

Principes et conditions d'emploi des oligo-éléments essentiels en agriculture ⁽¹⁾

par

J. LAVOLLAY

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE NATIONAL
DES ARTS ET MÉTIERS

Il n'y a guère plus d'une centaine d'années que l'on connaît l'importance fondamentale pour la vie des végétaux des matières minérales qui constituent leurs cendres et sont empruntées au milieu, particulièrement au sol.

LIEBIG avait conseillé de faire l'analyse minérale des récoltes afin de savoir quelles sont les quantités d'éléments enlevées au sol et, par conséquent, afin de savoir « quels sont les engrais chimiques qu'il convient de rapporter, et en quelles quantités on doit les utiliser, pour maintenir le sol dans le même état de fertilité ».

Or, si l'on fait l'analyse complète des éléments présents dans les plantes, on en trouve en proportion abondante, ce sont : C, H, O, N ; d'autres en proportion inférieure mais toujours notable : P, S, Cl, Si, K, Na, Ca, Mg ; d'autres enfin en quantités beaucoup plus faibles et souvent à l'état de traces cependant mesurables, comme Fe, Mn, Zn, Cu, Li, Rb, Cs, Ni, Co, Al, Ti, Cr, Mo, F, Br, I, B, V, As, Pb, Gl, Ba, Sr, etc.

C'est aux éléments constamment présents en très petite proportion dans les organismes (végétaux ou animaux) que M. Gabriel BERTRAND a donné le nom d'oligo-éléments. A mesure que les techniques analytiques s'affinent le nombre des oligo-éléments constamment trouvés chez les végétaux augmente et, comme il n'y a pas de raison pour penser *a priori* que tous ont une utilité pour la physiologie de la plante, la question se pose de savoir quels sont ceux que la plante doit obligatoirement trouver dans le milieu.

La méthode utilisée pour la recherche des *éléments indispensables* ou *essentiels* consiste à cultiver les végétaux étudiés, dans des conditions convenables de température et d'éclairement, sur des milieux artifi-

ciels généralement liquides qui ont été préparés au moyen d'eau très pure et de sels suffisamment purifiés. Les vases renfermant ces milieux liquides doivent être de nature telle qu'ils ne puissent céder au milieu l'élément ou les éléments qu'on étudie. Lorsque ces conditions sont remplies, on est assuré de réaliser des conditions de milieu connues et l'on peut rechercher quels éléments il convient d'introduire dans le milieu artificiel pour assurer un bon développement de la plante. Cette méthode qui a été souvent utilisée depuis plus de cent ans est généralement connue en France sous le nom de méthode synthétique. Le Prince de SALM HORSTMAR en 1851 ⁽¹⁾, avait publié les résultats d'une remarquable série d'expériences qu'il publia sous le titre de : *Recherches sur la nutrition de l'Avoine, particulièrement en ce qui concerne les matières inorganiques qui sont nécessaires à cette nutrition*. On trouve déjà dans ce travail le souci d'utiliser des vases ne pouvant rien céder au milieu : ces vases étaient fabriqués avec de la cire. Le support solide des racines était constitué de poudre de quartz et de cristal de roche. La purification des sels nutritifs était très soignée, particulièrement celle des sels de fer. L'eau était convenablement distillée. C'est à l'aide de cette technique que SALM HORSTMAR reconnut notamment la nécessité du fer et du manganèse pour l'Avoine.

L'établissement du *caractère essentiel* d'un oligo-élément est évidemment subordonné à la possibilité de purifier suffisamment l'eau et les constituants du milieu de culture pour que la masse de l'élément qui est présent à l'état d'impureté soit inférieure aux besoins de la plante.

Les méthodes de purification ont fait, comme chacun sait, de remarquables progrès dans les dernières décades. Alors que la recristallisation des sels était

(1) Texte d'un Cours-Conférence au Centre de Perfectionnement Technique. Cycle de Rationalisation agronomique (Maison de la Chimie, 19 janvier 1956).

(1) Ann. Chim. et Phys., 32, 461 (1851).

longue et dans certains cas peu efficace, les méthodes utilisant les échangeurs d'ions, celles qui utilisent les formateurs de complexes organiques extractibles par les solvants, ou encore les méthodes de coprécipitation, permettent actuellement une meilleure élimination des impuretés, surtout des ions métalliques.

La mise en œuvre de ces méthodes permet de préparer des milieux plus purs et, chose aussi importante, des milieux dont la limite supérieure des taux d'impuretés présentes est contrôlable et reproductible.

L'utilisation de la méthode synthétique comporte une autre difficulté qui tient à la présence de matières minérales dans la graine que l'on fait développer sur le milieu artificiel. La graine apporte sa réserve d'oligo-éléments, mais il est toujours possible de restreindre l'importance relative de celle-ci en choisissant une espèce végétale susceptible d'un grand développement et dont la graine soit suffisamment petite.

La méthode expérimentale étant ainsi établie, la question se pose de savoir à quoi l'on reconnaîtra qu'un oligo-élément est indispensable. On s'accorde généralement pour admettre que le caractère de nécessité d'un élément donné ne peut être démontré que par la vérification d'un ensemble de critères expérimentaux :

1° l'omission de cet élément dans le milieu de culture doit rendre impossible l'accomplissement complet du cycle végétatif, reproduction comprise ;

2° la carence ainsi réalisée doit être *spécifique* ; autrement dit, elle ne doit pouvoir être guérie ou évitée qu'en apportant l'élément considéré, et ne doit être guérie ou évitée par aucun autre élément ;

3° l'élément doit être *directement impliqué* dans la nutrition de la plante ; condition qui oblige à ne pas tenir compte des effets favorables qui pourraient être exercés indirectement sur la plante par la correction de conditions défavorables de milieu, d'ordre chimique ou bactériologique.

Dans l'état actuel des connaissances, il est reconnu que les plantes supérieures — c'est-à-dire les végétaux verts chlorophylliens — requièrent en assez grande quantité l'azote, le phosphore, le soufre, le potassium, le calcium et le magnésium et, en quantités beaucoup plus faibles, mais avec un caractère également essentiel, le fer, le manganèse, le bore, le zinc, le cuivre et le molybdène. Les six oligo-éléments cités ont été reconnus comme indispensables pour toutes les plantes chlorophylliennes qui ont été étudiées suivant la méthode synthétique. Les diverses espèces végétales cultivées se distinguent entre elles par des besoins plus ou moins importants en tel ou tel de ces oligo-éléments ; par exemple l'Avoine par ses besoins relativement élevés en manganèse, le Chou par ses besoins en molyb-

dène, la Betterave par ses besoins en bore, etc. Les végétaux chlorophylliens forment cependant un groupe homogène en ce qui concerne la nature des oligo-éléments qu'ils requièrent. Récemment il a été démontré que le Cl a le caractère d'oligo-élément indispensable pour la Tomate (1), on doit cependant attendre de nouvelles recherches pour savoir si cette acquisition doit être étendue à d'autres espèces comme il est probable.

TABLEAU I

<i>Éléments présents dans les plantes</i>	<i>Éléments actuellement reconnus comme indispensables aux plantes supérieures</i>
C H O N P S Si Cl K Na Ca Mg Fe Mn Zn Cu Li Rb Cs Ni Co Al Ti Cr Mo F Br I B V As Pb Be Ba Sr, etc.	C H O N P S K Ca Mg Fe Mn Zn Cu B Mo (Cl * V **)
	* Pour la Tomate. ** Grande probabilité.

Quant aux autres oligo-éléments qui ont été trouvés dans les plantes cultivées, il en est qui seront peut-être dans l'avenir reconnus comme nécessaires, quand les techniques de purification, les techniques analytiques et les méthodes biologiques seront devenues plus fines. Plusieurs d'entre eux se sont d'ailleurs révélés *utiles*, en ce sens que leur introduction dans le milieu de culture a conduit à une accélération du développement ou à des récoltes plus importantes ; mais l'*utilité* ne peut être confondue avec la *nécessité* stricte. L'utilité qui se traduit par un supplément de récolte a généralement, dans le passé, été l'indice d'une nécessité qui n'a été établie que plus tard et qui est d'ailleurs beaucoup plus difficile à démontrer lorsque les concentrations nécessaires sont très petites.

Actuellement le problème pratique des oligo-éléments intéresse les oligo-éléments dont le caractère essentiel est acquis, c'est-à-dire : Fe, Mn, Zn, Cu, B et Mo.

Les oligo-éléments essentiels doivent leur nécessité au fait qu'ils exercent dans l'organisme végétal des fonctions importantes. De leur présence dans les tissus dépend la biosynthèse de certaines molécules orga-

(1) BROYER (T. C.), CARLTON (A. B.), JOHNSON (C. M.), STOUT (P. R.), *Plant Physiol.*, 29, 526-32 (1954).

niques fondamentales (par exemple le fer est indispensable à la synthèse de la chlorophylle) ou la formation de certaines diastases (enzymes). Dans certains cas l'oligo-élément est lui-même un coenzyme et, dans ces cas, en son absence la fraction organique de l'enzyme est synthétisée mais elle reste inactive. De ce rôle fondamental des oligo-éléments essentiels, il résulte que leur carence entraîne des modifications importantes dans la physiologie normale de la plante, modifications qui souvent se traduisent par des signes plus ou moins apparents et plus ou moins caractéristiques de la carence. Lorsque celle-ci est suffisamment prononcée et lorsqu'elle ne se complique pas d'autres carences, elle peut être facilement reconnue et différenciée : c'est ce qu'on appelle le *diagnostic visuel*.

Ainsi la culture de nombreuses espèces végétales sur des milieux purifiés, dans lesquels on avait omis d'introduire tel ou tel oligo-élément indispensable, a permis de révéler à l'état pur les signes caractéristiques des carences et de prendre des photographies en couleurs des plantes souffrant de ces carences. En Grande-Bretagne le Prof. WALLACE s'est distingué par son œuvre patiente et efficace dans cette voie. L'ouvrage (1) qu'il a publié contient plusieurs centaines de photographies en couleurs dont la confrontation avec les plantes qui, développées dans les conditions naturelles, présentent des symptômes analogues, permet un premier diagnostic de la nature de la carence.

*
* *
*

Dans les conditions naturelles, en effet, ou du moins sur certains sols, la santé des plantes peut être altérée, le développement des végétaux cultivés peut être limité et les récoltes compromises, aussi bien en qualité qu'en quantité, par des carences en oligo-éléments essentiels. L'expression *maladies de carence* est souvent utilisée pour désigner ces *états de malnutrition* qui se manifestent, suivant la nature de l'élément en cause, par exemple par des chloroses du feuillage (Fe et Mn) ; ou, par exemple dans le cas de la carence en bore de la betterave, par la mort des jeunes feuilles et la pourriture du cœur ou, encore par carence en bore, par le jaunissement de certaines feuilles de la luzerne, etc... L'expression *maladies de carence* est cependant malheureuse si elle doit conduire à envisager les sels de fer, de manganèse, de bore, etc..., comme des médicaments de la plante malade. Les états de carence et leurs signes visibles sont en effet le résultat d'une nutrition incor-

recte de la plante ; les matières minérales qui peuvent y remédier n'agissent pas comme des *drogues*, mais comme des *aliments indispensables* dont la plante était privée en raison de la nature du milieu.

La première carence qui fut décrite est la carence en fer. C'est un Français, E. GRIS (1), qui montra en 1845 que la chlorose qui en résulte peut être guérie par une application de sels de fer sur le feuillage. La chlorose par carence en fer intervient très fréquemment chez les arbres fruitiers ; elle est facilement reconnaissable, même de loin, parce que les feuilles les plus jeunes, plus ou moins dépourvues de chlorophylle prennent une teinte jaune caractéristique que tout le monde peut reconnaître. La carence en bore intervient aussi assez souvent dans les conditions naturelles. Elle est en général bien connue en raison du fait que cette carence a été, il y a une vingtaine d'années, reconnue comme responsable d'une affection de la betterave très répandue sur certains sols et qui, en raison de son importance économique avait motivé beaucoup de travaux, la pourriture du cœur. On pourrait ici donner de plus amples précisions sur les carences en oligo-éléments observables dans les conditions naturelles et sur leurs signes visuels. Ce n'est cependant pas notre sujet et l'auditeur qui s'intéresse à ces questions pourrait se reporter utilement à l'ouvrage de T. WALLACE.

TABLEAU 2

Teneurs en oligo-éléments (toutes formes) de sols américains, en p. p. m. [BEAR]		Quantités d'oligo-éléments extraites des sols arables d'Écosse par l'acide acétique à 2,5 %, en p. p. m. [MITCHELL]	
Maximum	Minimum		
Mn 5200	90	Mn 5	à 100
Zn 225	10	Zn 2	à 30
Cu 60	2	Cu 0,05	à 1
B 110	18	Mo 0,02	
Mo 3	0,8	Co 0,05	à 2
Co 31	0,2	Cr 0,01	à 1
		Ni 0,1	à 5
		Pb 0,2	à 4
		Sn 0,5	
		Sr 0,2	à 10
		Ti 0,1	à 1
		V 0,05	à 1

(1) De l'action des sels ferrugineux solubles appliqués à la végétation et spécialement au traitement de la chlorose et de la débilité des plantes. *C. R.*, 21, 1386 (1845). Voir aussi *C. R.*, 23, 53 (1846) et 25, 276 (1847).

(1) The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms, London, 1951.

Constatons seulement que le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le bore et le molybdène sont des constituants habituels du sol, mais que cependant les plantes, en certains cas, ne parviennent pas à en obtenir suffisamment pour assurer leur nutrition correcte.

Il est très rare que le sol ne renferme pas, à l'état de combinaisons diverses, des quantités suffisantes des oligo-éléments essentiels. La carence absolue ou primaire est également rare ; elle peut cependant intervenir, par exemple sur des sols sableux très pauvres.

TABLEAU 3

Quantités de bore extraites par l'eau (bore « assimilable ») des sols arables de divers pays, en p. p. m.

Sols italiens (L. SALTO).....	0,06--1,90
— hawaïens (TANDA et DEAN) . . .	0,20-3,20
— d'Illinois et Géorgie (DE TURK et OLSEN).....	0,01-1,22
Sols russes (S. SINYAKOVA)	0,19-1,10
— français (300 échantillons)	0,15-4,20 (1)

(1) 87 % compris entre 0,2 et 2,0. (Résultats obtenus dans mon laboratoire, encore non publiés.)

L'expérience montre que, très souvent, des carences apparaissent alors que le sol est relativement riche en l'élément considéré. C'est généralement ce qui arrive dans le cas du fer ou du manganèse parce que certaines formes ou combinaisons de ces éléments ne peuvent être assimilées par les plantes. La carence qui intervient dans des cas semblables résulte de l'absence ou de l'insuffisance des formes *assimilables* dans le sol. A titre d'exemple on peut citer le cas du bioxyde de manganèse (MnO_2) très répandu dans les sols, et pratiquement inutilisable pour la nutrition des plantes.

Les conditions de milieu physicochimiques et microbiologiques du sol, notamment pH et rH , exercent une influence sur la proportion des formes assimilables de certains oligo-éléments, c'est un aspect de la question que nous retrouverons tout à l'heure. Les conditions de milieu où se trouvent les racines ont aussi une influence sur le phénomène physiologique de l'absorption des matières minérales. Le pH du milieu est, de ce point de vue, le facteur d'importance primordiale dont dépend la nutrition en oligo-éléments, parce qu'il exerce à la fois une influence sur la proportion des formes assimilables et aussi une influence sur leur absorption par les racines.

Pratiquement les effets de la réaction du sol vont se traduire de façon globale sur l'absorption des oligo-

éléments, par l'existence de certains intervalles de pH favorables et d'autres défavorables, comme le montre le graphique schématique de TRUOG (fig. 1).

Un autre phénomène dont dépend l'intensité de l'absorption des oligo-éléments est constitué par ce qu'on appelle l'*antagonisme* entre certains ions. Ce phénomène se traduit pratiquement par des effets dépressifs exercés par certains ions sur l'absorption d'autres ions. Par exemple, un excès de Mn assimilable exerce un effet dépressif sur l'absorption du fer ; un excès de zinc conduit au même résultat. Des états de carence peuvent être ainsi *induits* par la présence d'excès d'autres éléments indispensables.

Toujours dans le même ordre d'idées, il est clair que lorsqu'un oligo-élément se trouve dans le sol en petite proportion, la nutrition de la plante dépendra de la masse de sol qui est explorée par ses racines. Le développement radicaire dépend lui-même d'une bonne aération et de la présence en quantité convenable de certains éléments comme le magnésium. Chez les *Citrus*, dans les sols relativement pauvres en zinc, des apports de magnésium accroissent le développement radicaire et font disparaître la carence en zinc (CAMP (1)).

L'état des oligo-éléments dans le sol conditionne leur *assimilabilité*. On a vu plus haut de quelle importance est à ce sujet la réaction du sol. Mais celle-ci ne constitue pas le seul facteur à considérer. Les matières organiques ont aussi une grosse importance parce qu'elles retiennent en surface des éléments qui, sans elles, seraient rapidement éliminés par les eaux (cas du bore). Mais cette rétention peut avoir des conséquences fâcheuses, car certaines substances organiques peuvent lier des oligo-éléments avec une telle énergie que, sous cette forme, ils ne sont plus absorbables par les racines. Ainsi le Cu est immobilisé par les matières organiques dans les sols de polders.

Les matières organiques règlent aussi les conditions physicochimiques du milieu, notamment le potentiel d'oxydoréduction, et ainsi exercent une action puissante sur les proportions des formes assimilables (surtout pour Mn).

Enfin, les microorganismes du sol sont aussi des facteurs importants de l'assimilabilité des oligo-éléments, au moins de certains d'entre eux. Certaines bactéries ont en effet une action oxydante, notamment vis-à-vis des composés du Mn qu'ils amènent à l'état de MnO_2 , le rendant inassimilable ; d'autres ont une action réductrice dont le résultat peut être favorable ou défavorable. Enfin une prolifération microbienne

(1) Soil Science, 60, 157 (1945).

intense dans le sol peut aboutir à l'absorption par les microorganismes de la quasi-totalité des formes assimilables d'un certain oligo-élément, ce qui provoque un état de carence — au moins momentané — des végétaux cultivés dans le même sol.

On conçoit que l'existence de facteurs aussi nombreux capables de modifier l'assimilabilité et l'absorption des oligo-éléments oblige à considérer séparément le cas de chacun d'eux. C'est ce que nous ferons, de façon assez rapide.

Le fer est présent dans les sols, surtout à l'état d'oxydes. Cet élément ne passe en solution que sous l'effet des acides. Certaines substances organiques de caractère acide le maintiennent à l'état dissous et l'on sait que, justement, dans les sols, le fer migre à l'état de combinaisons humiques. En milieu neutre ou alcalin, le fer n'est pas assimilable et, même en milieu acide, les phosphates diminuent son assimilabilité. La chlorose provoquée par la carence en fer est habituellement trouvée sur les sols dont les teneurs en calcium et en manganèse sont élevées ; elle peut être provoquée

par des chaulages importants lorsqu'il s'agit de sols sableux relativement pauvres en fer.

Le manganèse, comme le fer, est présent dans les sols principalement sous forme d'oxydes. Les composés de Mn^{IV} , essentiellement MnO_2 , paraissent à peu près inassimilables. Le Mn de valence II est au contraire assimilable ; c'est l'état d'oxydation du Mn échangeable dans le sol. En ce qui concerne l'influence de la réaction, à des pH supérieurs à 6,5 dans beaucoup de sols le Mn n'est pas assimilable. L'acidité du milieu augmente l'assimilabilité de cet élément, comme elle augmente celle du fer. Lorsque l'acidité est forte, la concentration du Mn dans les solutions du sol peut devenir trop élevée et des effets toxiques en résultent.

Il est certain que les matières organiques jouent un grand rôle en ce qui concerne l'état du Mn dans les sols, certaines d'entre elles paraissent immobiliser l'élément ; l'absence de drainage peut également rendre le manganèse inassimilable.

D'autre part, certaines bactéries (oxydantes) tout au moins en milieu alcalin, rendent le manganèse inas-

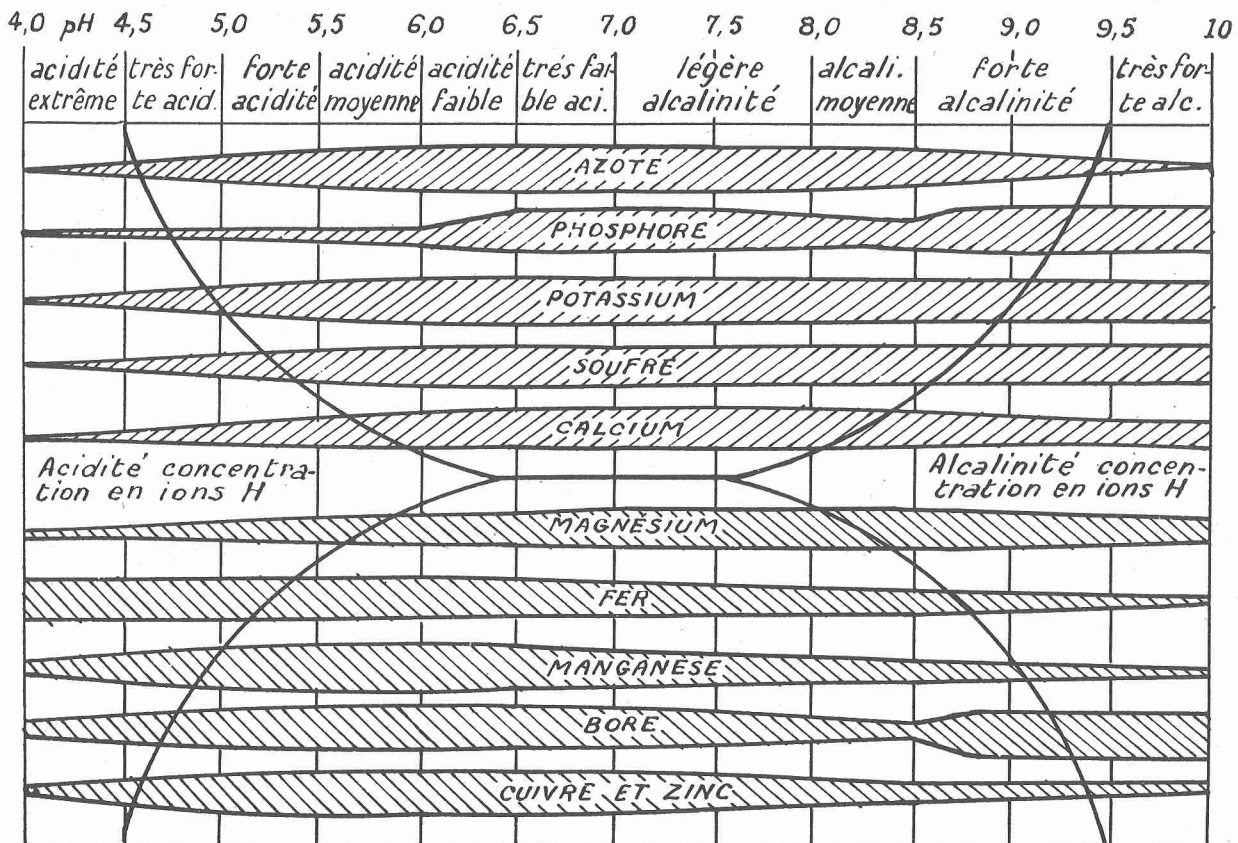


FIG. 1. — Pour chaque élément la hauteur de la bande hachurée donne une mesure approximative de l'assimilabilité. [TRUOG, Proc. Soil. Sci. Soc. Am., vol. 11, (1946)].

similable en provoquant son oxydation et sa précipitation à l'état de MnO_2 (GERRETSEN, QUASTEL, MULDER et GERRETSEN).

Dans mon laboratoire, le Mn assimilable a été dosé dans une centaine d'échantillons de sols. Le polygone de fréquences des valeurs obtenues est représenté fig. 2.

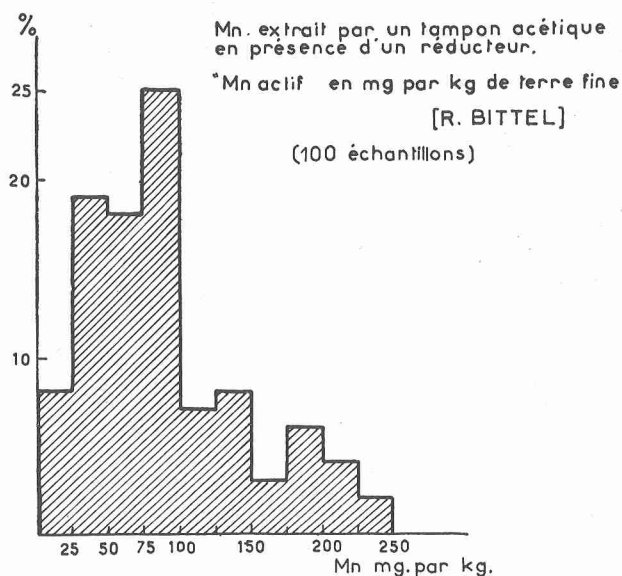


FIG. 2

Les sols ont des teneurs généralement assez faibles en zinc et cuivre (généralement de 5 à 50 p. p. m. de Zn, mais la teneur des sols sableux est habituellement très faible ; pour le Cu les teneurs sont variables et souvent de l'ordre de 50 p. p. m.). De ces quantités présentes une fraction seulement est assimilable par les plantes ; cette fraction est d'ailleurs difficile à évaluer. Dans mon laboratoire R. BITTEL (1) a, pour le dosage du Cu et du Zn assimilables, mis en œuvre une technique d'extraction rapide par le tampon acétique de pH 4,8. Les résultats de ses dosages pratiqués sur 140 échantillons de sols français sont représentés sur les figures 3 et 4 qui indiquent la fréquence des mesures ayant donné des valeurs groupées de 0,5 en 0,5 p. p. m. Chacun de ces polygones est marqué par un pic situé, pour le Zn au voisinage de 2 p. p. m. et, pour le Cu, autour de 1 p. p. m. La fraction rapidement solubilisée par le tampon ne représente donc qu'une proportion assez faible de l'ensemble des formes de ces éléments (on peut l'évaluer à 10 à 20 %) (Voir aussi MITCHELL, Tableau 2). Les petites quantités de Cu et de Zn puisées par la plante dans le volume du sol qui est exploré

par les racines retournent au sol avec les résidus végétaux ; ces éléments sont donc relativement concentrés dans la fraction organique de surface. Les substances organiques, l'activité des microorganismes, et surtout

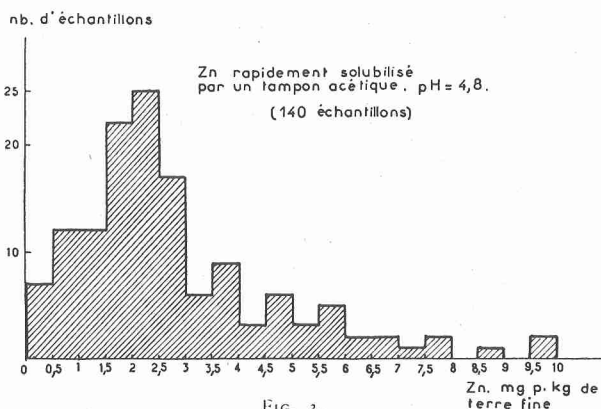


FIG. 3.

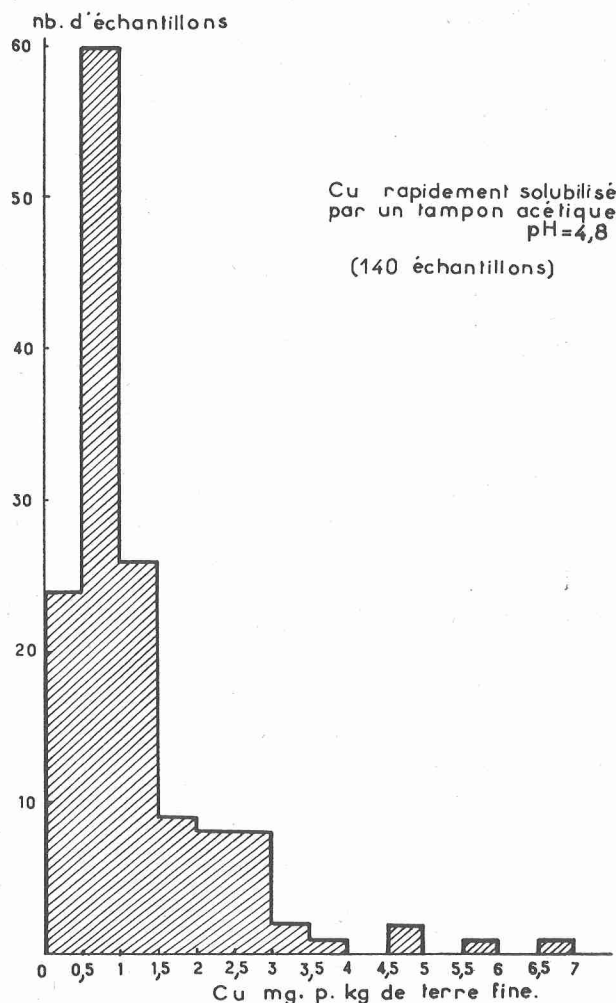


FIG. 4.

(1) BITTEL (R.). Congrès Int. Bota., Section Physiol., Paris, 1954.

la réaction du milieu sont des facteurs de l'assimilabilité de ces éléments. Le cuivre est rendu inassimilable par certaines matières organiques, telles que celles de l'humus des terres récupérées sur les polders ; il en résulte une carence : la maladie de réclamation qui a fait l'objet de sérieuses études en Hollande. Des conditions réductrices avec formation de H_2S conduisent aussi à l'immobilisation du cuivre. L'acide phosphorique en quantité excessive, des chaulages trop abondants sont capables de restreindre l'assimilabilité des deux oligo-éléments.

Le bore est présent dans les roches et les sables à l'état de *tourmaline*, minéral qui se retrouve dans les sols. Sous cette forme le bore est inaccessible aux végétaux. Par contre le bore présent dans les roches sédimentaires marines, ou dans les substances organiques provenant des plantes ou des animaux, est beaucoup plus facilement assimilable. Cet oligo-élément est d'ailleurs retenu par les substances organiques de l'humus qui s'opposent à son entraînement par l'eau : aussi les horizons superficiels sont-ils généralement plus riches en bore assimilable que les sous-sols correspondants.

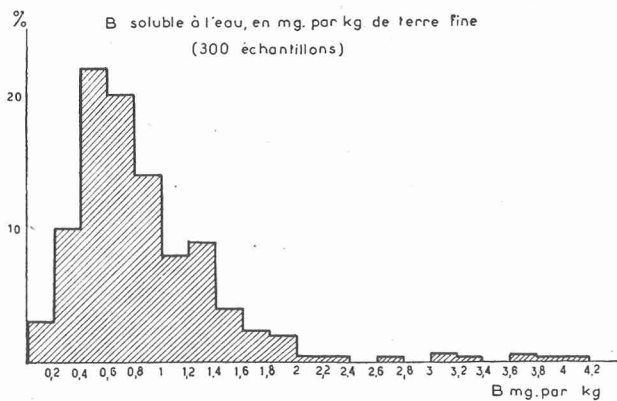


FIG. 5

Les chaulages, surtout lorsqu'ils sont *excessifs*, diminuent l'assimilabilité du bore par les végétaux ; il en est de même de la sécheresse qui fait apparaître des carences en bore sur des terrains où cette carence ne se produit pas si la saison est humide. Jusqu'à présent, la meilleure méthode de détermination du bore assimilable consiste à doser le bore extractible par l'eau chaude. La méthode a été spécialement étudiée dans mon laboratoire et appliquée à l'analyse de plusieurs centaines d'échantillons provenant de différentes régions de France.

Le polygone de fréquence des teneurs groupées de 0,2 en 0,2 p. p. m. montre, pour 300 échantillons

analysés, un pic à 0,4-0,6 p. p. m. et 66 % des chiffres entre 0,2 et 1 p. p. m. Au-dessus de 2 p. p. m. les échantillons sont très rares. Parmi ces échantillons, cent provenaient des Pyrénées-Orientales, département où la carence en bore sévit, notamment chez la Vigne.

La figure 6 montre les deux polygones de fréquence construits, d'une part à partir des résultats correspondant aux échantillons des Pyrénées-Orientales où 66 % des échantillons présentent des teneurs en bore inférieures à 0,6 p. p. m. et, d'autre part, à partir des échantillons provenant des autres régions de France où, à l'inverse, 73 % des échantillons présentent des teneurs en bore supérieures à 0,6 p. p. m. Aux U. S. A., on admet que les récoltes, principalement les légumineuses comme la luzerne, bénéficient d'un apport de bore quand la teneur du sol en bore assimilable est inférieure à 0,4 p. p. m. Nos résultats montrent que les chiffres le plus fréquemment trouvés dans les échantillons que nous avons analysés sont très proches de cette valeur.

Le molybdène est constamment présent dans les sols, mais en quantité extrêmement faible, puisque la teneur moyenne de la plupart des sols serait d'environ 2,5 p. p. m. Certains sols, bien entendu, en renferment beaucoup moins. Les symptômes de la carence en molybdène, tels qu'ils ont été découverts par les expériences de physiologie utilisant les milieux artificiels, se rencontrent le plus souvent dans la nature lorsque le pH du sol est inférieur à 5,2. Dans ces cas le chaulage suffit souvent à faire disparaître la carence.

Cet oligo-élément est essentiel à la réduction des nitrates, qui est le premier stade de l'assimilation de l'azote par les non-légumineuses ; le molybdène est également indispensable à l'utilisation de l'azote atmosphérique par les bactéries symbiotiques des légumineuses. Les besoins des plantes sont satisfaits, en solution nutritive, par une partie de Mo par milliard, aussi suffit-il d'apporter à certains sols d'Australie une once de MoO_3 par acre pour multiplier la récolte des légumineuses par le coefficient quatre.

L'assimilation du molybdène est, comme il est dit plus haut, sensiblement augmentée par les chaulages.

*
* *

L'emploi éventuel de l'un des oligo-éléments essentiels, ou de plusieurs d'entre eux, pose dans la pratique des problèmes souvent délicats qui ne peuvent être résolus avec profit que si l'on tient compte des diverses notions qui viennent d'être esquissées.

Pratiquement, le problème peut être posé à l'origine par un défaut du rendement d'une certaine espèce végétale qui ne peut être corrigé ni par un chaulage, ni

par l'apport des éléments fondamentaux N, P, K, ni par la correction d'une carence éventuelle en magnésium ou en soufre. Dans un tel cas on doit penser, soit à des conditions *toxiques*, soit à une *carence* en oligo-éléments. *L'analyse du sol*, dans laquelle on s'attachera à déterminer les quantités présentes par des méthodes reconnues comme donnant une image assez fidèle des quantités assimilables, permettra de mieux orienter le travail. Si la teneur en un oligo-élément essentiel est particulièrement basse, il y aura probabilité pour qu'une carence en cet oligo-élément soit en cause. Dans ce cas, *l'analyse de la plante*, et la comparaison de sa teneur en l'élément considéré avec les teneurs habituelles et normales de cette plante cultivée dans de bonnes conditions, sur des sols fertiles, permettront de confirmer ou d'infirmer la première conclusion.

Dans cet exemple on a supposé que le problème avait été posé par un défaut de rendement. Il peut se trou-

ver posé, à l'origine, de façon un peu plus précise, lorsque non seulement le développement de la plante est compromis mais lorsque des symptômes visuels de carence ont été reconnus. Si les signes sont caractéristiques d'une carence connue, il conviendra de doser dans la plante l'élément dont la carence a été diagnostiquée et, si l'analyse confirme le diagnostic, on fera la détermination des formes assimilables de l'élément dans le sol, afin de savoir s'il s'agit d'un défaut de l'élément ou d'une carence conditionnée. Dans les deux éventualités considérées, l'opportunité d'emploi d'un oligo-élément, à titre d'aliment de la plante, ne peut être décidée seulement à partir de la présomption qui découle uniquement soit de l'apparition de signes visuels, tels que chlorose, marbrure du feuillage, etc., soit de l'analyse du sol. Ceci, pour des raisons diverses. Les signes visuels de la carence sont rarement aussi caractéristiques dans les conditions naturelles que dans

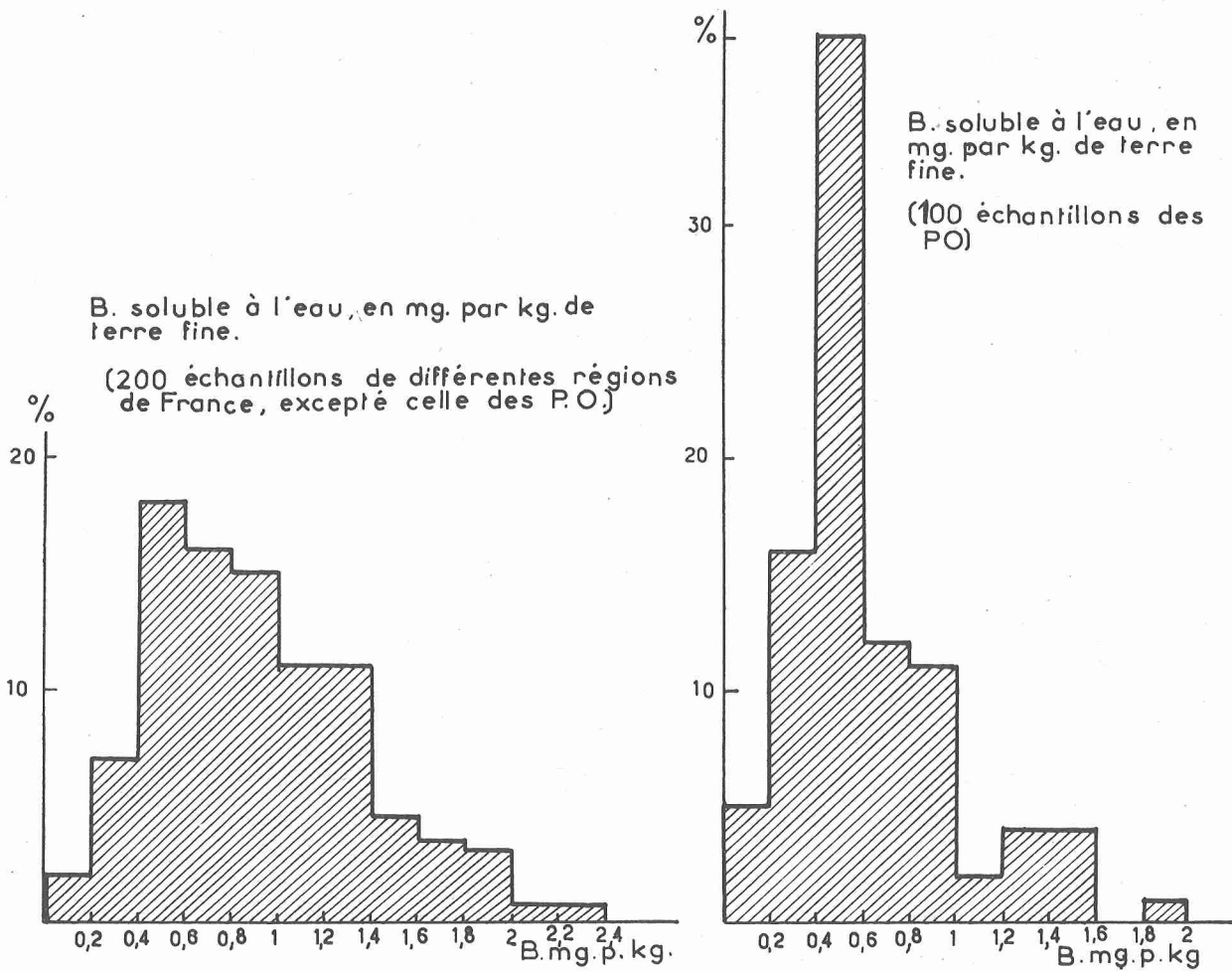


FIG. 6

les expériences de physiologie ; le tableau peut être beaucoup plus complexe quand plusieurs carences sont associées. D'autre part, il peut y avoir parfois confusion entre les signes de carences minérales et les stigmates d'affections parasitaires. Quant aux résultats de l'analyse du sol, ils sont toujours contingents et dépendent aussi bien de la teneur réelle en élément assimilable que de l'efficacité du réactif utilisé pour l'extraction, efficacité qui est loin d'être toujours proportionnelle au pouvoir d'absorption de la plante. En matière d'analyse des éléments assimilables du sol, *l'expert c'est la plante elle-même.*

TABLEAU 4

Teneurs maxima et minima en oligo-éléments dans 204 échantillons de légumes provenant de 10 États des U. S. A., en p. p. m. [BEAR]

		B	Mo	Cu	Mn	Co	Fe
Fèves	M	73	8,1	69	227	0,26	227
	m	10	0,1	3	10	0,00	10
Tomates . .	M	36	1,3	53	68	0,63	1938
	m	5	0,0	0	1	0,00	1
Chou	M	42	24,1	48	13	0,15	94
	m	7	0,0	0,4	2	0,00	20
Épinard . .	M	88	5,6	32	117	0,25	1584
	m	12	0,0	0,5	1	0,20	19
Laitue	M	37	4,5	60	169	0,19	516
	m	6	0,0	3	1	0,00	9

TABLEAU 5

Manganèse actif du sol et teneur en manganèse de la plante, en p. p. m. [COPPENET et CALVEZ]

Mn actif du sol	17	27	47	160	318
Teneur en Mn de l'Avoine	30 (*)	50	91	373	925
Teneur en Mn de la Pomme de terre (feuilles)	48	58	65	257	536

(*) Carence nette.

L'emploi d'un oligo-élément est donc subordonné à la confrontation des résultats de trois méthodes d'investigation qui se complètent mutuellement. S'il fallait donner une préférence à l'une d'entre elles, il faudrait choisir sans doute l'analyse de la plante.

L'absorption des oligo-éléments par les racines ne dépend pas en effet seulement de la quantité de cet élément qui est présente, à l'état assimilable dans le sol, mais, ainsi qu'on l'a vu plus haut, de diverses conditions de milieu parmi lesquelles le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la nature et les proportions des matières organiques, l'activité microbienne. Cette absorption dépend aussi de la nature et de la proportion des amendements calcaires et des engrais chimiques apportés au sol, notamment des phosphates. Elle peut dépendre enfin de conditions climatiques (sécheresse) et de la nutrition minérale globale, particulièrement en magnésium, élément qui assure un développement radiculaire suffisant. La nutrition en oligo-éléments est, en somme sous la dépendance complexe d'une série d'interactions qui ne sont pour la plupart pas en cause dans les processus de solubilisation mis en œuvre pour l'analyse chimique. Ainsi c'est l'analyse de la plante qui donne les renseignements les plus valables sur l'assimilabilité de l'élément envisagé, dans les conditions considérées.

Il est évident que lorsqu'une carence en un oligo-élément n'est pas provoquée par sa présence en trop faible proportion, mais lorsqu'il s'agit d'une carence conditionnée ou secondaire, le moyen le plus économique et parfois le seul efficace pour y remédier sera de changer les conditions de milieu qui restreignent son absorption. On cite à ce sujet l'exemple des arbres fruitiers carencés en zinc, étudiés aux U. S. A. par HOAGLAND, qu'un traitement par plusieurs centaines de kilogrammes de SO_4Zn apporté au sol ne suffisait pas à alimenter correctement, parce que le zinc apporté restait intégralement fixé dans le sol.

Ainsi, lorsqu'une carence en manganèse a été caractérisée, on apporte souvent au sol 50 à 100 kg de sulfate de manganèse par hectare. Mais dans beaucoup de sols pauvres en Mn assimilable, le sulfate de manganèse ajouté est rapidement converti en oxydes inutilisables et la durée de l'amélioration est souvent très courte⁽¹⁾. Par contre, si l'on traite le sol de manière à l'acidifier, par exemple en lui ajoutant du soufre ou du sulfate d'ammonium, on constate une amélioration qui est due à la solubilisation du manganèse du sol. Le même résultat semble pouvoir être obtenu par trai-

(1) MULDER (E. G.) et GERRETSEN (F.C.). *Advances in Agronomy* 4, 222-77, 1952.

tement du sol au moyen de tourbe acide et, mieux encore, par une association de SO_4Mn et de tourbe acide.

La correction de conditions de milieu défavorables à l'absorption d'un oligo-élément est facile à réaliser lorsqu'elle consiste, par exemple, à diminuer une fumure phosphorique trop importante (qui peut induire plusieurs carences : en fer, en zinc, en cuivre notamment), ou bien lorsqu'il suffit de neutraliser une trop grande acidité du sol (qui, dans le cas des légumineuses, provoque la carence en Mo). Mais la correction du milieu est plus difficile à réaliser dans certains cas comme celui de la carence en bore résultant d'un excès de calcaire, qu'il est impossible de détruire. Dans ce cas particulier, il reste la ressource d'augmenter autant que possible le taux des matières organiques.

De même, lorsqu'une carence en fer a pour cause un excès de Mn assimilable, comme cela se produit pour l'Ananas aux îles Hawaï et en Afrique noire dans des sols acides, l'élimination de la cause réelle de la carence (excès de Mn) ne peut être que très difficilement obtenue. Or des apports de fer à ces sols qui en sont déjà très riches sont tout à fait inopérants. Dans de tels cas le procédé le plus simple et le plus économique consiste à pulvériser directement sur le feuillage, une solution d'un sel de l'oligo-élément. On pulvérisera une solution de sulfate de fer sur le feuillage de l'Ananas souffrant d'un excès de manganèse ; une solution de borax sur le feuillage des arbres fruitiers souffrant de carence en bore sur sols calcaires ; une solution de sulfate de zinc sur les Citronniers de Californie cultivés dans des sols immobilisant le zinc, etc...

Au lieu de pulvérisations on peut aussi utiliser les méthodes d'injection dans les tissus mêmes de la plante. Le procédé est facilement applicable aux arbres auxquels peuvent être injectées des solutions liquides ou dans le tronc desquels il est possible d'insérer des comprimés d'un sel de l'oligo-élément dont ils manquent.

Enfin, dans tous les cas où une étude sérieuse aura montré que la carence est *primaire* (non conditionnée), on pourra apporter dans le sol en quantités convenables le sel choisi de l'oligo-élément. Si la méthode est efficace elle doit conduire au relèvement du taux de l'oligo-élément dans les tissus de la plante, notamment dans la feuille. Ainsi, dans tous les cas où la carence en bore ne résulte pas de la présence d'un excès de calcaire, l'apport au sol de borax permet de remé-

dier aux carences en bore, qui sont assez fréquentes dans les vergers de pommiers, notamment.

La fumure organique des sols est particulièrement intéressante en ce qui concerne l'apport et l'économie des oligo-éléments. Les différents déchets végétaux, les composts, apportent des quantités très appréciables d'oligo-éléments sous des formes qui sont généralement considérées comme assez rapidement utilisables par les plantes. De plus, sous cette forme, les oligo-éléments sont retenus en surface et échappent à la fixation irréversible par la partie minérale de la terre. Il est vraisemblable que des complexes organiques très stables mais représentant des formes assimilables par les racines, sont responsables de cet état de fait.

TABLEAU 6

Teneurs en oligo-éléments de quelques substances organiques en p. p. m. [BEAR]

	B	Mo	Cu	Mn	Zn	Co
Compost de luzerne...	70	2,5	42	260	—	0,11
Tourbe.....	13	2,1	7	110	20	0,02
Paille de blé.....	15	0,5	8	47	32	—
Tige de maïs.....	15	0,4	12	25	66	0,02

D'ailleurs la fabrication industrielle de certains complexes d'oligo-éléments chélatés est déjà entreprise. C'est ainsi que le fer, à l'état chélaté par des substances du type de l'acide éthylène-diamine-tétraacétique est utilisé avec grand profit pour apporter du fer assimilable à des sols chlorosants. Il a été trouvé que, sous cette forme, l'apport de 1 g de fer est équivalent à l'apport de près de 500 g de fer apportés à l'état de sulfate.

*
* *

En résumé les problèmes pratiques concernant l'emploi des oligo-éléments essentiels ne peuvent être résolus de façon rationnelle et productive que par une analyse approfondie de la situation qui doit associer de façon étroite les méthodes du physiologiste et celles du chimiste — l'examen de la plante et du rendement et l'analyse de la plante — l'analyse du sol et l'examen de ses propriétés.