclusions : réserves à apporter dans les interprétations. —

On doit conclure de cette discussion que l'interprétation judicieuse d'un bulletin d'analyse est capable de rendre de précieux services ; les deux analyses, physique et chimique, se complètent, et l'on peut avancer que la première est, peut-être, la plus importante. Car, c'est elle qui nous indique immédiatement les améliorations foncières que nous devons faire subir au sol pour le mettre en état de nourrir telle ou telle culture ; c'est elle qui nous guide au sujet de la nature des engrais que l'on doit enfouir dans le sol et qui nous montre, parfois du premier coup, que tel sol sera toujours inapte à porter telle plante, parce que, quelle que soit sa richesse en éléments de fertilité, sa constitution physique est mauvaise et non susceptible d'être améliorée d'une manière pratique et économique. Quant à l'analyse chimique, elle possède incontestablement une réelle valeur en ce qui concerne l'estimation du taux de la chaux, de l'azote et de l'acide phosphorique.

Mais il est bon de ne pas attribuer à un bulletin d'analyse une importance trop grande. Il faut, en effet, toujours faire entrer en ligne de compte, ainsi que nous le disions plus haut, *la notion de climat*. Ce facteur, dont les termes sont si nombreux et parfois si difficiles à définir, joue, dans la question qui nous occupe, un rôle de premier ordre. Une expérimentation directe sur le sol permettra, dans un lieu déterminé, de connaître quel est le poids de récolte que peut fournir une plante



donnée. Encore est-il indispensable d'établir à cet égard une moyenne portant sur un certain nombre d'années, de manière à éliminer, autant que possible, l'influence si variable des facteurs *température* et *humidité*. Si, alors, on compare le poids de ces récoltes avec celui de récoltes obtenues dans d'autres localités, assez voisines de celle où l'on opère et dont le rendement est plus élevé, on doit en conclure qu'il manque quelque chose au sol : l'analyse comparative des terres des deux localités fournira, le plus souvent, des indications assez nettes ; et l'on sera amené à introduire dans le sol telle substance fertilisante qui fait partiellement défaut. Il arrive maintes fois que l'addition d'une pareille substance n'élève pas le taux des cendres de la plante en cette substance, mais qu'elle favorise l'absorption d'un autre élément indispensable et, par cela même, accroisse le poids de la matière sèche du végétal.

Terminons par quelques indications relatives à *l'installation des champs d'expérience*.

Une pratique, très recommandable en ce qui concerne les cultures à établir sur un sol déterminé, consiste à suivre le développement d'une plante sur une étendue restreinte de terrain. On divisera une pièce de terre en un certain nombre de parcelles, de 100 mètres carrés environ de surface. Sur chacune d'elles on sèmera la graine destinée à fournir le végétal que l'on se propose de cultiver. La première parcelle n'aura, au préalable, reçu aucun engrais ; à la seconde on distribuera de l'azote minéral sous une certaine dose ; à la troisième on donnera de l'azote organique (fumier) ; à la quatrième, de la potasse ; à la cinquième des phosphates, etc. On notera, dans chaque cas, toutes les particularités que présentera le développement de la plante, ainsi que l'époque de sa floraison et de sa maturation. La comparaison du poids des récoltes permettra de se rendre compte de la nature de l'élément fertilisant qui fera défaut, et, par conséquent, de celui qu'il convient d'ajouter dans la région où l'on opère. C'est là ce que l'on pourrait appeler *l'analyse rationnelle du sol par la plante*. Il est évident que de semblables essais n'ont de valeur que vis-à-vis d'un végétal déterminé. Parfois il sera nécessaire d'introduire dans le sol, non pas une, mais deux matières fertilisantes.

Dans le cas où les récoltes des différentes parcelles seraient également médiocres, il faudrait en conclure que la constitution physique du sol est mauvaise, du moins en ce qui regarde la plante choisie, et que ce sol ne peut se prêter à sa culture que sous la condition d'une amélioration foncière.

Il va sans dire que ce procédé d'analyse culturale n'exclut pas l'exécution préalable des analyses physique et chimique du sol. Il arrivera fréquemment qu'une analyse chimique bien conduite indiquera, d'avance et sans ambiguïté, la nature et la forme sous lesquelles il conviendra d'introduire dans ce sol tel élément de fertilité.



CHAPITRE XI

PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES DU SOL

Généralités sur les êtres vivants qui habitent le sol. — Présence et rôle des microorganismes dans le sol. — Distribution des microbes dans le sol. — Oxydations produites par voie chimique et par voie microbienne. — Phénomènes de combustion qui portent sur le carbone et l'hydrogène. — Phénomènes d'hydrolyse de la matière azotée complexe, production d'ammoniaque. — Phénomènes de fixation de l'azote gazeux ; applications pratiques. — Phénomènes d'oxydation qui transforment l'ammoniaque en acides nitreux et nitrique : nitrification. Historique ; travaux de Boussingault. — Conditions de la nitrification ; la nitrification est corrélative de la présence d'un être vivant ; travaux de Schloesing et Müntz ; travaux de Winogradsky. — Nutrition carbonée des microbes nitrificateurs. — Nitrification intensive. — Phénomènes de réduction des nitrates et de certaines substances azotées. — Auximones. — Poisons du sol.

I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ÊTRES VIVANTS QUI HABITENT LE SOL

Présence et rôle des microbes dans le sol. — On peut dire que la terre végétale est le réservoir commun de presque tous les microorganismes connus. Les uns croissent et prospèrent avec facilité dans ce milieu parce que celui-ci contient tels aliments appropriés à leur développement ; les autres y demeurent à l'état latent, à l'état de vie ralentie, parce que



la composition des aliments qu'ils y trouvent ou celle de l'atmosphère ambiante ne leur conviennent pas ou leur conviennent mal. Lorsque ces deux facteurs éprouvent un changement dans un sens favorable à l'évolution de ces microorganismes, on les voit alors pulluler.

Parmi l'infinie variété des êtres microscopiques qui peuplent le sol, il en est un grand nombre qui présentent un intérêt de premier ordre pour l'agriculture.

En étudiant les phénomènes de combustion de la matière organique dans le sol qui aboutissent à la formation ultime du gaz carbonique et de l'eau (tome 1, p. 318), nous avons fait remarquer que ces combustions peuvent, sans doute, s'exercer par le jeu de réactions purement chimiques, ainsi que la chose a lieu, par exemple, dans l'oxydation à l'air de l'oxyde ferreux ou de l'acide oxalique en dissolution. Ces réactions, purement chimiques, sont faciles à réaliser en stérilisant une masse de terre, soit par la chaleur, soit par contact avec des antiseptiques appropriés. Wollny a montré, dans une série très intéressante de recherches, quelle était l'influence comparée de divers antiseptiques sur le dégagement du gaz carbonique produit par des terres riches en humus, chauffées à 30°, avec ou sans antiseptiques. Une dose de thymol égale à 1 p. 100 du poids de la terre a, dans une des expériences, réduit à 1/13 le dégagement du gaz carbonique ; une dose de 0,18 p. 100 de chlorure mercurique, à 1/20 ; enfin, l'application d'une température de 115° a réduit ce dégagement à 1/85 environ. Ce processus d'oxydation, dû au seul jeu des forces chimiques, est donc extrêmement lent, et la matière organique du sol subsisterait presque indéfiniment et s'accumulerait en quantités considérables si certaines catégories de microorganismes n'intervenaient pas d'une façon active pour porter l'oxygène sur le carbone et l'hydrogène des substances ayant appartenu au monde organisé.

Les microorganismes du sol sont donc les agents les plus énergiques de destruction de la matière carbonée et azotée ; leur rôle consiste à séparer d'abord les uns des autres les noyaux complexes de cette matière, et à attaquer ensuite les groupements plus simples. Les termes ultimes de ces transformations sont l'eau, le gaz carbonique,



l'ammoniaque, l'acide nitrique, l'azote. Le concours des microorganismes du sol n'est cependant pas indispensable aux plantes. Un végétal quelconque, supérieur ou inférieur, peut se développer dans une solution nutritive stérile ou même dans une masse solide privée de microorganismes.

Nous allons, dans ce qui va suivre, nous limiter strictement aux interventions microbiennes qui sont de quelque utilité pour l'agriculture, en laissant de côté ce qui a trait à la biologie proprement dite des infiniment petits auxquels sont imputables les phénomènes qu'il nous reste à décrire.

Microbes aérobie et anaérobies. — A un point de vue élémentaire, le sol est le théâtre de deux sortes d'actions microbiennes.

Aux organismes aérobie, il appartient d'être des agents purement oxydants, essentiellement bienfaisants, puisqu'ils fournissent aux végétaux, d'une manière directe ou non, les matières premières de leurs aliments : acide carbonique, eau, acide nitrique. Quelques-uns fixent simplement de l'eau sur telle substance organique (urée, par exemple).

Aux organismes anaérobies est dévolu un autre rôle : ceux-ci se développent au sein d'une atmosphère peu ou pas oxygénée ; ils s'attaquent à certaines substances organiques qu'ils dédoublent avec formation d'un produit plus simple que le produit initial et plus riche en hydrogène que lui ; en même temps se dégagent des gaz, parmi lesquels l'acide carbonique s'observe d'une façon constante. L'hydrogène ou le méthane accompagnent souvent ce dernier ; dans certains cas, on voit également apparaître l'azote et l'oxyde azoteux. Mais il est essentiel de remarquer que le dégagement de gaz carbonique que provoquent, en l'absence de l'oxygène, les organismes anaérobies travaillant au contact de certaines substances, n'est pas une propriété générale de la cellule. Ce dégagement ne dépend que de la *nature* des aliments dont cette cellule dispose.

Les phénomènes qui sont la conséquence de la vie microbienne sont compris sous la désignation générale de *phénomènes de fermentation* : le microbe agit par les *sécrétions diastatiques* qu'il élabore.

Un certain nombre d'espèces anaérobies habitent le sol ; elles y jouent, ainsi que nous le dirons dans la suite, un rôle



parfois néfaste, lorsque, par suite de circonstances temporaires ou définitives, elles trouvent des conditions favorables à leur existence.

Certaines fermentations dont profite l'agriculture, telle que la fermentation du fumier de ferme, sont le siège de deux phénomènes à la fois. Si la fermentation anaérobie modifie la masse organique dans un sens favorable à la simplification de la matière complexe initiale, elle est parfois l'origine d'une perte d'azote à l'état gazeux assez difficile à expliquer et dont la cause paraît obscure.

L'influence du milieu est capitale lorsqu'il s'agit de fermentations. Non seulement la présence ou l'absence de l'oxygène favorisent, entravent ou annulent le développement de certaines espèces, mais l'alcalinité ou l'acidité de ce milieu règlent l'intensité des transformations chimiques dans un sens déterminé, en permettant ou en empêchant l'évolution de telle classe d'infiniment petits. C'est ainsi que l'humus des tourbières persiste et s'accumule, même au contact de l'oxygène de l'air, parce que les seules espèces microbiennes qui peuvent s'adapter à un milieu acide ont un pouvoir oxydant très faible. Le microbe nitrique y demeure inerte. Si on modifie la réaction de la masse acide par addition d'une base (chaux, calcaire), certains microbes aérobies, jusque là incapables d'agir dans un pareil milieu, prennent le dessus et détruisent alors avec facilité la matière organique. Le ferment nitrique, aidé dans son travail par d'autres espèces aérobies, porte alors l'oxygène sur l'ammoniaque avec production d'acide nitrique.

Il faut également ajouter que, si tel microorganisme ne se développe que dans un milieu acide, et tel autre dans un milieu alcalin, *la question de concentration de l'acide ou de l'alcali* joue un rôle très important; un excès de l'un ou de l'autre pouvant compromettre ou anéantir l'existence du microbe, parfois même modifier ses propriétés physiologiques. Cependant certaines bactéries sont indifférentes à la réaction du milieu.

La présence ou l'absence d'oxygène produisent fréquemment, chez certains microorganismes, des modifications profondes dans leurs propriétés biologiques et morphologiques: on sait que la levure de bière, par exemple, immergée dans un liquide sucré, à l'abri de l'air, transfor-



me le sucre en alcool et acide carbonique, mais que sa prolifération est ralentie. Si la levure n'est pas immergée, si elle vit en surface, elle prolifère en détruisant le sucre : elle donne encore naissance à du gaz carbonique, mais elle ne fournit que de faibles quantités d'alcool.

Le changement de réaction du milieu, s'il est graduel, peut faire perdre à certains microorganismes la faculté de se développer sur la substratum où ils vivaient habituellement ; les actions chimiques dont ils sont les agents diffèrent notablement dans les deux cas.

L'activité bactérienne du sol dépend de la grosseur des particules terreuses, de la teneur en eau et de la concentration des solutions (Rahn) (1913). D'après Fulmer (1918), le carbonate de magnésium joue un rôle plus important que le carbonate de calcium dans le développement des bactéries du sol.

Notons enfin que, s'il y a des microbes aérobies et anaérobies *obligatoires ou stricts*, il existe de nombreux microorganismes qui présentent, suivant les conditions de milieu, une aérobose ou une anaérobose *facultatives*.

Parmi les agents extérieurs capables d'influencer le développement des êtres microscopiques, il faut citer : 1° *la lumière*, dont l'action est très complexe, et qui détruit une foule de microorganismes en présence de l'oxygène ; 2° *la chaleur* : nous nous bornerons à dire, à propos de ce facteur, que, en règle générale, la multiplication des microorganismes ne commence qu'à une certaine température, supérieure à 0°, bien que certaines espèces puissent se développer au-dessous de ce point. La multiplication s'accélère avec l'élévation de la température et atteint un maximum, puis elle décroît jusqu'à la mort du microorganisme. La température qui provoque l'anéantissement de la vitalité varie beaucoup avec l'espèce. Il y a probablement dans le sol des microbes qui peuvent résister à une température de 100°, au moins pendant quelques minutes ; d'où la difficulté que l'on rencontre si on veut stériliser une masse de terre un peu notable. Beaucoup de microbes du sol peuvent subir l'action de températures extrêmement basses, inférieures à — 100°, et même davantage, sans cesser d'exister : leur vie est alors suspendue.

Certains auteurs estiment qu'il existe un groupe spécial de bactéries adaptées aux basses températures ; d'après Brown et Smith (1912), les sols gelés possèdent un pouvoir ammonisant bien plus grand que celui des sols non gelés.

La température optimum d'activité de la plupart des espèces microbiennes habitant la terre arable est comprise entre 30 et 40°.

En principe, d'après Russell et Appleyard (1917), il y aurait concordance entre la marche du nombre des bactéries, le dégagement de gaz carbonique et le taux d'acide nitrique. Les processus biochimiques dépendent, en premier lieu, de la température ; l'humidité joue également un rôle très important.

dans le phénomène qui régit l'intensité de la décomposition des matières organiques : l'oxygène en dissolution dans l'eau de la pluie en serait le facteur déterminant.

Distribution des microbes dans le sol. — Etant donnée l'importance du rôle que jouent dans le sol les microorganismes, il est indispensable de connaître, approximativement au moins, leur position dans les différentes couches terreuses, et même leur nombre approché dans un volume donné de terre.

Voici, à cet égard, quelques renseignements fournis par Duclaux. Les microorganismes se comportent comme des colloïdes ; ils adhèrent



Fig. 1.

facilement aux substances solides qui les entourent. Conformément à l'observation, les couches supérieures du sol seront donc les plus chargées d'infinitement petits, de même que ces couches sont les plus chargées de matières organiques en général. Si on examine la *distribution qualitative* des êtres microscopiques dans le sol, on remarque que les couches superficielles renferment toujours la matière organique la plus colloïdale, la plus voisine de l'état qu'elle affectait lorsqu'elle faisait partie des êtres vivants (plantes ou animaux), et, par conséquent, la moins diffusible. Cette matière superficielle est peuplée des microbes qui doivent la transformer, et dont les conditions d'alimentation présentent le plus d'exigences. On peut attribuer à ce groupe de microorganismes une distribution figurée par la courbe AA' (sur l'axe Ox on porte des longueurs proportionnelles au nombre des microbes ; l'axe Oy indique la profondeur du sol). Cette courbe ne sera pas forcément régulière ; ses irrégularités seront imputables à des changements dans la constitution du sol (fig. 1).

Quant aux êtres microscopiques qui utilisent pour leur nourriture les résidus organiques que les microbes de la surface ont détachés des molécules initiales complexes, ceux-là se trouvent à une plus grande profondeur. En effet, ces résidus organiques sont plus diffusibles que les noyaux primitifs ; ils s'enfonceront donc dans le sol, et c'est précisément à l'endroit où ils pénètrent que se rencontreront les microbes de la seconde catégorie dont la distribution peut être figurée par la courbe BB'.

On comprend facilement les difficultés presque insurmon-

tables que présentent la recherche du nombre des microorganismes du sol et leur isolement. Chacun d'eux a son aliment préféré ; les uns sont des aérobies et les autres des anaérobies. On ne peut donc arriver à ce sujet qu'à des résultats fort incomplets. Voici cependant quelques indications très sommaires sur ce point spécial.

Koch, puis Fraenkel (1887) ont montré que le nombre des infiniment petits qui peuplent la terre décroît à mesure que l'on s'enfonce davantage dans le sol. Cette décroissance n'est pas toujours absolument régulière. Il peut arriver que, à un mètre de profondeur, on n'observe plus de microorganismes dans un sol qui n'a pas été remué. Parfois on les trouve à des profondeurs assez grandes : Fraenkel, dans un sol des environs de Potsdam, en a rencontré jusqu'à 4 mètres. Suivant l'époque de l'année, telle couche, stérile à un moment donné, peut contenir quelques mois plus tard des microorganismes. Le nombre de ceux-ci est extrêmement variable à la surface du sol, là où ils pullulent de préférence. Fraenkel, dans le sol dont il vient d'être question, en a compté par centimètre cube, 150.000 le 27 mai 1886, 300.000 le 24 août, 130.000 le 2 octobre, 55.000 le 3 novembre. Dans ces chiffres ne sont pas compris les microbes nitrificateurs dont le mode de culture était encore ignoré à l'époque des expériences de Fraenkel.

En fait, le nombre des microorganismes que contient le sol varie dans des proportions considérables ; il n'est pas rare de trouver à la surface de terres cultivées plusieurs millions de germes dans 1 gramme de terre. Une conséquence importante découle de la présence de cette flore microbienne. L'intensité respiratoire des microorganismes est énorme ; elle varie avec la capacité du sol pour l'air et l'eau, le nombre des êtres vivants, leur degré de vitalité, la nature des substances organiques auxquelles ils s'attaquent, la quantité et la nature des fumures organiques, la nature des plantes cultivées. Le travail mécanique du sol entre également en jeu.

Stoklasa (1911) a fourni à ce sujet des comparaisons très intéressantes. Cet auteur a trouvé les chiffres suivants relativement : 1° au nombre de microorganismes contenus dans 1 gramme de terre à diverses profondeurs ; 2° à la quantité de gaz carbonique dégagé par un kilogramme de terre à 25 p. 100 d'eau (échantillons pris au même niveau) ; la terre était balayée pendant vingt-quatre heures par un courant d'air pur à 20°.

(α = terre de prairie non travaillée et non fumée ; β = cette même



terre, travaillée depuis deux ans, fumée aux engrais chimiques et plantée en trèfle l'année de l'expérience ; γ = cette même terre, travaillée tous les ans, fumée au fumier de ferme et aux engrais chimiques, plantée en betteraves l'année de l'expérience).

Profondeur à laquelle ont été prélevés les échantillons de terre.	Nombre de microorganismes dans 1 gramme de terre.			Poids de CO ² dégagé par kilog. de terre en 24 heures (en milligrammes).		
	α	β	γ	α	β	γ
10 à 20 centim.	230.000	1.800.000	4.700.000	16,5	38,6	47,5
20 à 30 —	256.000	2.350.000	3.529.000	19,4	38,8	49,7
30 à 50 —	208.000	1.600.000	2.100.000	9,8	20,2	28,5
50 à 80 —	14.000	540.000	184.000	3,3	6,3	6,6
80 à 100 —	5.000	72.000	95.000	2,1	2,7	2,3

On voit par les chiffres de ce tableau que l'intensité respiratoire des microorganismes est en rapport avec leur nombre.

Il est bon de faire remarquer que la rareté des microorganismes ou leur absence, dans les couches profondes, peuvent souvent n'être qu'apparentes ; certaines couches du sol ne semblent stériles que parce que les microbes qui la peuplent refusent de se développer sur les substratums qu'on leur offre. Cependant, il est possible aussi que la stérilité des couches profondes soit réelle, puisque le sol agit comme un filtre ; de plus, la question de température entre probablement en jeu : certaines espèces se développent mal, ou même pas du tout, quand la température s'abaisse au-dessous d'une certaine limite.

Le microbe nitrique, un de ceux qui nous intéressent le plus, a été rencontré par Warington jusqu'à une profondeur de 46 centimètres et même, dans une observation, jusqu'à 91 centimètres. Cet auteur ; dans une série de recherches ultérieures (1887), en a découvert à 1 m. 50 et 1 m. 80. Bien que le microbe nitrique vivo d'une façon très particulière et que son alimentation carbonée soit purement minérale, ainsi que nous le verrons plus loin, il pullule surtout à la surface du sol ; d'abord parce qu'il est aérobie, et, en outre, parce qu'il trouve en cet endroit une plus grande abondance de substances azotées. Cependant le sol acide de certaines prairies, celui de beaucoup de forêts, celui des tourbières, ne renferment pas de microbes nitriques ou, tout au moins, ceux-ci y sont-ils très peu abondants.

Au point de vue des espèces rencontrées dans le sol arable, on peut dire, d'une façon générale, que le nombre des bactéries l'emporte sur celui des mucédinées. Celles-ci, au contraire, dominent exclusivement dans les terres acides, là où le microbe nitrique ne se développe pas. Inversement les bactéries y sont rares.

En dehors des microbes proprement dits, on rencontre dans le sol



de très nombreux protozoaires dont l'action, probablement néfaste dans bien des cas, s'exercera vis-à-vis des bactéries fixatrices d'azote ainsi que nous l'établirons en parlant des *poisons du sol*. D'après Scherinnann (1918), des types très variés de sol contiennent en moyenne, par gramme, 10.000 protozoaires, dont 1000 pour les ciliés et les amibes, le reste pour les flagellés.

Oxydations produites simultanément par voie chimique et par voie microbienne. — Avant d'entrer dans la description des phénomènes biochimiques qui dépendent de l'action des microorganismes, il convient d'éclaircir le point suivant.

Nous avons dit que les phénomènes de combustion qui sont la source du gaz carbonique contenu dans le sol avaient, en réalité, une origine double. *La combustion d'ordre purement chimique* est très peu active, mais il est probable *a priori* qu'elle doit croître avec la température. *La combustion d'ordre microbien* est incomparablement plus intense; cette combustion s'accélère également quand la température monte. Mais il est évident que, au delà d'une certaine élévation de température, ce phénomène vivant doit se ralentir pour cesser tout à fait quand cette élévation devient incompatible avec la vie microbienne.

Dehérain et Demoussy (1896) ont essayé de définir la part qui revient à ces deux ordres de combustion. Voici quelques-uns des résultats auxquels sont arrivés ces auteurs.

Lorsqu'on chauffe à 120°, pendant une heure, dans des tubes de faible volume (50 centimètres cubes environ), 25 grammes de terre franche et 5 grammes d'eau, on fait périr tous les êtres vivants. L'analyse des gaz, effectuée après ce chauffage, montre que le volume d'acide carbonique qui a pris naissance est supérieur à celui de l'oxygène initial inclus dans le tube : il y a donc eu *oxydation de la matière organique de la terre et dédoublement simultané d'une certaine quantité de cette matière* : ce dédoublement ayant fourni l'excès du gaz carbonique constaté. Mais cette modification est, en somme, peu profonde : elle porte seulement, dans une des expériences, sur 1,2 p. 100 du carbone total de l'échantillon de terre.

Si, après avoir extrait les gaz du tube, on y réintroduit de l'air et que l'on recommence plusieurs fois l'opération du chauffage, suivie d'une évacuation et d'une analyse des gaz, on remarque que l'oxydation se poursuit, mais qu'elle décroît en intensité à mesure que les opérations se multiplient. Il n'y a donc qu'une faible fraction de la matière organique qui, sous l'influence de la chaleur, se détruit assez faci-



lement : le reste est beaucoup moins oxydable. Cette altération de l'humus comporte, en fait, trois phases concomitantes : 1^o la majeure partie de l'oxygène libre brûle une portion du carbone de la terre en fournissant du gaz carbonique ; 2^o une petite fraction de la matière carbonée donne, par dédoublement, un certain dégagement d'acide carbonique ; 3^o il y a fixation du restant de l'oxygène libre sur les matières hydrocarbonées avec formation d'eau.

Quelle est maintenant l'intensité du phénomène comburant à la température ordinaire, mais en l'absence de microorganismes ? Pour la déterminer, les auteurs emploient un tube de verre, fermé à l'une de ses extrémités, et portant au voisinage de l'autre un renflement. Après avoir disposé dans ce tube la terre humide, on loge dans le renflement une bourre de coton et on scelle le tube que l'on chauffe à 120°. On extrait ensuite les gaz formés et on laisse rentrer de l'air, lequel se filtre sur la bourre et ne risque pas d'ensemencer le contenu du tube. On abandonne celui-ci à la température ordinaire pendant quelques jours, puis on analyse les gaz demeurés au contact de la terre. L'oxydation s'est poursuivie, mais la dose de gaz carbonique obtenue n'est guère que le dixième de celle que fournissait le chauffage à 120°. Si on répète la même expérience (à la température ordinaire), mais sur de la terre non chauffée, on aura la résultante des deux actions chimique et microbienne.

La quantité de carbone qui s'oxyde varie beaucoup avec l'état physique de la terre, suivant qu'elle est étalée en couche mince dans le tube, suivant qu'elle est comprimée par des secousses répétées, suivant qu'elle est mélangée avec de l'eau et pétrie en boulettes pour imiter la structure en mottes compactes, suivant qu'elle est tassée en la faisant traverser par une grande quantité d'eau attirée par une trompe. Voici le tableau d'une expérience qui montre la variabilité du degré d'oxydation dans les diverses conditions énumérées (50 grammes de terre et 10 grammes d'eau dans des tubes de 100 centimètres cubes de capacité) :

	Durée de l'expérience en jours	CO ² dégagé (enme.)
Terre étalée	4	16,03
—	3	11,7
Terre comprimée par secousses	3	12,9
Terro en boulettes	4	5,9
—	8	12,9
Terre tassée par écoulement d'eau ..	4	2,1
— ..	.8	3,7

L'oxydation est donc beaucoup plus énergique lorsque l'air pénètre aisément la masse. A la température ordinaire, comme à 120°, cette



oxydation décroît sans cesse. Dehérain et Demoussy se sont assurés du fait en enlevant chaque fois le gaz après quatre jours de contact à 22°, et le remplaçant par de l'air. Au bout de trente-cinq jours, 50 grammes d'une terre de jardin à 20 p. 100 d'eau n'avaient fourni que 58 cc. 3 de gaz carbonique.

Remarquons que la proportion d'humidité la plus favorable à l'oxydation, quelle que soit la cause de celle-ci, varie d'une terre à l'autre ; dans les diverses terres examinées ici, elle a varié de 17 à 25 p. 100.

Ainsi que nous l'avons déjà constaté bien des fois, l'oxydation de l'humus est donc imputable à une action chimique, toujours faible à la température ordinaire, et à une action microbienne beaucoup plus intense. Mais, dans les deux cas, l'élévation de la température accélère le phénomène.

Il y a lieu de chercher maintenant jusqu'à quelle température les microorganismes sont capables de brûler le carbone. A la température où ils seront détruits, la proportion de gaz carbonique, qui croissait jusque-là, doit subir une diminution suffisante pour qu'il soit possible de faire la part de chacune des deux actions aux températures où elles entrent en jeu l'une et l'autre.

A cet effet, un certain nombre de tubes, disposés comme plus haut, sont remplis de terre de jardin riche en humus : un des tubes est laissé à la température ordinaire (22°), un autre est chauffé à 44°, un autre à 55°, etc. La courbe ci-jointe (fig. 2) montre que, pour une terre de jardin, le dégagement du gaz carbonique s'est fortement accru à partir d'une température voisine de 45°. A 65°, le dégagement a atteint son maximum. On peut affirmer qu'à cette température l'activité microbienne s'exerçait encore, car il existe des ferments qui, dans le fumier par exemple, peuvent vivre jusqu'à 75°. Au-delà de 65°, il y a diminution brusque du dégagement gazeux ; puis, vers 80°, ce dégagement reprend et il devient considérable à 110°. Par conséquent, le dégagement du gaz carbonique résultant de la combustion de l'humus augmente progressivement jusqu'à une température compatible avec la vie (65° à 70° environ) ; la diminution du dégagement gazeux, au delà de cette température, indique nette-

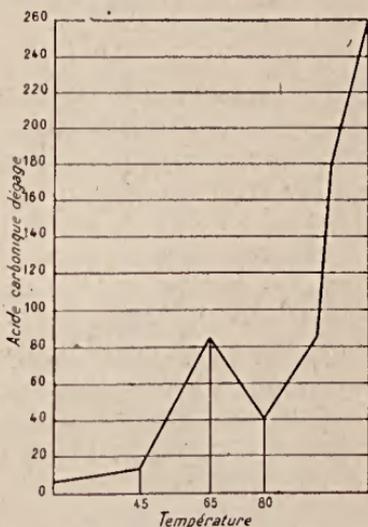


Fig. 2.



ment que la vitalité des ferments est abolie et que la seule action chimique entre alors en jeu.

Nous avons exposé antérieurement tome I, p. 294, la théorie de Mailard sur la genèse des matières humiques naturelles en partant des sucres et des aminoacides. D'après ce même auteur, les dégagements de gaz carbonique, croissant avec la température, observés par Dehérain et Demoussy dans les expériences précédentes, s'expliqueraient de la façon suivante. La formation des matières humiques aux dépens des amino-acides s'accompagne toujours de l'élimination du gaz carbonique : celui-ci proviendrait de la rupture de carboxyles CO_2H qui émaneraient, en particulier, d'acides aminés, ou de polypeptides achevant de se transformer en corps humiques.

Ordre à suivre dans l'étude des phénomènes biologiques du sol. — Nous allons maintenant passer en revue les principaux phénomènes qui, dans le sol, sont sous la dépendance de l'activité des microorganismes.

Au point de vue du bénéfice que peut en retirer la plante, laquelle exige, pour se nourrir, la présence dans le sol de composés très simples, on peut classer les phénomènes microbiologiques en cinq catégories :

1° Phénomènes de combustion et de dédoublement des substances non azotées : combustions complètes ou incomplètes ; fermentations, production de substances ternaires peu compliquées s'accompagnant d'un dégagement de gaz carbonique, d'hydrogène, de méthane ; 2° phénomènes d'hydrolyse de la matière azotée complexe avec production d'ammoniac ; 4° phénomènes d'oxydation transformant l'ammoniac en acides nitreux et nitrique ; 5° phénomènes de réduction des nitrates.

Cette dernière catégorie de réactions biologiques détache de la molécule azotée une certaine quantité d'azote qui, reprenant l'état gazeux, semble perdue pour la nutrition de la très grande majorité des végétaux. Mais l'équilibre se retrouve, par suite de l'entrée en jeu des microorganismes fixateurs d'azote libre.

Nous ne nous arrêterons pas ici, sauf dans quelques cas spéciaux, sur la morphologie et la physiologie des microorganismes du sol ; ce sujet ayant été traité, avec toute l'autorité nécessaire, dans un volume de cette Encyclo-



pédie (1). Nous n'envisagerons les résultats obtenus qu'au seul point de vue chimique.

1

PHÉNOMÈNES DE COMBUSTION ET DE DÉDOUBLEMENT QUI PORTENT SUR LE CARBONE ET L'HYDROGÈNE

Oxydation des matières ternaires et alimentation des micro-organismes. — Lorsque certains organes de la plante, tels que les feuilles, tombent à l'automne sur le sol, ainsi qu'il arrive chez la plupart des végétaux vivaces, ou lorsque la plante totale meurt sur place (plantes annuelles), les tissus organisés deviennent rapidement la proie d'un nombre considérable d'êtres microscopiques. Il en est de même des fumures organiques, et du fumier de ferme en particulier, qui apporte avec lui, au moment de son enfouissement, une infinité d'espèces microscopiques. L'éremacausis, c'est-à-dire la disparition lente du carbone à l'état de gaz carbonique, de l'hydrogène à l'état d'eau et de l'azote à l'état d'ammoniaque est un phénomène essentiellement microbien. Les éléments incombustibles de la plante qui faisaient partie, dans les tissus vivants, de combinaisons organiques plus ou moins complexes, reprennent l'état minéral. Mais cette disparition intégrale de la trame organique se fait toujours par stades successifs, et la formation de la matière, si difficile à définir au point de vue chimique, que nous avons appelée l'*humus*, est précisément l'un des termes de passage entre la plante qui a cessé de vivre et la gazéification totale de ses éléments combustibles. L'*humification* est le résultat de l'activité d'un grand nombre de mucorinées et de microbes aérobies habitant le sol. Elle est favorisée, comme nous l'avons dit plus haut, par une élévation de la température, par un certain degré d'humidité et par la réaction du milieu, puisque l'*humus acide*, peuplé d'êtres mi-

(1) *Microbiologie agricole*, par E. Kayser, 4^e édition. Paris, 1921.



croscopiques différents de ceux que l'on rencontre dans les sols arables ordinaires plus ou moins calcaires, résiste pendant très longtemps à l'oxydation.

Mucorinées et bactéries trouvent un milieu convenable à leur alimentation dans l'humus. C'est avec le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote contenus dans cet humus qu'elles fabriquent les éléments ternaires et quaternaires de leur propre organisme. Il est impossible, à l'heure actuelle, de définir la ou les matières qui, dans ce complexe, constituent l'aliment préféré de telles ou telles espèces microscopiques : il est certain que la plupart de ces espèces peuvent être cultivées sur les milieux artificiels que nous utilisons dans les laboratoires et dont la composition, relativement simple, diffère beaucoup de celle du milieu humique.

Quoi qu'il en soit, les infiniment petits rencontrent dans la matière organique du sol, d'une part les substances avec lesquelles ils édifient leurs tissus et, d'autre part, l'énergie nécessaire à l'entretien de leur existence. Par suite des phénomènes de désassimilation dont ces êtres sont le siège, ils restituent au milieu ambiant de l'acide carbonique, de l'eau, de l'ammoniaque, de l'azote : cette désassimilation est pour eux, comme pour les êtres supérieurs, source de chaleur et d'énergie.

Les anaérobies concourent également à la simplification de la matière organique, mais les transformations qu'ils lui font subir aboutissent à des termes moins condensés, renfermant encore une certaine dose d'énergie ; tels sont, parmi les corps les plus communs et les moins compliqués, les acides butyrique, lactique, acétique, etc. Les phénomènes anaérobies de la putréfaction proprement dite engendrent de nombreux acides aminés. Parmi les gaz qui se dégagent, on trouve encore l'acide carbonique, mélangé le plus souvent d'hydrogène, de méthane et d'acide sulfhydrique. Il appartient aux organismes aérobies de détruire ultérieurement, d'une façon complète, ces substances acides ternaires ou quaternaires, et de les faire rentrer par oxydation dans le monde minéral sous forme d'eau, de gaz carbonique, d'azote ou d'ammoniaque.

Dans le sol, microbes aérobies ou anaérobies travaillent d'une manière concomitante : on observe même fréquemment une sorte de *symbiose* entre eux : les premiers, en soutirant l'oxygène de l'atmosphère ambiante, protègent ainsi le développement des seconds. Toutefois, lorsque, par suite de circonstances accidentelles, les espèces anaérobies dominent, l'atmosphère interne du sol est temporairement ou définitivement privée d'oxygène, et la respiration des racines ne pouvant plus s'exercer, la plante meurt asphyxiée.

Il ne faut pas oublier que beaucoup d'espèces microbiennes dites anaérobies, sont *anaérobies facultatives*, c'est-à-dire peuvent, à un moment donné, vivre comme les aérobies au contact de l'oxygène de



l'air : c'est seulement la *nature de l'aliment* qui entre ici en jeu, ainsi que nous l'avons déjà remarqué plus haut.

Donc, c'est par l'intervention des microorganismes que la matière végétale reprend l'état minéral, et c'est presque exclusivement aux combustions microbiennes qu'il faut attribuer la présence, dans l'atmosphère des sols, d'une dose plus ou moins grande de gaz carbonique (tome 1, p. 318).

Les espèces microscopiques les plus communes du sol qui produisent ces phénomènes de destruction sont des *hyphomycètes* ou *champignons*, des *levures* et des *bactéries*.

Les *hyphomycètes* comprennent principalement les genres *Mucor* (surtout *M. mucedo*), *Aspergillus*, *Penicillium*; les levures, le genre *Torula*. Les bactéries sont infiniment plus variées. Citons parmi les plus communes : *Micrococcus ureæ*, *Bacillus butyricus* (*Amylobacter*), *B. subtilis*, *B. mycoides*, *B. prodigiosus*, *B. mesentericus vulgatus*, *B. denitrificans*, *Bacterium coli commune*, *B. termo*, *Baeterium vulgare* (*Proteus*), bactéries de la nitrification, etc.

A propos des phénomènes biologiques, que nous décrivons dans la suite, nous rappellerons le nom des agents qui les provoquent.

Produits de transformation des matières ternaires. —

Parmi les matières non azotées rencontrées dans le sol, et dont l'origine doit être imputée en grande partie à la présence des microorganismes, le gaz carbonique occupe certainement la première place au point de vue de l'importance. Il est inutile de revenir sur les variations de ce gaz dans l'atmosphère interne des sols; nous les avons étudiées antérieurement. Sa présence est constante: il est, en effet, le produit de la respiration directe de tous les aérobies qui habitent la terre; quant aux anaérobies ils émettent ce gaz par dédoublement de certaines matières ternaires avec dégagement simultané d'hydrogène ou de méthane.

Remarquons ici que l'on peut observer parfois une production notable de gaz carbonique, indépendante de la vie microbienne: c'est ce qui a lieu lorsque l'humus acide se trouve au contact du calcaire, même à 0° (Suchting, 1909). La respiration



des racines engendre également de fortes proportions de ce gaz.

Parmi les autres substances non azotées rencontrées dans le sol, dont l'origine doit être cherchée dans l'activité des microorganismes, il faut citer les acides formique, acétique, propionique, butyrique, ainsi que l'alcool (Müntz, 1884).

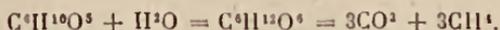
La présence de *ferments butyriques* dans la terre arable peut être facilement mise en évidence à l'aide de l'expérience suivante, due à Déhéraïn et Maquenne (1884). Dans un ballon de deux litres, on introduit 60 grammes de terre de jardin, 60 grammes de sucre, 30 grammes de carbonate de calcium et des traces de phosphate d'ammonium. On remplit complètement le ballon avec de l'eau, on le munit d'un tube à dégagement, et on le chauffe vers 35°. Au bout d'une quinzaine d'heures, des bulles gazeuses se dégagent ; puis après deux ou trois jours, la fermentation se ralentit. Elle reprend si on ajoute de nouveau une certaine quantité de calcaire afin de saturer l'acide qui a pris naissance. Les gaz qui se dégagent consistent en acide carbonique et hydrogène ; le produit fixe nouveau est l'acide butyrique que le calcaire neutralise au fur et à mesure de sa formation. D'après les auteurs précités, il est probable que le ferment butyrique proprement dit est ici en moindre proportion que le *B. amylobacter*.

Kröber (1909) a obtenu à la fois de l'acide acétique et de l'acide butyrique en ensemençant une solution de sucre avec un mélange de bactéries du sol.

Cette formation d'acides dans le sol peut être regardée comme une cause secondaire de dégagement du gaz carbonique, par suite de la neutralisation de ces acides par le carbonate de calcium. *Les acides en question sont des dissolvants énergiques des phosphates*. Tant qu'ils persistent à l'état de sels, ils peuvent également concourir à la nutrition d'organismes aérobies qui, après les avoir assimilés, les détruisent par combustion totale en fournissant de l'eau et de l'acide carbonique.

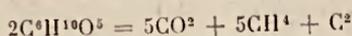
Destruction de la cellulose. — La fermentation de la cellulose est, pratiquement, l'une des plus importantes. Cet hydrate de carbone est détruit le plus souvent par des espèces anaérobies. Deux réactions se produisent alors : dans la première, il y a fixation d'une molécule d'eau sur la cellulose ; dans la seconde, l'hydrate de carbone soluble qui a pris ainsi naissance (glucose ?) est transformé en un mélange de gaz carbonique et de méthane.

L'équation, toute théorique d'ailleurs, de cette fermentation serait la suivante :



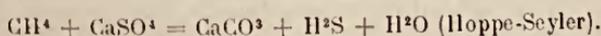
Une semblable fermentation devrait avoir lieu continuellement dans le sol où les débris celluloseux des végétaux abondent. Mais, normalement, la terre arable contient beaucoup d'oxygène et ne constitue un milieu réducteur que dans des cas exceptionnels. De plus, on ne trouve, parmi les gaz *normaux* du sol, ni méthane, ni hydrogène. De sorte que, si cette fermentation celluloseuse s'exerce dans le sol, elle doit être très lente; la cellulose subissant d'abord une humification qui la rend beaucoup plus résistante.

Les bactéries qui attaquent la cellulose sont très communes dans le sol. Il semblerait cependant que les hyphomycètes jouent ici un rôle plus important que les bactéries dans les phénomènes de désagrégation: celle-ci se produirait aérobiquement par l'intermédiaire d'une diastase, la *cytase*. On a parfois admis que la fermentation de la cellulose se faisait dans le sens suivant :

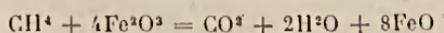


En réalité, le carbone ne serait pas mis en liberté à l'état de corps simple, mais les molécules celluloseuses restantes s'enrichiraient en carbone, et l'on pourrait ainsi se rendre compte du mécanisme de la formation de la matière humique par fixation de carbone sur les substances ternaires végétales avec élimination d'eau.

Pour expliquer la disparition du méthane dans le sol, il faudrait admettre les transformations suivantes, d'ordre purement chimique :



On bien :



L'oxyde ferreux se réoxyderait dans la suite.

Il existe dans le sol un microorganisme (*Bacillus methanicus*) qui utilise pour sa nutrition le carbone du méthane (Beijerinck et van Delden, 1903; Kaserer et Solingen). D'après Giglioli et Masoni (1917), il paraît exister des variétés ou des espèces différentes de bactéries méthaniques agissant à des températures diverses. Rares à la surface, ces bactéries abondent dans les profondeurs du sol; on les rencontre également dans le fumier, le purin, la vase d'égout.

Suivant certains auteurs, la disparition de l'hydrogène devrait être également mise sur le compte de microorganismes spécifiques.

Dans la fermentation du fumier de ferme en tas, il se produit à la partie supérieure, là où l'oxygène de l'air peut pénétrer la masse, une fermentation aérobie avec formation exclusive de gaz carbonique. Au milieu du tas, où l'accès de l'oxygène est difficile, la température s'élève beaucoup moins que dans le premier cas. Elle ne dépasse guère 35 à 40°;



elle peut atteindre 75° au voisinage de la surface. A cette élévation de température plus faible correspond une *fermentation anaérobie*, caractérisée par une production de gaz carbonique et de méthane (Reiset, Dehérain). Lorsqu'on la provoque dans un vase clos, la fermentation du fumier, à 52°, fournit presque exclusivement du gaz carbonique et du méthane, avec formation prépondérante de ce dernier gaz. Vers la fin de l'expérience, le rapport entre les volumes de ces deux gaz se rapproche de l'unité. Au début de la fermentation, on constate l'apparition d'un peu d'hydrogène (Schlössing).

A 72°, la fermentation aérobie s'exerce encore ; à 52°, la fermentation anaérobie est intense, mais elle cesse à 66°, c'est-à-dire à une température où la première a encore lieu. A 58°, Schlössing fils a obtenu, tantôt du gaz des marais (fumier de vache), tantôt de l'hydrogène (fumier de cheval). En aucun cas il ne se dégage d'azote libre ; quelques auteurs ont signalé la présence, en petites quantités, des acides acétique et butyrique.

La fermentation aérobie porte sur les pentosanes ; la fermentation anaérobie sur la cellulose. On voit, au fur et à mesure que le fumier se consomme sur le tas, suinter sur ses parois des gouttes noires qui sont le résultat d'une humification analogue, peut-être, à celle qui se produit dans le sol ; mais cette humification est beaucoup plus rapide chez le fumier. Ces gouttes noires ont été souvent regardées comme provenant de la dissolution de la vasculose de la paille dans les liquides ammoniacaux.

D'après Mazé (1915), la fermentation forménique, caractérisée par un dégagement concomitant de gaz carbonique et de formène, est l'œuvre d'un microbe strictement anaérobie, assez semblable à une *sarcine*. Un milieu convenable fermentescible neutre ou alcalin ensemencé de fumier frais, de terreau ou de terre arable, donne d'abord lieu à une fermentation butyrique avec dégagement d'hydrogène et de gaz carbonique. Cette fermentation s'arrête dans la suite ; puis, peu à peu débute la fermentation forménique avec production des gaz $\text{CO}^2 + \text{CH}^4$: le dégagement de l'hydrogène diminue de plus en plus. Cette fermentation forménique a pour effet de détruire tous les produits résultant d'une fermentation quelconque : acides fixes ou volatils, alcools.

En milieu acide, un grand nombre de mucédinées (aérobies) peuvent détruire la cellulose. Notons enfin que certains microbes dénitrifiants attaquent la cellulose ; une partie du carbone de cette substance passe à l'état de gaz carbonique, une autre s'unit avec la base de nitrate pour former un bicarbonate ; il se dégage en même temps de l'azote libre. Nous reviendrons ultérieurement sur ce phénomène à propos de la réduction des nitrates.

Quant aux processus biologiques qui aboutissent à la destruction des composés *pectiques*, si communs dans les végétaux, ils sont mal connus.



En résumé, tous les aérobies et les anaérobies du sol four-nissent, en s'attaquant à la matière organique supposée privée d'azote, de l'eau et du gaz carbonique ; les anaérobies donnent, de plus, naissance à de l'hydrogène et à du méthane ; ils forment, en outre, des produits plus condensés dont les principaux sont les premiers termes de la série des acides gras saturés.

II

PHÉNOMÈNES D'HYDROLYSE DE LA MATIÈRE AZOTÉE COMPLEXE, PRODUCTION D'AMMONIAQUE

Nous venons d'établir, dans leurs grandes lignes, les trans-formations biologiques que subit le carbone de l'humus ; occu-pons-nous des métamorphoses de l'azote.

La production de l'ammoniaque dans le sol est un phénomène général. — Lorsque nous avons étudié la constitution de l'hu-mus, nous avons insisté sur ce fait que la matière organique du sol renfermait toujours un ou plusieurs noyaux azotés. Ceux-ci peuvent persister très longtemps sous leur forme pri-mitive, ainsi que la chose a lieu dans la tourbe, par exemple. Leur simplification est extrêmement lente ; l'acidité naturelle du milieu s'opposant en grande partie au développement de la plupart des espèces microbiennes qui concourent le plus acti-vement à leur destruction.

L'action d'agents chimiques énergiques (acides forts, bases fortes) nous a permis antérieurement (tome 1, p. 310) de résoudre la presque totalité de l'azote contenu dans les complexes azotés en un corps de constitution très simple, l'*ammoniaque*. Un processus analogue se passe dans la terre arable ; on y ren-contre une foule de microorganismes producteurs d'ammo-niaque.

Examinons ici la formation de l'ammoniaque.

Une expérience très simple permet de se rendre compte de la facilité



avec laquelle certains microorganismes du sol produisent de grandes quantités de cette base. A cet effet, on prend un kilogramme d'une bonne terre de jardin que l'on mélange intimement avec 100 grammes de matière végétale pulvérisée (poudre de feuilles sèches par exemple) ; on dispose ce mélange dans un pot à fleur et on l'arrose de temps en temps. Si l'expérience est faite en été, on ne tarde pas, après trois ou quatre jours, à percevoir une odeur ammoniacale très nette qui s'échappe du vase. Cet essai échoue complètement si on prend des matières stérilisées au préalable. Il faut donc en conclure que la terre végétale contient des microorganismes capables de détruire, avec production d'ammoniaque, une partie des composés azotés apportés par la poudre végétale. Nous allons voir que c'est là d'ailleurs une fonction banale à laquelle prennent part les espèces microbiennes les plus variées.

Ce travail de simplification doit évidemment comprendre plusieurs séries de réactions. On observe, en effet, dans les phénomènes de putréfaction, d'abord l'apparition des acides aminés, tels que *leucine*, *tyrosine*, etc., accompagnés d'*indol* et de *scatol*. Les noyaux de ces substances résistent assez bien pendant un certain temps, mais ils disparaissent ensuite avec production d'ammoniaque.

Dans un sol qui n'a pas reçu d'engrais, tels que le fumier de ferme, et dont la partie combustible consiste seulement en humus, il ne semble pas se produire normalement, à cause de la présence constante de l'oxygène, de phénomènes putréfactifs proprement dits. L'azote de l'humus se transforme directement en ammoniaque. Toutefois — et c'est là un fait très important — la décomposition dans le sol d'un engrais, tel que le fumier, doit être accompagnée de la production de certaines substances, dont les unes n'ont qu'une existence temporaire, car elles sont détruites à leur tour par le jeu des actions microbiennes, mais dont les autres ont peut-être une durée assez longue pour nuire dans certains cas à la végétation. Ce problème de la toxicité de la terre arable et de la fatigue des sols, dont nous dirons quelques mots plus loin, envisagé comme une conséquence de la présence de certains produits vénéneux, est loin d'être résolu.

Les agents vivants qui donnent naissance à l'ammoniaque se rencontrent dans tous les sols ; ils s'attaquent aussi bien à l'azote de l'humus qu'à celui que renferment les engrais organiques proprement dits.

Ferments du sol qui agissent sur l'azote complexe. — Müntz (1890) a démontré la présence de ces ferments en employant d'abord des terres acides dans lesquelles il n'y a pas de nitrification. Ces terres, mélangées de râpures de corne, de sang desséché, etc., transforment l'azote organique de ces substances



en ammoniacale. La même expérience, réalisée avec des terres compactes qui nitrifient en général très difficilement, a fourni un résultat identique : ce ne sont donc pas les ferments nitrificateurs qui agissent sur l'azote organique. Nous verrons ultérieurement que le ferment nitrique ne résiste pas à une température de 70° ; or une terre, préalablement chauffée à 90°, et dans laquelle, par conséquent, l'action du ferment nitrique est anéantie, transforme encore en ammoniacale l'azote des substances organiques. A 120°, cette transformation cesse : les ferments producteurs d'ammoniacale sont donc plus résistants que ceux qui oxydent cette ammoniacale. Si on réensemence avec une parcelle de terreau la terre chauffée à 120°, la fermentation ammoniacale recommence.

*Cette fermentation est une fonction essentiellement banale à laquelle concourent un grand nombre d'espèces microbiennes qui habitent le sol. Müntz et Coudon (1893) en ont isolé quelques-unes qui sont capables de transformer en ammoniacale l'azote organique d'un bouillon de culture. Ladureau (1885) a montré que la torulacée qui produit cette fermentation se rencontre, non seulement dans la terre, mais aussi dans l'atmosphère, les eaux de pluie, les eaux souterraines. D'après Marchal (1893), une foule de bactéries, de levures, de moisissures qui habitent les couches supérieures du sol, participent à cette ammoniacalisation de l'azote organique. Dans les terres arables, l'action des bactéries prédomine à cause de la présence du calcaire ; dans les terres acides ce sont surtout les moisissures qui interviennent. En ce qui concerne les premières, l'auteur précité accorde une importance spéciale à la présence du *Bacillus mycoïdes*. Ce bacille est un oxydant énergique qui fixe l'oxygène sur le complexe organique et produit, aux dépens du carbone, du gaz carbonique ; aux dépens du soufre, de l'acide sulfurique ; aux dépens de l'azote, de l'ammoniacale. Il agit avec la même énergie sur l'albumine, la caséine, le gluten. Mais si ce bacille se trouve dans des milieux privés d'air où se rencontrent des substances réductibles (nitrates), il se comporte comme un anaérobie ; il réduit les nitrates en nitrites. Ceux-ci finalement se changent en ammoniacale. Le *Bacillus mycoïdes* engendre, par conséquent, de l'ammoniacale par deux*



processus opposés ; soit par oxydation, soit par réduction.

A côté de ce bacille, se placerait l'action des bactéries suivantes : *Protus vulgaris*, *Bacterium coli commune*, *B. fluorescens*, *B. liquefaciens*, *B. mesentericus vulgatus*, *Bacillus subtilis*, etc. Ce dernier bacille peut également, par suite d'un phénomène de réduction, engendrer de l'ammoniaque aux dépens des nitrates (Mlle Fichtenholz, 1899).

Parmi les mucédinées les plus communes qui possèdent la fonction ammonisante, il faut citer le *Mucor racemosus*, les *Aspergillus*, ainsi qu'une espèce nouvelle, décrite par Müntz et Coudon, le *Fusarium Müntzii*. Ces premiers essais ont été confirmés antérieurement par un grand nombre d'expérimentateurs (Rémy, 1902, Löhnis et Parr, 1906).

Il est bien évident que cette ammonisation, comme tout phénomène biologique, dépend d'un certain nombre de facteurs, tels que la température et l'humidité. Si les microorganismes aérobies sont des agents puissants de la fermentation ammoniacale, il existe aussi beaucoup d'anaérobies qui produisent le même résultat.

L'ammonisation est cependant plus active en conditions aérobies qu'en conditions anaérobies. Mais la nature chimique de la matière qui subit ce phénomène est d'importance majeure (Löhnis et Green, 1913). C'est ainsi que la vitesse de transformation en ammoniaque est plus grande pour les dérivés aminés de la série grasse que pour ceux de la série aromatique (Miyake, 1917). L'influence de certaines matières minérales doit être également prise en considération. Les sels de sodium (sulfate, chlorure, carbonate, bicarbonate) favorisent l'ammonisation sous de faibles doses ; celle-ci est entravée si ces sels sont présents à fortes doses. Toutefois, l'emploi du calcaire en réduit beaucoup la toxicité (Brown et Johnson, 1918). En principe, l'addition de petites quantités de chaux vive stimule le développement bactérien alors que les fortes doses amènent la cessation du processus biologique (Hutchinson, 1912 ; Miller, 1914). Ces dernières données sont à rapprocher des conclusions que Boussingault avait tirées de ses expériences sur la formation de l'ammoniaque dans la terre arable à la suite du chaulage (tome 1, p. 314).

Mais, en se plaçant à un point de vue général, on remarque que les phénomènes d'ammonisation débutent toujours par une attaque de matières protéiques plus ou moins complexes. Robinson et Tartar (1917) ont exécuté une série d'essais portant sur la fibrine du sang, l'albumine du blanc d'œuf, la peptone. Ces substances ont été soumises à l'action des bactéries suivantes : *Bacillus subtilis*, *B. mycoïdes*, *B. vulgaris*. Toutes les formes d'azote sont transformées plus ou moins rapidement, sous l'influence de ces bactéries, avec production finale



d'ammoniaque; la vitesse de cette transformation variant avec les divers protéiques. L'activité protéolytique des bactéries dépend de la nature de la matière première qu'elles sont chargées d'attaquer. L'azote des acides mono et diamminés constitue la source principale de l'ammoniaque formée par action bactérienne. Etant donnée la similitude des modifications chimiques que produisent l'hydrolyse en présence des acides *in vitro* d'une part, l'action bactérienne d'autre part, on peut conclure que celle-ci consiste principalement en une hydrolyse, au moins jusqu'au moment où se forment les divers aminoacides. On n'observe pas la formation de substances toxiques capables d'entraver l'ammonisation totale d'une matière protéique.

Les expériences précédentes confirment donc celles de Müntz que nous avons relatées plus haut.

Si l'on passe maintenant aux *applications pratiques* qui découlent de l'étude de ces phénomènes d'ammonisation, on remarque que la rapidité de la décomposition des engrais verts dans le sol dépend essentiellement de l'âge de la plante enfouie et, par conséquent, de la nature de ses tissus. Les plantes jeunes renferment beaucoup de substances amidées dont la décomposition, avec production d'ammoniaque, est relativement rapide. Lorsque la plante est plus âgée et que ses tissus renferment surtout des albuminoïdes, l'ammonisation est plus lente. C'est pour cette raison que l'on enterre les engrais verts à l'époque de la floraison du végétal; si le sol est léger et s'il est perméable à l'air; si, de plus, il est suffisamment riche en calcaire, les conditions d'une décomposition et d'une ammonisation rapides seront réalisées. Lorsque l'enfouissement a lieu à l'automne, l'ammoniaque formée persiste dans le sol pendant l'hiver, car la température est trop basse, à cette période de l'année, pour que cette base s'oxyde et se change en acide nitrique. Mais dès le printemps suivant, cette oxydation commence, et l'ammoniaque se transforme en acide nitrique que les végétaux semés à ce moment pourront utiliser (Dehérain).

Parmi les agents artificiels susceptibles de favoriser dans le sol la dégradation de la matière azotée avec production d'ammoniaque, il faut citer la fleur de soufre. Cette substance semble également accélérer la nitrification (Boullanger et Dujardin, 1912).

De nombreux expérimentateurs ont étudié, dans ces dernières années, le rôle que joue le soufre et certains de ses composés simples vis-à-vis de la flore microbienne du sol. D'après Pitz, une addition de soufre s'élevant à 0,05 p. 100 amène une décroissance du nombre des microbes nitrifiants et une augmentation du nombre des ammonisants. D'après Heinze (1906), le sulfure de carbone favoriserait la vitalité des microorganismes fixateurs d'azote. Ce même agent, ainsi que le gaz sulfureux et sulfhydrique, ont une influence bienfaisante sur la solubilisation des matières minérales et de l'azote organique (1913).

Notons encore que Grainez (1914) a montré que le sulfure de carbone et le toluène employés aux doses habituelles antiseptiques (0 gr. 1 pour 100 grammes de terre) n'ont pas d'effet défavorable sur la nitrification.



Fermentation ammoniacale du fumier de ferme. — Cette fermentation est l'une des plus intéressantes à connaître au point de vue de la pratique agricole. Le fumier de ferme est un mélange de litières et d'excréments. Les litières ont une composition très variée : ce sont, le plus souvent, des pailles de céréales, des fanes de légumineuses ou de pommes de terre, de la tourbe, de la terre, etc. Les litières servent de mode de couchage aux animaux dont elles retiennent mécaniquement les excréments solides, et surtout liquides.

L'urine des herbivores contient de l'urée, de l'acide hippurique et un peu d'acide urique. Les deux premières substances prédominent dans la composition des matériaux azotés de l'urine. Assez concentrée dans l'espèce chevaline, l'urine est beaucoup plus abondante mais moins riche en substances azotées, à volume égal, chez les espèces bovine et porcine. L'urine de l'homme et celle des carnivores est acide ; celle des herbivores alcaline, par suite de la présence de bicarbonate de potassium. L'ammoniaque, ou plutôt les sels ammoniacaux préformés, ne se rencontrent dans une urine normale qu'en quantité très faible. Sous l'influence de la fermentation ammoniacale, les urines qui sont naturellement acides, comme celles de l'homme et des carnivores, deviennent fortement alcalines. Les ferments qui transforment l'urée en carbonate d'ammonium, par simple fixation de deux molécules d'eau sur une molécule d'urée, sont assez nombreux. On les trouve dans le sol, dans l'air, dans les eaux polluées. Le *Micrococcus ureæ* rencontré par Pasteur dans l'urine, et étudié par Van Tieghem, est le premier ferment de l'urée qui ait été découvert. Les bactéries des genres *Urococcus*, *Urobacillus* sont aussi très répandues.

Tous ces microorganismes sont aérobies ; ils peuvent vivre néanmoins en présence d'une faible quantité d'oxygène ; ils hydrolysent également l'acide hippurique. Une molécule de cet acide fixe une molécule d'eau et se dédouble en une molécule d'acide benzoïque et une molécule de glycolle $\text{CH}_2(\text{NH}_2)\text{CO}_2\text{H}$. Ce dernier acide aminé est, à son tour, oxydé avec formation d'ammoniaque.

Cette fermentation ammoniacale banale est d'autant plus intense que la température est plus élevée ; elle communique à l'azote urinaire



une forme essentiellement volatile : aussi la perte par dégagement de l'ammoniaque dans l'air est-elle parfois très notable. Lorsqu'il s'agit de récolter le fumier à l'étable, on réduit, autant que possible, cette perte en enlevant fréquemment les litières salies imbibées d'excréments solides et liquides, et en les mettant en tas. L'arrosage souvent répété du tas avec le purin, qui suinte peu à peu de la masse, entretient une fermentation qui ne doit pas être trop énergique et ne pas dégager trop de chaleur : ce qui occasionnerait souvent des pertes d'ammoniaque très importantes. Dans les conditions d'une fermentation bien régulière le gaz carbonique, produit en excès, est un excellent fixateur de l'ammoniaque.

Lorsqu'on distribue le fumier sur une terre, l'ammoniaque, ou plutôt le carbonate qu'il contient, est apte à nitrifier immédiatement. Si les conditions de la nitrification ne sont pas réalisées, la base est fixée par le pouvoir absorbant ; elle peut d'ailleurs être utilisée directement par les végétaux, au même titre que l'azote nitrique. Toutefois, il faut redouter sa causticité et prendre certaines précautions lorsqu'on répand, par exemple, du purin sur le sol.

Les excréments solides subissent également la fermentation ammoniacale, mais avec une lenteur incomparablement plus grande que les urines. A cet égard, les excréments des espèces bovine et porcine, très aqueux, se décomposent hors du sol et dans le sol bien moins vite que les excréments plus secs de l'espèce chevaline. La chaleur dégagée dans ces transformations varie en raison inverse du degré d'hydratation des matières : c'est là une notion très importante lorsqu'il s'agit de distribuer les fumiers sur tel ou tel sol. Si le sol est compact et mal aéré, les fumiers de bœuf ou de porc fournissent de médiocres résultats : leur emploi doit être réservé aux terres légères et calcaires, c'est-à-dire aux terres dans lesquelles la circulation de l'air et celle de l'eau sont faciles.

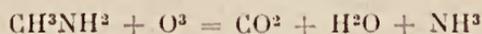
Mais quelle que soit la rapidité des phénomènes microbiens qui minéralisent la masse du fumier de ferme exposée dans les conditions les plus favorables à cette transformation, il ne faut pas oublier que l'ammonisation totale de l'azote de ce fumier est chose très lente. Les excréments solides, nous l'avons dit, résistent beaucoup plus que les excréments liquides : quant à l'azote des litières, il est encore plus réfractaire. On sait quelle est l'importance de ces notions lorsqu'il



s'agit d'estimer, même approximativement, la dose d'azote assimilable qu'apporte au sol un poids déterminé de fumier.

Nous verrons, à propos des phénomènes de dénitrification, dans quelles conditions le fumier de ferme peut perdre une certaine quantité d'azote à l'état gazeux.

Transformations de l'azote aminé. — Nous savons, à la suite des expériences que nous avons exposées antérieurement tome 1, p. 311, que le noyau azoté de l'humus est un noyau ou un mélange de noyaux amidés; le rôle des réactifs puissants (acides forts, alcalis) que nous avons employés pour simplifier ces molécules complexes se réduit, ainsi que nous l'avons montré, à une hydrolyse ou hydratation: d'où production d'ammoniaque. De même, le rôle des microbes aminoisants se réduit à une hydrolyse; ceci est particulièrement net dans la transformation de l'urée en carbonate d'ammonium. D'autre part, les phénomènes de putréfaction proprement dits qui s'emparent d'une matière albuminoïde fournissent, en l'absence de l'air, des dérivés azotés plus complexes que l'ammoniaque, renfermant encore, dans leurs molécules, une certaine dose de carbone: acides aminés, indol, scatol, méthylamine, etc. La destruction complète de ces noyaux azotés ne peut aboutir à une production d'ammoniaque que lorsque le carbone et l'hydrogène qu'ils contiennent subissent une oxydation. On en conclut que, si l'hydratation d'un amide peut avoir lieu en l'absence d'oxygène et conduire à une production d'ammoniaque, il est indispensable qu'un noyau aminé, tel que RNH^2 , éprouve une oxydation capable de changer le carbone et l'hydrogène du radical (R) en gaz carbonique et eau. En prenant comme type de cette transformation la monométhylamine, on aurait:



Une réaction de cette nature doit avoir lieu dans le sol; l'humus, en effet, peut contenir des noyaux aminés, c'est-à-dire des noyaux qui ne fournissent, en dernier lieu, leur azote sous forme ammoniacale que lorsqu'ils ont subi une oxydation. De plus, la fermentation anaérobie du fumier de ferme donne naissance à des acides aminés et à



des amines dont la destruction n'est assurée qu'à la suite de phénomènes d'aérobiose. Ce processus d'ammonisation par oxydation est fort important puisqu'il tend, finalement, à minéraliser l'azote des substances azotées les plus complexes.

Munro (1886) a montré que, dans le sol, l'éthylamine se transforme en ammoniacque, puis en acides nitreux et nitrique. En reprenant l'examen de cette question, Demoussy (1898) a vérifié que la terre végétale contenait des ferments capables de transformer en ammoniacque l'azote des amines. A cet effet, on introduit 0 gr. 01 de sulfate de monométhylamine dans des ballons de culture contenant 100 grammes d'eau, 1 gramme de carbonate de calcium et 0 gr. 01 de phosphate de potassium. Après stérilisation à l'autoclave, on ensemence ce liquide avec un peu de terre de jardin et on chauffe à 30°. Au bout de quatre jours, le réactif de Nessler indique la présence de l'ammoniacque; au bout de huit jours, la méthylamine a disparu et l'azote a pris uniquement la forme ammoniacale. Peu à peu, l'ammoniacque elle-même disparaît; elle est remplacée par l'acide nitreux, puis par l'acide nitrique. Cette transformation de l'azote aminé en azote ammoniacal *n'a pas lieu dans le vide*; elle est d'autant plus lente que l'accès de l'air est plus ménagé.

Si on opère sur une amine plus complexe, la triméthylamine par exemple, il faut attendre davantage pour constater l'apparition de l'ammoniacque. Le dix-huitième jour après l'ensemencement, la transformation n'est pas encore totale; celle-ci n'est complète qu'au bout d'un temps plus long. La présence de l'oxygène est ici encore indispensable. On peut mettre ce retard à l'ammonisation sur le compte de la complexité de la molécule, d'une part, et sur sa toxicité plus grande vis-à-vis des microbes du sol, d'autre part. L'aniline, la pyridine, la quinoléine s'oxydent encore plus lentement, et l'on ne doit employer, pour réussir l'expérience, que de très faibles doses de ces corps toxiques.

Il est donc bien démontré, par les faits qui précèdent, que l'ammonisation de ces molécules azotées complexes est un phénomène d'oxydation, et que la série des transformations d'ordre biologique qui amène l'azote à l'état d'ammoniacque est d'autant plus lente que la molécule initiale est plus condensée.

Il semblerait, d'après ce que nous venons de dire dans ce paragraphe, que l'ammoniacque qui se forme d'une manière nécessaire par suite du jeu d'un grand nombre d'espèces microbiennes doit abonder dans le sol. Ceci serait donc en contradiction avec ce que nous avons écrit plus haut, p. 67 et tome 1, p. 315, sur la rareté de l'ammoniacque dans les conditions normales, au sein de la terre arable. Mais, ainsi que nous l'avons d'ailleurs fait remarquer antérieurement, et ainsi que



nous l'établirons mieux encore dans la suite, tout s'explique si l'on songe que l'ammoniaque, stade nécessaire de la simplification de l'azote complexe, n'a qu'une existence temporaire, et que certains phénomènes oxydants spécifiques, d'ordre biologique, interviennent à leur tour pour changer cette base en acides nitreux et nitrique, infiniment plus diffusibles dans le sol ; car les sels de ces acides ne sont pas retenus par le pouvoir absorbant. Or cette transformation nitrique est parfois tellement rapide, lorsque certaines conditions extérieures sont réalisées, que le taux de l'ammoniaque du sol ne s'élève jamais.

III

PHÉNOMÈNES DE FIXATION DE L'AZOTE, GAZEUX

Cycle de l'azote. — Les phénomènes d'ammonisation que nous venons d'étudier s'adressent à la matière azotée complexe renfermée dans l'humus, dont l'origine doit être cherchée dans les albuminoïdes qui faisaient partie des tissus de la plante vivante. Cette plante avait elle-même puisé l'azote indispensable à son développement dans les nitrates du sol ; en sorte que le cycle de l'azote, en supposant que celui-ci une fois entré en combinaison ne se dégage jamais à l'état de liberté, se manifeste de la façon suivante. La plante morte abandonne à la surface du sol, ou dans sa profondeur, ses tissus chargés d'albuminoïdes. L'azote de ceux-ci, à la suite du travail de certains microbes, reparaît sous forme ammoniacale ; l'ammoniaque est ensuite oxydée avec formation d'acide nitrique, ou plutôt de nitrates, capables de nourrir de nouvelles plantes.

Pendant il existe des causes de destruction de l'azote combiné, et les processus de la dénitrification que nous étudierons plus loin reportent dans l'atmosphère une certaine quantité d'azote libre pris aux nitrates. Sans doute, les phénomènes électriques dont l'atmosphère est le siège restituent au sol d'une façon continue, principalement par les



eaux pluviales, une proportion d'azote combiné qui n'est pas négligeable. Toutefois cet apport, relativement faible sous nos climats, serait loin d'expliquer, par exemple, comment les terres en jachère s'enrichissent peu à peu en azote. On ne pourrait également comprendre pourquoi la quantité d'azote contenue dans la plupart des récoltes est, d'après Boussingault, supérieure à celle des engrais distribués au sol, et pourquoi le sol des forêts demeure indéfiniment fertile, malgré l'exportation, à chaque coupe, d'une quantité d'azote assez notable. Il doit donc exister des *causes de restitution* capables de compenser, et au-delà, les pertes d'azote combiné produites par certaines fermentations.

Cette question de l'enrichissement du sol par absorption de l'azote gazeux de l'air est restée pendant longtemps très obscure. La fixation de ce gaz était même niée d'une façon absolue par la plupart des expérimentateurs à la suite de la publication de la seconde série des recherches entreprises sur ce sujet par Boussingault (1852), bien que Georges Ville eût obtenu, à la même époque, des résultats absolument opposés. (Voir à ce sujet notre *Chimie végétale*, 2^e édition, 1914, page 189).

C'est en l'année 1885 que Berthelot a montré pour la première fois, de façon irréfutable, que l'azote de l'air se fixait sur le sol, et que cette fixation n'était pas sous la dépendance d'un phénomène purement chimique, mais qu'elle était corrélative de la présence d'êtres vivants. A partir de ce moment, les travaux confirmatifs de cette manière de voir abondent.

Réactions biologiques qui font entrer l'azote gazeux en combinaison. — On peut admettre que l'on connaît, à l'heure actuelle, *trois catégories de réactions qui font entrer l'azote libre minéral dans la molécule organique* : 1^o *fixation de l'azote sur la matière carbonée du sol par l'intermédiaire de microorganismes variés* dépourvus de chlorophylle, agissant seuls ou en symbiose avec d'autres espèces ; 2^o *fixation de l'azote sur certaines catégories de végétaux supérieurs* (légumineuses) par l'intermédiaire d'un champignon spécifique qui infecte les poils radicaux de la plante ; 3^o *fixation de l'azote par certaines algues vertes qui vivent en symbiose avec certaines bactéries.*

Quelle que soit la nature du phénomène qui organise ainsi l'azote élémentaire, la chose présente une importance consi-



dérable, tant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique. Au point de vue théorique, parce qu'il est remarquable de voir un gaz, tel que l'azote, doué d'affinités chimiques peu énergiques, entrer en réaction avec la matière carbonée et donner naissance, par un mécanisme absolument inconnu actuellement, aux substances les plus compliquées que nous connaissions, c'est-à-dire aux albuminoïdes ; au point de vue pratique, parce que l'azote est indispensable à la vie végétale, et que les causes de déperdition d'azote combiné sont notables : pertes par combustion vive, pertes par dénitrification dans lesquelles l'azote se redégage à l'état gazeux, pertes de nitrates dans les eaux de drainage. A côté de cette déperdition fatale de l'azote combiné, se place donc une série de phénomènes biologiques *compensateurs* qui font rentrer l'azote minéral dans le cycle de la vie, de la même manière que le gaz carbonique, produit de déchet ultime de toute combustion, reprend en quelque sorte une forme vivante lorsqu'il a traversé la cellule chlorophyllienne.

Des trois modes de fixation de l'azote gazeux que nous venons d'énumérer, nous laisserons de côté les deux derniers dont nous avons fait une étude suffisamment détaillée dans notre *Chimie végétale* (p. 180 et suivantes). Nous ne retiendrons ici que les faits relatifs à la fixation de l'azote sur le sol par l'intermédiaire de certains microorganismes dépourvus de chlorophylle.

Les raisons pour lesquelles nous traitons à cette place la fixation de l'azote sont les suivantes : ce phénomène aboutit à une production d'azote albuminoïde dont s'enrichit le sol. Or, la plupart des plantes ne prennent leur azote au sol que lorsque celui-ci a été transformé, d'abord en ammoniacque, puis en acide nitrique. Les mêmes agents qui s'attaquent à l'azote complexe de l'humus, et le métamorphosent en azote ammoniacal, interviennent lorsqu'il s'agit d'ammoniser l'azote albuminoïde qui est le résultat de la fixation de l'azote gazeux sur la matière carbonée. Nous avons donc intérêt, avant de traiter cette grande question de la nitrification, c'est-à-dire de l'oxydation microbienne de l'ammoniacque, à connaître *toutes les ressources d'azote complexe* dont le sol est le réservoir et dont le végétal peut disposer.

Recherches de Berthelot (1885). — Les sols que Berthelot a mis en œuvre, pour démontrer la fixation de l'azote gazeux étaient des sols stériles, très pauvres originairement en azote



combiné, et ne contenant, vers la fin des expériences, que de 1 à 3 grammes de matière organique par kilogramme. Voici, sommairement indiqués, le dispositif expérimental et les résultats obtenus. Quatre sols ont été mis en observation : deux sables argileux jaunes, extraits récemment des profondeurs de la terre, pauvres en azote ; un kaolin brut lavé contenant 4,8 p. 100 de potasse ; une argile blanche en contenant 6 p. 100.

Cinq séries d'expériences ont été exécutées avec ces divers échantillons : 1° conservation des vases porteurs des échantillons (un kilogramme environ) dans une chambre close : donc, exclusion de l'apport d'eau pluviale et des poussières ou autres matières organiques amenées par une atmosphère illimitée et incessamment renouvelée ; 2° séjour des vases au-dessus d'une prairie, ces vases étant sous un abri vitré ; 3° séjour des vases au haut d'une tour de 29 mètres, avec apport des eaux météoriques et des poussières de l'air ; ces vases étant soumis à l'influence de l'électrisation de l'atmosphère ; 4° échantillons disposés dans des flacons clos de 6 litres, avec exclusion, par conséquent, de tout apport extérieur ; 5° échantillons disposés dans des flacons clos, stérilisés ensuite par l'application d'une température de 100°, et communiquant avec l'extérieur par un tube ouvert muni d'une bourre de coton : la vitalité des microorganismes est abolie.

Voici seulement quelques chiffres relatifs à l'azote fixé dans ces différentes conditions. Le sable argileux n° 1, exposé simplement à l'air dans une chambre close, contenait au début, par kilogramme, 0 gr. 0709 d'azote. Après cinq mois, azote = 0 gr. 0933 : après treize mois et demi = 0 gr. 1109 ; après dix-sept mois = 0 gr. 1179. Le gain a donc été de $0,1179 - 0,0709 = 0,0470$, soit 66 p. 100 de l'azote initial. Le phénomène semble se ralentir lorsque la température s'abaisse. Quant à l'azote nitrique, il ne représente que $\frac{1}{5}$ de l'azote fixé. Un tel accroissement ne saurait être illimité : il est subordonné à la quantité de matière organique contenue dans le sol, quantité très faible dans l'échantillon mis en expérience.

Un échantillon de sable, analogue au précédent, exposé dans une prairie, a donné lieu à une fixation d'azote du même ordre de grandeur. Au haut de la tour, la fixation de l'azote a fourni des chiffres très voisins des précédents : il faut remarquer ici que, si on dose en même temps les apports azotés de l'eau de pluie, on trouve des nombres incomparablement plus petits que ceux qui représentent l'azote fixé. Il est même certain que la perte imputable au drainage du sable a été supérieure au gain provenant des eaux météoriques.

En flacons clos, la fixation de l'azote s'est effectuée progressivement comme dans les autres séries ; la nitrification a été très faible, sinon nulle : ce qui montre que ce phénomène ne joue aucun rôle dans la fixa-

tion de l'azote. Comme la dose de matière organique était peu notable, l'oxygène des flacons n'a pas été consommé en totalité, même au bout de plusieurs mois. A l'obscurité, il semble que le phénomène fixateur soit moins intense qu'à la lumière.

Enfin, dans la cinquième série d'essais, là où l'échantillon mis en vase clos avait été stérilisé, il n'y a pas eu de fixation d'azote. Celui-ci a même légèrement diminué. Cette diminution est probablement due à quelque réaction produite, au moment de la stérilisation, par la vapeur d'eau contenue dans le sable sur la matière organique de celui-ci : il y a eu départ de traces d'ammoniaque.

En résumé, la fixation de l'azote gazeux doit être mise sur le compte de certains organismes vivants ; cette aptitude est indépendante de la nitrification et ne saurait être attribuée à la condensation de l'ammoniaque atmosphérique. Elle est presque suspendue à 0°, elle disparaît à 100°, et s'exerce en vase clos aussi bien qu'à l'air libre, à la lumière comme à l'obscurité. Telles sont les premières expériences à la suite desquelles il a été permis d'affirmer la réalité de la fixation de l'azote gazeux par le sol. Dans une série de recherches ultérieures, Berthelot montra que cette propriété de fixer l'azote gazeux s'étendait à un grand nombre de terres.

Il est superflu de faire remarquer l'importance de premier ordre d'une pareille découverte. Une multitude de travaux confirmatifs vinrent appuyer ultérieurement les conclusions de Berthelot. Mais le but principal qu'il s'agissait maintenant d'atteindre c'était de rechercher dans le sol, puis de cultiver la ou les espèces microbiennes fixatrices, et de voir si cette propriété remarquable était l'apanage d'un grand nombre de microbes ou de mucédinées, ou bien si elle n'appartenait qu'à un nombre restreint d'espèces spécifiques.

Microbes fixateurs d'azote libre. — Quelques années après ce premier travail, Berthelot (1893) tenta de préciser le rôle de certains microorganismes, isolés du sol par les méthodes ordinaires de la bactériologie. Certaines algues non vertes, des genres *Alternaria* et *Gymnoascus*, cultivées sur kaolin, donnèrent lieu à une fixation d'azote ; il en fut de même d'une culture pure d'*Aspergillus*. Boussingault, longtemps auparavant, avait conclu de quelques essais qu'il avait exécutés dans ce sens que les plantes inférieures, telles que les mucédinées, ne fixent pas plus l'azote gazeux que ne le font les plantes supérieures. Cependant, dès cette époque, et par conséquent antérieure-



ment aux travaux de Berthelot, plusieurs expérimentateurs avaient continué à admettre que certaines mucédinées jouaient un rôle actif dans la fixation de l'azote gazeux. Ce rôle a été précisé dans ces dernières années, ainsi que nous le dirons plus loin.

Toujours est-il que les conclusions de ces premiers résultats d'isolement furent fortement contestées, jusqu'au jour où Winogradsky (1893) isola du sol une curieuse bactérie, apte à fixer l'azote, et dont les particularités biologiques méritent d'être citées, non seulement parce que cet exemple est le premier cas bien constaté de la présence d'une espèce microbienne spécifique vis-à-vis de la fixation de l'azote, mais, de plus, parce que la bactérie en question, anaérobie, vit en symbiose avec certains microorganismes aérobies du sol d'espèce banale.

On peut avancer que les fixateurs d'azote *appartiennent à trois catégories de microorganismes* : des bactéries anaérobies, des bactéries aérobies, des champignons. La symbiose de quelques-uns de ces microorganismes entre eux est fréquente. Dans un même sol, les trois catégories d'êtres microscopiques peuvent parfois fonctionner ensemble.

Expérience de Winogradsky. Fixation de l'azote par microbes anaérobies. — Cet auteurensemence une trace de terre sur le liquide suivant, absolument dépourvu d'azote : eau = 1000 centimètres cubes ; phosphate bipotassique = 1 gramme ; sulfate de magnésium = 0 gr. 5 ; mélange de chlorure de sodium et de sulfate ferreux = 0 gr. 01 à 0 gr. 02. 100 centimètres cubes de cette liqueur sont additionnés de 2 à 4 grammes de glucose et d'un peu de calcaire ; les vases sont traversés par un courant d'air filtré. Après un certain nombre de cultures, on ne rencontre, dans le milieu, que les trois organismes suivants : 1^o un *Clostridium* (voisin des ferments butyriques) qui domine ; 2^o un très fin bacille à longs filaments sinueux ; 3^o un gros bacille, large de 2 μ , à longs filaments se transformant en chaînettes d'articles asporogènes arrondis. Le calcaire se dissout ; une fermentation butyrique se déclare qui consomme tout ou partie du glucose. Le début de la fermentation est souvent capricieux ; mais, là où avait eu lieu la fermentation butyrique, on pouvait constater une fixation non douteuse d'azote libre.



Afin d'assurer aux débuts de la fermentation une allure plus régulière, Winogradsky ajoute, dès le commencement, dans les vases de culture, une très faible quantité d'azote nitrique ou ammoniacal dont nous verrons bientôt l'utilité. Ces traces d'azote combiné n'ont pas d'influence sur la fixation de l'azote gazeux ; elles servent seulement à amorcer la réaction. Dans ces circonstances, celle-ci débute régulièrement ; pour 1 gramme de glucose détruit dans la culture, il y a fixation de 0 gr. 0025 à 0 gr. 0030 d'azote. Cette fixation est moindre s'il y a aération insuffisante, ou lorsque la quantité d'azote combiné, ajoutée au début, est trop forte.

L'isolement des espèces présentes donne lieu à des remarques très intéressantes. Sur milieu solide aérobie, le gros bacille (bacille α) et le fin bacille (bacille β) se développent bien ; mais le *Clostridium* refuse de se développer. Le bacille α est aérobie, le bacille β anaérobie facultatif. De leurs cultures aucun gaz ne se dégage et aucune odeur butyrique ne se manifeste : leur rôle, dans la fixation de l'azote gazeux, paraît être d'ordre secondaire. Le *Clostridium* ne peut être cultivé sur milieu solide que dans le vide, là où les bacilles α et β sont incapables de vivre ; sa culture provoque un dégagement gazeux.

Lorsqu'on ensemence le *Clostridium* seul sur le liquide sucré primitif, il ne produit pas de fermentation bien nette : il semble que la présence des bacilles α et β soit indispensable à son développement ; c'est, en effet, ce qui a lieu. Si on reconstitue dans le milieu sucré primitif l'association de ces trois espèces (α , β , *Clostridium*), une fermentation régulière se déclare, et l'on doit en conclure qu'un microbe anaérobie, tel que le *Clostridium*, peut vivre normalement dans un milieu sucré s'il est protégé de l'action de l'oxygène par des microbes aérobies.

Ce qui prouve que les bacilles α et β n'ont pas d'action spécifique, c'est que l'on peut les remplacer par une mucédinée quelconque (*Aspergillus* ou *Penicillium*) : la fermentation butyrique, avec fixation d'azote, marche avec une régularité aussi grande qu'en présence des bacilles α et β .

Nous comprenons maintenant pourquoi il était nécessaire d'introduire, dès le début, dans les liquides de culture, une trace d'azote combiné : en effet, ces espèces favorisantes (bac-



cilles α et β , ou *Aspergillus*, ou *Penicillium*) doivent précéder dans son développement l'espèce anaérobie puisqu'elles ont pour but d'exclure l'oxygène de l'atmosphère ambiante. Or le *Clostridium* est seul apte à fournir au milieu l'azote combiné ; les aérobies α et β en sont incapables. Il est donc indispensable de donner d'abord à ces derniers une nourriture appropriée et de mettre, par conséquent, à leur disposition des traces d'azote combiné. Une fois le développement du *Clostridium* assuré, celui-ci fournira aux espèces favorisantes l'azote dont elles auront besoin.

Il résulte de l'examen de ce curieux cas de *symbiose* que l'on peut se passer des espèces aérobies, quelles qu'elles soient, en faisant la culture du *Clostridium* dans un milieu traversé uniquement par un courant d'azote pur. Pour cela, on introduira une trace de terre dans un flacon de culture où barbotera jour et nuit de l'azote pur ; avec cette première culture onensemencera un second flacon, et ainsi de suite. Après 4 ou 5 passages dans un semblable milieu, on chauffera vers 80° pendant un quart d'heure les spores bien mûres, afin de détruire les germes étrangers.

Le *Clostridium* est un ferment butyrique vrai ; Winogradsky n'ayant pu l'identifier avec aucun des ferments butyriques actuellement connus a proposé de le nommer *Clostridium pastorianum*. Dans les liquides de culture, il fournit des acides butyrique et acétique ; le premier de ces acides domine toujours. Les gaz qui se dégagent consistent en un mélange d'acide carbonique et d'hydrogène.

Il semble que la propriété de fixer l'azote gazeux appartienne à un petit nombre seulement des espèces microbiennes qui habitent la terre arable : en effet, contrairement à l'opinion de Berthelot, Winogradsky n'a rencontré cette propriété que chez l'organisme dont nous venons de décrire les particularités biologiques. En fait, depuis ces premières recherches et ainsi que nous allons le voir, un grand nombre d'expérimentateurs ont mis en évidence dans le sol la présence de nombreuses bactéries fixatrices d'azote, tant anaérobies qu'aérobies.

Quant à l'explication à fournir au sujet de la fixation de l'azote par le *Clostridium* et de la nature des substances qui se forment dans la réaction, Winogradsky admet que la rencontre de l'azote gazeux et de l'hydrogène naissant, au sein du protoplasme vivant, fournirait de l'ammoniaque.

Fixation de l'azote gazeux pendant l'humification. — Parmi les causes les plus actives de fixation de l'azote, il faut citer l'*humification des feuilles mortes* (Henry, 1897). D'après les



nouveaux essais de cet auteur (1902-1903), le gain d'azote qu'éprouve le sol des forêts, par suite de la fixation de ce gaz sur les feuilles mortes, l'emporte de beaucoup sur les pertes par l'exportation du bois.

La couverture de feuilles mortes (chêne, hêtre, charme, tremble, pins) mélangée à la terre peut fixer, par an et par hectare, surtout sur un substratum humide, une vingtaine de kilogrammes d'azote. Des feuilles mortes, placées en forêt sur du sable siliceux pur, constituant un substratum très pauvre et très sec, ou bien ne l'enrichissent pas, ou bien ne donnent lieu qu'à un gain insignifiant : mais il n'y a pas de perte d'azote à l'état gazeux. Montemartini (1906) a confirmé ces expériences, sans pouvoir rapporter cette fixation à une espèce microbienne déterminée.

Microorganismes anaérobies divers qui fixent l'azote. — Il existe plusieurs anaérobies, voisins du *Clostridium* de Winogradsky, qui sont capables de fixer l'azote gazeux. D'ailleurs ce *Clostridium* est très répandu dans presque tous les sols ; les dépôts de feuilles mortes en fermentation (Haselhoff et Bredemann, 1906). Il est probable que les enrichissements d'azote obtenus par Henry sont imputables à la présence de microbes de ce genre.

D'après les recherches récentes d'Omeliansky (1917) le *Clostridium pasteurianum* est un important fixateur d'azote. A 30°, sa culture se trouve dans les meilleures conditions et la fermentation du sucre est énergique. Mais c'est à la température ordinaire que se produit le maximum de fixation de l'azote. Plus la concentration de la liqueur en sucre est forte, moins énergique est la fixation de l'azote. Une augmentation trop grande de la teneur du milieu en matières azotées diminue et même arrête cette fixation. D'accord avec Winogradsky, l'auteur regarde le *Clostridium* comme un ferment butyrique typique et il estime que la propriété de fixer l'azote gazeux est très répandue chez le groupe des bactéries butyriques.

H. Pringsheim (1906) a décrit un *Clostridium* (*C. americanum*) qui, cultivé sur un milieu exempt d'azote, assimile ce gaz en flacons ouverts, alors que le *Clostridium* de Winogradsky exige le concours de microorganismes aérobies qui le mettent à l'abri de l'oxygène. Le *C. americanum* fournirait les acides lactique, butyrique et acétique, ainsi que les gaz hydrogène et carbonique. Cette bactérie fixatrice d'azote, comme la plupart des microorganismes fixateurs, trouve dans les cultures artificielles contenant glucose, sucre de canne, mannite, des sources d'énergie incomparablement plus efficaces que celles qu'elle peut rencontrer dans le sol. La cellulose, également, serait pour ces bactéries une source d'énergie (Pringsheim) ; mais ces fixateurs d'azote peuvent travailler économiquement dans le sol grâce à la symbiose qu'ils contractent avec les organismes autotrophes qui leur



assurent une quantité suffisante de matériaux carbonés (Krainsky, 1910).

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

Rosenblatt, Lichtenstein et Pringsheim (1913) ont isolé, puis cultivé, un microbe voisin du *Clostridium*, fixateur d'azote et aérobic. Ces auteurs le nomment *C. aerobicum*.

Microorganismes aérobies qui fixent l'azote. — Il est bon de rappeler d'abord que Mazé (1897-1898) est parvenu, le premier, à cultiver à l'état de pureté le microbe des nodosités radicales des légumineuses dans un liquide artificiel, et que ce microbe s'est montré apte à fixer l'azote en dehors de toute symbiose avec la plante hospitalière. (Voir notre *Chimie végétale*, 2^e édition, page 201.)

C'est principalement aux travaux de Beijerinck que nous sommes redevables de la connaissance d'espèces aérobies fixatrices d'azote sur la terre arable, dont la principale est l'*Azotobacter chroococcum*. D'après cet auteur (1903), ce microbe, diplocoque de 3 à 5 μ de diamètre, est très répandu dans le terreau de jardin et les terres fertiles. Il n'existe pas dans les terres acides, mais on le trouve dans l'eau de mer (Keding, 1909) ; dans l'eau de mer, aussi bien que dans l'eau douce, il vivrait en symbiose avec certaines algues. On le cultive aisément en lui fournissant des sources de carbone qu'il assimile avec facilité (mannite à 2 p. 100; propionate de calcium, de sodium, de potassium à 0,5 p. 100) et qui n'entrent que peu ou pas en fermentation butyrique. Ce microbe *oligonitrophile* ne forme pas de spores. On en obtient de belles cultures en ensemençant 0 gr. 1 à 0 gr. 2 de terreau sur le liquide suivant : eau de conduite 100 centimètres cubes, mannite 2 grammes, phosphate bipotassique 0 gr. 02. Si on ajoute à ce liquide des quantités un peu considérables d'azote combiné, le développement du microorganisme est moins bon. A côté de cet *Azotobacter*, l'auteur a rencontré une seconde espèce, l'*A. agilis*, qu'il qualifie de *mésaérophile*.

D'après Beijerinck et Van Delden (1903), la fixation de l'azote dans les cultures d'*Azotobacter chroococcum* reposerait



sur une symbiose de ce microbe, d'une part avec des bactéries sporogènes du genre *Granulobacter*, et, d'autre part, avec des bactéries sans spores dont les auteurs ont examiné deux formes : l'une est l'*Aerobacter acrogenes*, l'autre le *Bacillus radiobacter*, espèce très polymorphe. Toutes les espèces du genre *Granulobacter* posséderaient déjà d'elles-mêmes le pouvoir de fixer l'azote libre ; mais la symbiose avec l'*Azotobacter* exalterait singulièrement cette propriété. Les cultures grossières donnent une fixation d'azote d'environ 7 milligrammes par gramme de substance sucrée détruite. Le premier produit de l'assimilation de l'azote existe dans le liquide de culture à l'état libre, c'est-à-dire en dehors des bactéries qui le forment. Cependant cette assertion a été contestée récemment : il n'existerait dans les liquides de culture que très peu d'azote soluble. Au contraire, la matière sèche de l'*Azotobacter* contiendrait jusqu'à 80 p. 100 d'albuminoïdes (Gerlach et Vogel). De plus l'*Azotobacter* serait une des rares bactéries capables d'engendrer directement de l'ammoniaque aux dépens des nitrates et des nitrites, mais sans dégagement d'azote libre.

D'après Gerlach et Vogel, ainsi que d'après von Freudenreich, la symbiose de l'*Azotobacter* avec les espèces sus-mentionnées n'est pas indispensable pour que ce microbe puisse assimiler l'azote libre. Ce fait a été confirmé ultérieurement par Beijerinck lui-même (1908). Si on fournit à l'*Azotobacter* du malate de calcium comme source de carbone, il peut fixer 1 mgr. 5 d'azote libre par gramme de malate oxydé. L'aptitude à la fixation de l'azote varie avec l'âge du microbe ; le microbe jeune est, à cet égard, plus actif que l'adulte.

Les bactéries fixatrices d'azote sont surtout actives en milieu alcalin, très peu actives en milieu neutre ; il se peut, toutefois, que, dans beaucoup de sols, se rencontrent des bactéries plus actives en milieu alcalin, alors que, dans d'autres sols, ces bactéries agissent mieux en milieu neutre (Fraps, 1904).

Elles sont capables de fixer l'azote même lorsqu'on les cultive dans des milieux renfermant des nitrates ; cependant cette fixation est inférieure à celle que l'on observe dans des milieux dépourvus d'azote (Pringsheim, 1914). De petites quantités de nitrate de potassium, de sodium, de calcium (25 à 100 milligrammes pour 100 grammes de terre) activent la multiplication des *Azotobacter* en sol stérilisé ;

de fortes quantités sont défavorables (Hills, 1918). Le sel marin se montre toxique vis-à-vis des fixateurs d'azote à la dose de 0,5 p. 100 ; le sulfate de sodium n'est nuisible qu'à la dose de 1,25 p. 100, le carbonate arrête la fixation lorsque sa proportion atteint 0,4 à 0,5 p. 100. Ces sels exercent une influence moins nocive sur l'ammonisation (Lipman et Sharp, 1912). Dans les expériences qu'il a faites sur le rôle de l'arsenic, incorporé à un sol argilo-calcaire additionné de mannite, Greaves (1916) a montré que sous forme d'arséniates de plomb, de sodium, de zinc, l'arsenic stimule l'activité des bactéries fixatrices. L'arséniat de sodium devient toxique à la dose de 40 millièmes et suspend complètement la fixation à la dose de 250 millièmes, alors que l'arséniat de plomb n'est pas toxique à 400 millièmes. L'action stimulante de l'arsenic est indépendante de la nature du sol. Son maximum d'activité oscille autour de 10 millièmes (calculé en arsenic soluble).

Ce chiffre est supérieur à celui que contiennent la plupart des sols : il est donc probable que, dans la pratique agricole, l'arsenic stimule plus qu'il n'entrave l'activité bactérienne. L'arsenic, à petites doses, favoriserait également la nitrification. Quant aux effets toxiques de la magnésie, tant dans les sols que dans les solutions mannitiques, Lipman et Burgess (1914) estiment que ces effets sont nettement contrebalancés par l'addition de doses croissantes de calcaire.

L'*Azotobacter* se développe très bien dans les sols ehaulés, et sa diffusion dépend du degré de basicité du sol, c'est-à-dire de sa teneur en calcaire. Indépendamment de la chaux du calcaire, l'*Azotobacter* peut utiliser la chaux engagée dans le phosphate bicalcique, ou en combinaison avec les acides lactique et citrique ; mais il n'utilise pas la chaux du phosphate tricalcique, ni celle du chlorure ou du sulfate de calcium. Il emploie pour sa nutrition phosphorée les phosphates de sodium ou de potassium, ainsi que le phosphate bicalcique ; le phosphate tricalcique et les phosphates d'aluminium et de fer sont sans action (Christensen, 1917). D'après ce même auteur (1915), l'alcalinité du sol et la proportion d'acide phosphorique soluble qu'il renferme ont une grande importance ; la disparition de l'*Azotobacter* coïnciderait avec le manque de substances basiques. Des conclusions analogues, relatives au rôle des phosphates et du calcaire, ont été formulées par Cauda (1916). Les limites de température entre lesquelles il manifeste son activité sont + 5° et + 50° avec un optimum situé aux environs de 28°. Ce microbe est peu sensible à la dessiccation. L'aération et l'ameublissement du sol exercent une action particulièrement favorable à son développement.

D'après Stoklasa, les cultures d'*Azotobacter* renferment 10 p. 100 environ de leur poids d'azote sous forme de nucléoprotéides et de lécitines. La mannite, employée comme source de carbone, se transforme en alcool, acide lactique et acide acétique ; parfois on rencontre de l'acide butyrique. Les gaz qui se dégagent consistent en acide carbonique accompagné d'une petite quantité d'hydrogène. En cultures pures,



ce microbe ne donnerait ni acides, ni alcool (Krzemieniewski, 1908).

Parmi les hydrates de carbone capables d'alimenter l'*Azotobacter*, il faut mentionner l'arabinose et le xylose, l'inuline et la dextrine sont également très favorables à la fixation de l'azote : les *furfuroïdes* du sol, c'est-à-dire les substances capables de dégager du furfurole au contact des acides dilués et chauds, auraient, sur le développement de ce microbe, une très grande influence (Stoklasa, 1908). Si l'humus naturel joue un rôle important dans la nutrition de l'*Azotobacter*, il n'en serait pas de même de l'humus artificiel qui, d'après Warmbold (1906), demeurerait sans emploi.

Il est de toute nécessité que les fixateurs d'azote trouvent dans l'humus naturel du sol les matières carbonées indispensables à leur alimentation ; cependant l'humus, ainsi que nous l'avons dit antérieurement, ne donne pas d'hydrates de carbone solubles par saccharification. Les débris celluloseux des végétaux (fragments de racines, de tiges, de feuilles), non encore humifiés, constituent certainement un milieu nutritif favorable aux fixateurs d'azote. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe suivant. De plus, la symbiose de certaines algues vertes avec les bactéries fixatrices fournit à celles-ci le carbone dont elles ont besoin.

Lorsque l'humus naturel a été chauffé avec des acides étendus capables de lui faire perdre une forte proportion d'azote qui passe à l'état soluble, cet humus est inutilisable comme le serait l'humus artificiel. D'ailleurs les divers humus naturels ne se comportent pas de même vis-à-vis de l'*Azotobacter* (Krzemieniewski). Il existerait dans le fumier des microorganismes fixateurs d'azote (Tottingham, Fulmer et Fred).

D'après Rémy et Rësing (1911), l'*Azotobacter* ne se développe bien dans les solutions de mannite que si l'on ajoute à celles-ci de l'extrait de terre. Les acides humiques du sol déterminent une fixation d'azote notable, mais *ils n'agissent qu'en raison du fer* qu'ils contiennent. Par eux-mêmes, ils sont inertes. *Le fer possède une influence excitatrice*, et l'addition de sels ferriques suffit à elle seule pour déterminer dans les solutions de mannite un abondant développement d'*Azotobacter* et une forte accumulation d'azote. Cependant, d'après Kaserer (1911), la présence du fer n'exercerait qu'une faible influence s'il n'existait pas d'autres substances, entre autres l'alumine et la silice, sous forme soluble.

En effet, d'après Söhngen (1913), la présence de la silice, de l'alumine et de l'oxyde ferrique, sous forme colloïdale dans un milieu de culture, favorise le développement de l'*Azotobacter*. Il en serait de même, d'après Prazmowski (1912), des colloïdes organiques, azotés ou non.

Keyser (1920) a montré que l'*Azotobacter agilis* fixe le maximum d'azote en solution mannitique lorsque sa culture est éclairée par les radiations jaune et verte.

D'après Löhnis et Westermann (1909), les bactéries fixatrices d'azote pourraient se ramener à 4 types principaux :



1° *Azotobacter chroococcum*, caractérisé par la couleur brune ou noirâtre des colonies qu'il forme sur milieux solides ; 2° *Azotobacter Beijerinckii* (Lipman) caractérisé par une coloration jaunâtre et auquel on pourrait joindre *Azotobacter vinelandii* (Lipman) ; 3° *Azotobacter agilis*, espèce fluorescente, très mobile ; 4° *Azotobacter vitreum*, forme sphérique, dénuée de mouvement. A ces quatre espèces, on doit en ajouter une cinquième : le *Bacillus danicus* aérobie.

En principe, presque tous les hydrates de carbone, solubles ou non, glucose, saccharose, amidon, ainsi que la mannite (Koch), constituent pour ces fixateurs d'azote une alimentation carbonée supérieure à celle que leurs fournissent les sels d'acides organiques.

En ce qui concerne l'azote fixé dans le corps du microbe, cet azote n'est pas directement assimilable par les végétaux supérieurs, mais l'expérience montre qu'il est très aisément nitrifiable.

Quant au *Bacillus radiobacter*, il se comporte comme un dénitrifiant. Si, dans un milieu de culture approprié contenant des nitrates, on introduit simultanément *Azotobacter* et le *Radiobacter*, ce dernier réduit l'azote nitrique en azote libre, lequel est alors assimilé par l'*Azotobacter* (Stoklasa, Stranak).

Nous n'avons mentionné à dessein, dans cette courte étude, que les microorganismes qui fixent l'azote de façon indiscutable. Il a été décrit un certain nombre d'autres espèces ou de variétés des microbes précédents chez lesquels cette aptitude est minime ou douteuse ; nous passerons ces faits sous silence.

Applications pratiques. — C'est dans les couches supérieures de la terre arable que le développement des fixateurs d'azote est le plus marqué, en raison de l'ameublissement et, par conséquent, de l'aération dont ces couches bénéficient par suite du travail à la bêche ou à la charrue. De plus, les algues vertes, si communes à la surface de beaucoup de sols, fournissent aisément aux fixateurs d'azote le carbone dont ils ont besoin sous forme d'hydrates de carbone facilement assimilables. A cette source de carbone il faut ajouter la présence de l'humus

et des débris végétaux, plus abondants à la surface que dans les profondeurs. Le rôle améliorant de la jachère se trouve par cela même expliqué. On enterre, par une série de labours, la couche superficielle du sol qui s'est enrichie en azote ; une nouvelle couche est exposée à l'air, elle se couvre peu à peu d'algues vertes qui, à leur tour, fournissent du carbone à une nouvelle génération de fixateurs d'azote. Ceux-ci, d'ailleurs, se rencontrent parfois à de grandes profondeurs.

Cependant, d'après Dvorak (1912), plus la matière végétale est consommée, moins elle se prête à la culture naturelle de l'*Azotobacter*. C'est la matière encore verte, riche en substances facilement hydrolysables, qui répond le mieux aux besoins de ces bactéries dont les éléments de nutrition sont préparés par certains microorganismes. Hutelinson (1918) a également insisté sur le rôle que joue le degré de décomposition de la matière organique dans la fixation d'azote.

Il est difficile d'exprimer par des chiffres exacts la quantité d'azote gazeux qui peut se fixer dans le cours d'une année sur la surface d'un hectare abandonné à la jachère ; les variables dont dépend cette fixation sont trop nombreuses : température, humidité, alcalinité du sol, richesse en éléments minéraux favorables, degré d'aération, teneur en humus, etc. Les nombres fournis à cet égard oscillent entre 10 et 50 kilogrammes : on conçoit, d'après ce que nous venons de dire, pourquoi cet écart est si grand. Mais, quoi qu'il en soit, l'enrichissement est réel dans tous les cas, et l'opinion d'après laquelle un sol bien pourvu de matière organique gagne continuellement de l'azote — opinion très souvent émise avant que l'on connût la cause de ce gain — est amplement justifiée.

Peut-on artificiellement agir sur le sol et l'ensemencer de cultures de bactéries fixatrices ainsi que la chose a été réalisée, avec plus ou moins de succès, à l'aide de la nitragine, en ce qui concerne la culture des légumineuses ? On a proposé parfois d'ajouter au sol des solutions sucrées afin de fournir aux fixateurs d'azote un hydrate de carbone facilement assimilable. Mais les calculs faits sur ce point montrent que le prix de la quantité de sucre qu'il faudrait employer serait très supérieur à celui de l'azote que l'on introduirait sous forme de nitrates ou de sulfate d'ammonium. En outre, on ne peut incorporer impunément à un sol des hydrates de carbone solubles : ceux-ci nuiraient à la végétation des plantes supérieures et favoriseraient le développement de mucédinées et de bactéries réductrices capables de produire des phénomènes de dénitrification. L'opération ainsi conduite serait donc doublement mauvaise.



Il convient cependant de signaler le fait suivant. Hutehinson (1918) a montré que le suere ajouté à raison de 2.500 kilogrammes à l'hectare produirait des augmentations de rendement se chiffrant par 20 et 54 p. 100 imputables à la fixation de l'azote.

Mucédinées qui fixent l'azote.— Nous avons rappelé plus haut (p.128) que Berthelot avait montré que l'*Aspergillus niger* donnait lieu à une fixation d'azote. Cette fixation, obtenue par l'intermédiaire de diverses mucédinées, est souvent très faible ; parfois, cependant, elle fournit des quantités d'azote non négligeables : c'est ee qui a été établi nettement par Puriewitsch (1895) pour la mucédinée précédente ehez laquelle la quantité d'azote fixé est proportionnelle au poids de saccharose mis à sa disposition dans le liquide de culture. D'après Saida (1902), le *Mucor stolonifer* serait également un fixateur d'azote ; d'après Frohlich (1909), il en serait de même avec *Microsporium commune*, *Hormodendron cladosporioides*, *Cladosporium herbarum*, hyphomycètes qui vivent sur les débris de plantes mortes. Heinze (1909) eonsidère ce mode de fixation comme étant le plus souvent douteux ; mais les mucédinées qui se développent si fréquemment sur le sol seraient capables, comme les algues, de fournir à l'*Azotobacter* les hydrates de carbone que celui-ci réclame. Il semble donc que ee rôle de fixateur d'azote par les mucédinées, encore très discuté par beaucoup d'expérimentateurs, réclame de nouvelles recherches. Kossowitsch (1916) refuse aux saccharomycètes et aux champignons le pouvoir de fixer l'azote.

En résumé, si la fixation de l'azote gazeux par les mucédinées paraît douteuse, cette fixation ne saurait être niée quand les diverses espèces d'*Azotobacter* et de *Clostridium* entrent en jeu. Ce sont vraisemblablement les *Azotobacter* qui vivent en symbiose avec les algues vertes répandues à la surface du sol. Celles-ci, en culture pure, ne fixent pas l'azote gazeux (Kossowitsch, 1894) (Voy. notre *Chimie végétale*, p. 201). D'autre part, le bacille des nodosités radicales des légumineuses (*B. radiciola*) travaille avec activité à fixer l'azote dans le corps de cette catégorie de végétaux supérieurs, et l'on sait qu'un sol qui a nourri une ou plusieurs récoltes de légumineuses éprouve toujours un enrichissement plus ou moins notable en azote, bien qu'il y ait eu, à chaque récolte, exportation de matière végétale et, par conséquent, d'azote. Ce gain d'azote qu'éprouve le sol par suite du développement des organismes fixateurs est évidemment compensé par une série de processus inverses. La dénitrification, ainsi que certains phénomènes de putréfaction d'une part, les combustions vives d'autre part, restituent d'une ma-

nière continue à l'atmosphère une quantité d'azote gazeux non négligeable. Un équilibre tend à s'établir qui le plus souvent serait en faveur d'un enrichissement en azote.

Il est, enfin, un point très intéressant dont il faut faire mention. Dans les sols normaux, on rencontre ensembles les *Azotobacter* et les *Clostridium*, ceux-là, aérobies, ceux-ci, anaérobies ; comment réagissent-ils les uns sur les autres ? Omeliansky (1915) fait remarquer que, d'après nombre d'expérimentateurs, on constate une fixation d'azote plus considérable chez les cultures mixtes d'*Azotobacter* et de *Clostridium* que dans le cas d'une culture pure d'un seul de ces microbes. Dans les conditions naturelles ceux-ci vivent côte à côte : aussi l'auteur précité a-t-il étudié la fixation de l'azote qui se produit dans les cultures mélangées d'un grand nombre de races d'*Azotobacter* et de *Clostridium pasteurianum*, et il a associé à ces cultures d'autres microorganismes que l'on rencontre dans le sol au voisinage des deux premiers. On observe alors que si l'*Azotobacter* fixe l'oxygène et crée ainsi un milieu anaérobie pour le *Clostridium*, il détruit également les produits nuisibles que ce dernier a élaboré, notamment l'acide butyrique : ce qui maintient la réaction du milieu. Les microorganismes qui accompagnent dans le sol les deux espèces fixatrices d'azote, et qui sont aérobies, favorisent le développement du *Clostridium* mais peuvent aussi entraver celui de l'*Azotobacter*.

On pourrait avancer qu'il existe une sorte de *symbiose* entre les *Azotobacter* et les *Clostridium*.

Nous terminerons ce paragraphe en mentionnant, pour mémoire, une opinion émise par Bonnema (1903) sur la fixation non microbienne de l'azote dans le sol. L'azote libre s'oxyde au contact d'une solution alcaline d'hydrate ferrique ; dans le sol, cet azote serait vraisemblablement transformé en acido nitreux par un catalyseur qui ne serait autre que l'hydrate ferrique lui-même. Celui-ci, après avoir ainsi perdu une partie de son oxygène, fournirait de l'hydrate ferreux. Les microbes du genre *Azotobacter* s'empareraient de l'acido nitreux, et l'oxygène inclus dans le sol réoxyderait l'hydrate ferreux en le transformant de nouveau en hydrate ferrique. De telle sorte que le premier stade de la fixation de l'azote serait purement minéral. F. Sestini a réfuté cette manière de voir qui ne repose sur aucun argument sérieux.

IV

**PHÉNOMÈNES D'OXYDATION
TRANSFORMANT L'AMMONIAQUE EN ACIDES NITREUX
ET NITRIQUE. NITRIFICATION**

Les végétaux, tant supérieurs qu'inférieurs, pourraient utiliser l'azote ammoniacal à la formation de leurs albuminoïdes ; un grand nombre de plantes qui se développent sur les sols acides se servent même de l'azote organique complexe du substratum, cet azote étant probablement digéré par les mycorhizes avant de pénétrer dans la plante. Cependant l'expérience montre que l'azote ammoniacal et l'azote organique, lorsqu'ils font partie d'un sol tant soit peu calcaire, subissent une oxydation remarquable : *il apparaît alors de l'acide nitrique*, lequel est neutralisé par le carbonate de calcium. Or, une foule de végétaux supérieurs et inférieurs s'emparent avec avidité des nitrates avec lesquels ils édifient la molécule albuminoïde. Cette transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique constitue le *phénomène de la nitrification*. Toutes les fois que certaines conditions de milieu sont réalisées, cette transformation a lieu ; elle est, en quelque sorte, fatale.

La nitrification est un phénomène d'ordre biologique, comme la fixation de l'azote gazeux ; elle dépend de la présence dans le sol de certains microorganismes spécifiques aérobies qui oxydent l'ammoniaque. Nous verrons, dans la suite, que le *microbe nitreux*, le premier de ces microorganismes qui entre en jeu dans cette oxydation, ne porte l'oxygène que sur l'ammoniaque, la matière azotée complexe étant incapable de nitrifier directement sans passer d'abord par le terme *ammoniaque*. L'acide nitreux est oxydé à son tour *par le microbe nitrique*, différent du microbe nitreux, avec production d'acide nitrique. En somme, *la nitrification n'est pas une cause d'enrichissement des sols en azote*, ainsi qu'on l'avait pensé autrefois ; c'est seulement *une transformation de l'azote ammoniacal en azote oxydé*, ce dernier étant beaucoup plus diffusible puisqu'il n'est pas retenu dans le sol par le pouvoir absorbant.

L'étude du phénomène nitrificateur est une étude particulièrement intéressante : au point de vue théorique d'abord, étant donné le mode très particulier de nutrition des microbes qui entrent en jeu ; au point

de vue pratique ensuite, parce que l'acide nitrique est très diffusible dans les sols et constitue, pour tous les végétaux de la grande culture, une source excellente d'azote assimilable. De plus, la nitrification est un des phénomènes qui contribuent de la manière la plus efficace à l'épuration des eaux polluées. Les circonstances qui provoquent ou accélèrent la nitrification ont, sur la fertilité des sols, une influence aussi grande que celles qui favorisent la circulation de l'air ou qui assurent à la terre arable un degré convenable d'humidité.

Le phénomène nitrificateur est connu depuis fort longtemps. On sait que, dans certains pays chauds, *le nitre* (le plus souvent un mélange de nitrates de calcium et de potassium) s'effleurit à la surface du sol et s'y maintient tant qu'il n'est pas dissous par l'eau de la pluie. Certaines terres des pays tropicaux accumulent des quantités énormes de nitre, capables de demeurer presque indéfiniment en place, grâce à l'absence ou à la rareté des pluies.

Causes de la nitrification. Historique. — L'acide nitrique qui circule dans les eaux ou celui qui se trouve au sein de la terre reconnaissent une double origine. Les décharges électriques de l'atmosphère, surtout en temps d'orage, combinent l'azote et l'oxygène aériens. Au contact de la vapeur d'eau cette combinaison fournit de l'acide nitrique : d'où présence de cet acide dans les eaux pluviales et apport sur le sol de quantités variables de ce principe fertilisant (tome 1, p. 100). *C'est là l'origine minérale de l'azote nitrique.*

La seconde source de nitrates doit être cherchée, ainsi que nous le disions plus haut, dans la présence de certains microorganismes spécifiques très communs dans la terre arable, les eaux courantes, les poussières de l'atmosphère. Mais le rôle capital que jouent ces microorganismes dans l'oxydation de l'ammoniaque n'a été découvert qu'en 1877. Jusque-là, la formation des nitrates avait été mise sur le compte de phénomènes purement chimiques.

Dans ce qui va suivre nous adopterons l'ordre historique ; nous montrerons succinctement par quelles phases a passé l'étude du phénomène nitrificateur dont l'agent vivant est demeuré si longtemps inaperçu, jusqu'au jour où les idées de Pasteur, qui expliquaient d'une façon si lumineuse les processus de la fermentation en général, furent transportées dans le domaine de la chimie du sol. Les travaux qui ont précédé immédiatement la découverte du ferment nitrique sont très intéressants à examiner de près ; nous en ferons ressortir les points essentiels.



On avait supposé d'abord que l'oxygène et l'azote sont capables, sous l'influence des corps poreux, d'entrer en combinaison : on expliquait ainsi la présence du nitre dans le sol où, vraisemblablement, les meilleures conditions de porosité sont réalisées, ainsi que l'efflorescence du salpêtre sur les murs de cave, les décombres, les tas de matières organiques en décomposition. Il semble que ce soit Glauber (1604-1668) qui ait, le premier, insisté sur le rôle des corps poreux et montré que les pierres se salpêtrèrent d'autant mieux que l'air les pénètre plus facilement. A cette influence de la porosité se substitue plus tard une autre manière de voir : c'est l'azote de la matière organique elle-même qui s'oxyde aux dépens de l'oxygène atmosphérique. Aussi s'efforçait-on d'exposer autant que possible cette matière organique à l'influence oxydante de l'air. Les expériences bien connues de Kühlmann (1838) et de Schonbein (1857) — dans lesquelles on voit se produire de l'acide nitrique lorsqu'on fait passer un mélange d'oxygène et de gaz ammoniac sur la mousse de platine chauffée à 300° — paraissent indiquer que l'oxydation de l'ammoniaque devait être le point capital dans la production de l'acide nitrique.

D'autre part, il est remarquable de voir le rôle que l'on faisait jouer, pour l'obtention du salpêtre, aux substances animales ou végétales en décomposition, et, cela dans un temps où la science chimique n'existait pour ainsi dire pas. A cet égard, l'*Instruction pour l'établissement des nitrières*, publiée en 1777 par les Régisseurs généraux des poudres et salpêtres, est très curieuse à consulter. On y remarque avec quelle précision les salpêtriers recommandent de mélanger la terre avec des matières animales ou végétales, et de faire en sorte que l'air circule le plus aisément possible au sein de la masse que l'on aura soin, pour atteindre ce but, de remuer de temps en temps. L'influence de l'humidité n'avait pas échappé davantage aux fabricants de nitre : la matière en nitrification doit être arrosée souvent, soit avec de l'eau, soit, mieux, avec de l'urine ; mais les arrosages doivent être plus fréquents qu'abondants. Suivant la nature des terres et des matières qui leur sont mélangées, la nitrification était plus ou moins rapide et le rendement en nitre plus ou moins élevé.

Il est bon de remarquer que ces prescriptions, purement empiriques, sont celles que nous suivons encore lorsque nous voulons favoriser la nitrification d'une terre arable : les façons fréquentes auxquelles on soumet le sol favorisent l'arrivée et le renouvellement de l'air dans la masse qui doit renfermer une certaine dose d'humidité.

A une époque assez rapprochée de nous, on a voulu voir dans la nitrification un phénomène d'oxydation chimique provoqué par la présence de l'oxyde ferrique dont une partie de l'oxygène se porterait sur l'ammoniaque avec formation d'acide nitrique (Voir plus haut, p. 141). Cette conception du phénomène nitrificateur a encore été soutenue de nos jours ; il ne faudrait pas affirmer qu'elle fût radicalement fautive. Mais, si tant est qu'il se produise des nitrates par ce mécanisme, il ne doit s'en former que de faibles doses. De plus, beaucoup d'ex-

périmentateurs ont opéré dans des conditions qui ne sont pas à l'abri de toute critique, et aucun essai quantitatif sérieux n'est venu démontrer la réalité de cette genèse de l'acide nitrique. Tout récemment, Mooser (1901) a encore invoqué la possibilité de l'oxydation de l'ammoniaque par voie chimique. Cet auteur estime que le chauffage de la terre destiné à anéantir le phénomène nitrificateur ne démontre pas que cet anéantissement soit imputable à la mort des microbes : l'application de la chaleur influencerait le pouvoir catalytique (?) du sol par suite d'une modification de surface.

Travaux de Boussingault. — Si l'essence même du phénomène de la nitrification a été ignorée de Boussingault, il convient cependant de retracer ici sommairement quelques expériences fort intéressantes de l'illustre agronome relatives à ce phénomène, dans lesquelles il est démontré, entre autres choses, que l'azote de l'air n'intervient pas directement dans la nitrification.

Boussingault compare le sol arable, fumé et amendé, à une véritable nitrière : c'est surtout aux dépens de l'azote des matières organiques que se forme l'azote nitrique. Toute terre, quel que soit son degré de fertilité, est capable de nitrifier si elle renferme du calcaire. Mais la question, qui s'était posée bien des fois, et sur laquelle Boussingault se propose de revenir, est celle de l'intervention possible de l'azote de l'air dans le phénomène. En effet, dans la terre végétale, la nitrification est d'abord assez active ; elle se ralentit ensuite : ce qui semble montrer que le contact de l'air doit être suffisamment prolongé pour que la matière organique devienne apte à nitrifier. Voici les expériences que Boussingault institua à ce sujet.

Un certain poids de terre végétale sèche fut mélangé à trois fois son poids de sable quartzéux, lavé, calciné et humecté d'eau distillée. Ce mélange fut introduit dans de grands ballons ayant à peu près une capacité de cent litres. Le sable était destiné à rendre la terre plus perméable, et la dose d'eau ajoutée n'imbibait pas complètement la masse, circonstance reconnue favorable à la nitrification. On introduisit dans l'un des appareils une certaine quantité de cellulose afin de juger si, par le fait de la combustion lente d'une proportion de carbone plus forte que celle qui était contenue dans la terre, on n'exagérerait pas l'oxydation de l'azote. Les ballons, fermés avec des bouchons de caoutchouc, furent déposés dans un cellier. L'azote total, avant et après



l'expérience, fut dosé par la méthode de Dumas ; le carbone par combustion ; l'acide nitrique à l'aide du procédé de la teinture normale d'indigo. La lenteur de la nitrification est, dans ces conditions, très grande, et, comme le dispositif adopté ne permettait pas d'agiter la masse, l'auteur résolut de laisser la terre au contact avec cette atmosphère limitée pendant un temps considérable. Les ballons, clos en 1860, furent ouverts en 1871.

A la fin de l'expérience, Boussingault constata que l'atmosphère confinée des ballons était loin d'être épuisée en oxygène. Mais dans certains essais, pour lesquels on avait fait usage à dessein de ballons de dimensions plus réduites afin que l'oxygène inclus fut complètement employé à l'oxydation de la matière organique, la nitrification n'avait fourni que des chiffres moitié plus faibles que ceux des grands ballons. Dans ceux-ci — chose très importante, spécialement visée dans ces expériences — l'azote gazeux ne parut pas avoir contribué à la nitrification. Car, au bout de onze ans, si la terre s'était salpêtrée, l'azote total ne pesait pas plus, et même pas tout à fait autant qu'en 1860. Donc dans les conditions où cette expérience avait été exécutée, la nitrification avait eu lieu aux dépens de l'azote des substances organiques de l'humus qui existent dans tous les sols fertiles : l'azote libre de l'atmosphère confinée n'était pas intervenu. Voici, à titre de document, le bilan de deux expériences :

Première expérience : terre végétale = 100 grammes, sable = 300 grammes.

Deuxième expérience : terre végétale = 100 grammes, sable = 300 grammes, cellulose = 5 grammes, contenant 2 gr. 222 de carbone.

	Azote total	Acide nitrique	Azote contenu dans l'acide	Carbone	
I	En 1860 ...	0,4722	0,0029	0,00075	3,663
	En 1871 ...	0,4520	0,6178	0,16000	3,067
	Différence ..	— 0,0202	+ 0,6149	+ 0,15925	— 0,596
II	En 1860 ...	0,4722	0,0029	0,00075	5,885
	En 1871 ...	0,4660	0,5620	0,14570	3,358
	Différence...	— 0,0082	+ 0,5591	+ 0,14495	— 2,527

En même temps, Boussingault voulant se rendre compte des effets que produit non seulement la terre végétale, mais aussi ses éléments principaux sur la nitrification des matières organiques azotées employées comme engrais, institua les essais suivants. On mélangeait un poids connu de paille, de tourteaux de colza, d'os en poudre, d'os torréfiés, de râpure de corne, de sang desséché, etc., dans lequel la proportion d'azote était bien connue, soit avec du sable, soit avec de la craie, soit avec de la terre végétale. Un échantillon de terre non ad-



ditionné d'engrais servait de terme de comparaison. Tous ces mélanges étaient disposés dans des flacons d'une capacité de dix litres et humectés avec une quantité d'eau inférieure à celle qui aurait été nécessaire pour produire le maximum d'imbibition. Les flacons étaient fermés à l'aide d'un bouchon traversé par un tube de verre destiné à faire communiquer entre elles les atmosphères intérieure et extérieure. Au bout de trois ans, on humecta de nouveau la terre, et deux ans après (cinq ans depuis le début) on procéda à l'examen du contenu des flacons. Les engrais susmentionnés avaient été répartis : 1° dans du sable de Fontainebleau lavé et calciné ; 2° dans la craie de Meudon lavée et séchée à l'étuve ; 3° dans de la terre argilo-siliceuse très peu calcaire. On a dosé, dans chaque mélange, à la fin de l'expérience, les nitrates et l'ammoniaque. Voici quels ont été les résultats obtenus.

Dans le sable et la craie, il ne s'était formé que des traces d'acide nitrique, ou même pas du tout, et des traces d'ammoniaque ; seules, les substances *mélangées à la terre végétale* avaient nitrifié. On en conclut que c'est dans la terre végétale, *déjà spontanément nitrifiable*, que les matières organiques azotées ont développé le plus d'acide nitrique et le moins d'ammoniaque. Une quantité d'azote de 30, 50 et même 90 p. 100 de l'azote initial des engrais ajoutés s'était transformée en acide nitrique : donc, *c'est bien à l'influence de la terre végétale prise en bloc qu'est due l'oxydation de l'azote des matières organiques* ; les constituants principaux de la terre, sable et calcaire, ne provoquent pas cette oxydation.

Ces expériences, très bien conduites d'ailleurs, ne donnaient aucune indication sur la cause même du phénomène. Elles mettaient en évidence ce fait que l'azote atmosphérique n'entre pas directement en jeu dans la nitrification, et que le mélange complexe qui constitue la terre arable semble posséder seul la propriété mystérieuse de produire l'oxydation de l'azote organique, à l'exclusion de ses principaux constituants minéraux.

Conditions de la nitrification. — L'ensemble des recherches faites par un grand nombre d'auteurs, et par Boussingault en particulier, démontrait que, pour que la nitrification se réalisât, le concours d'un certain nombre d'agents était indispensable. C'est à Schloesing (1873) que l'on doit une étude très soignée des *conditions de la nitrification* ; cette étude a précédé de quelques années la découverte de l'être vivant, producteur de l'acide nitrique ; elle est très importante, et nous allons la présenter comme une préface nécessaire à la connaissance intime du phénomène nitrificateur.



Il y a cinq conditions de la nitrification : 1° présence d'une matière organique azotée (prise évidemment dans son état naturel, car, à l'époque où ce travail a été exécuté, il n'était pas question de stérilisation) ; 2° présence de l'oxygène ; 3° présence d'une base capable de saturer l'acide nitrique ; 4° présence d'une certaine dose d'humidité ; 5° température comprise entre certaines limites.

1° *Présence d'une matière organique azotée.* — Lorsqu'on mélange à des poids égaux de sable des quantités croissantes de terreau, les quantités d'acide nitrique formées sont proportionnelles au poids de la matière organique employée. La variabilité de la nitrification d'une terre à l'autre dépend, en grande partie, de la nature de la matière organique qui nitrifie et de son degré de décomposition.

2° *Présence de l'oxygène.* — On prend des poids égaux d'une même terre que l'on dispose dans une série d'allonges dans lesquelles on fait circuler des mélanges d'azote et d'oxygène en proportions variables ; voici les résultats obtenus par l'auteur précité :

Mélanges gazeux {	Oxygène	1,5	6	11	16	21
contenant p. 100 {	Azote	98,5	94	89	84	79
NO ³ H dans 1 K ^o de terre à 15 ^o } d'eau en 4 mois (en millig.). . }		47,5	95,7	131,5	162,6	246,6

L'activité de la nitrification est donc en relation directe avec la dose d'oxygène qui compose l'atmosphère des allonges. Le cas où cette atmosphère serait suroxygénée n'a pas été examiné, puisque ce cas est en dehors des conditions naturelles.

Schlœsing a réalisé une expérience dans laquelle il ne fit circuler que de l'azote pur. Non seulement il ne s'est pas formé de nitrates, mais ceux qui préexistaient ont été détruits. Nous reviendrons ultérieurement sur ce phénomène réducteur important.

3° *Présence d'une base.* — Bousingault avait, il y a long-



nomène de la nitrification. Etudions maintenant la *cause* de ce phénomène.

La nitrification est corrélatrice de la présence d'un être vivant. Travaux de Schløesing et Müntz. — C'est à Schløesing et Müntz (1877) que nous sommes redevables de cette notion : *la nitrification est corrélatrice de la présence d'un être vivant*. Cet être vivant est un microorganisme aérobie que ces savants n'ont pas isolé à l'état de pureté absolue, puisqu'à cette époque, les études bactériologiques étaient encore peu avancées, surtout en ce qui concerne le sol, mais dont ils ont démontré la réalité par une série d'expériences très remarquables et étudié les propriétés les plus caractéristiques. Voici l'exposé de ces recherches :

Pasteur, en 1862, avait fait remarquer que l'action de l'oxygène de l'air sur la matière organique est singulièrement bornée chaque fois que cette action s'exerce en l'absence de microorganismes. Beaucoup d'êtres inférieurs ont, au contraire, le pouvoir de fixer l'oxygène sur les matières organiques complexes, dont les éléments sont ainsi transformés en eau, gaz carbonique, azote, ammoniacque, acide nitrique.

A l'époque même où Schløesing et Müntz firent leurs premières expériences, la question de l'épuration des eaux d'égout par le sol était l'objet d'études approfondies. Les savants précités se demandèrent si la combustion de la matière azotée n'avait lieu que dans la terre végétale seule (ainsi qu'il ressortait des travaux de Boussingault), ou bien si cette combustion pouvait s'opérer dans des sols exclusivement sableux, dépourvus de matière organique.

Dans un tube de 1 mètre de longueur, fermé à sa partie inférieure par une toile métallique, on introduit 5 kilogrammes de sable quartzeux calciné au rouge et mélangé avec 100 grammes de calcaire pulvérisé. Ce sable est arrosé chaque jour avec une dose constante d'eau d'égout, calculée de telle sorte que la descente s'effectue en huit jours. Afin de réaliser toutes les conditions de la nitrification, on fait circuler dans le tube un courant d'air lent, introduit par refoulement de haut en bas. Pendant les vingt premiers jours, la nitrification n'eut pas lieu ; l'eau qui s'écoulait était simplement filtrée et contenait un taux invariable d'ammoniacque. Au bout de ce temps, l'acide nitrique fit son apparition, et l'ammoniacque, ainsi que l'azote organique, disparurent peu à peu. Schløesing et Müntz font remarquer que, s'il s'était agi d'un simple phénomène de combustion, on ne comprendrait pas pourquoi cette combustion aurait exigé un temps aussi long. Mais, au contraire, ce retard se conçoit très bien si l'on admet *la présence d'un agent organisé* dont le développement et l'activité comburante ont demandé un certain temps avant de se manifester. Voici comment les auteurs se



sont assurés de la présence de cet être organisé dans l'eau d'égout employée.

Quelques années auparavant, Müntz avait montré que les organismes vivants, en général, sont anesthésiés par les vapeurs de chloroforme et que leurs fonctions sont suspendues. A la partie supérieure du grand tube, on place un petit récipient contenant du chloroforme dont les vapeurs sont entraînées par le courant d'air et se répandent peu à peu dans toute la colonne. Dix jours après cette manipulation, les eaux qui filtraient ne renfermaient plus d'acide nitrique, alors que l'ammoniaque et l'azote organique y réapparaissaient. La preuve de la présence d'un être vivant capable de brûler l'azote ammoniacal était donc faite.

Schlœsing et Müntz appliquèrent le même traitement à la terre végétale. Deux allonges remplies de terre sont traversées par un courant d'air; dans la seconde, on dispose un récipient à chloroforme. Au bout de deux mois, le taux de l'acide nitrique n'avait pas varié dans celle-ci; dans la première, la nitrification avait suivi son cours normal. Si on pratique la même expérience, mais en chauffant préalablement à 100° l'une des allonges, et si on fait ensuite passer au travers des deux appareils de l'air flambé, afin de ne pas introduire de germes venant de l'extérieur, on remarque que la nitrification reste stationnaire dans l'allonge chauffée et qu'elle se poursuit dans celle qui contient de la terre naturelle.

La porosité de la masse ne semble pas jouer un rôle aussi important que celui qu'on lui attribuait autrefois. En effet, si on dispose dans des allonges du gravier ou des cailloux polis, corps non poreux, et qu'on les arrose avec de l'eau d'égout, celle-ci nitrifie très bien. Si on fait barboter un courant d'air dans de l'eau d'égout disposée dans un flacon avec un peu de craie, cette eau nitrifie et l'ammoniaque disparaît. De la terre végétale ou du terreau, mis en suspension dans l'eau, continuent à nitrifier quand on fait traverser le mélange par un courant d'air.

Premiers essais d'isolement du microbe nitrificateur. — Schlœsing et Müntz ensémencèrent une trace de terreau, soit dans de l'eau d'égout stérilisée, soit dans des liquides minéraux artificiels contenant un sel ammoniacal et une matière organique. On fait passer dans ces liquides un courant d'air, ou bien on les dispose sur une faible épaisseur, à l'abri des poussières, et on les maintient à une température convenable. Dans ces conditions, l'azote ammoniacal s'oxyde peu à peu. A 70°, l'action du ferment est anéantie; il en est de même lorsqu'on supprime l'accès de l'oxygène. Les auteurs ont rencontré ce ferment principalement dans la terre végétale, les eaux d'égout et toutes les eaux qui renferment des matières organiques; les eaux courantes en renferment également. On l'a trouvé ultérieurement dans les eaux marines.

Si le microbe nitrificateur n'a pas été isolé à l'état de pureté à la



suite de ces premiers essais, on ne saurait néanmoins douter de sa présence et de la faculté remarquable qu'il possède d'oxyder l'ammoniaque.

Mais les infiniment petits qui oxydent la matière organique en général sont très nombreux, et il y avait lieu de se demander si la nitrification était une fonction banale d'oxydation pouvant être réalisée par une mucédinée quelconque aérobie, ou bien si l'oxydation de l'ammoniaque n'était réservée qu'à des microorganismes spécifiques. Schlœsing et Müntz montrèrent que les mucédinées telles que *Mucor mucedo*, *M. racemosus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium glaucum*, *Mycoderma vini*, *Mycoderma aceti*, mises dans les conditions les plus favorables à la nitrification, n'avaient aucune action sur l'oxydation de l'ammoniaque. Ces mucédinées, loin de produire des nitrates, les détruisent et transforment l'azote nitrique en azote organique. Si on abandonne l'expérience à elle-même, pendant un certain temps, il peut même se produire un dégagement d'azote gazeux. La fonction nitrifiante apparaît donc comme une fonction *spécifique* dont ne sont doués que certains microorganismes particuliers.

Particularités du phénomène nitrificateur. — A peine ces très intéressantes recherches étaient-elles publiées que beaucoup d'expérimentateurs se hâtèrent d'en vérifier la justesse et de poursuivre l'étude approfondie de l'oxydation de l'ammoniaque. Warington (1879) confirme la nécessité d'un ensemencement, ainsi que celle de la présence d'une base. Il remarque que, dans les solutions artificielles concentrées, la période d'incubation est plus longue que dans les solutions diluées ; de plus, il se produit, tantôt de l'acide nitrique, quand les liqueurs sont froides, étendues et placées à l'obscurité, tantôt de l'acide nitreux, lorsque les liqueurs sont plus concentrées, exposées à la lumière et soumises à une élévation de température. D'ailleurs, la formation de l'acide nitreux avait été déjà regardée par Schlœsing et Müntz comme la conséquence d'une nitrification entravée. Cependant, dans les essais de Warington, la formation de l'acide nitreux ne paraissait pas dépendre d'un manque d'oxygène : les nitrites semblaient précéder les nitrates ; parfois il ne se formait que de l'acide nitreux. Une solution de nitrite de potassium, inoxydable à l'air seul, se change en nitrate si on l'additionne de quelques gouttes d'un liquide en pleine nitrification. Enfin, Warington démontra que jamais la totalité de l'azote de l'ammoniaque n'était



capable de nitrifier, car une partie de cet azote sert de nourriture aux microbes eux-mêmes et passe à l'état d'azote organique.

Toutes ces expériences confirment donc les travaux de Schloësing et Müntz.

Irrégularités constatées dans les premiers essais de culture.

— Parmi les faits d'une explication difficile observés par Warington pendant la nitrification des solutions ammoniacales, il faut citer avant tout le suivant. Puisque la nitrification est l'œuvre d'un être vivant, celui-ci doit trouver dans le milieu où il se développe une matière carbonée aux dépens de laquelle il puisse vivre, ainsi que la chose a lieu chez tous les êtres dépourvus de chlorophylle. Or, Warington avait fourni de nombreux exemples dans lesquels il montrait que la nitrification pouvait se produire dans des milieux extrêmement pauvres en substances carbonées. Peu après, Munro (1886), insistait sur ce point : que les moindres traces de carbone, telles que celles qui sont apportées par les poussières de l'air, suffisaient pour déterminer la transformation en acide nitrique de quantités relativement grandes d'ammoniaque.

Heræus (1886), vers la même époque, à la suite d'une étude des espèces microscopiques qui habitent les eaux de source, avait observé que les bactéries douées de la propriété d'oxyder l'ammoniaque, que l'on rencontre dans un liquide additionné de terre, ne se développent qu'à la surface et semblent n'avoir à leur disposition que très peu de matières carbonées. Cet auteur préleva à la surface de ces liquides une petite quantité des êtres qui s'y étaient développés et il les sema dans deux milieux : le premier contenant du phosphate de potassium, du sulfate de magnésium, du chlorure de calcium, de carbonate d'ammonium et du sucre ; le second contenant les mêmes substances, moins le sucre. L'oxydation de l'ammoniaque fut beaucoup plus intense dans le second que dans le premier de ces milieux. Heræus remarque qu'il est difficile de comprendre comment un être dépourvu de chlorophylle peut vivre dans un milieu exempt de carbone organique. Beaucoup d'autres expérimentateurs avaient, presque en même temps, fait une constatation analogue (Warington, Hueppe, P. et G. Frankland). Hueppe (1888) et Low ont cherché à expliquer cette synthèse de matière carbonée à l'aide de formules très hypothétiques qu'il est inutile de transcrire ici.

Un second fait, à propos duquel nous avons déjà dit quelques mots



plus haut, ne recevait pas davantage d'explication. Warington, Munro, P. et G. Frankland avaient très souvent remarqué que, dans leurs liquides de culture, il se formait tantôt des nitrites et tantôt des nitrates. Parfois ces derniers étaient réduits à l'état de nitrites. Ce phénomène réducteur pouvait être imputé à la présence de microbes variés peuplant le sol et les eaux. La présence d'une matière organique, capable de fermenter facilement, semblait être la cause essentielle de cette réduction. Mais, ce qui paraissait étrange, c'était la formation presque constante de nitrites dans les solutions artificielles alors que, dans le sol, cette formation est rare, à moins que l'on ne soit en présence d'un milieu nettement réducteur, comme dans le cas des sols submergés, ou que la terre n'ait reçu de très fortes doses d'un sel ammoniacal.

Munro, le premier, émit l'idée que l'acide nitreux était peut-être produit par un organisme spécial, différent de celui qui change l'azote ammoniacal en azote nitrique.

Travaux de Winogradsky. — S'il est évident, d'après ce qui précède, que la nitrification est un phénomène biologique, il subsiste néanmoins encore beaucoup d'incertitudes sur le mode d'oxydation de l'azote organique. Cette oxydation, avec formation de nitrates, est-elle l'œuvre d'un seul ou de plusieurs microorganismes ? Comment se nourrissent ces micro-organismes qui semblent se développer d'autant mieux que le milieu où on les cultive est plus pauvre en carbone ?

C'est à Winogradsky (1890-92) que l'on doit une réponse satisfaisante à ces deux questions fondamentales. A cause de l'intérêt considérable qui s'attache au travail de cet auteur, nous donnerons ici quelques éclaircissements spéciaux.

Commençons par l'étude de l'oxydation de l'azote ; celle de la nutrition carbonée des microbes sera exposée plus loin.

Après un grand nombre d'essais infructueux qui lui montrèrent la difficulté d'obtenir une nitrification régulière sur des milieux contenant une matière organique, le savant bactériologiste russe enseigna une goutte d'un liquide en pleine nitrification sur une solution purement minérale contenant, dans 1000 centimètres cubes d'eau : 1 gramme de sulfate d'ammonium et 1 gramme de phosphate de potassium. Chaque matras reçoit 100 centimètres cubes de cette solution à laquelle on ajoute 0 gr. 5 à 1 gramme de carbonate de magnésium. Dès le quatrième jour, la réaction à la diphenylamine est

très nette (cette réaction indique aussi bien la présence des nitrites que celle des nitrates). Après plusieurs mois, alors que le peuplement du milieu était devenu constant, l'auteur isola du liquide cinq espèces se développant sur gélatine : aucune n'était capable d'oxyder l'azote ammoniacal. Ce procédé d'isolement sur gélatine était donc impropre à mettre en évidence le microorganisme nitrificateur, lorsque l'observation suivante révéla à la fois sa présence et fit soupçonner son mode spécial de nutrition carbonée. Au fond des matras de culture, alors que la nitrification était intense (au cinquième ou sixième jour), la couche de carbonate magnésien se troublait, et ce trouble était dû à des organismes ovales, fusiformes, se mouvant avec rapidité dans la liqueur. Cette coïncidence, entre l'apparition de ces organismes et une nitrification intense, était la règle ; quant aux organismes mobiles, ils semblaient, à un moment donné, disparaître du liquide, car le voile supérieur qui recouvrait la culture n'en contenait pas. Chez les cultures anciennes, le dépôt de carbonate devenait grisâtre et gélatineux ; si on imprimait un mouvement aux vases, ce carbonate demeurait d'abord comme emprisonné ; puis la masse se désagrégait et des flocons se dispersaient au sein du liquide. Examinés au microscope, ces flocons donnèrent le résultat suivant : les grumeaux transparents du sel étaient recouverts d'une bactérie ovale, semblable à celle qui nageait dans la solution au moment où celle-ci se troublait. L'addition d'un peu d'acide acétique dissolvait le carbonate, les flocons perdaient leur blancheur, ils devenaient transparents tout en gardant leur forme et se montraient sous l'aspect d'une *zooglé*e, peu compacte, présentant des lacunes : celles-ci marquaient la place où le carbonate magnésien avait été dissous par l'acide acétique.

Cet ensemble donnait l'impression, non pas d'un mélange accidentel du microbe avec le carbonate, *mais d'une association de la bactérie avec le sel*, englobé par elle dans une matière gélatineuse que cette bactérie aurait sécrétée. On comprend maintenant le retard, ou même parfois, l'absence de nitrification dans les expériences du début. En effet, on prélevait une goutte de liquide à la surface de la liqueur en voie de nitri-



cation, là où la bactérie ovale n'existait que rarement. Pour pratiquer un ensemencement à coup sûr, il faut donc introduire la pipette *jusqu'au fond du matras*, dans la couche même du carbonate.

Il résulte de cette première série de minutieuses recherches qu'il est déjà au moins très vraisemblable que le microbe nitrificateur se contente d'une nourriture purement minérale : cette conclusion se confirmera encore mieux dans la suite. Afin d'épurer la culture et d'isoler de ce milieu uniquement le microbe nitrificateur, Winogradsky eut recours à un procédé très ingénieux qui vaut la peine d'être cité. A cet effet, on utilise précisément la faculté que possède ce microbe de ne pas se développer sur gélatine. Quelques gouttes de liquide, prélevées au fond d'un matras comme il vient d'être dit, sont jetées dans de l'eau distillée stérilisée. On reprend de nouveau les grumeaux avec une pipette et on les fait tomber sur de la gélatine contenue dans une boîte Pétri. A l'endroit même où ces gouttes tombent, il reste, après l'absorption du liquide par la gélatine, quelques parcelles de carbonate de magnésium ; au bout de quelques jours, on examine au microscope le résidu laissé par ces gouttes. Ceux d'entre ces résidus qui ne montrent pas de colonies sont introduits de nouveau dans le liquide minéral stérilisé : on obtient de la sorte des cultures pures, qui nitrifient très régulièrement, mais dont le début est parfois assez lent, car le microbe a dû souffrir de son contact prolongé avec la gélatine.

L'emploi d'un milieu de culture *strictement minéral* s'imposait donc. Winogradsky dialyso une solution de silicate de sodium mélangée d'acide chlorhydrique ; la solution de silice qui reste sur le dialyseur est concentrée, puis versée dans des boîtes Pétri et gélatinisée par l'addition d'une liqueur minérale renfermant, pour 100 centimètres cubes d'eau : 0 gr. 04 de sulfate d'ammonium, 0 gr. 05 de sulfate de magnésium, 0 gr. 1 de phosphate de potassium, 0 gr. 6 à 0 gr. 7 de carbonate de sodium et des traces de chlorure de calcium. On pourra désormais isoler du premier coup le microbe nitrificateur en introduisant directement une parcelle de terre végétale dans la gelée de silice. Ce procédé, très recommandable, est celui que l'on suit le plus ordinairement aujourd'hui.

Pouvoir nitrificateur. — Le microbe ainsi isolé se présente sous la forme d'une ellipse dont le grand diamètre a une longueur de 1,1 à 1,8 μ et le petit une longueur de 0,9 à 1 μ . Winogradsky lui donna d'abord le nom générique de *Nitromonas*. Il compara son pouvoir nitrificateur à celui que Schloësing avait obtenu dans ses études sur la nitrification de l'ammoniaque (pour 200 grammes de diverses terres, 3 à 4 milligram-



mes d'azote étaient nitrifiés par jour), et trouva des chiffres un peu supérieurs (6 à 7 milligrammes).

Formation exclusive d'acide nitreux. — En examinant de plus près la nature du composé oxygéné de l'azote qui avait pris naissance dans ses cultures, Winogradsky y constata la présence presque exclusive de nitrites. Un pareil fait avait déjà été signalé antérieurement, ainsi que nous l'avons dit plus haut : cette formation exclusive de nitrites avait été mise sur le compte d'une nitrification entravée, soit par abaissement de température, soit par trop grande alcalinité du milieu, soit par aération insuffisante, soit par suite de la présence de phénomènes réducteurs. Mais, dans les expériences actuelles, on ne pouvait imputer que l'insuffisance de l'aération. Or, si on dispose le liquide de culture dans des matras plus larges, et en couches plus minces, de façon à favoriser l'oxydation, on n'arrive qu'à une production plus intense d'acide nitreux : l'acide nitrique n'apparaît pas.

Reprenant l'idée primitive de Munro, d'après laquelle la nitrification pourrait dépendre du concours de deux microorganismes distincts, l'un produisant de l'acide nitreux, l'autre de l'acide nitrique. Winogradsky se procura des échantillons des terres les plus variées et, au lieu de procéder à l'isolement immédiat des organismes spéciaux par des passages successifs sur des liquides contenant un sel ammoniacal, il résolut de laisser se développer librement tous les êtres capables de vivre dans le milieu de culture purement minéral jusqu'ici utilisé. La période d'incubation varia entre trois et vingt jours, suivant l'échantillon de terre employé. L'acide nitreux prenait d'abord naissance ; peu à peu il diminuait, et l'on voyait apparaître l'acide nitrique. Les organismes nitrificateurs, transportés directement de leur milieu naturel dans un milieu facilement nitrifiable (contenant un sel ammoniacal), fournissent donc d'abord de l'acide nitreux, et l'acide nitrique ne se montre que lorsque l'ammoniaque a totalement disparu. On en conclut que la production de l'acide nitreux constitue un stade intermédiaire entre l'ammoniaque initiale et le terme d'oxydation ultime, l'acide nitrique. Si on veut que l'acide nitreux d'abord formé s'oxyde plus rapidement, on devra ajouter au liquide des doses croissantes d'un sel ammoniacal, non pas à mesure que l'azote ammoniacal disparaît de la liqueur, mais à mesure que disparaît l'azote nitreux. On peut même accélérer cette transformation à tel point que l'azote nitreux ne se rencontre plus, et que l'oxydation paraisse fournir d'emblée de l'azote nitrique. Il en résulte que, dans un milieu liquide, il est pos-



sible de produire de l'azote nitrique, ainsi que cela se passe dans les milieux naturels.

Ferment nitrique. — *L'oxydation de l'ammoniaque est donc le résultat de l'activité de deux microorganismes distincts.* En effet, Winogradsky a établi de la façon la plus nette que le ferment nitreux, isolé par cultures successives au début de ses recherches, était incapable de fournir autre chose que de l'acide nitreux. Au bout de plusieurs semaines, les cultures ne renfermaient que l'acide nitreux. Ce ferment nitreux, appelé par Winogradsky *Nitrosomonas* (ferments de l'ancien monde) et *Nitrosococcus* (ferments du nouveau monde) a été rencontré dans toutes les terres où il a été cherché. Sa fonction biologique est toujours spécifique ; au point de vue morphologique, il subit des variations importantes, d'où les deux noms que leur a attribués l'auteur.

La formation d'acide nitrique, par oxydation de l'acide nitreux, est également une fonction spécifique dévolue à un microorganisme spécial. Si on prend des terres dans lesquelles on a constaté une énergique nitrification, et qu'on en ensemeence une trace sur des milieux ne contenant pas d'ammoniaque, mais uniquement du nitrite de potassium, on aboutit, plus ou moins rapidement, mais toujours, à la transformation du nitrite en nitrate. On réalise une culture pure du ferment nitrique (*Nitromonas*, *Nitrobaeter*) en introduisant une parcelle de terre en voie de nitrification dans une liqueur ne renfermant que du nitrite de potassium. On épurera le ferment en ensemençant quelques gouttes de cette liqueur dans un nouveau milieu à nitrite, et ainsi de suite.

La fonction de ce dernier microorganisme est spécifique ; car si, avec une culture épurée de ce microbe, on ensemeence une liqueur ammoniacale, il ne se produit ni nitrite, ni nitrate. Le microbe nitrique est incapable d'oxyder l'azote ammoniacal. C'est un ferment d'une extrême petitesse : son diamètre moyen est de 0,5 μ . On peut également l'isoler à l'état de pureté sur silice gélifiée.

D'après Boullanger et Massol, si le ferment nitreux ne peut être isolé que sur un milieu purement minéral, il est possible



d'isoler le ferment nitrique sur gélose (2 grammes de nitrite de sodium, 1 gramme de carbonate de sodium calciné, traces de phosphato de potassium, 15 grammes de gélose pour un litre). L'ensemencement se fera avec de la délayure de terre. Les ferments nitreux (car il en existe plusieurs espèces) se présentent soit sous forme de bactéries sphériques immobiles, ayant jusqu'à 3μ de diamètre (*Nitrosococcus*), soit sous forme de bâtonnets courts, elliptiques et mobiles (*Nitrosomonas*). On ne connaîtrait qu'une seule forme de ferment nitrique, en petits bâtonnets immobiles de $0,5 \mu$ de long sur $0,25 \mu$ de large.

Nitrification dans la terre arable. — Que se passe-t-il dans le milieu naturel où a lieu la nitrification, c'est-à-dire dans la terre arable ? Winogradsky stérilise un certain nombre d'échantillons de terre, qui reçoivent un peu de sulfate d'ammonium et sont humectés d'une dose d'eau suffisante. Dans un premier échantillon, on introduit du ferment nitreux pur, dans un second du ferment nitrique pur, dans un troisième les deux ferments ensemble. Un échantillon de terre témoin, non stérilisé, permet de suivre les progrès d'une nitrification naturelle.

Voici ce que l'on constate : 1° la terre normale ne donne que des nitrates, les nitrites n'y ont qu'une existence tout à fait passagère. Même en présence de quantités notables d'un sel ammoniacal, l'oxydation des nitrites par le ferment nitrique n'est pas entravée : il en résulte que, dans le sol, le phénomène nitrificateur diffère absolument de celui qui a lieu dans une solution artificielle où la présence de l'ammoniaque en excès annihile l'oxydation des nitrites par le ferment nitrique ; 2° le ferment nitreux ne fournit, dans la terre préparée comme il a été dit plus haut, que de l'acide nitreux, et celui-ci ne s'oxyde jamais ; 3° le ferment nitrique seul n'oxyde pas l'ammoniaque ; 4° l'introduction des deux ferments fournit de l'acide nitrique, et les choses se passent comme dans l'échantillon de terre témoin.

Le remplacement dans le liquide de culture du sulfate d'ammonium par du phosphate, particulièrement propice à la vie microbienne, n'exerce pas d'influence favorable sur la fermentation nitreuse ; peut-être la transformation des nitrites en nitrates est-elle alors accélérée (Marseille, 1896).



Energie comparée des ferments nitreux et nitrique. — Nous avons vu que, dans les milieux liquides, il se produisait surtout des nitrites ; dès le début des études précises entreprises sur la nitrification ce fait paraissait général. Munro avait supposé que l'acide nitreux était peut-être le résultat de l'activité d'un organisme spécial, ou bien que, en présence de carbone organique, le microbe nitrificateur lui-même portait de préférence l'oxygène sur le carbone plutôt que sur l'acide nitreux.

Voici, d'après Winogradsky, comment on peut expliquer cette apparition constante des nitrites dans les liquides de culture. Lorsque deux microbes sont en présence, le plus énergique entrave et annule même le développement de l'autre. Or, d'après les mesures de ce savant, la vitalité du microbe nitreux est incomparablement plus grande que celle du microbe nitrique. Dans des conditions identiques, le premier oxyde beaucoup plus vite une certaine dose d'azote ammoniacal que le second n'oxyde la même dose d'azote nitreux. Si donc, dans une liqueur contenant un sel ammoniacal, onensemence ensemble les deux ferments, le microbe nitreux est le seul qui rencontre, dès le début, les conditions favorables à son développement, et lorsque le ferment nitrique peut commencer son travail, au moment où il se trouve en présence des nitrites qui viennent de prendre naissance, le ferment nitreux est si abondant qu'il s'empare de tout l'oxygène dissous dans le liquide et anéantit ainsi peu à peu la fonction oxydante du ferment nitrique. Au bout de quelques passages sur des solutions ammoniacales, le ferment nitrique, de plus en plus affaibli, finit par disparaître. Cependant Winogradsky a parfois observé une persistance de ce dernier ferment (dans une terre provenant de Quito par exemple) ; ce qui prouve que la vitalité du microbe nitrique peut être, dans certains cas, égale et supérieure même à celle du microbe nitreux.

Pourquoi, dans la terre arable, l'apparition de l'acide nitreux est-elle suivie si rapidement de celle de l'acide nitrique ? La terre est un milieu poreux, et la surface qu'elle présente à l'oxygène ambiant est beaucoup plus grande que celle d'un liquide qui n'est en contact direct avec l'air que par sa partie supérieure. Aussi le développement du ferment nitreux ne peut-il entraver celui du ferment nitrique. Il n'y a donc pas accumulation de nitrites dans le sol, à moins que ne se



trouvent réalisées des conditions d'aération défavorables, telles que celles qui résultent de la submersion. La production des nitrites s'observe également dans le cas où le sol reçoit des doses exagérées, ou trop souvent répétées, de sels ammoniacaux. Il faut également remarquer que, dans le sol, la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal est lente, et que, normalement, il n'y a jamais excès d'ammoniaque. Celle-ci est oxydée par le ferment nitreux au fur et à mesure de sa formation, et la vitalité de ce dernier ferment est proportionnée aux faibles doses d'ammoniaque qu'il rencontre. Le ferment nitrique peut donc agir concurremment et oxyder l'azote nitreux.

Nous allons voir bientôt qu'il y a lieu de modifier légèrement ces différentes interprétations dans le cas d'une nitrification naturelle.

Il est même possible, ainsi que l'a démontré Demoussy (1899), d'obtenir directement de l'acide nitrique dans les milieux liquides. Pour cela, il convient de préparer un milieu contenant les deux ferments nitreux et nitrique, dans lequel ce dernier soit très actif. Onensemence avec une trace de terre des solutions de nitrite de potassium, contenant un peu de phosphate de potassium et de carbonate de calcium. La transformation de 20 milligrammes d'azote nitreux en azote nitrique demanda, dans ces conditions, quinze jours. Une quantité égale de nitrite fut alors ajoutée ; son oxydation s'accomplit en quatre jours, puis en trois : ce qui prouve que le microbe nitrique était particulièrement vigoureux dans ce milieu. On introduisit alors 20 milligrammes d'azote sous forme de sulfate d'ammonium ; au bout de deux semaines la réaction de l'ammoniaque était nulle, et, à aucun moment, on ne put déceler dans la liqueur la présence des nitrites. Une nouvelle dose d'ammoniaque fut oxydée en quatre, puis en trois jours, et cela sans apparition d'azote nitreux.

Interprétation exacte du phénomène nitrificateur (1). —

L'absence de l'acide nitreux dans les conditions naturelles de la nitrification, opposée à la présence constante de cet acide dans les expériences artificielles, a été récemment interprétée d'une façon intéressante par Boullanger et Massol (1904).

Nous avons vu antérieurement que, dans la transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique, il y avait une phase intermédiaire : la phase nitreuse. D'après Winogradsky, le ferment nitreux, plus vigoureux, entraverait la végétation du

(1) On lira avec grand profit les travaux remarquables, surtout au point de vue pratique, publiés par Calmette avec la collaboration de Rolants, Boullanger, Constant, Massol et Buisine, sous le titre de *Recherches sur l'épuration biologique et chimique des eaux d'égout* (Paris, Masson, éditeur, 9 volumes, 1905-1914). Nous avons fait à ces travaux de nombreux emprunts.



ferment nitrique, lequel ne peut se multiplier qu'au moment où la fermentation nitreuse est achevée. Au contraire, dans la terre arable, c'est-à-dire dans les conditions d'une nitrification normale, la *symbiose* des microbes nitreux et nitrique aurait lieu grâce à la porosité du milieu. Cependant Warington avait montré (1891) que la présence de l'ammoniaque paralysait le ferment nitrique. Ce fait avait été reconnu exact par Winogradsky et Omeliansky. Le ferment nitrique présente, en effet, une sensibilité extraordinaire vis-à-vis de cette base : 5 milligrammes par litre gênent son action, et celle-ci est annulée en présence de 150 milligrammes d'ammoniaque. Dans les conditions d'une expérience de laboratoire telle que celle qu'a pratiquée Winogradsky, la présence successive des acides nitreux et nitrique est la règle à peu près générale. Mais, dans les conditions naturelles, il n'en est plus de même. En effet, la symbiose se produit dans les lits bactériens d'épuration des eaux résiduaires au contact de doses d'ammoniaque parfois très élevées. Il se forme simultanément de faibles quantités d'acide nitreux et de fortes quantités d'acide nitrique : les eaux, après épuration, contiennent encore de l'ammoniaque libre. On voit donc qu'ici les deux phénomènes nitreux et nitrique sont superposés, et non pas successifs.

Ces résultats contradictoires entre la nitrification des liquides employés au laboratoire et la nitrification naturelle paraissent indiquer, d'après Boullanger et Massol, que si l'ammoniaque agit de façon défavorable sur le ferment nitrique végétal au point d'entraver sa multiplication, cette base paraît, au contraire, peu active sur la fonction oxydante du microbe développé. On pourrait, par conséquent, expliquer de cette façon l'opposition qui semble exister entre la nitrification, telle qu'on la voit se dérouler dans les essais de laboratoire, et telle qu'elle se passe dans la nature. Au laboratoire, onensemence en général le microbe en petites quantités dans un milieu ammoniacal : d'où mauvaise multiplication du ferment nitrique et absence de symbiose. Dans la nature, au contraire, on se trouve en présence de supports, sol ou lits bactériens d'épuration, bien peuplés de microorganismes en voie continue de nitrification ; la symbiose doit donc être la règle : car si l'ammoniaque agit



sur le ferment nitrique en mettant obstacle à sa multiplication, il faudrait atteindre de très fortes doses de cet aleali pour retarder légèrement la fonction oxydante de ce microbe.

L'action nocive observée par Winogradsky dans les milieux de culture employés par lui provient du dégagement de l'ammoniaque mise en liberté par le carbonate alealin ou alealino-terreux ajouté à ces milieux de culture, car le sel ammoniacal en lui-même ne gêne pas le ferment nitrique si la liqueur ne renferme pas de substances capables de déplacer l'ammoniaque en quantités suffisantes pour empêcher le développement de ce dernier ferment.

Voici donc comment les choses doivent se passer en réalité d'après Boullanger et Massol. Deux cas sont à considérer.

1^o Les milieux qui nitrifient ne contiennent pas d'ammoniaque libre, ni de substances capables d'en dégager en proportions notables : tel est le cas des terres arables. Ici, l'évolution du ferment nitrique n'est pas gênée par la présence de sels ammoniacaux : aussi la nitrification s'établit-elle d'emblée sous forme symbiotique ; les nitrates apparaissent directement, et l'on ne trouve que peu ou pas de nitrites.

2^o Les milieux qui nitrifient contiennent de l'ammoniaque, du carbonate d'ammonium ou des substances susceptibles d'en provoquer la formation : c'est le cas des eaux d'égout ou des eaux résiduaires. La multiplication du ferment nitrique peut alors se faire en présence d'ammoniaque, tant que la dose de cette base n'est pas trop élevée. Il est donc facile d'expliquer ce qui se passe dans la nature, par opposition aux observations faites au laboratoire, de la façon suivante. Dans ce dernier cas, on ensemeince les deux ferments en petite quantité, ainsi qu'il est dit plus haut et, cela, dans un milieu qui contient de fortes proportions d'ammoniaque. Il en résulte que la multiplication du ferment nitrique se fait mal ou même pas du tout, et que la phase nitreuse se termine avant que la phase nitrique ait commencé : il n'y a donc pas de symbiose possible. Mais si on ajoute maintenant de l'ammoniaque, même à forte dose, après une première nitrification qui a permis le développement successif des deux organismes, l'action de la base devient insensible vis-à-vis du ferment nitrique ; les deux ferments nitreux



et nitrique travaillent simultanément et tout se passe alors comme dans le cas d'un phénomène naturel. On n'observe que la production de traces de nitrites. Ce sont là les faits tels qu'ils se déroulent dans la nature : on se trouve en présence de supports peuplés, en voie de nitrification continue sur lesquels l'ammoniaque est presque sans action : aussi le phénomène doit-il toujours s'effectuer sous forme symbiotique.

Rappelons ici le processus de nitrification continue, avec formation exclusive d'acide nitrique, obtenu par Demoussy et signalé à la fin du paragraphe précédent.

Il convient, de plus, de faire remarquer que l'action nocive des matières organiques sur les microbes nitrificateurs est du même ordre que celle de l'ammoniaque vis-à-vis du microbe nitrique : ces matières entravent sa *multiplication* ; elles sont à peu près sans action sur la marche des microbes bien développés. Nous allons d'ailleurs revenir bientôt sur la nutrition carbonée de ces organismes.

Cycle complet de l'oxydation de l'azote. — Les ferments nitreux et nitrique ne peuvent-ils, dans aucun cas, oxyder directement la molécule azotée complexe telle que le sol la contient ; est-il nécessaire que cette molécule azotée subisse d'abord la fermentation ammoniacale ?

Oméliansky (1899) a résolu le problème d'une façon très satisfaisante de la façon suivante. Si on met des ferments nitreux et nitrique bien purs en présence d'urée, d'asparagine, de bouillon, de blanc d'œuf, etc., ces substances restent intactes : l'azote organique, quelle que soit la forme qu'il affecte, n'est oxydé par aucun de ces deux ferments, isolés ou associés. D'autre part, l'auteur prend du bouillon étendu qu'ilensemence : 1° avec du *Bacillus racemosus*, accompagné des ferments nitreux et nitrique ; 2° avec du *B. racemosus* accompagné de ferment nitreux ; 3° avec du *B. racemosus* accompagné de ferment nitrique ; 4° avec les ferments nitreux et nitrique seuls. Dans le premier cas, on perçoit rapidement une odeur putride, puis ammoniacale. Au bout de trois semaines, apparaît l'acide nitreux ; au bout de deux mois, il n'y a plus que de l'acide nitrique. Dans le second cas, les choses se passent



comme dans le premier, mais l'acide nitreux persiste indéfiniment sans qu'il y ait production, à aucun moment, d'acide nitrique. Dans le troisième cas, il se fait seulement de l'ammoniaque, mais celle-ci ne s'oxyde pas ; dans le quatrième cas, le bouillon ne subit aucune transformation.

Il en résulte que, lorsque l'azote organique se change en azote nitrique, ainsi que cela a lieu dans tous les bons sols arables, *le concours de trois sortes de microorganismes est indispensable* : 1° l'azote organique subit une fermentation qui le transforme en ammoniaque, cette transformation étant le résultat de la présence d'espèces banales (p. 116) qui n'ont rien de spécifique ; 2° l'azote ammoniacal est oxydé en azote nitreux par un microbe spécial qui, d'un endroit à un autre, peut présenter des différences morphologiques, mais dont la fonction est absolument spécifique et qui ne peut aller plus loin que le stade nitreux ; 3° l'azote nitreux est, à son tour, oxydé en acide nitrique par un microbe spécifique, bien distinct du précédent, incapable à lui seul d'oxyder l'azote ammoniacal.

Telles sont les différentes phases par lesquelles passe le phénomène nitrificateur dont nous connaissons maintenant le mécanisme, grâce aux travaux de Winogradsky. Il est juste d'ajouter que, à l'époque même où celui-ci publiait ses recherches définitives (1891), Warington arrivait de son côté, et d'une manière tout à fait indépendante, à des conclusions analogues.

Nous exposerons plus loin la suite des travaux exécutés sur la nitrification, et nous indiquerons certaines particularités relatives à la nutrition des ferments que nous venons d'étudier. Mais, auparavant, il convient de parler du mode suivant lequel les microbes nitrifiants prennent leur carbone au monde extérieur.

Nutrition carbonée des microbes nitrificateurs. — Ce mode de nutrition est des plus remarquables. Nous avons pu plus haut (p. 153) que certains expérimentateurs, Heraeus entre autres, avaient été frappés de ce fait, que la nitrification est généralement d'autant plus active qu'il y a moins de matière carbonée dans les liquides de culture ou dans les eaux en voie de nitrification. La chose semblerait surprenante puisque les microbes nitrificateurs sont dépourvus de chlorophylle. Afin d'établir d'une manière indiscutable cette propriété unique alors en son genre,



Winogradsky mit le plus grand soin à préparer des milieux rigoureusement exempts de matières organiques, et des sels minéraux absolument purs, et à garantir les cultures de toute trace de poussières atmosphériques. Il remarqua alors que le ferment nitreux, organisme incolore, peut, aussi bien à la lumière qu'à l'obscurité, se développer dans un milieu absolument exempt de carbone organique. Ce fait fut mis hors de doute par des dosages de carbone exécutés sur les liquides au sein desquels la nitrosomonade s'était développée.

Ces dosages, sur lesquels nous n'insisterons pas, se pratiquent en brûlant le carbone qui s'est fixé sur les liquides de culture à l'aide d'un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. Voici quelques chiffres. Une solution dans laquelle il s'était formé 928 milligrammes d'azote oxydé a fourni 10 mgr. 2 de carbone ; une autre qui renfermait 604 milligrammes d'azote oxydé a fourni 7 mgr. 1 de carbone. Ce carbone ne représente certainement pas le carbone total assimilé, car, pendant la durée des cultures, il s'en est perdu une certaine quantité par oxydation (respiration).

Ainsi, l'organisme nitrificateur fournit le premier exemple d'un microbe incolore, susceptible de synthèse carbonée. Winogradsky suppose qu'il s'agit ici de la synthèse d'un amide quelconque aux dépens du gaz carbonique et de l'ammoniaque.

L'assimilation du carbone ne s'opère que dans la mesure où progresse l'oxydation de l'azote ; les maxima et minima d'assimilation carbonée coïncident avec les maxima et minima d'oxydation de l'azote. Quatre expériences ont fourni les résultats suivants (en milligrammes) :

Azote oxydé	722	506,1	928,3	815,4
Carbone	19,7	15,2	26,4	21,4
Rapport $\frac{\text{azote}}{\text{carbone}}$	36,6	33,3	35,2	36

La lenteur avec laquelle s'accroît le ferment nitrique s'explique en considérant la disproportion qui existe entre son action oxydante et son pouvoir assimilateur : l'assimilation de 1 milligramme de carbone n'a lieu que s'il y a, en moyenne, formation de 35 mgr. 1 d'azote oxydé. D'après Coleman (1908), le rapport entre l'azote oxydé et le carbone assimilé semble être plus grand pour le microbe nitrique que pour le microbe nitreux.

Beijerinck (1914) a cherché si le ferment nitrique était, comme le ferment nitreux, capable de réduire le gaz carbonique : ses expériences ne lui ont pas permis de formuler une conclusion ferme à cet égard.



Les soins à apporter dans la purification des substances minérales qui servent à démontrer la fixation du carbone et dans celle des gaz qui sont au contact des liquides de culture doivent être des plus minutieux. Elfvig (1891) a montré, en effet, que certains champignons (*Briarcea*) sont capables d'utiliser comme source de carbone les vapeurs d'acide acétique, assez communes dans les laboratoires.

Expériences de Godlewski. — Il est donc bien établi que la nitrosomonade assimile dans les liqueurs où elle se développe le carbone des carbonates minéraux. Cependant Godlewski (1893) émit l'idée que ce carbone ne pouvait être emprunté qu'à l'acide carbonique aérien ou à celui des bicarbonates facilement dissociables. Cet auteur montra (en 1896) qu'une solution ammoniacale ensemencée de *nitrosomonades* ne fournit pas d'acide nitreux quand on fait traverser le ballon de culture par de l'air bien exempt de gaz carbonique, alors même que la solution nutritive renferme du carbonate magnésien.

Afin de rendre cette démonstration plus rigoureuse, Godlewski s'est servi d'appareils qui ne comportaient que des pièces en verre, et de la fabrication desquels on excluait le liège dont l'oxydation pouvait fournir des traces d'acide carbonique. Les conclusions auxquelles aboutirent les recherches ainsi entreprises furent les suivantes : il n'y a pas d'oxydation de l'ammoniaque en l'absence du gaz carbonique ; si ce dernier, au contraire, se trouve au contact des liquides de culture, la nitrification est régulière. *Il en résulte que le gaz carbonique libre est la seule source à laquelle la nitrosomonade emprunte du carbone.* Mais la dose initiale de ce gaz peut être extrêmement faible, car, à mesure que s'oxyde l'ammoniaque, il se produit de l'acide nitreux. Celui-ci décompose le carbonate de magnésium et dégage du gaz carbonique, lequel peut d'ailleurs rester fixé sur le carbonate magnésien et fournir un bicarbonate aisément dissociable. Ces conclusions ont été confirmées par Gaertner (1898).

Il est néanmoins difficile de comprendre qu'un microbe qui fixe aussi aisément l'oxygène sur l'ammoniaque possède en même temps un pouvoir réducteur assez énergique pour décomposer le gaz carbonique.

Il faut également remarquer que, d'après Godlewski, une fraction généralement assez faible de l'azote ammoniacal se dégage à l'état libre pendant la nitrification en milieux artificiels. Dans des expériences déjà anciennes, Schløsing avait montré que la quantité d'azote libre qui apparaît dans la nitrification de l'ammoniaque, au sein d'une terre bien aérée, est presque négligeable. En fait une petite fraction, soit de l'ammoniaque préexistante, soit de l'acide nitrique formé, est employée à la production d'une certaine quantité d'azote organique.



Il semble, d'après ce qui précède, que la présence de la matière organique soit un obstacle au développement des ferments nitrificateurs, et cependant la nitrification, parfois si intense dans les sols, a toujours lieu dans un milieu plus ou moins riche en humus. Nous examinerons bientôt d'une façon particulière ce point très important.

Quelques données nouvelles sur les ferments nitrificateurs. —

Les travaux si remarquables de Winogradsky ont été repris par de nombreux expérimentateurs ; ils demeurent entiers dans leurs conclusions fondamentales. Toutefois certains faits intéressants et nouveaux ont été mis au jour depuis vingt ans qui réclament une description sommaire (1).

La difficulté, très grande d'abord, de l'isolement des bactéries nitrifiantes à l'état de pureté avait porté certains auteurs à supposer que le carbone organique pouvait leur être de quelque secours. Burri et Stützer (1896) pensaient avoir isolé un microbe nitrique capable de se développer sur gélatine. Stützer et Hartleb, tout en confirmant en grande partie les travaux de Winogradsky, croyaient que le microbe nitrique pouvait se transformer en-champignon. Mais ce dernier auteur (1896), en soumettant ses propres essais à un nouveau contrôle, remarqua qu'à côté du microbe nitrique se rencontrent très fréquemment des organismes, voisins morphologiquement, mais incapables d'oxyder l'azote nitreux. Ceux-ci se développent bien sur gélatine ou sur bouillon nutritif, alors que le véritable microbe nitrique ne s'y développe pas : aucun organisme nitrificateur ne peut vivre sur gélatine. L'emploi de cultures impures est ici la source des erreurs. Cette opinion a été confirmée peu après par Fraenkel, Krüger et Rullmann.

D'après Omeliansky (1899), si l'on peut employer avec succès la silice gélifiée contenant un sel ammoniacal pour isoler le microbe nitreux et la gélose nitrifiée pour isoler le microbe nitrique, opinion confirmée depuis par Boullanger et Massol, il vaut mieux encore isoler le microbe nitreux sur plaques de gypse. A une solution contenant par litre 0 gr. 5 de sulfate de magnésium, 2 grammes de sulfate d'ammonium, 2 grammes de sel marin, 0 gr. 4 de sulfate ferreux, 2 grammes de phosphate bipotassique, on mélange du carbonate magnésien et on en imbibe des plaques de gypse ; ou bien, on gâche ensemble du plâtre avec 10 p. 100 de carbonate de magnésium et de l'eau. Après la prise de la substance, on mouille la plaque avec la solution précédente. Perotti (1905) emploie des cubes de carbonate magnésien qu'il humecte avec une solution ap-

(1) Calmette, *loc. cit.*



Une remarque importante d'Omeliansky doit être faite ici : cet auteur a montré (1902) que le microbe nitreux ne semble pas sécréter de *diastase oxydante* à laquelle on pourrait imputer l'oxydation de l'ammoniaque, et que *sa présence effective* est indispensable à la marche régulière du phénomène nitrificateur. Si, dans les solutions nutritives, on remplace le sel ferreux par un sel manganoux, il n'en résulte aucune amélioration.

D'après Beijerinck (1914), il existerait une bactérie (*Bacillus manganicus*) susceptible d'oxyder le carbonate manganoux ; plusieurs champignons inférieurs jouiraient de la propriété de changer l'oxyde manganoux en oxyde manganique.

Influence d'une addition de matière organique sur la nitrification. — Examinons s'il n'y a pas lieu, vis-à-vis des microbes nitrificateurs, de faire une sorte de classement entre les matières organiques. — L'absence complète de toute substance organique n'est pas une condition absolument indispensable à la bonne marche de la nitrification. Winogradsky et Omeliansky (1899) ont eux-mêmes montré que, si la présence de peptone en certaines proportions gêne et même abolit la fonction spécifique du microbe nitrique, il n'en est pas ainsi pour tous les corps carbonés. En présence d'un ensemencement massif, la peptone peut favoriser la fermentation nitrique aux doses de 0 gr. 025 à 0 gr. 2 p. 100. Le glucose, à la dose de 0 gr. 025 p. 100, agit favorablement, mais une dose de 0 gr. 03 p. 100 semble être la limite de cette action favorable. L'urée, à la dose de 0 gr. 05 à 0 gr. 04 p. 100, active la fermentation s'il y a ensemencement massif ; elle la ralentit à des doses supérieures à 0 gr. 5. L'asparagine à la dose de 0 gr. 05 p. 100 est défavorable ; il en est de même de la glycérine. Des substances organiques plus complexes, telles que les infusions de foin, de feuilles sèches, peuvent être utiles en deçà de certaines proportions, nuisibles au delà. L'urine, à une concentration de 2 p. 100, possède une action retardatrice imputable à l'ammoniaque qui se forme pendant la stérilisation. Warington avait déjà fait voir que la présence de cet alcali entrave la transformation des nitrates en nitrites. Si l'acétate de sodium à 2 p. 100 retarde la transformation de l'acide nitreux en acide nitrique, le butyrate, au contraire, a peu d'effet à cet égard. Le microbe nitreux est plus sensible que le microbe nitrique vis-à-vis des substances



azotées telles que la peptone et l'asparagine. Plus la molécule d'un corps donné est complexe, plus elle est décomposable et assimilable par le plus grand nombre des espèces microbiennes. plus facilement elle retarde la croissance et paralyse le travail des microbes nitrificateurs. Warington avait montré, longtemps auparavant (1891), qu'une addition de 0 gr. 25 p. 100 d'acétate de calcium à une culture en voie de nitrification favorisait le phénomène.

Ajoutons que Stützer (1901) a confirmé la plupart des vues de Winogradsky et Omeliansky relativement au retard ou à l'arrêt que subit la fermentation nitrique en présence de certaines substances organiques. Il faut également remarquer que telle substance carbonée peut être nuisible quand elle se trouve dans un liquide artificiel de culture où n'existent, en fait d'êtres vivants, que les microbes nitreux ou nitrique, alors que dans le sol, milieu naturel, cette substance n'a pas d'influence. Wimmer (1904), ainsi que Coleman, ont fait voir que l'action nocive du sucre de canne ou celle des sels d'acides organiques est bien moindre dans le sol que dans les solutions artificielles. De très fortes doses d'engrais organiques (fumier), introduites dans une terre arable, peuvent suspendre la nitrification et occasionner des phénomènes de réduction avec départ d'azote libre. Mais l'humus naturel, même lorsqu'il est abondant, n'entrave pas la nitrification : il accélère la marche du phénomène puisqu'il constitue la source primordiale de l'azote des sols.

D'après Karpinski et Niklewski (1908), l'extrait de terre et les humates sont particulièrement favorables à la nitrification : telle est aussi l'opinion de Bazarewski (1909). Nous allons d'ailleurs revenir sur le rôle de l'humus dans le paragraphe suivant.

Enfin, d'après Beijerinck (1914), contrairement à l'opinion de beaucoup d'expérimentateurs, le ferment nitrique est capable de vivre facilement en présence de matières organiques et de se développer à leurs dépens. Mais il perd alors très vite son pouvoir oxydant et devient saprophyte. Cependant il peut, sans que ce pouvoir oxydant soit aboli, transformer des traces de matière organique. La gélose, soigneusement lavée pour la priver des substances solubles qu'elle contient, est susceptible de servir à la culture du ferment nitrique, aux lieux et places des plaques de silice. La concentration minima de matières organiques solubles qui détruit le pouvoir nitrifiant du microbe est d'environ 0,05 p. 100.

Barthel (1915) a montré que, en présence de matières organiques azotées solubles, la nitrification n'avait lieu qu'à partir du moment où ces matières sont complètement minéralisées. Celles de ces matières que l'on rencontre dans le sol arable n'ont une influence négligeable que lorsqu'elles sont insolubles.



En résumé, si le microbe nitreux est extrêmement sensible à la présence de matières organiques, le microbe nitrique l'est beaucoup moins. Une substance organique sera, en général, d'autant moins nocive qu'elle sera moins soluble dans les milieux ambiants.

Influence de l'humus sur la nitrification. — Voyons maintenant ce que donne, au regard de la nitrification, la matière organique du sol. Cette matière possède une constitution très éloignée de celle de ses générateurs (cellulose, albuminoïdes des végétaux). Il était évident, *a priori*, que sa présence habituelle, mais en quantités variables dans la terre, ne pouvait nuire à l'évolution du phénomène nitrificateur. D'après Müntz et Lainé (1906), la forme même qu'affecte le carbone dans l'humus n'est pas une entrave à la nitrification. Voici les résultats que ces auteurs ont obtenus en ajoutant à plusieurs terres suffisamment calcaires, et très inégalement riches en carbone, une dose de 1 p. 1000 de sulfate d'ammonium :

		Terre de jardin	Terreau consommé	Terre silico- calcaire	Terre argileuse	Terre argilo- calcaire
Teneur p. 100 des terres en carbone ...		3,6	17,6	1,5	1,0	1,5
Azoto nitrifié par kilogr. de terre au bout de ...	2 jours	0,036	0,117	0,000	0,009	0,005
	7 jours	0,090	0,209	0,037	0,040	0,020
Azoto nitrifié par kilogr. de terre ad- ditionnée de 2 p. 100 de SO ⁴ (NH ⁴) ² au bout de :	7 jours	0,282	0,411	0,007	0,064	0,064

On voit, d'après ces chiffres, que la nitrification se produit d'autant mieux que la matière carbonée du sol est plus abondante : l'abondance de l'humus favorise donc la nitrification mais elle n'est pas indispensable pour une nitrification active. En effet, si, dans l'essai précédent, on développe une nitrification continue par addition de sulfato d'am-



monium, jusqu'à établissement d'un régime normal, on trouve, au bout de 32 jours :

Azote nitrifié par kilo-					
gramme de terre	0,743	1,346	0,653	0,906	0,871
(en grammes)					

Il est clair que les terres les plus pauvres en humus produisent des nitrates avec une activité qui ne diffère pas beaucoup de celle des terres plus riches ; parfois même la nitrification des terres pauvres dépasse celle de ces dernières. *La différence n'existe que dans la période initiale* de l'alimentation en matière nitrifiable ; cette différence s'atténue dans la suite. Dans l'opinion de Müntz et Lainé, le rôle de la matière organique apparaît comme un rôle de début. L'expérience montre que, d'une manière générale, une terre est d'autant plus chargée d'organismes actifs, et plus apte à nitrifier, qu'elle renferme plus d'humus.

Les résultats que nous venons de citer mettent bien la question au point. Il semblait, en effet, ainsi que nous l'avons établi plus haut, qu'il y eût antagonisme entre la présence du carbone organique et le développement des ferments nitrificateurs, avec les réserves que nous avons faites à cet égard. On comprend néanmoins que les phénomènes observés au sein des liquides de culture ne doivent pas être interprétés de la même façon que ceux qui se passent dans les milieux naturels de la nitrification. La *forme du carbone* diffère essentiellement dans les deux cas. Dans les milieux artificiels, l'addition d'une substance carbonée diffusible exerce, ainsi que nous l'avons vu, une action défavorable ou mortelle sur les organismes nitrificateurs lorsqu'on dépasse une concentration, même très faible ; le carbone, tel qu'il existe dans la molécule colloïdale de l'humus, ne possède plus ce pouvoir toxique.

Les observations abondent dans lesquelles il est démontré que l'humus, loin d'être une entrave à la nitrification, la favorise au contraire (en présence de calcaire). Les faits contraires, signalés par Pichard à un certain moment, semblent exceptionnels. D'après Buhlert et Fickendey (1906), le pouvoir nitrificateur d'un sol serait à peu près proportionnel à sa teneur en humus. L'excès d'humus ne devient nuisible que lorsque



la dose de calcaire que contient un sol est insuffisante pour en saturer l'acidité, ou lorsque l'oxygène y circule mal ; il se produit alors du gaz carbonique qui peut rester confiné, et l'atmosphère devient réductrice. Un phénomène de ce genre se réalise dans les terres très compactes additionnées d'une trop forte quantité de matières organiques.

Toutefois il ne faut pas exagérer l'influence de l'aération ; Schløsing, ainsi que nous l'avons vu antérieurement, a constaté la production de doses d'azote nitrique très voisines en présence d'atmosphères contenant : 10, 11, 16, 21 p. 100 d'oxygène.

Si l'humus n'est pas une entrave à la nitrification, ainsi que nous venons de l'établir, il paraîtrait cependant que l'ammonisation de son azote organique est généralement assez lente, beaucoup plus lente, par exemple, que celle de l'azote d'une matière organique intacte n'ayant pas encore subi les phénomènes de l'humification. C'est ainsi que l'azote des tourteaux nitrifie beaucoup plus rapidement que l'azote humique (Pichard).

Quelques mots maintenant sur la façon dont se comporte, vis-à-vis de la nitrification, un milieu riche en matières organiques et en azote.

La nitrification du *fumier de ferme* en tas est chose anormale ; cette nitrification ne pourrait avoir lieu qu'à la surface du tas, là où l'aération est suffisante, et lorsque la fermentation aérobie, qui dégage beaucoup de chaleur, est achevée. A l'intérieur de la masse, l'atmosphère est dépourvue d'oxygène. Il a été cité des exemples de nitrification du fumier en tas ; mais la quantité de nitrates formée est généralement très faible, sauf dans quelques cas où il y avait eu addition de chaux (Maercker). La réaction fortement ammoniacale que présente le fumier bien arrosé de purin s'oppose, entre autres causes, à l'établissement de la nitrification. Toutefois, d'après Niklewski, le ferment nitreux peut coexister dans le fumier à côté des ferments dénitrifiants.

Influence de la présence des nitrites et des nitrates sur le développement des microbes de la nitrification. — Boullanger et Massol (1903) ont indiqué la température de 45° comme étant fatale aux microbes nitreux après cinq minutes ; les ferments nitriques résistent jusqu'à 55°. La température optimum de culture pour les deux espèces de ferments est de 37° environ. En milieu liquide, le ferment nitreux cesse d'agir lorsque la concentration en sulfate d'ammonium atteint 5 p. 100. Le développement de ce ferment se ralentit lorsqu'il y a production de 8 à 10 grammes de nitrite de magnésium au litre ; il s'arrête



si la proportion atteint 13 à 15 grammes. La présence des nitrites de potassium ou de sodium dans les milieux où l'onensemence le ferment nitreux est nuisible, même à faibles doses (1 à 7 grammes au litre) ; la présence des nitrates de calcium ou de magnésium n'entrave l'action des microorganismes que lorsque la concentration atteint 1 p. 100 au moins. La transformation des nitrites en nitrates par le ferment nitrique devient d'autant plus difficile que la concentration du milieu en nitrites est plus forte. Si cette concentration atteint 2 p. 100, la nitrification est suspendue.

La présence des nitrates de potassium, de sodium, de magnésium, dans les liquides où l'onensemence le ferment nitrique, n'entrave pas son développement tant que la proportion de ces sels est inférieure à 20 à 25 grammes par litre ; le nitrate de calcium ralentit la nitrification à la dose de 12 grammes par litre.

En somme, le ferment nitrique est très sensible à la dose des nitrites auxquels il s'attaque ; sa sensibilité est beaucoup plus grande à cet égard que celle du ferment nitreux vis-à-vis de l'ammoniaque.

À l'inverse des autres espèces microbiennes, le ferment nitrique est plus gêné par la concentration du produit sur lequel il agit (nitrites) que par la concentration du produit auquel il donne naissance (nitrates).

Une remarque intéressante doit être faite ici : D'après Gréages, Carter et Goldthorpe (1919), les sels qui stimulent le plus l'activité végétale sont aussi ceux qui accélèrent la nitrification dans le sol. Leurs effets sur les plantes semblent dus principalement à l'action qu'ils exercent sur les bactéries en général. Celles-ci, à leur tour, rendent assimilable une plus grande quantité d'éléments profitables à la végétation.

Nitrification dans les milieux naturels. Applications. — Nous allons indiquer, dans ce qui va suivre, quelques particularités que présente la nitrification dans son milieu naturel, c'est-à-dire dans la terre arable.

1° **ROLE DE L'EAU.** — De tous les facteurs qui influent sur la nitrification, il n'en est pas de plus important que l'eau. La



dose d'humidité optimum que doit renfermer un sol, chez lequel on suppose réunies toutes les conditions indispensables à la nitrification, varie essentiellement avec la structure physique de ce sol. Si les éléments de la terre sont grossiers, si la circulation de l'eau s'effectue aisément, une dose relativement faible de ce liquide assurera une nitrification parfaite. Si les éléments sont, au contraire, très fins, une teneur en eau très supérieure à la précédente sera indispensable à la bonne marche du phénomène. C'est ce que Schlœsing fils (1897) a mis en évidence dans une expérience très frappante.

L'observation journalière indique que la nitrification est moins active, en général, dans les terres fortes à éléments très fins que dans les terres à éléments grossiers : il semble, en effet, que la perméabilité du sol pour l'air soit moindre dans le premier cas, et qu'il faille mettre ce retard à la nitrification sur le compte d'un manque d'oxygène. Schlœsing fils montre que, très souvent, ce n'est pas l'air qui manque à ces terres fortes, mais bien l'eau. La chose a même lieu lorsque ces terres fortes présentent des taux d'humidité égaux, voire supérieurs, à ceux des terres légères dans lesquelles les combustions sont très actives. A l'état normal, lorsque l'eau ne se trouve pas dans la terre en proportions excessives, elle ne remplit pas les interstices existant entre les éléments solides (terre ressuyée). Elle revêt seulement les particules terreuses d'une couche mince. Pour un même taux d'humidité du sol l'épaisseur de ces couches sera d'autant moindre que la finesse des particules sera plus grande, puisque la surface de celles-ci ira toujours en s'accroissant. Supposons qu'un sol, contenant 10 p. 100 d'eau, renferme une forte proportion d'argile, matière dont les grains sont extrêmement fins, la couche aqueuse qui revêt chaque grain peut être tellement mince qu'elle apporte une entrave à la vie microbienne.

L'auteur précité compose des mélanges de sable quartzeux, dont le diamètre moyen est de $\frac{1}{3}$ de millimètre, d'argile très grasse dont les éléments ont un diamètre moyen inférieur à 1μ , de blanc de Meudon et d'eau, tenant en dissolution du sulfate d'ammonium. Le mélange estensemencé de microbes nitrificateurs par l'addition d'un peu de terreau, et ces sols artificiels sont introduits dans de grands flacons où l'accès de l'air est facile. Le tableau ci-joint donne la composition de cinq sols artificiels et la quantité d'azote nitrifié en 73 jours pour cent de l'azote ammoniacal ajouté (température (25-27°).



		I	II	III	IV	V
Composition des sols	Sable	100	90	80	75	70
	Argile	0	10	20	25	30
	Craie	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Eau	10	10	10	10	10
Azote nitrifié	83	94	89	56	20	

On voit que, dans les lots IV et V, là où la dose d'argile atteint 25 et 30 p. 100, la nitrification est fortement ralentie, alors que, dans les lots I, II, III, qui représentent des terres légères, le phénomène est normal. Le manque d'air ne saurait être incriminé dans le premier cas, puisque ces lots étaient très divisés et non tassés. On répond d'ailleurs à cette objection de la façon suivante. Si on augmente la dose de l'eau, l'aération doit diminuer ; or, ainsi qu'il résulte de l'examen des chiffres du tableau ci-dessous, la nitrification devient au contraire plus active : ce n'est donc pas l'air qui manque aux sols compacts, c'est l'eau.

Sable.....	70	70	70	70
Argile.....	30	30	30	30
Craie	0,5	0,5	0,5	0,5
Eau	10,6	11,5	13,2	14
Azote nitrifié	80	100	100	100

Il faut en conclure que, dans les terres fortes, la dose de l'eau capable d'entretenir régulièrement le phénomène nitrificateur doit être plus élevée que dans les terres légères.

La continuité d'action d'un phénomène biologique exige la constance des facteurs qui le provoquent. Les alternatives de sécheresse et d'humidité auxquelles est soumise la terre arable, dans les circonstances naturelles, entravent ou favorisent la nitrification ; c'est là un fait facile à observer lorsqu'il s'agit, par exemple, de la nitrification des sels ammoniacaux. Si l'humidité pouvait toujours être maintenue à un taux favorable, les sols arables, alors même qu'ils seraient enrichis de doses notables de sels ammoniacaux, seraient capables d'oxyder très régulièrement cette ammoniaque. Mais, lorsque la terre se dessèche facilement, l'oxydation de l'ammoniaque est suspendue. C'est peut-être pour cette raison que l'on a regardé parfois le sulfate d'ammonium comme un engrais toxique. Les racines des plantes supportent plus facilement le contact d'une solution relativement concentrée de nitrates que celui d'une



solution d'un sel ammoniacal à la même concentration. Toutefois, dans les conditions favorables, l'azote ammoniacal, à poids égal, nitrifie toujours plus rapidement que l'azote organique.

D'après Dehérain, il arrive souvent que, dans l'espace de vingt-quatre heures, plus d'un centième de la quantité de l'azote ammoniacal introduit est capable de nitrifier ; tandis qu'avec la matière azotée de l'humus, dans le même temps, l'oxydation ne porte que sur le millième seulement de l'azote. Lorsqu'on ajoute à une terre des doses croissantes de sulfate d'ammonium, la nitrification s'arrête à un moment donné ; presque toujours la quantité d'azote nitrique formée est d'autant plus faible que la dose de sulfate ajoutée est plus forte.

La nitrification des sels ammoniacaux, et celle du sulfate d'ammonium en particulier, présente un grand intérêt, soit qu'il s'agisse de l'épandage direct de ces substances sur la terre arable, soit que ces sels prennent naissance dans la décomposition de la matière azotée du sol ou de celle des fumiers. L'étude complète de ce phénomène est d'autant plus nécessaire que certains auteurs, à diverses époques, estimaient que la nitrification de l'ammoniaque s'accompagnait d'un dégagement d'azote gazeux. Schloesing (1889) a démontré que ce dégagement n'avait pas lieu. A cet effet, on mélange à un certain poids de terre (200 gr.) disposé sous une cloche, et dont la teneur en azote est connue, un poids connu de tel ou tel sel ammoniacal. On fait le vide dans l'appareil et on y laisse ensuite rentrer un volume d'air exactement mesuré. De temps en temps, on introduit un volume déterminé d'oxygène destiné à brûler la matière organique ainsi que les choses se passent dans les conditions naturelles, et à subvenir aux besoins des microorganismes nitrificateurs. A la fin de l'expérience, on dose l'azote dans l'atmosphère gazeuse de la cloche et dans la matière solide sous toutes ses formes.

Voici le bilan de l'une des expériences

AZOTE			
	Ammoniacal		Nitrique
Au début	0 gr. 1861		0 gr. 0026
A la fin (2 mois).	0 gr. 0267		0 gr. 1584
Azote disparu . .	0 gr. 1594	Azote apparu . .	0 gr. 1558

Il y a donc eu production de 0 gr. 1594 — 0 gr. 1558 = 0 gr. 0036 d'azote gazeux, c'est-à-dire d'une quantité qui est de l'ordre d'erreur des expériences. De semblables essais, répétés sur divers sels ammoniacaux, ont fourni des résultats identiques : la transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique ne donne pas lieu à un dégagement d'azote gazeux.



On remarquera que la quantité d'azote ammoniacal disparu l'emporte un peu sur celle de l'azote nitrique apparu, bien que la nitrification de la matière azotée de la terre elle-même ait dû se poursuivre en même temps que celle de l'ammoniaque surajoutée : ce qui montre qu'une petite fraction, soit de l'ammoniaque préexistante, soit de l'acide nitrique formé, a été employée à la production d'une certaine quantité de matière organique azotée.

Schloesing calcule que, dans les expériences analogues à celle dont il vient d'être question, il se formerait, dans l'espace d'un jour, de 6 à 16 kilogrammes d'acide nitrique à l'hectare. Les conditions de cette expérience sont des conditions naturelles en ce sens que les doses d'azote ammoniacal ajoutées au sol sont comparables à celles que l'on peut distribuer sous forme d'engrais ; seuls, la constance de la température et l'émiettement de la terre favorisent au plus haut point la nitrification dans une mesure que l'on ne rencontre pas habituellement. Les chiffres ainsi obtenus sont donc excessifs.

Müntz et Gaudechon (1912) ont constaté qu'il existe un *fonctionnement optimum* des ferments nitrificateurs à une époque qui, sous le climat de Paris, s'étend du 28 mars au 25 avril, époque que l'on désigne souvent par l'expression de *réveil de la terre*. Dans les expériences faites à cet égard par les auteurs précités, ce maximum s'est manifesté en dehors de toute action possible de la température, car celle-ci était demeurée constante, aussi bien chez la terre qui servait de semence et que l'on avait maintenue vers 0°, que chez les terres ou terreaux additionnés de sulfate d'ammonium et ensemencés, qui étaient maintenus à 26°.

D'après une hypothèse émise par Littleton et Bizzell, (1913) certaines plantes supérieures auraient sur le processus de la nitrification dans le sol une influence définie. Celle-ci varierait d'intensité avec la famille à laquelle appartient le végétal et chaque espèce posséderait à cet égard une action propre sur l'activité des microorganismes nitrificateurs.

2° INFLUENCE, SUR LA NITRIFICATION, DE LA NATURE DE L'AZOTE ORGANIQUE. — On remarque fréquemment que la nitrification, après avoir fourni une marche ascendante régulière, subit des temps d'arrêt qui ne sont imputables à aucune des circonstances extérieures indispensables à l'exercice du phénomène. Ces arrêts ou ces retards doivent probablement être mis sur le compte d'une *résistance spéciale* que présente la matière organique azotée aux différentes transformations par lesquelles elle doit passer avant que son azote prenne la forme ammoniacale.



C'est ce que montre l'expérience suivante, due à Dehérain (1887), exécutée sur une terre bien émiettée et maintenue à un degré d'humidité particulièrement favorable.

	Azote nitrifié en 1 jour par tonne de terre
Du 17 mai au 13 juin 1887	2 gr. 4
— 13 juin au 6 juillet	1 gr. 4
— 6 juillet au 26 juillet	1 gr. 9
— 27 juillet au 29 août	1 gr. 5
— 29 août au 11 octobre	0 gr. 6
— 11 octobre au 22 novembre	0 gr. 2

On sait que, toutes choses égales d'ailleurs, l'activité de la nitrification croît avec la température. D'après cela, le maximum de production des nitrates aurait dû, dans l'essai précédent, coïncider avec les très fortes chaleurs du mois de juillet de l'année envisagée, puisque la trituration du sol et les arrosages ont été effectués de la même façon à toutes les époques. Il peut même arriver que le maximum de nitrification soit reporté, chez certaines terres, à un moment où la température est relativement basse. On en conclut que le seul facteur dont on puisse incriminer l'influence, dans le cas actuel, n'est autre que la nature de l'azote de l'humus. Les irrégularités constatées ne proviennent que d'une transformation inégale de l'azote complexe. La vitalité des microbes transformateurs, aussi bien celle des microbes producteurs d'ammoniaque que celle des microorganismes nitrificateurs, pourrait également entrer en jeu. La dose absolue d'azote organique que renferme un sol n'a pas d'influence ; souvent, en effet, on verra une terre plus pauvre en azote qu'une autre nitrifier mieux que cette dernière. Cependant les sols épuisés par la culture contiennent, presque toujours, des matières azotées difficilement nitrifiables.

Cette résistance de la matière azotée apparaît bien dans l'expérience suivante, due à Marcille (1896). Trois terres renferment respectivement 2 gr. 74, 0 gr. 5, 1 gr. 2 d'azote organique par kilogramme. Elles sont étalées en couche mince, convenablement humectées (15 à 18 p. 100 d'eau), et soumises de temps en temps à la trituration. Voici quelle fut la teneur de ces terres en azote nitrique, à différentes époques, dans 100 grammes de matière :

	A l'origine 12 novembre 1895	12 décembre 1895	15 janvier 1896	24 mars 1896
I.....	3 mgr. 3	26 mgr. 0	53 mgr. 7	81 mgr. 2
II.....	4 mgr. 4	15 mgr. 6	31 mgr. 2	37 mgr. 5
III.....	8 mgr. 0	8 mgr. 0	9 mgr. 0	10 mgr. 0



Ainsi, le 24 mars, l'échantillon I contenait 23 fois plus d'azote nitrique que le 12 novembre; l'échantillon II 8,5 fois plus, l'échantillon III 1,25 fois plus. Etant données ces différences énormes, il y avait lieu de chercher si celles-ci devaient être mises sur le compte de l'énergie inégale des ferments du sol. A cet effet, de petits ballons contenant du sulfate d'ammonium en solution stérilisée furent ensemencés avec une trace de chacun des trois échantillons. Au bout de 35 jours, on dosa dans chacun d'eux l'azote nitrique : le premier, ensemencé avec l'échantillon I, contenait 38 milligrammes d'azote nitrique, le second 15,2, le troisième 19. Ces résultats ne se laissaient pas prévoir; l'échantillon III, dont les microbes nitrifient mieux que ceux de l'échantillon II, ayant donné lieu, d'après le tableau précédent, à une nitrification naturelle très peu active. La résistance à la nitrification réside donc dans une cause qui ne dépend pas des ferments eux-mêmes. On ne saurait accuser la pauvreté des échantillons précédents en acide phosphorique, car I en renfermait 0 gr. 58 au kilogramme, II en renfermait 2 gr. 8 et III en renfermait 1 gr. 2. Il en résulte que cette résistance doit être cherchée *dans la nature même de la matière azotée complexe*. L'échantillon III qui, dans les conditions naturelles, nitrifie très peu, semble contenir une matière azotée difficilement attaquable. La justesse de cette hypothèse peut se vérifier ainsi : en effet, si on chauffe à 120° une certaine quantité de cette dernière terre et si on la réensemence après chauffage, elle produit, dans un même espace de temps, plus d'acide nitrique qu'elle n'en fournissait avant chauffage. La nature de la matière azotée entre donc ici seul en jeu.

La résistance à la nitrification de certaines terres tourbeuses, additionnées de chaux, est imputable à la nature de l'humus plutôt qu'à la constitution physique de la masse. Dumont (1901) a montré que le sulfate d'ammonium était capable de nitrifier dans un pareil milieu; l'inertie de l'azole organique doit donc être rapportée à un défaut d'ammonisation.

3° INFLUENCE DE CERTAINS SELS SUR LA NITRIFICATION. — Warington a montré qu'une addition de carbonate de sodium au sol exerce une influence défavorable sur la nitrification; le bicarbonate se conduit d'une façon inverse, sa causticité étant presque nulle. Le carbonate d'ammonium, en faible quantité, nitrifie bien; mais si la dose en est exagérée, on ne voit apparaître que des nitrites et pas de nitrates. Une dose un peu forte de ce sel s'oppose même à la production de l'acide nitreux. C'est pour cette raison qu'il faut diluer le purin avant de l'épandre directement sur le sol.

D'après Boullanger et Massol, la nitrification du sulfate d'ammonium a lieu en présence des carbonates des métaux suivants : magnésium, calcium, baryum, strontium, zinc, plomb, nickel, manganèse, cuivre, fer, bismuth. On obtient une nitrification complète avec les sels ammoniacaux suivants (employés à la dose de 0 gr. 257 NH³ par litre, répondant à 1 gramme de sulfate) : arséniate, nitrate, nitrite, borate, bro-



mure, carbonate, chlorure, fluorure, hyposulfite, phosphate, phosphite, sulfite, sulfure, acétate, formiate, lactate, malate, succinate, tartrate, urate. L'arsénite, l'iode, le citrate, l'oxalate ne nitrifient que lorsque la liqueur est plus diluée (0 gr. 5 à 1 gramme par litre). Le ferment nitreux est peu sensible vis-à-vis de certains sels qui jouissent de propriétés antiseptiques à l'égard d'autres microorganismes : borate et fluorure d'ammonium, à la dose de 2 grammes par litre, nitrifient aisément. A la dose de 0 gr. 5 à 1 gramme par litre, le ferment nitrique est capable d'oxyder à peu près tous les nitrites.

D'après Dumont et Crochetelle (1893), le carbonate de potassium active la nitrification des terres riches en humus, pourvu que la quantité de ce sel ne dépasse pas 2 à 3 p. 1000 ; à plus fortes doses, ce sel est nuisible. Le chlorure de sodium n'entrave la nitrification que lorsqu'il atteint une dose élevée, soit 0,5 p. 100 d'après Delhérain ; le chlorure de potassium est moins toxique, mais son influence sur la nitrification est faible. A la dose de 7 à 8 p. 1000, le sulfate de potassium favorise la nitrification (Dumont et Crochetelle). Pichard (1884) avait déjà reconnu cette action bienfaisante, ainsi que celle des sulfates de sodium et de calcium, à la dose de 5 p. 1000. Cependant quelques auteurs attribuent au plâtre une action douteuse sur la nitrification.

Nitrification intensive. — Ainsi qu'il résulte de l'exposé que nous venons de faire, le phénomène nitrificateur est d'une constance remarquable. Les microbes nitreux et nitrique se rencontrent partout et, lorsque les conditions que nous avons établies plus haut (p. 147) sont réalisées, l'azote ammoniacal se change en azote oxydé. Mais l'intensité du phénomène varie lorsque l'intensité des facteurs qui en règlent l'existence varie elle-même. Les oscillations, considérables parfois, que subit la dose de l'humidité dans le sol, les changements brusques ou progressifs de la température, la nature de l'azote organique sont les trois facteurs qui ont le plus d'influence sur la variabilité de la nitrification.

Müntz et Lainé (1905) ont cherché à accélérer dans des proportions très notables le phénomène nitrificateur, en opérant sur des solutions de sels ammoniacaux que l'on faisait couler sur des supports solides et inertes étalés au contact de l'air. Les escarbilles concassées, employées avec succès dans les champs d'épuration, constituent un milieu très oxydant. Mais, d'après les auteurs précités, le noir animal en grains favorise encore mieux l'oxydation, surtout lorsqu'on opère avec des solutions de sulfate d'ammonium relativement con-



centrées (7 gr. 5 dans 1 litre). Sous un volume de 10 décimètres cubes, le noir peut produire, par jour, une quantité d'acide nitrique de 8 gr. 1 exprimée en NO^3K . La concentration du sulfate donnée ci-dessus semble correspondre au maximum d'effet ; une liqueur plus concentrée (10 grammes) nitrifie moins bien. On a pu employer jusqu'à 960 centimètres cubes de solution ammoniacale par jour pour 10 décimètres cubes de noir. En opérant à 30° , si l'on établissait sur la surface d'un hectare une couche de noir en grains de 2 mètres de hauteur, ensemencée au préalable d'organismes nitrificateurs, le tout étant clos et abrité, il serait possible, en arrosant méthodiquement la masse avec la liqueur sulfatée précédente, d'obtenir un poids de 16.000 kilogrammes de nitrate de potassium par jour, soit près de 6 millions de kilogrammes de nitre au bout d'une année. Le liquide ainsi chargé de nitre est fort dilué (8 à 9 grammes au litre) ; mais on pourrait y introduire une quantité de sel ammoniacal égale à celle qui était contenue à l'origine, et refaire passer sur le lit oxydant la liqueur contenant en même temps du nitre et du sel ammoniacal. On recommencerait ainsi un certain nombre de fois jusqu'à ce que la proportion de nitre formée s'opposât à la nitrification.

Les auteurs ont essayé de transporter cette nitrification intensive dans la terre arable. Celle-ci, maintenue à un degré d'humidité favorable et constant, et sa température oscillant entre 15 et 22° , était remuée de temps en temps pour simuler un labour. Voici quelques-uns des résultats obtenus. Un mélange à parties égales de terre franche et de terreau, additionné de 2 p. 100 de sulfate d'ammonium, a fourni, en vingt-quatre heures et par kilogramme de matière, 0 gr. 350 de nitrates, soit 350 grammes par mètre cube. Une nitrière d'un hectare, avec une couche de 50 centimètres d'épaisseur, donnerait, par jour, 1750 kilogrammes de salpêtre ou 650.000 kilogrammes par an environ. Un terreau bien consigné, additionné de 1 p. 1000 de sulfate d'ammonium, a produit, par kilogramme et par jour, 0 gr. 630 de salpêtre, soit 3250 kilogrammes pour 1 hectare avec une couche de 50 centimètres ; ou 1.200.000 kilogrammes dans l'espace d'une année. Si on remplace le sulfate à mesure qu'il nitrifie, on peut ainsi charger graduellement les terres de telle façon que, dans certains cas, de meubles et légères qu'elles étaient d'abord, ces terres devenaient pâteuses et plastiques comme une argile. Parfois la nitrification s'arrêtait par suite de la saturation du calcaire ; elle reprenait lorsqu'on ajoutait de nouveau calcaire. On parvint ainsi à une teneur variant de 27 à 33 grammes de



salpêtre par kilogramme, suivant la terre employée. Connaissant la quantité d'eau qui imprègne le mélange, on peut estimer la concentration de cette eau en nitre : elle varie, suivant les cas, de 55 grammes à 157 grammes de nitre par litre. Il est donc possible de fabriquer des quantités de salpêtre incomparablement supérieures à celles que produisaient les anciennes nitrières.

Müntz et Lainé, continuant leurs recherches (1906), ont montré que la tourbe additionnée de calcaire peut fournir, après ensemencement par des organismes vivaces et addition de sulfate d'ammonium aux mêmes doses que ci-dessus, l'énorme quantité de 48.800 tonnes de nitre par an et par hectare, soit 8 fois plus que le noir animal de l'expérience précédente. Les tourbes légères et spongieuses, de décomposition peu avancée, sont les meilleures comme support. La nitrification étant capable de continuer dans des solutions très chargées de nitrates, on peut, comme il a été dit plus haut, additionner les liqueurs nitratées d'une nouvelle dose de sel ammoniacal et reverser à plusieurs reprises sur le lit oxydant. On a obtenu ainsi :

	1 ^{er} passage	2 ^e	3 ^e	4 ^e	5 ^e
Nitrate par litre (calculé en NO ³ K).....	8 gr.5	17 gr.4	25 gr.4	32 gr.9	41 gr.7

La tourbe, employée comme support des organismes nitrificateurs, permet donc la production intensive du salpêtre. Mais la *tourbe elle-même peut-elle fournir la matière nitrifiable* ? Sa distillation sèche ne donne guère, dans les eaux qui passent, qu'une fraction assez faible de l'azote sous forme d'ammoniaque. Cependant, si on distille la tourbe dans un courant de vapeur surchauffée, les 4/5 au moins de son azote peuvent être recueillis à l'état d'ammoniaque. Il serait donc possible d'extraire ainsi de la tourbe, sous forme d'ammoniaque, l'azote organique inerte qu'elle contient, et l'on aurait, de cette façon, la matière première d'une nitrification intensive.

Nitrification comparée dans le sol et dans les lits bactériens. —

Le milieu *terre* est incomparablement plus apte à nitrifier l'azote organique qu'on lui confie que les milieux artificiels, tels que les lits bactériens employés à l'épuration des eaux d'égout. Aussi ne peut-on comparer entre eux ces deux modes d'épuration. C'est ce qui résulte des expériences de Müntz et Lainé (1911) sur les pertes d'azote subies au cours de l'épandage de l'eau d'égout, sur les lits bactériens d'une part, sur une bonne terre arable d'autre part.

Ces auteurs montrent que 16 p. 100 seulement de l'azote apporté



par les eaux polluées s'éliminent à l'état gazeux quand on répand ces eaux sur la terre, le reste de l'azote nitrifié régulièrement ; alors que cet épandage, pratiqué sur les lits bactériens, conduit à une perte d'azote gazeux de 60 p. 100 environ. Les deux modes d'épuration sont donc fort différents. Sur les lits bactériens, l'action des organismes banaux de la combustion de la matière organique est prédominante et le phénomène nitrificateur est relégué au second plan. Dans le sol c'est le contraire qui a lieu ; la nitrification prend le dessus, et l'action qu'exercent sur les composés azotés les organismes vulgaires de la destruction de la matière organique est très réduite (1).

Nitrification dans les milieux acides. — Il est enfin une question fort importante qui touche directement à la nutrition végétale, et dont il convient de dire ici quelques mots : celle de la présence ou de l'absence des nitrates dans les terrains acides.

Nous avons maintes fois insisté sur la nécessité de la présence d'une base (carbonate alcalin ou alcalino-terreux) dans le sol, ou dans les milieux artificiels, afin que la nitrification puisse s'y établir. Lorsque la base ou son carbonate sont saturés, à la suite de la neutralisation de l'acide nitrique, la nitrification s'arrête et ne reprend que si on additionne le milieu d'une nouvelle dose de base. En fait, la présence des nitrates dans les sols dits *acides*, tels que tourbières, terres de forêts, de landes, de bruyère, a été niée par beaucoup d'auteurs.

Ebermayer a examiné à cet égard un nombre considérable d'échantillons de sols forestiers de la Bavière, et n'y a rencontré que des traces de nitrates ; souvent même ces sels étaient totalement absents. Faut-il en conclure que la nitrification est impossible dans de pareils sols en raison même de l'absence de carbonates, ou bien peut-on supposer qu'il se forme très peu

(1) Il a été découvert, dans ces dernières années, un mode de nitrification particulier produit par les boues dites *activées*. Lorsqu'on fait passer un courant d'air dans de l'eau d'égout, il se forme un précipité complexe qui possède la propriété d'oxyder très rapidement l'ammoniaque à basse température. On n'est pas encore complètement fixé sur le processus d'activation des microbes qui entrent en jeu, ni sur leur parenté avec les ferments nitriques du sol. L'examen de cette question se rapportant plus spécialement à l'étude de l'épuration des eaux d'égout et de leur emploi comme matières fertilisantes, nous nous bornerons seulement à en signaler ici l'importance.

d'azote nilrique et que celui-ci est immédiatement absorbé par les végétaux qui croissent en forêt ou sur les tourbières, ainsi que la chose a été soutenue parfois ? Quelques auteurs estiment que les nitrates qui se formeraient dans ces milieux acides y seraient facilement réduits, à l'état de nitrites d'abord, à l'état d'ammoniaque ensuite ; et que cette dernière forme de l'azote serait utilisée directement par les plantes. Il paraît plus probable que les mycorhizes, dont sont garnies les racines d'une foule de plantes humicoles, interviennent directement pour digérer en quelque sorte l'azote organique qui se trouve à leur contact et présenter ainsi au végétal une forme diffusible de l'azote qu'il reste encore à définir, mais dont elles peuvent certainement profiter. Quoi qu'il en soit, la possibilité de la nitrification dans ces milieux acides est une question non encore résolue d'une façon tout à fait satisfaisante, bien que, ainsi que nous l'avons dit un peu plus haut, Dumont rapporte cette inertie de l'azote des tourbières à un défaut d'ammonisation. Les microbes nitrificateurs existent dans les sols acides, puisqu'il suffit de les chauler ou de les marrer pour y voir apparaître des nitrates, le plus souvent au bout d'un temps assez court. Plusieurs observations prouvent d'ailleurs que certains sols acides renferment effectivement des nitrates. S'agit-il dans ce cas de la présence des bactéries ordinaires de la nitrification, ou bien a-t-on affaire à des espèces nouvelles ? Leur culture n'a donné jusqu'ici aucun résultat probant.

Voici quelques renseignements sur ce point. Chuard (1892) remarque que, à la partie supérieure des tourbières, on rencontre une couche de substance meuble, légère, nommée *terreau de tourbe*. Sorti de son gisement, ce terreau ne renferme que de l'azote organique et de l'azote ammoniacal (†) ; mais les nitrates s'accumulent dans sa masse en proportions d'autant plus élevées que ce terreau est extrait depuis plus longtemps de son lieu d'origine et exposé à l'air. Or ce milieu, très riche en carbone organique, manque de base salifiable. La culture de la nitrobactérie n'a donné lieu, après ensemencements successifs, qu'à une nitrification très peu intense.

D'après Migula (1900), les sols des forêts renferment des microbes nitrificateurs. Dans les couches supérieures de ces sols, encore couvertes de feuilles en décomposition, il n'y a pas de nitrification, car l'excès de matière organique serait une entrave à l'exercice du phénomène. Mais



celui-ci s'exerce, au contraire, dans les couches profondes (10 à 20 centimètres). On trouve des zones dont l'intensité nitrifiante est variable, et dont les positions sont différentes de celles qu'elles occupent dans une terre arable. Il est remarquable de voir la production d'acide nitreux se manifester incomparablement plus vite que celle de l'acide nitrique dans les milieux de culture ensemencés de terre de forêt. L'auteur estime que, en raison de la lente décomposition des matières organiques, la formation des nitrites et celle des nitrates sont bornées à un court espace de temps, puisque l'activité des bactéries de la putréfaction renaît à l'automne au moment de la chute des feuilles, alors que celle des bactéries nitrifiantes cesse. Il en résulte que le sol des forêts ne contient de nitrates que pendant un laps de temps assez court durant lequel les arbres pourraient s'en emparer.

Weiss (1909) a également rencontré des nitrates dans le sol des forêts du Danemark, presque dénué de calcaire. Ces nitrates étaient plus abondants pendant les mois froids de l'année, moins abondants pendant les mois chauds. Cette différence est-elle imputable à un arrêt de la nitrification par défaut d'eau dans les mois chauds, ou à une absorption de ces nitrates par les arbres ?

D'après Arnd (1916), les microbes ammonisants seraient plus nombreux dans les couches supérieures des tourbières de montagnes que dans les couches inférieures. Les microbes nitrificateurs ne se rencontreraient pas dans les couches superficielles, et le chaulage serait nécessaire pour en provoquer la nitrification. Toutefois A. Petit (1913) a montré que ce dernier phénomène est parfois possible dans les humus acides, indépendamment de la présence du calcaire. Coquidé (1915), au contraire, n'a obtenu de bons résultats culturaux qu'avec le nitrate de sodium dans les sols tourbeux des environs de Laon ; il semble que la nitrification naturelle ne puisse s'établir dans un pareil milieu.

D'après les études qu'il a faites sur la nitrification de certaines terres de Suède, Hasselmann (1917) distingue deux types de terrains humifères : les terrains humifères *doux*, bien aérés par l'action des vers et des insectes ; les terrains humifères *forts* constitués par une couverture de matière végétale en décomposition. L'humus *doux* renferme autant de bactéries nitrifiantes que d'organismes dénitrificateurs. L'humus des forêts de résineux, couvert de mousse, serait dépourvu de ces deux genres de microbes. Les mêmes essences forestières se développeraient mieux dans les terrains où l'azote est capable de nitrifier que dans ceux où ce phénomène n'aurait pas lieu.

Bref, on voit que la question de la formation des nitrates dans les tourbières, et dans les milieux acides en général, réclame encore de nombreuses recherches.

Résumé de l'étude de la nitrification.— Ce phénomène, d'une importance considérable, est bien connu à l'heure actuelle dans ses causes principales. Il exerce sur la fertilité des sols une



influence de premier ordre. Rappelons encore une fois les conditions naturelles qui provoquent la nitrification, étant entendu que les microbes, agents du phénomène, existent partout ; supposons également la température favorable. Le sol doit être calcaire, mais quelques millièmes suffisent pour obtenir une nitrification régulière ; il doit également être humide. Ainsi que nous l'avons établi plus haut, la dose d'eau nécessaire varie essentiellement avec la nature physique du sol, c'est-à-dire avec l'épaisseur de la couche aqueuse qui revêt les éléments terreux. Une terre de moyenne consistance, se rapprochant des terres franches, devra contenir 20 p. 100 d'eau environ. Plus elle est compacte, et plus la dose d'eau doit être considérable, sans toutefois dépasser un certain degré ; car nous savons que les quantités d'eau et d'air renfermées dans un sol sont complémentaires.

La forme de la matière organique n'est pas indifférente. L'humus naturel nitrifie toujours, mais parfois avec une grande lenteur, surtout lorsqu'il s'agit de terres épuisées par la culture : ce qui prouve, une fois de plus, que ce que nous appelons *humus* est une substance très hétérogène. L'azote de la matière organique non encore humifiée (engrais verts, fumier d'étable, tourteaux) nitrifie en général plus rapidement que l'humus lui-même. Mais, si on ajoute de trop fortes doses de carbone organique, un phénomène antagoniste de celui de la nitrification prend naissance : non seulement les nitrates ne se forment plus, mais ceux qui préexistaient se réduisent en fournissant des produits moins oxydés, ou même de l'ammoniaque, et enfin de l'azote libre. Cette dénitrification sera, dans un instant, l'objet d'une étude attentive ; car, là où elle s'installe, elle compromet la nutrition azotée du végétal.

Pour favoriser la nitrification naturelle, il est nécessaire, autant que la chose est possible, de maintenir le sol suffisamment humide et de lui donner des façons fréquentes. Celles-ci ont toujours été reconnues comme particulièrement avantageuses au maintien de la fertilité des terres. Le travail du sol diffuse les microorganismes de toute nature, aussi bien ceux qui oxydent l'ammoniaque que ceux qui en provoquent la



formation. De plus, le sol s'aère, les mottes volumineuses sont détruites, et l'on évite ainsi la formation de milieux compacts. L'emploi de fumures organiques, de quelque origine qu'elles soient, ne saurait être profitable sans un travail mécanique soigné du sol. L'émiettement de la terre d'une part, la constance de la température d'autre part, accélèrent au plus haut point la production de l'acide nitrique, ainsi qu'il résulte des expériences de Schläesing dont il a été question plus haut. Mais si, dans la pratique, cet émiettement est réalisable dans une assez large mesure, il est évident qu'on ne saurait compter ni sur la constance de la température, ni sur celle d'un degré suffisant à l'humidité.

V

PHÉNOMÈNES DE RÉDUCTION DES NITRATES

Nous avons défini, dans les pages qui précèdent, les phénomènes qui président à l'oxydation de l'azote complexe, et montré par quel mécanisme cette forme de l'azote se change en azote nitrique. Cherchons maintenant quelles sont les causes qui interviennent pour produire, dans les conditions naturelles, la désoxydation des nitrates.

Causes de la destruction de l'azote combiné. — Ces causes sont de deux ordres. Toutes les *combustions vives* de matières végétales (plantes, houille), ou animales, dégagent en grande partie à l'état libre l'azote combiné que renfermaient ces matières. En second lieu, *certaines microorganismes* interviennent pour désoxyder peu à peu l'azote nitrique et lui faire parcourir tous les termes de réduction : azote nitreux, oxyde azotique, oxyde azoteux, ammoniacque, jusqu'à destruction totale de toute combinaison et dégagement d'azote élémentaire. Ce sont ces actions destructives de la matière azotée, engendrées par plusieurs microbes spécifiques, dont nous allons nous occuper. Cette étude est fort importante : en effet, certaines formes d'azote combiné — les nitrates en premier lieu, source d'azote



à laquelle puisent tant de végétaux — peuvent disparaître dans diverses circonstances par suite des réductions que ces nitrates éprouvent du fait de l'intervention de quelques microorganismes communs dans le sol. Mais, parmi les nombreux agents microbiens auxquels sont imputables ces réactions, les uns n'amènent l'acide nitrique que jusqu'à l'état d'acide nitreux ; les autres, poussant plus loin la désoxydation, éliminent complètement l'oxygène de la molécule : d'où formation, soit d'ammoniaque, soit d'azote gazeux.

Malgré le nombre et la valeur de quelques-uns des travaux effectués sur la dénitrification, ce phénomène est loin d'être encore aussi bien connu que celui de la nitrification.

Il convient d'abord de dire quelques mots de la destruction par putréfaction des matières organiques azotées *qui ne contiennent pas d'azote oxydé*.

Nature des gaz dégagés dans la putréfaction des matières organiques azotées en l'absence des nitrates ou des nitrites. —

Que se passe-t-il, au point de vue du dégagement des gaz, lorsque des substances telles que la viande, l'albumine, le fumier de ferme, etc., entrent en putréfaction au contact de l'air ?

Reiset (1856) a étudié le dégagement gazeux qui se produit dans la décomposition du fumier peu ou très consommé, et dans celle de la viande, en introduisant plusieurs kilogrammes de ces matières sous une cloche, et en fournissant à la masse un volume connu de gaz oxygène. La conclusion de l'auteur est que la matière organique en voie de putréfaction absorbe des quantités considérables d'oxygène et dégage du gaz carbonique : la durée de l'expérience fut, dans quelques essais, de 33 jours. L'azote des sels ammoniacaux, des nitrates (1), des matières azotées fixes qui peuvent prendre naissance pendant cette putréfaction ne représente pas tout l'azote contenu primitivement dans ces matières ; il y aurait toujours un *dégagement très notable d'azote à l'état gazeux*.

Remarquons qu'il ne doit exister de nitrates à aucun moment dans les milieux organiques dont nous venons de parler, et que les expériences de Reiset tendraient à faire croire que toutes les putréfactions qui ont lieu en présence de l'oxygène en excès occasionnent des pertes, parfois considérables, d'azote libre. Il ne paraît cependant pas en être ainsi le plus souvent,



et on doit admettre, avec Schlœsing (1889), que le dégagement de l'azote gazeux est, dans de pareilles conditions, infiniment faible.

Ce dernier auteur a opéré sur des poids de substances beaucoup moins élevés (une dizaine de grammes en moyenne) que ceux qu'avait employés Reiset. Dans un ballon clos, muni d'un tube barométrique, et contenant la substance à étudier (viande, chair de poisson, fromage, crottin, etc.), on fait d'abord le vide ; on y introduit ensuite un volume d'air rigoureusement mesuré. Au fur et à mesure de la disparition de l'oxygène, on réintroduit des quantités connues de ce gaz et finalement, après douze ou quatorze mois, on évacue les gaz de l'appareil dans un volumétre.

Schlœsing a trouvé que, si on compare le volume de l'azote dégagé au poids de l'azote ammoniacal produit, on remarque que les pertes d'azote à l'état gazeux sont très faibles ; ce qui, d'après l'auteur, pourrait s'expliquer par ce fait que ses expériences ont duré un temps beaucoup plus considérable que celles de Reiset : il serait possible que l'azote gazeux ne se dégagât qu'au début seulement. Voici quelques chiffres qui montrent la faiblesse du dégagement de l'azote à l'état libre comparé à la production de l'azote ammoniacal.

AZOTE				
Matières soumises à la fermentation	contenu dans les matières à l'état initial	dégagé à l'état de gaz	apparu à l'état de NH ³	Azote gazeux dégagé p. 100 de l'azote ammoniacal formé
	gr.	mgr.	mgr.	
Haricots	0,4120	3,8	191,6	2
Fromage.....	0,2185	4,9	169,8	2,9
Poisson	0,2810	3,1	235,8	1,3
Crottin et urine	0,1090	2,3	284,0	0,8

A la même époque, Schlœsing a également montré que, pendant la fermentation forménique du fumier, à 52°, *il ne se produisait pas traces d'azote gazeux.*

Abandonné pendant quelques heures au contact de l'air pour lui permettre de s'ensemencer spontanément, un liquide essentiellement putrescible, comme le sang, enfermé ensuite dans un vase clos muni d'un



tube à dégagement et maintenu à une température de 40 à 45°, n'a fourni, au bout de quatre mois environ, terme au delà duquel tout dégagement avait cessé, *que du gaz carbonique, sans traces de gaz combustibles ni d'azote*. Le magma liquide contenait de l'ammoniaque, des acides gras volatils et des principes azotés fixes (Berthelot et André, 1892).

Kellner et Yoshii (1888) ont fait voir que, dans la putréfaction des graines et dans celle du lait, amorcées avec de l'urine en décomposition, il n'apparaissait pas d'azote libre et il ne se formait pas d'azote nitrique. Un mélange d'urine putréfiée, d'asparagine et de graines de *Soja* ne perd pas d'azote à l'état gazeux.

Il semble donc que, au moins dans la plupart des cas, la putréfaction en présence ou en l'absence d'oxygène d'une matière azotée ne contenant ni nitrates ni nitrites et ne pouvant pas en produire, ne s'accompagne pas d'une perte d'azote gazeux. Il se dégage seulement du gaz carbonique ; parfois ce gaz est accompagné de méthane et d'hydrogène. Nous allons voir, dans la suite, que cette conclusion paraît presque toujours justifiée, et que les dégagements d'azote libre que l'on observe dans la nature sont liés à la présence d'un composé oxygéné de l'azote. Toutefois, et dans des conditions insuffisamment définies, il peut se produire un dégagement d'azote gazeux dans divers milieux en putréfaction ne renfermant pas d'azote nitrique (Gibson, 1895).

Réduction des nitrates (1). — Cette réduction a été étudiée pour la première fois d'une façon suivie par Gayon et Dupetit (1882-1885) ; mais, dès l'année 1875, Meusel en avait indiqué l'origine microbienne.

Schlesing, ainsi que nous l'avons signalé plus haut (p. 148), avait remarqué, dans ses études sur la nitrification, que si l'on enferme dans une allonge quelques kilogrammes de terre riche en nitrates, on observe que l'oxygène de l'air inclus dans le vase est rapidement absorbé ; non seulement les nitrates disparaissent, mais la matière organique elle-même de la terre fournit une certaine dose d'azote gazeux.

Les premières recherches de Gayon et Dupetit portèrent sur certains microorganismes capables d'amener les nitrates à l'état de nitrites sans désoxydation ultérieure de ceux-ci. Si on abandonne à l'air libre du bouillon tenant en dissolution

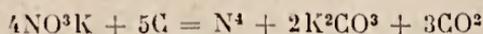
(1) Un résumé historique assez complet, relatif à la réduction des nitrates, a été donné par Bagros (*Sur le mécanisme de la dénitrification par les bactéries dénitrifiantes indirectes*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris, 1910).



un peu de nitrate de potassium, le liquide se trouble, se peuple d'organismes microscopiques et on constate la présence de nitrite de potassium. Gayon et Dupetit isolèrent de ce milieu quatre espèces de microbes, anaérobies, susceptibles de produire une semblable réduction. Ils remarquèrent également que le *microbe du choléra des poules*, la *bactéridie charbonneuse* et le *vibron septique* produisent le même phénomène, mais que la dose de nitrite formée est beaucoup moindre que celle que l'on obtient avec les espèces précédentes. Ces expériences établissent nettement l'ubiquité des êtres capables de réduire l'azote nitrique.

Peu après, ces auteurs isolèrent de l'eau d'égout nitratée deux microbes nouveaux : le *Bacterium denitrificans* α et le *B. denitrificans* β , le premier plus actif que le second. Ces deux microbes sont très avides d'oxygène ; ils empruntent ce gaz, soit à l'air libre, soit au nitrate ; ils sont donc, suivant les cas et avec la même facilité, aérobies ou anaérobies. Le *B. denitrificans* α (le plus actif des deux) se développe mieux et détruit plus de nitrates dans un bouillon de viande que dans l'eau d'égout. Chose remarquable, l'acide salicylique, l'aniline, le phénol, qui sont, au regard de la plupart des microorganismes, des antiseptiques, n'empêchent pas le développement du *B. denitrificans*. Suivant la richesse du milieu, cette bactérie fournit, soit un dégagement d'azote libre seul, soit, en même temps, un départ de gaz carbonique. Avec un milieu riche en matières organiques, l'azote est mélangé d'acide carbonique ; mais, lorsque ce dernier gaz ne se trouve pas dans les conditions nécessaires à sa saturation, il ne se dégage que de l'azote.

L'équation suivante rend compte de la réaction réductrice produite par le *B. denitrificans* :



le carbone étant emprunté à la matière organique du bouillon. Corrélativement, on remarque une production d'ammoniaque. La totalité de l'oxygène de l'acide nitrique se porte sur le carbone de la matière organique du bouillon ; parfois, l'analyse



permet de constater le dégagement d'un léger excès d'azote gazeux qui provient de l'azote du substratum organique.

Le microbe α , ensemencé dans un liquide artificiel nitraté contenant de l'acide citrique et de l'asparagine additionnés de matières minérales, fournit un dégagement d'oxyde azoteux N_2O à côté de l'azote et du gaz carbonique. Donc, suivant la composition du milieu nutritif, l'azote du nitrate se dégage à l'état libre, ou bien est mélangé d'oxyde azoteux.

Les destructeurs anaérobies des matières hydrocarbonées, tels que le *Bacillus amylobacter*, très commun dans le sol, dégagent de l'hydrogène et du gaz carbonique avec formation d'acide butyrique. Dehérain et Maquenne (1883) avaient attribué à ce microbe, dont nous avons déjà parlé plus haut (page 112), le pouvoir de réduire les nitrates avec production d'oxyde azoteux et d'azote; ils pensaient que l'hydrogène dégagé était, dans ce cas, l'agent de la réduction. Gayon et Dupetit montrent que le *B. amylobacter*, lorsqu'il est en culture pure, n'attaque pas le nitrate de potassium en présence du sucre et qu'il n'en réduit que des traces en présence d'amidon ou de glucose, bien qu'il se fasse un abondant dégagement d'hydrogène. L'expérience de Dehérain et Maquenne montrait bien, en réalité, le fait de la réduction des nitrates, mais comme ces auteurs avaient opéré avec de la terre brute, le ou les véritables agents réducteurs des nitrates leur avaient échappé. Dans une de leurs expériences, le volume de l'oxyde azoteux dégagé représentait $1/12$ environ du volume des gaz totaux recueillis.

Donc, la dénitrification n'est pas l'apanage de tous les microbes réducteurs; elle n'a lieu qu'en présence de certains êtres à fonctions spécifiques.

Importance pratique des phénomènes de dénitrification. — Gayon et Dupetit ont établi l'importance pratique de ces phénomènes. Si l'on prend du terreau de jardin que l'on mélange avec son poids de pierre ponce calcinée, et que l'on fasse tomber goutte à goutte à la surface de ce terreau de l'eau d'égout nitratée à 100 milligrammes au litre et stérilisée — en opérant au sein d'une atmosphère d'azote — on remarque que la solution s'appauvrit en acide nitrique. Ceci démontre, dans le terreau et dans la terre végétale, la présence d'organismes dénitrifiants. Le *B. denitrificans* α , ensemencé sur un échantillon de terre stérilisée et enrichie de nitrate réduit ce sel,



et cette réduction s'exagère à la suite d'une addition d'eau sucrée. Si l'échantillon est riche en humus, il est inutile d'ajouter des substances hydrocarbonées. La terre se dépouille ainsi de tout l'azote du nitrate ; de plus, elle perd une certaine quantité de l'azote constitutif de sa matière organique.

Gayon et Dupetit font observer que cette réduction des nitrates, soit que ceux-ci proviennent d'une nitrification naturelle, soit qu'ils aient été ajoutés au sol sous forme d'engrais, n'est guère à redouter dans les conditions ordinaires d'une bonne culture, puisque le sol est alors soumis au labour qui permet à l'air de circuler facilement autour des particules terreuses. Mais si l'atmosphère des sols devient réductrice, par suite de la présence d'une couche d'eau à leur surface ou seulement d'un trop grand degré d'humidité, les phénomènes de réduction des nitrates peuvent s'y manifester.

Ces premières expériences nous montrent donc la réalité de la réduction des nitrates par voie microbienne. On comprend maintenant l'importance du phénomène et la nécessité de mieux définir la nature et le mode d'action des organismes qui provoquent cette réduction. En somme, la question qui se pose est celle-ci : quels sont les microorganismes qui réduisent seulement les nitrates en nitrites ; quels sont ceux qui, poussant plus loin la désoxydation, libèrent l'azote à l'état gazeux ? Si le premier phénomène caractérisait seul la dénitrification, il ne serait guère à craindre, car les nitrites pourraient, dans des conditions favorables, reproduire des nitrates, et l'azote combiné ne serait pas perdu. Mais, lorsque la réduction dépasse le terme *nitrite* ou le terme *ammoniaque*, l'azote est perdu pour la végétation.

Un certain nombre de travaux qui suivirent de près la publication de ceux de Gayon et Dupetit portèrent sur les conditions dans lesquelles se produit le dégagement d'azote libre, plutôt que sur la nature des espèces microscopiques qui provoquent une pareille transformation.

Conditions diverses dans lesquelles on constate la disparition des nitrates. — Beaucoup d'auteurs pensaient à cette époque que la réduction des nitrates était imputable à la présence de la matière organique elle-même, soit de celle que renferment les milieux naturels, soit de celle des bouillons de culture.

Kellner et Yoshii (1888), après avoir montré, comme nous l'avons dit plus haut, l'absence d'azote gazeux dans les putréfactions qui prennent naissance au sein des matières azotées exemptes de nitrates



et de nitrites, remarquèrent que les pertes d'azote libre n'ont lieu que lorsqu'il y a oxydation de l'ammoniaque par l'oxygène de l'air, l'acide nitreux formé agissant sur les composés organiques azotés. La nitrification normale s'accompagnerait donc toujours d'une perte d'azote gazeux. Ce dernier fait avait d'ailleurs été déjà constaté par Warington, lorsque ce savant répétait les premières expériences de Schloësing et Müntz.

D'après Taeke (1889), et en confirmation des faits avancés par Kellner et Yoshii, la putréfaction de la farine, de la viande, de l'herbe, amorcée avec un peu de terre ou de fromage pourri, ne fournit pas d'azote gazeux en la présence ou en l'absence d'oxygène. Si à ce milieu on ajoute un nitrate, l'azote apparaît, ainsi que ses oxydes inférieurs. Le libre accès de l'oxygène diminue, mais ne supprime pas cette réduction.

Leone (1891) ayant eu l'occasion d'étudier la nitrification et la dénitrification dans les eaux potables, avait remarqué qu'en ajoutant de la gélatine ou autres substances organiques à une eau en voie de nitrification, il se produisait de l'azote nitreux, puis de l'ammoniaque. Lorsque la substance additionnelle est consommée, l'ammoniaque et l'acide nitreux disparaissent, et l'on voit réapparaître l'acide nitrique. Si on introduit, dans 10 kilogrammes de terre en voie de nitrification, 300 grammes d'engrais frais, la nitrification s'arrête ; il se produit de l'acide nitreux, puis de l'ammoniaque. Au bout de trente-cinq jours, l'ammoniaque à son tour disparaît peu à peu, elle est remplacée par l'acide nitreux. Après trois mois, la terre ne renferme plus que de l'azote nitrique. Leone pensait que cette dénitrification était imputable au développement rapide de certains germes qui trouvent, dans la présence d'un excès de matière organique, un milieu favorable à leur accroissement : ces germes ont besoin d'oxygène, et ce gaz ne suffit plus aux exigences de la nitrification.

Nous reviendrons plus loin sur les phénomènes produits par l'apport dans le sol d'une dose d'engrais organique exagérée.

Nouvelles tentatives d'isolement de microorganismes réducteurs. —

Cependant Frankland (1889) s'occupa d'isoler de l'air et de l'eau potable une série de microorganismes capables de réduire l'acide nitrique. Les espèces les plus réductrices furent rencontrées dans l'eau (*Bacillus racemosus*, *B. violaceus*, *B. vermicularis*, *B. aquatilis*). Ces espèces provoquaient la formation d'acide nitreux accompagné d'un peu d'ammoniaque, ce dernier gaz provenant sans doute de l'azote de la peptone employée dans le milieu de culture. En tous cas, là où l'on observait la réduction partielle ou totale du nitrate en nitrite, la somme de l'azote nitreux et de l'azote nitrique dans la solution en fermentation était identique à l'azote nitrique du liquide initial. Il existe donc, comme l'ont montré Gayon et Dupetit, des espèces réductrices qui ne poussent pas la désoxydation au delà du terme nitreux.



L'ubiquité des ferments dénitrificateurs est donc certaine, et leur pouvoir réducteur, s'il ne se manifeste pas toujours, peut être mis en évidence en modifiant quelque peu les conditions de milieu. En effet, Bréal (1892) remarque que les nitrates, existant dans presque toutes les eaux naturelles, se rencontrent, par cela même, à la surface d'une foule de substances solides mouillées par ces eaux. Par exemple, sur la surface de la paille on trouve des nitrates; si on immerge cette paille dans l'eau, les nitrates disparaissent. Vient-on à ajouter au liquide une petite quantité d'un nitrate, celui-ci disparaît à son tour. Un peu de terre végétale, humectée avec de l'eau ayant séjourné sur la paille, peut perdre tout l'acide nitrique qu'elle contenait primitivement; il se dégagerait même, dans ces conditions, de l'azote à l'état gazeux. Un grand nombre d'autres substances végétales produisent une pareille réduction. Mais le ferment réducteur ne trouve pas dans les terres labourées un milieu propice à son développement, car ces terres ne sont pas généralement assez humides pour que les débris végétaux qu'elles contiennent demeurent imbibés d'eau: dans les sols compacts, au contraire, qui restent longtemps humides, cette réduction a toujours lieu.

Il est facile, d'après Bréal, de communiquer à un sol des propriétés réductrices en exagérant sa compacité par le tassement que peut y produire un écoulement d'eau prolongé. A cet effet, on dispose dans un long tube de verre, étiré à sa partie inférieure, une centaine de grammes de terre et on verse à la partie supérieure du tube 150 centimètres cubes d'eau. Lorsque celle-ci s'est écoulée, on la verse de nouveau dans le tube, et on recommence ainsi un certain nombre de fois. On constate que cette eau, riche en nitrates après le premier versement, se dépouille peu à peu de ces sels au bout de quelques semaines. Ceci démontre que le tassement produit par le passage de l'eau a suffi pour créer un milieu réducteur par privation d'oxygène. C'est là une remarque très importante qui permet d'expliquer la dénitrification dans les sols submergés.

Quelques années après, Burri et Stützer (1896) étudièrent les phénomènes de dénitrification que provoque dans le sol un apport exagéré de fumier. Ces auteurs isolèrent des fèces de cheval deux microbes. Ensemencés séparément dans du bouillon nitraté, ces microbes ne donnent lieu à aucune réaction; si on les ensemence ensemble, une fermentation se déclare. L'un de ces microorganismes est le *Bacterium coli commune*, l'autre est une espèce nouvelle: Burri et Stützer la nomment *B. denitrificans I*; ce microbe est aérobie. Dans cette action symbiotique le *B. coli* transformerait le nitrate en nitrite, le *B. denitrificans* décomposerait ensuite complètement le nitrite avec dégagement d'azote gazeux. Ces mêmes auteurs ont isolé des macérations de paille un microbe, le *B. denitrificans II*, qui, tout seul, est capable de décomposer les nitrates et les nitrites avec production d'azote libre. L'association des deux bacilles précédents, d'une part, le *B. denitrificans II*, d'autre part, provoquent également bien la fermentation



d'un bouillon nitraté ; mais si la quantité de nitrate offerte est trop forte, l'alcalinité du milieu s'accroît au point d'arrêter toute réaction.

Si les espèces associées se rencontrent dans un milieu dépourvu d'oxygène, elles ne dégagent pas d'azote gazeux, il se produit seulement de l'acide nitreux ; en présence d'un faible accès d'oxygène, il se produit de l'azote gazeux. Le *B. denitrificans II* n'exerce son action réductrice qu'en l'absence de l'air : en présence de ce gaz, la fermentation est suspendue ou au moins entravée. Il en résulte que, dans un sol bien aéré, ce dernier microorganisme est peu à redouter, alors que les deux espèces associées peuvent détruire les nitrates.

Ampola et Garino (1897) ont trouvé dans les excréments du bœuf un bacille, le *B. denitrificans agilis*, capable de décomposer les nitrates avec formation d'azote et de gaz carbonique. Les matières fécales des herbivores sont d'ailleurs très chargées de microbes réducteurs : nous ne pouvons insister ici sur les variétés qui y ont été découvertes. Voici seulement, à titre d'indication, l'une des équations proposées pour expliquer le phénomène dénitrificateur. Ampola et Ulpiani (1898), en étudiant la disparition du sucre dans les cultures anaérobies de deux bactéries dénitrifiantes isolées par eux, l'une de la terre, l'autre de l'air, ont été amenés à formuler ce processus de la façon suivante :



La nature de la matière carbonée offerte aux microorganismes réducteurs est de première importance.

Aussi, en 1897, Jensen, afin d'expliquer certains côtés obscurs de ce phénomène, tenta de montrer qu'il existe une relation entre l'action des bactéries dénitrifiantes et la quantité de carbone organique dont ces bactéries disposent. D'après cet auteur, il faudrait classer les aliments carbonés favorisant la dénitrification en deux groupes : ceux qui sont directement assimilables, tels que les acides butyrique, lactique, citrique, et ceux qui ne peuvent être utilisés que lorsqu'ils ont été décomposés par les bactéries de la putréfaction, tels que glycérine, glucose, amidon. Les bactéries dénitrifiantes ne sont douées de quelque activité que lorsqu'elles rencontrent, à côté des nitrates, une provision suffisante de composés carbonés directement assimilables.

Nous verrons bientôt l'application de ce fait aux phénomènes de dénitrification dans les sols que l'on enrichit artificiellement d'un excès de matière organique.

D'après Weissenberg (1897), certaines bactéries qu'il nomme *dénitrifiantes vraies* ont le pouvoir, lorsqu'elles manquent d'oxygène, d'emprunter ce gaz aux nitrates. L'apport d'une quantité suffisante d'oxygène suspend la dénitrification ; la suppression de ce gaz entraîne la reprise du travail des bactéries dénitrifiantes. L'azote du nitrate se dégage à l'état gazeux, et la base, mise en liberté, rend le milieu tellement alcalin que le microbe refuse de se développer. En ce qui concerne les bactéries qui ne détruisent les nitrates que lorsqu'elles vivent en sym-



biose, leur mode d'opérer est différent. L'une d'elles réduit le nitrate en nitrite, l'autre décompose ce dernier sel dont elle dégage l'azote à l'état libre.

Les expériences qui précèdent, intéressantes à plusieurs points de vue, ne rendent pas compte des réactions successives qui amènent les nitrates à l'état d'azote gazeux; elles ne donnent aucun renseignement sur le sort de l'azote organique des milieux où se produit la dénitrification. Celles qu'avaient publiées, dès 1892, Giltay et Aberson, ouvraient cependant une voie nouvelle. Ces auteurs prennent, comme milieu de culture, deux liquides contenant — outre les sels minéraux indispensables au développement des microorganismes additionnés de 2 grammes de salpêtre — le premier un gramme d'asparagine au litre, le second un gramme de glucose, de manière à disposer, dans ce dernier cas, d'une liqueur exempte d'azote autre que celui du nitrate. Le bacille, isolé par les auteurs de l'air et du sol, et cultivé sur les deux milieux précédents, avait beaucoup de ressemblance avec le *B. denitrificans* de Gayon et Dupetit. Dans les deux liqueurs, on constata la disparition des nitrates et celle des nitrites, avec dégagement d'azote. Dans la première, qui contenait de l'asparagine, une certaine dose d'ammoniaque prenait naissance, et le volume de l'azote dégagé était supérieur à celui que pouvait fournir l'azote du nitrate ajouté au début. Ceci montre qu'une partie de l'azote de l'asparagine avait participé à la réaction. Dans la seconde liqueur, qui renfermait du glucose, il ne s'était pas formé d'ammoniaque, et l'azote dégagé répondait au volume de celui que contenait le nitrate ajouté. Les expériences ultérieures de Grimbert ont élucidé les diverses phases de ce phénomène.

Ferments dénitrifiants vrais. Ferments dénitrifiants indirects. — Avec les expériences de Grimbert (1898-1899) se dissipent bien des obscurités qui planaient sur les phénomènes que nous étudions ici. Cependant les conclusions si nettes formulées par cet auteur semblent avoir été méconnues ou mal interprétées par la plupart des savants qui se sont occupés de ce sujet dans la suite. Nous entrerons ici dans quelques



détails pour montrer l'importance des faits nouveaux mis en lumière dans le travail auquel nous faisons allusion, travail que nous exposerons d'après le résumé qu'en a donné Bagros (*loc. cit.*).

Grimbert étudie l'action dénitrifiante de deux bactéries très répandues : le *Bacterium coli commune* et le *Bacille d'Eberth* (*Bacillus typhosus*). Les nitrates ne peuvent être attaqués que lorsque le milieu renferme des principes amidés, tels que ceux que contient le bouillon de viande. C'est par suite de la réaction secondaire qu'exerce l'acide nitreux sur les amides que se produit le dégagement d'azote libre. Il faut dire *acide nitreux* et non pas *nitrites* ; ceux-ci ne peuvent agir par eux-mêmes en milieu neutre ou alcalin.

L'auteur cultive les deux microbes précédents sur différents substrata : 1^o sur l'eau peptonée à 1 p. 100, contenant 1 p. 100 de nitrate. On observe alors une réduction partielle du nitrate en nitrite, mais sans dégagement gazeux ; 2^o sur du bouillon de bœuf peptoné et nitraté à 1 p. 100, auquel cas il se produit un abondant dégagement gazeux. Ainsi, lorsqu'on substitue un milieu à un autre, il y a un changement profond dans les fonctions biologiques des deux microorganismes mis en œuvre. Grimbert étudie alors la nature des gaz dégagés, la proportion de nitrate détruit, le rapport entre le poids du nitrate détruit et le volume d'azote dégagé, la proportion des nitrites qui restent à la fin et, en dernier lieu, le volume de l'azote amidé fourni par un volume de bouillon égal à celui que l'on a employé dans les expériences.

Le *Bacillus pyocyaneus*, dénitrifiant énergique, fut, en outre, ensemencé dans une solution de peptone nitratée, afin de comparer son action à celle des deux microbes précédents, et de saisir la différence qui existe entre ces deux derniers et les ferments dénitrifiants vrais. Grimbert trouve que le bacille pyocyanique ne dégage que de l'azote pur, sans gaz carbonique, alors que les deux autres dégagent à la fois ces deux gaz. Avec le bacille pyocyanique, il se produit cependant du gaz carbonique, mais, la base du nitrate étant mise en liberté, ce gaz est absorbé par elle, et le milieu devient très alcalin ; tandis qu'avec les deux autres microbes il demeure neutre. Dans



le cas du bacille pyocyanique, le volume de l'azote dégagé est égal à celui que contient le nitrate détruit ; il est plus de sept fois supérieur à celui que pourraient fournir les principes amidés du bouillon. Avec le *B. coli* et le *B. typhosus*, la réaction du liquide de culture reste neutre ; le volume de l'azote recueilli est le double de celui qui répond à l'azote du nitrate et la moitié seulement de celui qui serait dégagé par l'hypobromite (azote amidé). Grimbert admet que la moitié de cet azote dégagé provient des nitrates, et que l'autre moitié ne peut provenir que des principes amidés du bouillon : ces principes sont décomposés au contact des produits de réduction du nitrate par les bactéries, c'est-à-dire par l'acide nitreux.

Il résulte de ces expériences que le *B. coli* et le *B. d'Eberth* n'attaquent pas les nitrates par le jeu du même mécanisme que celui qu'emploie le *B. pyocyanique*. La réduction des nitrates par ceux-là est imputable aux principes amidés : il faut donc en conclure que si l'on fournit à la solution de peptone l'azote amidé qui lui manque, on obtiendra un dégagement d'azote. C'est ce que l'expérience vérifie. On utilise, à cet effet, un milieu constitué par une solution de peptone à 1 p. 100, contenant 1 p. 100 de nitrate et additionné de 1 p. 100 d'extrait de viande. Cultivé sur ce substratum, le *B. coli* dégage un volume d'azote bien supérieur à celui qui proviendrait du nitrate détruit. L'extrait de viande fournit au milieu les composés amidés indispensables à la décomposition du nitrate. De nouveaux essais confirment ce dernier fait : si on emploie des quantités croissantes d'extrait de viande, la proportion de nitrate détruit augmente parallèlement aux poids d'extrait ajouté au milieu.

Grimbert propose donc de *diviser les bactéries dénitrifiantes en deux catégories* : la première comprend les microbes qui, tels que le *B. pyocyanicus*, attaquent *directement* le nitrate en utilisant l'oxygène de ce sel pour brûler le carbone ; le gaz carbonique qui prend naissance se fixe sur la base du nitrate devenu libre. La seconde catégorie (*B. coli*) comprend les microbes qui réduisent le nitrate en nitrite ; cette réduction se complète *d'une action secondaire* entre le nitrite et les composés amidés que contient le milieu de culture. Ce phénomène



secondaire paraît résulter de la réaction qui s'établit entre l'acide nitreux formé par les bactéries et les corps amidés, conformément à l'expression suivante, où l'urée a été prise comme type d'amide :



Grimbert estime que cette décomposition se produit grâce à l'intervention d'un acide formé aux dépens de certaines substances du bouillon. Cet acide saturerait la base au fur et à mesure que celle-ci deviendrait libre ; ce qui entraînerait la neutralité du milieu.

Les ferments dénitrifiants vrais sont donc ceux qui, comme le *B. pyocyaneque*, dégagent l'azote des nitrates au contact d'une solution de peptone à 1 p. 100 ; *les ferments dénitrifiants indirects* ne donnent lieu à un dégagement d'azote qu'en présence des acides amidés du bouillon.

Quelques faits nouveaux relatifs à la dénitrification. — Indiquons maintenant très rapidement les conclusions de quelques-uns des travaux postérieurs à celui de Grimbert, en passant sous silence ceux qui, tout en décrivant des espèces dénitrificatrices nouvelles, n'apportent aucune contribution spéciale relativement au mécanisme intime de la réaction.

Schneidewind fait intervenir, comme condition fondamentale de la décomposition des nitrates par les microbes du fumier ou de la paille, la présence de certaines sources de carbone ; cellulose, amidon, mannite, acides butyrique, citrique, lactique, etc. Pour Marpmann (1899), le gaz hydrogène issu de certaines fermentations bactériennes sera l'agent réducteur des nitrates ; il se formerait des nitrites et des sels ammoniacaux, lesquels réagissant sur les amidés et les amines provenant des albuminoïdes du milieu de culture, fourniraient de l'azote libre. Il n'y aurait donc là qu'une série de réactions *d'ordre purement chimique*, capables d'amener l'azote nitreux et l'azote ammoniacal à l'état d'azote gazeux, réactions ne pouvant s'effectuer qu'en milieu acide. Cette façon de voir est contraire aux faits découverts par Grimbert en ce qui concerne les dénitrifiants directs. Wolf (1899) pense que le premier stade de réaction conduit à la formation de nitrites, lesquels sont décomposés ultérieurement par le gaz carbonique provenant de la combustion du carbone : la dénitrification n'aurait lieu que s'il y a abondant dégagement de gaz carbonique.

Weissemberg (1902) revient sur la division des bactéries dénitrifiantes en bactéries directes et indirectes, établie quatre ans auparavant par Grimbert, comme nous venons de le voir. Cet auteur estime



que, s'il y a réaction secondaire des nitrites sur les amides contenus dans le liquide de culture, il faut que celui-ci devienne acide. Or Grimbert avait déjà remarqué que, si l'intervention d'un acide est nécessaire, cette intervention peut avoir lieu sans que le milieu cesse de rester neutre ou alcalin.

Grimbert et Bagros (1909) ont précisé le mécanisme de l'action des bactéries dénitrifiantes indirectes (*B. coli*) de la façon suivante. Si on cultive le colibacille dans une solution de peptone à 1 p. 100 contenant 1 p. 100 de nitrate de potassium, il ne se dégage pas d'azote ; le nitrate se change seulement en nitrite, ainsi que nous l'avons vu plus haut. Lorsqu'à la solution précédente on ajoute des aliments carbonés tels que glucose, glycérine, saccharose, acides lactique, tartrique (ces derniers neutralisés par la soude), on retrouve après trente-deux jours la quantité de nitrate originelle, bien qu'il y ait eu fermentation active dans certains milieux. La présence d'hydrates de carbone ou de sels organiques ne suffit donc pas, au moins en présence du colibacille, pour qu'il y ait décomposition des nitrates. Par conséquent, contrairement à l'opinion de Wolf, la dénitrification ne dépend pas de la fermentation des hydrates de carbone.

Si la solution de peptone nitratée est additionnée de glycocolle, d'urée, d'asparagine, de leucine, de tyrosine, puisensemencée avec le colibacille, il ne se produit pas de dégagement gazeux, et, au bout de trente jours, le nitrate n'est pas détruit. Il en résulte que la seule présence de matériaux amidés ou aminés ne suffit pas pour provoquer la dénitrification. Mais si on ajoute à la fois à la solution de peptone nitratée un hydrate de carbone et un acide aminé, il se produit immédiatement une active dénitrification, à la condition que l'aliment carboné soit attaqué par le colibacille. Pendant l'expérience la réaction demeure neutre ou légèrement alcaline.

On peut synthétiser ces derniers résultats ainsi qu'il suit. La destruction d'un nitrate par les bactéries dénitrifiantes indirectes exige la réalisation des conditions suivantes : 1° la réduction du nitrate en nitrite ; 2° le milieu de culture doit contenir à la fois des substances amidées ou aminées et des aliments carbonés susceptibles d'être attaqués par le microbe en fournissant des acides. Dans ce cas, la bactérie attaquant l'aliment carboné donne naissance à un acide qui réagit sur le nitrite et *provoque la réaction de l'acide nitreux libre sur le corps aminé* ; il se dégage alors de l'azote et du gaz carbonique. L'acide se combine à l'alcali du nitrate, et le liquide reste neutre.

Les faits qui viennent d'être exposés expliquent les résultats que Grimbert avait obtenus antérieurement en substi-



tuant le bouillon de viande à la peptone, et il est permis de penser qu'ils peuvent s'appliquer à un grand nombre de bactéries dénitrifiantes indirectes.

Le mécanisme de l'action des bactéries indirectes a été de nouveau étudié avec soin par Bagros (1910), dont les travaux confirment de façon remarquable ceux de Grimbert : la dénitrification par le colibacille n'a lieu que lorsque le milieu renferme à la fois des corps ternaires susceptibles de fermenter sous l'action de microbes (glucose, lactose, acide lactique, corps à fonction alcool), et des acides aminés (glycocolle, urée, alanine, gélatine, etc.). La présence simultanée de ces deux catégories de substances est indispensable à l'exercice du phénomène. On observe parfois le dégagement d'une petite quantité d'oxyde azotique, mais jamais celui d'oxyde azoteux ni d'hydrogène. Le gaz carbonique seul est incapable de déplacer l'acide nitreux.

Franzen et Lohmann (1910) ont donné, à la même époque, une classification des bactéries dénitrifiantes en trois groupes. Dans le premier ils placent les microorganismes qui fournissent des nitrites et, pour une faible part, des produits plus avancés de réduction (*Bacillus prodigiosus*, *Bacterium coli*, *B. typhi murium*). Dans le second, on trouve des microorganismes qui donnent d'abord des nitrites, mais qui réduisent ensuite rapidement ces sels (*B. pyocyaneus*). Dans le troisième, on doit admettre les microorganismes qui n'attaquent pas les nitrites. Mais les auteurs précités semblent ignorer les résultats obtenus par Grimbert sur le mécanisme de la dénitrification.

D'après Pelz (1910), on pourrait classer les dénitrificateurs en dénitrificateurs énergiques (*Vibrion cholérique*, *Bacille typhique des souris*, *Bacillus aerogenes*) ; dénitrificateurs moyens (*B. typhosus*, *B. coli*) ; dénitrificateurs faibles (streptocoque, staphylocoque). Mazé (1911) a montré que les microbes que Winogradsky n'avait pu séparer, en milieu liquide, des bactéries nitrifiantes (p. 154) sont des dénitrifiants énergiques : les uns produisent seulement de l'acide nitreux, les autres fournissent des composés oxygénés gazeux de l'azote : ce sont des dénitrifiants aérobies.

Il ne faudrait pas, d'après Klaeser (1914), diviser les bactéries capables de réduire les nitrates en bactéries productrices de nitrites et bactéries productrices d'ammoniaque ; la formation de l'acide nitreux et celle de l'ammoniaque dépendent de la composition et de la réaction du milieu. L'auteur a examiné à cet égard 28 espèces de bactéries à spores : une réaction alcaline favorise la genèse des nitrites, une réaction acide celle de l'ammoniaque. Un choix convenable du milieu de culture fournit soit l'un, soit l'autre de ces corps.

Citons, enfin, les expériences récentes de Hulme (1914) dans lesquelles on voit apparaître le rôle réducteur de l'hydrogène. L'auteur dispose les quatre flacons suivants qu'ilensemence de cultures pures provenant des eaux d'égout : I, peptone = 0 gr. 5 p. 100, extrait de viande = 0 gr. 5 p. 100, nitrate de potassium = 0 gr. 5 p. 100 ; II, mêmes subs-



tances que dans I, mais pas de nitrate ; III, peptonc = 0 gr. 5, glucose = 0 gr. 5, nitrate de potassium = 0 gr. 5 ; IV, mêmes substances que dans III, mais sans nitrate. Voici le pourcentage des gaz dégagés par chacun de ces flacons.

	I	II	III	IV
Hydrogène	0	70,14	0	74,17
Azote	96,83	0	98,95	0
Gaz carbonique	3,17	29,86	1,41	25,83

Les flacons I et III contenaient des nitrites. Il semble, à l'inspection des chiffres ci-dessus, que l'hydrogène *naissant* soit un agent réducteur des nitrates. Ce gaz est abondant dans les expériences II et IV en l'absence du nitrate de potassium, il disparaît dans les expériences I et III faites en présence de ce sel. Ce rôle réducteur de l'hydrogène est bien mis en évidence dans l'essai suivant. Un flacon, identique au flacon I, ne renferme que 0,1 p. 100 de nitrate : tant qu'il y a des nitrites dans le liquide en fermentation, il se dégage un mélange gazeux composé d'azote et de gaz carbonique ; mais, à partir du moment où la réduction est complète et lorsque le liquide ne contient plus de nitrites, il ne se dégage qu'un mélange d'hydrogène et de gaz carbonique.

Passons maintenant à l'examen de la dénitrification observée dans les milieux naturels, et voyons quelles conséquences agricoles on en peut tirer.

La dénitrification dans le sol. — Le sol contient une foule de bactéries dénitrifiantes ; la plupart de celles qui ont été mises en œuvre dans les expériences qui précèdent se rencontrent dans la terre. Après avoir étudié le mécanisme de la réduction des nitrates, qui ne pouvait être nettement défini que par l'emploi de cultures pures et de milieux de composition strictement connue, il convient maintenant d'ajouter quelques mots sur les phénomènes tels qu'ils se passent dans les conditions habituelles de la pratique agricole. Il y a un fait remarquable, facile à expliquer cependant au moyen des données que nous venons d'acquérir, c'est celui d'une dénitrification intense dans le sol en présence d'un excès de matière organique.

Lorsqu'on eut découvert la présence constante de bactéries dénitrifiantes dans la terre, un agronome allemand, Wagner (1896), montra que l'efficacité du fumier de ferme n'était pas en rapport avec sa teneur



en azote, et il supposa que les nitrates, formés par l'oxydation de l'ammoniaque ou des matières azotées du fumier, étaient réduits par certains ferments qu'apportaient les excréments du bétail, et conséquemment, perdus pour la végétation. Wagner mélangeait, à des échantillons variés de terre, des matières animales telles que crottin, bouses, fumier frais, etc., il abandonnait à elles-mêmes, comme terme de comparaison, des terres semblables non additionnées et incorporait un poids connu de nitrate de sodium à ces deux catégories de sols. Après quelques jours, toutes ces terres sont soumises au lavage ; or, si l'on retrouve intégralement les nitrates dans les seconds échantillons, on constate que ces nitrates ont disparu en grande partie dans les premiers. Les conclusions que Wagner tira de ces expériences furent défavorables à l'emploi du fumier de ferme pour lequel il proposait l'emploi d'un traitement chimique préalable, afin d'assurer dans sa masse la destruction des organismes réducteurs que celle-ci renfermait et qui étaient la cause de la disparition des nitrates dans le sol.

L'emploi des fumures au fumier de ferme étant presque universellement reconnu comme fort avantageux dans un très grand nombre de cultures, et la réalisation des idées de Wagner pouvant amener une révolution dans la pratique agricole, Dehérain s'empara de la question et n'eut pas de peine à démontrer que l'*excès seul de la matière organique* incorporée au sol devait être incriminé dans les essais de l'agronome allemand. Voici quelques explications à cet égard.

Si on stérilise une solution de nitrate de potassium à 1 p. 100 et qu'on l'additionne de 0 gr. 5 de paille, la réaction des nitrites apparaît après quelques jours. Au bout d'un mois, il n'existe presque plus d'azote nitrique et la perte de l'azote à l'état gazeux est considérable. L'addition de fumier frais ou de crottin, au lieu de paille, fournit le même résultat ; ceci confirme les conclusions de Wagner : la paille et le fumier *frais* contiennent des ferments réducteurs. Mais si l'on emploie du fumier *consommé*, la perte ne se produit plus, ou, du moins, elle est très faible. Avec une goutte du liquide dans lequel le fumier a occasionné une énergique réduction, on peut ensemercer des ballons contenant ; pour 300 grammes d'eau, 1 gramme de nitrate de potassium et 2 grammes d'amidon. Au bout de quinze jours, les nitrates ont disparu. Cette réduction n'a lieu, dans ce dernier cas, que lorsque le liquide renferme de l'amidon ; le nitrate, s'il était seul, ne serait pas réduit. Ce phénomène s'atténue beaucoup si on fait passer dans les ballons de culture un rapide courant d'air ; inversement, la réduction est très rapide quand on maintient le liquide à l'abri de l'oxygène.

Comment se comporte la terre arable elle-même ? Lorsqu'on ensemece avec des terres variées des liqueurs renfermant un centième de nitrate de potassium et un peu d'amidon, on observe toujours la disparition des nitrates. La terre renferme donc des ferments réducteurs comme nous le savons déjà ; mais on exalte leur activité par addition d'amidon. Or, malgré leur présence constante dans le sol, ces ferments n'ont, dans les conditions ordinaires, que peu d'influence,



puisque la nitrification — ainsi qu'il est d'observation journalière — se passe d'une façon régulière. Mais ces ferments réducteurs deviennent dangereux lorsqu'ils sont en présence de certaines matières carbonées pouvant facilement fermenter.

Si, maintenant, on fait l'expérience avec des mélanges de terre arable et de fumier, voici ce que l'on constate. A 2 kilogrammes de terre on incorpore de 200 à 400 grammes de croton et une quantité bien connue de nitrate de potassium. Après quelques jours, on lave les échantillons pour y doser les nitrates, et l'on remarque que, si dans les essais maintenus à la température ordinaire la perte d'azote à l'état gazeux est peu marquée, cette perte est au contraire très notable lorsque l'essai a été porté à une température de 30°. Les idées émises par Wagner sont donc justes; mais, ainsi que le fait observer Dehérain, les doses de 200 et 400 grammes d'engrais pour 2 kilogrammes de terre équivalaient, dans la pratique agricole, à l'emploi, par hectare, de 400.000 et 800.000 kilogrammes de fumier de ferme. Cette dose est excessive; elle est dix et vingt fois plus forte que la dose employée, même dans le cas d'une fumure énergique. Si on mélange à un poids connu d'une bonne terre arable une quantité de fumier même double de celle que l'on distribue ordinairement, non seulement les nitrates ne sont pas réduits, mais la nitrification se poursuit d'une façon régulière. Donc, les bactéries dénitrifiantes n'exercent leur action funeste qu'en présence de quantités énormes de matière organique que l'on n'utilise jamais dans la pratique agricole. De plus, si l'amidon, comme il a été dit plus haut, constitue un aliment de choix pour les bactéries de la dénitrification, cet hydrate de carbone n'existe pas dans les excréments des animaux: l'amidon est toujours digéré. On a pensé que les *pentosanes*, et notamment la *xylane*, qui se rencontrent communément dans le fumier non consommé, pouvaient fournir aux microorganismes réducteurs un aliment hydrocarboné semblable à l'amidon des expériences précédentes. Mais les fermentations qui s'établissent dans la masse du fumier mis en tas détruisent la presque totalité de la xylane: aussi le *fumier fait*, tel qu'il est le plus souvent répandu sur le sol, ne présente-t-il aucun des inconvénients attribués au *fumier frais*.

A l'époque même où ces travaux étaient exécutés, Warington (1897) arrivait à une conclusion analogue: la dénitrification produite par les microorganismes réducteurs véhiculés par les excréments doit être mise sur le compte d'un apport exagéré de matière carbonée. Il est très vraisemblable qu'un pareil apport doit ralentir l'oxydation régulière de l'azote ammoniacal, voire même l'arrêter. Il en résulte qu'un milieu habituellement favorable à la nitrification peut, temporairement, être transformé en un milieu réducteur, puisque l'oxygène est enlevé aux nitrates préexistants.

Mais l'emploi d'un *fumier consommé*, introduisant dans le sol une matière beaucoup plus lentement fermentescible, ne saurait, conformément à l'expérience, présenter les mêmes inconvénients. De plus, Dehérain a fait remarquer que la destruction préalable des microor-



ganismes dans la masse du fumier avant son épandage ne présenterait aucun avantage, puisque l'apport de matière organique serait toujours le même et que les microbes dénitrificateurs habitent communément le sol.

En résumé, les conclusions formulées par Wagner sont vraies lorsqu'il s'agit de l'incorporation à une terre arable de masses considérables de matière carbonée. Mais la quantité de celle que l'on répand le plus souvent est incapable d'amener une dénitrification : les phénomènes oxydants d'une nitrification régulière sont alors chose normale.

La différence entre la façon dont certains microbes dénitrifiants évoluent dans un liquide de culture ou dans un sol très humide, d'une part, et, d'autre part, dans une terre modérément humide et bien aérée, provient surtout de la dose variable d'oxygène contenue dans ces deux sortes de milieux : faible ou nulle dans le premier cas, abondante dans le second cas, elle favorise ou entrave la dénitrification (Koeh et Petit, 1901).

Des notions qui précèdent, on peut tirer la conclusion suivante, relative à *l'emploi simultané du fumier et des nitrates* que réclament certaines cultures.

D'après Ampola et Ulpiani (1903), si l'on veut éviter les pertes d'azote, on doit, pendant la période régulière de la nitrification dans le sol, ne pas fournir à ce sol d'engrais frais ou riches en paille. Si la culture envisagée exige une application de nitrates, il ne faudra faire cette application qu'après décomposition complète du fumier dans la terre. Dans les sols tourbeux les nitrates sont rapidement détruits avec formation d'ammoniaque et d'azote libre.

En outre, on ne saurait trop insister sur ce point, c'est que si la *quantité* de matière organique ajoutée à un sol en voie de nitrification peut amener un arrêt, et même une rétrogradation dans la nitrification, la *qualité de cette matière*, c'est-à-dire ses facultés nutritives vis-à-vis des microorganismes réducteurs, joue aussi un rôle très important.

Des conclusions également intéressantes sur la nitrification et la dénitrification en présence de paille seule ou de paille mêlée



de fumier ont été formulées récemment par Kossowitch (1914).

Humidité des terres et dénitrification. — Si l'activité des ferments dénitrifiants est exaltée dans un sol très humide, par suite de la pauvreté de l'atmosphère en oxygène ou même de l'absence de ce gaz, il est, par contre, une condition opposée qui favorise également la dénitrification.

Giustiniani (1901) a fourni sur ce point quelques données dont voici les conclusions. Si on compose des milieux sableux artificiels que l'on divise en deux séries, et auxquels on incorpore, dans la première série, du sulfate d'ammonium et, dans la seconde, du nitrate de sodium (ces deux sels étant pris sous des poids renfermant même quantité d'azote); si, ensuite, on ensemeince tous ces milieux avec un peu de terre, voici ce que l'on observe à la température ordinaire en faisant varier le taux de l'humidité de 0 à 16 p. 100. L'énergie de la nitrification du sulfate d'ammonium est directement proportionnelle à la dose de l'humidité. La dénitrification du nitrate de sodium, bien que très faible, n'est sensible que lorsque le taux de l'humidité descend au-dessous d'un certain chiffre. Lorsqu'on expérimente avec la terre arable dans les mêmes conditions que celles qui viennent d'être indiquées, la dénitrification est manifeste quand le taux de l'humidité est inférieur à 6 p. 100. Un pareil taux ne suffit pas à l'entretien des ferments nitrificateurs. Mais ceux-ci reprennent rapidement le dessus lorsque l'humidité monte à 10 p. 100; avec 16 p. 100 leur action atteint son maximum. En ce qui concerne les ferments dénitrificateurs, la faible proportion de 4, et parfois de 2 p. 100 d'eau, représente la limite qui permet à ceux-ci de manifester leur activité, laquelle n'est pas alors entravée par celle des ferments travaillant en sens contraire. Lorsque le taux de l'humidité est nul, toute vie microbienne est suspendue; si ce taux est faible, voisin des limites que nous avons signalées, la dénitrification est proportionnelle à la richesse du milieu en matière organique: c'est ce qui résulte de l'observation faite sur deux terres, inégalement chargées d'humus, l'une à 4,2 p. 1000 et l'autre à 18,03 p. 1000 de carbone organique. Le maximum d'activité des ferments dénitrifiants a lieu à une température assez basse, incompatible avec le développement normal des ferments nitrificateurs.

Il résulte de ce qui précède que l'intensité des phénomènes de réduction des nitrates dans le sol dépend de trois facteurs dont le sens vient d'être défini: *humidité, température, proportion de matière organique.* Dans les milieux liquides, l'optimum d'activité des ferments dénitrificateurs est situé aux environs de 40-42°; cette température élevée est déjà défavorable à la nitrification.

D'après Oelsner (1914), les phénomènes de la dénitrification sont



observables dans un sol suffisamment humide à 40 p. 100 d'eau, même lorsque ce sol ne renferme que des traces de matières organiques : il ne s'agirait ici que d'une aération insuffisante.

On sait, d'autre part, qu'une forte teneur en eau du sol provoque l'apparition des protozoaires. Comme, de plus, une teneur excessive en eau favorise les phénomènes réducteurs, il en résulte que la présence d'un grand nombre de protozoaires (amibes, flagellés, ciliés) peut servir d'indication vis-à-vis du processus de la réduction. Il est possible, d'après von Wolzogen Kühr (1917), de diviser à cet égard les terres de la façon suivante :

1° *Bonnes terres*, dans lesquelles il y a peu ou pas de phénomènes réducteurs et qui ne contiennent que peu ou pas de protozoaires (0 à 50 par gramme de terre) ;

2° *Mauvaises terres*, fortement réduites, renfermant un nombre élevé de protozoaires (50, 100 et même davantage par gramme de terre) ;

3° *Très mauvaises terres*, encore plus réduites, avec peu ou pas de protozoaires. Le nombre de ces êtres inférieurs augmente donc d'abord au fur et à mesure qu'apparaissent les phénomènes réducteurs, il atteint un maximum et diminue quand on se trouve en présence de très mauvaises terres. En effet, les protozoaires sont aérobies et leur nombre s'accroît tant que l'aération du sol est suffisante ; mais lorsque les phénomènes réducteurs s'accroissent, les microorganismes anaérobies augmentent : donc la quantité d'oxygène diminue. Les protozoaires présentent alors un maximum. Enfin, les phénomènes de réduction devenant de plus en plus énergiques, le nombre des protozoaires s'abaisse, puis s'annule par suite du manque d'oxygène et de la présence des substances toxiques engendrées par le fait du processus réducteur.

Eaux d'égout et dénitrification. — Si les phénomènes de dénitrification dans le sol ont une grande importance pratique, et s'ils peuvent être évités en partie d'après les indications que nous avons données plus haut, ces mêmes phénomènes sont très intéressants à étudier, lorsqu'il s'agit de l'épuration des eaux d'égout. Il est évident, *a priori*, que cette masse fluide de matière organique qui constitue les eaux résiduelles, forcément peuplée des microorganismes les plus variés, doit être le siège de fermentations de toute nature. Au cours de leur épuration par les lits bactériens, les eaux d'égout laissent échapper une très notable quantité d'azote gazeux, ainsi qu'il ressort d'un travail de Müntz et Lainé (1911).

Cette perte s'élève de 50 à 60 p. 100 ; elle peut même atteindre 70 p. 100, et on constate une corrélation entre la proportion de matière



organique présente et la déperdition de l'azote. Quand la matière organique fait défaut et que la totalité de l'azote se trouve sous la forme ammoniacale, la perte d'azote est nulle ou insensible. Si, donc, il n'existait dans la masse que des microbes nitrificateurs, ceux-ci ne donneraient pas lieu à un dégagement d'azote libre : ce qui montre bien que ces microbes ne sont pas les seuls à produire l'épuration.

Lorsque l'eau d'égout a passé sur les lits bactériens, elle fournit, en moyenne, pour 100 parties d'azote préexistant : azote nitrifié 30 à 35, azote gazeux 55 à 60. Au point de vue de la destruction de la matière azotée, ce sont les agents vulgaires de la combustion qui agissent de la façon la plus efficace.

Malgré l'aération des lits bactériens, il y a réduction sensible des nitrates formés ; il se produit donc une perte d'azote, mais cette perte est cependant bien inférieure à celle qui résulte de la combustion directe des matières organiques et de l'ammoniaque elle-même. Plus la matière carbonée est abondante, plus la réduction est énergique. L'azote des nitrates ne donne naissance, ni à de la matière organique azotée, ni à de l'ammoniaque. Les microorganismes se bornent à emprunter l'oxygène à l'acide nitrique, sans en utiliser l'azote ; la réduction est complète, car il ne se produit pas de nitrites. Mais, à l'abri de l'air, il se forme d'abord des nitrites, surtout à basse température. On voit donc combien est complexe le phénomène de la transformation de l'azote organique d'une eau d'égout, et combien doit être considérable le nombre des agents microscopiques, doués de fonctions variées, qui interviennent dans ce processus : les conditions extérieures d'aération et de température règlent en partie le sens des réactions.

VI

AUXIMONES

Nous venons de parler, avec les détails nécessaires pour mettre en évidence leur intérêt de premier ordre, des phénomènes biologiques de l'ammonisation et de la nitrification, dont le rôle, bien défini, consiste à simplifier la molécule azotée complexe que contient toujours l'humus. Cette molécule — au moins sous sa forme primitive — n'est probablement, en effet, d'aucun secours pour la végétation dont les besoins *quantitatifs*, assez considérables en azote, ne sont assurés que lorsque cet azote existe sous la forme minérale.

Il est de notion courante que la plante réclame, en outre, d'autres éléments dont nous avons appris à constater la pré-



sence, et dont nous avons étudié les divers états dans le sol : acide phosphorique, potasse, chaux, magnésie. Mais nous devons nous demander maintenant si, à côté de ces éléments qui entrent dans les tissus végétaux sous des poids relativement élevés, il n'existerait pas des *infinitement petits de nature organique*, mais *non vivants*, susceptibles d'intervenir comme facteurs dans les phénomènes de la nutrition végétale.

On sait, en effet, quelle est à cet égard l'influence des *infinitement petits minéraux*, dont le rôle, insoupçonné autrefois, s'est précisé de façon remarquable dans ces dernières années. Le manganèse, le zinc, le bore, l'iode, etc., dont la présence était parfois décelée dans les anciennes analyses, semblaient ne s'introduire dans la plante que d'une manière fortuite et suivant les conditions du milieu où elle se développait.

Or, il est bien démontré aujourd'hui, grâce à l'emploi de méthodes analytiques d'une extrême délicatesse qui ont permis de les rencontrer chaque fois qu'on les a cherchés, que la présence de ces infinitement petits minéraux est indispensable à la structure, donc au fonctionnement de certaines diastases.

Afin de saisir l'intérêt qui s'attache à la découverte des *infinitement petits organiques* connus sous le nom d'*auximones* (*αυξιμοσ*, qui fait croître), dont l'étude est encore à peine ébauchée, il est utile de rappeler d'abord, en quelques mots, les acquisitions récentes faites dans le domaine de la nutrition animale à la suite de la découverte, dans certains aliments, d'*infinitement petits organiques* qui orientent les phénomènes de la croissance, et dont l'absence conduit à la déchéance vitale et à la mort.

Le fonctionnement normal de l'organisme animal exige, comme l'on sait, le concours d'une certaine proportion d'eau, de sels, d'aliments ternaires (graisses, hydrates de carbone) et d'aliments quaternaires ou albuminoïdes. Si, laissant de côté les trois premières catégories d'aliments, on porte son attention sur les albuminoïdes, on remarque que c'est dans ce groupe de substances organiques que l'on rencontre la plus grande hétérogénéité. En effet, un albuminoïde est toujours un édifice compliqué, construit avec des matériaux multiples, dont les plus caractéristiques sont les *acides aminés*. Mais si la structure chi-



mique de ces derniers diffère beaucoup d'un acide à l'autre, leur mode d'association dans la molécule protéique présente également de grandes variations. Or, dans une série de travaux récents, du plus haut intérêt, il a été établi de façon indiscutable que la présence, dans une ration alimentaire donnée, de certains de ces acides aminés est indispensable pour la croissance de l'animal, et qu'un albuminoïde qui en serait dépourvu ne saurait concourir à la nutrition. Le besoin d'azote, s'il est *quantitatif*, doit donc être aussi *qualitatif*. Les acides aminés dont l'animal ne peut faire la synthèse devront être forcément empruntés par lui, soit à d'autres animaux, soit aux végétaux.

Mais il y a plus ; et voici qu'un facteur nouveau apparaît. Les phénomènes de la croissance d'abord, ceux de l'équilibre physiologique ensuite, réclament, en outre, la présence d'autres éléments organiques, *sous des poids très faibles*, éléments auxquels Funk a donné le nom de *vitamines* (1). Leur constitution chimique et leur rôle intime sont encore mal connus, mais leur absence est incompatible avec le développement normal de l'individu. Les vitamines ne sont pas, à proprement parler, des aliments, ce sont des matières de *configuration déterminée* que l'on pourrait peut-être — mais sous toutes réserves — comparer aux infiniment petits minéraux dont nous parlions plus haut.

Les faits précédents étant admis, voici à la suite de quelles expériences un physiologiste anglais, Bottomley (1914), fut amené à constater, qu'en soumettant la tourbe à certains traitements, on lui confère le pouvoir de renfermer des substances susceptibles de stimuler de façon remarquable la croissance des plantes.

On prend de la tourbe fraîche que l'on humecte avec un bouillon de culture de bactéries aérobies ayant la propriété de changer l'acide humique en humates solubles. On maintient la masse pendant deux semaines environ à la température

(1) Le lecteur désireux de connaître la question des vitamines lira avec profit la belle étude que G. Schaeffer leur a consacrée dans le *Bulletin de la Société scientifique d'hygiène alimentaire et d'alimentation rationnelle de l'homme* (1918), sous le titre de : *Les travaux récents sur les besoins quantitatifs d'azote chez les mammifères et les vitamines*.



de 26°. On la stérilise ensuite à l'autoclave et on l'ensemence avec une culture mixte d'*Azotobacter chroococcum* et de *Bacillus radicola* ; puis on chauffe pendant quelques jours à 26°. La matière ainsi traitée, appelée *tourbe bactérisée*, contient jusqu'à 2,7 p. 100 d'azote soluble et 4,3 p. 100 d'azote total.

Dès les premiers essais qu'il exécuta sur l'influence de la tourbe bactérisée vis-à-vis des végétaux, il apparut à l'auteur que cette tourbe contenait, en plus des substances nutritives habituelles, une matière capable de communiquer aux plantes une vigueur particulière. Soluble dans l'eau et dans l'alcool, elle se montre active sous des poids très faibles. Il peut sembler assez naturel de rapprocher ces résultats de ceux que nous avons signalés plus haut relativement aux effets des vitamines vis-à-vis des animaux.

A ces substances encore très imparfaitement connues, renfermées dans la tourbe bactérisée, Bottomley donne le nom d'*auximones*. Les tentatives de séparation du milieu où elles ont pris naissance ont été réalisées de la façon suivante. La tourbe inoculée est épuisée par l'alcool ; on évapore la solution, et on reprend le résidu par l'eau distillée chaude. A une série de ballons munis des matières minérales indispensables, on ajoute l'extrait aqueux précédent, et on cultive sur le milieu l'*Azotobacter chroococcum* ; on constate alors une fixation d'azote beaucoup plus énergique que celle que donnerait la solution minérale seule.

Il résulte de cette expérience que la tourbe inoculée paraît renfermer une *substance stimulante*, assez stable d'ailleurs, puisqu'elle peut supporter, sans cesser d'être active, une température de 134°, ce qui n'est pas le cas des vitamines. Cette substance ne se rencontre pas dans la tourbe brute. L'acide phosphotungstique, susceptible de précipiter les principes nutritifs accessoires de la nutrition animale, précipite également l'extrait alcoolique de tourbe bactérisée. Une portion du précipité ainsi obtenu se montra, sous la dose de dix-sept millièmes, aussi active que l'extrait alcoolique lui-même. L'expérience a porté sur de jeunes pousses de blé : l'excédent de poids, sur celui des cultures faites seulement avec une liqueur nutritive complète ordinaire, atteignit 21,2 et 29,4 p. 100. Une préci-



pitation de la substance active effectuée par le nitrate d'argent a fourni des résultats analogues.

Les graines *non germées* d'orge, d'avoine, de pois, de lin ne renferment pas de vitamines ; ce n'est que pendant la germination que ces principes prennent naissance. Il semble donc qu'il se forme, du fait de l'acte germinatif, des substances spéciales permettant à l'embryon d'utiliser les réserves nutritives de la graine.

En vue de constater la présence effective de ces substances, on sépara de leurs graines de jeunes pousses de blé ; un lot de ces jeunes pousses servait de contrôle, l'autre fut additionné de l'extrait au nitrate d'argent : ce dernier lot a fourni des plantes dont le poids était dix fois supérieur à celui des sujets du premier lot.

Même ajoutées en très petite quantité, les auximones ont une influence considérable sur le développement de la lentille d'eau.

Continuant ses recherches, Bottomley (1915) a montré que lorsqu'on ajoute des auximones à une culture brute en voie de nitrification, il se produit une écume à la surface de cette culture. Les organismes générateurs de l'écume sont au nombre de deux ; ils abondent dans le sol. La formation de cette écume, dont la quantité augmente avec la dose d'auximones ajoutées, est spécifique de leur action. Les bactéries qui provoquent ce phénomène peuvent, comme les organismes de la nitrification, se développer sans le secours du carbone organique ; elles tirent leur azote de celui des sels ammoniacaux. Les auximones favorisent le processus nitrificateur. Mlle Moekering (1917) a étudié l'influence de l'extrait de tourbe bactériée sur les microorganismes les plus importants de la terre arable. Elle a confirmé que l'application de cet extrait était favorable aux phénomènes de la fixation de l'azote et de la nitrification, que cette application ralentissait la marche des phénomènes de dénitrification et paraissait sans influence sur l'ammonisation.

Si on stérilise à l'autoclave, en présence d'eau, une culture pure d'*Azotobacter chroococcum* et qu'on ajoute le liquide en petites quantités à une culture de *Lemna minor* en solution nutritive de Detmer, cette dernière plante se développe plus



rapidement et fournit un poids de matière sèche plus élevé que celui du témoin. De semblables résultats s'observent avec une culture de *Bacillus radicola* (Bottomley, 1920). Ces bactéries fixatrices d'azote élaborent des substances ayant mêmes effets stimulants que les dérivés de l'acide nucléique obtenus dans la décomposition des matières organiques (tourbe).

D'après Jones (1917), si la bactérisation de la tourbe semble augmenter le rendement végétal, il faudrait néanmoins répandre sur le sol des quantités considérables de matière pour obtenir des résultats avantageux, ceux-ci étant fonction de la quantité de tourbe ajoutée.

Les auximones paraissent prendre naissance pendant 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.

VII

POISONS DU SOL

Possibilité de l'intoxication du sol. — L'étude biologique du sol que nous venons d'exposer sommairement nous amène à conclure que la plupart des microorganismes qui habitent la terre arable travaillent le plus souvent dans un sens favorable à la végétation. Dans les conditions normales d'un bon sol aéré et convenablement labouré, tels microbes brûlent la matière carbonée et restituent au milieu ambiant de l'eau et du gaz carbonique, tels autres simplifient la molécule azotée d'origine albuminoïde pour en libérer de l'azote ammoniacal, tels autres oxydent ce dernier et produisent des nitrates. Les microbes inoffensifs, si l'on peut appeler ainsi les dénitrificateurs, n'évoluent que dans des circonstances où le sol arable se trouve, d'une façon temporaire ou définitive, soumis à des influences qui contrarient ou annulent l'activité des êtres de la première catégorie. On peut souvent lutter contre ces influences néfastes en assainissant le sol, en l'aérant par de bons labours, en provoquant l'écoulement des eaux superflues,



en lui fournissant certains agents chimiques tels que la chaux : bref, en favorisant dans la plus large mesure possible les phénomènes d'oxydation.

En réalité, le sol contient une foule d'ennemis des plantes. Les bactéries qui s'attaquent aux végétaux de la grande culture sont bien connues ; on sait, à cet égard, les ravages exercés vis-à-vis de la betterave, de la pomme de terre, du chou, etc. Le sol renferme aussi de nombreuses espèces de champignons qui envahissent les semis et les tubercules.

Or, l'étude attentive des causes qui, au bout d'un temps plus ou moins long, produisent un changement dans le poids des récoltes, a permis de découvrir l'influence certaine de facteurs autres que ceux dont nous venons de parler.

Ne pourrait-il pas arriver, à la longue, qu'un végétal, bien que disposant d'une quantité suffisante de matières nutritives, subisse une déchéance par suite de la présence de substances fixes ou volatiles qu'il excréterait autour de lui, même en très faibles quantités, ou de matières vénéneuses qui proviendraient du sol dans lequel il se développe, tels que, par exemple, certains produits de putréfaction qui prendraient naissance dans la terre aux dépens des très nombreux matériaux organiques que celle-ci renferme. *A priori*, rien ne s'oppose à cette manière de voir. Il peut y avoir intoxication de la plante par suite de l'existence, parfois passagère, d'une matière qui souille les dissolutions que cette plante emprunte au sol : ce serait là ce que l'on pourrait appeler une *intoxication externe*. Mais le fait est admissible aussi d'une *auto-intoxication* du végétal provenant de certains produits plus ou moins volatils que celui-ci émettrait constamment dans la terre et dont la présence, au bout d'un temps variable, retentirait sur sa vitalité de façon à déterminer l'arrêt de sa croissance.

Il faut, bien entendu, laisser ici de côté les influences nocives vis-à-vis de la végétation qui proviendraient de la présence de substances chimiques toxiques : sels de zinc, de plomb, de mercure, etc., répandus soit par hasard dans tel endroit, soit intentionnellement pour détruire quelque parasite dangereux. De même, il ne convient pas d'envisager le cas où, dans un lieu déterminé, un engrais soluble habituellement à la végétation, aurait été employé en quantité assez grande pour que sa concentration momentanée soit nuisible à l'évolution



de la plante tant qu'une dilution convenable n'aurait pas amené le sel à un état tel de dilution qu'il puisse être absorbé sans danger par la racine.

Des raisons d'ordre osmotique interviennent alors pour plasmolyser la cellule et amener la mort. A cet égard, on sait combien est nuisible l'action du sel marin apporté par l'eau de mer ; la plupart des végétaux ne résistent pas à la salure. Cet excès de sel ne disparaît que sous l'influence des pluies prolongées ; et si, pour une cause ou une autre, le sel marin envahit de nouveau le sol, soit par suite d'un apport en surface, soit par l'effet d'actions capillaires qui le font remonter de la profondeur, toute culture devient impossible. Les sels magnésiens solubles, même en très léger excès, sont également toxiques. Les terres acides (tourbières) ne sont capables de porter que des plantes de peu de valeur au point de vue alimentaire ; l'excès d'acidité produisant des effets analogues à ceux que l'on observe en présence de certains sels. L'oxydation du sulfure de fer, assez commun dans beaucoup de tourbières, engendre de l'acide sulfurique dont la concentration, même à faible dose, est un obstacle absolu au développement de la plupart des plantes.

Ceci posé, revenons aux substances toxiques qui ne proviennent pas d'un apport sur le sol de sels minéraux et qui appartiennent vraisemblablement à la série des *ptomaïnes* et des *toxines* d'origine cellulaire ou microbienne.

Il est bon, à ce propos, de faire les réflexions suivantes. On doit penser que la plante se comporte comme l'animal dans l'organisme duquel, même à l'état normal, il y a production constante de substances toxiques dont on trouve, dans l'urine principalement, de faibles traces, mais dont la quantité s'exagère au cours de divers états pathologiques. La respiration animale s'accompagne toujours de l'émission de produits toxiques volatils auxquels il faudrait rapporter certains phénomènes d'ordre nerveux constatés chez des animaux enfermés dans un espace clos, saturé de vapeur d'eau ; sans qu'il soit possible d'imputer les troubles observés à la présence du gaz carbonique. Nombre d'observations montrent que la respiration végétale a, sous ce rapport, d'étroites analogies avec la respiration des animaux. Berthelot (1889) a remarqué que si l'on enfermait de la terre humide sous une cloche, cette terre exhalait des traces d'ammoniaque et de composés azotés volatils lesquels se dissolvent dans l'eau qui ruisselle sur les parois de la cloche. Lorsque cette terre porte des plantes le même phénomène a lieu.

Fatigue du sol en général. — *L'intoxication du sol*, ou la *fatigue du sol*, comme on dit le plus souvent, est d'observation très ancienne. On sait que certaines plantes, les légumineuses en particulier, refusent de prospérer indéfiniment sur la même parcelle de terre. Tel végétal ne devra reparaitre sur la parcelle qui l'a porté qu'au bout d'un temps au moins égal à celui où



il est demeuré en place ; et cela, quelles que soient les façons que l'on ait données au sol pour l'aérer et quelle que soit la nature des engrais employés. Cependant cette intoxication du sol par la plante est difficile à comprendre, et beaucoup d'auteurs en ont nié d'abord la réalité : en effet, pourquoi ces toxines seraient-elles nuisibles vis-à-vis de la seule plante qui les a produites et non vis-à-vis d'autres plantes, capables de se développer normalement sur le sol même où les premières languissent en raison de l'intoxication qu'elles subissent ? On peut parfois incriminer l'épuisement de la terre en substances nutritives, et la prétendue fatigue du sol, dans le cas de la culture du trèfle notamment, doit être rapportée, d'après Kossowitsch (1906), à un manque d'acide phosphorique et, plus rarement, de potasse. Certains sols trop riches en azote s'opposeraient également à cette culture.

Mais si cette pauvreté relative du sol en éléments minéraux joue un rôle évident, là où elle a été dûment constatée, il est bien des cas où ce facteur ne saurait entrer seul en ligne de compte. Toutefois, on obtient, dans certains cas, de bons résultats en réinoculant simplement le sol avec une culture de la bactérie adaptée à l'espèce de légumineuse cultivée.

Malgré tout, il existe des plantes qui sont capables de végéter très longtemps sur le même sol : les expériences fameuses de Lawes et Gilbert sur la culture du blé le démontrent suffisamment. Il est superflu de faire remarquer que le sol des forêts porte indéfiniment la même végétation : on a émis l'hypothèse que les micorhizes qui garnissent les racines de la plupart des arbres les protègent contre toute infection.

Ce problème de l'intoxication du sol est l'objet depuis plusieurs années de nombreuses recherches, surtout de la part des agronomes américains, parmi lesquels il faut citer principalement Milton Whitney. Sans doute, cette intoxication est souvent une réalité, ainsi que nous l'établirons bientôt ; mais à force de vouloir chercher la raison du phénomène dans la présence, parfois hypothétique, de matières vénéneuses, on est arrivé, trop fréquemment, à négliger l'influence de certains facteurs étrangers à la question. On a prétendu, par exemple, que, sous le couvert des grands arbres, aucune végétation n'était possible en raison de la présence de substances toxiques excrétées par ces arbres. Or cette absence de végétation, d'observation courante, n'est nullement



un fait absolu. Lorsque la frondaison de l'arbre est abondante et que la lumière solaire pénètre difficilement jusqu'à terre, il n'y a rien qui doive surprendre quand on constate la rareté ou le manque de végétation de plantes à faibles dimensions. De plus, la *qualité lumineuse* des rayons de lumière blanche, modifiée par son passage au travers des surfaces vertes de l'arbre, doit être prise en considération.

Cependant cette dernière influence physique ne semble jouer qu'un rôle assez restreint. En effet, on a remarqué maintes fois que beaucoup de végétaux croissent normalement qui *sont plantés dans des caisses* disposées sous le couvert de grands arbres.

D'où il résulterait que les racines de ces arbres élaboreraient bien quelque substance toxique capable d'infecter le sol sur lequel les petits végétaux ne pourraient se développer.

D'autre part, les conifères (pins, sapins, etc.) laissent tomber chaque année sur le sol une quantité considérable d'aiguilles mortes, enduites de résine, et dont l'humification est par cela même extrêmement lente. Il existe donc sous les arbres de cette espèce un feutrage épais d'une matière difficilement putrescible qui s'oppose au développement des petits végétaux, si communs et si variés, que l'on rencontre sous les arbres d'essence différente.

L'exagération des influences toxiques a porté certains auteurs à défendre cette idée, que l'emploi des engrais était destiné, moins à nourrir les plantes, qu'à détruire dans le sol les matières vénéneuses produites par elles. Une pareille opinion, émise sous cette forme trop absolue, nous semble difficile à soutenir, et les preuves expérimentales que l'on a fournies parfois à cet égard sont assez fragiles. Le sujet mérite néanmoins une étude approfondie.

On sait que l'addition à certains sols de sels de fer, ou mieux de manganèse, produit une augmentation notable de récolte. Que ces sels métalliques jouent le rôle de *coferments* dans la constitution de certaines diastases dont ils renforcent ou provoquent l'action, la chose ne saurait être niée, depuis les travaux de G. Bertrand notamment. Mais on peut aussi se demander si ces sels — auxquels on pourrait ajouter les sels de zinc et l'acide borique, capables à l'état de traces de stimuler la végétation — n'interviendraient pas d'une façon plus ou moins directe en qualité d'*antitoxiques*.

Quoi qu'il en soit, la fatigue du sol est un fait d'observation courante. En voici un exemple fourni par Pouget et Chouchak (1907).

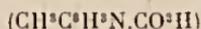


On épuise à l'eau distillée 60 à 80 kilog. de terre provenant d'une vieille luzernière. On évapore le liquide à sec à basse température (40°), et l'on divise l'extrait obtenu en deux parties. L'une est incorporée à une terre qui n'a jamais porté de luzerne, l'autre est calcinée, et les cendres qui proviennent de cette calcination sont mélangées avec une égale quantité de cette même terre. On répartit dans des vases identiques 5 kilogrammes de chacun de ces échantillons, et on dispose, en outre, comme témoin, un vase semblable rempli de la même terre, mais sans aucune addition. Chaque vase reçoit toujours une même quantité d'eau et un même nombre de graines de luzerne, germées préalablement. L'expérience, poursuivie pendant quatre ans, a permis de constater que l'*extrait aqueux de terre de luzerne calcinée* n'a pas agi de façon sensible sur la végétation, tout en mettant à la disposition de celle-ci une certaine quantité de matières salines. L'*extrait aqueux non calciné* a toujours produit une diminution de récolte qui ne peut provenir par conséquent que des *matières organiques apportées par cet extrait*. Nous reviendrons bientôt sur ce point en parlant des toxines issues des plantes elles-mêmes. Il faut conclure de ces essais que l'action toxique de l'extrait de terre de luzerne n'émane vraisemblablement que des sécrétions de la luzerne elle-même. D'après A. Lumière (1920), le *réveil de la terre*, que Müntz et Gaudechon (page 177) attribuent à un fonctionnement optimum des ferments nitrificateurs au début du printemps, serait imputable à l'élimination lente par l'eau de la pluie de produits toxiques sécrétés par les racines des plantes ou résultant de la mort de végétaux annuels.

En fait, ainsi que nous allons l'établir bientôt, il existe dans certaine terres des substances vénéneuses isolables. Dumont et Dupont (1907) ont montré que l'on pouvait rajeunir une terre à luzerne soit en l'aérant fortement, soit en l'enrichissant d'engrais variés ; la matière humique paraissant présenter dans ce cas une grande efficacité. On obtient des résultats encore meilleurs par l'apport de 10 p. 100 d'une terre n'ayant jamais porté de légumineuses. Les auteurs pensent que l'influence microbienne doit être ici laissée de côté.

On peut donc poser en principe que la fatigue des sols reconnaît d'autres causes qu'une diminution partielle des matières nutritives réclamées par les végétaux ou que l'emploi de mauvaises méthodes culturales. De là, à attribuer cette fatigue à la présence dans le sol de substances vénéneuses, il n'y a qu'un pas. Si, donc, cette dernière manière de voir est exacte, et si l'on parvient à constater la présence effective de ces substances, on pourra ensuite tenter de combattre cette *intoxication* du sol par l'emploi d'agents physiques ou chimiques susceptibles de détruire les poisons accumulés dans le sol à la suite des végétations antérieures.

Substances toxiques isolées du sol. — Un certain nombre de substances, dont la toxicité a été vérifiée vis-à-vis des plantes, ont été isolées du sol. Schreiner et Shorey (1908) ont trouvé dans une terre riche en sels minéraux, mais infertile, de Takoma Park, de petites quantités d'*acide picoline-carbonique* (méthylpyridinecarbonique) :



Cet acide exerce une action toxique vis-à-vis des semences du blé ; mais, à très faibles doses, il joue le rôle de stimulant, ainsi qu'il arrive souvent pour beaucoup de poisons. A la dose de 1 à 2 dix-millièmes dans le sol son action toxique est très nette.

Ces mêmes auteurs ont isolé d'un certain nombre de sols infertiles l'*acide dioxystéarique* $\text{C}^{18}\text{H}^{34}\text{O}^4$. Dans une terre du Tennessee, on en aurait rencontré 0 gr. 05 par kilogramme de terre. La toxicité de ce corps est déjà notable à la dose de 1/50000 ; très notable à celle de 1/10000 pour les jeunes blés. L'acide dioxystéarique obtenu artificiellement se conduit de même. La présence de cet acide peut se concevoir de la manière suivante. L'acide oléique fait partie intégrante de la graisse que renferment nombre de végétaux ; il entre également dans la molécule de plusieurs lécithines végétales. L'oxydation de cet acide, avec production d'acide dioxystéarique, sous l'influence de divers agents, air, enzymes des racines, microorganismes, est chose vraisemblable. L'existence de l'acide dioxystéarique dans beaucoup de sols infertiles a engagé Schreiner et Lathrop (1911) à rechercher s'il y avait une relation entre la présence de cet acide et l'infécondité des terres. Les auteurs ont examiné à cet égard 84 sols (60 échantillons pris à la surface et 24 sous-sols). Dans un tiers des cas, on a pu établir l'existence de cet acide. Les 60 sols proprement dits se divisent en deux catégories : 1° *les bons sols*, c'est-à-dire ceux d'une fertilité satisfaisante ou moyenne ; 2° *les sols pauvres*, c'est-à-dire les sols peu ou pas féconds. Dans les 25 sols qui constituaient ceux de la première catégorie, on n'a rencontré que 2 fois l'acide dioxystéarique, tandis qu'on a rencontré cet acide dans 18 des échantillons de la seconde catégorie qui en comprenait 35. Lorsqu'un sol est nettement infécond, la présence de l'acide peut y être décelée, et cela dans les localités les plus différentes. Aussi Schreiner et Lathrop estiment-ils que la recherche de cet acide est de quelque avantage lorsqu'il s'agit de contrôler la valeur culturale d'une terre.

On a rencontré dans certains sols de l'*acide oxystéarique* $\text{C}^{18}\text{H}^{34}\text{O}^3$, dont la présence serait imputable à la réaction de l'acide nitreux sur quelques acides aminés. On a pu également caractériser l'acide *lignocérique* $\text{C}^{24}\text{H}^{48}\text{O}^2$, dont la formation serait explicable par l'action de certains microorganismes sur les tissus ligneux.

Schreiner et Sullivan (1909) ont trouvé dans un sol, qui avait été cultivé pendant longtemps en fèves, une substance cristalline, vénéneuse vis-à-vis de ces plantes. Ce sol était devenu acide et la plante refusait d'y végéter ; débarrassé par lavage de ce produit toxique, il fut



de nouveau capable de porter cette plante. Indépendamment des matières que nous venons de mentionner, Schreiner et Shorey ont isolé du sol des carbures parafféniques, une cholestérine spéciale, l'agrostérine, non toxique, de l'arginine, de l'histidine, des dérivés pyrimidiques, des bases puriques (xanthine, hypoxanthine). Plus récemment, Shorey (1914) a trouvé dans des sols sableux de l'acide benzoïque, de l'acide métaoxytoluïque et de la vanilline.

Peut-on annuler ou diminuer la toxicité de certaines de ces substances ? Il résulte de plusieurs essais, effectués par Schreiner et Reed (1908) sur des plantes cultivées en solutions aqueuses, que la toxicité de quelques substances organiques ajoutées intentionnellement (vanilline, coumarine, arbutine) s'abaisse au contact des racines vivantes jusqu'à un certain point, lorsque la concentration initiale de la solution n'est pas assez élevée pour nuire au végétal. Il semble que le pouvoir oxydant des racines joue dans le phénomène un rôle notable ; les racines saines se défendraient elles-mêmes. On a, d'ailleurs, à propos de cette défense, émis certaines hypothèses appuyées parfois par des observations non douteuses, hypothèses dans lesquelles on a fait intervenir la destruction, par des microbes bienfaisants, de microbes nocifs pénétrant dans la racine.

L'addition de matières fertilisantes (nitrate de sodium, carbonate de calcium) combat, dans une certaine mesure, l'influence néfaste des substances toxiques présentes, et coopère, avec l'activité physiologique du végétal, à leur destruction. D'où cette opinion, formulée par beaucoup d'auteurs, que *l'influence bienfaisante des engrais salins s'exerce principalement vis-à-vis des poisons organiques du sol.*

Toxines provenant des plantes elles-mêmes. — L'origine des substances toxiques dont nous venons de constater la présence doit être vraisemblablement cherchée dans les plantes vivantes elles-mêmes, ou dans les débris qu'elles abandonnent au sol après leur mort.

Parmi les nombreuses recherches effectuées dans cette voie, et dont nous avons déjà dit quelques mots plus haut en parlant des expériences de Pouget et Chouchak, il faut citer les suivantes. Remarquons de suite que, d'après la plupart des auteurs, ces substances toxiques *ne sont pas spécifiques* de tel ou tel végétal, mais qu'elles peuvent nuire à des plantes d'une autre espèce que celles qui les ont produites.

Peritwin (1913), après avoir cultivé diverses plantes en sable quartzéux additionné d'une liqueur nutritive, a remarqué qu'une deuxième culture faite dans ce milieu donnait des sujets malades ; qu'il s'agisse de la même plante ou de plantes



différentes. Cet expérimentateur estime que ce sont les résidus de racines dont la décomposition est l'origine des produits nuisibles. Les solutions aqueuses de terres fatiguées, filtrées sur charbon, abandonnent leurs toxines à cet agent : tandis que l'ébullition du liquide ne les supprime pas.

L'action spécifique sur une catégorie déterminée de végétaux ne semble donc pas exister.

D'après Pickering (1917), l'eau d'arrosage qui a lavé les racines de certains végétaux (moutarde), étant introduite dans un vase où se développe de la moutarde, en réduit beaucoup la vigueur. Le principe toxique dont on constate ainsi les effets semble être très oxydable, car il disparaît lorsqu'on expose à l'air, pendant vingt-quatre heures, les eaux d'arrosage qui le renferment.

Greig Smith (1918) admet également la présence de toxines dans le sol.

Prianischnikow (1914), à la suite d'observations portant sur des cultures successives de plantes variées faites dans du sable humide pourvu de sels minéraux, remarque également un changement progressif des récoltes. S'il y a action toxique, cette action ne revêt cependant pas un caractère spécifique. L'auteur pense, ainsi que Peritwin, que la cause de cette déchéance vitale est imputable à la présence des racines demeurées dans le sol.

Il est cependant nécessaire de noter que ces substances vénéneuses — susceptibles d'intoxiquer indistinctement plusieurs espèces végétales — semblent n'avoir aucune prise sur certaines catégories de plantes, lesquelles posséderaient à cet égard une *immunité relative*. Signalée par quelques auteurs, cette immunité a été niée par d'autres.

Il est très probable que les variations que subit fréquemment un sol, quant à sa composition chimique et à sa réaction (acide ou basique), peuvent exalter ou diminuer, vis-à-vis des matières toxiques qu'il renferme, la résistance des plantes qui sont cultivées sur ce sol.

Cependant, à côté de cette intoxication provoquée par la présence de produits issus de la décomposition végétale, il existe d'autres facteurs *de nature chimique* capables de porter



préjudice aux plantes. En effet, d'après Prianischnikow, celles-ci n'absorbent pas dans le sol, à toutes les périodes de leur évolution, les acides et les bases de la même manière. Au début de leur existence, elles prennent plus de radicaux acides que de radicaux basiques : le sol s'alcalinise donc, et les plantes qui engendrent la plus grande alcalinité sont celles chez lesquelles la culture répétée fournit de mauvais rendements. Un lavage de la terre, après une culture de blé par exemple, suivi d'une addition de sels utiles, a pour effet de rendre une nouvelle culture sensiblement meilleure que si le lavage n'avait pas été pratiqué.

Il faudrait donc, en réalité, compter sur deux facteurs principaux susceptibles d'abaisser la fertilité d'un sol : présence de substances toxiques, *non spécifiques*, émanant des débris organiques d'une part, réaction alcaline provenant du mode même de nutrition de la plante d'autre part. L'influence de ce second facteur réclamerait de nouvelles recherches.

La réaction du sol ne saurait d'ailleurs être étrangère à l'abaissement de sa fertilité. Söhlngen, Knetemann et Wieringa (1917) ont remarqué, chez les sols des Pays-Bas, un pareil abaissement, préjudiciable surtout aux céréales, et qui semble coïncider avec un accroissement du taux de l'acide humique libre de ces sols : l'épandage d'amendements appropriés s'impose alors.

Beaucoup d'agronomes (Prianischnikow, Cameron, Peritwin, etc.) ont observé que l'introduction du charbon dans un sol fatigué annule les effets toxiques provenant d'une culture précédente, et élève le poids de la culture suivante.

Fatigue du sol en relation avec la présence des protozoaires. —

Si, comme nous venons de le voir, les toxines du sol occupent une place importante dans la question de l'abaissement de la fertilité d'une terre, il semble cependant qu'il faille tenir compte également de la présence de certains êtres vivants qui s'opposent au développement régulier des bactéries bienfaisantes (bactéries ammonisantes, bactéries de la nitrification, bactéries fixatrices d'azote). Il s'agit ici de certains protozoaires dont le rôle néfaste a surtout été mis en lumière par Russell et ses collaborateurs.



Une forte dose d'humidité, accompagnée de l'accumulation de matière organique, constitue un facteur susceptible de favoriser le développement des protozoaires et de provoquer, du fait de l'amointrissement dans le nombre des bactéries bien-faisantes, une fatigue du sol.

Il serait possible de lutter contre celle-ci, soit par l'emploi d'antiseptiques (toluène, sulfure de carbone) destinés à anéantir les protozoaires et à renforcer le développement des bactéries utiles (Russell et Golding, 1912), soit par l'application de la chaleur pendant deux heures à 96-98°, ou pendant trois heures à 55° (Russell et Petherbridge, 1912). Le nombre des bactéries utiles serait donc limité en quelque sorte par la présence des protozoaires. La disparition de ceux-ci à la suite de traitements appropriés, leur réapparition et leur multiplication lente après réinoculation avec une petite quantité de terre naturelle confirmeraient leur importance en tant que facteurs de l'épuisement des sols (Russell, 1916).

D'après Russell et Hutchinson (1913), les protozoaires se développeraient plus lentement et résisteraient moins bien que les bactéries aux effets de la chaleur et des antiseptiques. La température de 60° serait la température optima pour le développement des bactéries. Mais c'est aussi le degré de température qui serait strictement nécessaire pour anéantir les organismes supposés préjudiciables.

Russell (1917) a remarqué que la stérilisation partielle du sol, effectuée soit par chauffage à 60° ou plus, soit par exposition aux vapeurs de toluène pendant peu de temps, est suivie d'une augmentation, puis d'une diminution du nombre des bactéries. Cette augmentation s'observe aussitôt après l'élimination des vapeurs antiseptiques : aussi le nombre des bactéries peut-il alors surpasser de beaucoup celui que fournirait la terre primitive. On remarque, concurremment, une accumulation notable d'ammoniaque.

L'amélioration ainsi réalisée est permanente, au point que cette abondance de bactéries se maintient pendant plus de deux cents jours. En présence de cette amélioration, il ne peut donc être question d'une élimination de toxines issues des bactéries,



puisque l'activité de celles-ci est bien plus grande chez la terre stérilisé que chez la terre primitive.

Russell en conclut de nouveau que le seul facteur nuisible aux bactéries doit être cherché dans la présence des protozoaires que la stérilisation partielle de la terre est susceptible d'atteindre. L'augmentation du nombre des bactéries coïncide toujours avec la suppression des protozoaires. Les antiseptiques chimiques, suivant leur degré d'énergie, produisent des effets intermédiaires avec atténuation partielle des ravages qui sont imputables à ces protozoaires, mais on constate alors que, au bout d'un certain temps, l'augmentation du nombre des bactéries ne se maintient pas. Goodey et Cunningham (1906) ont émis des opinions analogues quant au rôle néfaste des protozoaires.

Toutéfois, cette manière de voir, un peu exclusive, bien qu'elle réponde fréquemment à la réalité des faits, n'est pas adoptée par tous les observateurs. La chose ne saurait surprendre si l'on réfléchit à la multiplicité des facteurs d'ordre physique et chimique qui gravitent autour de la question.

D'après Shermann (1916), les résultats précédents ne doivent pas être généralisés en raison même de la constitution essentiellement différente des sols. Hills (1918) prétend que la présence d'un nombre excessif de protozoaires est nuisible aux seuls *Azotobacter*, mais que cette constatation ne peut être faite que chez les milieux *artificiels* de culture. En ce qui concerne un sol à l'état naturel, l'influence des protozoaires sur l'ammonisation, la nitrification et la fixation de l'azote gazeux serait douteuse.

Ceci posé, et quelles que soient les causes premières de l'infection du sol, voyons comment on peut procéder à sa désinfection.

Modes de désinfection du sol. — L'un des plus anciennement connus est l'*écobuage*. Cette pratique consiste à brûler les herbes et les plantes ligneuses (bruyères, ajoncs) qui couvrent le sol, puis à enterrer par un labour la couche superficielle atteinte par l'action de la chaleur. Non seulement cette façon d'opérer produit certaines modifications avantageuses en ce qui con-



erne la nutrition future des plantes auxquelles elle fournit des matières salines sous un état plus assimilable, mais, de plus, elle provoque la destruction des spores de éryptogames et des œufs d'insectes.

Dans ces derniers temps, on a préconisé la stérilisation du sol par l'emploi de la chaleur, mais à une température beaucoup moins élevée que celle que fournit l'écoeuage. Le *chauffage* de la terre, vers 60-70°, détruit partiellement, ou même totalement les protozoaires, alors que les bactéries fixatrices d'azote résistent. Un échauffage à 120° dans l'autoeuave détruit presque toutes les bactéries ; mais, à cette température, la matière azotée du sol éprouve une simplification d'où résulte la formation de composés ammoniacaux en assez grande quantité ; formation qui s'accompagne d'un accroissement de fertilité.

Toutefois, l'application de la chaleur, ainsi comprise, serait pratiquement irréalisable au moins sur une grande échelle. Aussi convient-il de recourir à l'emploi ménagé des antiseptiques en général. Au premier rang de ceux-ci se place le sulfure de carbone, utilisé il y a déjà longtemps pour combattre chez les végétaux une foule de maladies cryptogamiques. Son emploi, dans le cas de la stérilisation des terres, semble devoir se généraliser.

Il est juste de rappeler à ce propos que, dès l'année 1881, A. Girard, à la suite d'expériences faites en Allemagne, avait préconisé l'emploi de ce liquide en vue de la destruction d'un nématode (*Heterodera Schachtii*) qui s'attaque à la betterave. A la dose massive de 300 grammes par mètre carré, ce parasite tue à la fois la plante et les nématodes. Mais les semis ultérieurs fournissent des betteraves toujours saines dont la richesse saccharine est égale à celle de betteraves normales.

Quelques années après, A. Girard a montré que l'injection dans le sol de ces doses massives de sulfure de carbone augmente dans une mesure considérable le rendement des récoltes, et que les bons effets obtenus devaient être attribués à la destruction des insectes adultes ou à l'état de larves, tandis que les bactéries utiles n'étaient pas touchées.

Mais les dépenses excessives qu'entraînerait l'usage du sul-



fure de carbone, à la dose indiquée plus haut, s'opposeraient immédiatement à son emploi s'il n'avait été démontré dans la suite que, sous des poids beaucoup plus faibles, il était possible d'obtenir des résultats encore satisfaisants.

Employé comme l'on sait avec grand succès depuis de nombreuses années pour combattre certaines maladies cryptogamiques, le sulfate de cuivre a été également recommandé dans la lutte contre les maladies du sol, au même titre que les antiseptiques dont nous allons bientôt parler. Mentionnons, à ce propos, les remarques faites par A. Girard, en 1895, sur l'innocuité vis-à-vis des plantes, d'une accumulation, même considérables, du cuivre dans la terre arable. En effet, cet auteur détermine approximativement la quantité de cuivre qui, employé aux doses actuelles pendant un siècle d'une lutte continue contre les maladies parasitaires, s'accumulerait dans le sol : soit environ 4.500 kilogrammes de sulfate de cuivre à l'hectare. L'expérience montre que les plantes les plus variées se développent normalement sur un terrain qui a reçu d'avance un poids aussi considérable de métal.

Revenons maintenant aux antiseptiques actuellement employés dans la stérilisation des sols.

Les substances suivantes dont les noms sont accompagnés de la dose habituelle qu'il convient d'appliquer à 1 mètre carré de surface, sont d'un usage courant : soufre (20 grammes), sulfate de cuivre (10 grammes), permanganate de potassium (5 grammes), charbon de bois (20 grammes), hypochlorite de chaux (10 grammes), toluène, formol, lysol, sulfure de carbone, eau oxygénée (5 centimètres cubes). Une foule d'autres substances, tant minérales qu'organiques, ont été également mises en œuvre.

Il existe forcément encore des divergences de vues sur l'efficacité de tel antiseptique et sur la quantité qu'il convient de mettre en usage. Etant donné le nombre très grand d'expériences faites à ce sujet, en Amérique notamment, nous ne pouvons signaler ici que les résultats de quelques essais particulièrement concluants.

Les expériences de Miège (1914) ont été effectuées en plein



champ sur des pommes de terre qui avaient été plantées quelques jours après l'enfouissement des antiseptiques précédemment cités. Les résultats favorables obtenus dans la culture de cette plante portent sur l'activation de la maturité des tubercules et l'amélioration de leur qualité. C'est à la suite de l'application du soufre que le rendement a été le meilleur : la récolte pesait le double de celle qu'avait fournie la parcelle témoin. Le sarrasin a donné des résultats du même ordre.

Les succès obtenus avec les plantes de jardin sont remarquables.

Voici, sous forme de tableau, quelques résultats qui se rapportent à des végétaux cultivés sur des parcelles de 20 mètres carrés (antiseptiques employés : permanganate, hypochlorite de chaux, charbon, formol, toluène, sulfure de carbone, eau oxygénée, sulfate de cuivre, soufre).

Haricots.

Témoin	= 0 kgr. 550
KMnO ⁴	= 0 kgr. 950
Ca(ClO) ²	= 1 kgr. 250
C.....	= 0 kgr. 900

Tomates.

Témoin	= 35 kgr. 000
Ca(ClO) ²	= 50 kgr. 500

Carottes.

Témoin	= 14 kgr. 100
CH ² O.....	= 42 kgr. 500

Pommes de terre.

Témoin.....	= 8 kgr. 440
C ² H ⁴	= 13 kgr. 700
CS ²	= 12 kgr. 880
CH ² O	= 12 kgr. 740
H ² O ²	= 12 kgr. 720
KMnO ⁴	= 13 kgr. 000
CuSO ⁴	= 14 kgr. 100
S.....	= 16 kgr. 920
C.....	= 12 kgr. 720



Truffaut (1918) emploie le sulfure de carbone sous forme d'émulsions savonneuses, à la dose de 500 kilogrammes à l'hectare ; dans ces conditions, il a obtenu, avec une culture de choux, une augmentation de 270 p. 100 par rapport au sol témoin.

Le sulfure de calcium a fourni, aux doses de 250 à 300 kilogrammes à l'hectare, des résultats excellents avec navets et rutabagas.

Les carbures suivants : benzène, anthracène, toluène, naphthaline, à la dose de 200 kilogrammes, seuls ou mélangés au sulfure de calcium, se sont montrés également favorables. Gainey (1918) a étudié l'influence du sulfure de carbone et celle du toluène sur le nombre total des bactéries, et sur l'activité de la nitrification. Si on fait une application suffisante de ces deux antiseptiques, il peut en résulter un arrêt de la nitrification et une destruction des *Azotobacter*, ceux-ci étant plus facilement atteints que les bactéries nitrifiantes. Les quantités maxima de sulfure de carbone et de toluène susceptibles d'entraver ou d'annuler le développement des microorganismes utiles varient beaucoup avec le degré d'humidité du sol ; l'efficacité de ces substances est en raison inverse du taux de cette humidité.

On voit donc qu'il est très important de déterminer à l'avance la *dose maniable* des antiseptiques en général, de façon à maintenir intacte la fécondité du sol, tout en détruisant les microorganismes nuisibles et les poisons qu'ils secrètent.

Il convient enfin de mentionner l'emploi de certains réactifs violents : acides sulfurique et chlorhydrique, sulfate ferreux, sulfures divers, sels de baryum, etc. destinés, le plus souvent dans la pratique, à supprimer les mauvaises herbes. Leur efficacité ne fait aucun doute lorsqu'ils sont répandus en quantité suffisante, mais leur emploi serait à surveiller s'il s'agissait de les appliquer à la destruction de parasites dangereux en raison même des dégâts qu'ils pourraient occasionner vis-à-vis des plantes que l'on veut précisément cultiver.

A l'usage de ces substances antiseptiques qui s'adressent au sol lui-même à assainir, il convient de joindre la désinfection des semences. On y parvient soit par l'emploi de la chaux, du



sulfate de cuivre, du formol, du lysol, etc., soit par une courte immersion dans l'eau chaude.

Interprétation des résultats obtenus dans la désinfection des sols. — Quelles explications peut-on mettre en avant dans le but d'interpréter les résultats favorables obtenus dans la désinfection des sols par les procédés mentionnés plus haut ? La chaleur et les antiseptiques tels que charbon, toluène, formol, ont pour effet de détruire les microorganismes nuisibles et, peut-être aussi, les toxines qu'ils secrètent. Cette catégorie d'antiseptiques ne subit dans le sol aucune modification probable.

Quant aux antiseptiques, tels que soufre, sulfures, sulfites, sulfates, chaux, permanganate, etc., leur mode d'action, qui doit être évidemment différent, pourrait dépendre de réactions chimiques plus ou moins profondes auxquelles ces substances participeraient dans le milieu où elles sont introduites. De plus, ces substances apportent au sol certains éléments de fertilité.

Nous avons vu les partisans de la lutte contre les protozoaires attribuer les bons effets des antiseptiques à la destruction de ces organismes, alors que les microbes utiles, plus résistants, seraient épargnés. L'ammonisation assez rapide de la matière humique, consécutive à l'emploi des antiseptiques, semble donner raison à ceux qui voient dans les protozoaires les ennemis principaux du sol. De plus, la matière même de ces protozoaires, ainsi anéantis, augmenterait la fertilité du sol.

Enfin — comme nous l'avons rappelé plus haut — il est probable que l'application de la chaleur et celle de certains antiseptiques sont capables de modifier quelque peu les propriétés physiques du sol et de favoriser la production de substances assimilables. On pourrait donc rapprocher cette action de celle des amendements proprement dits. Quelques auteurs ont cherché une explication des bons effets obtenus par l'emploi des antiseptiques en les interprétant dans le sens d'un changement de réaction du milieu, défavorable à telle espèce bactérienne et favorable à telle autre.

Les antiseptiques *réducteurs*, formol, toluène, sulfure de carbone, sulfites, charbon nuiraient au développement des microbes aérobies ; les antiseptiques *oxydants*, permanganate,



eau oxygénée, hypochlorites combattraient la présence des anaérobies. Il y aurait donc lieu, si l'on adoptait cette manière de voir, d'ailleurs assez plausible, de faire usage alternativement des deux sortes d'antiseptiques.

Toxicité du sol et assolements. — D'après Brown (1912), l'épuisement d'un sol, consécutif à la culture continue d'une même plante, reconnaîtrait à la fois une cause d'origine bactérienne et une cause d'origine chimique. Si les bactéries du sol manquent de nourriture, il peut arriver, par voie de conséquence, que les plantes ne trouvent plus les éléments nécessaires à leur évolution normale. La présence dans le sol de certaines substances organiques est capable de restreindre l'activité bactérienne à tel point que la récolte prochaine ne rencontrera plus les aliments qu'elle réclame. D'après l'auteur précité, la pratique des assolements augmente le nombre des microorganismes et, par conséquent, développe les facultés d'ammonisation, de nitrification, de fixation de l'azote. Il semble exister une relation étroite entre l'activité bactérienne et les fendements.

Toute autre est l'opinion suivante relativement aux heureux résultats que procure la pratique des assolements. Modestov (1917) nie que les bienfaits obtenus par cette pratique très ancienne doivent être attribués uniquement aux exigences différentes que manifestent les plantes vis-à-vis des éléments de fertilité, surtout en ce qui concerne l'azote et le phosphore dont les exportations sont à peu près les mêmes pour les diverses récoltes; il n'y aurait d'écarts sensibles que pour la potasse. Après avoir ainsi mis en doute la théorie actuelle des assolements, cet auteur explique de la façon suivante la diminution des rendements que l'on observe à la suite de la culture continue d'une même plante, et les avantages réels que l'on obtient par une rotation judicieuse : 1° le sol se trouve dans *un état physique plus favorable* après la culture d'une plante sarclée ; 2° le système radical des plantes évolue dans des couches du sol qui varient avec la nature de la plante (ces deux assertions ont d'ailleurs été émises bien des fois). D'après Modestov, elles suffiraient à expliquer les bons résultats des assolements.



En effet, en ce qui concerne, par exemple, l'avoine et la betterave, les points de contact des racines avec les particules de terre ne sont pas comparables dans les deux cas, et la faculté que possèdent ces racines de dissoudre les éléments fertilisants ne doit pas être du même ordre. D'après cette manière de voir, l'intoxication du sol d'origine microbienne passerait au second plan.

En résumé, il résulte de cet exposé que le nettoyage des terres à l'aide d'agents appropriés est parfaitement justifié, aussi bien au point de vue théorique qu'au point de vue pratique. Les résultats très encourageants déjà obtenus permettent d'affirmer qu'il convient de persévérer dans cette voie. Les résidus souvent inutilisables, et parfois encombrants, que laissent certaines industries chimiques pourront peut-être trouver des débouchés dans ce sens, à la condition, toutefois, qu'en raison de la quantité sous laquelle ils seront employés ou en raison de leur toxicité propre ils soient incapables de nuire au développement de la plante.

Un nouveau chapitre de la science agronomique est donc ouvert : celui de *l'hygiène du sol*.

Mais il ne faut pas perdre de vue la remarque suivante. On ne doit regarder les substances toxiques du sol — qu'elles proviennent de la plante elle-même ou des fumures organiques employées — comme cause unique de l'infertilité qu'après s'être assuré que ce sol contient une quantité suffisante de matières alimentaires assimilables, ou qu'il est susceptible, à la suite d'un travail soigné, de fonctionner normalement quant à sa perméabilité à l'eau et aux gaz de l'atmosphère (1).

Il se peut également, ainsi que l'a supposé Milton Withney, que les sols se débarrassent spontanément des toxines qu'ils renferment par le fait même de l'humification de leur matière organique.

(1) Voir sur la *Désinfection des sols*, l'intéressant travail de E. Miège (Annales du service des épiphyties, tome 5, page 83, 1918).



CHAPITRE XII

APPLICATIONS DE L'ÉTUDE DE LA CONSTITUTION CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE DES SOLS. EAUX DE DRAINAGE

Importance de l'étude des eaux de drainage. — Substances solubles contenues dans les eaux de drainage. — Pertes par drainage. — Quantités d'eau de pluie qui tombent sur une surface déterminée. — Richesse des eaux de drainage en éléments fertilisants. — Pertes d'azote nitrique dans les conditions naturelles. — Cultures dérobées.

I

IMPORTANCE DE L'ÉTUDE DES EAUX DE DRAINAGE (1)

Dans l'exposé que nous avons consacré à l'étude de la constitution chimique de la matière minérale des sols (Chapitre VII, tome I, page 230), nous avons examiné la nature des dissolutions contenues dans la terre arable. Nous avons montré par quels procédés on pouvait isoler les liquides qui mouillent normalement les particules terreuses avec leur degré réel de concentration et indiqué les conséquences que l'on doit tirer de leur présence au point de vue de la nutrition végétale. Il nous faut mainte-

(1) Dans ce Chapitre, il ne sera question que des eaux de drainage au point de vue chimique ; la pratique du drainage ayant été l'objet, dans cette Encyclopédie, d'un excellent travail de la part de MM. Risler et Wery (*Irrigations et drainage*, 2^e édition, Paris, 1909).



nant étudier ce qui se passe lorsque le sol reçoit, du fait de la chute des pluies, une quantité d'eau surabondante, capable de le traverser dans toute sa hauteur. On donne le nom *d'eaux de drainage* aux eaux qui s'infiltrent ainsi au travers du sol et qui s'écoulent, soit dans des drains artificiels, soit dans des drains naturels, c'est-à-dire dans les rivières. Leur étude complète ne pouvait être abordée avec profit qu'à la suite de celle des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Lorsqu'on fait l'analyse de l'eau qui a traversé toute l'épaisseur d'un poids un peu notable d'une bonne terre arable, et dont l'excédent a été recueilli au bas de l'allonge où cette terre était enfermée, on remarque, ainsi que nous l'avons dit à la page 239 du tome I de cet ouvrage, qu'il existe en quelque sorte deux catégories de substances en dissolution dans le liquide. Les unes sont relativement abondantes : chaux, acide nitrique, soude, acide sulfurique ; les autres sont moins abondantes ou même ne se rencontrent qu'à l'état de traces : potasse, silice, magnésie, chlore, acide phosphorique, ammoniacque.

On en conclut déjà que, si la masse des eaux pluviales qui traverse le sol est un peu considérable, la terre ayant subi ce lavage se dépouillera de quelques-uns des principes capables de fournir à l'organisme végétal un élément indispensable (azote nitrique), ou de quelque substance apte à jouer dans la terre un rôle physique ou chimique important (chaux). Il résulte de ces considérations préliminaires que l'étude du volume et de la composition des eaux qui filtrent au travers du sol est d'une grande importance pratique parce qu'elle permet d'apprécier, d'une part l'intensité et la nature des réactions chimiques et microbiennes dont ce sol est le siège, et, d'autre part, la quantité des matières fertilisantes perdues dans un laps de temps donné, matières qu'il sera nécessaire de réintroduire dans le sol si l'on veut y maintenir un certain degré de fertilité.

Principales questions que soulève l'examen des eaux de drainage : α **Eaux pluviales ; eaux de drainage.** — Etablissons, d'une manière générale, la nature des problèmes qui se présentent à nous dans ce genre de recherches. L'examen des



eaux de drainage doit comporter à *priori* l'étude d'un certain nombre de phénomènes.

En premier lieu, il est d'observation courante que la quantité d'eau pluviale qui tombe sur le sol est extrêmement variable d'un point du globe à un autre.

Il existe sur notre planète des localités où il ne pleut presque jamais. La pluie est nulle, ou à peu près, sur de grands espaces entre le Pérou et le Chili ; les chutes pluviales dans le Sahara sont insignifiantes. Au sud de la Californie, il ne tombe qu'une hauteur de 60 millimètres d'eau par an. Dans l'immense région comprise entre la mer Caspienne et la Mandchourie, le sud de la Sibérie et le Thibet, la hauteur de l'eau qui tombe est très faible.

Par contre, il est des régions où la hauteur de la pluie dépasse 3 mètres par année (intérieur des Guyanes, fond du golfe de Guinée, Bornéo, côte méridionale de Java, etc.). A Sierra-Leone, au Cameroun, la hauteur de la pluie atteint plus de 4 mètres ; elle s'élève à 5 mètres sur les côtes de Birmanie. Enfin, dans le fond du golfe de Bengale, il existe une station, située à 1200 mètres d'altitude, qui reçoit plus de 12 mètres d'eau.

En France, on constate des variations notables dans la quantité d'eau qui tombe annuellement dans les diverses régions. Sur quelques points des contrées du Midi, il tombe moins de 500 millimètres d'eau ; dans les lieux élevés (Alpes, Jura, Vosges, Auvergne, Morvan, Cévennes, monts d'Arrée en Bretagne), la chute d'eau annuelle dépasse souvent 1.500 millimètres.

Dans la même région, deux points, situés parfois à quelques kilomètres de distance, sont arrosés par des masses d'eau très inégales. Nous n'avons pas à définir ici les causes de ces variations ; il nous suffit de constater le fait. De plus, dans un endroit déterminé, le volume de l'eau pluviale tombée diffère essentiellement d'une année à l'autre, au moins dans beaucoup de cas.

Parmi les facteurs qui influent sur la quantité d'eau récoltée dans les drains, il faut considérer d'abord la perméabilité du sol. Si celui-ci se laisse facilement traverser par les liquides, la quantité d'eau recueillie toutes choses égales d'ailleurs, sera plus considérable que si on s'adresse à un sol moins perméable. De plus, la totalité de l'eau qui tombe sur une surface de terre déterminée ne traverse pas cette terre : une partie disparaît par évaporation, et cette fraction est d'autant plus notable que la température extérieure est plus élevée. Réciproquement, pendant les mois d'hiver, le rapport entre l'eau qui filtre au travers du sol et l'eau qui tombe à sa surface est beaucoup plus grand que pendant la période chaude de l'année, en raison de l'évaporation plus faible dans le premier cas.

On comprend que la perméabilité d'un sol considéré joue un rôle



important en ce qui concerne le rapport entre l'eau qui le traverse et celle qu'il reçoit. Si le sol est très perméable, l'eau pluviale s'infiltrera promptement et soustraira ainsi à l'évaporation des quantités de liquides d'autant plus élevées que le passage au travers de la masse terreuse sera plus rapide, et inversement.

β. Substances solubles dans les eaux de drainage; drainage et nitrification. — Une autre question se pose dans l'étude des eaux de drainage. Puisque la température de l'air, et celle du sol qui en dépend, possèdent une influence très marquée sur la fraction du liquide qui filtre, et que cette fraction ne saurait être la même dans les différentes saisons, *la composition chimique* des eaux de drainage doit varier aux diverses époques de l'année.

Il est un phénomène dont l'importance est dominante dans le cas actuel, c'est celui de la nitrification. Nous avons vu antérieurement que *les nitrates n'étaient pas retenus par le pouvoir absorbant*, et qu'un lavage quelque peu prolongé suffisait pour les entraîner en totalité. Or, l'activité de la nitrification est essentiellement variable suivant les différentes saisons. Faible ou nulle en hiver, en raison de l'abaissement de la température, elle devient plus grande au printemps et possède un maximum en été.

Considérons le cas d'une bonne terre arable, nue, c'est-à-dire dépourvue de végétation : c'est vers la fin de l'été que cette terre contiendra le plus de nitrates. Mais comme, en général, les drains coulent peu pendant la saison chaude, par suite de l'évaporation active qui s'exerce à la surface du sol, la perte d'azote nitrique sera faible. Elle ne deviendra notable qu'à une époque ultérieure où, la température s'étant abaissée, l'évaporation sera moindre ; le volume de l'eau pluviale capable de traverser le sol sera alors plus considérable. On en conclut que le dosage de l'azote nitrique dans les eaux de drainage doit fournir des indications précieuses sur le travail microbiologique du sol ; mais il faut avoir égard au temps que met le liquide à traverser la terre considérée pour reporter avec justesse, à une époque déterminée, l'intensité des réactions dont cette terre a été le siège à un moment donné.

Un problème analogue se pose dans le cas d'un sol cultivé. Ici, la question est plus complexe. En effet, la végétation soustrait au sol des quantités importantes d'azote nitrique : d'où pauvreté relative des eaux de drainage. De plus, la plante évapore, durant toute la période ascendante de son existence, un volume d'eau considérable. Le sol qui la porte, s'il ne reçoit pas une quantité suffisante d'eaux météoriques

ou d'eaux d'arrosage, peut se dessécher à tel point que la dose d'humidité qu'il renferme à une époque donnée soit trop faible pour subvenir aux exigences de la nitrification. Aussi, lorsqu'un sol semblable, une fois dépouillé des plantes qu'il a nourries, sera lavé par les pluies, celles-ci pourront-elles n'entraîner que des quantités très faibles d'azote nitrique : d'abord parce que la végétation aura utilisé à son profit une fraction plus ou moins notable des nitrates, et, en second lieu, parce que le dessèchement de la terre, du fait même de l'évolution de la plante, aura entravé l'activité de la nitrification.

Ces considérations sont très importantes en matière de culture.

Dans les lignes qui précèdent, il n'a été question que de sols que l'on supposait doués d'une richesse satisfaisante en principes minéraux et auxquels on n'avait pas distribué d'engrais. L'étude des eaux de drainage de terres ayant reçu, soit des nitrates, soit des sels ammoniacaux, soit des fumures organiques, telles que le fumier de ferme, présente un intérêt de premier ordre. La composition des eaux de drainage, examinée à certaines époques de l'année, pourra renseigner sur la rapidité avec laquelle les nitrates ajoutés auront filtré au travers de la terre ; elle montrera le temps employé par les sels ammoniacaux à se convertir en nitrates ; elle permettra de comparer entre elles, au point de vue de leur aptitude à la nitrification, les diverses fumures organiques : fumier, sang desséché, tourteaux, etc. Par conséquent, elle indiquera, pour tel sol de constitution physique déterminée, quels seront les engrais azotés dont la distribution sera la plus avantageuse, c'est-à-dire ceux qui transformeront le plus rapidement leur azote organique en azote nitrique. On devine combien la vitesse de cette transformation doit être variable suivant la structure de la terre considérée.

γ. Conséquences de l'entraînement des nitrates. — Puisque les nitrates s'écoulent facilement d'une terre lavée par une quantité suffisante d'eau de pluie, on aura tout intérêt à maintenir le sol couvert le plus longtemps possible de végétation, afin d'en extraire, par l'intermédiaire et au profit de la plante, une fraction importante de l'azote nitrique que ce sol contient. Or, à l'automne, à l'époque où la terre renferme encore, malgré l'exportation végétale, de fortes quantités de nitrates, et



où des pluies abondantes sont à craindre, il arrive fréquemment que le sol est, pendant un certain temps, privé de végétaux, et exposé, par conséquent, à perdre ses nitrates d'une manière plus ou moins complète. Une pratique ancienne et, qui, suivant la nature du sol, fournit des résultats variables, mais souvent assez bons, consiste à établir sur la terre ainsi dénudée la culture d'une plante à végétation rapide, capable de se développer entre le moment où la récolte principale a été enlevée et celui où l'on entreprend le semis d'une plante nouvelle. Ce genre de culture, destinée à absorber une fraction de l'azote nitrique, qui sans cela serait perdue, a reçu le nom de *cultures dérobées ou intercalaires*.

La plante fixe l'azote nitrique soluble et entraînable par l'eau pluviale ; elle le convertit en azote albuminoïde insoluble et le soustrait ainsi à une perte certaine. Le sort réservé aux cultures dérobées varie suivant les cas. Le plus souvent, on enterre les plantes sur place, dans le sol même qui les a portées, à la fin de l'automne. Il est évident que l'azote protéique va demeurer sous cet état pendant un espace de temps assez long ; car, pendant l'hiver, les phénomènes de décomposition microbienne, capables d'amener l'azote organique sous la forme ammoniacale, sont fortement ralentis par suite de l'abaissement de la température. Par le fait de l'installation d'une culture dérobée, on *insolubilise* en quelque sorte l'azote nitrique. Au bout d'un temps variable, qui dépend de la nature du sol et de l'élévation de la température, l'azote protéique prend successivement la forme ammoniacale, puis la forme nitrique ; il sera donc mis, dès le printemps suivant, à la disposition des végétaux que l'on sèmera à cette époque sur la parcelle de terre ayant reçu au préalable la culture dérobée. Nous reviendrons bientôt sur ce sujet.

Evaluation des pertes par drainage. — Cases de végétation. —

L'étude rationnelle des eaux de drainage est donc fort instructive, et, si nous avons jusqu'à présent parlé surtout de l'azote nitrique, c'est que cet élément est indispensable à la plante et que son prix est assez élevé. De plus, c'est la perte, souvent considérable, de l'azote nitrique par drainage qui retentit le plus sur la fertilité des sols.

L'analyse de l'eau des drains naturels (rivières ou ruisseaux) fournit des renseignements sur les pertes qu'éprouve le sol lorsqu'il est traversé par les eaux de la pluie. Mais le calcul



exact du volume de l'eau qui a traversé ce sol ainsi que l'estimation réelle des surfaces arrosées ayant déversé leurs eaux dans telle rivière, présentent quelque difficulté.

Les travaux les plus soignés et les plus fructueux; quant à l'interprétation des résultats obtenus, sont ceux dans lesquels il a été fait usage de *cases de végétation*.

On appelle ainsi de vastes cavités creusées dans le sol, dont les parois et le fond sont isolés de la terre qui les entoure par une maçonnerie suffisamment épaisse, rendue imperméable par un revêtement de ciment. De pareilles cases auront de 3 à 4 mètres carrés de surface et 1 mètre de profondeur. On ménagera dans le fond une ou deux ouvertures destinées à recueillir l'eau qui traversera la masse de terre. On garnit ces cases avec la terre que l'on doit soumettre à l'étude, et on pourra imiter la constitution naturelle d'un sol en disposant dans le fond de la case un sous-sol artificiel de telle structure que l'on voudra. Un pluviomètre, de surface connue, situé dans le voisinage, indiquera la quantité d'eau de pluie qui tombe. De semblables appareils donnent des renseignements très précis, non seulement dans le cas de terres nues, mais surtout dans le cas de sols plantés et pourvus ou non d'engrais. Ce sont ces renseignements dont nous ferons état dans ce qui va suivre.

Toutefois, une critique qui saute aux yeux s'impose lorsqu'on emploie ces appareils. La terre dont on garnit les cases est forcément moins tassée que dans les conditions naturelles. Si la case a une profondeur d'un mètre par exemple, cette terre se trouve ainsi ameublie sur une hauteur beaucoup plus grande que celle des sols même les mieux travaillés. Malgré cela, les conclusions que l'on peut tirer des observations faites sur les cases de végétation méritent quelque attention. On comprend que, en raison même de l'aéneblissement du sol, les chiffres qui représentent la déperdition de certains éléments soient plus élevés que ceux que l'on obtiendrait dans des circonstances plus naturelles. Ceci est vrai particulièrement au début des observations; dans la suite, la terre se tasse peu à peu et prend une structure normale. D'ailleurs, ce n'est pas là un inconvénient sérieux: mieux vaut connaître le maximum des pertes qu'éprouve un sol de façon à pouvoir y remédier par des apports suffisants de matières fertilisantes.

À défaut de cases de végétation, on a fait souvent usage de grands vases de grès, percés de trous, d'une cinquantaine de centimètres de hauteur et d'un diamètre à peu près égal.

L'étude des eaux de drainage, au point de vue chimique, a été entreprise par nombre d'auteurs; nous retiendrons principalement ici les faits mis en lumière par Lawes, Gilbert et Warrington en Angleterre, et par Delérain en France.

Reprenons maintenant l'étude détaillée des divers points



que nous venons d'indiquer. Nous insisterons principalement sur les faits suivants : quantités d'eau pluviale qui tombent sur une surface déterminée et rapport existant entre l'eau qui traverse le sol et l'eau que ce sol a reçue ; expériences de Lawes et Gilbert destinées à établir ce rapport ; expériences de Dehérain ; substances dissoutes dans les eaux de drainage dans les cas des terres nues ou cultivées avec ou sans engrais ; pertes d'azote nitrique dans les conditions naturelles ; cultures dérobées.

II

QUANTITÉS D'EAU DE PLUIE QUI TOMBENT SUR UNE SURFACE DÉTERMINÉE

Apport total. — On possède à cet égard des données assez complètes, relatives à un grand nombre de régions du globe. Mais nous ne transcrivons ici que quelques chiffres en particulier, destinés à montrer la variabilité de la hauteur de la pluie tombée suivant les différentes années.

A Montsouris (1), dans la région sud de Paris, la hauteur moyenne de la pluie (en millimètres) pendant vingt ans (1875-1895) a été la suivante, dans les différents mois de l'année :

Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
46,1	36,1	31,5	35,9	39,8	43,2	58,1	54,5
	Août	Septembre	Octobre	Novembre			
	50,6	45,4	58,7	48,1			

soit donc une hauteur moyenne, pour l'année entière, de 548 millimètres. Durant cette période, les variations ont été considérables, pendant le même mois, d'une année à l'autre. Citons quelques exemples. Dans le tableau ci-dessous, le premier chiffre indique la hauteur maximum, accompagné, entre

(1) D'après l'*Annuaire de l'Observatoire municipal de Montsouris*, année 1897.



parenthèses, du millésime de l'année; le chiffre placé au-dessous indique la hauteur minimum (en millimètres) :

Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril
84,6 (1872)	63,2 (1875)	59,1 (1873)	87,7 (1888)	84,9 (1878)
6,0 (1873)	9,1 (1876)	1,8 (1887)	6,0 (1893)	0,3 (1893)
Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
84,7 (1889)	137,9 (1873)	105,4 (1890)	79,2 (1886)	85,3 (1883)
3,6 (1880)	26,7 (1877)	16,6 (1885)	17,4 (1893)	0 (1895)
	Octobre	Novembre		
	149,8 (1892)	106,7 (1882)		
	19,7 (1888)	15,9 (1879)		

Dans le cours de l'année, s'étendant de décembre à novembre, la hauteur maximum d'eau de pluie a été observée en 1885-86; elle s'est élevée à 710 mm. 3. La hauteur minimum a été observée en 1873-74; elle s'est élevée à 396 mm.4, soit 55 p. 100 seulement. La surface d'un hectare aurait donc reçu, en 1885-86, 7.103 mètres cubes d'eau; en 1873-74, 3.964 mètres cubes. Une année moyenne fournirait 5.480 mètres cubes. En Angleterre, la quantité d'eau tombée est, en général, plus considérable qu'à Paris. A Rothamsted, notamment, où ont été faites les observations de Lawes et Gilbert, on trouve les moyennes suivantes, en millimètres, relatives à un intervalle de vingt-sept années (1853-1879).

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
67,5	42,9	43,4	50,8	60,7	62,7	66,3	68,6
Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total			
64,0	75,7	58,9	51,6	713,3			

Le minimum d'eau tombée se rencontre en février et le maximum en octobre, à Rothamsted comme à Paris.

Evaporation de l'eau. — Il est bien évident que la totalité de l'eau de pluie qui tombe sur une surface déterminée ne saurait traverser le sol. Une partie demeure dans l'épaisseur de celui-ci, et cette fraction varie avec l'état antérieur d'humidité.



dité de la terre considérée et avec sa constitution physique. Nous avons déjà étudié ce point particulier en traitant de l'imbibition des terres par l'eau, tome I, page 160. L'autre partie de l'eau tombée s'évapore dans l'atmosphère, et cette fraction varie principalement avec la température et l'état hygrométrique de l'air. Lorsque le sol considéré est couvert de végétation, une portion de l'eau ayant primitivement pénétré dans la terre s'introduit dans la plante à l'activité physiologique de laquelle elle est indispensable. Cette eau ne s'y immobilise pas; elle est sans cesse rejetée dans l'atmosphère (transpiration), et sans cesse remplacée par une nouvelle quantité de liquide soustrait au sol par les racines. Au fur et à mesure des progrès de sa végétation, la plante se dessèche peu à peu, mais alors même qu'elle paraît complètement sèche, elle contient encore une dose d'eau notable.

Il nous reste donc à chercher quelle est la fraction de l'eau de pluie qui, suivant les diverses circonstances que nous venons d'énumérer, traverse complètement le sol et dissout pendant son passage certaines substances fertilisantes qui sont alors perdues pour la végétation.

On peut tout d'abord se faire, ainsi qu'il suit, une idée sommaire de la quantité d'eau évaporée. Prenons, comme le fait Duclaux, une étendue de terre considérable, au sujet de laquelle on possède des indications précises relativement à la quantité d'eau tombée et à celle que les fleuves déversent annuellement dans la mer. En France, sur une surface de 528.000 kilomètres carrés environ, il tombe, par an, 417 milliards de mètres cubes d'eau, pour une hauteur moyenne de pluie de 700 millimètres. Les fleuves en débitent 180 milliards de mètres cubes ;

le rapport $\frac{180}{417}$ est égal à $\frac{43}{100}$. On en conclut que la totalité du sol de la France absorbe 43 p. 100 de l'eau tombée, laquelle passe dans les fleuves et, que 57 p. 100 de cette eau de pluie sont rejetés dans l'atmosphère par évaporation.

Ces données brutes ne nous renseignent pas sur l'état des surfaces ; il n'est question ici que de l'ensemble de l'évaporation, celle-ci provenant à la fois des espaces dépourvus de végétation et de ceux qui en sont couverts.

Risler, dans sa propriété de Calèves (Suisse), a étudié pendant dix ans (1867-1876) le rapport entre les quantités d'eau tombée et d'eau évaporée sur des terres cultivées à l'état normal (blé, luzerne, trèfle). Le champ de culture avait une surface de 10 ares ; les eaux qui tra-



versaient le sol étaient reçues dans une série de drains régulièrement disposés. En sorte que cette expérience, faite sur une assez grande échelle, présente une valeur indiscutable.

La hauteur moyenne de la pluie des dix années a été de 944 mm. 6. Les drains en ont recueilli 250,8 ; la différence, c'est-à-dire 693, représente à la fois l'eau qui est retournée à l'atmosphère par simple évaporation, l'eau qui est demeurée dans le sol, et l'eau qui, à un moment donné, a fait partie des tissus végétaux. On trouve donc que, dans la localité où cette observation a été faite, sur 100 parties d'eau tombée, il y a eu 26 parties d'eau captée par les drains et 74 parties d'eau évaporée. Il s'agit ici d'un sol cultivé *normalement*. Les chiffres de cette expérience montrent, si on les compare à ceux que nous avons donnés relativement à la surface de la France, que l'influence de la végétation sur la quantité d'eau de pluie évaporée est considérable : les plantes dessèchent partiellement le sol. Nous aurons l'occasion de trouver ultérieurement confirmation de ce fait.

Expériences de Lawes et Gilbert. — Ces auteurs, pour recueillir et mesurer l'eau de drainage, ont construit de grandes caisses en briques contenant des épaisseurs de terre égales à 0 m. 50, 1 mètre, 1 m. 50. Leurs expériences ont été poursuivies pendant un long espace de temps (1853-1880). Nous aurons surtout en vue ici la période décennale (1871-1880) sur laquelle il a été fourni beaucoup de renseignements.

Lawes et Gilbert ont d'abord étudié le rapport entre la quantité d'eau tombée pendant chaque saison et celle qui traverse une épaisseur de terre déterminée. La moyenne annuelle de la hauteur de la pluie a été de 786 millimètres ; les $\frac{44}{100}$ de cette eau ont pénétré dans le sol. Sous le climat de Paris, moins humide que celui de l'Angleterre, l'eau qui traverse le sol n'est guère que le tiers de l'eau tombée.

Lawes et Gilbert font remarquer que le passage de l'eau à travers la terre s'effectue de deux façons différentes : 1° *par drainage direct*. Dans ce cas, l'eau s'infiltré en suivant les canaux qui sillonnent la masse entière du sol. Ce passage est très facile, car ces canaux, qui consistent en fentes et fissures, persistent alors même que la sécheresse a cessé ; 2° *par drainage général*. L'eau filtre alors peu à peu au travers de toute l'épaisseur de la terre. Elle se sature des sels qu'elle y rencontre ; tandis que, dans le cas du drainage direct, elle ne peut en dissoudre qu'une assez faible quantité. Lorsque la terre est légère, naturellement poreuse, l'imbibition est rapide et l'on a surtout affaire au



drainage général. Mais s'il s'agit d'une terre forte, l'eau se glisse d'abord dans les canaux préexistants avant de mouiller la masse entière du sol : le drainage direct précède donc le drainage général.

On a constaté en Angleterre, au point de vue de la variabilité annuelle de la chute des eaux pluviales, des phénomènes analogues à ceux que nous avons signalés plus haut à propos des observations faites à Montsouris. L'année 1874, par exemple, n'a fourni que 574 millimètres d'eau ; l'année 1879 en a fourni 1079 millimètres. Il est donc tombé beaucoup plus d'eau à Rothamsted qu'à Paris.

Le rapport entre la quantité d'eau qui passe dans les drains et celle qui tombe sur le sol varie énormément avec les saisons, et, cela, pour les causes que nous avons indiquées antérieurement. La période avril-septembre donne 26 p. 100 d'eau de drainage ; donc, 74 p. 100 de l'eau tombée se sont évaporés. La période octobre-mars donne 62 p. 100 de drainage et 38 p. 100 d'eau évaporée. Voilà pour la moyenne. Mais, d'une année à l'autre, les écarts sont parfois très grands : 100 parties d'eau tombée pendant l'été ont fourni de 7,9 à 47,6 parties d'eau de drainage.

La quantité d'eau qui s'évapore à la surface d'un sol *non cultivé* dépend de la température de l'air, de son état hygrométrique, de l'intensité du vent, de la température du sol, du mode de distribution de l'eau dans le sol. Ce dernier point a son importance. En effet, l'observation montre qu'une pluie abondante et qui tombe rapidement fournit un volume d'eau de drainage plus grand, donc une évaporation moindre, que la même quantité d'eau répartie sur la même surface mais pendant un temps plus long. En été, étant donnée l'élévation de la température, l'évaporation de l'eau est incomparablement plus forte qu'en hiver ; cependant, la quantité d'eau qui tombe pendant l'été l'emporte toujours sur celle qui tombe en hiver. Malgré cela, et en raison même de l'évaporation très forte de l'eau pendant l'été, la terre laisse filtrer plus d'eau en hiver qu'en été.

A Rothamsted, durant la période décennale envisagée, le rapport entre l'eau évaporée et l'eau qui a traversé la terre a oscillé autour des chiffres suivants :

Sur 100 parties d'eau tombée :

	Janvier	Mars	Juin	Sept.	Nov.
Eau évaporée.....	24	60	80	65	30
Eau ayant filtré	76	40	20	35	70

Il convient de remarquer que l'on commet une erreur en calculant par différence l'eau évaporée. Car, à partir de l'hiver jusqu'au milieu de l'été, le sol subit une dessiccation progressive et continue ; donc l'évaporation réelle surpasse la différence observée entre la pluie tombée et l'eau de drainage recueillie. Le phénomène inverse a lieu pen-



dant la période de refroidissement durant laquelle le sol se sature peu à peu d'humidité.

Lorsqu'il s'agit d'un sol cultivé, les choses se passent autrement. Les feuilles évaporent des quantités d'eau considérables en relation avec l'éclairage qu'elles reçoivent. Or, l'assimilation chlorophyllienne est sous la dépendance de cet éclairage. De sorte que, entre l'accroissement d'un végétal et sa transpiration, il doit exister une relation étroite. Lawes et Gilbert remarquent que, dans des circonstances favorables, cette relation est sensiblement constante. D'après leurs expériences, il faut admettre que, lorsque la plante fabrique 1 gramme de matière sèche, elle évapore de 250 à 300 grammes d'eau. En réalité, l'écart est encore plus grand, ainsi qu'il résulte de travaux ultérieurs.

Expériences de Dehérain. — En faisant usage de grands vases de grès remplis de terres de différentes origines, Dehérain a constaté à Grignon (aux environs de Paris) que l'eau de drainage n'atteignait jamais le tiers de l'eau de pluie tombée. La quantité d'eau qui s'écoule des terres pauvres en humus est toujours un peu plus grande que celle qui filtre au travers d'une terre plus riche ; les différences sont toutefois assez faibles.

Voici un exemple, fourni par l'auteur précité, du drainage d'une terre nue, observé dans une case de végétation de 4 mètres carrés de surface sur 1 mètre de profondeur, du 27 février 1892 au 2 mars 1893. Si on rapporte les chiffres à une surface de 1 mètre carré, on trouve que l'eau pluviale a fourni 566 litres, l'eau de drainage 145 litres ; il en résulte que 25,6 p. 100 seulement de l'eau de pluie ont traversé la terre. Le drainage a été nul du 17 février au 21 juillet ; du 12 novembre au 2 mars il représentait 46 p. 100 de l'eau tombée. On voit, par ce seul exemple, quelles variations énormes présente la quantité d'eau qui filtre par rapport à celle qui tombe sur le sol, et la nécessité où l'on est d'étudier de pareils phénomènes sur de très longues périodes.

Lorsqu'il s'agit de sols cultivés, il arrive souvent que l'on ne recueille pas d'eau de drainage avant la fin de l'automne, car les plantes ont desséché à un tel point le sol que les premières pluies d'automne ne suffisent pas à mouiller complètement la terre.



III

**RICHESSSE DES EAUX DE DRAINAGE EN ÉLÉMENTS
FERTILISANTS**

La composition minérale des eaux de drainage varie essentiellement avec la composition chimique du sol ; elle varie aussi avec la présence ou l'absence de végétaux, puisque ceux-ci absorbent des éléments de fertilité qui sont alors soustraits aux liquides qui imbibent la terre ; elle dépend du degré de vigueur des plantes et de leur nature : telle plante absorbant davantage telle substance. Enfin elle est en relation avec la quantité et la nature des engrais distribués.

On trouve dans les eaux de drainage des terres cultivées ou cultivables deux éléments de première importance : de l'azote nitrique et de la chaux (sous forme de bicarbonate, de sulfate, de chlorure). On y rencontre aussi de notables quantités de soude. Beaucoup d'eaux de drainage renferment d'assez fortes proportions de chlore et d'acide sulfurique. Les autres éléments fertilisants, acide phosphorique, potasse, ammoniaque, n'existent le plus souvent qu'en doses minimes, parfois même à l'état de traces. En effet, la plupart des terres arables, à moins qu'elles ne soient d'une excessive pauvreté en calcaire et en humus, possèdent, à l'égard des trois dernières substances que nous venons de citer, un pouvoir absorbant très marqué.

Cas des terres non cultivées ou des terres n'ayant pas reçu d'engrais. — L'acide nitrique est l'élément dont le taux est le plus intéressant à connaître, en raison de l'utilité incontestée de cette substance et de son prix relativement élevé. De plus, l'étude des pertes d'azote nitrique donne une mesure directe du travail chimique et bactériologique du sol.

Le maximum de richesse en nitrates se présente le plus souvent dans le premier drainage d'automne, d'après Lawes et Gilbert. Peu à peu, cette richesse diminue, et l'on observe un minimum de nitrates au printemps. La chose est facile à



comprendre puisque les nitrates s'accumulent dans le sol pendant l'été, grâce à une température favorable à l'évolution du ferment nitrique. Le drainage est faible dans cette saison, quelquefois il est nul ; car, alors même qu'il s'agit d'une terre nue, l'évaporation est considérable. Il faut remarquer, cependant, que les premières eaux qui s'écoulent dans les drains au mois d'octobre ne sont pas forcément les plus chargées en nitrates. En effet, ceux-ci sont surtout abondants dans les couches supérieures du sol ; ils n'apparaissent dans les drains que lorsque toute l'eau de la couche qui leur est sous-jacente a d'abord été déplacée.

Pendant une période de neuf années, il a été trouvé en moyenne dans les eaux de drainage, par an et par hectare, à Rothamsted, les quantités suivantes d'azote nitrique (1877-1886) :

Mars à juin = 7 kgr. 5 ; juillet à septembre = 8,7 ;
octobre à février = 27 ;

soit un total de 43 kilogrammes recueillis dans une case de végétation de 1 m. 50 de profondeur (Warrington). La seule période triennale (1877-1880) avait fourni, par an et par hectare : 49 kgr. 4 d'azote nitrique ; ce qui équivaut à une fumure d'environ 300 kilogrammes de nitrate de sodium (Lawes et Gilbert). A cet azote nitrique perdu il convient d'ajouter de petites quantités d'azote ammoniacal et d'azote organique, le tout s'élevant à peu près à 2 kilogrammes. L'eau de pluie apporte annuellement sur le sol une moyenne de 5 kilogrammes d'azote combiné, chiffre plus faible que celui que l'on observe en France notamment.

Si la terre nue est soumise à de nombreux labours qui renouvellent les surfaces et activent la nitrification, la perte en azote nitrique peut être beaucoup plus élevée que celle que nous venons de signaler. Delhérain a trouvé, à Grignon, dans les eaux de drainage des terres nues de ses cases de végétation, terres travaillées et n'ayant pas reçu d'engrais, des chiffres d'azote nitrique infiniment plus forts que ceux qu'on t fournis Lawes et Gilbert.

Quoi qu'il en soit, les pertes d'acide nitrique sont notables, surtout dans le drainage d'automne. Nous verrons plus loin de quelle façon on peut les réduire. Ces pertes devront évidemment s'abaisser beaucoup lorsque le sol sera couvert de végétation et que celle-ci sera vigoureuse. Si le sol est peu calcaire, l'acide nitrique se trouve combiné à la potasse ; on le rencontre à l'état de nitrate de calcium lorsque les terres sont calcaires.

En ce qui concerne l'acide phosphorique, substance de première



importance dans l'économie végétale, les pertes sont généralement minimales. Elles se chiffrent par une centaine de grammes par an et par hectare dans beaucoup de cas. Nous donnerons bientôt les résultats obtenus sur des terres enrichies d'engrais.

La *potasse* est entraînée dans les eaux de drainage en faible quantité. Toutefois, la proportion de cette base est plus élevée que celle de l'acide phosphorique. Dehérain a montré que le poids de cet alcali pouvait atteindre 2 gr. 5 par mètre cube d'eau chez les terres épuisées par la culture; ce qui donnerait, pour la surface d'un hectare, une perte totale annuelle de 5 kilogrammes environ pour les terres de Grignon.

Dans le cas d'une terre n'ayant jamais reçu d'engrais, la perte serait encore moindre. Elle est, au contraire, plus élevée chez les terres en bon état de fumure, mais ne dépasse que rarement une dizaine de kilogrammes par an et par hectare.

Il résulte de ce qui précède que, des trois principaux éléments de fertilité d'un sol, azote, acide phosphorique, potasse, les deux derniers sont presque intégralement conservés par la terre et n'en disparaissent que par les récoltes. Pour établir le bilan de ces deux éléments de fertilité, on fera la différence entre l'exportation par les récoltes et les apports par les fumiers ou les engrais chimiques. En ce qui concerne l'azote, il faut, au contraire, tenir compte des pertes imputables aux eaux de drainage.

La *chaux* est, ainsi que nous l'avons bien des fois signalé, un des éléments les plus utiles au sol. Quoique la solubilité de son carbonate dans l'eau soit faible, cette solution est augmentée du fait de la présence dans la terre d'une dose de gaz carbonique variable, mais parfois assez élevée; aussi doit-on s'attendre à trouver dans les eaux de drainage une quantité de carbonate, ou plutôt de bicarbonate de calcium, d'autant plus élevée que la terre sera plus chargée d'engrais organiques et qu'une bonne circulation de l'air permettra mieux à cette matière organique de s'oxyder. Or, nous savons que c'est l'intensité de la vie microbienne qui règle la teneur d'un sol en gaz carbonique. A cette perte de chaux sous forme de bicarbonate, il faut ajouter les pertes à l'état de sulfate de calcium; la perte de chaux sous cette forme s'ajoutant à celle du bicarbonate donnera dans certains cas des chiffres très élevés, pouvant dépasser 400 à 500 kilogrammes de chaux par an à l'hectare. Si le sol est pauvre en sulfate de calcium, mais s'il reçoit des engrais sulfatés (sulfates d'ammonium ou de potassium), la double décomposition qui a lieu entre ces sulfates et le calcaire produira une élimination de sulfate de calcium d'autant plus élevée que les engrais sulfatés auront été plus largement distribués. Il en est de même de la présence de la chaux à l'état de chlorure de calcium. Cette élimination sera d'autant plus considérable que le sol aura reçu comme engrais un poids plus élevé de chlorure de potassium.



Prenons, comme exemple de l'importance de l'élimination de la chaux, les expériences de Lawes et Gilbert sur le champ de blé de Rothamsted (la culture du blé enlève au sol peu de chaux). Les auteurs ont trouvé, sur une parcelle sans engrais, la dose de 98 gr. 1 de chaux par mètre cube d'eau de drainage. Si on suppose, ainsi que nous l'avons dit plus haut, qu'il tombe en moyenne sur ce domaine 786 millimètres d'eau et que 44 p. 100 de cette eau s'écoulent dans les drains, cela ferait une perte à l'hectare égale à 338 kilogrammes de chaux.

On constate parfois des pertes encore plus fortes : Stoklasa a trouvé pour les sols de Bohême, chez lesquels la respiration microbienne est très variable, des chiffres variant de 218 à 1268 kilogrammes de carbonate de calcium éliminés par an et par hectare. Ces pertes énormes de chaux doivent fixer l'attention.

La quantité de calcaire que l'on rencontre dans les eaux de drainage ne dépend pas de la dose absolue de cette substance dans le sol ; nous savons qu'elle ne varie qu'avec le taux, c'est-à-dire la tension du gaz carbonique qui existe dans l'atmosphère interne de la terre. De même, les engrais sulfatés ou chlorurés solubles dissolvent, par double décomposition, autant de calcaire dans un sol riche que dans un sol pauvre en carbonate de calcium. Si, donc, à la suite de fumures abondantes, organiques, sulfatées, chlorurées, il disparaît un poids aussi notable de calcaire et que le sol soit naturellement pauvre en cette substance, il y aura lieu de restituer, à un moment donné, à ce sol la chaux qu'il aura perdue par l'effet des réactions que nous venons de signaler. *A fortiori*, s'il a fallu chauler ou marnier une terre trop peu calcaire, il est nécessaire de tenir grand compte des phénomènes qui tendent à éliminer peu à peu le carbonate de calcium.

Le *chlore* que l'on rencontre dans les eaux de drainage est combiné au sodium et au calcium. On en trouve des proportions très variables. La parcelle du champ de blé de Rothamsted, dont nous parlions plus haut, cultivée sans engrais, contenait, par mètre cube d'eau de drainage, 10 gr. 7 de chlore. A l'aide du calcul précédemment fait, on voit que, par an et par hectare, il s'élimine dans les eaux environ 37 kilogrammes de chlore. D'après une moyenne tirée d'un grand nombre d'expériences, l'eau de la pluie apporterait au sol environ 15 kilogrammes de chlore à l'hectare.

L'*acide sulfurique*, combiné également au sodium et au calcium, a été trouvé égal à 24 gr. 77 par mètre cube ; soit un départ de 85 kilogrammes par an et par hectare. Cette élimination continue de l'acide sulfurique, soit dit en passant, est à prendre en sérieuse considération ; car, dans les sols naturellement pauvres en sulfates, il peut arriver un moment où la dose d'acide sulfurique est assez faible pour mettre une entrave à la bonne marche de la végétation. Le soufre, en effet, fait partie intégrante de la molécule albuminoïde.

La soude s'écoule dans les eaux de drainage sous la forme de sulfate et de chlorure ; plus rarement sous la forme de nitrate, à moins que le sol n'ait reçu des doses excessives de cet engrais. L'emploi habituel, sur nombre de terres, de ce dernier agent de fertilité, fait monter beaucoup le taux de soude que l'on rencontre dans les eaux de drainage.

La perte de soude est donc toujours notable ; nous savons, en effet, que cette base est mal retenue par le pouvoir absorbant. Dans l'exemple de la parcelle du champ de blé de Rothamsted sans engrais, cette perte, calculée à l'hectare, s'élevait à 20 kilogrammes environ. Mais, ainsi que nous le dirons plus loin, le poids de soude éliminée peut être dix fois plus grand dans certains cas.

Cas des terres cultivées ou ayant reçu des engrais. — Tous autres sont les chiffres qui représentent les pertes par eaux de drainage dans le cas de terres cultivées avec ou sans engrais. Une terre cultivée est toujours moins humide qu'une terre en jachère, et les pertes par infiltration diminuent par conséquent. Si, à titre d'expérience, ainsi que la chose a été pratiquée dans les cases de végétation, on distribue à une terre nue des engrais variés, afin de déterminer la nature et la quantité des substances qui apparaissent dans les eaux de drainage sous l'influence de ces engrais seuls, on peut faire certaines observations très intéressantes. En particulier, ces observations porteront sur la vitesse avec laquelle nitrifient les matières azotées organiques (fumier, engrais verts, tourteaux, sang desséché, etc.) ainsi que les sels ammoniacaux. On constate, dans de semblables essais, que les sels ammoniacaux nitrifient généralement très bien, à la condition que la dose d'humidité soit suffisante. Or cette dose optimum varie avec la structure physique du sol comme nous le savons. La nitrification de l'azote ammoniacal est également fonction de la température : à l'automne, par conséquent, elle est peu notable ; elle peut être suspendue pendant les mois d'hiver, et elle recommence au printemps. Mais l'azote ammoniacal demeure fixé dans le sol, et les eaux de drainage n'en renferment le plus souvent que des traces.

Si le sol est suffisamment calcaire, tous les engrais organiques azotés peuvent y nitrifier. La vitesse de la nitrification de ces matières dépend de leur degré de finesse d'abord, ainsi que de la rapidité avec laquelle les nombreux amides complexes qui entrent dans leurs molécules azotées



se transforment en ammoniacque. Le sang desséché et les engrais verts sont les substances qui subissent avec le plus de facilité la transformation ammoniacale et qui, conséquemment, nitrifient avec la vitesse la plus grande. Les engrais torrifiés (euir, corne) nitrifient beaucoup plus vite que ces mêmes engrais pris à l'état naturel, alors même qu'ils seraient finement divisés : on sait que l'action de la chaleur a pour effet de résoudre peu à peu la molécule albuminoïde en molécules plus simples. Quant au fumier de ferme, l'ammonisation de son azote est plus lente. En effet, s'il renferme des matières dont la transformation en ammoniacque est déjà parachevée à la suite des fermentations qu'il a éprouvées lors de la mise en tas, la majeure partie de son azote se trouve encore sous forme albuminoïde (résidu des litières). Lorsque ces litières sont abondantes et qu'elles comprennent des débris de végétaux ligneux (bruyères, fougères), la décomposition complète du fumier dans le sol et la nitrification subséquente de l'azote de pareils matériaux exigeront un temps parfois fort long. Mais cette lenteur de transformation présente souvent des avantages réels, tant au point de vue chimique qu'au point de vue physique.

Telles sont les conséquences les plus remarquables que l'on peut tirer de l'étude des eaux de drainage qui s'écoulent des terres non cultivées, mais enrichies de substances fertilisantes azotées de constitution diverse. Il en résulte, au point de vue pratique, que, lorsqu'une terre réclame de l'azote, il est indispensable de tenir compte de sa perméabilité, de sa constitution chimique, de la nature des plantes qu'elle est destinée à porter, avant de se prononcer sur le choix à faire relativement à la *forme* de l'azote qu'il convient de donner à cette terre.

Lorsque le sol est enrichi d'engrais et qu'il porte des végétaux, l'étude des eaux de drainage est encore très intéressante. Elle nous montre, en effet, la quantité et la nature des pertes que subit la terre, et, par conséquent, elle nous permet de connaître, au moins d'une façon approchée, quelle est la fraction de la matière fertilisante qui, d'une part, demeure dans le sol et celle qui, d'autre part, pénètre dans la plante. Cette dernière fraction s'obtient par l'analyse de la récolte.

Signalons très sommairement à cet égard quelques-uns des résultats obtenus par Lawes et Gilbert sur le champ de blé de Rothamsted. Ces expériences font suite à celles que nous avons exposées plus haut, relatives aux parcelles sans engrais.

Dans le tableau ci-joint, le premier chiffre indique, en *grammes*, la quantité de substance contenue dans 1 mètre cube d'eau de drainage, le second chiffre la perte en *kilogrammes* à l'hectare, en supposant une chute de pluie annuelle de 786 mil-



Pour un hectare	Chaux		Magnésie		Potasse		Soude		Azote nitrique		Chlore		Acide sulfurique		Acide phospho- rique	
	gr.	kgr.	gr.	kgr.	gr.	kgr.	gr.	kgr.	gr.	kgr.	gr.	kgr.	gr.	kgr.	gr.	kgr.
35.000 kgr. de fu- mier de ferme...	147,4	508,5	4,9	16,9	5,4	18,6	13,7	47,2	16,1	55,5	20,7	71,4	106,1	366,6		
224 kgr. sels ammo- niacaux + en- grais minéraux..	143,9	496,4	7,9	27,2	4,4	15,1	10,7	36,9	8,5	29,3	20,7	71,4	73,3	252,8	1,54	5,3
448 kgr. sels am- moniacaux seule- ment.....	154,1	531,6	7,4	25,5	1,9	6,5	7,1	24,5	13,9	47,9	32,0	110,0	44,4	153,1	1,44	4,9
448 kgr. sels am- moniacaux et su- perphosphates...	165,6	571,3	7,3	25,1	1,0	3,4	6,6	22,7	15,3	52,7	31,6	109,0	54,3	187,3	1,66	5,7

limètres de hauteur dont les 44/100 auraient traversé le sol, soit 3.450 mètres cubes.

Nous n'avons pas fait figurer ici les pertes en azote ammoniacal ; elles sont insignifiantes et n'atteignent que quelques centaines de grammes, même dans le cas d'une forte fumure en sels ammoniacaux.

Les chiffres précédents, bien que n'étant évidemment pas applicables à tous les pays, ni, surtout, à toutes les cultures, donnent néanmoins une idée des pertes subies par les sols sous l'influence du drainage par l'eau de pluie. Il faudrait les corriger suivant les variations que présentent entre eux les divers sols, au point de vue physique et chimique, suivant la quantité d'eau qui tombe dans telle localité et la fraction de cette eau qui traverse la couche arable, suivant la nature de la plante cultivée et son degré de vigueur. On ne peut établir à ce sujet que des règles générales ; tel a été seulement le but de cette courte étude.

IV

PERTES D'AZOTE NITRIQUE DANS LES CONDITIONS NATURELLES

Dans les pages qui précèdent, il a été question des pertes d'azote nitrique dans des conditions souvent un peu artificielles. Car, lorsqu'on fait usage de cases de végétation, la terre est émiétée, très filtrante, et la nitrification y est exagérée, au moins dans les premiers temps.

Schlösing (1895) a essayé d'estimer la déperdition moyenne, par hectare, de l'azote entraîné par les eaux d'infiltration traversant une grande étendue de territoire. Ce sont les rivières qui constituent les drains naturels où aboutissent ces eaux d'infiltration. Elles reçoivent finalement l'azote enlevé à la terre végétale. C'est donc dans les eaux de rivière qu'il faut rechercher cet azote. Mais si les nitrates traversent une terre arable sans subir de pertes, ils peuvent éprouver un déchet du fait de la présence des végétaux aquatiques qui les absorbent.

En vue d'éliminer cette cause d'erreur et de déterminer avec précision le taux véritable des nitrates enlevés par les eaux qui traversent le sol, Schlösing fait remarquer qu'il est nécessaire d'opérer dans un cas particulier, celui où la végétation aquatique est suspendue. Or, c'est ce qui a eu lieu vraisemblablement pendant la période de froid rigoureux du mois de février 1895. A ce moment, les rivières ne rec-



vaient pas d'eau de ruissellement ; leur seule alimentation provenait des eaux souterraines d'infiltration. On a prélevé de l'eau sur différents points de la Seine, de la Marne, de l'Yonne, de l'Oise, dans le bassin de Paris, et les débits de ces rivières ont été calculés d'après les formules connues. Chose remarquable, les eaux souterraines ont conservé un titre en acide nitrique à peu près constant. La moyenne de tous ces dosages a fourni 9 mgr. 33 d'acide nitrique par litre, soit 2 mgr. 42 d'azote. Adoptons ce dernier chiffre comme représentant le titre moyen des eaux d'infiltration qui traversent le sol pendant l'espace d'une année.

Si l'on admet que la hauteur moyenne des pluies soit de 700 millimètres dans le bassin de la Seine, et si la tranche d'eau qui s'infiltré est le sixième de cette valeur, la surface d'un hectare sera traversée par 1.167 mètres cubes d'eau et la perte s'élèvera à 2 kgr. 8 d'azote. En supposant que la tranche d'eau qui s'infiltré soit le quart de l'eau tombée, la surface d'un hectare sera traversée par 1.775 mètres cubes d'eau avec une perte de 4 kgr. 29 d'azote. Pour une infiltration du tiers, le volume de l'eau traversant la terre serait de 2.333 mètres cubes, avec 5 kgr. 65 d'azote. On voit que la perte en nitrates, ainsi calculée, est bien inférieure à celle que fournissent les bases de végétation. Toutefois ces chiffres ne représentent qu'un minimum ; car si l'on dose l'acide nitrique dans l'eau des sources, on trouve des nombres infiniment plus élevés.

A l'époque des crues des rivières, le phénomène est très différent. Au mois de novembre 1896, Schlœsing a fait des prises d'eau : de la Seine à Paris, de la Marne à Charenton, de la Haute-Seine à Montereau, de l'Yonne à Montereau également. L'azote nitrique y était respectivement représenté, dans un litre, par les chiffres suivants : 5 mgr. 08 ; 3 mgr. 3 ; 13, 4 mgr. 46 ; 4 mgr. 50. Si on tient compte, au même moment, du débit de ces rivières, on trouve que, dans l'espace de vingt-quatre heures, ces cours d'eau auraient emporté :

	Acide nitrique $\frac{N^2O^5}{2}$	Acide nitrique calculé en NO^3K
Yonne.....	35t.000 kilogrammes	650.000 kilogrammes
Haute-Seine.....	54.000 —	101.000 —
Marne	107.000 —	200.000 —
Seine à Paris	486.000 —	909.000 —

Or ces nitrates ne proviennent évidemment que de la nitrification naturelle des champs des divers bassins : il faut donc penser que l'activité nitrifiante est infiniment plus grande que ne l'indiquent les premiers dosages, mais elle n'atteint les chiffres précédents que si les pluies sont assez abondantes pour laver complètement le sol.

Ocupons-nous maintenant des *cultures dérobées* dont le but est d'enrayer, dans une certaine mesure, la perte des nitrates.



V

CULTURES DÉROBÉES

Un sol en jachère perd, par le fait des eaux de drainage, des quantités considérables d'azote nitrique. Lorsque la terre est couverte de végétation, nous savons que ces pertes sont beaucoup moindres, d'abord parce que la plante évapore de très grandes quantités d'eau dont elle prive, par conséquent, le sol, et que, de plus, elle utilise une importante fraction des nitrates. Les eaux de drainage sont donc moins abondantes et beaucoup moins chargées de nitrates. Etant donnée la variété des cultures que l'on installe sur un sol, il peut arriver que, après la maturité d'une récolte et son enlèvement, la terre reste nue pendant un temps plus ou moins long. Si cette époque coïncide avec l'automne, et s'il pleut abondamment pendant cette saison, les nitrates, accumulés dans le sol par suite de la température favorable de l'été, risquent de passer dans les eaux de drainage. Ce sont ces pertes qu'il s'agit d'éviter ou d'atténuer dans la mesure du possible.

Il semble, *a priori*, que l'on puisse y parvenir en disposant sur le sol, momentanément dépourvu de culture, une plante à végétation rapide, capable d'évaporer beaucoup d'eau et de s'emparer des nitrates que les pluies sont sur le point d'entraîner. Voici quelques indications sommaires empruntées aux expériences que Dehérain a faites sur ce point, expériences susceptibles de donner une idée très nette de l'utilité de la pratique dont nous nous occupons ici. Nous allons trouver, dans ce qui suit, une application intéressante de l'étude des eaux de drainage.

On installe principalement sur le sol des cultures dérobées de *moutarde blanche* ou de *vesce*. La moutarde végète rapidement, son feuillage est assez épais ; la vesce, en sa qualité de légumineuse, peut, en outre, fixer l'azote gazeux de l'air. La quantité de matière végétale que fournit une culture dérobée



varie, comme on le conçoit, énormément d'une année à l'autre suivant les conditions climatiques de l'automne. Mais elle soustrait toujours au sol une fraction d'azote nitrique plus ou moins importante qui, sans cela, se perdrait dans les eaux de drainage.

Au début de la mauvaise saison, il s'agit de savoir ce qu'il convient de faire de cette culture : 1° on pourra, si l'année considérée a été pauvre en fourrages, donner la récolte en nourriture au bétail, et le sol ne conservera, en fait de fumure, que les racines seules de la plante ; 2° si la terre qui a porté la culture dérobée est en bon état de fumure et qu'une terre voisine soit, à cet égard, moins bien partagée, on pourra enfouir dans cette dernière la partie aérienne de la culture dérobée qui s'est développée sur le bon sol ; 3° enfin, et c'est là le cas le plus général, la culture dérobée sera enfouie sur le sol même qui l'a portée. Mais cet enfouissement devra-t-il se faire à l'automne, ou bien doit-on attendre le printemps suivant ; quel est l'effet que l'on obtiendra suivant l'époque de cet enfouissement ?

Utilisation des cultures dérobées. — De semblables expériences ont été effectuées par Dehérain sur les cases de végétation dont il a été question plus haut. L'analyse des eaux de drainage, au point de vue de leur teneur en azote nitrique, fournira la solution de la question.

On comparera la teneur en azote nitrique des eaux provenant des cases à cultures dérobées, disposées comme nous l'avons dit, à celle des terres restées nues : de cette comparaison ressortira l'utilité de ces cultures. Le dosage comparatif des nitrates devra commencer dès l'automne, afin de juger de l'efficacité des cultures dérobées pour restreindre ou annuler la perte des nitrates ; ce dosage devra être poursuivi pendant l'hiver. Les cultures dérobées, en effet, pourraient simplement retarder la perte d'azote nitrique, puisqu'un sol couvert de végétation est souvent desséché à ce point que les drains ne coulent pas par suite de la transpiration de la plante. Mais si les nitrates ont été simplement *retenus* en nature dans le sol, ils seront entraînés par les pluies d'hiver, et les eaux de drainage seront plus concentrées en azote nitrique que si elles filtraient au travers de terres nues, déjà dépouillées par les pluies d'automne.

Enfin, au moment où la culture dérobée est enfouie, l'azote qu'elle



renferme s'y rencontre principalement à l'état d'azote albuminoïde provenant d'une transformation de l'azote nitrique qu'elle a absorbé au cours de son évolution. Cet azote albuminoïde subira, au contact de la terre, une série de métamorphoses que nous avons étudiées antérieurement, et dont le résultat final sera la transformation inverse de cet azote insoluble en azote soluble, c'est-à-dire en azote nitrique. Il en résulte qu'il est nécessaire de connaître à quelle époque est azote des cultures dérobées reprendra la forme soluble et se trouvera à la disposition des végétaux que l'on planterait sur des sols enrichis de ces cultures dérobées. On aura la réponse à cette question en déterminant la teneur des eaux en nitrates pendant le reste de l'année.

L'enfouissement de la culture dérobée pouvant avoir lieu à diverses époques, ainsi que nous l'avons dit plus haut, le dosage des nitrates dans les eaux de drainage nous indiquera combien de temps les plantes enfouies doivent rester dans le sol afin que leur azote albuminoïde reprenne la forme soluble d'azote nitrique : on connaîtra ainsi l'époque la plus favorable à l'enfouissement.

Voici l'exposé des recherches que Delhérain a exécutées pendant les années 1891-1892 :

1° Les cultures de moutarde et de vesce sont particulièrement indiquées en raison de la croissance rapide de ces plantes et de leur rusticité. Semée à l'automne de 1890 qui n'a pas été pluvieux, la moutarde n'a pas acquis un grand développement, mais elle était riche en azote (26 p. 100 de matière sèche, contenant 6 p. 100 d'azote). Si cette moutarde avait été enfouie, elle aurait fourni à l'hectare 1.200 kilogrammes de matière sèche contenant 72 kilogrammes d'azote. La vesce, en 1891, peu développée mais riche en azote, aurait fourni à l'hectare 167 kilogrammes d'azote : en 1892, cette même plante avait pris un accroissement beaucoup plus notable, mais sa teneur en azote était plus faible ; elle n'en aurait fourni que 88 kilogrammes.

Ces cultures pourraient être maintenues sur pied durant tout l'hiver. Leur végétation est alors peu active, leur transpiration faible, et la terre laisse écouler de l'eau dans les drains. Malgré cela, les pertes d'azote nitrique sont moindres sur les sols plantés que sur la terre nue. Ainsi, pendant la période novembre 1891-février 1892, on a dosé dans les eaux de drainage (pour la surface de 1 hectare) : dans le cas de terres nues 15 kgr. 6 ; dans le cas de la terre cultivée en vesce 12 kgr. 04, dans le cas de la terre cultivée en moutarde 6 kgr. 76 d'azote nitrique.

Lorsque la culture a été fauchée au mois de novembre pour servir d'aliment au bétail, le sol est resté exposé aux pluies de l'hiver après la coupe ; il ne contient plus que les racines de la plante sur lesquelles pousse encore un peu de verdure. Le sol porteur de ces racines n'a perdu, pendant l'intervalle de temps indiqué plus haut, que 12 kgr. 6 d'azote nitrique, au lieu de 15 kgr. 6, dans le cas de la terre nue.

2° Voyons maintenant comment les choses se passent lorsqu'on enfouit la vesce (partie aérienne fauchée) dans un sol autre que celui.



sur lequel elle s'est développée. Si cet enfouissement a lieu à la fin de novembre, la décomposition des parties vertes commence déjà pendant l'hiver, et, dès le mois de février, les eaux qui ont filtré au travers de la terre ainsi enrichie contiennent un poids d'azote nitrique un peu plus élevé que celui qui provient des terres nues : soit 17 kgr. 9, au lieu de 15 kgr. 6.

Les nitrates qui ont pris naissance pendant l'été et l'automne ne sont donc pas restés en nature dans le sol ; ils ont été assimilés par les plantes semées à l'arrière-saison.

L'étude de la richesse des eaux de drainage en azote nitrique, continuée pendant le printemps et l'été de l'année suivante, fait encore mieux ressortir l'utilité des cultures dérobées. Ainsi, la terre qui avait porté la vesce, et dans laquelle il n'était resté que les racines de la plante, a fourni aux eaux de drainage une quantité plus forte d'azote nitrique que celle qui était restée sans culture. On a trouvé :

Azote nitrique des eaux de drainage de 1 hectare pendant le printemps, l'été et l'automne de 1892.	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Terre nue} \dots\dots\dots \\ \text{Terre n'ayant con-} \\ \text{servé que les ra-} \\ \text{cines de la vesce.} \end{array} \right.$	72 kilogrammes
		93 kilogrammes

L'azote organique des racines s'était donc, dans une large mesure, changé en azote nitrique.

La terre qui avait reçu en novembre la partie aérienne de la vesce a fourni aux eaux de drainage, pendant le même laps de temps, 102 kilogrammes d'azote nitrique.

On en conclut que, dans le cas où on aurait installé une culture sur le sol qui avait conservé les racines de vesce, et sur celui qui avait reçu la partie aérienne de cette plante, les végétaux auraient bénéficié d'un surcroît de nitrates s'élevant à $93 - 72 = 21$ kilogrammes dans le premier sol, à $102 - 72 = 30$ kilogrammes dans le second.

3° La terre dans laquelle on a enfoui sur place, en février 1892, la totalité de la culture dérobée a fourni aux eaux de drainage, pendant le printemps, l'été et l'automne de 1892, une quantité d'azote nitrique égale à 109 kgr. 9 ; soit une différence de $109,9 - 72 = 37$ kgr. 9 par rapport à la terre nue. Dans le cas d'une terre qui portait une culture dérobée de trèfle et de moutarde, enfouie le 27 mars 1892, l'azote nitrique ayant filtré pendant le printemps, l'été et l'automne de 1892, s'est élevé à 125 kilogrammes, soit un excédent de $125 - 72 = 53$ kilogrammes d'azote nitrique.

Une remarque importante trouve ici sa place. On a tout avantage à enfouir une culture dérobée *avant l'hiver*, et à ne pas attendre pour cela le début du printemps. En effet, pendant l'hiver, la matière organique de cette culture dérobée se décompose dans le sol, lentement sans doute, mais son azote sera apte à nitrifier en grande partie dès que les premières chaleurs se feront sentir : il se trouvera donc à la



disposition des plantes semées au printemps, c'est-à-dire à une époque où celles-ci en ont le plus grand besoin. Si, au contraire, la culture dérobée n'était enfouie qu'au printemps, le travail préliminaire de décomposition, de simplification et d'ammonisation de l'azote organique exigeant un certain temps, la nitrification de cet azote ne commencerait que tardivement, et les nitrates produits ne seraient que d'un secours médiocre pour les plantes qui auraient été semées au printemps sur la parcelle considérée. Cette remarque concorde d'une manière absolue avec l'observation des faits.

Ainsi, grâce à l'emploi des cultures dérobées, l'azote nitrique que renferme un sol à l'automne peut être retenu en majeure partie, et échapper, par conséquent, à une déperdition certaine si on installe sur ce sol une plante à végétation rapide dont on enfouira ultérieurement par un labour les organes aériens. La plante se saisit de l'azote nitrique et l'immobilise en quelque sorte sous forme d'azote albuminoïde. Celui-ci, alors qu'il est en contact avec les microorganismes variés du sol, reprend peu à peu sa forme soluble et diffusible d'azote nitrique pour le plus grand profit des végétaux que l'on aurait cultivés sur la parcelle considérée.

Les chiffres qui précèdent peuvent paraître très élevés. Ils le sont, en effet, ainsi qu'il arrive dans les essais exécutés sur une petite échelle, étant donné que les façons auxquelles on soumet la terre d'une simple case de végétation sont incomparablement plus soignées que celles que l'on donne à un vaste espace de terrain. La terre d'une case est, en outre, fortement émiettée. Mais, quoi qu'il en soit et toutes proportions gardées, le sens du phénomène est le même dans tous les cas.

On peut résumer ainsi les données précédentes. Sauf dans les années à automne très sec qui fournissent de médiocres résultats au point de vue de la levée des graines, les cultures dérobées réussissent le plus souvent de façon satisfaisante. Cette réussite est mieux assurée dans les régions du Nord que dans celles du Midi. La culture dérobée dessèche partiellement le sol ; elle entrave donc, d'une part, l'élimination des nitrates par drainage, puisqu'elle absorbe ces nitrates ; d'autre part, elle ralentit la nitrification par la raison qu'elle prive parfois le sol de la quantité d'humidité nécessaire à cette fonction biologique. Par conséquent, les cultures dérobées n'épuisent pas le sol auquel elles enlèvent de l'azote, car cet azote reparaît ultérieurement sous forme nitrique lorsque les végétaux ont été enterrés et sont restés enfouis pendant un certain temps.

Une conclusion s'impose donc ici. Etant donnée l'évaporation considérable que produit une végétation vigoureuse, le système de culture au moyen duquel la terre sera le plus longtemps possible couverte de végétation sera le meilleur pour restreindre les pertes en nitrates. Au contraire, les terres en jachère s'appauvriront beaucoup en azote nitrique.

Mais il est bien évident que, lorsqu'il s'agit de régler un ensemble de cultures et de fixer le choix à faire à cet égard dans un lieu déterminé, il faut tenir grand compte des influences météorologiques. « Si variée que soit la quantité totale de pluie tombée et sa répartition annuelle dans un même pays, l'agriculture locale a dû apprendre à se plier aux conditions météorologiques locales de la région, faire de préférence des céréales là où le printemps est pluvieux et l'été sec, des fourrages là où les pluies d'été ne sont pas rares. » (Duclaux).



CHAPITRE XIII

ÉTUDE DES SOLS EN PLACE CLASSIFICATION DES SOLS

Facteurs généraux de la végétation. — Caractères des sols au point de vue agricole. — Premiers essais de classification ; terres fortes, terres légères. — Classification des terres d'après leurs propriétés physiques. — Classification de de Gasparin. — Classification chimique. — Classification géologique. — Importance de la géologie appliquée à l'agriculture. — Conclusions.

Facteurs généraux de la végétation. — Au point de vue agricole, les bases scientifiques d'une classification rationnelle des différents sols que l'on rencontre à la surface du globe restent encore à trouver. On ne peut, comme nous allons le voir, fournir sur ce point que des données approximatives.

Il paraîtrait naturel d'admettre dans la même classe toutes les terres ayant même constitution physique ou chimique : quelques restrictions à cet égard sont cependant nécessaires.

Remarquons, en effet, avec Hall, que l'on rencontre sur de vastes étendues des sols du même type, c'est-à-dire dont la constitution physique ou chimique présente quelque ressemblance et dont le rapprochement s'impose, soit parce qu'ils portent une même flore spontanée, soit parce qu'ils sont aptes à nourrir telle culture déterminée. De pareils sols ont même origine géologique. Toutefois, leur délimitation exacte est difficile en raison du passage insensible de tel sol à tel autre. De plus, si un sol d'une certaine constitution physique ou chi-



mique est, le plus souvent, couvert d'une même végétation spontanée, telles des plantes qui composent cette végétation peuvent aussi se rencontrer sur un autre sol, de structure très différente. Une plante déterminée ne se développe donc pas exclusivement sur une terre déterminée : les observations de ce genre sont très fréquentes. Le châtaignier, par exemple, ainsi que nombre de conifères, peuvent croître sur des sols calcaires en même temps que sur des sols siliceux. Il en résulte que la *qualité du sol* n'est pas le seul facteur qui intervienne dans l'évolution d'une plante.

On ne saurait trop insister également sur le point suivant. Ce qui fait la qualité d'un sol, ce qui distingue ce que l'on est convenu d'appeler un bon sol d'un mauvais sol, c'est évidemment la proportion plus élevée d'éléments de fertilité que l'on rencontre dans le premier, en supposant, bien entendu, que celui-ci possède une constitution physique telle que la plante soit capable d'utiliser ces éléments. Mais, ainsi que nous l'avons fait remarquer antérieurement, si la couche arable est de faible épaisseur et qu'elle soit superposée à un sous-sol peu meuble et mal pourvu ou dépourvu de substances actives, les végétaux qui s'y développent, surtout s'ils sont trop rapprochés les uns des autres, n'auront à leur disposition qu'un volume de terre insuffisant et ne disposeront, par conséquent, que d'une quantité médiocre de matières alimentaires. La richesse *absolue* d'un sol en matières nutritives n'a donc qu'une valeur relative. Il n'en est plus de même si un sol, bien que présentant une richesse peu satisfaisante, repose sur un sous-sol meuble dans lequel on rencontre jusqu'à de grandes profondeurs des éléments de fertilité identiques à ceux que contient la couche supérieure; ces éléments fussent-ils même moins abondants encore que dans cette dernière couche. Dans ce cas, la plante émet de longues racines et va puiser en profondeur les substances que ne lui fournit pas la couche superficielle. Un sol pauvre n'est donc pas toujours un mauvais sol lorsqu'on n'en étudie que la surface.

Mais, quelle que soit la constitution d'un sol, il existe un ensemble de phénomènes *extérieurs* qui n'ont aucun rapport avec cette constitution et dont l'importance est cependant capitale



vis-à-vis du développement des végétaux. Tous les agronomes sont d'accord sur le point suivant : *Une classification des sols doit tenir grand compte de la question de climat.* La constitution physique et la nature chimique d'un sol ne sont pas, en effet, les seuls facteurs qui entrent en jeu quand il s'agit de culture : la quantité d'eau qui tombe dans telle région, la répartition de cette eau et la moyenne de la température suivant les différentes saisons, l'altitude du sol, son inclinaison par rapport à l'horizon, sont autant de facteurs qu'il est nécessaire d'introduire dans l'appréciation de la valeur culturale d'une pièce de terre. Nous allons revenir bientôt sur ces différentes particularités.

I

CARACTÈRES DES SOLS AU POINT DE VUE AGRICOLE

De Gasparin a bien fixé ces caractères ; nous lui emprunterons ici quelques-uns des aperçus qu'il a donnés à cet égard.

L'agriculteur ne se préoccupe pas de savoir quelle est la constitution intime d'une terre ; il se demande seulement quel est le genre de plantes que cette terre pourra nourrir avec le plus de profit pour lui, et quelle est la nature des amendements qu'il faudra lui fournir pour arriver à ce résultat.

Une terre peut être examinée à plusieurs points de vue. *Au point de vue chimique*, d'abord : certains éléments communiquent aux terres des propriétés bien définies qui intéressent l'agriculteur. La présence du calcaire permet la culture du blé ; si la terre renferme du gypse, ou si on lui en ajoute, la culture des légumineuses sera profitable.

Les propriétés physiques des terres interviennent également dans la question. Une terre habituellement fraîche porte des prairies ; une terre, sèche en été, convient au froment ou au seigle. Les terres humides en hiver appellent des récoltes de printemps lorsqu'elles ont perdu à cette époque une partie de leur humidité.

Les propriétés mécaniques à envisager sont celles qui ont trait à la facilité, plus ou moins grande, avec laquelle une terre peut être travaillée. Si elle est siliceuse, sablonneuse, ou riche en humus, le travail



mécanique en est aisé ; si elle est argileuse, le travail sera d'autant plus pénible que la proportion de l'argile sera plus élevée.

Enfin, au point de vue des engrais et amendements à fournir à une terre, on peut avancer que, dans les sols sableux et calcaires, la décomposition des engrais est facile et que ces sols demandent de fréquentes fumures. Si la terre est argileuse, elle retient bien les engrais qu'on lui distribue, mais elle les décompose avec lenteur. On lui fournira de fortes fumures, à de longs intervalles. Une terre riche en humus exigera le chaulage.

L'eau et sa répartition. — Quels que soient les caractères d'un sol, il est un élément qui ne doit jamais lui faire défaut. Cet élément c'est l'eau. On retrouve son action indispensable et son influence bienfaisante à la base de toute végétation. Qu'il s'agisse de la germination, du développement de la plante, puis enfin de la maturation de ses fruits, l'eau est, à chaque étape de l'évolution végétale, l'élément primordial qui intervient, d'abord comme dissolvant des substances minérales du sol, comme véhicule ensuite de ces substances au travers des tissus, enfin comme agent de leur répartition dans les différents organes. On sait, en effet, que le poids de matière organique fabriqué par la plante est en relation avec la quantité d'eau que celle-ci évapore. Sur un sol habituellement sec, il ne se développe qu'une maigre végétation, et les plantes qui l'occupent luttent contre la sécheresse, soit en restreignant la surface de leurs feuilles, soit en épaississant leur cuticule, soit en se créant des réservoirs d'eau logés dans un tissu spécial des feuilles.

De pareilles terres ne pourraient porter de récoltes rémunératrices. Nos plantes de la grande culture exigent une quantité d'eau suffisante qui doit se répartir sur toutes les périodes de leur évolution. Si l'eau est nécessaire au premier développement du végétal pour assurer le fonctionnement normal de la feuille, considérée comme le lieu où prennent naissance les hydrates de carbone et les albuminoïdes, il est encore indispensable que l'eau intervienne au moment de la maturation, c'est-à-dire à l'époque du transport, vers l'ovule fécondé, des matières que la feuille a élaborées. Lorsque l'eau fait défaut à cette période critique, le grain est mal rempli ; dans le cas



d'un végétal à tubercules ou à racine charnue, ces organes n'acquièrent que de faibles dimensions.

Mais si l'eau est indispensable à la végétation, il faut remarquer, ainsi que le dit très justement de Gasparin, que cette propriété pour un sol d'être humide est trop souvent variable ; qu'elle s'applique, selon les cas, aux mêmes natures de sol. « *Elle est essentiellement locale, s'étend à tous les genres de terrain, quand elle provient d'une qualité excessive du climat. D'autres fois, elle tiendra à sa disposition topographique, et elle embrassera toute une section de territoire, quelle que soit la nature des terres. Ainsi, en Arabie, on n'aura que des terres sèches qui seront argileuses, sablonneuses, calcaires ; en Irlande, on n'aura que des terres humides, argileuses, sablonneuses, calcaires. Ailleurs, une partie du territoire, situé sur un plateau, sera sèche, tandis que les pentes et les vallées formées des mêmes terrains seront humides... Ainsi l'humidité du sol, qui est la propriété physique la plus importante, celle dont le cultivateur doit surtout se préoccuper, n'est pas propre à régir une classification et ne ferait que la rendre confuse. Elle marche en première ligne dans l'appréciation des terrains : elle doit être écartée dans leur classification.* »

Qualités physiques d'une terre arable. — Supposons que la quantité d'eau qui tombe sur une région déterminée soit suffisante. Les végétaux ne pourront néanmoins utiliser cette eau que lorsque la terre présentera certaines aptitudes physiques propres à la retenir. Il faudra, de plus, que les racines puissent cheminer convenablement dans la masse solide.

Déhérain, à la suite de de Gasparin, reconnaît à une terre arable trois qualités physiques principales. Une terre doit être *perméable, immobile et continue*.

Elle est *perméable* lorsque l'eau et les gaz la traversent aisément.

Elle est *immobile* lorsqu'elle résiste : 1° à l'action du vent qui ne doit pas l'éparpiller ; 2° à l'action de la gelée qui ne doit pas la soulever.

Elle est *continue*, quand elle ne se fendille pas au moment de la sécheresse, mettant ainsi à nu les racines et les déchirant parfois.

Une terre très légère, exclusivement composée de grains sableux, tels que ceux qui constituent les dunes, est très perméable, mais elle est très mobile sous l'action du vent. Elle est



continue, car la sécheresse n'y produit pas de fissures. Une terre très forte, composée surtout d'argile, est peu ou pas perméable à l'eau et aux gaz ; elle est discontinue, car elle se fendille pendant la sécheresse. Une terre très calcaire se soulève sous l'influence de la gelée.

Ces trois sortes de terres, prises dans leur état extrême, sont impropres à toute culture. Le rôle des amendements, qu'il est nécessaire de leur fournir, consiste précisément à corriger chacun des défauts que nous venons de mentionner.

11

PREMIERS ESSAIS DE CLASSIFICATION

Terres fortes ; terres légères. — Ces notions préliminaires étant acquises, il s'agit maintenant de jeter les premières bases d'une classification des terres.

Supposons d'abord, avec Boussingault, l'existence de cas très simples. Au seul point de vue pratique, on diviso souvent les terres arables en deux grandes catégories : *les terres fortes et les terres légères.*

Les premières, dans lesquelles domine l'argile, sont peu perméables, se dessèchent lentement et présentent au travail de la charrue ou de la bêche une résistance plus ou moins grande. Par contre, si elles absorbent et retiennent beaucoup d'eau, elles résistent mieux à la sécheresse et peuvent recevoir de notables quantités d'engrais dont la décomposition est lente. Si les pluies sont répétées, ces terres acquièrent un grand degré d'humidité ; l'eau et les gaz de l'atmosphère n'y peuvent plus circuler. Lorsqu'au contraire la sécheresse est intense et continue, ces terres deviennent très dures et se fendillent.

Les terres légères, inversement, sont très perméables ; leur dessiccation est rapide, leur travail facile. Elles consomment beaucoup d'engrais par suite de leur perméabilité et de la facilité avec laquelle l'oxygène brûle la matière organique. Elles résistent mal à la sécheresse et, comme conséquence, ne doivent donner que des récoltes médiocres ou nulles dans les années où la pluie est rare.

Si les choses se passaient ainsi normalement, un sol purement argileux et un sol purement sableux seraient incultivables. « *Les défauts de ces deux espèces de terrains sont de nature à se compenser, à se neu-*



traliser, et c'est du mélange de ces sols extrêmes que résultent les terres reconnues comme les plus favorables à la culture» (Boussingault). Les défauts inhérents aux terres fortes et aux terres légères se corrigent parfois d'eux-mêmes naturellement, non pas toujours d'une façon absolue, mais d'une façon relative. Tout dépend, dans ce cas, de la structure physique de la couche sur laquelle repose la terre arable, couche que nous appelons *sous-sol*.

Sous-sol. — Nous avons déjà fourni quelques éclaircissements à ce sujet (tome I, p. 208). On sait que, le plus souvent, il est facile de distinguer le sous-sol du sol. La connaissance de la structure du sous-sol est d'une grande importance ; ses qualités physiques ont un retentissement très marqué, tant sur les qualités physiques que sur les qualités chimiques du sol lui-même.

Boussingault a fait à cet égard les réflexions suivantes. Lorsque la constitution minérale du sous-sol est la même que celle du sol, on peut, par des labours profonds, augmenter l'épaisseur de la couche arable aux dépens du sous-sol. Mais il est possible que la terre perde alors momentanément sa fertilité et ne la recouvre qu'au bout d'un temps assez long. En effet, on se prive ainsi en partie de l'humus que renferme la couche arable et dont une certaine quantité est enfouie à une profondeur plus ou moins grande. De plus, on n'augmente pas la richesse en éléments fertilisants. Le travail mécanique d'un labour profond produit seulement un ameublissement de la terre sur une épaisseur plus grande et facilite la pénétration des racines.

Mais, lorsque la constitution minérale du sol et celle du sous-sol ne sont plus les mêmes, ce qui a lieu quand la couche arable est formée d'un dépôt d'alluvions provenant de la désagrégation de roches situées à une grande distance, on peut améliorer cette couche arable par l'adjonction d'une certaine quantité de la couche sous-jacente. On comprend que cette amélioration puisse retentir sur les propriétés physiques du sol dans les deux exemples qui voient. Une terre argileuse est, généralement, peu perméable ; si elle repose sur un sous-sol sableux et que l'on incorpore une partie de ce sable à l'argile de la couche supérieure, celle-ci acquerra un certain degré de perméabilité. L'inverse est également vrai. Un sol très sableux et très filtrant reposera avec avantage sur un sous-sol argileux. Mais ici, il y a lieu d'établir une distinction relative à l'inclinaison de la couche argileuse. Nous allons revenir sur ce point.

Si la constitution d'un sol présente une importance majeure, il est indispensable également de faire entrer en ligne de compte la question de climat et la question d'orientation. Il faut, avec Boussingault, admettre que les terrains argileux conviennent mieux aux climats secs,



les terrains sablonneux et les terrains crayeux aux climats humides. Sous les climats humides, les solutions du sol sont peu concentrées ; dans les climats secs, ces solutions sont plus concentrées. Parfois même les substances solubles s'accumulent et peuvent cristalliser.

Rapports du sol avec le sous-sol. — On peut, comme l'a fait Dehérain, schématiser ces rapports réciproques de la façon suivante :

On envisage quatre cas principaux : A. *Terres légères* reposant : 1° sur un sous-sol perméable, 2° sur un sous-sol imperméable ; B. *Terres fortes* reposant : 1° sur un sous-sol perméable, 2° sur un sous-sol imperméable.

Une terre légère reposant sur un sous-sol perméable est à la merci des conditions de climat. Si celui-ci est sec, une semblable terre peut être presque totalement ou totalement infertile. Si la terre est calcaire, on la boiserait en conifères qui n'évaporent que peu d'eau. Avec le temps, on pourra disposer ainsi d'une couche d'humus appréciable. Si le climat est humide, ou si ces terres sont susceptibles d'être irriguées, elles peuvent devenir fertiles. Dans ce dernier cas, l'eau apporte avec elle des principes fertilisants, parfois en dose notable (potasse en particulier). Dehérain conseille de répandre sur ces terres du fumier de ferme, en faibles quantités à la fois, mais fréquemment renouvelées.

Les terres légères reposant sur un sous-sol imperméable peuvent être excellentes sous un climat moyennement humide, à la condition que le sous-sol présente une pente permettant l'écoulement de l'eau en excès, ou lorsque, par des travaux appropriés, on évacue ces eaux en creusant des tranchées. Alors même que le climat serait sec, de pareilles terres sont de bonne qualité, si, sur la couche argileuse du sous-sol incliné, coule une nappe d'eau douce. Par capillarité, le liquide remonte dans le sol et alimente les végétaux qui s'y développent.

Mais si un sol léger repose sur un sous-sol imperméable horizontal, les choses changent : il n'y a plus d'écoulement possible. La terre se gorge d'eau en hiver et se dessèche en été d'autant plus que cette saison sera moins pluvieuse. L'exemple classique de cette disposition est fourni par les landes de Gascogne. Avant le creusement des tranchées destinées à diriger les eaux, soit vers le bassin d'Arcachon, soit vers la Gironde, ces landes étaient noyées d'eau pendant l'hiver et devenaient sèches et brûlantes pendant l'été. L'écoulement des eaux surabondantes et la plantation de pins maritimes ont métamorphosé l'aspect du pays. Les pins qui évaporent peu trouvent, pendant la saison chaude, une quantité d'eau suffisante dans la couche imperméable sur laquelle viennent buter leurs racines.

Les terres fortes qui reposent sur un sous-sol perméable sont, en géné-



ral, d'excellentes terres. Le défaut que présente une terre forte, d'être compacte et de retenir parfois trop d'eau, se trouve corrigé par la facilité avec laquelle cette eau s'écoule dans le sous-sol. Il est nécessaire de donner à ces sols des labours profonds capables de les ameublir jusqu'à la couche du sous-sol.

Les terres fortes qui reposent sur un sous-sol imperméable deviennent très humides dans la saison des pluies et ne peuvent être travaillées. Le drainage s'impose ; on les transformera ainsi en sols de très bonne qualité.

Flore spontanée. — Si toutes les plantes doivent rencontrer dans le sol un certain nombre de principes qui sont toujours les mêmes et dont l'existence est étroitement liée à leur développement ; si, par conséquent, elles ont *les mêmes besoins qualitatifs*, il est d'observation courante que leurs besoins *quantitatifs* sont très différents. Les sols naturels incultes sont caractérisés par la présence de végétaux dont l'espèce varie avec la composition chimique de la masse qui les porte.

Sur un sol exclusivement sableux, dénué de calcaire et très peu argileux, on rencontrera certaines Graminées appartenant aux genres *Arundo*, *Aira*, *Phleum* ; certaines Cypéracées (*Carex arcnaria*) ; puis quelques-unes des plantes suivantes : *Spergula arvensis*, *Armeria vulgaris*, *Genista scoparia*, *Cytisus laburnum*, *Plantago arenaria*, *Rumex acetosella*, etc. Si le sol sableux renferme un peu d'humus, on y trouvera la bruyère (*Calluna vulgaris*) ; mais on n'y verra presque jamais de légumineuses fourragères. Sur un sol calcaire, au contraire, les légumineuses abondent : plantes des genres *Trifolium*, *Medicago*, *Vicia*, *Anthyllis*, *Lotus*, etc. ; on y trouve aussi : *Reseda luteola*, *Poterium sanguisorba*, *Silene inflata*, divers végétaux du genre *Rosa* et, comme arbres, l'if (*Taxus baccata*), la viorne (*Viburnum lantana*), etc.

Les sols marneux portent un certain nombre de légumineuses ; on y rencontre également : *Tussilago farfara*, *Rubus fruticosus*, *R. Cæsius*. Les sols limoneux, dont la composition se rapproche de celle d'une bonne terre franche, nourrissent un très grand nombre d'espèces végétales qu'il serait trop long d'énumérer ici, et dont on trouvera la nomenclature dans les Flores particulières à chaque région. Quant aux sols tourbeux, ils portent de nombreuses plantes des genres *Cyperus*, *Carex*, *Juncus*, *Scirpus*, *Eriophorum*, *Sphagnum*, etc., de valeur alimentaire nulle. Les indications que l'on puise dans l'observation de ces plantes spontanées, relativement à la nature chimique du sol qui les supporte, rendent parfois de grands services.

Exposons maintenant de façon très sommaire les principes géné-



raux de quelques classifications ; il est difficile de faire un choix absolu dans le cas présent ; ce choix devra être subordonné aux conditions climatiques de la région.

III

CLASSIFICATION DES TERRES D'APRÈS LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Cette classification, indiquée par Ramann, présente l'avantage d'exprimer des propriétés déterminées, telles que celles qui se rapportent à la capacité des sols pour l'eau. En voici, brièvement résumés, les points principaux.

D'après la grosseur de leurs particules, on peut classer les sols ainsi qu'il suit :

α. Sols pierreux. — Composés de fragments rocheux, souvent volumineux, difficilement décomposables par les agents de l'atmosphère ; ces sols sont couverts de forêts dans les régions humides. Les arbres insinuent leurs racines dans les fentes de ces fragments qui se tapissent de mousse ; ils parviennent ainsi à y puiser l'eau et les matières salines indispensables à leur croissance.

β. Sols sableux. — La silice est la matière fondamentale de ces sols ; plus elle domine et plus grande est leur infécondité. De pareils sols sont très perméables et généralement profonds. Leur capacité pour l'eau est faible. Ils s'échauffent facilement et perdent par conséquent avec rapidité le peu de liquide qu'ils retiennent. Les plantes à enracinement superficiel s'y développent mal ou pas du tout ; seuls, les végétaux à racines pivotantes peuvent aller chercher assez loin l'humidité nécessaire à leur existence. Si ces sols très filtrants sont mélangés d'argile ou d'humus, leur capacité pour l'eau s'accroît ; s'ils sont mélangés de calcaire et de silicates variés, leur valeur culturale augmente. En raison de leur échauffement facile, les sols sableux portent une végétation précoce.

γ. Sols limoneux. — Ils sont formés d'un mélange de sable, d'argile et d'un peu de calcaire. Ils constituent la base de ce que l'on appelle en France la *terre franche*, surtout s'ils contiennent un peu d'humus. Selon la teneur de ces sols en éléments fins (tome I, p. 212), leur capacité pour l'eau varie dans de grandes limites.

Ils s'échauffent d'autant moins que leurs éléments sont plus fins



et que leur teneur en eau est plus élevée. La circulation de l'air dépend de leur division particulière et de la profondeur à laquelle celle-ci se maintient.

δ. Sols argileux. — Ils forment une masse très plastique lorsqu'ils sont humides ; lorsqu'ils sont secs, ils s'agglomèrent en fragments plus ou moins durs, difficiles à émietter. Nous avons dit plus haut qu'un sol purement argileux serait impossible à cultiver, tant à cause de ses propriétés physiques qui entraînent l'imperméabilité et la discontinuité que de sa très faible teneur en éléments de fertilité : mais, en revanche, son pouvoir absorbant vis-à-vis des matières salines est élevé. L'échauffement de pareils sols est lent ; dans les terres où domine l'argile, la végétation est toujours en retard. L'aération en est d'autant plus difficile que l'argile est plus abondante, et la décomposition des matières végétales que l'on incorpore à cette argile est d'autant plus malaisée que l'accès de l'air est plus pénible. Nous savons que si un pareil sol repose sur un sous-sol perméable ses propriétés physiques sont heureusement modifiées.

ε. Sols calcaires. — Lorsque le sol est essentiellement calcaire, sa couleur varie du blanc au gris ou au brun (oxyde ferrique). Les sols calcaires sont perméables à l'eau et aux gaz ; ils souffrent de la sécheresse et n'ont qu'une faible valeur, car la plupart des principes nutritifs indispensables leur font défaut. Lorsque les roches calcaires qui donnent naissance à ces sols sont mélangées d'argile, la terre acquiert une plus grande valeur. La plasticité de pareils sols varie en raison de la quantité d'argile qu'ils contiennent ; il en est de même de leur capacité pour l'eau. Ces sols décomposent bien les matières organiques et s'échauffent d'autant mieux qu'ils sont plus calcaires.

ζ. Sols humiques. — On nomme ainsi les sols riches en matière organique. Lorsqu'ils sont siliceux, ils se dessèchent facilement. Ils sont très perméables (terres de forêts, terres de landes et de bruyère) ; s'ils sont argileux, ils demeurent gorgés d'eau et portent une végétation très spéciale : joncs, sphaignes, roseaux, etc. Leur richesse en éléments fertilisants est faible ; ils manquent d'acide phosphorique et surtout de calcaire. Leur culture ne peut être entreprise qu'à la suite d'améliorations physiques et chimiques très importantes.

La classification que nous venons d'exposer est avantageuse quand on veut apprécier la nature des travaux mécaniques auxquels il convient de soumettre le sol ; elle indique quel est le degré de perméabilité de la terre, mais elle ne nous renseigne pas sur la richesse propre du sol en éléments fertilisants. Elle demande donc à être complétée.

IV

CLASSIFICATION DE DE GASPARIN

On pourrait qualifier cette classification du nom de *physico-chimique*.

Quelle est la substance qui imprime aux sols dits *arables* leurs caractères principaux ? De Gasparin fait remarquer que les terres calcaires, par l'action qu'elles exercent sur les engrais, mettent rapidement ceux-ci en état de servir d'aliments aux plantes. Si une terre n'est pas calcaire, les engrais y demeurent inutilisés. Le calcaire, soit qu'il existe naturellement dans le sol, soit qu'il provienne d'un chaulage ou d'un marnage, change donc d'une façon absolue les conditions de la végétation et permet d'obtenir des récoltes rémunératrices. Aussi de Gasparin adopte-t-il, en principe, deux grandes classes de terres : *les terres calcaires, les terres non calcaires*. A côté de ces deux grandes classes, il admet deux groupes particuliers : *les terres argileuses et les terres où domine l'élément humique*.

Résumons rapidement les principales données de cette classification, en y joignant quelques observations de Dehérain.

Subdivision des terres calcaires. — a. Terres limoneuses. — Un limon renferme un mélange de sable, de calcaire et d'argile avec de faibles quantités d'humus. Il se couvre d'herbes à l'état naturel : graminées donnant de bons fourrages, trèfle blanc. Les bonnes terres limoneuses jouissent des propriétés que nous avons signalées antérieurement : la perméabilité, l'immobilité, la continuité. Les limons qui possèdent de pareilles qualités sont dits *limons meubles*. Dehérain estime qu'avec 30 p. 100 d'argile et de sable fin, la terre limoneuse, dite encore *terre franche*, est capable d'emmagasiner une proportion d'eau favorable. Si le sable grossier atteint 50 p. 100 et le sable fin seulement 20 p. 100, la perméabilité est bien assurée ; mais la dessiccation de la terre est trop rapide. Une terre franche ne doit pas contenir assez d'argile pour que la dessiccation y produise un retrait.

Lorsque l'argile existe en trop faible quantité, si la chaux et la silice dominant, la terre devient légère ; c'est à ce genre de sol que de Gasparin donne le nom de *limon inconsistant*. De pareils sols (sols *sablo-calcaires* de Dehérain) se dessèchent très rapidement. Ils sont continus, mais souvent mobiles.



Lorsque l'argile prédomine, le limon devient tenace. Comme type de ce limon, de Gasparin cite le limon du Nil, de couleur jaune-brunâtre, happant fortement à la langue. Ce limon présente dans sa composition d'assez fortes variations suivant les endroits où on le recueille. Il doit sa fertilité à la proportion notable d'humus qu'il renferme.

Lorsque le calcaire est peu abondant, la terre est dite *argilo-siliceuse*. Dehérain remarque que cette terre peut devenir imperméable aux gaz et à l'eau, mais qu'elle conserve bien l'humidité qu'elle a reçue. Par suite de sa pauvreté en calcaire, un pareil sol sera souvent mobile ; il deviendra discontinu pendant la sécheresse. L'apport de marne et de chaux remédie à ces deux inconvénients ; les fumures organiques copieuses peuvent également diminuer la plasticité de l'argile. L'écoulement des eaux surabondantes se fera par le drainage.

β. Terres argilo-calcaires. — D'après de Gasparin, des étendues considérables de terrains « formées des débris de calcaires argileux, se trouvent dans des formations géologiques différentes, dans les bassins dominés par le calcaire jurassique, la craie, les formations d'eau douce, ou dans les alluvions des rivières qui en découlent ». Ces terres sont bonnes pour le blé, et propres aux prairies artificielles. Quand elles portent des prairies naturelles, le foin y est d'excellente qualité.

γ. Terres crayeuses. — Au point de vue agricole, les craies sont caractérisées par l'abondance de l'élément calcaire, mélangé d'un peu d'argile et de sable siliceux. Elles sont perméables, se dessèchent vite, se soulèvent facilement par la gelée et sont entraînées par le vent. Les sols purement calcaires sont absolument infertiles dans les pays chauds ; ils se couvrent d'herbes dans les contrées humides. Ils décomposent avec facilité les matières organiques ; la nitrification y est intense, mais les nitrates sont facilement dissous par les pluies.

D'après de Gasparin, la luzerne et le sainfoin sont les fourrages qui conviennent le mieux aux terrains crayeux ; le blé peut aussi s'y développer avantageusement. On appelle *craies fraîches* celles qui sont en communication par leur profondeur avec une nappe d'eau. Si le sous-sol sur lequel repose la craie est imperméable, on a la *craie sèche* avec tous ses inconvénients.

Subdivisions des terres non calcaires. — **α. Terres siliceuses.** — Formées par des débris de roches dépourvues de calcaire, ces terres se rencontrent sur le bord de la mer, sur les rives des cours d'eau. Les dunes représentent un type de terre siliceuse. Ce genre de sol est très perméable ; il n'emmagasine pas l'humidité. Il est très mobile et si le climat est sec, sa fertilité est très faible. Certains arbres résineux (pins) s'y développent bien lorsque la profondeur du sol est suffisante.

Mais lorsque ces terres siliceuses sont irriguées, ou si elles sont situées sous un climat naturellement humide, elles peuvent donner d'excellents résultats, surtout si on leur fournit de copieuses fumures



organiques. Dans ce dernier cas, elles sont particulièrement destinées à la culture maraîchère.

β. **Terres glaiseuses.** — De Gasparin range dans cette classe les terres composées d'un mélange d'argile et d'une quantité plus ou moins grande de silice libre, mais qui ne peut dépasser 55 p. 100. Il est bon de faire ici une remarque touchant le mot *argile*. Les méthodes physiques d'analyse du sol qu'employait l'auteur précité n'avaient pas la précision de celles que nous possédons aujourd'hui. Ce qu'il nomme *argile* est, ainsi que nous l'avons établi (tome I, p. 113), un mélange d'argile colloïdale avec des débris siliceux souvent fort abondants. De sorte que le taux de silice véritable, contenue dans les terres qualifiées de glaiseuses, doit excéder certainement 55 p. 100.

Lorsqu'il argile domine, ces terres sont aptes à donner de très bonnes récoltes si, par suite d'une pente suffisante, les eaux pluviales peuvent s'écouler. Si le sable fin domine, ces terres seront très compactes quand elles auront reçu la pluie ; si la silice est en grains plus gros, la terre se dessèche facilement et prend le caractère des terres siliceuses. En principe, quand l'argile est abondante, la terre est pauvre en éléments de fertilité.

De Gasparin distingue dans ce groupe :

1° *Les glaises inconsistantes.* Elles renferment beaucoup de silice et ont peu de ténacité, surtout si le sable à gros grains domine. Sèches en été, gorgées d'eau dans la saison des pluies, ces terres demandent à être boisées.

2° *Les glaises meubles.* Lorsque les terres sont formées de schistes micacés, elles retiennent bien l'humidité, mais s'égouttent facilement. Si la silice domine, elles sont légères et rentrent dans la catégorie des terres siliceuses. Les châtaigniers prospèrent bien dans de pareils sols. Sous le nom de *glaises meubles volcaniques*, de Gasparin comprend les terrains composés de débris basaltiques. Ces terrains sont perméables, mais retiennent cependant une quantité d'eau suffisante ; ils sont riches en potasse et en soude et sont d'une grande fertilité (campagne de Naples, Limagne d'Auvergne).

3° *Les glaises tenaces.* Elles forment une pâte dans laquelle le soc de la charrue ne peut pas pénétrer lorsqu'elles sont humides ; elles résistent pareillement au labour quand elles sont sèches parce qu'elles forment alors une masse très dure. Ces terres sont discontinues pendant la sécheresse ; elles se gorgent d'eau pendant l'hiver. « Elles sont d'une culture difficile et, quand elles n'ont pas une pente suffisante, il faut les disposer en billons ou en ados. »

γ. **Terres argileuses.** — De Gasparin classe dans cette catégorie les terres à 85 p. 100 d'argile au moins. Leur ténacité est telle que toute culture y est impossible.

δ. **Terres à base organique** (terreau, humus). — Le caractère princi-



pal de ces terres c'est de perdre, une fois desséchées, plus du cinquième de leur poids par la combustion.

De Gasparin distingue les *terreaux doux* (terre de jardin), formés de débris de végétaux au fond des étangs et des marais sur un sol calcaire et les *terreaux acides*. Ceux-ci, bouillis avec de l'eau, donnent une liqueur qui rougit le papier bleu de tournesol. A cette catégorie appartiennent : 1° *les terres de bois* qui, pour être mises en culture, exigent après leur défrichement une application de chaux ou de marne. 2° *Les terres de bruyères*. Celles-ci renferment des débris entiers de plantes ; elles diffèrent des terres de bois par leur nature siliceuse. On sait que la terre de bruyère convient à un grand nombre de plantes (plantes de serre en particulier.) Si l'on veut que ces terres portent d'autres végétaux que ceux qu'elles nourrissent ordinairement, il faut les soumettre au chaulage ou à l'écochage. Cette dernière opération consiste, comme l'on sait, à brûler la couche superficielle du sol couverte d'herbes ou de plantes ligneuses et à répandre ensuite les cendres. On enrichira, en outre, ces terres en leur fournissant du fumier de ferme. 3° *Les terres tourbeuses*. Nous avons indiqué antérieurement l'origine des tourbières (tome I, p. 293). Une tourbière se remplit d'eau pendant l'hiver ; l'écoulement des liquides ne peut être obtenu que par le creusement de fossés profonds et rapprochés. Les modifications chimiques qu'il convient de faire subir aux tourbières sont celles du chaulage ou du marnage.

La classification dont nous venons d'exposer seulement les grandes lignes offre des avantages réels au point de vue pratique. Avec l'aide de la seule analyse physique, on peut, le plus souvent, faire rentrer un sol donné dans une des catégories que nous avons mentionnées, et savoir, par conséquent, quelles sont les modifications physiques et chimiques qu'il est nécessaire de lui faire subir pour l'amener à l'état de sol cultivable. Il est bien entendu que la question de climat (régime des eaux, température, orientation, etc.) doit être prise en considération ; car telle terre rentrant dans l'un quelconque des groupes que nous venons d'étudier pourra fournir sous tel climat des récoltes satisfaisantes, alors que, sous tel autre, sa fertilité sera beaucoup moindre.



V

CLASSIFICATION CHIMIQUE

On a parfois tenté d'établir une classification des sols d'après la quantité de matières assimilables qu'ils contiennent dans un poids déterminé de terre. Mais on se heurte alors à de nombreuses difficultés. Devra-t-on, par exemple, classer en première ligne la terre qui renferme le plus de principes fertilisants sous le poids le plus faible ? Il faudrait alors supposer que nous connaissons le degré d'assimilabilité de toutes les substances qui se rencontrent dans un échantillon donné de cette terre. Or nous avons montré, à propos de l'analyse chimique des sols, quelles étaient les difficultés parfois insurmontables que soulevait cette notion d'assimilabilité. On sait que ce n'est pas la richesse absolue d'un sol en telle ou telle substance qu'il importe de connaître, mais bien la fraction de cette substance dont les plantes peuvent immédiatement profiter. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne l'azote, si abondant dans les terres humiques, mais si mal utilisable pour la plupart des végétaux tant que ce principe n'aura pas subi certaines transformations qui doivent l'amener à l'état d'azote minéral diffusible. De plus, un sol que l'analyse chimique aura conduit à regarder comme pauvre en telle matière fertilisante, pourra, en effet, ne fournir que de médiocres récoltes avec tel végétal, mais en fournira de beaucoup plus satisfaisantes avec tel autre dont les besoins minéraux seront, au point de vue quantitatif, différents du premier. Il arrivera très fréquemment aussi que tel sol, classé au point de vue chimique parmi les sols pauvres, donnera, pendant une année chaude et humide, des produits supérieurs à ceux d'un sol mieux pourvu de matières fertilisantes, mais manquant d'eau.

Enfin, et on ne saurait trop le répéter, si un sol, même peu riche, est meuble sur une grande hauteur, si le sous-sol est perméable et si le volume d'eau pluviale qu'il reçoit est suffisant, la plante cherchera en profondeur ce qu'elle ne trouve



pas en largeur. Son développement sera souvent plus satisfaisant que celui d'une plante de même espèce ayant végété dans un sol beaucoup plus riche, mais dénué de profondeur, et, par cela même, soumis aux variations météorologiques de sécheresse ou d'humidité excessives.

Une classification *chimique* des terres serait donc illusoire : les propriétés physiques du sol ont un tel retentissement sur ses qualités chimiques, ainsi que nous l'avons maintes fois établi, que la plupart des éléments de fertilité indispensables resteraient sans emploi s'ils ne subissaient pas certaines modifications dues au jeu seul des agents physiques. C'est là un fait reconnu de tout temps : les façons fréquentes que l'on donne à une terre constituent une source d'enrichissement.

VI

CLASSIFICATION GÉOLOGIQUE

Nous aurions pu commencer par cette classification qui, de prime abord, semble être la plus rationnelle et la plus scientifique.

Cette classification, qui divise les sols en deux grands groupes, nous l'avons déjà esquissée au début de ce petit livre (tome I, p. 26).

A. Sols primitifs. — Ce sont ceux qui reposent encore sur la roche qui leur a donné naissance. Ces sols seront donc privés des éléments que la roche ne renferme pas.

Dans cette première catégorie, il faut placer les sols issus de la destruction sur place des roches cristallines : granite, porphyre, gneiss, micaschistes, très pauvres en chaux et en acide phosphorique, riches en potasse. Si la roche primitive contient de l'amphibole, du pyroxène, de la hornblende, les sols seront mieux partagés sous le rapport de la chaux. Lorsque la roche primitive est d'origine volcanique (trachytes, basaltes), ses débris seront beaucoup plus riches en éléments fertilisants (chaux, acide phosphorique). Mais il convient aussi de tenir compte du degré de finesse des fragments. Ceux d'entre eux qui sont grossiers demeurent au voisinage de la roche mère ; ils ne peuvent porter, le plus souvent, qu'une végétation assez maigre, étant donné la petitesse de leur surface par rapport à leur volume. Lorsque



les éléments rocheux, par suite du travail mécanique de la désagrégation, sont plus menus, ils sont entraînés par les eaux de pluie à une distance plus grande et peuvent fournir aux végétaux des conditions de développement plus favorables. En effet, leurs éléments de fertilité seront mis peu à peu à découvert sur une surface d'autant plus considérable que l'effritement aura été plus parfait.

B. Terrains d'alluvion. — Ces terrains ne se posent plus sur la roche primitive, ils sont formés de débris, souvent très variés, que l'eau a entraînés plus ou moins loin de leur lieu d'origine suivant la vitesse du courant et la finesse des particules solides.

A cette catégorie appartiennent les *sols argileux* provenant de l'action chimique des eaux naturelles sur les roches cristallines primitives ; les *sols sableux*, provenant de roches dans lesquelles dominent les éléments siliceux ; les *sols limoneux*, provenant du mélange des deux précédents ; les *sols calcaires*, provenant de la carbonatation de la chaux contenue dans les roches primitives avec dissolution subséquente à l'état de bicarbonate, puis départ de l'excès de gaz carbonique ; les *sols marneux*, provenant d'un mélange de sable, d'argile et de calcaire.

Il convient de remarquer que cette classification ne rend guère de services au point de vue pratique. On trouve, en effet, des sols de même nature dans les deux grandes catégories que nous avons admises : l'argile, le limon, la marne peuvent se rencontrer sur la roche primitive d'où ils sont issus, ou dans son voisinage immédiat. Par conséquent, à l'égard de la nutrition de la plante, il est indifférent de savoir si un sol déterminé est situé plus ou moins loin de son point d'origine. De plus, il n'est pas fait mention de la matière organique. Toutefois, certaines alluvions sont particulièrement riches en matières fertilisantes parce qu'elles résultent du mélange d'une infinité de fragments de roches dont la composition chimique est très variée. En raison de cette variété, et du degré de finesse que présentent leurs particules, on conçoit que beaucoup de terres formées par des dépôts d'alluvions se distinguent par leur remarquable fécondité.

Importance de la géologie appliquée à l'agriculture. — S'il est malaisé d'établir une classification strictement géologique des sols, il n'est pas moins vrai que ce sont les études géologiques qui fournissent les meilleurs renseignements sur la qualité physique et chimique des terres. S'inspirant des idées de son maître E. Risler, Hitier a écrit avec raison : « Il existe entre les formations géologiques et la végétation des rapports étroits qui s'expliquent par ce fait qu'une même formation géologique donne naissance, en général, à des terres agricoles de



qualités analogues, parce qu'elles contiennent les mêmes éléments dans des proportions à peu près uniformes... Deux pays à constitution géologique différente présentent, par ce fait même, aussi bien dans leur aspect extérieur, dans leurs sols, que dans les systèmes de culture que l'on y suit, des différences profondes. Par contre, deux pays situés en France, ou l'un en France, l'autre à l'étranger, si éloignés soient-ils, s'ils ont la même constitution géologique, présentent, avec le même aspect extérieur, le même groupement des habitations, la même terre et les mêmes systèmes de culture. »

« Abondance ou rareté des sources, présence ou absence de nappes d'eau souterraines continues dans le sous-sol, profondeur à laquelle se maintient cette nappe d'eau, perméabilité des terrains : ce sont là toutes conditions qui dépendent étroitement de la constitution géologique du pays. »

Faisant une juste critique des anciennes classifications, Risler remarque que la division des terres en *terres franches, argileuses, sablonneuses, etc.*, ne saurait suffire : « Il y a sable et sable. Il y a toutes sortes d'argiles. Il y a également toutes sortes de calcaires : la craie ne ressemble pas au calcaire corallien et le calcaire corallien ne ressemble pas davantage au calcaire grossier des environs de Paris. Les terres qui dérivent des uns ou des autres diffèrent par leur composition chimique comme par leurs propriétés physiques ; elles n'ont ni la même profondeur, ni le même sous-sol... En s'appuyant sur la géologie, les anciennes classifications pourront être plus utiles aux agriculteurs ; en devenant réellement plus scientifiques, elles seront du même coup plus pratiques. » Aussi Risler admet-il, avec A. de Lapparent, que la meilleure carte agronomique d'une région est sa carte géologique détaillée.

Cependant, il ne semble pas que les seules cartes géologiques aient toujours rendu à l'agriculture les services que l'on était en droit d'en attendre. Nous avons bien souvent, au cours de ces pages, montré que le sol, avec ses propriétés physiques et chimiques, n'était pas l'unique facteur qui entrât en jeu lorsqu'il s'agit de fixer les conditions de réussite d'une culture donnée. Les questions de régime des eaux, de température,



de situation géographique, interviennent immédiatement pour modifier, d'une manière souvent profonde, les qualités de ce sol et, par conséquent, son rendement économique.

Une véritable carte agronomique devrait enregistrer fidèlement toutes les particularités qui impriment à telle région sa physionomie spéciale : tel est le but que s'est proposé d'atteindre un agronome allemand, Hazard, pour une certaine région du royaume de Saxe (*Landw. Jahrb.*, t. XXIX ; p. 805 ; 1900). Nous ne pouvons ici qu'effleurer un sujet qui appartient plus spécialement au domaine de l'agriculture générale.

L'auteur envisage le sol, le climat, la situation géographique. On sait que, pour produire un kilogramme de matière sèche, les végétaux doivent disposer d'un poids d'eau variant de 300 à 700 kilogrammes : il y a donc, à cet égard, des oscillations assez notables. Hazard classe les plantes de la grande culture et les arbres forestiers d'après leurs exigences en eau. En ne considérant, pour abrégé, que les principales des plantes de la première catégorie, on peut les distinguer, par ordre d'exigences croissantes en eau, de la façon suivante : pommes de terre, seigle, avoine, trèfle rouge et orge, blé et betteraves. Mais si l'eau joue un rôle capital dans la production de la matière sèche, la température moyenne possède également une importance de premier ordre dont il est tenu compte. A l'aide de l'analyse physique, l'auteur détermine la nature et les proportions des éléments capables d'influencer la distribution de l'eau dans le sol, c'est-à-dire de retenir ce liquide et de le mettre à la disposition des racines. Les cartes de Hazard comprennent une *carte lithologique* qui renseigne sur la structure géologique du sol ; une *carte du sol*, s'appuyant sur la précédente, et dans laquelle sont notés les propriétés physiques du sol, la pente du terrain, les conditions climatiques, les renseignements cultureux que fournit la pratique seule et ceux que donnent les essais de laboratoire. Dans cette carte figurent les cinq types principaux de terres capables de nourrir les végétaux mentionnés plus haut. Une *carte d'aménagement du sol* montre quelle est l'étendue que doit occuper chaque culture ; elle est complétée



par une *carte de l'assolement* de la région considérée *répondant aux conditions économiques*.

Il ressort de ce qui précède qu'il existe, dans telle contrée, des terres à blé, des terres à betteraves, des terres à pommes de terre, etc., et que l'on peut indiquer d'avance, à l'aide d'études bien conduites, quel est le végétal qu'il convient de cultiver de préférence, et dont on obtiendra des rendements satisfaisants, à l'exclusion de tel autre. On se trouve donc ici en présence d'un ensemble de données se complétant mutuellement, susceptibles de guider l'agronome dans le choix de cultures rationnelles.

Conclusions. — Supposons qu'un sol déterminé possède toutes les qualités physiques susceptibles d'assurer le développement parfait d'une plante déterminée ; supposons encore qu'il reçoive en temps opportun le volume d'eau nécessaire pour alimenter la plante. Ces deux conditions ne sont cependant pas les seules dont on devra tenir compte : il faudra, de plus, que ce sol renferme une proportion de matières alimentaires capables de répondre aux besoins du végétal. Or nous savons que l'analyse chimique d'un grand nombre de terres arables indique un approvisionnement en azote, acide phosphorique, potasse, chaux, etc., qui, calculé pour la surface d'un hectare et pour une profondeur de 40 centimètres environ, peut sembler suffire aux exigences de la plupart des plantes de la grande culture. Toutefois, la pratique montre que beaucoup de sols chez lesquels on rencontre cette richesse globale ne donnent souvent que des récoltes médiocres. Nous nous sommes expliqués bien des fois sur ce point : étant donné l'approvisionnement, parfois considérable, d'un élément indispensable, une fraction seulement de cet approvisionnement, fort petite dans certains cas, se trouve sous une forme telle que la plante puisse l'assimiler actuellement.

Il existe donc des *terres complètes* et des *terres incomplètes*. Les premières, par suite de leur origine, peuvent fournir, sans qu'il soit utile de leur faire aucune addition, des récoltes rémunératrices pendant un grand nombre d'années ; tandis que les secondes réclament l'apport d'une ou plusieurs matières



fertilisantes qui leur font défaut, ou qu'elles ne renferment qu'en proportions trop réduites.

D'après Risler, sur un territoire agricole de 50 millions d'hectares que comprend la France, il n'y a guère que le cinquième de cette surface qui possède des terres complètes, c'est-à-dire renfermant, par suite de leur origine géologique, assez d'acide phosphorique, de potasse, etc., pour subvenir aux besoins de bonnes récoltes de blé, de racines, de trèfle ou de luzerne. Les quatre cinquièmes du sol agricole de la France constituent donc des terres incomplètes dont la majeure partie manque, avant tout, d'acide phosphorique.

Il ne nous appartient pas d'exposer ici à quelles destinations on réservait ces terres, alors qu'on ignorait autrefois les causes de leur infertilité. Risler a développé ce point avec beaucoup d'ampleur (1).

Deux moyens s'offrent à nous pour lutter contre la stérilité partielle ou totale d'un sol : 1^o l'apport sur ce sol, comme matières fertilisantes, de plantes étrangères destinées à nourrir le bétail et à lui servir de litière ; 2^o l'emploi des engrais chimiques.

Les plantes étrangères au domaine sont celles que l'on trouve dans les eaux de la mer (fucus, varechs), dans les prés, dans les bois, sur les landes. On peut employer ces plantes directement comme engrais en les enfouissant dans le sol ; on féconde ainsi une terre aux dépens d'une autre terre. Cette dernière s'appauvrit donc, à moins que, mieux partagée que le domaine que l'on veut cultiver, elle ne reçoive des eaux d'irrigation qui entretiennent sa richesse ou ne soit située dans certaines vallées où se sont accumulées, à la suite des temps, de grandes quantités de matières fertilisantes : tel est le cas de beaucoup de prairies naturelles. Le plus souvent, les plantes de prairies servent à nourrir le bétail ; on transforme ainsi la matière végétale en chair musculaire, en lait et en graisse, et le domaine à enrichir ne profite que du fumier des animaux. Très répandue encore à l'heure actuelle, cette pratique permet

(1) Géologie agricole, tome IV, p. 379. Paris.



d'améliorer peu à peu des surfaces de terre considérables ; c'était la seule à laquelle on avait recours autrefois d'une manière instinctive, lorsque les lois de la production agricole étaient inconnues.

Toutefois, l'emploi exclusif de matières végétales ou de fumier sur des sols pauvres ne permet pas de culture intensive. Les transformations que subissent ces engrais organiques sont lentes ; elles ne peuvent libérer chaque année, sous une forme réellement assimilable pour la plante, qu'une fraction assez faible des éléments de fertilité que ces engrais contiennent en puissance. L'azote organique, en particulier, ne revêt l'état d'azote nitrique que dans une proportion insuffisante pour nourrir une bonne récolte de blé, à moins que l'on ne dispose de masses énormes de fumier, ce qui n'est pas le cas le plus souvent. Encore faut-il supposer que le sol du domaine à améliorer contienne une dose convenable de calcaire.

Depuis soixante ans, les engrais chimiques que fabrique l'industrie (sels d'ammoniaque, matières azotées inutilisables pour l'alimentation auxquelles on fait subir certains traitements), ou ceux que l'on rencontre en abondance sur quelques points du globe (nitrates, sels de potassium, phosphates) ont amené une transformation radicale dans l'art de cultiver.

Il est facile actuellement de fournir au sol, sous un faible poids, telle substance fertilisante qui lui fait défaut, et cela sous une forme soluble qui profite immédiatement à la plante ; il serait superflu d'énumérer ici les résultats remarquables obtenus dans cette voie. Cependant, on ne saurait trop rappeler que les engrais chimiques ne doivent pas être utilisés d'une façon exclusive ; l'emploi du fumier ou celui des engrais verts, joint d'une façon judicieuse à l'épandage des engrais chimiques, fournit toujours des résultats supérieurs à ceux que donnent les seuls engrais chimiques. Nulle règle générale ne peut être formulée à cet égard, parce que ce point particulier dépend d'un trop grand nombre de circonstances variables, telles que : situation économique, nature du sol, influence du climat, espèces végétales cultivées. Malgré les avantages incontestables que procure l'apport des engrais chimiques, il



ne faudrait pas croire qu'ils représentent à eux seuls une source inépuisable de fécondité, à supposer même qu'ils soient très largement distribués. La structure physique et la constitution chimique du sol auquel on les incorpore jouent un rôle capital dans la façon dont ils sont arrêtés par les particules terreuses d'abord, avant d'être absorbés ultérieurement par le végétal. Pour ne prendre qu'un exemple, il serait inutile de répandre des sels solubles de potassium ou d'ammonium sur un sol exclusivement sableux dépourvu de calcaire; l'eau pluviale entraînerait ces sels que ne retiendrait aucune propriété absorbante.

Qu'il s'agisse de l'épandage d'un engrais ou de la culture d'une plante, on est donc toujours ramené à cette notion, fondamentale en matière de chimie agricole, que les propriétés physiques d'un sol sont, en somme, celles qu'il convient d'étudier avec le plus de soin afin de les modifier, si la chose est reconnue nécessaire, en vue de diriger une exploitation vers un but déterminé. L'utilisation par la plante des richesses alimentaires que renferme la terre est toujours subordonnée aux conditions physiques du milieu ambiant. Puissions-nous avoir réussi à faire cette démonstration dans les pages de ce petit ouvrage.



TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

DU PREMIER VOLUME

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION A L'ÉTUDE DE LA CONNAISSANCE DU SOL..... 11

Aspect général du sol, 11. — Le sol est un milieu inhomogène, 12. — A quelle profondeur pénètrent les racines ? terre arable, 13. — Importance de la couche située au-dessous de celle de la

terre arable, 15. — Comment on peut étudier le sol, 15. — Composition élémentaire de la plante; éléments minéraux absorbés par la plante, 18.

CHAPITRE II

FORMATION DES SOLS. — ÉLÉMENTS DES SOLS.... 22

Roches en général. Ce que l'on doit entendre par le mot *roches*, 22. — Roches cristallines; roches sédimentaires, 23. — Soils formés sur place, sols de transport, 24. — Constitution des roches, 26. — Classification des roches au point de vue chimique, 27. — Analyse minéralogique, 29. — Principaux minéraux que l'on rencontre dans les roches les plus usuelles, composition de ces minéraux, 30. — Description sommaire de quelques roches éruptives, 31. — Description sommaire de quelques roches volcaniques, 32. — Description sommaire de quelques roches cristallophylicines, 33. — Roches sédimentaires, 34. — Composition centésimale de quelques roches, 37. — Composition de quelques minéraux communs, 38. — Phénomènes qui provoquent la destruction des roches, 41. — Action de la gelée, 41. — Action des glaciers, 41. — Action des torrents, 43. — Actions destructives dues à la végétation, 44. — Phénomènes d'ordre chimique, 45. — Dissolutions

par l'eau pure, 46. — Dissolutions par l'eau contenant les gaz de l'atmosphère, 47. — Action des gaz carbonique et oxygène, 47. — Action profonde du gaz carbonique, 49. — Examen comparé des roches non altérées et des roches altérées, 50. — Dégradation des feldspaths, 50. — Recherches d'Ebhelmen, 51. — Latérite, 53. — Expériences synthétiques, 53. — Expériences de Daubrée, 54. — Conséquences de l'altération des roches; action du gaz carbonique sous pression, 55. — Action de l'eau chargée de matières salines ou de substances organiques, 56. — Rôle des acides concentrés, rôle de la matière organique dans la décomposition des roches, 58. — Désagréments sous l'influence de l'eau et de la végétation, 59. — Déplacement de la potasse des roches silicatées par quelques substances employées comme engrais, 60. — Quelques remarques relatives à la structure chimique des silicates, 61. — Phénomènes de destruction ayant



une origine d'ordre physiologique, 63. — Destruction par les végétaux inférieurs, 64. — Destruction par les microbes, 64. — Fixation du gaz carbonique sur l'écorce terrestre, 65. — Modes de destruction des principales roches, 66. — Roches primitives, 67. — Roches volcaniques, 68. — Roches cristallophylliennes, 68. — Roches calcaires, 68. — Lenteur de formation de la couche de terre arable, 69. — Formes principales des éléments rocheux que l'on rencontre dans le sol, 70. — Éléments acides; silice et silicates, 70. — Acide phosphorique et phosphates, 71. — Acide sulfurique et sulfates, 72. — Acide chlorhydrique et chlorures, 73.

— Éléments basiques . potasse, 73. — Soude, 73. — Chaux, 74. — Magnésie, 75. — Oxyde de fer, 75. — Oxyde de manganèse, 75. — Discussion relative à la nature et à la composition des éléments rocheux que l'on rencontre dans le sol, 75. — Persistance, dans la terre arable, d'espèces minérales pures, 76. — Objections à cette manière de voir, 77. — Les phénomènes d'épigénie se continuent dans la terre arable, 79. — L'action dissolvante de l'eau s'accompagne toujours d'une action destructive, 79. — Mécanisme probable des phénomènes de dissolution, 82. — Présence et origine de l'humus dans le sol, 84. — Formation de la terre végétale, 84.

CHAPITRE III

ÉTUDE DES GAZ DE L'ATMOSPHÈRE ET DES EAUX MÉTÉORIQUES..... 88

Éléments gazeux de l'atmosphère, 88. — Gaz carbonique, 91. — Observations relatives à la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique, 92. — Circulation du gaz carbonique à la surface du globe, 93. — Ammoniaque atmosphérique, 94. — Acide

nitrique atmosphérique, 97. — Ozone, 98. — Eaux météoriques, leur teneur en azote combiné: causes d'enrichissement du sol sous leur influence, 100. — Apport total des composés azotés sur le sol, 103.

CHAPITRE IV

CONSTITUTION PHYSIQUE DES SOLS..... 105

Les quatre constituants du sol arable, 106. — Détermination qualitative sommaire des constituants du sol, 106. — Définition de la constitution physique des sols, 111. — Constitution du sable, 111. — Constitution de l'argile, 112. — Quelques mots sur les substances colloïdales, 112. — L'argile est une substance colloïdale, 114. — Conséquences pratiques des propriétés colloïdales de l'argile, 117. — Argile colloïdale véritable, 118. — Constitution du calcaire, 119. — Constitution de la matière organique, 120. — Structure du sol, ses relations avec l'eau et avec l'air, au point de vue physique, 123. — Lacunes du sol, dimensions des éléments, 124. — Surface des éléments constituants du sol, 128. — Capacité du sol vis-à-vis des fluides :

des : eau et gaz, 129. — Rapports entre l'eau et le sol, 131. — Phénomènes capillaires, tension superficielle, 131. — Mouvement de l'eau dans le sol, 132. — Ascension capillaire dans le sol, 134. — Infiltration de l'eau, capacité du sol pour l'eau, 136. — Perméabilité du sol, 140. — La présence de certains sels augmente la perméabilité du sol, 142. — Infiltration de l'eau sous pression, 143. — Mouvements de l'eau du sol au contact des substances salines solubles, 143. — Affinité de l'eau pour certains éléments du sol, 147. — Colloïdes du sol, 149. — Phénomènes d'adhérence, 152. — Adsorption, 153. — Quelques propriétés des colloïdes du sol, 154. — Précipitation réciproque des colloïdes, 156.



CHAPITRE V

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS..... 157

Notions générales et définition des propriétés physiques des sols, 157. — Poids spécifique de la terre arable 159. — Imbibition des terres par l'eau, 160. — Pénétration de l'eau de haut en bas, 160. — Pénétration de l'eau de bas en haut, 162. — Mesure de la capacité d'imbibition, 163. — Imbibition de la terre végétale, 165. — Hygroscopicité, 168. — Influence de la température sur l'hygroscopicité de la terre végétale, 171. — Dessiccation absolue d'une substance, 171. — Aptitude des terres à la dessiccation, 172. — Influence de la finesse des éléments, 173. — Influence du degré d'humidité du sol sur sa dessiccation, 176. — Influence de l'eau d'imbibition et de l'eau d'hygroscopicité sur la végétation, 176. — L'eau hygroscopique peut-elle servir à alimenter les végétaux ? 177. — Perméabilité de la terre vis-à-vis des gaz de l'atmosphère, 178. — Perméabilité des constituants de la terre, sable, 180. — Argile 180. — Calcaire, 181. — Humus, 181. — Perméabilité de la terre,

181. — La terre végétale ne condense pas les gaz de l'atmosphère, 182. — Cohésion ou ténacité de la terre, 183. — Adhérence, 183. — Retrait, 184. — Relations entre la chaleur solaire et le sol, 184. — Emission de la chaleur solaire, 184. — Température du sol, 185. — Température du sol à différentes profondeurs, 187. — Couleur du sol, 188. — Chaleur spécifique, 188. — Conductibilité du sol pour la chaleur, 190. — Echauffement du sol et de ses constituants au contact de l'eau, 191. — Effets thermiques obtenus avec diverses terres, 193. — Effets thermiques fournis par les éléments isolés ; argile, 194. — Matière organique, 194. — Carbonates et oxydes, 195. — Origine des dégagements de chaleur observés, 195. — Influence de la fixation antérieure de l'eau sur le dégagement de chaleur, 195. — Causes de l'échauffement des terres et de leurs constituants, 196. — Travail des terres, 197. — Jachère, 203.

CHAPITRE VI

ANALYSE MÉCANIQUE ET PHYSIQUE DES SOLS.... 205

But de l'analyse physique des sols ; procédés généraux, 205. — Dimensions relatives des éléments, 207. — Prélèvement d'un échantillon de terre, 208. — Autres procédés d'échantillonnage du sol, 212. — Procédé d'analyse physique de Schloësing, 212. — Analyse mécanique, notions préliminaires sur ce mode d'analyse, 215. — Procédés par sédimentation, 217. — Méthode de Schloësing, 217. — Méthode de Hall, 219. — Méthode de Wolf, 220. — Méthode

de Kühn, 220. — Classification des argiles, 220. — Méthode d'Oden Swen, 221. — Dénomination des éléments sableux, 221. — Valeurs comparées des méthodes ci-dessus décrites, 222. — Procédés par déplacement, 223. — Procédé de Nobel, 224. — Appareil de Schöne, 224. — Appareil de Kopecky, 225. — Conclusions, 226. — Analyse minéralogique, 227. — Séparation des constituants du sol d'après leur poids spécifique, 228.

CHAPITRE VII

CONSTITUTION CHIMIQUE DE LA MATIÈRE MINÉRALE DES SOLS..... 230

Notions préliminaires sur la constitution chimique de la matière

minérale, 230. — Phénomènes chimiques et phénomènes micro-



biologiques, 232. — Plan des questions à étudier, 235. — Etude des dissolutions du sol, 235. — Présence dans le sol de substances solubles ou en dissolution, 236. — Méthode de déplacement des véritables dissolutions du sol, 237. — Dissolutions de la terre arable, 239. — Phénomènes chimiques qui provoquent les dissolutions normales du sol, 241. — Acide phosphorique ; phosphates, 242. — Dissolution continue de l'acide phosphorique dans le sol, 243. — Rôle des plantes dans la dissolution des phosphates insolubles du sol, 248. — Acide phosphorique soluble et fertilité du sol, 250. — Causes indirectes de la solubilisation des phosphates, 251. — Silice, chlore, acide sulfurique, 253. — Potasse, 254. —

Remarques sur les états de la potasse dans le sol, 255. — Action du gaz carbonique sur la solubilisation de la potasse, 257. — Soude, 258. — Chaux, magnésie, 258. — Phénomènes de double décomposition, 260. — Phosphates, 260. — Sels de potassium, 263. — Constitution des solutions étendues, 264. — Dialyse de la terre arable, 264. — Des différentes formes de la matière minérale définies d'après l'action de certains réactifs énergiques, 267. — Phosphore et acide phosphorique, 268. — Acide phosphorique utile aux végétaux, 270. — Soufre et acide sulfurique, 272. — Action fertilisante du soufre, son évolution dans le sol, 274. — Potasse, 275. — Chaux, 279. — Résumé, 279.

CHAPITRE VIII

CONSTITUTION CHIMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS..... 281

Généralités sur la matière organique des sols, 281. — Rôles multiples de la matière organique dans le sol, 285. — Du rôle de certains animaux dans la production de l'humus, 286. — Ordre à suivre dans l'étude de l'humus, 297. — Rapports pondéraux entre le carbone et l'azote dans la plante, dans l'humus, dans la terre, 287. — Erémacausis, 289. — Richesse en carbone et en azote de la terre arable, 290. — Différentes variétés d'humus, 291. — Tourbe, 293. — Genèse des matières humiques, 294. — Propriétés chimiques générales de l'humus, 296. — Noyau organique, 296. — L'humus renferme toujours des matières minérales et de l'azote, 298. — Variations du taux de l'azote et des matières minérales dans les divers humus, 300. — Action de l'oxygène sur l'humus, 300. — Rôle de l'humus vis-à-vis des végétaux, 301. — Pseudo-combinaisons de l'humus avec les éléments minéraux, 305. — Constitution

chimique du noyau azoté de l'humus, 308. — Action hydrolysante des acides, formation d'ammoniac, 310. — Action hydrolysante des alcalis ; formation d'ammoniac, 312. — Produits intermédiaires obtenus dans la décomposition de l'humus par les alcalis, 313. — Actions chimiques naturelles qui simplifient l'azote complexe de l'humus, 314. — Absorption et émission d'ammoniac par la terre arable, 315. — Odeur propre de la terre, 317. — Atmosphères confinées des sols ; variations de la composition des gaz, 318. — Nature, dosage et variations des gaz renfermés dans les sols ; expériences de Boussingault et Léwy, 319. — Influence de certains facteurs sur la production du gaz carbonique, 321. — Expériences de Schläsing fils et de Mangin, 323. — Combustion de la matière organique dans le sous-sol 327. — Résumé de l'étude de la constitution chimique de la matière organique du sol, 328.



TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

DU SECOND VOLUME

CHAPITRE IX

POUVOIR ABSORBANT DES SOLS VIS-A-VIS DES MATIÈRES FERTILISANTES 5

Définition du pouvoir absorbant ; nature des phénomènes qui entrent en jeu, 5. — Différentes modalités du pouvoir absorbant, 6. — Constatation du pouvoir absorbant, 7. — Division du sujet, 10. — Premiers travaux relatifs au pouvoir absorbant des sols, 11. — Expériences de Way, rôle des silicates du sol ; travaux de Liebig, 11. — Expériences de Brüstlein, sur la fixation de l'ammoniaque, 13. — Doubles décompositions d'ordre chimique, 16. — Fixation de l'acide phosphorique, 16. — Fixation de l'ammoniaque, 18. — Fixation de la potasse, 19. — Phénomènes d'absorption attribuables à la présence des colloïdes minéraux et organiques,

22. — Déplacement des bases dans un silicate zéolithique, 22. — Les phénomènes de déplacement des bases dans le sol corrélatifs de la présence des silicates hydratés, 23. — Absorption de la potasse en dissolution, 23. — Remarques sur les équilibres, 24. — Déplacement des bases par le gaz carbonique. Echange de bases, 25. — Expériences de van Bemmelen, rôle des hydrogels, 27. — Pouvoir absorbant des colloïdes humiques, 30. — Phénomènes d'équilibre : loi d'action de masse, 31. — Affinité capillaire, actions de surface, phénomènes d'adsorption, 35. — Résumé et conclusions pratiques, 37.

CHAPITRE X

ANALYSE CHIMIQUE DE LA TERRE ARABLE 42

But de l'analyse chimique, 42. — Éléments assimilables, 43. — Difficultés que l'on rencontre lorsque l'on veut définir et déterminer le degré d'assimilabilité d'un élément, 44. — Réactifs rationnels, 44. — Réaction du sol, 46. — Détermination de l'eau, 54. — Dessiccation de la terre, 55. — Perte par calcination, 56. — Détermination de la matière organique totale, et du carbone en particulier, 56. — Dissolution de l'humus, 56. — Dosage du carbone total, 58. — Détermination de l'azote organique, de l'azote nitrique, de

l'azote ammoniacal, 61. — Azote organique, 62. — Azote nitrique, 66. — Azote ammoniacal, 67. — Détermination de la totalité des éléments minéraux, 69. — Substances minérales à caractère acide, 72. — Acide phosphorique, 72. — Acide sulfurique, 74. — Substances minérales à caractère basique, 75. — Chaux, 75. — Calcaire actif, 77. — Magnésie, 78. — Potasse, 79. — Analyse rationnelle des terres par l'eau chargée de gaz carbonique, 81. — Interprétation des analyses physique et chimique des sols, 84. — Difficulté des

G. ANDRÉ. — *Chimie du sol.*

II. 19



interprétations analytiques, 85. — Prise d'échantillon, 87. — Interprétation de l'analyse physique, 87. — Interprétation de l'analyse chimique, 90. — Va-

riations du taux des éléments de fertilité, 91. — Conclusion : réserves à apporter dans les interprétations, 95.

CHAPITRE XI

PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES DU SOL..... 97

Généralités sur les êtres vivants qui habitent le sol, 97. — Microbes aérobies et anaérobies, 99. — Distribution des microbes dans le sol, 102. — Oxydations produites simultanément par voie chimique et par voie microbienne, 105. — Ordre à suivre dans l'étude des phénomènes biologiques du sol, 108. — Phénomènes de combustion et de doublement qui portent sur le carbone et l'hydrogène, 109. — Oxydation des matières ternaires et alimentation des microorganismes, 109. — Produits de transformation des matières ternaires, 111. — Destruction de la cellulose, 112. — Phénomènes d'hydrolyse de la matière azotée complexe, production d'ammoniaque, 115. — La production de l'ammoniaque dans le sol est un phénomène général, 115. — Ferments du sol qui agissent sur l'azote complexe, 116. — Fermentation ammoniacale du fumier de ferme, 120. — Transformation de l'azote aminé, 122. — Phénomènes de fixation de l'azote gazeux, 124. — Cycle de l'azote, 124. — Réactions biologiques qui font entrer l'azote gazeux en combinaison, 125. — Recherches de Berthelot, 126. — Microbes fixateurs d'azote libre, 128. — Expériences de Winogradsky. Fixation de l'azote par microbes anaérobies, 129. — Fixation de l'azote gazeux pendant l'humification, 131. — Microorganismes anaérobies divers qui fixent l'azote, 132. — Microorganismes aérobies qui fixent l'azote, 133. — Applications pratiques, 137. — Mucédinées qui fixent l'azote, 139. — Phénomènes d'oxydation transformant l'ammoniaque en acide nitreux et nitrique. Nitrification, 141. — Causes de la nitrifi-

cation; historique, 142. — Travaux de Boussingault, 144. — Conditions de la nitrification, 146. — La nitrification est corrélatrice de la présence d'un être vivant. Travaux de Sehlösing et Müntz, 149. — Premiers essais d'isolement du microbe nitrificateur, 150. — Particularités du phénomène nitrificateur, 151. — Irrégularités constatées dans les premiers essais de culture, 152. — Travaux de Winogradsky, 153. — Pouvoir nitrificateur, 155. — Formation exclusive d'acide nitreux, 156. — Ferment nitrique, 157. — Nitrification dans les terres arables, 158. — Énergie comparée des ferments nitreux et nitrique, 159. — Interprétation exacte du phénomène nitrificateur, 160. — Cycle complet de l'oxydation de l'azote, 163. — Nutrition carbonée des microbes nitrificateurs, 164. — Expériences de Godiewsky, 166. — Quelques données nouvelles sur les ferments nitrificateurs, 167. — Influence d'une matière organique sur la nitrification, 168. — Influence de l'humus sur la nitrification, 170. — Influence de la présence des nitrites et des nitrates sur le développement des microbes de la nitrification, 172. — Nitrification dans les milieux naturels. Applications, 173. — 1° Rôle de l'eau, 173. — 2° Influence sur la nitrification, de la nature de l'azote organique, 177. — Influence de certains sels sur la nitrification, 17. — Nitrification intensive, 180. — Nitrification comparée dans le sol et dans les lits bactériens, 182. — Nitrification dans les milieux acides, 183. — Résumé de l'étude de la nitrification, 185. — Phénomènes de réduction des nitrates, 187. — Causes de la destruction de l'azote combiné,

187. — Nature des gaz dégagés dans la putréfaction des matières organiques azotées en l'absence de nitrates ou de nitrites, 188. — Réduction des nitrates, 190. — Importance pratique des phénomènes de dénitrification, 192. — Conditions diverses dans lesquelles on constate la disparition des nitrates, 193. — Nouvelles tentatives d'isolement de microorganismes réducteurs, 194. — Ferments dénitrifiants vrais. Ferments dénitrifiants indirects, 197. — Quelques faits nouveaux relatifs à

la dénitrification, 201. — La dénitrification, dans le sol, 207. — Humidité des terres et dénitrification, 207. — Eaux d'égout et dénitrification, 208. — Auxilimones, 209. — Poisons du sol, 214. — Fatigue du sol en général, 216. — Substances toxiques isolées du sol, 220. — Toxines provenant des plantes elles-mêmes, 221. — Fatigue du sol en relation avec la présence des protozoaires, 223. — Mode de désinfection du sol, 225. — Toxicité du sol et assolements, 231.

CHAPITRE XII

APPLICATIONS DE L'ÉTUDE DE LA CONSTITUTION CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE DES SOLS. EAUX DE DRAINAGE..... 233

Importance de l'étude des eaux de drainage, 233. — Principales questions que soulève l'examen des eaux de drainage : α Eaux pluviales, eaux de drainage, 234. — β Substances solubles dans les eaux de drainage. Drainage et nitrification, 236. — γ Conséquences de l'entraînement des nitrates, 237. — Évaluation des pertes par drainage. Cas de végétation, 238. — Quantité d'eau de pluie qui tombent sur une surface déterminée, 240. — Apport total, 240. — Évaporation de

l'eau, 241. — Expériences de Lawes et Gilbert, 243. — Expériences de Dehérain, 245. — Richesse des eaux de drainage en éléments fertilisants, 246. — Cas des terres non cultivées n'ayant pas reçu d'engrais, 246. — Cas des terres non cultivées ou de terres ayant reçu des engrais, 250. — Pertes d'azote nitrique dans les conditions naturelles, 253. — Cultures dérobées, 255. — Utilisation des cultures dérobées, 256.

CHAPITRE XIII

ÉTUDE DES SOLS EN PLACE ; CLASSIFICATION DES SOLS..... 260

Facteurs généraux de la végétation, 261. — Caractères des sols au point de vue agricole, 263. — L'eau et sa répartition, 264. — Qualités physiques d'une terre arable, 263. — Premiers essais de classification, 266. — Terres fortes, terres légères, 266. — Sous-sol, 265. — Rapports du sol avec le sous-sol, 268. — Flore spontanée, 269. — Classification des terres d'après leurs propriétés physiques, 270. — α . Sols pierreaux, 270. — β Sols sableux, 270. — γ Sols limoneux, 270. — δ . Sols argileux, 271. — ϵ Sols calcaires, 271. — ζ . Sols luniques,

271. — Classification de de Gasparin, 272. — Subdivision des terres calcaires, α . Terres limoneuses, 272. — β . Terres argilo-calcaires, 273. — γ . Terres crayeuses, 273. — Subdivision des terres non calcaires, α . Terres siliceuses, 273. — β . Terres glaiseuses, 274. — γ . Terres argileuses, 274. — δ . Terres à base organique, 274. — Classification chimique, 276. — Classification géologique, 277. — Sols primitifs, 277. — Terrains d'alluvion, 278. — Importance de la géologie appliquée à l'agriculture, 278. — Conclusions, 281.



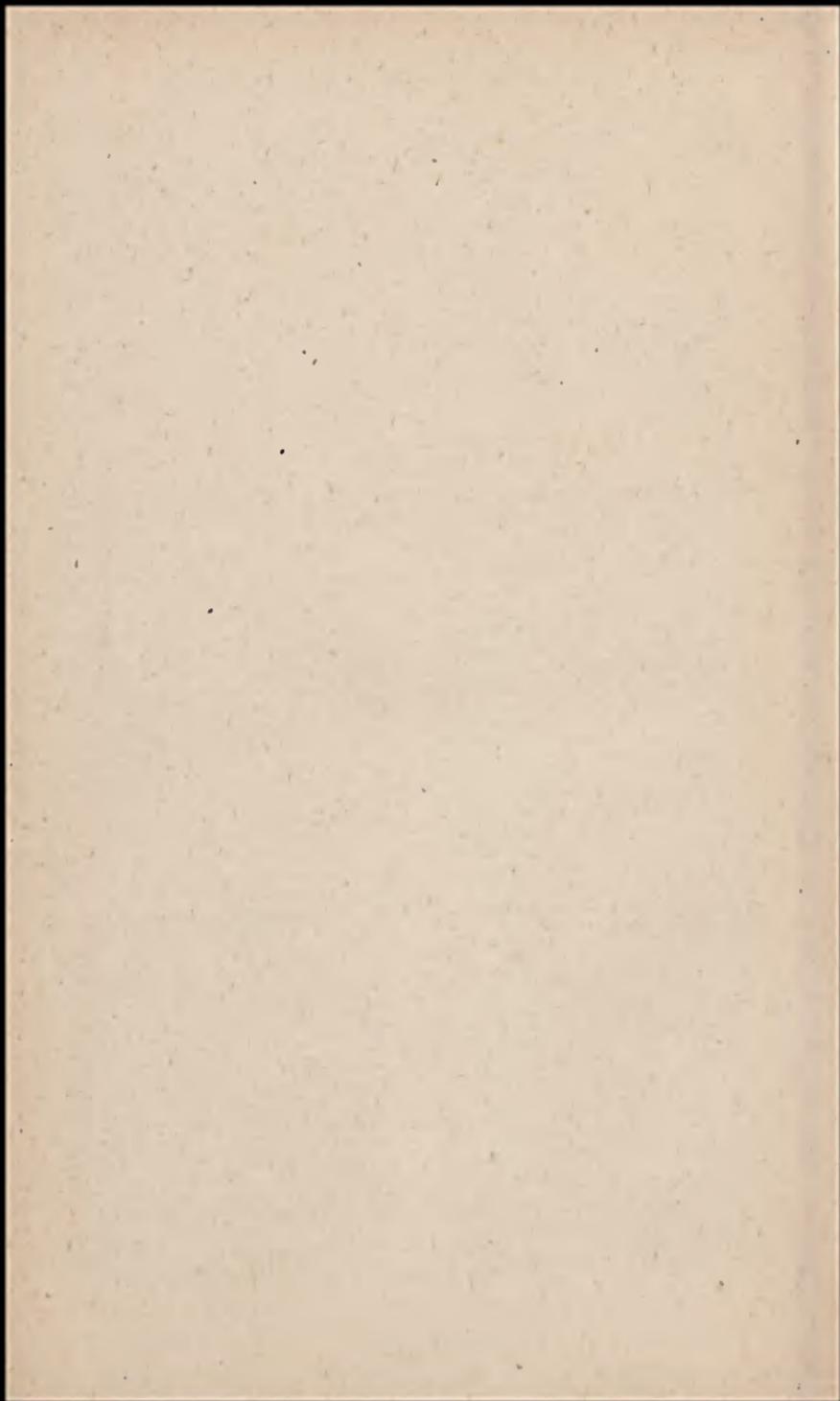


TABLE ALPHABÉTIQUE

DES DEUX VOLUMES

A			
Absorbant (Pouvoir)	II.5	Arènes	I.48
Absorption (Combinaisons d')	I.151, 283, II.28	Argiles	I.34, 40, 48, 113, 220
— (Phénomènes d')	I.151, II.22, 28	Argile colloïdale.....	I.114, 118
<i>Actinomyces odorifer</i>	I.183	— (Constitution de l')	I.112
Actinote	I.39	Arginine.....	II.221
Action de masse (Lol d') ..	II.31	Argon	I.88
Adhérence de la terre ...	I.183	Ascension capillaire de l'eau dans le sol	I.134
Adhérence (Phénomènes d')	I.152	<i>Aspergillus</i>	II.118, 139, 151
Adsorption ...	I.129, 153, II.135	Atmosphères confinées des sols.....	I.318
<i>Aerobacter aerogenes</i>	II.134	Augite.....	I.39
Aérophies (Microbes)	I.233, II.99	Auximones.....	II.209
Affinité capillaire.....	II.35	Azote.....	I.89
— de l'eau pour certains éléments du sol.....	I.147	Azote ammoniacal (Dosage de l').....	II.67
Agrostérine	II.221	Azote nitrique (Dosage de l').....	II.66
Albite.....	I.38, 67	Azote nitrique (Pertes par drainage).....	II.237 253
Alluvions	I.44, II.278	Azote organique (Dosage de l').....	II.62
Alumino-silicique (Acide)	I.62, 76, 82, II.38	Azote (Fixation de l' — gazeux sur la terre) ...	II.124
Ammoniaque (Absorption et émission par la terre arable de l')	I.315	Azote (Variations du taux de l')	II.91
Ammoniaque atmosphérique	I.94	Azotés (Apport total des composés — sur le sol)	I.103
Ammoniaque des eaux météoriques	I.101	<i>Azotobacter agilis</i> ...	II.133, 137
Amphiboles	I.39	— <i>Beijerinckii</i>	II.137
Anaérobies (Microbes)	I.233, II.99	— <i>chroococcum</i> ..	II.137, 213
Analyse chimique des sols	II.42	— <i>vitreum</i>	II.137
— mécanique des sols	I.215		
— minéralogique des sols	I.29, 227	B	
— physique des sols	I.205	<i>Bacillus aerogenes</i>	II.202
Andalousite	I.40	— <i>amylobacter</i> ..	II.111, 133, 192
Andésine	I.38	— <i>aquatilis</i>	II.194
Andésites	I.33, 37	— <i>butyricus</i>	II.111
Anhydrite	I.46	— <i>danicus</i>	II.137
Anorthite	I.38, 83	— <i>fluorescens</i>	II.118
Apatite.....	I.36, 40, 72	— <i>liquefaciens</i>	II.113
Aptitude des terres à la dessiccation.....	I.172	<i>Bacillus manganicus</i>	II.163
		— <i>mesentericus vulgatus</i> ..	II.118
		— <i>methanicus</i>	II.113
		— <i>mycoïdes</i> ..	II.111, 117, 118
		— <i>prodigiosus</i>	II.202



<i>Bacillus pyocyaneus</i>	II.198
— <i>racemosus</i>	II.163, 194
— <i>radicicola</i>	II.139
— <i>radiobacter</i>	II.134
— <i>subtilis</i>	II.118
— <i>typhosus</i>	II.198
— <i>vermicularis</i>	II.194
— <i>violaceus</i>	II.194
Bactéries.....	II.111
<i>Bacterium coli</i> commune,	
II.118, 195, 198	
— <i>denitrificans</i> ..	II.191, 195
— <i>termo</i>	II.111
— <i>typhi murium</i>	II.202
— <i>vulgare</i>	II.111
Basaltes.....	I.33, 37, 59
Bauxite.....	I.53
Biotite.....	I.31, 38, 67

C

Cailloux.....	I.129
Calcaire.....	I.109
— actif.....	II.77
Calcaires argileux.....	I.35
Calcaire (Constitution du)	I.119
— grossier.....	I.35
Calcaires hydrauliques...	I.35
— magnésiens.....	I.36
— siliceux.....	I.35
— terreux.....	I.35
— (Variations du taux du)	II.91
Calorie.....	I.189
Capacité d'imbibition (Mesure de la).....	I.163
Capacité du sol pour l'eau	I.136
— vis-à-vis des fluides.....	I.129
— maximum du sol pour l'eau.....	I.137
— minimum du sol pour l'eau.....	I.137
Capillaire (Affinité).....	II.35
— (Ascension).....	I.134
Capillaires (Phénomènes)	I.131
Carbone total (Dosage du)	II.58
Carbonique (gaz).....	I.89, 91
— (Teneur de l'atmosphère en gaz)...	I.92
Cases (de végétation)....	II.238
Cellulose (Destruction de la).....	II.112
Chabasié.....	II.24
Chaleur solaire.....	I.184
— spécifique.....	I.188
Champs d'expérience (Installation des).....	II.96
Chaux (Dissolution dans le sol de la).....	I.258
— (Dosage de la)....	II.75
— (Formes dans le sol de la).....	I.74, 279

Chimique (Classification des terres).....	II.276
Chlorhydrique (acide) (Formes dans le sol de l').....	I.73
Chlorites.....	I.39
Chlorures (Dissolution dans le sol des).....	I.253
<i>Cladosporium herbarum</i> ...	I.139
Clinocllore.....	I.39
<i>Clostridium aerobicum</i>	II.133
— <i>americanum</i>	II.132
— <i>pastorianum</i>	II.131
Coagulation.....	I.150
Cohésion de la terre.....	I.183
Colloidal (Etat).....	I.55
Colloïdales (Substances)....	I.112
Colloïdes du sol.....	I.149, 154
— humiques.....	II.30
— (Propriétés des—du sol).....	I.154
Conductibilité du sol....	I.190
Continue (terre).....	II.265
Couleur du sol.....	I.188

D

Deltas.....	I.44
Dénitrifiants (Ferments— vrais et indirects)....	II.197
Dénitrification dans le sol	II.203
Déplacement (Procédés par).....	I.223
Dérobées (Cultures).....	II.275
Désinfection (Modes de du sol).....	II.255
Dessiccation absolue d'une substance.....	I.171
Dessiccation de la terre....	II.55
Diallage.....	I.39
Dialyse de la terre arable	I.264
Dimensions des éléments du sol.....	I.124, 207
Diopside.....	I.39
Diorite.....	I.32, 37, 68
Dioxytéarique (Acide)....	II.220
Dissolutions du sol.....	I.235
Disthène.....	I.40
Dolomitiques (Roches)...	I.36
Drainage (Eaux de).....	II.233
— (Richesse des eaux de — en principes fertilisants)....	I.226

E

Eau (Détermination de l').....	II.54
— (Mouvement de l'— dans le sol).....	I.132
Eaux d'égout.....	II.208
— météoriques (teneur en azote combiné des).....	I.100
Echantillons de terre (Prise	

des).....	I.208, II.87	Hygroscopicité de la terre	
Echauffement du sol....	I.191	végétale.....	I.168
Ecobuage.....	II.225	Myphomycètes.....	II.111
Éléments minéraux (Dé-		Hypoxanthine.....	II.221
termination des).....	II.69		
Epidote.....	I.39	I	
Epigénie.....	I.78		
Erémacausis.....	I.289	Imbibition de la terre par	
		l'eau.....	I.160
F		Immobilé (Terre).....	II.265
Fatigue du sol.....	II.216	Indol.....	II.116
Feldspaths.....	I.31, 38, 67	Infiltration de l'eau.....	I.136
(Dégradation des).....	I.50	Interprétation des analyses	II.84
Fer oligiste.....	I.31	Ions.....	I.264
Floculation.....	I.150		
Flore spontanée.....	II.269	J	
Fortes (terres).....	II.266		
Furfuroides (Substances).....	II.136	Jaohère.....	I.203
<i>Fusarium Muntzii</i>	II.118		
		K	
G			
Gaz carbonique (Teneur de		Kaolin.....	I.34, 40
l'air en).....	I.91	Kaolinisation.....	I.48
Gel.....	I.150	Kjeldahl (Méthode de) ..	II.64
Gelée (Action de la).....	I.41	Kopeccky (Appareil de)....	I.225
Géologique (Classification		Krypton.....	I.89
— des terres).....	II.277	Kühn (Méthode de).....	I.220
Gîtes minéraux.....	I.28		
Glaciers (Action des).....	I.41	L	
Gneiss.....	I.33, 37, 68		
Granite.....	I.31, 37, 67	Labradorite.....	I.38, 83
Granulite.....	I.32	Lacunes du sol.....	I.124
<i>Granulobacter</i>	II.134	Latérite.....	I.53
<i>Grauwaches</i>	I.34, 59	Laves.....	I.33, 37
Gravier.....	I.129	Légères (Terres).....	II.266
Grès.....	I.34	Lépidolite.....	I.38
— bigarré.....	I.59	Leucine.....	II.116
Gypse.....	I.36	Levures.....	II.111
		Lignocérique (Acide) ..	II.220
		Limonite.....	I.46
II		M	
Hall (Méthode de).....	I.219	Magnésie (Dissolution dans	
Hélium.....	I.89	le sol de la).....	I.258
<i>Heterodera Schachtii</i>	II.226	Magnésie (Dosage de la) ..	II.78
Histidine.....	II.221	Magnésie (Formes dans le	
<i>Hormodendron cladospo-</i>		sol de la).....	I.75
roides).....	II.139	Marnes.....	I.69
Hornblende.....	I.32, 39, 68	Métamorphisme.....	I.27
Humine.....	I.297	Micas.....	I.31, 38, 68
Humique (Acide).....	I.120, 283, 297	Micaschistes.....	II.33, 37, 68
— (Matière).....	I.282	Micelles.....	I.150
Humophosphates.....	I.306	Microbes.....	I.64, II.97
Humus....	I.84, 110, 120, 291	— (Alimentation des)	II.109
— (Dissolution de l').....	II.56	Microbes (Distribution	
— (Constitution chi-		dans le sol des).....	II.102
mique du noyau		<i>Micrococcus ureæ</i> ..	II.111, 120
azoté de l').....	I.308	<i>Microsporium commune</i> ..	II.139
— (Influence de l'sur		Moraine frontale.....	I.41
la nitrification) ..	II.170	<i>Mucor mucedo</i>	II.151
Hydrargillite.....	I.53	— <i>racemosus</i>	II.118, 151
Hydrogels.....	II.27	— <i>stolonifer</i>	II.139

Muscovite.....	I.38, 67	Picolinecarbonique (Acide)	II.220
<i>Mycoderma aceti</i>	II.151	Plasticité de l'argile.....	I.109
— rini.....	II.151	Pneumatolyse.....	I.58
Mycorblzes.....	I.303	Poids spécifique de la terre arable.....	I.159
N			
Nitrates (Réduction des).....	II.187	Poisons du sol.....	II.214
Nitrification.....	II.141	Pores.....	I.166
— (Conditions de la).....	II.146	Porphyre.....	I.32, 37
Nitrification intensive... ..	II.180	Potasse (Dissolution dans le sol de la).....	I.254
Nitrique (Acide — dans l'air)	I.97	Potasse (Dosage de la)...	II.79
— (Acide — dans les eaux météoriques.....)	I.100	Potasse (Formes dans le sol de la).....	I.73
Nitrique (Ferment).....	II.157	Potasse (Variations du taux de la).....	II.94
<i>Nitrobacter</i>	II.157	Prélèvement d'un échan- tillon de terre.....	I.208
<i>Nitrosococcus</i>	II.157, 158	<i>Proteus vulgaris</i>	II.118
<i>Nitrosomonas</i> ..	II.155, 157, 158	Pseudo-solutions.....	I.113, 150
Nobel (Procédé de).....	I.224	Pyroxènes.....	I.39
Noire (Matière).....	I.282	P	
O			
Obsidienne.....	I.33	Quartz.....	I.31
Oden Swen (Méthode de).....	I.221	— hyalin.....	I.38
Odeur de la terre.....	I.317	Quartzites.....	I.34
Oligoclase.....	I.38, 67, 83	R	
Opale.....	I.46	Réactifs rationnels.....	II.44
Organique (Constatation de la présence de la matière)	I.110	Réaction du sol.....	II.46
Organique (Constitution de la matière).....	I.120, 281	Retrait de la terre.....	I.184
Orthose.....	I.38, 62	Rétrogradation (des phos- phates).....	I.202
Oxyde de fer (Formes dans le sol de l').....	I.75	Roches acides.....	I.27
Oxyde de manganèse (For- mes dans le sol de l') ..	I.75	— argilleuses.....	I.34
Oxygène.....	I.89	— basiques.....	I.27
Oxystéarique (Acide) ...	II.220	— calcaires.....	I.35, 68
Ozone.....	I.98	— (Classification des— au point de vue chimique)	I.27
P			
<i>Penicillium glaucum</i>	II.151	Roches (Constitution des).....	I.26
Pennine.....	I.39	— cristallines.....	I.23
Péridot.....	I.39	— cristallophylliennes,	I.23, 68
Perméabilité du sol.....	I.140	Roches dolomitiques....	I.36
Perméabilité du sol vis à vis des gaz de l'air....	II.78	— (en général).....	I.22
Permutite.....	II.12	— éruptives.....	I.23
Phosphatides.....	I.306	— massives.....	I.23
Phosphore (Formes dans le sol du).....	I.268	— pourries.....	I.65
Phosphorique (Dissolution dans le sol de l'acide)	I.242, 250	— sédimentaires.....	I.23
Phosphorique (Dosage de l'acide).....	II.72	— stratifiées.....	I.23
Phosphorique (Formes dans le sol de l'acide) ..	I.71, 268	— (Structure des).....	I.28
Phosphorique (Variations du taux de l'acide)....	II.93	Roches volcaniques ..	I.68
		Rubéfaction.....	I.49
S			
Sable.....	I.106		
— (Constitution du).....	I.111		
— grossier.....	I.213, II.88		
— fin.....	I.213, II.88		
Sableux (Dénomination des éléments).....	I.221		

Scatol	II.116	T	
Schlösing (Méthode d'analyse par sédimentation de)	I.217	Talc.....	I.40
Schlösing (Procédé d'analyse physique de)	I.212	Température du sol....	I.185
Schone (Appareil de)	I.224	Tension superficielle....	I.131
Sédimentation (Procédés par)	I.217	Terre arable.....	I.13
Serpentine	I.70	— végétale (Formation de la).....	I.84
Silicates (Structure chimique des)	I.61	Terres à bases organiques	II.274
Silice (Dissolution dans le sol de la)	I.253	— argileuses	II.274
Silice (Formes dans le sol de la)	I.70	— argilo-calcaires....	II.273
Sol (Colloïde)	I.150	— complètes.....	II.281
— (Aspect général du) ..	I.11	— crayeuses	II.273
— (Définition du).....	I.11	— de bruyère.....	II.275
Sols acides	I.74, 120	— franches..	II.88, 270, 272
— argileux	II.271	— glaiseuses	II.274
— calcaires	II.271	— incomplètes	II.281
— (Caractères des — au point de vue agricole)	II.263	— limoneuses	II.272
Sols (Classification des) ..	II.261	— siliceuses.....	II.273
— (Constitution physique des)	I.105	Torrents (Action des)....	I.43
— de transport..	I.24, II.278	Torula.....	II.111
— formés sur place	I.24, II.277	Tourbe	I.293
— humiques	II.271	Toxiques (Substances — isolées du sol).....	II.220
— limoneux	II.270	Trachytes.....	I.32, 37
— pierreux	II.270	Travail des terres.....	I.197
— sableux	II.270	Travertins	I.35
Solutions étendues (Constitution des)	I.264	Trémolite	I.39
Soude (Dissolution dans le sol de la)	I.258	Tufs calcaires.....	I.35
Soude (Forme dans le sol de la)	I.73	Tyrosine	II.116
Soufre (Formes dans le sol du).....	I.272	U	
Sédimentation (Procédés par)	I.217	Ulmine	I.297
Sous-sol	I.15, 208, II.267	Ulmique (Acide).....	I.297
<i>Streptothrix odorifera</i>	I.318	<i>Urobacillus</i>	II.120
Sulfurique (Dissolution dans le sol de l'acide) ..	I.253	<i>Urococcus</i>	II.120
Sulfurique (Dosage de l'acide).....	II.74	V	
Sulfurique (Formes dans le sol de l'acide).....	I.72, 272	Vers de terre.....	I.65, 286
Surface des éléments du sol	I.128	Vitamines	II.211
Syénite	I.32, 57, 68	W	
		Wolf (Méthode de).....	I.220
		X	
		Xanthine	II.221
		Xénon	I.89
		Z	
		Zéolithos.....	I.46, II.22



E. KAYSER

Maître de conférences de microbiologie à l'Institut national agronomique

**MICROBIOLOGIE APPLIQUÉE
A LA TRANSFORMATION
des Produits Agricoles**

1921, 1 volume in-16, de 390 pages, avec 49 figures. . . 10 fr.

E. KAYSER

Maître de conférences de microbiologie à l'Institut national agronomique

**MICROBIOLOGIE APPLIQUÉE
A LA FERTILISATION DU SOL**

1921, 1 volume in-16, de 326 pages, avec 49 figures. . . 10 fr.

Em. MIÈGE

**La Pratique des Engrais
ET LA FERTILISATION DU SOL**

1920, 1 volume in-16, de 124 pages, avec figures. . . 4 fr.

Ajouter 10 pour 100 pour recevoir franco.



Librairie J.-B. BAILLIÈRE et FILS, 19, rue Hautefeuille, à PARIS

ENGRAIS

I

LES MATIÈRES FERTILISANTES

Par C.-V. GAROLA.

Directeur de la Station agronomique de Chartres.

5^e édition entièrement refondue

1921, 1 volume in-16, de 348 pages, avec 47 figures... 10 fr.

Librairie J.-B. BAILLIÈRE et FILS, 19, rue Hautefeuille, à PARIS

ENGRAIS

II

LA PRATIQUE DE LA FUMURE

Par C.-V. GAROLA

Directeur de la Station agronomique de Chartres.

5^e édition entièrement refondue

1921, 1 volume in-16, de 350 pages, avec 40 figures... 10 fr.

Ajouter 10 pour 100 pour recevoir franco.



GÉOLOGIE AGRICOLE

Par Ernest CORD

Professeur spécial d'Agriculture.

*Attaché au service des études techniques
du Ministère de l'Agriculture.*

1920, 1 volume in-18, de 450 pages, avec 316 figures. 10 fr.

ANALYSES AGRICOLES

Terres, Engrais, Fourrages
Produits des industries agricoles

Par R. GUILLIN

Directeur du laboratoire de la Société des Agriculteurs de France.

2^e édition, 1919, 1 volume in-18, de 450 pages, avec 50 figures. 10 francs

LES ENGRAIS EN HORTICULTURE

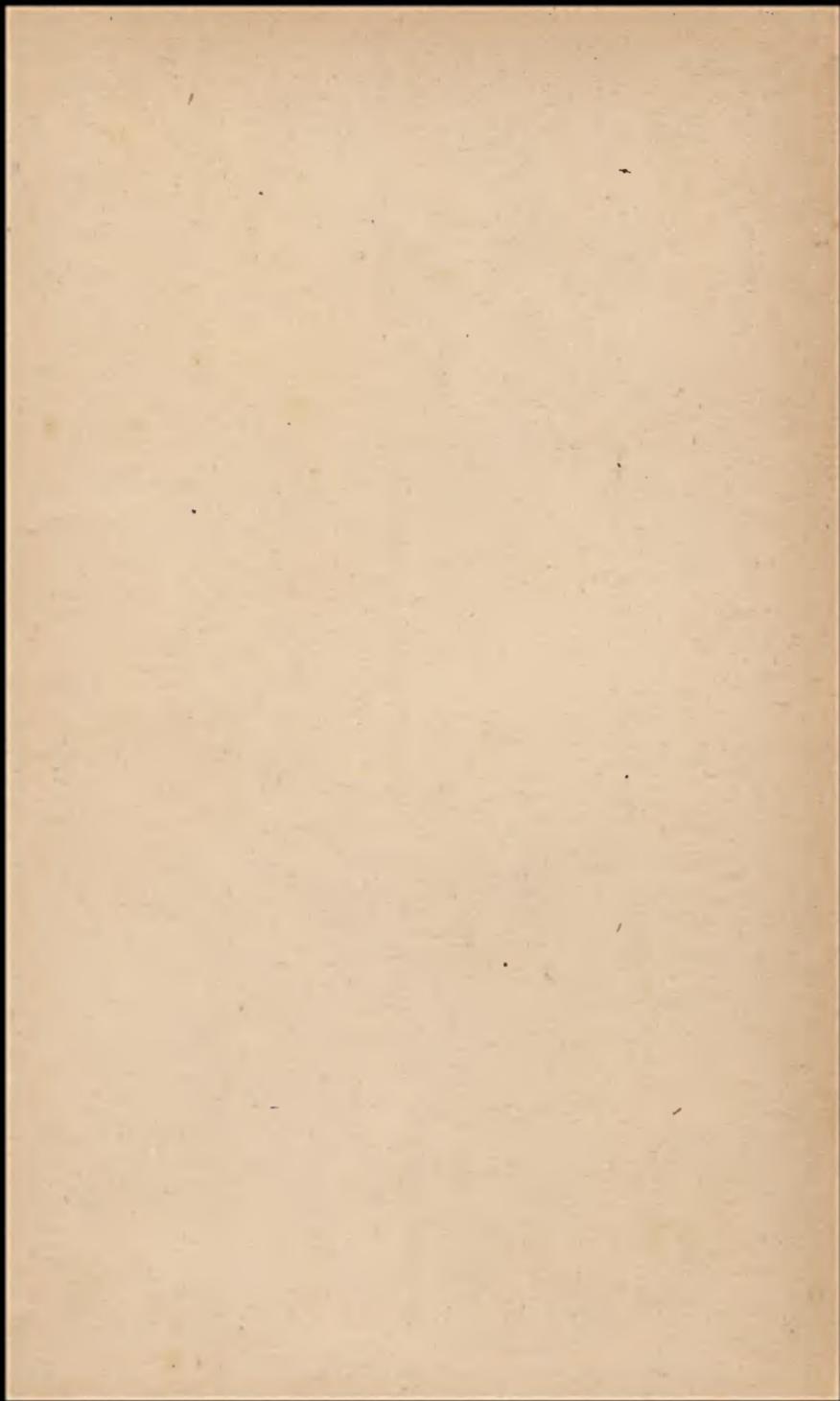
Par A. PETIT

Professeur à l'École nationale d'Horticulture de Versailles.

1921, 1 volume in-16 de 274 pages, 7 fr. 50

Ajouter 10 pour 100 pour recevoir franco.





2008

11/12





