

**E. CHANCRIN**

Inspecteur général honoraire  
de l'Agriculture.

**LE PROBLÈME**  
DE  
**LA FERTILITÉ**  
**DES SOLS**

**LIBRAIRIE HACHETTE**  
79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS



**E. CHANCRIN**

Inspecteur général honoraire  
de l'Agriculture

**LE PROBLÈME  
LA FERTILITÉ  
DES SOLS**

**ÉVOLUTION DANS  
L'EMPLOI DES ENGRAIS**



**LE SOUFRE**

**LIBRAIRIE HACHETTE**  
79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

## DU MÊME AUTEUR

**Chimie générale appliquée à l'Agriculture.** Un volume in-16 de 260 pages, 10<sup>e</sup> édition revue, avec 165 figures ..... 10....»

**Chimie agricole.** Un volume in-16 de 264 pages, 17<sup>e</sup> édition revue, avec 45 figures ..... 10....»

**Viticulture moderne.** Un volume in-16 de 334 pages, 9<sup>e</sup> édition revue, avec 208 figures ..... **12.. »**

**Le Vin** (Procédés modernes de préparation, d'amélioration et de conservation). Un volume de 248 pages, 8<sup>e</sup> édition revue, avec 113 figures **10 »**  
(*Encyclopédie des Connaissances agricoles.*)

**Action fertilisante du Soufre.** Brochure in-16 de 38 pages, parue en 1913 .....*Édition épuisée.*

LIBRAIRIE HACHETTE, 79, Boulevard Saint-Germain, PARIS

## AVANT-PROPOS

**E**N 1908, alors que j'étais directeur de l'École de Viticulture de Beaune, j'eus l'occasion de lire un vieil ouvrage paru en 1858 : le Manuel pour le Soufrage des Vignes malades, par HENRI MARÈS, dans lequel l'auteur consacrait tout un chapitre à l'action du soufre sur la végétation indépendamment de son action contre l'oïdium. Cette lecture m'incita à faire des essais pour examiner cette action.

Les essais commencèrent en 1909. En 1910, des expériences en grande culture eurent lieu à Beaune. M. Desriot accepta de faire à l'École de Genne-tines (Allier) des essais identiques de façon à nous contrôler mutuellement. Le compte rendu de ces expériences parut dans le Journal d'Agriculture pratique, du 6 avril 1911. De nouvelles expériences eurent lieu en 1911 à l'École de Beaune et à l'École de Genne-tines et leur compte rendu fut publié dans le même journal le 21 mars 1912. M. Roussel commenta nos expériences dans la Revue générale des Sciences pures et appliquées.

Pour retenir l'attention des agriculteurs, je crus devoir réunir les comptes rendus de toutes ces expériences dans une brochure intitulée : Action fertilisante du Soufre, parue en 1913 à la librairie Hachette.

Depuis cette époque de nombreuses recherches ont été faites par les savants. Des idées nouvelles ont surgi sur la fertilisation des sols, sur l'action des infiniment petits chimiques », des engrais catalytiques. Aussi ai-je pensé qu'il était peut-être bon de résumer dans une nouvelle brochure quelques-unes de ces idées, notamment en ce qui concerne le Soufre.

Puisse cette modeste publication intéresser les agriculteurs.

E. CHANCRIN,

Inspecteur général honoraire de l'Agriculture.



# LE PROBLÈME DE LA FERTILITÉ DES SOLS

---

---

## ÉVOLUTION DANS L'EMPLOI DES ENGRAIS

### I. — **Le problème de la fertilité du sol n'est pas résolu. Nécessité d'un 'équilibre' entre le végétal et le sol 'au point de vue des éléments nécessaires: à la plante.**

Dans l'une des éditions de notre ouvrage *Chimie agricole* (la douzième, il y a quinze ans), au chapitre *Méthodes nouvelles de fertilisation des sols, évolution dans l'emploi des engrais*, nous faisons remarquer que *l'apport des engrais chimiques ou engrais complémentaires n'avait pas résolu entièrement le problème de la fertilité des sols.*

« A tout homme qui réfléchit, disait A.-Ch. Girard, il apparaît que nous sommes actuellement enlisés et que nous piétons sur place; **la fertilisation du sol ne se limite certainement pas à nos notions simplistes sur l'azote, l'acide phosphorique, la potasse, la chaux.** »

C'est qu'en réfléchissant, on s'apercevait que le problème de la fertilité des sols était plus complexe qu'on ne le pensait.

En effet, *dans la nature*, abstraction faite des besoins de l'homme, *il existe un état d'équilibre entre le sol et la plante, entre la plante et l'animal.*

Les plantes poussent en prenant au sol et à l'air les éléments qui leur sont nécessaires pour vivre. Leur multiplication et leur développement sont évidemment fonctions de la richesse du sol qui les porte et de l'influence du milieu.

Les végétaux se nourrissent exclusivement de matières minérales prises dans le sol ou dans l'air et fabriquent de la matière organique.

Les animaux, ne pouvant fabriquer leurs aliments au moyen de substances minérales, empruntent ces aliments tout formés aux végétaux. La matière organique provenant des végétaux ou des animaux ayant vécu se désagrège, se décompose sous l'action des microbes et ses éléments font retour au monde minéral.

Nous assistons simplement à des transformations de la matière qui, tour à tour, circule dans le monde minéral, le monde végétal, le monde animal pour revenir enfin au point de départ, à subir encore de nouvelles et infinies transformations.

*Dans ce cycle, l'homme a rompu l'état d'équilibre entre le végétal et le-sol : en effet, à l'état sauvage, les plantes naissent, vivent, meurent en grande partie sur place et les matières minérales reviennent au sol qui les a fournies tandis que l'homme au contraire s'est évertué à multiplier, outre mesure, les plantes qui lui sont utiles, à les exporter au-dehors sans trop se soucier de rendre les matières minérales au sol, comme si ce dernier était une mine inépuisable.*

Sans doute, les agronomes se sont bien aperçus de ce déséquilibre, mais ils ont cru qu'il suffisait de rendre au sol les éléments fertilisants les plus utiles, leur utilité résultant de ce que les plantes en absorbent beaucoup et qu'ils sont en quantités moindres dans le sol.

*C'est ainsi qu'ils ont admis que les quatre principaux éléments de fertilité du sol étaient l'azote, l'acide phosphorique, la potasse et la chaux, et qu'ils ont préconisé seulement l'emploi dès engrais azotés, phosphatés, potassiques et d'amendements calcaires. Il était entendu que tous les autres éléments dont les plantes ont besoin pour vivre se trouvaient en quantités suffisantes dans, le sol et qu'il était inutile de s'en préoccuper.'*

Cependant, il y a plus de trente ans, *Berthelot et André montraient que les tissus végétaux contiennent du soufre en assez grande quantité* (presque autant que de phosphore) et qu'il y avait lieu de considérer ce corps comme un véritable aliment des plantes.

D'autre part, bien antérieurement, *Raulin* avait mis en évidence, en cultivant *l'Aspergillus niger* (moisissure du pain) en solutions de composition connue, que la suppression de très faibles doses de zinc, de fer réduisait la récolte *d'Aspergillus* dans des proportions énormes (2/3 pour le fer, 9/10 pour le zinc). Et à propos de ces expériences *Duclaux*, de l'Institut Pasteur, avait émis cette idée hardie que ce qui se produit pour *l'Aspergillus niger*, sorte de végétal en miniature, pourrait bien se produire aussi pour les plantes de grande culture : des quantités très minimales des corps trouvés dans les cendres des plantes et mis dans le sol pouvaient peut-être augmenter les rendements culturaux.

Plus tard, en effet, *bon nombre de savants constatèrent qu'à côté des éléments essentiels tels que l'azote, l'acide phosphorique, la potasse, la chaux, il y a encore toute une série d'éléments, métaux et métalloïdes, très utiles aux plantes dont quelques-uns ont été qualifiés « d'infiniment petits chimiques ou même d'engrais catalytiques* parce qu'ils semblent n'agir sur les végétaux qu'en très petites quantités ou seulement par leur présence dans le sol :

*M. Gabriel Bertrand montra, dès 1904, l'influence favorable du manganèse, sous forme de sulfate, sur les plantes; cette étude fut le point de départ de toute une série d'expériences au sujet des engrais dits manganésés.*

*A partir de 1908 Boullanger, de l'Institut Pasteur de Lille, étudia, en plus du manganèse, l'action d'autres substances telles que le sulfate d'alumine, le silicate de soude, le sulfate de fer, le soufre en fleur et obtint des résultats intéressants (voir p. 23).*

*Vælder* s'occupait de l'action du *lithium*, du *plomb*; il montra qu'à doses



faibles ces éléments exercent des actions influençant le développement végétatif, la formation des racines et la nature des graines produites.

*Spinks* montra également que les sels de lithium peuvent produire l'immunité de plusieurs céréales contre les attaques de certains champignons parasites.

*Jungelson* fit connaître que des traces de cuivre peuvent produire sur le maïs des modifications des épis et des grains.

*Nous-même en 1910 et 1911, en collaboration avec M. Desriot*, nous fîmes des expériences en grande culture dans l'Allier et en Côte-d'Or concernant l'action du soufre en fleur sur la betterave et la pomme de terre (voir p. 24).

*M. Demolon*, en 1912, dans une note à l'Académie des Sciences, indiqua les résultats d'expériences concernant l'action fertilisante favorable du soufre en fleur sur cultures de rutabagas, panais, betteraves, navets (voir p. 24).

*M. Brioux*, en 1913, obtint également des résultats favorables en utilisant le soufre sur cultures de pommes de terre, moutarde blanche, céleri, rutabagas (voir p. 25).

Sans parler *des essais effectués par M. Bordas* à Avignon, Vermorel et Antony à Villefranche, Petit à l'École nationale d'Horticulture de Versailles, etc., concernant l'action du soufre sur le rendement cultural des plantes.

Bref, nous avons assisté à une éclosion d'expériences concernant l'action de bon nombre de corps sur le rendement des plantes de grande culture.

*Certes « depuis Boussingault et Déhérain, dit M. G. Bertrand dans son discours à la séance solennelle de l'Académie d'Agriculture en 1935, la chimie et la physiologie ont fait de grands progrès : les méthodes d'analyse se sont perfectionnées, la composition du sol, les besoins alimentaires des plantes sont mieux connus. On sait aujourd'hui qu'il ne suffit pas de dix à douze éléments pour constituer les tissus d'un végétal, mais qu'il en faut plusieurs dizaines. On entrevoit que certaines espèces ou groupes d'espèces ont une composition élémentaire quantitative différente des autres, qu'il y a, par exemple, plus de soufre dans les légumineuses et les crucifères que dans les graminées. Tout un faisceau de recherches prouve, enfin, que le soufre est aussi indispensable à la formation et à la vie de la plante que le phosphore, l'azote et les nombreux éléments auxquels je viens de faire allusion. »*

Sans doute, « il n'est pas actuellement possible, disent MM. G. Bertrand et Virgil Ghitescu, de représenter d'une manière exacte la composition élémentaire quantitative de la matière végétale, et de ce fait, on se trouve arrêté dans l'étude d'un grand nombre de problèmes touchant à la physiologie végétale et à l'agriculture ».

Néanmoins, pour donner une idée de cette composition, nous citerons les résultats d'analyses obtenus par eux concernant la composition élémentaire quantitative de quatre plantes de grande culture appartenant à quatre grandes familles : le colza, la luzerne, le sarrasin, l'avoine.

Les résultats suivants sont rapportés à 100 parties de matières sèches :

	Colza.	Luzerne.	Sarrasin.	Avoine.
Carbone .....	39,9 <sup>8</sup>	45,37	3 <sup>8</sup> ,9 <sup>0</sup>	45,45
Hydrogène .....	5,02	5,54	4,65	5,4 <sup>8</sup>
Oxygène .....	47,35	41,32	43,87	40,15
Azote .....	5,06	3,3 <sup>0</sup>	3,94	3,01
Soufre .....	1,225	0,435	0,295	0,560
Phosphore .....	0,557	0,282	1,022	0,476
Calcium .....	4,074	2,3 <sup>1</sup> 0	3,150	0,732
Magnésium .....	0,425	0,329	1,221	0,333
Potassium .....	2,871	0,906	2,907	2,011
Sodium .....	0,408	0,157	0,011	0,566
Silicium .....	0,0171	0,037	0,021	1,269
Fer .....	0,0081	0,100	0,010	0,005
Manganèse .....	0,0072	0,0014	0,0014	0,0005
Zinc .....	0,0050	0,0014	0,0015	0,0025

Les expérimentateurs ont négligé dans leurs analyses, « les éléments comme le bore, l'iode, le titane, le nickel, l'aluminium, etc., etc., dont les proportions sont si petites que leur ensemble n'affecte pas le chiffre trouvé, eu égard au degré de précision du dosage des éléments combustibles ». Nous verrons que certains de ces éléments ont une importance.

Dans les cendres des végétaux on trouve en proportions très faibles, outre les corps cités par G. Bertrand, un certain nombre de corps tels que le brome, le fluor, l'iode, le cuivre, etc., qui, malgré leur rareté, peuvent jouer un rôle important dans la vie des plantes.

En 1934, MM. Brioux et Jouis dans une communication à l'Académie d'Agriculture s'expriment ainsi :

« En dehors des éléments fondamentaux qui (azote non compris) forment la majeure partie des cendres végétales et sont utilisés comme amendements ou engrais à l'état de combinaisons diverses, on trouve aussi dans les cendres, de petites doses d'autres corps tels que le manganèse, le bore, le fluor, le zinc, etc., dont le rôle n'est pas négligeable, et dont l'utilité pour le développement des plantes supérieures a pu être démontrée par divers expérimentateurs. Ces éléments dit « catalytiques » sont susceptibles d'agir à des doses parfois très minimes; on connaît à ce sujet les travaux de MM. G. Bertrand, Læw, Javillier, Mazé, A gulhon, etc.

« Mais l'utilisation pratique par addition aux engrais courants, des éléments catalytiques accessoires ne s'est pas encore répandue en agriculture, bien que, par exemple, l'emploi du carbonate ou sulfate de manganèse à des doses variant de 25 à 50 kilogrammes par hectare ait fourni parfois des résultats nettement intéressants. »

Nous avons fait remarquer que l'absence d'un infiniment petit chimique ou engrais catalytique, pouvait nuire à la cellule végétale comme l'absence d'une infime quantité de zinc empêche le développement de la cellule de niger.

M. Gabriel Bertrand n'a-t-il pas prouvé que la croissance de l'Asper-

*gillus* était heureusement influencée par la présence d'un milligramme de manganèse dans 10 000 litres de milieu de culture!

MM. Brioux et Jouis ont reconnu en 1934 que le fluor à faible dose peut être utile à la végétation comme l'avaient déjà observé Mazé en France, puis Læw et Suzuki au Japon.

L'addition de petites quantités de manganèse, de bore, de cuivre à l'engrais complet paraît avoir eu pour effet, dans leurs expériences, d'améliorer la qualité des pommes de terre, en augmentant légèrement leur teneur en fécule et en matière sèche.

MM. Joret et Malterre, dans leurs expériences de 1935, ont obtenu avec le bore, sous forme de borate de soude à la dose de 4 kilogrammes à l'hectare épandus en mélange avec les engrais sur pommes de terre, un excédent de rendement de 28 p. 100.

Comme l'ont reconnu Maquenne et G. Bertrand à propos du zinc, du titane et de l'aluminium, il y a une certaine proportionnalité dans les feuilles entre la teneur en chlorophylle et la teneur en métal : les feuilles vertes sont riches en métal, les feuilles étiolées n'en renferment presque pas. « Cette particularité, dit G. Bertrand, est favorable à l'hypothèse d'une intervention de l'aluminium dans les phénomènes nutritifs de la plante et peut-être explique-t-elle, du moins en partie, les résultats positifs obtenus depuis une vingtaine d'années par l'emploi du sulfate d'alumine comme engrais catalytique. »

C'est précisément à certains corps contenus en petites quantités dans quelques engrais très employés, qu'est due une partie de l'action de ces engrais sur le rendement des plantes cultivées. Par exemple, le nitrate de soude naturel du Chili contient, outre son azote nitrique, du bore, de l'iode, du brome, de la magnésie, de la potasse, etc. Le superphosphate de chaux apporte au sol, outre son acide phosphorique soluble à l'eau, du soufre sous forme de sulfate de chaux, du fer, de l'alumine, de la magnésie, du fluor et même des traces de manganèse, de bore, d'iode, de cuivre, de zinc (voir p. 32 et 33).

### **En résumé,**

**« Les plantes sont formées, comme tous les êtres vivants, par l'union, sous des formes diverses, d'un nombre élevé de métalloïdes et de métaux et il existe une telle dépendance physiologique entre ces éléments que l'insuffisance d'un seul doit être considéré comme une cause d'arrêt de la croissance »** (MM. G. Bertrand et Silberstein *Compte rendu l'Académie des Sciences*, 27 janvier 1936. *Note sur les teneurs comparatives en soufre et en azote des plantes cultivées sur le même sol.*)

Les quelques citations que nous avons faites au sujet de quelques-uns de ces éléments, que l'on qualifie parfois d'*éléments secondaires*, suffisent, il nous semble, pour montrer que **la fertilité des terres ne saurait être toujours maintenue par les seuls apports d'azote, d'acide phosphorique, de potasse et de chaux et qu'il faudra apporter au sol bon nombre d'autres éléments.**

## II. — « Les éléments secondaires jouent dans l'alimentation des plantes un rôle comparable aux vitamines dans l'alimentation humaine. »

(Lawrence Baker.)

Un certain nombre de maladies de dégénérescence des plantes cultivées sont probablement dues à l'absence de l'un ou de plusieurs de ces éléments catalytiques ou autres ; elles seraient des maladies de carence :

1° MM. Demolon et Mazé ont montré que, privée de soufre, la plante ne peut plus synthétiser sa chlorophylle et que la chlorose sévit dans les sols sans soufre.

2° A notre connaissance, la première maladie de carence nettement reconnue est celle du prunier de l'Agenais, grâce aux belles recherches de MM. Guittonneau, Keilling et Mlle Bejambes publiées dans les *Annales de la Science agronomique* de 1909. Il résulte de ces recherches que la crise de mortalité prématurée qui sévissait sur les pruniers de l'Agenais est due à une carence d'acide phosphorique. D'où nécessité d'apporter au sol principalement des engrais phosphatés, superphosphates, etc. Le fait important sur lequel nous croyons devoir insister à l'occasion de ces recherches est le suivant qu'ont signalé MM. Guittonneau et ses collaborateurs : « Les jeunes pruniers qui succombent sont très souvent attaqués dans un ou plusieurs de leurs organes soit par des bactéries (bactéries de la gommoze), soit par des cryptogames (champignons du pourridié, polypores). On a, dès lors, tout naturellement attribué la mort des arbres à l'action des parasites qui les avaient envahis et on crut qu'il suffirait de fermer toutes les portes à de telles invasions pour éviter la propagation des accidents. C'est ainsi qu'on a pu fonder les plus grands espoirs sur certaines mesures de protection, tout à fait recommandables d'ailleurs. »

Nous constatons que l'on confondait les effets de la maladie avec ses causes ! Que de fois peut-être fait-on, sans s'en douter, la même confusion et dit-on que telle maladie est due à telle bactérie, à tel microbe alors qu'elle est due à une carence d'un corps dans le sol ? Ne sait-on pas que tout être vivant affaibli par une alimentation insuffisante peut être la proie des microbes au milieu desquels il vit ?

3° MM. Fæx et Bur gevin (Centre national de Recherches agronomiques de Versailles), dans une note à l'Académie d'Agriculture du 21 novembre 1934, signalent que les travaux de Brandenburg à Baarn (Hollande), confirmés par ceux de Bobko et Belvoussor, ont abouti à la conclusion que la maladie du cœur de la betterave pouvait être reproduite par suppression du bore dans un milieu nutritif. Elle serait alors une maladie de carence et l'apport de

*bore au sol serait susceptible de la faire disparaître.* Des résultats positifs dans ce sens ont été obtenus en culture par certains expérimentateurs (Brandenburg, Kaufmann, Schmidt). Dans des travaux qui viennent d'être publiés, Kruger, Wimmer et Ludecke ont aussi obtenu des résultats favorables avec le *soufre*.

En France, les expériences nombreuses qu'ont effectuées et fait effectuer MM. Fœx et Burgevin (note présentée à l'Académie d'Agriculture du 30 octobre 1935) « confirment la valeur de l'acide borique ou du borate de soude comme moyen de lutte contre la maladie du cœur de la betterave ». On conseille pour un premier traitement les doses minimales de 8 à 10 kilogrammes d'acide borique ou 13 à 16 kilogrammes de borate de soude par hectare (1 g. 5 par mètre carré).

Pour M. G. Bertrand, il est peu probable que l'acide borique agisse comme antiseptique : « Je pense, dit-il, que le rôle de cette substance, dans les heureux traitements qui ont été rapportés, est de faire disparaître une déficience du sol en acide borique, de parer ainsi à une insuffisance alimentaire de la plante. »

4° M. F. C. Gerretsen, à la suite de ses essais sur l'effet d'une déficience en manganèse sur les avoines et son rapport avec les bactéries du sol, suggère qu'il résulte de l'absence de manganèse un retard dans l'assimilation chlorophyllienne et un déficit de glucides avec comme conséquence un très faible développement des racines qui finissent par succomber aux attaques des micro-organismes.

5° M. W. H. Chandler, professeur de pomologie à l'Université de Californie, nous indique que la maladie de la petite feuille (*little leaf*) des arbres fruitiers (pommier, pêcher, abricotier, prunier) semble due à une carence de zinc; elle peut être guérie par du sulfate de zinc mis dans le sol ou même par des morceaux ou lamelles de zinc enfouis en partie et à une certaine profondeur dans le tronc et les branches.

6° D'après Lemmet, ingénieur agronome, chef de service agricole des territoires du Sud de l'Algérie, « l'analyse comparée des cendres provenant de feuilles de dattiers prélevées les unes des arbres sains et les autres des arbres dépérissants, a montré que, dans le premier cas, on avait la proportion de 20/1 000 000 de bore et dans le second cas 17/1 000 000 seulement.

« Quant au cuivre, dit-il, il a été démontré qu'il est le secret de la floraison et de la fructification pour l'*Heliantus* ou « soleil » et la tomate. »

« Le cuivre semble jouer, en outre, un rôle primordial dans la vie équilibrée du palmier-dattier :

« On a remarqué en effet, que si on épandait du sulfate de cuivre tout autour d'un palmier-dattier dépérissant et si on irriguait ensuite le sol pour faire pénétrer la solution minérale en profondeur, on constatait quelques mois plus tard que les divisions limbiaires d'une feuille présentaient la même composition minérale que celles prélevées sur un palmier bien portant. On a observé en même temps que la végétation du palmier malade s'améliorait. »

D'après M. Dufrénoy, directeur de la Station de pathologie végétale du Sud-Ouest (*Revue générale des Sciences*, 15 février 1935) :

« Faute de bore, les tissus périvasculaires se nécrosent (Haas), les bourgeons avortent (d'après MM. Fœx, Bron, van Schreven).

« La *déficience de manganèse* provoque une chlorose; l'absorption de traces de zinc guérit les inhibitions de croissance d'après MM. Chandler, Hoagland, Batchelor, Reed et Dufrenoy, et, en Californie, les heureux effets parfois obtenus par l'application de sulfate de fer étaient dus au sulfate de zinc que le sulfate de fer contenait à l'état d'impureté.

« *L'excitation du pouvoir de fixation de l'azote par l'azotobacter*, en présence de sels de fer, est spécifiquement due au molybdène contenu comme impureté et dont l'effet est décelable à la dilution du milliardième (Horner et Burk).

« Le *cuivre joue dans l'économie des plantes supérieures un rôle important*; l'affection des citrus dite « exanthema » se soigne spécifiquement par l'apport de sulfate de cuivre. »

### **Est-ce que la déficience de certains éléments dans le sol, et par suite dans les plantes cultivées n'influerait pas sur la santé humaine?**

« Des études expérimentales attentives, dit encore M. Lemmet, ont été entreprises au cours de ces dernières années, notamment en Floride et en Australie, en vue d'éclairer cette question si importante, mais aussi si complexe, et de ce fait encore très confuse, qu'est la fertilisation rationnelle du sol. Ces études présentent, -au point de vue biologique et de la santé humaine, un intérêt considérable. Elles ont montré, en effet, *que certains états pathologiques graves semblaient provenir, chez les êtres vivants, de la déficience dans leur économie vitale de certains éléments plus ou moins rares dans la nature, tels que le manganèse, le bore, le cuivre, etc.*

On aurait tort de croire que la déficience de ces éléments rares chez les végétaux que nous consommons ne peut avoir aucune influence sur notre santé. « *On ne saurait, dit Richet, membre de l'Institut, dans son Traité de Physiologie médico-chirurgicale, exagérer l'importance des forces infiniment petites, physiques ou chimiques, sur la vie des êtres.* »

Songeons, comme l'a montré M. G. Bertrand, que la croissance de *l'Aspergillus figer* est influencée par la présence d'un milligramme de manganèse dans 10 000 litres de milieu de culture! Or, remarque Dejust, « *la sensibilité cellulaire croît d'ordinaire avec la différenciation. Il est donc à supposer, à titre de simple mais vraisemblable hypothèse, que certaines cellules des animaux supérieurs sont plus sensibles que celles des champignons inférieurs.* »

« Certes, dit le Dr Maire-Améro (*Annales agronomiques* de 1931), le rôle de l'alimentation n'est plus aujourd'hui à démontrer dans la constitution de notre bilan nutritif : l'étude des maladies par carence, les acquisitions récentes sur les dystrophies d'origine alimentaire, tout concourt à en accroître chaque jour l'importance.

« L'étude des vitamines, en particulier, montre que l'organisme jeune, humain ou animal, est incapable de croître, l'organisme adulte ne peut garder son équilibre s'ils ne reçoivent que des protéines, des hydrates de carbone ou des graisses. L'apport d'un quatrième groupe de substances est indispensable, car l'organisme n'en peut opérer la synthèse : ce sont les vitamines.

« Celles-ci sont quelquefois directement utilisées, mais se comportent le plus souvent comme des ferments ou des catalyseurs exerçant une action de présence. Or, la question des vitamines n'est pas close et il semble bien, si l'on en croit précisément les résultats fournis par les travaux récents sur les dystrophies d'origine alimentaire dites *inapparentes*, qu'il y ait tout lieu de penser que les vitamines connues A, B, C et D ne sont pas les seules et qu'il existe dans notre organisme d'autres catalyseurs. Ce sont les éléments minéraux dont nous voulons parler.

« La physiologie végétale ne nous apprend-elle pas, en effet, que le potassium favorise par sa présence l'assimilation des hydrates de carbone; on connaît le rôle du manganèse dans l'assimilation chlorophyllienne; on sait que le zinc intervient dans certains phénomènes diastasiques.

« *Tout concourt donc à rendre évident le rôle de l'alimentation. Or, l'alimentation dépend du sol; elle est formée du et dans le milieu où évoluent ses éléments terrestres ou autres par les racines et rien qu'à ce titre, on peut admettre son action directe dans la production de phénomènes pathologiques.* »

Que l'on veuille bien nous permettre d'ouvrir une parenthèse au sujet de certaines maladies des animaux : il s'agit des *maladies osseuses du bétail*. Elles seraient dues à une déficience du sol en calcium et en phosphore, déficience se répercutant dans l'alimentation. De nombreuses expériences ont très nettement mis en évidence le rôle important joué par l'emploi des *amendements calcaires* et des *engrais phosphatés* (superphosphates, etc.) dans la lutte préventive contre ces maladies osseuses.

Comme le fait très bien remarquer M. Drouin, directeur des services vétérinaires au Ministère de l'Agriculture, « *il ne faudrait pas croire qu'il suffit d'ajouter à la ration de l'acide phosphorique ou de la chaux en nature pour compenser la déficience de l'alimentation. Le problème est infiniment plus complexe et l'expérience a démontré que l'absorption directe par l'animal de substances chimiques, même judicieusement choisies, ne peut compenser la déficience des fourrages. Il faut que la chaux ou le phosphore passent par la plante, qui les présente à l'organisme sous une forme assimilable, et dans un équilibre particulier.* »

De même l'*hématurie bovine* ou *pissement de sang*, d'après le D' Moussu, paraît nettement se rattacher à la qualité des herbages, à la *composition* des fourrages verts et secs, qui sont elles-mêmes des résultantes de la composition des terrains, terres acides, pauvres en chaux, acide phosphorique, etc. ».

Puisque des maladies physiologiques et même des états pathologiques concernant les animaux proviennent de la déficience du sol en certains éléments, pourquoi cette déficience se répercutant sur les plantes n'agirait-elle pas, dans une certaine mesure, sur la santé humaine, bien que l'homme ne soit pas que végétarien?

Sans doute quelques physiologistes et médecins (notamment des médecins américains), poussant à l'extrême ces théories nouvelles, ont voulu trouver dans la déficience de certains corps la cause profonde de maladies

graves. Il importe de ne pas exagérer et aussi de ne pas méconnaître l'importance de ces questions que l'on ne saurait négliger.

Nous faisons part de ces idées sur la déficience ou la présence de certains corps ou éléments rares chez les végétaux que nous consommons parce ***qu'il nous paraît nécessaire, au point de vue de la santé humaine et du rendement des végétaux cultivés, de remédier à la rupture d'équilibre entre le végétal et le sol (rupture résultant de la culture intensive) en apportant au sol tous les éléments qui lui manquent, ou qui s'y trouvent en quantité insuffisante.***

### *Conclusions.*

***Il n'est pas douteux qu'il ne suffit plus d'apporter au sol de l'azote, de l'acide phosphorique, de la potasse et de la chaux et qu'il est nécessaire d'y ajouter bon nombre d'autres corps, d'éléments dit cc catalytiques ».***

Quels sont ces corps, ces éléments, dans quelle proportion relative seront-ils mis à la disposition des plantes au point de vue économique? Autant de questions, de problèmes qui ne sont pas encore résolus, qui nécessitent des recherches délicates avant de pénétrer dans la pratique et dont se préoccupent les savants.

Les chercheurs de tous les pays, s'inspirant des conceptions modernes physico-chimiques ou biologiques, s'appliquent à solutionner les problèmes agronomiques. En France, sous l'impulsion de nos savants, l'étude du sol, base de l'agronomie, avec ses méthodes modernes est entrée dans une voie nouvelle; il suffit pour en être convaincu de lire, par exemple, l'excellent *Guide pour l'étude expérimentale du sol* de M. Demolon, inspecteur général des stations agronomiques, l'un des membres les plus distingués de *l'Association internationale de la science du sol*, et M. Leroux, préparateur de chimie agricole au Conservatoire national des arts et métiers.

Au *Congrès des engrais et des amendements de 1935*, dans un *rapport fort intéressant sur la Détermination des besoins du sol en engrais et amendements dans le cadre de nos connaissances*, M. Doret, directeur de la Station agronomique de la Somme, nous montre précisément les progrès déjà réalisés.

Comme disait A.-Ch. Girard, « laissons à la science le temps d'accomplir son œuvre; elle marche d'un pas lent, mais sûr vers de nouvelles conquêtes dont nous ou nos enfants tirerons profit ».

*Si nous ne pouvons rapidement solutionner dans son ensemble le problème de la fertilisation des sols, ne peut-on pas n' en solutionner, pour le moment, qu'une partie concernant seulement quelques corps : soufre, manganèse, bore, cuivre?*

*Mieux encore, ne peut-on pas commencer par un seul élément, celui dont les plantes exigent des quantités presque aussi grandes que celles du phosphore : le soufre?*

***La nécessité de recourir aux engrais à base de soufre est à l'ordre du jour.***



**« Dans la période récente, fait remarquer M. Demolon, l'attention s'est portée sur le soufre qui, comme le phosphore, entre dans la constitution des protéides végétaux! »**

M. G. Bertrand notamment, à la suite de ses travaux sur la répartition du soufre dans la terre arable et dans les végétaux, estime que les **« agromomes devraient s'en préoccuper comme ils le font de l'azote, du phosphore et du potassium et qu'ils devraient l'utiliser à titre d'engrais »**.

D'ailleurs rappelons ce qu'a dit M. G. Bertrand dans son discours à l'Académie d'Agriculture en séance solennelle du 27 février 1935, lorsqu'il a comparé la lente évolution de l'agriculture durant la période qui va des origines de l'humanité à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, au rapide essor qu'elle a pris depuis l'époque qui nous sépare de la fondation de la chimie et de la physiologie végétales (comparaison qu'il a illustrée en choisissant l'histoire d'un engrais, le plâtre ou sulfate de calcium, dont l'un des composants est le soufre) :

**« On sait aujourd'hui, dit-il, qu'il ne suffit pas de dix à douze éléments pour constituer les tissus d'un végétal, mais qu'il en faut plusieurs dizaines... »**

**« Tout un faisceau de recherches prouve, enfin, que le soufre est aussi indispensable à la formation et à la vie de la plante que le phosphore, l'azote et les nombreux éléments auxquels je viens de faire allusion... »**

**« Malheureusement, comme j'ai déjà eu l'occasion de le faire ressortir, l'industrie chimique n'envisage encore, pour la fabrication des engrais concentrés, que trois fertilisants : l'azote, la potasse et l'acide phosphorique. De sorte que, si l'usage de ces nouveaux produits de l'industrie des engrais se généralise, les terres cultivables s'appauvrissent au fur et à mesure de leurs autres principes nutritifs et il arrivera un moment où les cultivateurs auront beau acheter et répandre sur leurs terres des composés azotés, des sels potassiques et des phosphates, ce sera en pure perte et l'on verra baisser continuellement les récoltes. »**

**« Dans cette décrépitude de la valeur nutritive du sol, l'appauvrissement qui se fera sentir le Premier sera sans doute celui du soufre. Il résulte, en effet, des récents travaux de laboratoire que non seulement la terre arable ne renferme pas toujours une réserve notable de soufre, mais que les plantes exigent pour se développer des proportions de ce métalloïde à peu près égales, parfois même supérieures à celles du phosphore. »**

**« Sans soufre, il ne faut pas l'oublier, la plante ne peut effectuer la synthèse des matières protéiques, elle ne peut former de protoplasme, elle ne peut, en un mot, produire ni cellules, ni tissus. »**

**« Que les agriculteurs tiennent compte de ces découvertes, qu'ils utilisent les engrais concentrés en y ajoutant au moins du soufre, sous forme de plâtre ou d'un autre sulfate, et, loin de voir diminuer la qualité de leurs terres, ils en augmenteront la productivité. »**

## LE SOUFRE

### I. — Toutes les plantes contiennent du soufre qu'elles prennent dans le sol en quantités d'autant plus grandes que la culture est plus intensive.

Berthelot, il y a longtemps, a montré que les plantes contiennent des quantités importantes de soufre et l'on cite souvent, comme exemple, son analyse devenue classique de la *crételle vulgaire*, mettant en parallèle les teneurs comparatives de cette plante en soufre et en phosphore.

	Proportions par kilogramme de matières sèches en soufre. en phosphore.	
Dans les racines	0,8	2,2
Dans les feuilles . . . . .	2,8	4,4
Dans les épis. . . . .	3,1	2,5

En examinant ces résultats on est quelque peu surpris de constater le rôle énorme et justifié que les agronomes ont attribué au phosphore, alors que celui attribué au soufre est resté si longtemps négligé.

Les nombreuses expériences que l'on fit plus tard sur l'action fertilisante du soufre, et que nous résumons plus loin, incitèrent les agronomes à changer peu à peu d'opinion.

En 1926, dans les *Annales agronomiques*, *Marchandier et Goujon*, au laboratoire du Mans, à propos du soufre de la couche arable et aliment des plantes, ajoutèrent ce qui suit :

Le soufre existe, en effet, dans certaines autres plantes, en quantité beaucoup plus forte que dans la crételle.

C'est ainsi que dans les feuilles de saule, d'érable, il représente 10 p. 100 des cendres.

Dans les algues, la proportion de cet élément est beaucoup plus élevée encore et c'est ce qui explique l'odeur désagréable d'hydrogène sulfuré qu'elles dégagent par la putréfaction.

Les plantes textiles contiennent aussi du soufre et *Robert Kane*, analysant du lin, en trouve 12 p. 100 dans les cendres de ce végétal.

Enfin, dans les cendres de graines de crucifères on peut en doser jusqu'à 8 p. 100. Dans ces graines, la teneur en soufre est fonction de leur richesse en matières protéiques, matières dans la constitution desquelles entre ce corps.

*Balland* a recherché la distribution du soufre et du phosphore dans un

## LE SOUFRE

grand nombre d'aliments et, des résultats acquis par lui, on peut conclure qu'il n'existe pas de substance dans laquelle on ne puisse trouver du soufre.

Dans les céréales, c'est le phosphore qui domine; mais dans les légumes verts (poireaux, salades, etc.), c'est le soufre.

En somme, le soufre existe dans tous les végétaux; il y a donc lieu de le considérer comme un véritable aliment des plantes.

Quel rôle remplit-il dans la physiologie? Il nous est encore impossible de le préciser. Sa présence constante dans ces complexes albuminoïdes (acides amino-sulfurés, cystéine et cystine), qui se trouvent dans toutes les cellules végétales, permet de penser qu'une certaine corrélation existe entre son action et celle de l'azote.

MM. Mazé et Demolon, nous l'avons vu, prétendent que, privée de soufre, la plante ne pourrait plus synthétiser sa chlorophylle et ils montrent que la chlorose sévit dans les sols sans soufre. Cet élément interviendrait donc, indirectement au moins, pour activer la fixation du carbone et la formation de l'amidon.

Aussi on ne peut que souscrire à cette opinion du savant américain Jacob G. Lipman :

« *Que l'on traite de la physiologie végétale, de la pathologie végétale, de l'art vétérinaire, de l'agronomie, de la chimie du sol ou de celle des engrais, on découvre que les réactions du soufre offrent un champ d'application presque infini.* »

D'après M. Dujrénoy, directeur de la Station de pathologie végétale du Sud-Ouest, « dans l'économie cellulaire, le soufre agit surtout comme accepteur d'oxygène ou d'hydrogène dans les groupements sulphydriques, d'où son pouvoir anticypogamique s.

M. G. Bertrand, dans une communication présentée au IX<sup>e</sup> Congrès de Chimie en 1929, fit remarquer l'importance que l'on devait donner au soufre :

« Les substances protéïdiques qui sont, comme on sait, des substances plus ou moins voisines de l'albumine et de la caséine, constituent une partie importante du protoplasma et du noyau cellulaire des plantes; elles jouent par conséquent un rôle de tout premier ordre dans la production de la matière végétale. Quand on les soumet à l'analyse élémentaire on les reconnaît formées de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, de phosphore et de soufre. Comme ces deux derniers éléments n'existent pas dans l'atmosphère, les plantes doivent les trouver dans le sol pour édifier leurs cellules et accroître leurs tissus. *En vue de parer à ce besoin alimentaire, les agriculteurs utilisent, depuis longtemps déjà, des engrais phosphatés, mais ils ne se servent pas encore, au moins d'une manière consciente et régulière, des engrais sulfatés. Il y a là un oubli très grave qu'il devient de plus en plus urgent de réparer.*

**« Chaque année, en effet, une certaine quantité de soufre est extraite du sol par les récoltes, puis exportée sous forme de grain, de foin ou de viande. Cette quantité est d'autant plus considérable que la culture est intensive et, si l'on ne finissait pas par y mettre bon ordre, il arriverait un moment où, selon la loi du minimum de Liebig, on aurait beau employer comme engrais des quantités croissantes d'azote, de phosphates et de sels potassiques, on constaterait une diminution progressive de rendement. »**

*Les recherches que MM. G. Bertrand et Silberstein ont poursuivies de*

LE PROBLÈME DE LA FERTILITÉ DES SOLS

**1927 d 1930** à l'aide d'une méthode plus rigoureuse que celles utilisées jusque-là, leur ont permis d'établir que « **les plantes exigent pour la construction de leurs tissus des quantités de soufre beaucoup plus grandes qu'on le supposait et qui au moment de la floraison sont très voisines de celles du phosphore** ».

D'après les analyses récentes de G. Bertrand, la composition en soufre des végétaux cultivés serait :

	Soufre pour 100 de matières sèches.	Rapport soufre phosphore.
	S	S/P
Froment (graine) .....	0 1634	33,5
Seigle (graine) .....	0 1524	32,8
Maïs (graine) .....	0 1978	36,8
Pomme de terre (tubercule) .....	0,1689	45,9
Tabac (feuille) .....	0 3694	81,4
Luzerne (partie aérienne floraison) . . .	7,4999	105,8
Trèfle blanc (plante entièrement en fleur)	0,5164	117,4
Colza (partie aérienne en fleur) .....	0 9288	155,8

*M. Demolon* fait remarquer que « si l'on tient compte des parties aériennes récoltées au moment de la floraison, le rapport S/P varie de 0,44 pour le froment à 1,56 pour le colza. Il est minimum pour les graminées, maximum pour les légumineuses et les crucifères ». G. Bertrand estime donc que « pour 200 kilogrammes de phosphore les plantes renferment de 50 à 150 kilogrammes de soufre. Une récolte de crucifères peut ainsi exporter par hectare plus de 200 kilogrammes de SO ».

Dans de nouvelles recherches en 1935, MM. G. Bertrand et Silberstein ont déterminé les teneurs comparatives en soufre et en phosphore de trente-sept espèces de plantes maraîchères ou de grande culture cultivées sur le même sol :

« Les résultats de ces nouvelles recherches, disent-ils, rendent plus manifestes encore que les précédents l'importance du soufre comparée à celle du phosphore dans le développement des végétaux; en effet, le rapport du premier au second de ces éléments est cette fois égal ou supérieur à l'unité dans la moitié des cas et, sans descendre au-dessous de 0,38, il s'élève dans la nouvelle série non seulement à 1,7, mais à 2 ou 3 et même jusqu'à 4.

« Ces résultats montrent aussi que les teneurs différentes des espèces végétales en soufre et en phosphore ne dépendent pas exclusivement de la composition des sols, qu'elles dépendent encore, si ce n'est surtout, des besoins physiologiques de ces espèces et de leur aptitude à les satisfaire. Il est remarquable, à ce point de vue, que, si certaines plantes n'ont pas fixé plus de 0,15 ou 0,20 de soufre pour 100, de leur matière sèche, d'autres ont atteint, sur le même sol, jusqu'à 1,9 p. 100, soit environ 10 fois davantage; à côté, sans aucun parallélisme entre la fixation du soufre et celle du phosphore, ce dernier a varié seulement de 0,24 à 0,85 p. 100. »

En 1935, MM. Vincent, directeur, Herviaux et Sarrazin, préparateurs

## LE SOUFRE

à la Station agronomique de Quimper, ont présenté à l'Académie d'Agriculture une note ayant pour titre : « Observations sur le rôle du soufre dans la fumure en Bretagne » (en sols granitiques).

Nous en citons les passages suivants :

« Le soufre existe dans les sols et les plantes soit à l'état de sulfates, soit en combinaisons organiques. »

En ce qui concerne les plantes :

« Les sulfates se rencontrent en faibles quantités dans les plantes. Chez les céréales : blé, orge, avoine, ils sont presque **inexistants** dans les grains et représentent la moitié du soufre total dans les pailles : ce sont les grains qui contiennent le plus de soufre; les pommes de terre, les betteraves fourragères sont plus pauvres, les betteraves plus que les pommes de terre; pour les deux, les sulfates correspondent à la moitié du soufre total.

« *Le soufre total va croissant dans l'ordre suivant : graminées, légumineuses et crucifères où il atteint 2 p. 200 de la matière sèche.*

« Les organes jeunes des plantes contiennent le plus de sulfates, les feuilles s'appauvrissent progressivement au profit des fleurs et des graines. Dans la plante les sulfates réduits partiellement, comme les nitrates et les phosphates, donnent des combinaisons organiques azotées diverses contenant du soufre.

« Les besoins alimentaires des cultures varient avec les rendements : pour 30 quintaux environ par hectare, les céréales, blé, orge, avoine, exportent 10 kilogrammes de soufre; i 200 quintaux de betteraves : 12 kilogrammes; 370 quintaux de pommes de terre : 11 kg. 70; les fourrages en floraison : sarrasin : 7 kg. 70; trèfle incarnat : 10 kg. 40; colza : 30 kilogrammes ; choux : 40 kilogrammes.

« Un assolement pommes de terre, blé, orge, avoine, trèfle violet exige environ, d'après nos essais, 61 kilogrammes de soufre en cinq ans. »

### **En résumé,**

**Actuellement, il est reconnu que les plantes, en général, contiennent presque autant de soufre que de phosphore.** Dans les céréales c'est le phosphore qui domine, dans les légumes verts c'est le soufre. Les pommes de terre contiennent moins de soufre que de phosphore, le tabac presque autant. Les plantes des prairies contiennent autant de soufre que de phosphore. Les betteraves et surtout les crucifères, choux, navets, colza, etc., contiennent beaucoup plus de soufre que de phosphore.

La preuve expérimentale a été faite qu'« **un abaissement de la proportion de soufre assimilable contenue dans la terre arable entrave d'une manière très importante l'action des autres facteurs de production de la matière végétale et notamment de l'azote** ».

**D'où la conclusion : Le soufre existant dans tous les végétaux. en quantités importantes, il faut donc le considérer comme un aliment au même titre que l'azote, le phosphore, la potasse ou la chaux.**

## II. — Insuffisance de la quantité de soufre dans la plupart des sols, ceux-ci s'appauvrissant d'autant plus en cet élément que la culture est plus intensive.

Dans le sol le soufre total qu'on trouve se présente à l'état minéral et à l'état organique.

Le soufre à l'état organique se trouve engagé dans les substances plus ou moins dégradées qui proviennent de la mort et de la décomposition des espèces végétales et animales; il se présente à l'état de composés sulfo-conjugués que l'on n'est pas encore parvenu à isoler. D'après M. Demolon, « le soufre à l'état organique ne devient utilisable pour la plante qu'après oxydation sulfurique par voie biochimique ».

Le soufre à l'état minéral se présente sous forme de sulfates (sulfates alcalins, magnésien et alcalins) et notamment de sulfate de chaux. Il se présente parfois sous forme de sulfures dans les terres où les sulfates se trouvent réduits par les matières organiques.

Dans les *sols bretons acides et cultivés*, M. G. Bertrand a trouvé, pour 100 sols, de 0,466 gramme à 1,078 gramme de soufre par kilogramme.

Dans ces mêmes sols, MM. Vincent, Sarrazin et Herviaux ont constaté que « la proportion de soufre organique est, en général, plus grande que celle du soufre minéral et dépasse le plus souvent 50 p. 100 du total. Dans les *sols neutres et alcalins*, la proportion de soufre organique oscille entre 50 et 60 p. 100 du total, tandis que dans les *sols acides* elle atteint près de 74 p. 100

D'après M. Gabriel Bertrand ce sont ces sulfates solubles et aisément assimilables qui constituent le principal stock de soufre immédiatement utile aux plantes cultivées.

« Or, fait remarquer M. Goujon, ingénieur agronome, directeur du laboratoire du Mans, *ces sulfates, mal retenus par les propriétés absorbantes des sols, subissent des déperditions continues. Nous pouvons lire dans la Chimie agricole du professeur André qu'une terre contenant 1 g. 411 de soufre total par kilogramme de terre fine ne renferme que 0,812 de sulfate.*

« Nous avons pu constater nous-même (*Annales des Sciences agronomiques*, p. 402), que cette proportion semble à peu près la même dans bien des terres et que le soufre total accuse des différences de teneur très sensibles avec les échantillons analysés.

« Sur 58 terres, 4 seulement ont une teneur en soufre supérieure à 1 p. 1 000; 32 ont de 0,5 à 1 p. 1 000 et 22 moins de 0,5 p. 1 000.

« Ces différences de teneur devant correspondre à des besoins différents, il semble logique de conseiller la restitution du soufre, dans les terres pauvres *au* moins, au même titre que celle des autres éléments. »

MM. Vincent, Sarrazin et Herviaux ont calculé les pertes de sulfates par les eaux de drainage dans les sols bretons : ils ont trouvé qu'il se perd annuellement par les eaux de drainage entre 30 et 175 kilogrammes d'acide sulfurique de ces sulfates, c'est-à-dire entre 10 et 57 kilogrammes de soufre par hectare.

*En 1929, M. G. Bertrand, dans une communication au Congrès de Chimie industrielle, a écrit :*

« Les terres cultivées renferment-elles toujours assez de soufre pour qu'il soit inutile de leur en ajouter à titre d'engrais? » Nous avons étudié la question, M. Silberstein et moi, et voici à quelles conclusions nous sommes arrivés :

*« Pas plus dans le cas de la telle que dans celui des plantes on ne peut se contenter de doser le soufre restant dans le produit de la calcination. Il faut recourir à une méthode particulière, ne laissant échapper aucune partie du métalloïde contenu, soit dans les substances organiques de la terre, soit dans ses substances minérales; sinon, on aurait, par un mécanisme rappelé plus haut, des pertes importantes. Il faut aussi éviter des gains. Comme le gaz généralement employé pour le chauffage donne en brûlant des composés sulfureux, se fixant en partie sur la terre ou les végétaux et sur les réactifs au cours de l'analyse, ce qui augmente la teneur finale en soufre, il est indispensable de n'employer, pendant toute la durée d'une opération, que des appareils de chauffage électriques.*

a Nous avons utilisé une méthode proposée autrefois par l'un de nous pour le dosage du soufre dans le caoutchouc, méthode qui, après adaptation au cas de la terre arable, s'est montrée aussi pratique et aussi exacte.

***« Les résultats obtenus ont montré que les proportions de soufre total <sup>con-</sup>tenues dans les terres cultivées provenant des diverses régions de la France oscillent entre d'assez larges limites et s'abaissent quelquefois à des valeurs très basses, environ 0 g. 2 par kilogramme.***

Mais ce n'est pas tout. *Nous avons découvert, en poursuivant ce travail, qu'il y avait toujours du baryum dans la terre arable. Des analyses quantitatives nous en ont fait trouver de 0 g. 08 à 1 g. 72 par kilogramme. Or on sait que le baryum donne avec l'acide sulfurique un sulfate remarquablement peu soluble : il faut, d'après Kohlrausch et Rose, 436 zoo parties d'eau pour le dissoudre. La présence du baryum dans la terre est donc susceptible de paralyser par <sup>insolubilisation</sup> une partie des sulfates qu'elle renferme.* Nous avons trouvé, par exemple, une terre du département de l'Yonne contenant seulement 226 milligrammes de soufre total par kilogramme et assez de baryum pour en fixer 86 à l'état de sulfate, une terre du département du Gard dans laquelle, sur 498 milligrammes de soufre total, il y en avait jusqu'à 401 qui pouvaient être combinés sous la même forme de sel barytique.

***Il n'est plus permis d'admettre, après ces résultats, que la terre arable renferme toujours assez de soufre organique et minéral pour suffire aux besoins des récoltes et qu'il est inutile de lui en ajouter comme engrais. »***

## 111. — Nécessité d'apporter aux terres le complément de soufre nécessaire.

Depuis près de trente ans, l'observation et de nombreux essais ont montré que l'apport de soufre sous forme de soufre sublimé augmente le rendement des plantes :

Dès le début de l'emploi du soufre en viticulture on a remarqué la végétation particulièrement belle des vignes soumises au soufrage. *En 1858, Marès*, dans son « *Manuel pour le Soufrage des Vignes malades s, consacra tout un chapitre d cette action du soufre sur la végétation*, indépendamment de son action contre l'oïdium :

« *Le soufre*, dit-il, *stimule la végétation de la vigne et il en favorise la fructification*. Il lui communique ainsi la vigueur nécessaire pour réagir contre les attaques de son parasite....

« De toutes les innovations apportées à la culture de la vigne, l'emploi méthodique et périodique du soufre, soit pour combattre les invasions de l'oïdium, soit pour agir sur la fructification et la végétation des ceps, est la plus considérable qu'on ait encore imaginée et fait accepter par la pratique. Son influence sur la production des vignobles est décisive. Combinée avec une bonne culture et l'usage des engrais, les rendements de la vigne sont devenus à la fois plus réguliers et plus abondants.

« La végétation des vignes soufrées est plus brillante; leur fructification est moins exposée aux ravages de la coulure.

s Le soufre active la maturation des raisins d'une manière très remarquable.... D'après nos observations, le soufrage avance de dix jours environ la maturité des raisins.... Il perfectionne le raisin sous le rapport de sa couleur et de son développement; aussi le vin de vignes soufrées, dans le Midi, est-il relativement meilleur et plus coloré....

« On peut le considérer pour les vignes *comme un engrais*, ou plutôt comme un amendement d'un ordre particulier.... »

Plus loin on lit :

« J'ai signalé plus haut l'influence favorable du soufrage sur la floraison; je *l'ai* encore observée, et, cette même année, les observations de plusieurs viticulteurs sont venues confirmer celles que j'avais publiées, à cet égard, les années précédentes. Ce fait si important n'est point d'ailleurs isolé, et ne s'applique point seulement à la floraison et à la fructification de la vigne : j'ai constaté que le soufre favorise la fructification d'un grand nombre d'arbres fruitiers, notamment du prunier, du cognassier, du poirier, du pommier, etc., et qu'il exerce sur la végétation d'un grand nombre de plantes cultivées une action puissante. En considérant les choses sous ce nouveau point de vue, et non point seulement sous celui de l'*aptitude* du soufre à combattre la maladie de la vigne, il serait avantageux de soufrer les vignes lors de leur floraison, sans se préoccuper de la présence de l'oïdium. C'est dès lors une opération distincte de celle dont le but est de combattre la maladie, et chacun l'appréciera à son point de vue particulier.



« Une maturité plus égale, et probablement aussi une action spéciale du soufre sur la matière colorante du raisin, ont donné à ce dernier plus de couleur. »

Et Marès termine en disant :

« Dans tous les cas, rien ne serait plus digne d'intérêt que l'étude des questions qui se rattachent à l'emploi du soufre pour stimuler la végétation. C'est un champ **tout** nouveau, dans lequel la physiologie végétale et l'agriculture peuvent trouver de nombreux sujets d'observation. »

Il y a plus d'un demi-siècle que ces lignes ont été écrites et ce n'est que cinquante ans plus tard, vers 1909-1910, que commencèrent à paraître des expériences précises sur l'action fertilisante du soufre.

*Une note très intéressante concernant l'action du soufre en fleur sur la végétation fut communiquée par Boullanger, de l'Institut Pasteur de Lille, et présentée par Mintz à l'Académie des Sciences le 5 février 1912.*

Dans cette note, à propos du compte rendu des expériences effectuées, nous lisons : « Au cours de nos recherches sur les engrais catalytiques, effectués par les méthodes de Wagner, nous avons pu constater que le soufre en fleur, ajouté à très faible dose à la terre de diverses cultures en pots, exerce une action très favorable sur la végétation et augmente notablement les rendements de ces cultures. »

Les expériences de Boullanger étaient particulièrement intéressantes parce qu'elles permettaient de comparer l'influence du soufre avec celles de plusieurs autres corps essayés en même temps.

M. Boullanger résuma comme suit, dans les *Annales de l'Institut national agronomique*, le résultat de toutes ces expériences dans lesquelles le soufre a presque toujours donné les plus forts excédents de récolte :

« Il résulte des essais qui précèdent qu'on peut augmenter notablement, dans beaucoup de cas, le rendement de certaines cultures par l'emploi à dose très faible des engrais catalytiques.

« Pour la *carotte*, l'agent le plus actif semble le soufre en fleur, puis viennent le sulfate d'alumine, le sulfate de manganèse et le silicate de soude. Le sulfate de fer seul semble sans action.

« Pour le *haricot*, le soufre seul détermine une augmentation très nette de la récolte : les autres éléments semblent sans action sensible.

« Sur le *céleri*, tous les engrais étudiés agissent favorablement, et surtout le soufre et le sulfate de fer. Le sulfate d'alumine, le sulfate de manganèse et le silicate de soude entraînent également des augmentations très élevées de rendement.

« Pour l'*épinard*, le soufre seul paraît agir favorablement; les autres substances sont sans action et peuvent même exercer une action nuisible.

Pour la *laitue*, le soufre vient également en tête, puis le sulfate de manganèse, le sulfate de fer et enfin le sulfate d'alumine.

« Pour l'*oseille*, c'est encore le soufre qui agit le plus favorablement, puis le sulfate de manganèse; le sulfate d'alumine, le sulfate de fer et le silicate de soude sont sans action ou agissent défavorablement.

« Pour la *chicorée*, l'engrais de choix est encore le soufre, puis le sulfate d'alumine; les autres substances (silicate de soude, sulfate de fer, sulfate de manganèse) semblent sans action sensible.

« Pour la *pomme de terre*, le sulfate d'alumine vient en tête, puis le silicate de soude, le sulfate de fer et enfin le soufre. Nous avons vu, dans la première

## LE PROBLÈME DE LA FERTILITÉ DES SOLS

partie de ce mémoire, que les sels de manganèse agissent également très favorablement sur cette plante.

« Pour **l'oignon**, le sulfate d'alumine, le sulfate de fer et le soufre exercent une légère action favorable ; les autres substances (sulfate de manganèse, silicate de soude) sont sans action ou même légèrement nuisibles.

« Pour la **betterave**, le sulfate de manganèse et le sulfate d'uranium exercent une action très favorable. »

Boullanger montra que *l'action fertilisante du soufre mettait en cause l'activité des microbes du sol* puisqu'elle devenait nulle ou à peu près dans une terre préalablement stérilisée. *D'autre part, en 1912, Boullanger et Dugardin établirent nettement, en opérant sur la terre elle-même que, dans ce milieu naturel enrichi ou non de matières organiques (sang desséché), la présence du soufre favorisait l'ammonification.*

A peu près en même temps que Boullanger, *M. Demolon*, alors directeur de la Station agronomique de l'Aisne, *faisait connaître* à l'Académie des Sciences, dans une note également communiquée par *Müntz* le 19 février 1912, *les résultats d'expériences qu'il venait de faire au sujet de l'action fertilisante très favorable du soufre en fleur sur cultures de rutabagas, panais, betteraves, navets.*

« Si l'on rapproche, dit-il, nos résultats de ceux obtenus par Boullanger, on constate que le *nombre de végétaux sensibles à l'action du soufre est très considérable et qu'on les rencontre dans des familles botaniques très diverses. Les crucifères paraissent toutefois devoir être placées au premier rang à cet égard.*

« Nos expériences nous ont permis d'observer que, dans les parcelles soufrées, le système foliacé présentait, d'une manière générale, *une teinte d'un vert plus foncé*, qui à l'œil permettait de reconnaître immédiatement ces parcelles. Au moment de la sécheresse de l'été, nous n'avons pas observé, en présence du soufre, la tendance au jaunissement qui s'est parfois manifestée pour les témoins. **Ce soufre nous paraît donc exercer une action sur le développement de la chlorophylle.** » D'ailleurs *MM. Mazé et Demolon* ont montré que, **privée de soufre, la plante ne peut synthétiser sa chlorophylle, et que la chlorose sévit dans les sols sans soufre.** *Cet élément interviendrait donc, immédiatement au moins, pour activer la fixation du carbone et la formation de l'amidon.*

*En 1910 nous fîmes, en grande surface, à l'École de Viticulture de Beaune dont nous étions alors directeur, nos premières expériences concernant l'action du soufre sur cultures de pommes de terre et de betteraves.*

*M. Desriot* accepta de faire à l'École d'Agriculture de Genettes (Allier), des essais identiques : les excédents de récolte dus au soufre sublimé furent des plus appréciables. A Beaune où les pluies furent très abondantes, nous pûmes constater pour la première fois *l'action très nette du soufre contre la pourriture.*

*Mêmes essais en 1912* sur la pomme de terre et la betterave, et résultats analogues.

Ce furent surtout les idées de *Marès* sur l'action du soufre publiées en

1858 et aussi les expériences de M. G. Bertrand vers 1904, montrant l'influence du manganèse sur les plantes, qui nous incitèrent à effectuer les expériences que nous venons d'indiquer et à les publier dans une brochure *parue* en 1913.

À la même époque dans les pays étrangers on faisait également des essais :

*Dans l'Allemagne du Nord, en vue de combattre la « gale » des pommes de terre, à l'aide du soufre en poudre mis dans le sol, au moment de la plantation des tubercules. Les résultats de ces expériences montrèrent que les pommes de terre récoltées dans les parcelles ayant reçu du soufre, étaient non seulement en grande partie indemnes de la « gale », mais aussi en plus grande abondance.*

*Aux États-Unis, Hart et Peterson étudièrent l'action du soufre dans le sol et sur les récoltes.*

*En France, en 1913, M. Brioux expérimenta l'effet du soufre enfoui à la dose de 200 et 200 kilogrammes à l'hectare, dans un sol léger silico-calcaire. La plus-value constatée fut en moyenne de 15 p. 100 pour les pommes de terre, de 12 p. 100 pour la moutarde blanche, de 43 p. 100 pour les rutabagas. Ce fut à la suite de ces essais que Brioux et Guerbet firent des recherches intéressantes sur l'évolution du soufre dans le sol.*

Après la Grande Guerre, les essais continuèrent parmi lesquels nous citerons ceux de :

*MM. Vermorel et Antony, à la station de Villefranche, qui obtinrent des augmentations de rendement de 40 p. 100 pour le blé et de 50 p. 100 pour le haricot.*

*M. Petit, professeur à l'École nationale d'Horticulture de Versailles, qui obtint avec le soufre, à la dose de 20 grammes par mètre carré dans une terre de jardin riche en humus ne renfermant que 1,25 p. 100 de calcaire, un accroissement de rendement de la laitue en matière sèche de 20 p. 100.*

Ceux plus récents de :

*M. Bordas, directeur de la Station agronomique d'Avignon, qui obtint des augmentations de rendement de 12 p. 100 sur choux, de 49 p. 100 sur pommes de terre, de 33 p. 100 sur aubergines.*

*L'Institut des Recherches agronomiques que nous aurons l'occasion de citer.*

*Des Écoles pratiques d'Agriculture, essais effectués, sur notre demande, en 1932 et 1933.*

#### IV. — Les recherches faites pour expliquer comment le soufre élémentaire se transforme dans le sol et agit sur les plantes.

**De nombreuses recherches ont été faites pour savoir comment ce soufre évoluait dans le sol et agissait sur les plantes.**

Rappelons que, dès 1911, Boullanger montra que l'action fertilisante du soufre mettait en cause l'activité des microbes du sol puisqu'elle devenait nulle, ou à peu près, dans une terre préalablement stérilisée. D'autre part, en 1912, Boullanger et Dugardin établirent nettement, en opérant sur la terre elle-même, que, dans ce milieu naturel enrichi ou non de matières organiques. (sang desséché), la présence du soufre favorisait l'ammonification.

Rappelons aussi qu'en 1912 Demolon fit remarquer que le soufre paraissait exercer une action sur le développement de la chlorophylle. De plus Mazé et Demolon montrèrent que, privée de soufre, la plante ne peut plus synthétiser sa chlorophylle et que la chlorose sévit dans les sols sans soufre. Cet élément interviendrait donc, immédiatement au moins, pour activer la fixation du carbone et la formation de l'amidon.

M. Demolon, comme Boullanger, reconnut que dans une terre préalablement chauffée à 105° pendant une heure, la transformation du soufre en sulfates se montrait plus lente que dans une terre non chauffée, ce qui indiquait que des actions microbiennes intervenaient. Il fit remarquer que l'action fertilisante du soufre semblait pouvoir être attribuée :

1° A son action sur les microbes du sol;

2° A sa transformation progressive en acide sulfurique qui, non seulement dans certains cas peut constituer une source de soufre pour la plante, mais qui peut encore jouer le rôle de solubilisateur de certains éléments minéraux du sol soit directement, soit indirectement par la formation de sulfate de chaux mobilisateur de la potasse.

En 1913 MM. Brioux et Guerbet, à la suite de leurs recherches sur l'évolution du soufre dans le sol, pensaient « que Boullanger avait négligé, ou tout moins considéré comme très peu importante l'action que le soufre est susceptible d'exercer en tant que source d'acide sulfurique et de sulfates. Leurs expériences démontrèrent que le soufre incorporé au sol est susceptible, dans des conditions favorables d'humidité et de température, de s'oxyder beaucoup plus rapidement et plus complètement qu'on ne l'avait montré jusqu'ici. »

Plus tard, en 1927 et 1930, dans une étude remarquable intitulée : L'évo-

*lution et la solubilisation du soufre élémentaire dans la terre arable*, MM. Guittonneau et Keilling, rendant compte de leurs recherches, disaient

« Il est tout indiqué de rapprocher les observations de Demolon, concernant l'intervention des actions microbiennes dans la transformation du soufre en sulfates, des études poursuivies par de nombreux bactériologistes et d'admettre que *l'oxydation du soufre en sulfates se poursuivait dans les sols*, comme dans les cultures microbiennes, *sous l'action de micro-organismes autotrophes* qui puisaient leur énergie vitale dans l'oxydation même du métalloïde.

a Cette conception, dit-il, se trouve un peu plus tard renforcée par les travaux de l'École américaine.

a En effet, en 1922, Waksman et Joffe décrivent, sous le nom de *Thiobacillus thiooxidans*, une bactérie afitotrophe qui se montrait remarquablement active dans l'oxydation du soufre de certains composts préparés en vue d'obtenir une solubilisation économique du phosphate tricalcique. Après avoir pensé que cette bactérie, qui transformait directement le soufre en sulfates, pourrait bien être par excellence l'agent de l'oxydation du soufre dans le sol, Waksman dut reconnaître qu'elle n'était présente que dans les sols ayant déjà été traités par le soufre et qu'elle ne trouvait vraiment sa conjecture optimum que dans les milieux nettement plus acides que des terres cultivées normalement. Mais, le bactériologiste américain émit l'hypothèse que le *Thiobacillus thiooxidans* pouvait travailler en association avec un autre micro-organisme (*Thiobacillus B*) s'accommodant bien des réactions voisines de la neutralité. Le *Thiobacillus B* était également autotrophe et très voisin du *Thiobacillus thioparus* déjà décrit en 1904 par Beijerinck et signalé dès 1915 par Gehring comme universellement répandu dans les sols. »

Cependant, l'idée d'une pareille spécificité ne devait pas être admise par tout le monde. En 1921 Demolon annonça que, cultivés dans un milieu bien aéré (sable imprégné d'une solution nutritive complexe), les microbes hétérotrophes du sol pouvaient, eux aussi, transformer le soufre en sulfates. Ces observations furent confirmées par Rippel en 1924.

Par conséquent, M. Demolon montra nettement que la propriété d'oxyder le soufre en sulfate n'est pas bactériologiquement spécifique.

En résumé, en 1924, ainsi que le font remarquer MM. Guittonneau et Keilling, un fait était nettement établi : « dans le sol, le soufre élémentaire se transforme en acide sulfurique et en sulfates ».

Cette notion permettait de comprendre diverses modalités possibles de l'action fertilisante du soufre et notamment les suivantes :

° Un apport de soufre équivaut à un apport de sulfates, le plus souvent utilisables par la végétation, c'est-à-dire, en fin de compte, d'un engrais sulfaté. Or, l'utilité de tels engrais n'est nullement douteuse pour nombre de cultures effectuées dans les conditions de la pratique courante et les travaux de G. Bertrand et Silberstein ont tout récemment éclairé de la manière la plus heureuse ce point trop souvent négligé de la chimie agricole.

<sup>20</sup> **L'acide sulfurique, formé aux dépens du soufre, peut dissoudre et mobiliser dans les sols non calcaires des principes fertilisants divers, tels que la potasse, le fer, l'alumine et le manganèse** (Brioux et Guerbet). En sols calcaires l'acide sulfurique se fixe évidemment presque exclusivement sur la chaux, et le sulfate de calcium ainsi formé peut ensuite mobiliser de la potasse.

<sup>30</sup> Dans certaines terres qu'une alcalinisation excessive et sans cesse renaissante (*black alkali soils*) rend stériles, il paraissait évident, a priori, que la formation également continue de radicaux  $\text{SO}_3^-$ , assurée pas l'apport de fortes doses de soufre, devait, en neutralisant le milieu, le rendre fertile. C'est ce que l'expérience a effectivement confirmé (Lipmann, O'Gara, Rudolfs).

Quant au mécanisme même de la transformation du soufre en sulfates dans le sol, il n'était encore que bien imparfaitement connu. On savait, il est vrai, qu'il se rattachait à des actions microbiennes parmi lesquelles on pouvait évoquer aussi bien, celles d'espèces autotrophes **et spécifiques** que celles d'espèces hétérotrophes et banales.

Mais, quoique pressentie par certains chercheurs (Brioux et Guerbet), la complexité du processus biochimique de la solubilisation et de l'oxydation du métalloïde n'avait pas encore été établie. Le rôle véritable qu'y jouent les **micro-organismes** hétérotrophes, travaillant ou non en association avec les autotrophes, était, en particulier, resté méconnu.

*En 1925 et 1926 Guittonneau détermine successivement :*

**1<sup>o</sup> *Io Que de nombreux micro-organismes hétérotrophes isolés du sol se montraient capables de solubiliser le soufre élémentaire à l'état d'hyposulfites*** lorsqu'on les cultivait, en milieu bien aéré et maintenu au voisinage de la neutralité, dans des solutions minérales nutritives additionnées de matières organiques diverses (sels ammoniacaux d'acides organiques, amides, acides aminés, peptone, glycérine, mannite, glucose, amidon);

**2<sup>o</sup> *Que d'autre part, dans les mêmes milieux, l'association de chacune des espèces hétérotrophes précédemment étudiées avec une autre espèce microbienne capable de transformer les hyposulfites en sulfates faisant apparaître, dans les cultures, des sulfates.*** Le fait est d'autant plus remarquable que l'espèce choisie pour transformer les hyposulfites en sulfates se montrait incapable de s'attaquer directement au soufre. Il était d'ailleurs possible, au moyen de certains artifices expérimentaux (augmentation de la richesse des milieux de culture en aliments organiques), de régler le travail de l'association microbienne de manière à obtenir soit des *sulfates* exclusivement, soit un mélange *d'hyposulfites et de sulfates*.

*L'apparition des produits intermédiaires, au cours de la transformation du soufre en sulfates, était ainsi démontrée en cultures sur milieux artificiels liquides. Il ne restait plus, fort de ces renseignements, qu'à rechercher si la solubilisation du soufre dans le sol ne donnait pas lieu à des phénomènes du même ordre.*

*Cette recherche fut faite par MM. Guittonneau et Keilling; leurs travaux remarquables furent publiés en 1932. Citons leurs conclusions :*

**1<sup>o</sup> *Il nous paraît logique d'admettre que dans les sols arables, milieu où certains micro-organismes autotrophes (ceux de la nitrification notamment) se montrent en général si actifs, les bactéries autotrophes du soufre, aujourd'hui rangées dans le groupe du Thiobacillus, peuvent s'attaquer à ce métalloïde et l'oxyder directement en sulfates.***

**2 *Mais, d'autre part, il nous semble hors de doute que, dans ce milieu biologique, les espèces microbiennes hétérotrophes de la floccule zymogène exercent de leur côté sur le soufre une action biochimique d'un ordre tout différent que nous nous sommes attachés à définir.***

**3<sup>o</sup> *L'accumulation dans le sol de composés incomplètement oxydés du soufre semble bien être le résultat principal des actions directes ou indirectes que peuvent exercer les espèces zymogènes du sol sur le métalloïde.***

*Le soufre ainsi solubilisé se trouve engagé dans des combinaisons chimiques se rattachant surtout, sinon exclusivement, soit au groupe des hyposulfites stables en milieu alcalin, soit au groupe des polythionates supérieurs (tétra et pentathionates caractérisés) stables en milieux acides. Dans les terres normales la proportion des polythionates formés aux dépens du soufre l'emporte toujours de beaucoup sur celles des hyposulfites.*

*Polythionates supérieurs et hyposulfites disparaissent des terres soufrées,*

au bout d'un temps plus ou moins long, en se transformant en sulfates. Dans l'ensemble de l'évolution que subit le métalloïde incorporé au sol ils représentent donc des *produits intermédiaires*.

5° L'apparition, dans une terre arable, des produits intermédiaires de l'oxydation microbienne du soufre peut avoir certaines conséquences biologiques dont quelques-unes ont déjà été signalées :

a) L'un de nous a montré que la présence de ces composés favorisait l'accumulation de l'ammoniaque en paralysant plus ou moins complètement la nitrification dans une terre peptonée et soufrée.

b) Roach et Glynn ont fait état du rôle possible de l'acide hyposulfureux comme agent de destruction des sporanges d'hiver du *Synchytrium endobioticum* dans les terres soufrées.

c) L'un de nous, en collaboration avec Mlle Bejambes et Mme François Perey (travail encore inédit), a enfin constaté que les produits en question n'avaient aucune action nocive sur les Protozoaires du sol.

6° C'est un fait depuis longtemps établi que les hyposulfites aussi bien que les polythionates sont facilement oxydés par les bactéries autotrophes du soufre. On pense dès lors tout naturellement à la possibilité d'une association entre ces bactéries oxydantes et les micro-organismes hétérotrophes solubilisateurs du soufre et producteurs d'hyposulfites et de polythionates. L'idée se défend d'autant plus aisément que de telles associations ont été effectivement réalisées par l'un de nous dans des cultures synthétiques dont nous avons rappelé le comportement vis-à-vis du soufre dès le début de cette étude.

### *En résumé,*

*L'évolution du soufre dans le sol présente un parallélisme frappant avec celle de l'azote, selon l'expression de Demolon.*

Grâce aux recherches de MM. Guittonneau et Keilling que nous venons de citer, nous savons que lorsqu'on met du soufre dans le sol, certaines bactéries autotrophes (rangées dans le groupe des « Thiobacillus ») peuvent l'attaquer, l'oxyder et le transformer en acide sulfurique, lequel, en présence de bases, donne des sulfates.

Certaines espèces microbiennes hétérotrophes de la florule zymogène l'attaquent également, l'oxydent et le transforment en acide hyposulfureux, ce qui donne des hyposulfites et des acides thioniques formant des polythionates. Mais, ces hyposulfites aussi bien que les polythionates sont oxydés peu à peu par des bactéries autotrophes du soufre et, au bout d'un temps plus ou moins long, se transforment en sulfates.

*Il y a association entre les bactéries oxydantes et les micro-organismes solubilisateurs du soufre et producteurs d'hyposulfites et de polythionates.*

*Les hyposulfites et les polythionates, composés incomplètement oxydés du soufre, ne sont que des produits intermédiaires; nous verrons plus loin le rôle important qu'ils jouent au point de vue antiparasitaire.*

## V. — Pour quelles raisons l'importance de l'emploi du soufre comme engrais a été si longtemps méconnue.

*Comment se fait-il que l'emploi de soufre comme engrais ne soit pas encore entré dans la pratique agricole au même titre que l'emploi des engrais azotés, phosphatés et potassiques?*

Si l'on s'est mal rendu compte jusqu'ici de l'importance de la question du soufre comme engrais, si l'on ne s'est pas encore aperçu d'une manière évidente de l'appauvrissement progressif des terres en soufre, « c'est d'abord, dit G. Bertrand, parce qu'on a manqué de chiffres précis touchant les besoins des plantes en soufre et la teneur des terres cultivées en ce métalloïde ; ensuite parce que, depuis environ un demi-siècle, on a introduit inconsciemment, dans le sol, à la suite d'un certain nombre de traitements chimiques, des quantités assez notables du corps qui nous occupe.

« En s'appuyant sur les données de la littérature scientifique actuelle ayant trait à la composition des végétaux, manquant, d'autre part, de la documentation nécessaire en ce qui concerne la terre arable, on a pu faire la supposition que les plantes n'ont pas un grand besoin de soufre et que les terres cultivées renferment toujours assez de sulfates et d'autres combinaisons voisines pour n'avoir point à s'en préoccuper.

« Une telle supposition est certainement loin de la vérité.

« Les teneurs en soufre des plantes que l'on peut calculer, à partir des chiffres parus jusqu'à ces dernières années, proviennent à peu près exclusivement d'analyses de cendres. Or, pendant la calcination, la plus grande partie du soufre organique est volatilisée à l'état de gaz sulfureux et, sous l'influence combinée du charbon et de l'oxygène, une partie du soufre des sulfates subit parfois le même sort : les chiffres de métalloïde trouvé dans les cendres sont toujours trop petits et conduisent à sous-estimer d'autant les besoins des espèces végétales en soufre.

« Si l'on ne s'est pas encore aperçu d'une manière évidente de l'appauvrissement progressif des terres en soufre, par suite de la culture intensive, c'est que depuis environ un demi-siècle on a souvent introduit inconsciemment des quantités assez importantes de soufre dans le sol, grâce à certaines pratiques agricoles.

« La principale de ces pratiques est l'adjonction des engrais artificiels et notamment des engrais chimiques au fumier de ferme. Le sang desséché, la poudrette et davantage la corne contiennent du soufre organique. Le sulfate de potassium et celui d'ammoniaque sont encore plus riches : jusqu'à 24 p. 100 dans le dernier. Les superphosphates peuvent être considérés comme des



mélanges de phosphates acides de calcium avec une grande quantité de sulfate du même métal (plus de la moitié de celui-ci) et il n'est pas **impossible** que, dans certains cas, leur supériorité sur les phosphates naturels tiennent à la présence concomitante du sulfate.

« *Le traitement de la chlorose de la vigne par le sulfate ferreux* n'est pas seulement un traitement par le fer, c'est aussi un traitement par le soufre. L'emploi, en d'autres circonstances, du *soufre en poudre* est d'abord utile à cause des propriétés parasitocides et antiseptiques de la substance mise en jeu et de ses produits de transformation, mais *il apporte ensuite au sol, lorsque l'oxydation du métalloïde est complète, une certaine quantité de sulfates*. Enfin la pratique récente de la destruction des mauvaises herbes par le procédé Rabat augmente aussi secondairement la teneur en sulfates de la terre. »

Il n'en est pas moins vrai que, dans bien des cas, l'insuffisance du soufre apporté par les engrais devait se faire sentir, car ainsi que nous le verrons page 34, on ne peut pas toujours apporter au sol des engrais azotés sous forme de sulfate d'ammoniaque ou des engrais potassiques sous forme de sulfate de potasse, en admettant que le sol manque de potasse, ce qui n'est pas toujours le cas.

Les manifestations de cette insuffisance pouvaient être une ammonification incomplète, une diminution peu apparente des rendements par suite du manque d'équilibre des éléments fertilisants.

Cette insuffisance se fera certainement sentir davantage si l'industrie des engrais, ainsi que l'a fait remarquer M. G. Bertrand, tend de plus en plus à « fabriquer des produits aussi concentrés que possible en azote, en phosphore et en potassium ne contenant, par exemple, que de l'urée et des sels résultant de la combinaison des acides azotique et phosphorique avec l'ammoniaque et la potasse » (voir p. 35).

### ***En résumé,***

*Si l'on ne s'est pas préoccupé de la question du soufre, c'est parce que :*

**1° l'on ne s'est pas bien rendu compte des besoins des plantes en soufre;**

**2° l'on manquait de chiffres précis sur la teneur des terres en soufre;**

**3° l'on introduisait dans le sol des engrais chimiques apportant sous forme de sulfates des quantités assez notables de soufre.**

## VI. — Sous quelle forme peut-on et doit-on employer le soufre?

*On peut se demander sous quelle forme il est possible d'employer le soufre, car, en effet, alors que le phosphore, le potassium, le calcium ou l'azote ne sont maniables qu'à l'état de sels, le soufre présente, quant à lui, cette particularité de pouvoir être employé tout aussi aisément sous sa forme simple de soufre en fleur qu'à l'état de combinaison sulfatée, c'est-à-dire sous forme de sulfates.*

Nous allons donc examiner l'emploi du soufre sous forme de sulfates et sous forme de soufre en fleur ou soufre sublimé.

### A. — EMPLOI DU SOUFRE SOUS FORME DE SULFATES.

Nous avons vu que, pendant longtemps, le soufre n'a été apporté aux plantes cultivées que sous forme de sulfates. C'est précisément l'apport au sol de certains engrais azotés, phosphatés et potassiques, sous forme de sulfates, qui a permis de ne pas trop épuiser le sol en soufre et de ne pas trop nous apercevoir de la répercussion d'un manque de soufre sur les rendements des récoltes.

MM. G. Bertrand et Silberstein ont même nettement démontré qu'un sel sous forme de sulfate non azoté, phosphaté ou potassique agit favorablement sur les récoltes à cause de son apport en soufre : dans une terre de l'Yonne particulièrement pauvre en soufre (0,114 p. 1000), ils ont augmenté de 83 p. 100 la récolte de graine de colza par addition de *sulfate de soude* à la fumure.

Certains expérimentateurs, en substituant au sulfate d'ammoniaque un mélange de nitrate et de sulfate de soude, ont pu montrer que la supériorité reconnue dans quelques cas au sel ammoniacal, ne provenait que de cette présence du soufre dans la molécule. »

On peut donc dire que les *engrais azotés, phosphatés et potassiques utilisés par les agriculteurs sous forme de sulfates* (ou qui contiennent des sulfates) *apportent du soufre aux plantes :*

*Le sulfate d'ammoniaque* apporte au sol, en plus de son azote, environ 22 p. 100 de soufre.

*Le sulfate de potasse* fournit en plus de la potasse, environ 18 p. 100 de soufre.

*Le superphosphate de chaux, engrais phosphaté le plus employé,* apporte au sol, outre son phosphore, 8 à 12 p. 100 de soufre provenant du plâtre ou sulfate de chaux qu'il contient.

Risler, il y a près d'un demi-siècle, à propos de l'importance de l'acide

sulfurique des terres arables sous forme de sulfates, avait émis l'opinion que les bons effets des superphosphates pouvaient être attribués, en partie, au soufre que cet engrais apporte sous forme de plâtre (sulfate de chaux).

On connaît d'ailleurs la célèbre expérience de Franklin montrant l'influence du plâtre sur le développement des légumineuses. De plus Dehérain montra plus tard que le plâtre ou sulfate de chaux a pour effet de mobiliser la potasse du sol et de favoriser son absorption par les racines des plantes.

*Le superphosphate de chaux est donc à la fois un engrais phosphaté et soufré.* Sans parler d'autres corps que le superphosphate contient en petites quantités : des phosphates de fer et d'alumine, du sulfate de magnésie, du fluorure de calcium et même des traces de manganèse, de bore, d'iode (20 milligrammes par kilogramme de superphosphate), de cuivre et de zinc... qui, nous l'avons vu, peuvent indirectement ou directement influencer favorablement le rendement, soit comme agents de nutrition, soit par leur influence sur l'immunité de la plante aux maladies.

Nous pouvons citer encore le *Crud d'ammoniac* contenant environ 4.0 p. no de soufre.

Tout cela a fait dire à G. Bertrand : « L'on **ne saurait oublier maintenant que pour obtenir de bonnes récoltes, les plantes doivent rencontrer dans le sol, à l'état naturel ou ajouté comme engrais, une proportion de soufre à l'état de sulfates aussi importante qu'elle du phosphore à l'état de phosphates.** »

#### B. — EMPLOI DU SOUFRE EN FLEUR OU SOUFRE SUBLIMÉ.

Nous avons signalé (p. 23) toute une série d'essais, d'expériences effectuées de 1909 à 1936 dans lesquelles on a employé comme engrais *le soufre sous sa forme simple de soufre en fleur et qui montrent que ce soufre augmente le rendement des plantes cultivées.*

Comment agit ce soufre?

Nous avons indiqué page 25 les recherches des différents savants sur l'évolution du soufre élémentaire dans la terre arable, recherches qui solutionnent cette question. *Rappelons seulement que, grâce à certaines bactéries oxydantes, le soufre, dans le sol, est oxydé puis transformé en acide sulfurique, lequel, en présence de bases, donne des sulfates.*

Certaines espèces microbiennes attaquent également le soufre, l'oxydent et le transforment en acide hyposulfureux et en acides thioniques qui donnent respectivement des hyposulfites et des polythionates.

Mais d'autres bactéries oxydent à leur tour ces hyposulfites et ces polythionates pour les transformer finalement, au bout d'un temps plus ou moins long, en sulfates.

*Un apport de soufre équivaut donc à un apport de sulfates. **Mais n'oublions pas qu'il y a formation de composés intermédiaires incomplètement oxydés du soufre** (hyposulfites et polythionates) dont le rôle est très important ainsi que nous le verrons pages 37 et 38.*

## VII. — Comparaison entre l'emploi du soufre sous forme de sulfates et sous forme de soufre en fleur ou soufre sublimé.

A. — Au POINT DE VUE PRATIQUE, ON NE PEUT PAS TOUJOURS UTILISER DU SOUFRE SOUS FORME DE SULFATES DANS UNE FORMULE DE FUMURE BIEN ÉQUILIBRÉE.

Certains engrais azotés, phosphatés et potassiques, apportant du soufre au sol sous forme de sulfates, quelques agronomes ont fait remarquer, qu'une formule d'engrais composés comprenant, par exemple, du sulfate d'ammoniaque, du superphosphate et du sulfate de potasse apportait aux plantes une quantité de soufre suffisante.

Ces agronomes calculent la quantité de soufre qui existe dans une récolte de plantes cultivées, la quantité de soufre que peuvent apporter les engrais sulfatés en question et ils montrent théoriquement que cette dernière dépasse même les besoins des plantes pour en déduire qu'elle est suffisante.

Rappelons ce que A.-Ch. Girard a dit à propos de ces calculs d'ordre théorique : « si on se basait uniquement sur la quantité absolue des éléments trouvés dans une récolte pour rechercher et appliquer les formules d'engrais, on serait souvent conduit à des erreurs ».

Il en est de même quand on fait l'analyse des sols et que l'on détermine les engrais devant fournir les éléments fertilisants qui leur manquent : la pratique montre que l'apport d'engrais chimiques donne souvent de bons résultats quand l'analyse chimique a révélé que le sol contient les éléments fertilisants en quantités suffisantes. Tous ces calculs d'ordre théorique « donnent rapidement d'utiles renseignements, fait remarquer A.-Ch. Girard, mais il faut se garder de leur attribuer le caractère rigoureux qu'ils ne comportent pas ».

Les faits sont là pour le démontrer :

I<sup>o</sup> Des expériences ont montré *qu'en général, si on emploie les formules habituelles d'engrais que la pratique a indiquées, en utilisant deux des trois engrais ou même les trois engrais (azotés, phosphatés et potassiques) sous forme de sulfates une addition de soufre augmente souvent les rendements.*

D'ailleurs, peut-on toujours employer dans une formule de fumure équilibrée des engrais azotés, potassiques, phosphatés sous forme de sulfates ou contenant des sulfates? Pour les engrais azotés les agriculteurs ne peuvent pas toujours utiliser le sulfate d'ammoniaque. Ils sont obligés, dans certains cas, d'employer d'autres engrais azotés notamment les nitrates (nitrate de soude, nitrate de chaux, etc.) qui ne contiennent pas de soufre.

On sait, en effet, pour ne citer qu'un exemple, que l'emploi des nitrates

s'impose toutes les fois que l'on veut obtenir une action presque immédiate sur la végétation.

*Pour les engrais potassiques*, le sulfate de potasse apporte du soufre au sol, c'est entendu. Mais les agriculteurs vont-ils laisser de côté le chlorure de potassium et la sylvinite, engrais potassiques d'un prix moins élevé qui donnent aussi d'excellents résultats?

*Pour les engrais phosphatés*, au contraire, on peut toujours utiliser le superphosphate de chaux, le seul engrais phosphaté qui, outre son acide phosphorique soluble dans l'eau, contienne du soufre sous forme de sulfate de chaux, car, nous dit M. Lenglen, « il est l'engrais phosphaté le plus capable de donner rapidement au sol le maximum d'aptitude à produire de grosses récoltes. C'est par excellence l'engrais phosphaté des cultures intensives. »

Mais, il faut bien reconnaître que, si l'on peut toujours faire entrer le superphosphate de chaux dans une fumure équilibrée, la quantité de soufre qu'il apporte, bien qu'appréciable, n'est cependant pas, à elle seule, suffisante.

2° Nous connaissons d'une manière générale les besoins des plantes en soufre, mais *nous ne pouvons pas dire que telle ou telle formule d'engrais comprenant des sulfates apporte, a priori, une quantité de soufre suffisante*. En effet, les sulfates qui nous occupent *sont solubles dans l'eau, d'où pertes dans les eaux de drainage à l'exception du sulfate de potasse retenu par les propriétés absorbantes des terres pourvues de calcaire*.

*Müntz et Girard, dans leur « Traité sur les Engrais », dès 1887, nous ont fait remarquer que les sulfates sont rapidement enlevés par les eaux de drainage et qu'ils subissent des déperditions continues s'opposant à leur accumulation.*

D'autre part, la quantité de sulfates nécessaire est fonction de la quantité de soufre contenue dans le sol. Or, M. G. Bertrand nous a montré que *la présence du baryum dans les terres pouvait insolubiliser une partie importante des sulfates du sol et, par conséquent, la rendre inutilisable par les plantes.*

*En résumé,*

***Dans la pratique, on ne peut vraiment, pour apporter du soufre aux plantes en quantité suffisante, employer toujours comme engrais chimiques azotés, phosphatés, potassiques soit le sulfate d'ammoniaque, soit le superphosphate, soit le sulfate de potasse.***

Au surplus, l'industrie des engrais chimiques n'a-t-elle pas une tendance à livrer des engrais plutôt concentrés desquels sont précisément éliminés des sulfates et par conséquent du soufre?

**M. G. Bertrand** appelle notre attention sur ce point : « La tendance actuelle de l'industrie des engrais chimiques, dit-il, est de fabriquer des produits aussi concentrés que possible en azote, en phosphore et en potassium, ne contenant, par exemple, que de l'urée et des sels résultant de la combinaison des acides azotique et phosphorique avec l'ammoniaque et la potasse, de manière à ne pas grever le prix de transport des produits fertilisants de

celui des matières inertes, ou supposées inertes, qui les accompagnent dans la plupart des engrais antérieurement en usage (superphosphates, salpêtre du Chili, sulfates et chlorures alcalins, scories, cyanamide, etc.). Cette tendance est rationnelle, mais l'agriculteur ne doit pas oublier qu'elle conduit à la disparition, dans les nouvelles formules d'engrais chimiques, de corps dont l'utilité pour le développement des plantes n'est pas moins nécessaire que celle des trois éléments conservés, Il agira donc sagement, dans bien des cas, en ajoutant tout au moins une certaine proportion de sulfate d'ammoniaque ou de potassium, voire de sulfate de calcium (sous la forme de pierre à plâtre ou d'anhydrite) aux engrais chimiques concentrés, mais incomplets, que lui procure le commerce. »

*Si les agriculteurs sont obligés d'ajouter du sulfate de calcium ou plâtre à ces engrais aussi concentrés que possible, où sera le bénéfice de cette concentration? Dans ces conditions n'est-il pas préférable d'ajouter du soufre sublimé?*

B. — LE SOUFRE, SOUS SA FORME SIMPLE DE SOUFRE EN FLEUR OU SOUFRE SUBLIMÉ, EST PRÉFÉRABLE AU SOUFRE SOUS FORME DE SULFATES, PARCE QU'IL MOBILISE DES ÉLÉMENTS UTILES AUX PLANTES.

1° *Quand on apporte au sol du soufre sous forme de sulfates on ne met, en général, à la disposition des plantes, en plus du soufre, qu'un seul élément minéral plus ou moins utile.*

Par exemple, du calcium si l'on utilise du plâtre ou sulfate de calcium; du calcium encore si l'on utilise du sulfate d'ammoniaque dans un terrain plus ou moins calcaire, puisqu'il y a double décomposition du sulfate d'ammoniaque et du carbonate de calcium avec formation de carbonate d'ammoniaque et de sulfate de calcium; du potassium si l'on utilise de sulfate de potasse, et, en outre du calcium, si le sol est calcaire, puisqu'il y a double décomposition du sulfate de potassium et du carbonate de calcium avec formation de carbonate de potassium et de sulfate de calcium.

2° *Quand on apporte au sol du soufre sous sa forme simple de soufre en fleur, il s'oxyde, se transforme finalement en acide sulfurique ainsi que nous l'avons vu. Mais cet acide sulfurique naissant s'empare en quelque sorte de différents éléments minéraux qui se trouvent dans le sol pour former des sulfates (sulfates de potasse, de calcium, d'alumine, de fer, de manganèse, etc.), lesquels mettent à la disposition des plantes, en plus du soufre et sous une forme assimilable bon nombre d'éléments minéraux pouvant avoir une influence heureuse sur la biologie des plantes. On exprime cette action importante du soufre en disant : le soufre sublimé mis dans le sol mobilise des éléments utiles aux plantes. Cette mobilisation a été souvent signalée, nous n'en donnerons que quelques exemples :*

a) M. Power, de l'Université de Berkley (Californie), constate que la solubilisation du fer, résultant de l'action mobilisante du soufre sur le fer, intensifie la formation de la chlorophylle comme par une pulvérisation d'un sel ferrique sur les jeunes plantes atteintes de chlorose.

b) Brioux et Guerbet ont recherché en 1913 la composition des dissolutions

du sol avant et après l'oxydation de soufre, dans une terre de jardin silico-calcaire et dans une terre de limon des plateaux non calcaires. « Pour la terre de jardin renfermant 6 p. 100 de carbonate de chaux, l'acide sulfurique produit aux dépens du soufre se fixe presque exclusivement sur la chaux du carbonate. »

En ce qui concerne les autres éléments du sol dissous par l'eau, ils ne constataient d'augmentation que pour la potasse; on connaît d'ailleurs, depuis les recherches de Débérain, l'action du sulfate de chaux sur la potasse du sol.

« Mais les résultats sont très différents pour les dissolutions extraites de la terre de limon des plateaux ne renfermant que 2 p. 100 de chaux totale. *L'acide sulfurique s'empare d'abord de la partie la plus mobilisable de la chaux, de celle qui est combinée à l'acide carbonique et aux humates, puis l'excès d'acide solubilise d'autres substances telles que la potasse, l'oxyde de fer et alumine et même le manganèse.* »

On peut ajouter : il est possible que l'acide sulfurique solubilise encore d'autres métaux plus ou moins rares non décelés par l'analyse et qui sont susceptibles d'avoir une heureuse influence sur la vie des plantes.

« On admet, dit *M. Goujon*, que le soufre, s'oxydant, se transformerait en acide sulfurique, lequel mobiliserait, à l'usage du végétal, de nouvelles quantités de *potasse, d'alumine, de fer, de manganèse*. Ceci constituerait la transformation étudiée par Brown et ses collaborateurs sous la dénomination *de sulfocification*. »

***L'apport de soufre sublimé au sol présente donc des avantages sérieux.*** Mais, a-t-on fait remarquer, « le soufre, se transformant dans le sol en acide sulfurique, peut au bout de quelques années, dans les terres dépourvues de calcaire ou carbonate de chaux, arriver à acidifier la réaction du sol au détriment de sa fertilité ».

Sans doute, si l'on enfouissait chaque année dans le sol de grandes quantités de soufre dans les terrains dépourvus de calcaire, les terres deviendraient trop acides. Mais, si dans ces terres on ne dépasse pas la dose de 100 à 200 kilogrammes par hectare, ce qui représente 10 à 20 grammes de soufre par mètre carré (étant donné qu'il se forme au fur et à mesure des sulfates de potasse, de fer, d'alumine, de manganèse, de magnésie, etc., solubles dans l'eau et susceptibles d'être en partie absorbés par les plantes ou entraînés par les eaux de drainage), nous estimons que cette acidité est négligeable.

D'ailleurs, depuis près d'un siècle, sur des vignes en terrains granitiques complètement dépourvus de chaux, on a répandu, chaque année comme traitement anticryptogamique (oïdium, etc.), environ 100 kilogrammes de soufre par hectare, dont une grande partie tombe sur le sol. On ne s'est jamais aperçu que des arbres (pêchers, etc.) cultivés dans ces vignes, ou encore certaines cultures intercalaires aient eu à souffrir d'un excès d'acidité.

C. — **LE SOUFRE EN FLEUR DANS LE SOL N'AGIT PAS SEULEMENT COMME ENGRAIS, IL EXERCE DES ACTIONS MICROBIENNES IMPORTANTES ET BIENFAISANTES.**

« Boullanger et Dugardin<sup>7</sup> établirent nettement en opérant sur la terre elle-même que, dans ce milieu naturel, enrichi ou non de matières organiques azotées, la présence du soufre favorisait l'ammonisation. »

Boullanger, Demolon, Brioux, Guerbet et Vogel ont démontré que *le*

soufre augmente l'activité de certains éléments microbiens, ce qui explique qu'en sa présence *nitrification* et *ammonisation* sont notablement activées.

« L'humidité, l'aération et la température influencent cette oxydation du soufre d'autant plus lente que l'aération est plus défectueuse et la température plus basse.

« L'addition de matières hydrocarbonées, de nitrate de soude ou de carbonate de chaux exerce une action *déprimante*, tandis que celle de matières organiques azotées est favorisante au contraire. » (Goujon.)

C'est ce qui explique que l'apport de soufre sublimé dans les terres très riches en matières organiques azotées, terre de cultures maraîchères (hortillonnages de la Somme), produit des effets remarquables ainsi que l'indique M. Joret (Rapport sur le fonctionnement de l'Institut des Recherches agronomiques en 1932) à la suite de ses expériences de 1924, 1925 et 1932. En 1933, « l'apport du soufre en fleur a donné, dit-il, les rendements les plus élevés en pommes de terre, bien que les doses des trois éléments ajoutés (azote, acide phosphorique et potasse) aient été réduites de moitié. Le soufre seul a augmenté de 15 à 20 p. 100 le poids de l'ail, des échalotes. Ces résultats confirment ceux déjà obtenus en sol analogue en 1924 et 1925 sur pommes de terre, poireaux, carottes.

« L'action du soufre dans ces sols est avant tout une action indirecte qui favorise l'ammonisation et par suite la nitrification et enfin l'assimilation des diverses réserves du sol. Il favorise aussi la synthèse de la chlorophylle, comme l'indique la coloration verte beaucoup plus intense du feuillage sur les parcelles soufrées. »

C'est ce qu'avaient déjà démontré Mazé et Demolon. Le soufre interviendrait donc, indirectement du moins, pour activer la fixation du carbone et la formation de l'amidon.

Boullanger, en 1912, avait d'ailleurs remarqué dans ses expériences que le système foliacé, dans les parcelles soufrées, présentait une teinte d'un vert plus *foncé*.

Mazé et Demolon ont montré que, privée de soufre, la plante ne peut plus synthétiser sa chlorophylle et que la chlorose sévit dans les sols sans soufre.

Dans toutes nos expériences, aussi bien celles de 1911, de 1912, que celles faites en 1933 dans certaines *Écoles* d'Agriculture, année pendant laquelle la sécheresse a été grande, les plantations des parcelles soufrées, en pleine végétation, étaient d'un beau vert, alors que celles des parcelles non soufrées étaient d'un vert jaunâtre, nous obligeant de conclure, comme Chauzit en 1921, que « le soufre exerce une action très nette et donne des plantes à la fois plus robustes et plus résistantes à la sécheresse ».

#### D. — LE SOUFRE SUBLIMÉ DANS LE SOL AGIT NON SEULEMENT COMME MODIFICATEUR DE LA FLORE MICROBIENNE, MAIS AUSSI COMME ANTI-PARASITAIRE.

Nous avons vu page 29 que le soufre dans le sol s'oxyde et se transforme peu à peu en acide sulfurique pour donner des sulfates divers, mais avec



formation de **produits intermédiaires d'oxydation, acide hyposulfureux et acides thioniques donnant des hyposulfites et polythionates, agents antiparasitaires.**

1° Les agronomes américains W. H. Martin et A. W. Blair, ainsi que W. Roach et Mary D. Glynn ont pu récemment montrer que l'acide hyposulfureux, résultant de l'oxydation incomplète du soufre dans le sol, agit comme *agent de destruction des sporanges d'hiver du Synchitrium endobioticum produisant la gale noire ou maladie verruqueuse de la pomme de terre.*

**En Suisse, Neuweiler a obtenu, grâce au soufre, une diminution dans l'intensité d'attaque par le Synchitrium endobioticum.**

Nous n'ignorons pas qu'actuellement la meilleure méthode pour combattre cette maladie est l'emploi des variétés résistantes de pommes de terre; c'est ce que font les Anglais et ce que font en France avec succès M. Ducomet et M. Foex, directeur de la Station centrale de Pathologie végétale. Mais la question de l'action du soufre sur la maladie verruqueuse de la pomme de terre n'est pas complètement réglée. En effet, en avril 1935, les conclusions générales de Miss Mary Clynn de la Station expérimentale anglaise de Rothamsted étaient les suivantes : « Les applications de soufre, variant en quantité suivant les différents types de sols, ont presque éliminé la maladie. L'élimination complète n'a pu être effectuée, probablement parce qu'il a été difficile de mêler intimement le soufre avec le sol. Le traitement tendait à réduire la récolte suivant immédiatement l'application du soufre, mais aucun effet délétère n'a été constaté sur la récolte de l'année suivante sur terrain léger à Ormskirk.

« Il paraît probable que l'on pourrait arriver à éliminer la maladie, en mélangeant consciencieusement le soufre avec le sol, mais on ne pourrait pas effectuer un tel traitement sur une large échelle, en raison du travail que cela nécessiterait. La meilleure méthode de combattre la maladie serait d'employer des variétés résistantes de pommes de terre, excepté peut-être dans le cas de très petites parcelles où le soufre pourrait être mis à l'épreuve. »

Pour certains expérimentateurs, l'idée qui a prévalu est *la désinfection du sol* en employant du soufre à des doses élevées jusqu'à 500 grammes par mètre carré et alors ils ont constaté que « la plante ne poussait plus ». Cela n'a rien d'étonnant, car 500 grammes par mètre carré font 5 000 kilogrammes de soufre à l'hectare... et les agriculteurs savent très bien que, s'ils mettaient en une seule fois des doses d'engrais aussi formidables, par exemple, 5 000 kilogrammes de nitrate de soude, ou de sulfate de potasse, etc., le résultat serait déplorable.

Nous pensons que des doses très élevées de soufre sont inutiles et même nuisibles pour lutter contre les maladies bactériennes. Comme c'est surtout par la formation lente des produits intermédiaires d'oxydation du soufre (hyposulfites, etc.) que ce corps agit au point de vue microbien, c'est moins par les doses massives, que par son action continue, que le soufre peut donner des résultats favorables. Des essais à des doses ne dépassant pas 300 à 400 kilogrammes de soufre par hectare sont à effectuer.

2° Nous avons constaté dans nos expériences de 1910 que *le soufre dans*

*le sol avait une action très nette sur la destruction de la pourriture humide des pommes de terre* : les pommes de terre indemnes dans les parcelles soufrées étaient en plus grand nombre et plus grosses.

Boullanger, en 1912, avait fait des remarques du même genre.

3° Les expériences faites par M. Girardin, professeur d'agriculture, et par l'École d'Agriculture de Contamine-sur-Arve on't montré *qu'il suffit d'un kilogramme de soufre sublimé par 1000 kilogrammes de pommes de terre conservées en tas pour garantir ces tubercules contre la pourriture ordinaire* alors que dans bon nombre d'ouvrages on indique qu'il faut 5 kilogrammes de soufre ou 5 kilogrammes de chaux.

4° On sait que M. Demolon, dans une note relativement récente présentée à l'Académie d'Agriculture, a montré que la durée limitée des cultures de légumineuses est due à un *bactériophage* réduisant considérablement la production des nodosités sur les racines et le développement des bactéries fixatrices d'azote. *Le bactériophage présent dans le sol est susceptible de passer dans la plante.*

« Le phénomène de la fatigue du sol constaté dans la culture de la luzerne, dit-il, peut être interprété à l'aide de nos observations. A partir du moment où le bactériophage a diffusé dans toute la masse exploitée par les racines, on observe le déclin de l'activité fixatrice de la plante à l'égard de l'azote atmosphérique. Cet état de choses ne se produit pas avant la fin de la seconde année, époque où le système racinaire atteint son maximum d'expansion.

« C'est précisément la durée souvent assignée aux luzernières en agriculture intensive. On s'explique enfin que le sol demeure impropre à un nouveau développement de la légumineuse, jusqu'à la disparition du bactériophage qui s'y est accumulé. »

Nous pensons que *le soufre mis dans le sol a une action sur le bactériophage de la luzerne, grâce à ses produits intermédiaires d'oxydation (hyposulfites, etc.)*. Lors de nos expériences de 1910 et 1911 concernant l'action du soufre sur les cultures et plus tard dans d'autres expériences, nous avons remarqué que *le soufre sublimé exerçait une influence importante sur la luzerne*: dans la parcelle soufrée la luzerne restait plus longtemps vigoureuse alors que dans la parcelle témoin la luzerne commençait à périr au bout de 2 ans. Nous avons, à tort, attribué ce résultat à ce que le soufre, augmentant l'activité de certains éléments microbiens, la nitrification et l'ammonisation se faisaient mieux, prolongeant ainsi l'existence de la luzerne. Les recherches de M. Demolon nous ont permis une nouvelle interprétation plus logique. Nous conseillons de faire des essais qui nous fixeront au sujet de l'action du soufre sur la vie prolongée de la luzerne; nous savons, d'après les travaux de Boullanger et Dugardin, que le soufre n'a pas d'influence sur les bactéries fixatrices d'azote : dès la première année, avant de semer, mettre dans le sol 200 kilogrammes de soufre à l'hectare, dose qui *n'empêche* pas la formation des nodosités contenant les bactéries fixatrices d'azote (*B. radicola*), mais qui peut empêcher l'invasion de ces nodosités par le bactériophage présent dans le sol.

*En résumé,*

**1°** *Le soufre peut être employé sous deux formes : sous sa forme simple de soufre en fleur et sous la forme de sulfates.*

**2°** *Au point de vue pratique, on ne peut pas toujours utiliser le soufre sous forme de sulfates dans une formule bien équilibrée.*

**3°** *Le soufre sous sa forme simple de soufre en fleur est préférable au soufre sous forme de sulfates parce qu'il mobilise des éléments utiles aux plantes.*

**4°** *Le soufre en fleur dans le sol n'agit pas seulement comme engrais, mais comme modificateur de la flore microbienne et comme antiparasitaire.*

Nous ajoutons :

*L'emploi préférable du soufre, sous sa forme simple de soufre sublimé, n'implique pas qu'il ne faut pas employer les engrais sulfatés toutes les fois que cela est possible, bien au contraire.*

*Il est incontestable que l'emploi d'engrais azotés, phosphatés ou potassiques, sous forme de sulfates ou contenant des sulfates, permet de diminuer la dose de soufre en fleur à employer.*

## V111. — Le soufre en horticulture.

### A. — SON EMPLOI COMME ENGRAIS.

*Tout ce que nous avons dit du soufre employé en agriculture comme engrais s'applique d l'horticulture.*

C'est en horticulture surtout que les résultats favorables obtenus dans l'emploi du soufre comme engrais sont indiscutables. On le comprend sans peine : les terres de jardin, en effet, sont généralement riches en matière organique azotée et nous avons vu page 38, à propos des essais de M. Joret dans les terres de cultures maraîchères (hortillonnages de la Somme), combien les résultats sont intéressants.

Si nous reparlons, à propos de l'horticulture, de l'emploi du soufre comme engrais, c'est pour mettre en garde les horticulteurs sur les doses exagérées de soufre qu'ils pourraient peut-être employer en culture maraîchère. Sans doute, les horticulteurs se rappellent les mauvais résultats obtenus lorsqu'on a commencé à utiliser les différents engrais chimiques : quand on recommandait, par exemple, d'employer en agriculture zoo kilogrammes de nitrate de soude à l'hectare, ce qui fait 20 à 25 grammes par mètre carré, les horticulteurs, qui opéraient sur des planches de quelques mètres carrés, estimaient que 20 à 25 grammes par mètre carré paraissaient bien insuffisants et avaient une tendance à quintupler la dose, d'où les mauvais résultats obtenus au début.

Nous pensons qu'il ne faut pas dépasser 250 à 300 kilogrammes de soufre par hectare soit 25 à 30 grammes par mètre carré.

*MM. Joret et Malterre*<sup>1</sup>, à propos de leurs expériences en 1933 concernant l'action du soufre en sols tourbeux, disent : « Dans ces sols tourbeux où la matière organique se décompose mal, un apport de soufre seul (200 kg. par Ha.) a donné des excédents de rendement de 10 à 15 p. 100. En présence d'une fumure complète, cet excédent est considérablement réduit.

« La première action du soufre est sans doute de nature microbienne et il y a alors entre les micro-organismes et les éléments fertilisants un antagonisme qui se traduit par un retard dans l'absorption normale de l'azote. Cette action, d'abord légèrement retardatrice, se montre favorable au contraire plus tard par une meilleure utilisation de tous les éléments.

« Il convient sans doute d'utiliser le soufre de bonne heure et de l'associer à une fumure réduite. »

L'utilisation du soufre en culture maraîchère n'est pas nouvelle : il y a une quarantaine d'années, nous avons vu dans la région viticole de l'Ardèche,

<sup>1</sup>. Extrait du Rapport sur le fonctionnement de l'Institut des Recherches agronomiques pendant l'année 1933.

quelques agriculteurs mettre de petites quantités de soufre dans les lignes de haricots et de petits pois de leur jardin; ils nous disaient obtenir de très bons résultats provenant de la mise en fuite des insectes. Plus tard nous avons constaté que le soufre jouait le rôle d'engrais; et actuellement nous croyons qu'il joue à la fois le rôle d'engrais et d'antiparasitaire contre les bactériophages des bactéries fixatrices d'azote des légumineuses. M. Girardin, professeur d'agriculture, a vu lui aussi depuis longtemps employer de petites quantités de soufre dans les cultures de haricots en jardin et obtenir de bons résultats.

En horticulture, comme en agriculture, le soufre doit être associé aux autres engrais habituellement utilisés (engrais azotés, phosphatés, potassiques), dans une formule bien équilibrée.

#### B. — SON EMPLOI POUR FAVORISER LA FLORAIISON ET LA FRUCTIFICATION DES ARBRES FRUITIERS.

Nous rappelons que Marès, en 1858, avait constaté que le soufre répandu sur les arbres fruitiers, comme sur la vigne, à l'aide de soufreuse, « favorise la floraison et la fructification d'un grand nombre d'arbres fruitiers, notamment du prunier, du cognassier, du poirier, du pommier, etc., « indépendamment de l'aptitude du soufre à combattre certaines maladies (oïdium, etc.) ».

Pacottet, en 1905, à propos de la vigne, disait : « on a constaté souvent que le millerandage est très atténué par un soufrage pratiqué au moment de la floraison. Pour expliquer cette action réelle et bienfaisante, on a pensé que le soufre agissait sur la fleur en la maintenant dans une atmosphère sèche ou que l'acide sulfureux ou autre gaz, dégagés par ce corps, provoquaient la fécondation. Il n'en est rien. Le soufrage agit par le courant d'air violent du soufflet, qui aide au décapuchonnage des fleurs et projette sur celles-ci, et dans l'atmosphère, le pollen des anthères. Le pollen ainsi mis en mouvement s'attache aux stigmates et assure la fécondation. Le soufrage des variétés coulardes au moment de leur floraison est donc à recommander. »

En 1907, 1908 et 1909, à l'École de Viticulture de Beaune, nous avons voulu vérifier si le soufrage agissait sur le millerandage seulement par le courant d'air violent du soufflet. Des essais comparatifs avec le soufflet sans soufre et avec soufre sublimé nous ont montré que c'est le soufre qui agit et non pas seulement le courant d'air violent du soufflet.

À la même époque, à l'École de Beaune, nous avons suivi les conseils de Marès et nous avons parfaitement constaté l'action favorable du soufre sur la fructification des arbres fruitiers. Des horticulteurs peuvent facilement faire des essais de ce genre.

#### C. - SON EMPLOI COMME ANTICRYPTOGAMIQUE.

Nous avons vu, pages 37 et 38, que le soufre en fleur agit non seulement comme engrais, mais qu'il exerce en plus deux autres rôles importants :

1° *Il agit comme modificateur de la flore microbienne, l'ammonisation* et la

-nitrication sont notablement activées par lui, la *synthèse de la chlorophylle* se fait mieux, etc.

2° Il agit comme *antiparasitaire* ou plutôt comme *anticryptogamique* pour lutter contre certaines maladies (gale noire ou maladie verruqueuse de la pomme de terre, la pourriture humide de la pomme de terre, etc.).

*C'est surtout en horticulture que le soufre en fleur joue un rôle de premier plan comme anticryptogamique.*

Il est depuis longtemps très employé notamment contre les *oïdiums* qui attaquent de nombreuses plantes cultivées : la vigne, les arbres fruitiers (pommier, prunier, pêcher), le houblon, la chicorée, le chou, le navet, le panais, le tabac, le groseillier, le fraisier, le rosier, etc.

M. Foex reconnaît que les *oïdiums*, bien que faisant partie d'un groupe très homogène, comprennent malgré tout des parasites biologiquement assez différents les uns des autres. Ces champignons n'hivernent pas tous de la même façon. D'autre part, la phase végétative des différents *oïdiums* est assez variable, de sorte que les époques d'application des traitements à effectuer doivent être forcément en rapport avec le rythme de cette phase végétative.

Il est bien possible que les variations de réussite des traitements dépendent aussi de la forme du soufre employé, de son état de pureté, des transformations que subit le soufre en fonction de la température, de l'humidité, etc.

« D'après les récentes recherches effectuées dans les laboratoires du professeur Petri, à Rome, le soufre pur sublimé donne à l'eau une réaction fortement acide (pH = 3,0), le soufre pur ventilé une réaction faiblement acide (pH = 6,8), les soufres gris une réaction alcaline (pH = 7,7) (les soufres gris contiennent 45 p. 100 de carbonate de chaux, 5 p. 100 de carbonate de magnésie, 5 p. 100 de sulfate de chaux).

« C'est le soufre sublimé, le plus acide (pH = 3,0), qui montre le plus grand pouvoir anticryptogamique (inhibition de la germination des spores de *Puccinia glumarum*). Le soufre gris basique étant le moins efficace. »  
Tolites choses égales d'ailleurs le soufre paraît d'autant plus actif et plus économique qu'il est plus divisé.

#### D. — COMMENT AGIT LE SOUFRE.

*L'action du soufre comme anticryptogamique peut être attribuée à son contact, à l'hydrogène sulfuré, à l'anhydride sulfureux, aux acides thiosulfuriques et pentathioniques.*

Une température ambiante comprise entre 20° et 25° est nécessaire pour obtenir de bons résultats; à une trop haute température, 38° à 40°, on risque de brûler les végétaux traités.

a) *A son contact.* -- Le soufre solide, ayant une tension de vapeur appréciable, émet des vapeurs de soufre qui peuvent diffuser et pénétrer dans les spores situées à quelque distance. On conçoit que la finesse et la légèreté du soufre employé aient de l'importance.

b) *A l'hydrogène sulfuré.* -- Dès 1862 Pollaci montrait que certains organes végétaux vivants peuvent réduire le soufre avec production d'hydrogène sulfuré : il constatait, par exemple, que les feuilles de vignes soufrées dégagent de l'hydrogène sulfuré, et noircissent le papier à l'acétate de plomb.

« Plus tard, en 1888, Rey Pihade invoquait la présence, dans les cellules de levure et dans diverses cellules animales ou végétales, d'une substance capable de réduire le soufre en hydrogène sulfuré, et qu'il nommait philothion.

« Mais, ce n'est qu'en 1921 qu'Hopkins a pu isoler le glutathion identique au philothion qui est un tripeptide de la glycine, de l'acide glutamique et de la cystéine.

« Les feuilles jeunes et en voie d'active croissance (au moins chez certaines plantes et en particulier chez le fraisier) excrètent par les stomates une substance capable de réduire le soufre en hydrogène sulfuré, les iodures en iode métallique, et le chlorure ferrique en sel ferreux. Par exemple, de jeunes feuilles de fraisier soufrées, puis emprisonnées entre deux feuilles de papier à l'acétate de plomb impriment rapidement en noir, sur le papier, l'empreinte de leur face inférieure.

« C'est à cette réduction du soufre en hydrogène sulfuré que Barker attribue l'effet fongicide des soufrages : le contact du soufre et des cellules vivantes est nécessaire, mais il suffit de traces de soufre : 0 mg. 05 par centimètre carré suffisent à préserver des feuilles contre certains champignons. »

Dans ce cas encore la finesse et la légèreté du soufre ont une grande importance, afin que les poudrages envoient du soufre sur toutes les parties des feuilles.

c) *A l'anhydride sulfureux, aux acides thiosulfuriques et pentathioniques.* — Pendant longtemps on a cru que le soufre agissait grâce à la production d'acide sulfureux (anhydride sulfureux), le soufre s'oxydant soit lorsqu'il est en particules très fines baignées par l'oxygène de l'air à une certaine température, soit lorsqu'il est à l'état de vapeur comme nous l'avons indiqué ci-dessus.

Plus tard, certains savants ont admis que le soufre exerçait son action fongicide grâce aux composés oxygénés du soufre de la série thionique (dithionique, trithionique, tétrathionique et pentathionique.)

D'autres savants admirent aussi que le soufre paraissait devoir son pouvoir anticryptogamique à un dégagement d'acide sulfurique à l'état naissant résultant de l'action de l'oxygène de l'air et de l'humidité sur l'anhydride sulfureux dont nous avons parlé plus haut (d'après M. Dufrénoy).

Nous pensons que l'action du soufre peut être attribuée à la fois à son contact, à l'hydrogène sulfuré et principalement à ses composés oxygénés (acides thiosulfuriques et pentathioniques), action favorisée par les agents atmosphériques (air, chaleur, lumière, etc.).

Au point de vue pratique, ce qu'il faut retenir, pour obtenir le meilleur résultat, c'est que le soufre à employer est d'autant plus actif qu'il est plus léger, plus fin et plus facilement susceptible de s'oxyder. Ces caractères se révèlent particulièrement dans la *fleur de soufre sublimé*.

La fleur de soufre est, en effet, caractérisée : 1° par sa légèreté et sa finesse qui lui permettent de pénétrer sur toutes les parties des organes à protéger; 2° par sa grande facilité d'oxydation résultant d'abord de sa forme utriculaire qui lui donne le maximum de surface soumise à l'action de l'air, et ensuite par l'enveloppe amorphe de ses utricules beaucoup plus facilement oxydable que le soufre cristallisé. C'est ce qui explique la supériorité de la fleur de soufre sublimé par rapport à tout autre soufre dans le traitement de l'oïdium. L'emploi du soufre en fleur est trop connu des viticulteurs et des horticulteurs pour que nous insistions.

## APPENDICE.

*L'emploi des soufres mouillables mélangés à un sel de cuivre* (sulfate, hydrate, **oxychlorure** de cuivre), pour les traitements mixtes contre l'oïdium et le mildiou est également connu. On a compté qu'intercalé entre les sulfatages liquides, il donne d'excellents résultats.

On sait qu'à côté des traitements liquides au sulfate de cuivre contre le mildiou, il est nécessaire de pratiquer des traitements par *poudrages*. Aussi a-t-on fabriqué des poudres cupriques que l'on a mélangées tout d'abord à des matières inertes en poudre (talc ou stéatite). Plus tard, on a eu l'idée de substituer à ces poudres inertes du *soufre mouillable* et l'on a eu des *soufres mouillables mélangés* d'un *sel de cuivre employés en poudrages*. De sorte que le viticulteur, en effectuant le traitement complémentaire contre le mildiou, effectue en même temps un traitement contre l'oïdium.

*Emploi du soufre comme insecticide.* — Le soufre exerce une action insecticide peu connue et cependant réelle. Mais nous convenons que cette action se fait sentir surtout lorsque les soufres mouillables sont mélangés de nicotine, de naphthaline et d'autres produits insecticides tels que le fluosilicate de baryum, etc.

Les poudrages au soufre mouillable nicotine, par exemple, donnent d'excellents résultats contre les pucerons, chenilles de différents insectes.



## TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS .....	3
VOLUTION DANS L'EMPLOI DES ENGRAIS.	
I. — Le problème de la fertilité du sol n'est pas résolu. Nécessité d'un équilibre entre le végétal et le sol au point de vue des éléments nécessaires à la plante .....	5
II. — « Les éléments secondaires jouent dans l'alimentation des plantes un rôle comparable aux vitamines dans l'alimentation humaine ». (Lawrence Baker.) .....	10
LE SOMME.	
I. — Toutes les plantes contiennent du soufre qu'elles prennent dans le sol en quantités d'autant plus grandes que la culture est plus intensive.....	16
II. — Insuffisance de la quantité de soufre dans la plupart des sols, ceux-ci s'appauvrissant d'autant plus en cet élément que la culture est plus intensive .....	20
III. — Nécessité d'apporter aux terres le complément de soufre nécessaire .....	22
IV. — Les recherches faites pour expliquer comment le soufre élémentaire se transforme dans le sol et agit sur les plantes. . . .	26
V. — Pour quelles raisons l'importance de l'emploi du soufre comme engrais a été si longtemps méconnue .....	30
VI. — Sous quelle forme peut-on et doit-on employer le soufre? . .	32
VII. — Comparaison entre l'emploi du soufre sous forme de sulfates et sous forme de soufre en fleur ou soufre sublimé .....	34
VIII. — Le soufre en horticulture .....	42

**BRODARD & TAUPIN**  
COULOMMIERS-PARIS  
(France)  
**24029-4-1936.**



***Prix: 8 fr.***