

CHAPITRE XI

LES FACTEURS CHIMIQUES DE LA FERTILITE DES SOLS (BASES ECHANGEABLES ; SELS ; UTILISATION DES ECHELLES DE FERTILITE)

B. DABIN

11.1. - Les bases échangeables dans les sols tropicaux.

11.1.1. Introduction. Méthode d'analyse du complexe absorbant.

L'étude complète du complexe absorbant est devenue une détermination analytique courante dans les laboratoires de pédologie.

Cette étude comporte la détermination de la capacité totale d'échange de bases T exprimée en milliéquivalents pour 100 g, ainsi que l'analyse des principaux cations échangeables (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+), la somme de ces cations est représentée par S en milliéquivalents pour 100 g.

$\frac{S}{T}$
Le $\frac{S}{T}$ exprime le coefficient de saturation du complexe absorbant en %.

Le réactif d'extraction des bases échangeables est l'**acétate d'ammonium** normal à pH 7 ; dans le cas des sols très alcalins, on peut utiliser un réactif à pH 8,5.

La capacité d'échange peut être déterminée par des méthodes variées, en général on sature le sol par de l'ammonium, du calcium ou du baryum à pH 7 et on dose la totalité des cations fixés.

Dans les sols très alcalins, on peut saturer le sol par du sodium à pH 8,5.

La réserve totale en bases peut être obtenue par attaque à l'acide nitrique concentré et bouillant pendant 5 heures comme pour le phosphore total. Cette méthode peut être utile pour connaître la réserve en potassium du sol dont une partie importante migre entre les feuillets des argiles et peut être régénérée et servir à l'alimentation des plantes.

L'étude théorique du complexe absorbant a été présentée dans un autre chapitre, il est seulement rappelé ici quelques éléments d'interprétation qui peuvent être utiles dans la pratique.

11.1.2. Généralités sur le complexe absorbant.

Capacité d'échange T. La capacité d'échange dépend du type d'argile et de la teneur en éléments fins minéraux ainsi que de la teneur en matière organique.

A pH 7	Kaolinite	10 mé	pour 100 g
	Illite	30 mé	>
	Montmorillonite	100 mé	>
	Humus	300 mé	>

Dans les vertisols riches en montmorillonite, la capacité d'échange peut atteindre 50 à 60 mé pour 100 g même si le sol est pauvre en matière organique.

Dans les sols ferrallitiques qui ne contiennent pratiquement que de la kaolinite, c'est la matière organique qui présente le principal pouvoir d'échange soit :

30 %	d'argile	3 mé
3 %	matière organique	9 mé
		12 mé
		pour 100 g

Fixation des cations. Les cations sont retenus en quantité variable en raison, en particulier, de leur force de fixation ; dans les sols habituellement étudiés, l'ordre est le suivant : $Ca > Mg > K > Na$.

La proportion des cations dans le complexe est :

Ca	= 75 à 90 %	de T
Mg	= 10 à 30 %	
K	= 5 à 10 %	
Na	= 2 à 5 %	

Dans les sols à alcali, c'est le sodium qui est le plus important.

Il sera indiqué par la suite les meilleurs équilibres compatibles avec la fertilité.

Le pH. Le pH est mesuré dans l'eau et dans le chlorure de potassium normal. Le pH dépend du

taux de saturation en bases du complexe $\frac{S}{T}$ ainsi que la richesse en hydrogène échangeable $\frac{H}{T}$

$$pK + \text{Log} \left[\frac{\frac{S}{T}}{\frac{H}{T}} \right]$$

Le pK est la constante de dissociation de l'argile.

Les montmorillonites saturées par H et par Al sont plus dissociées que les kaolinites saturées d'une façon identique. Les montmorillonites donnent des pH plus bas pour une saturation en bases identique, la différence atteint une unité pH. La montmorillonite se comporte comme un acide plus fort que la kaolinite.

Les ions monovalents donnent des pH plus élevés que les ions bivalents car ils sont plus dissociés : un sol saturé en calcium présente un pH voisin de 7, tandis qu'un sol saturé en sodium peut avoir un pH de 9.

L'addition d'un sel (NaCl, CaCl₂) à une argile sodique, abaisse le pH. Le chlorure de calcium abaisse plus le pH que le chlorure de sodium.

Lorsqu'on mesure le pH dans une solution de chlorure de potassium, il y a un abaissement du pH par acidité d'échange, par rapport au pH dans l'eau. Il peut y avoir également déplacement d'aluminium échangeable avec libération d'ions hydrogène. La différence (pH eau-pH KCl) est fonc-

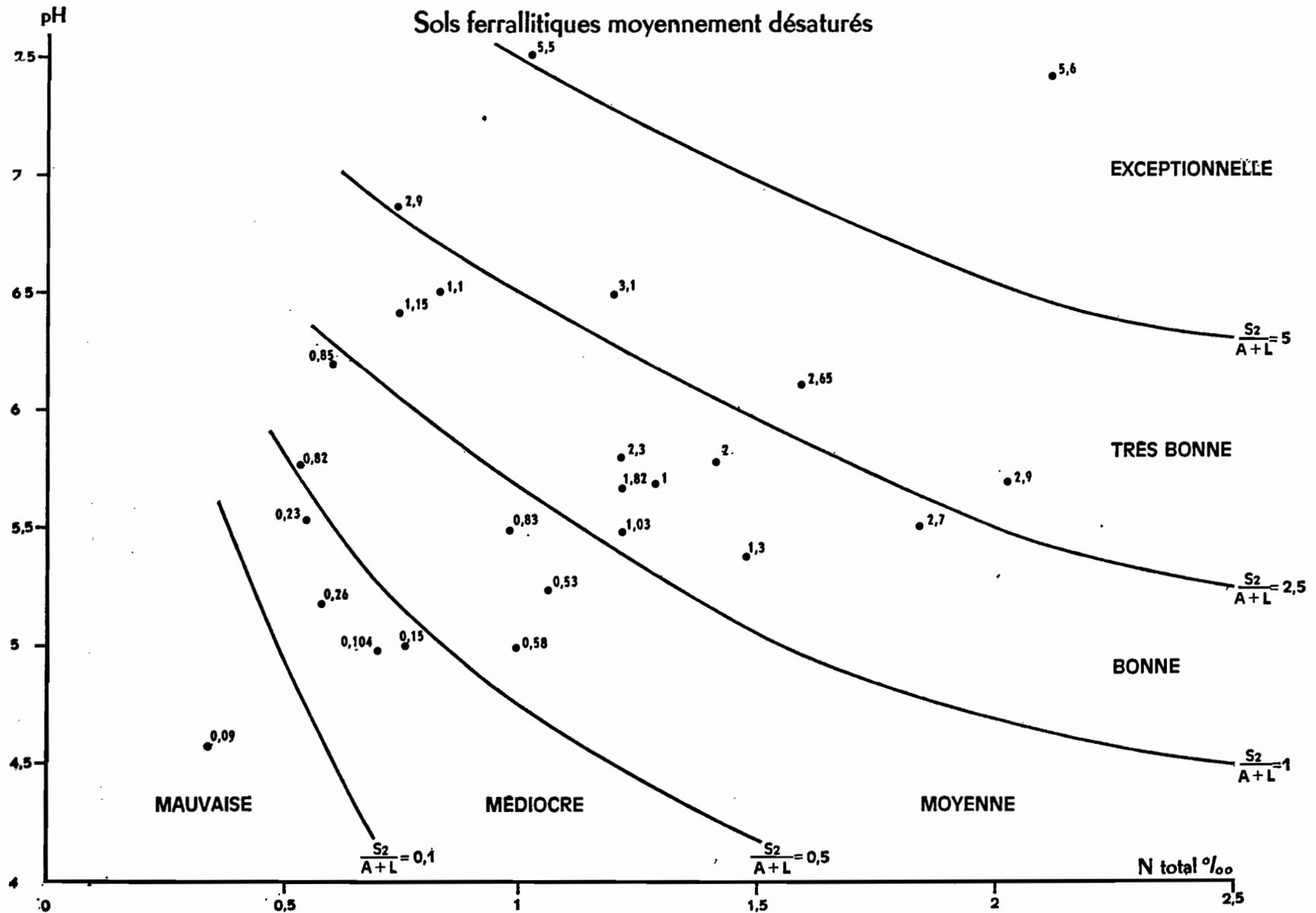


Fig. 37 - Relation entre la teneur en azote total, le pH, le rapport $\frac{S^2}{A+L}$ et la fertilité dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés.

< 0,1	mauvais
0,1 à 0,5	médiocre
0,5 à 1	moyenne
1 à 2,5	bonne
2,5 à 5	très bonne
> 5	exceptionnelle

un graphique représente la relation entre N total et S²
 pH, — et fertilité dans les sols ferrallitiques A + L typique (Fig. 37).

Problèmes du potassium et du magnésium. Si la valeur de S dépend essentiellement de la capacité d'échange et du pH, pour les autres cations, c'est leurs proportions relatives qui jouent un rôle important dans la fertilité.

Problème du potassium. Les études les plus récentes ont montré que le potassium « assimilable » du sol était en réalité du potassium échangeable qui pouvait être prélevé jusqu'à concurrence de 75 % dans des essais Neubauer (BLANCHET, 1959), par contre, la corrélation entre le potassium échangeable et fertilité est faible ; cette corrélation devient élevée si l'on tient compte des rapport $\frac{K}{T}$, $\frac{K}{S}$ ou $\frac{K}{Ca}$

Il semble donc que l'alimentation en potassium des plantes dépende de la densité des ions potassium par rapport aux autres cations, la vitesse de désorption devient un facteur secondaire alors qu'il est primordial dans le cas du phosphore.

Cas particulier des sols tropicaux. Dans les sols argileux des régions semi-arides, et en particulier dans les sols d'alluvions cultivés en rizière, le besoin en potassium se fait rarement sentir, alors que les besoins en azote et parfois en phosphore sont élevés.

Par contre, dans les régions humides, en sols ferrallitiques particulièrement, les besoins en potassium sont très fréquents. Des plantes comme le caféier, le cacaoyer, le palmier à huile, etc., consomment de grandes quantités de potassium.

Exemple.

Sols ferrallitiques faiblement désaturés (pluviométrie 1 400 mm) de R.C.A.
 Culture du caféier (FORESTIER 1965).

Tableau 28

BESOINS EN POTASSIUM DE SOLS PLANTÉS EN CAFIERS (FORESTIER 1965)

Teneur en A + L	10 %	20 %	55 %	85 %
teneur moyenne en K mé 100 g	0,1	0,18	0,4	0,65
limite de carence	0,05	0,1	0,28	0,32

MOULINIER (1962), considère que pour obtenir un bon rendement en caféier dans les sols sur sables tertiaires de basse Côte-d'Ivoire, il faut au moins 0,1 mé pour 100 g de potassium.

Dans ces sols, le magnésium doit être supérieur à 1,5 mé. Mais ceci essentiellement en raison du pH lié au magnésium et au calcium. De même pour la canne à sucre, 0,1 mé pour 100 g représente la limite inférieure au-dessous de laquelle il existe un besoin intense en potassium dans tous les cas. Au-dessus de 0,1 mé, le potassium doit représenter plus de 2 % de la valeur de S pour que la teneur soit considérée comme correcte. Si S = 10 mé pour 100 g, K = 0,2 mé représente une valeur moyenne.

Equilibre Ca-Mg-K. Cet équilibre a été étudié par de nombreux auteurs, parmi lesquels on peut citer : B. DABIN sur cotonnier 1954, DUGAIN sur bananier, FORESTIER sur caféier 1959-1960, MOULINIER sur caféier 1962, MARTIN PREVEL et COLMET-DAAGE sur bananier 1963.

Un certain nombre d'auteurs ont réalisé des analyses de plantes concurremment avec les analyses de sols (FORESTIER-MARTIN-PREVEL).

Sols ferrallitiques fortement désaturés

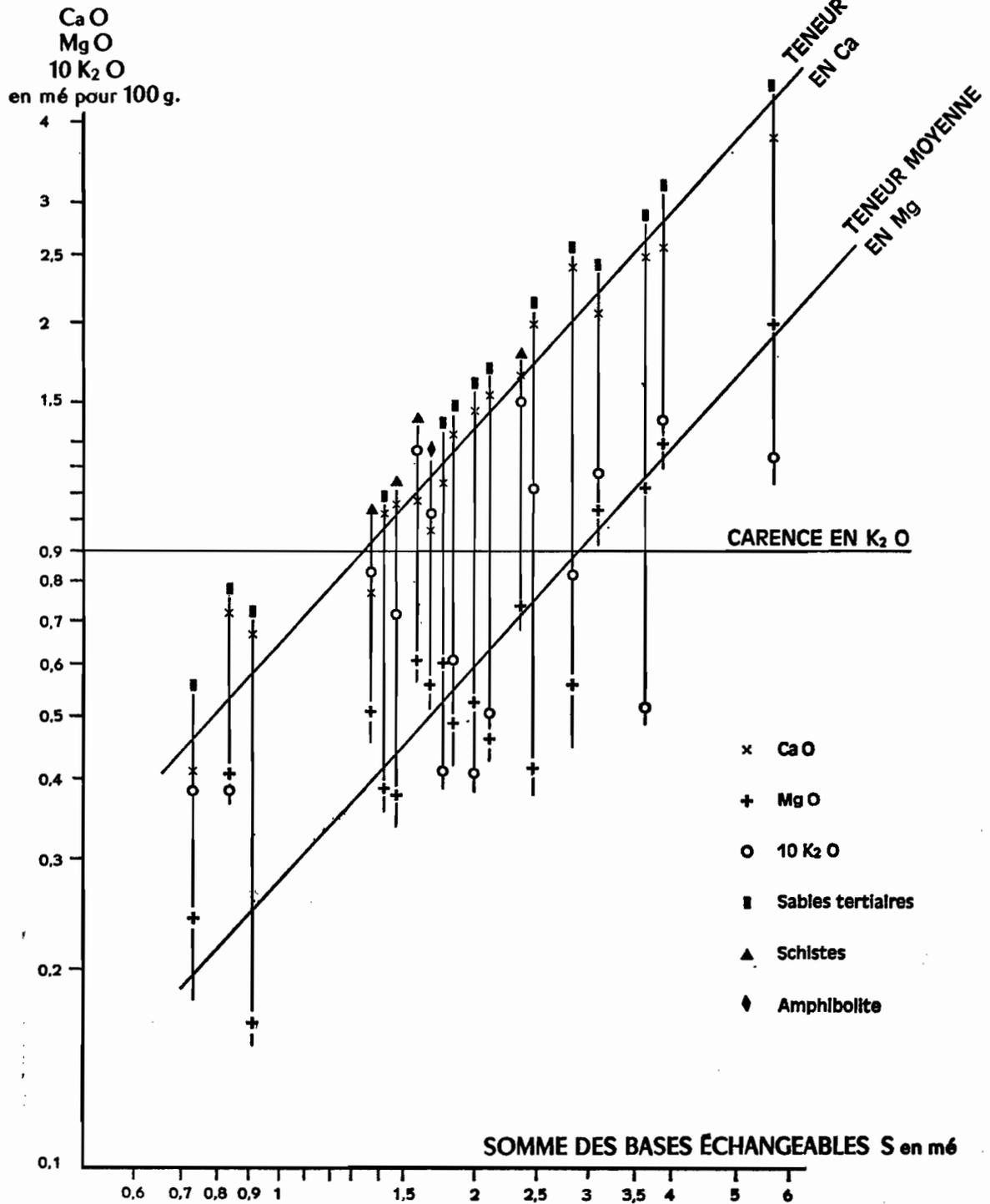


Fig. 38 - Équilibre des bases échangeables dans des sols ferrallitiques fortement désaturés.

Cas de carence en potassium. Cette carence est nette si $\frac{\text{Mg}}{\text{K}} > 15$ ou $20 \frac{\text{Mg} + \text{Ca}}{\text{K}} > 40$ ou

50. La limite peut être supérieure à 50 dans le cas des sols argileux.

Par exemple, dans les sols des Antilles sols du SIMON (MARTIN-PREVEL), il y a 20 mé calcium échangeable et 19 de magnésium échangeable, le bananier peut présenter une pourriture du régime (dégrain) s'il y a moins de 1 mé de potassium dans le sol.

Cette limite correspond à celle indiquée précédemment pour la canne à sucre, c'est-à-dire potassium non inférieur à 2 % de la somme de base.

Carence en magnésie. Inversement, dans le cas d'une teneur relativement élevée en potassium, une carence en magnésium peut apparaître si le rapport $\frac{\text{Mg}}{\text{K}}$ est inférieur à une certaine valeur.

Dans le cas du caféier, la limite semble se situer pour $\frac{\text{Mg}}{\text{K}} < 2$ (FORESTIER), dans le cas du bananier, la maladie du Bleu apparaît pour $\frac{\text{Mg}}{\text{K}} < 3$ (DUGAIN), dans le cas du cotonnier, lorsque

$\frac{\text{Mg}}{\text{K}}$ est égal à 3, des apports d'engrais potassiques provoquent des dépressions de rendement (DABIN).

Echelle de fertilité par rapport au potassium. Un rapport moyen Ca-Mg-K peut être représenté par la formule 20-10-1 (Fig. 38). Une échelle moyenne de richesse en potassium peut correspondre aux valeurs suivantes (compte tenu de toutes les indications données précédemment).

Potassium en mé pour 100 g.

< 0,1	mauvais
0,1 - 0,2	médiocre
0,2 - 0,4	moyen
> 0,4	bon
Si A + L < 10 %	les chiffres sont à diviser par deux
Si A + L > 60 %	les chiffres sont à multiplier par deux

De très nombreux sols ferrallitiques présentent des besoins en potassium importants. En ce qui concerne la culture du palmier à huile, dans des sols ayant moins de 0,1 mé p. 100 g, l'apport de 1 kg par pied de potassium multiplie par 7 les rendements en huile ; il en est de même du cocotier (Essais I. R.H.O. Côte-d'Ivoire).

Autres facteurs agissant sur l'alimentation en potassium. Un excès d'humidité dans le cas de la culture du caféier peut provoquer une carence en potassium (FORESTIER). Dans les sols acides, un chaulage peut améliorer l'alimentation potassique.

Réserves du sol en potassium. Dans des sols contenant certaines argiles du type mica, une partie importante des réserves non échangeables en potassium peut passer à l'état échangeable. En 25 ans, les plantes peuvent prélever 25 fois la diminution du potassium échangeable. Dans des sols dont le taux en potassium échangeable est passé en 25 ans de 108 ppm à 83 ppm, les plantes ont puisé 600 ppm de potassium.

11.2. - Problème des sols calcaires.

Les sols présentant un excès de carbonate de calcium, CO_3Ca , peuvent provoquer chez les végétaux des accidents de végétation dont le plus connu est la chlorose.

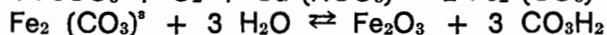
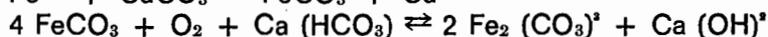
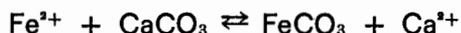
Il n'est pas possible de mettre en corrélation les accidents de chloroses avec la teneur en calcium total du sol. Celui-ci peut se présenter sous forme de cailloux plus ou moins durs, mais il

peut exister également dans les fractions fines, limon et argile, il est alors beaucoup plus soluble. Un test assez généralement utilisé est celui du calcaire « actif » qui consiste à fixer le calcium par de l'oxalate d'ammonium.

Les sols riches en calcaire « actif » peuvent avoir un pH de l'ordre de 8,5, mais lorsque l'humidité du sol augmente, il peut y avoir une forte hydrolyse des carbonates et augmentation de l'alcalinité.



Il peut y avoir action sur le fer selon le schéma suivant :



Fe^{2+} assimilable se transforme en Fe^{3+} inassimilable. Dans tous les cas, la chlorose semble liée à la présence dans la solution du sol de fortes concentrations en Ca^{++} et en bicarbonate CO_3H .

Ces phénomènes augmentent avec l'humidité et une température trop élevée ou trop basse. On note un accroissement du potassium dans les feuilles chlorosées et une diminution du fer soluble.

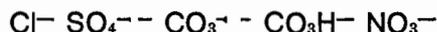
L'excès de calcium bloque le phosphore sous forme de phosphate tricalcique insoluble ; le bore peut être bloqué également si $\frac{B}{Ca} < \frac{1}{1500}$, le fer devient peu assimilable au-dessus de pH = 7,6.

11.3. - Problème des sols salés et à alcalis.

Le problème des sols salés et à alcalis est très complexe, il se pose aussi bien sur le plan de l'analyse des sols proprement dit que de l'interprétation des résultats dans le but de déterminer la fertilité des sols.

Définition des sols salés. Ce sont des sols qui contiennent en solution une grande quantité de sels solubles, et dont le complexe absorbant peut être plus ou moins saturé en ion sodium.

Les divers anions solubles que l'on peut doser sont les suivants :



Les borates peuvent s'accumuler occasionnellement.

Les cations principaux sont Na^+ et Mg^{++} , Ca^{++} dans le cas de sols riches en gypse.

On distingue trois catégories de sols salés.

— **Les sols salés proprement dits.** Ils sont riches en sels solubles, la conductivité électrique de l'extrait de sol saturé est supérieure à 4 millimhos/cm. Le rapport $\frac{\text{Na}}{\text{T}}$ est inférieur à 15 %, le pH est inférieur à 8,5, la structure est souvent bonne et les colloïdes bien floclés.

— **Les sols salés à alcalis.** Leur conductivité est supérieure à 4 millimhos/cm, le rapport $\frac{\text{Na}}{\text{T}}$ est supérieur à 15 %, le pH est supérieur à 8,5, les colloïdes sont floclés.

— **Les sols à alcalis non salés.** La conductivité est inférieure à 4 millimhos/cm, le rapport $\frac{\text{Na}}{\text{T}}$ est supérieur à 15 %, le pH est supérieur à 8,5 et peut atteindre 10, les colloïdes sont dispersés et l'humus peut être solubilisé en raison de l'alcalinité et de la présence de carbonates alcalins. Les sols à alcalis peuvent être lessivés superficiellement avec formation d'un horizon B très compact, ce sont les « Solonetz solodisés ».

Pression osmotique en atmosphère = $L \times 0,36$ (millimhos/cm).

Pour une même teneur en sels en % de sol sec, la conductivité dépend de l'humidité du sol, c'est-à-dire de son pouvoir de rétention. Un sol argileux ou humifère a une conductivité plus faible qu'un sol sableux pour un même état d'humidité, par exemple à la capacité maxima de rétention.

% de sel dans le sol = $0,064 L \times$ % eau dans le sol à saturation.

Action du sodium échangeable.

Dans les sols salés, un équilibre s'établit entre la composition de la solution du sol et celle de son complexe absorbant qui s'enrichit en ions sodium. Lorsque la teneur en sodium échangeable du sol est élevée, la structure se dégrade et la perméabilité baisse beaucoup. C'est, le plus souvent, à partir de Na/T-12-15 % que le phénomène revient très accusé. Dans certains sols, il peut l'être déjà à partir de Na/T = 6 - 8 %. Il apparaît ainsi que le magnésium peut parfois avoir une action nocive également ; dans d'autres cas, il agit, au contraire, à peu près comme le calcium.

Ces sols à alcalis, riches en sodium échangeable, ont, s'ils ne sont pas en même temps très salés, une réaction très basique. Leur pH/eau est alors de l'ordre de 8,8 à 9 et même au-delà, dès que le sol contient du carbonate de sodium. Dans ce dernier cas, le pH monte au-delà de 10. Une réaction aussi élevée est très néfaste. Les systèmes racinaires de nombreuses plantes ne le supportent pas ; par ailleurs, elle peut provoquer le blocage des divers oligo-éléments.

Amélioration des terrains salés. Après avoir, le cas échéant, supprimé l'arrivée des eaux riches en sels (nappe phréatique, filets d'eau souterrains circulant, etc., par un drainage approprié ou par un pompage), il faut lessiver le sol par des eaux peu ou pas salées : submersion et drainage.

Si le sol est riche en sodium échangeable, il faut lui apporter du gypse finement moulu (ou de la pyrite, ou parfois du soufre) pour remplacer ce sodium échangeable du complexe par du calcium.

La proportion nécessaire est calculée de façon à ramener Na/T à une valeur assez basse (si possible < 10 %). Si le sol est calcaire et surtout s'il contient du carbonate de sodium, on peut utiliser de l'acide sulfurique dilué. Cet apport de gypse est combiné avec une forte irrigation et un drainage efficace. On peut faire dissoudre le gypse dans l'eau d'irrigation.

Eaux d'irrigation. Les eaux d'irrigation salées sont dangereuses pour les sols et les cultures. Les ouvrages de L. RICHARDS (du Laboratoire de Riverside, U.S.A.) et de J. DURAND donnent des renseignements précis sur leurs possibilités d'utilisation.

D'après les auteurs américains, il est indispensable d'envisager non seulement la conductivité de l'eau mais aussi sa richesse en sodium (d'après la valeur du rapport d'absorption S.A.R. =

$$\frac{\text{Na}^+}{\frac{\sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}}{2}}$$

Les valeurs limites de conductivité par cm^2 sont de 250, 750 et 2250 micromhos.

Des eaux de conductivité supérieure à 2 250 micromhos ne devraient plus être utilisées. En fait, elles peuvent l'être encore, mais seulement en terrain sableux ou en terrain limoneux bien structuré et bien drainant. Des eaux de conductivité supérieure à 4 ou 5 millimhos ne sont que très difficilement utilisables.

Plutôt que le SAR, on peut utiliser le rapport moléculaire Na/Ca des éléments contenus dans l'eau. Il n'importe pratiquement d'ailleurs que si l'eau a une conductivité supérieure à 500 micromhos (et surtout supérieure à 750 micromhos) et si la terre n'est pas sableuse ou sablo-limoneuse. Ce sont surtout les eaux dans lesquelles Na/Ca est supérieur à 1 qui présentent un danger d'alcalisation pour les terres.

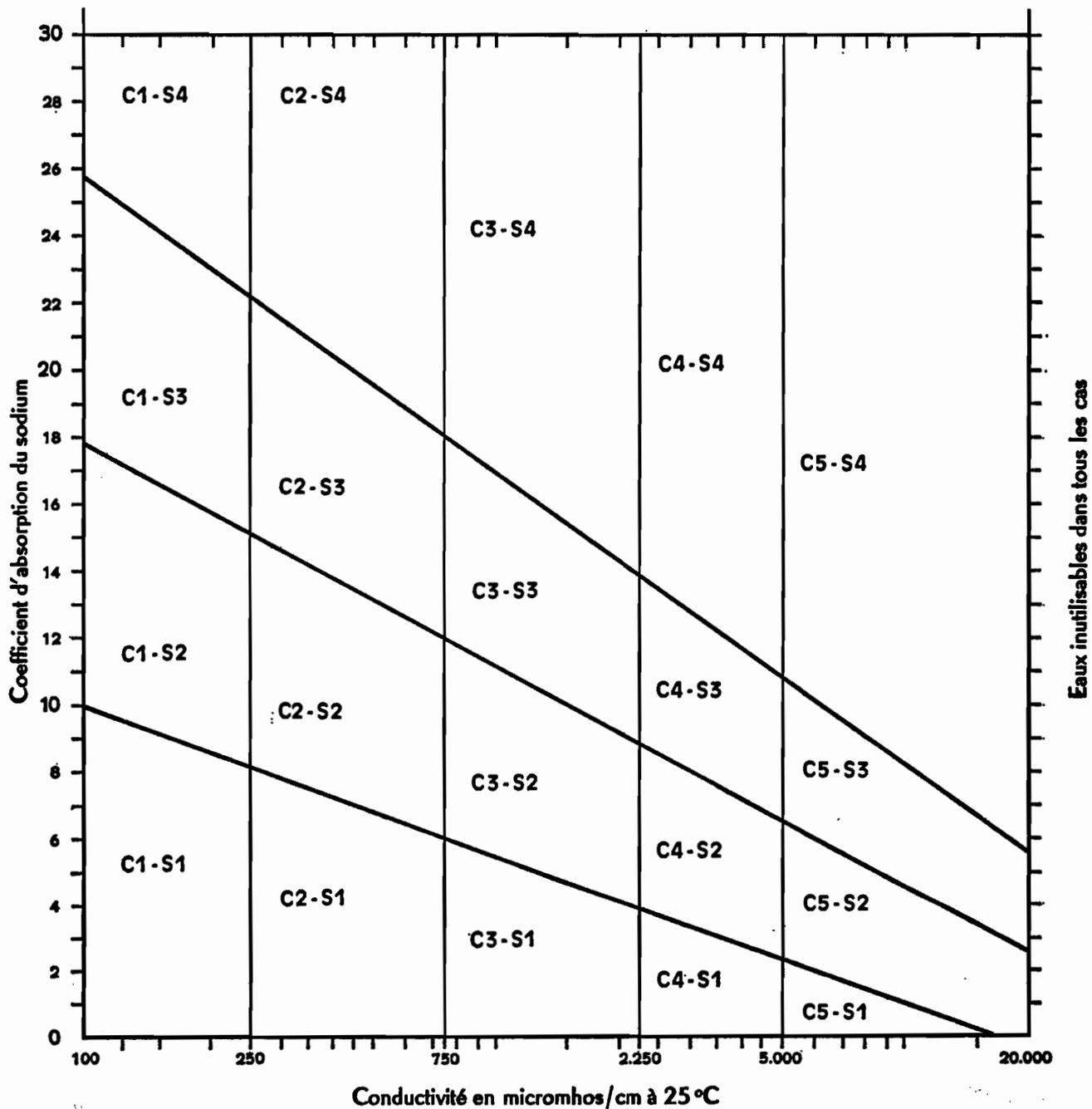


Fig. 39 - Diagramme permettant de déterminer la qualité des eaux en fonction de la conductivité et du coefficient d'absorption du sodium.

11.4. - Conditions d'utilisation des échelles de fertilité.

Dans les chapitres précédents on a passé en revue un certain nombre de facteurs du sol qui influent sur la fertilité : facteurs morphologiques, facteurs physiques (structure et bilan d'eau), facteurs chimiques tels que la matière organique, l'azote, le phosphore, les bases, le pH, etc.

Dans chaque cas, on a tenté de présenter des normes d'interprétation chiffrées, et d'établir des « échelles de fertilité ». Il est bien évident que ces échelles très générales, s'adressant à des cultures différentes, sous des conditions climatiques différentes, ne peuvent être qu'approximatives, mais elles ont l'avantage de préciser l'orientation des phénomènes, le mode et l'intensité d'action de chaque facteur pris séparément, et enfin de fixer certains niveaux de valeurs où ces facteurs deviennent insuffisants. Malgré les différences d'adaptation des cultures, les mauvaises propriétés du sol peuvent avoir une influence défavorable très générale.

Pour la commodité de l'exposé, il a été présenté successivement plusieurs échelles concernant : la structure, l'azote total et le pH, le phosphore total, etc. portant le nom « d'échelle de fertilité ». Mais il est bien évident que chaque échelle de fertilité, prise séparément, indique l'action particulière des éléments qui la concernent, mais ne saurait donner, à elle seule, une information suffisante sur la fertilité générale, s'il n'est pas tenu compte en même temps des autres éléments et des autres échelles.

Il existe souvent une certaine correspondance entre les différentes échelles, du fait, par exemple, que de nombreux facteurs physiques ou chimiques sont liés à la teneur en matière organique et varient dans le même sens.

Néanmoins, des facteurs limitants peuvent toujours exister. Par exemple, l'échelle azote total \times pH (Fig. 30) peut indiquer une fertilité bonne, et par ailleurs la courbe d'équilibre azote total \times acide phosphorique total, indiquer une teneur insuffisante en phosphore, la fertilité potentielle donnée par la première échelle ne pourra être atteinte que par l'apport d'engrais phosphatés, le phosphore étant, dans ce cas, un facteur limitant.

De même, dans le cas de sols riches en azote et à pH acide pour lesquels l'échelle indique une fertilité potentielle bonne, des carences en potassium et magnésium peuvent limiter les rendements, les normes d'interprétation données pour ces éléments constitueront une indication générale (rapport $\frac{K^+ \text{ potassium échangeable}}{T \text{ capacité d'échange}}$, rapport $\frac{Mg^{++}}{K^+}$, etc.) concernant le besoin de ces

sols en potassium ou magnésium. Dans le cas de sols peu humifères, pauvres en azote total et à pH neutre, la fertilité indiquée par l'échelle azote \times pH peut être bonne, par contre l'échelle de fertilité en fonction de la structure peut donner une indication mauvaise, surtout si le rapport $\frac{Na^+}{T}$ ou $\frac{Na^+}{Ca^{++}}$ est défavorable. La fertilité potentielle ne pourra être atteinte que par la correction des propriétés physiques (travail du sol, drainage, chaulage, sulfatage, plantes améliorantes, etc.).

C'est donc la comparaison des différentes échelles de fertilité qui indiquera pour chaque sol les éléments que l'on peut considérer comme favorables, et ceux, au contraire, qui constituent des facteurs limitants et doivent être corrigés.

Ces diagnostics nécessitent donc des analyses suffisamment complètes, aucune conclusion correcte ne pouvant être établie sur quelques chiffres isolés. Cependant, les facteurs physiques peuvent parfois être déterminés d'après les seules observations de terrain, et dans le cas de cultures pérennes ou à fort enracinement (cacaoyer), ce sont des données essentielles.

Les exemples chiffrés donnés dans le texte ont été fournis à titre d'illustration, l'action de facteurs séparés a été isolée pour la commodité de la présentation, les analyses complètes existent toujours mais ne figurent pas afin de ne pas trop alourdir les chapitres. Ces exemples correspondant à des faits réels, mais localisés, ne sont valables que dans les conditions où ils ont été établis, et il n'est pas question d'en généraliser les résultats ; cependant, il est possible de constater que ces **résultats s'intègrent dans les échelles de fertilité** dont les limites de catégories ont été choisies

très larges pour être d'un emploi suffisamment général. Ce sont ces échelles que l'agronome devra utiliser pour ses diagnostics. Les appréciations de qualité se rapportent davantage au sol qu'à la plante, les exigences particulières de chacune d'elles pouvant varier considérablement, c'est donc à l'agronome de savoir utiliser ces résultats d'une façon critique, et avec les précautions qui s'imposent; et après avoir effectué le travail analytique correspondant à l'étude des divers facteurs limitants, c'est en fonction de sa connaissance du milieu particulier qu'il désire étudier, de son expérience et de son jugement, qu'il pourra émettre une conclusion valable sur la fertilité du sol.

11.5. - Pédologie et fertilisation.

L'étude du sol permet de prévoir des aptitudes culturales, mais n'est pas toujours suffisante pour préciser les techniques de fertilisation qui doivent intervenir obligatoirement dans un programme de développement. Le problème de la fertilisation n'est pas traité dans ce travail, car il se base essentiellement sur l'expérimentation agronomique, et c'est plusieurs chapitres importants qu'il faudrait rajouter pour exposer les différentes techniques relatives à l'établissement des formules d'engrais.

On se borne donc à indiquer l'influence des facteurs pédologiques sur les problèmes de fertilisation, et à signaler quelques méthodes actuellement préconisées pour l'étude des carences minérales et leur correction.

R. CHAMINADE, ainsi que ses collaborateurs de l'I.R.A.T. ont préconisé une méthode en deux temps qui consiste :

- 1 — à effectuer des diagnostics de carence par une technique en petits vases de végétation ;
- 2 — à étudier les résultats en plein champ en déterminant les courbes de réponse des cultures à des doses croissantes d'éléments dont la carence a été mise en évidence dans les pots de végétation.

La technique en pot utilise une quantité faible de sol (1 kg), et une plante test (par exemple ray-grass) semée d'une façon très dense de façon à bien exploiter le sol de ses racines. La méthode est basée sur le principe de la loi du minimum de LIEBIG (si l'un des éléments nécessaires à l'alimentation des plantes vient à manquer, l'action de tous les autres est compromise), elle consiste à comparer le rendement obtenu avec une formule nutritive complète, et ceux résultant de la soustraction des divers éléments pris un par un. Les différences négatives les plus importantes avec la formule complète indiquent les plus fortes carences (P - K - Ca, etc.). Ces différences doivent être de 30 % pour avoir une signification. Une hiérarchie des différentes carences peut ainsi être établie.

Au cours du deuxième temps on étudie aux champs la courbe de réponse des cultures à l'azote en ajoutant au sol des doses croissantes de cet élément, tous les autres éléments dont la carence a été reconnue préalablement étant apportés en quantité largement suffisante. Les rendements augmentent en fonction des doses croissantes, puis, marquent un fléchissement après avoir passé par un optimum.

Le même essai peut être réalisé en présence de doses croissantes de phosphore après addition de la dose optimum d'azote et des autres éléments. Ces courbes de réponse permettent d'évaluer les quantités d'éléments à apporter pour amener le sol à un niveau de fertilité élevé. Dans certains sols ferrallitiques de Madagascar, des essais de ce genre ont permis de faire passer des rendements en maïs d'une valeur à peu près nulle, jusqu'à plus de 5 tonnes/ha.

Dans le cas d'éléments pouvant être fixés par le sol comme le phosphore, ces fortes fumures portent le nom de « fumure de redressement » ; elles constituent un véritable investissement pour accroître le capital de fertilité du sol. L'utilisation des « fumures de redressement » nécessite parfois l'emploi de fortes quantités d'engrais qui dépassent les besoins immédiats de la plante, le but de ces fumures est d'apporter chacun des éléments à un niveau tel que la nutrition minérale ne soit plus un facteur limitant, une fumure même légèrement excessive ne présentant pas d'inconvénients majeurs.

Cette méthode est destinée à promouvoir une agriculture intensive où l'achat des engrais est largement compensé par des rendements élevés. Cependant dans des systèmes agricoles à évolution lente, la fumure représente une dépense très importante et n'est pas toujours assurée d'une rentabilité

aisée, on cherche à réaliser une fumure optimale en tenant compte de considérations économiques. Parmi les méthodes préconisées, on peut citer celle qui est appliquée par l'I.R.C.T. (Institut du Coton) en particulier en Afrique tropicale.

Cette méthode comporte plusieurs étapes :

- la détermination et la localisation des déficiences minérales,
- la détermination de la composition optimale de la fumure,
- la courbe d'action de la fumure et la limite de rentabilité,
- l'arrière action et la fumure complémentaire,
- la détermination d'une formule facilement vulgarisable.

La détermination des déficiences minérales s'effectue principalement à l'aide du « diagnostic foliaire », plusieurs années d'essai ont mené à déterminer des teneurs critiques pour les principaux éléments N, P, S, K, etc. qui sont assez constantes pour l'ensemble du milieu étudié.

Ces déterminations de carences sont complétées par des essais aux champs qui utilisent une « méthode soustractive » un peu identique à celle préconisée pour les vases de végétation, et qui porte sur les quatre éléments principaux N, P, K, S. Cet essai soustractif est suivi pendant plusieurs années et permet l'étude de l'évolution des réserves minérales d'un sol sous l'effet d'une rotation ou d'une culture continue. Ces essais soustractifs sont liés au diagnostic foliaire, et plus récemment des analyses de sols (en particulier en Côte-d'Ivoire) ont montré une bonne correspondance entre les résultats d'analyse de phosphore (total et assimilable), les pourcentages de réponse du cotonnier dans les essais soustractifs et l'analyse des plantes.

La détermination de la composition optimale de la fumure est réalisée par une méthode appelée « méthode des coupes ».

Si l'on prend trois éléments N — P₂O₅ — K₂O appelés X₁ — X₂ — X₃, on trace des surfaces de réponse des cultures en faisant varier le rapport de ces éléments et en déterminant les rendements. La méthode des coupes prospecte une surface de réponse par des coupes expérimentales construites à partir de rendements observés et met en évidence les caractéristiques essentielles des

surfaces et volumes de réponse permettant d'établir la relation générale suivante $\frac{X_1}{a} = \frac{X_2}{b} = \frac{X_3}{c}$

Pour une concentration donnée en un élément X₁, X₂ ou X₃, il faut au minimum apporter les deux autres suivant des concentrations correspondant à la relation précédente pour obtenir la récolte maximale compatible avec les conditions de culture.

Dans le milieu naturel on peut calculer la composition en X₁ — X₂ — X₃ d'une fumure quelle que soit les doses choisies, en appliquant les deux formules :

$$aX_1 + bX_2 + c = 0$$

$$a'X_1 + b'X_2 + c' = 0$$

La composition de la fumure variera en fonction de la dose.

Les doses croissantes d'engrais mises en essai permettent de tracer la courbe de la fumure (doses croissantes × Rt) qui peut être utilisée soit pour la recherche de nouveaux facteurs limitants, soit pour déterminer la quantité d'engrais apportant le bénéfice le plus élevé. Les arrières actions des fumures sont déterminées par une méthode analogue. Enfin, après l'établissement des fumures optimum en divers points d'essais, des formules de fumure simplifiées doivent être mises au point pour des régions données et expérimentées.

D'autres techniques sont préconisées par les divers instituts spécialisés (I.F.A.C. - I.R.H.O. - I.F.C.C. - etc) ; dans le cas de cultures pérennes ou semi-pérennes (palmier, bananier, etc.), les méthodes sont parfois différentes et adaptées aux besoins propres de la plante, néanmoins le diagnostic foliaire, de même que l'étude morphologique et l'analyse des sols, sont fréquemment utilisés pour rechercher les facteurs de fertilité et effectuer les diagnostics de carence. De nombreux résultats d'essais ont été présentés à la Conférence de Tananarive (novembre 1967) sur la fertilité des sols tropicaux. Une des conclusions de ce colloque a été de proclamer l'importance primordiale de l'utilisation des engrais minéraux dans le développement de l'agriculture des pays tropicaux, dont

les sols sont généralement d'une grande pauvreté chimique. En second lieu, les conclusions du colloque ont indiqué que, pour obtenir une bonne efficacité des engrais, il était nécessaire que les autres facteurs de fertilité soient également à un niveau convenable. Facteurs physiques, matières organiques, techniques culturales, facteurs humains.

Lorsqu'on étudie une fumure minérale, il faut considérer l'ensemble des facteurs de fertilité, par exemple dans le cas des essais sur sol ferrallitique de Madagascar, la pluviométrie est suffisante, le sol est profond et possède une excellente structure, le taux de matière organique varie de 2 % à 5 %, le pH est de 4,6, l'échelle de fertilité (N total \times pH) indique une fertilité moyenne à bonne. Cependant, les rendements sans engrais sont très bas, en raison d'une grande pauvreté en phosphore et en bases échangeables ; dans ce cas, les apports massifs d'engrais chimiques donnent des résultats très spectaculaires.

Inversement, dans le cas de sols acides et très pauvres en matière organique, où l'échelle (azote \times pH) indique un niveau de fertilité bas à très bas, l'apport d'engrais seul ne produit généralement que de faibles accroissements de rendements, par exemple dans certains sols de savane dégradés d'Afrique continentale ; une régénération organique par une plante de couverture (graminée rustique ou autre) doit alors précéder la fertilisation minérale. De même, dans le cas de certains sols argileux à structure très compacte (Vertisols), il faut un bon travail du sol et des conditions de drainage convenables pour obtenir de bonnes récoltes de coton, et un effet significatif des fumures minérales.

Enfin, dans le cas des cultures pérennes, comme le cacao, il arrive parfois que dans des sols chimiquement peu riches, on ne parvienne pas, même après 10 ans d'essais, à mettre en évidence d'une façon significative l'effet positif des fumures minérales, on ne peut conclure que ces fumures sont inutiles, mais de nombreux facteurs jouent un rôle primordial: enracinement de la plante, alimentation en eau, ombrage, traitements des maladies, etc.

Ces quelques exemples, trop peu nombreux, montrent cependant que le problème de la fertilisation demeure très complexe ; les différentes méthodes de diagnostic apportent de très précieux renseignements, mais doivent intervenir dans un ensemble d'études où la pédologie conserve un rôle très important.

CONCLUSION GENERALE

Aussi bien en ce qui concerne les facteurs physiques que les facteurs chimiques de la fertilité, certaines données fondamentales de l'agronomie établies pour les régions tempérées sont applicables dans le cas des régions arides ou tropicales humides.

Néanmoins, certaines notions doivent être adaptées aux conditions particulières de climat et d'exploitation de ces régions, ainsi qu'à l'évolution particulière de leurs sols.

C'est sur ces notions particulières aux climats tropicaux que l'on a voulu insister, notamment sur la fragilité des réserves organiques et des éléments minéraux qui leur sont liés. La rapidité des métabolismes biologiques et l'intense pouvoir de dégradation de l'érosion conduit à donner plus d'importance à la notion de « réserves », d'autre part s'il est possible d'utiliser des sols à faible potentiel chimique, il y a des limites inférieures au-dessous desquelles il ne faut pas descendre, enfin l'amélioration de ce potentiel par des engrais et amendements peut conduire à des résultats très spectaculaires, qui sont encore actuellement des cas isolés mais qui constitueront cependant un facteur de progrès considérable de l'agriculture tropicale au fur et à mesure que l'ensemble des techniques culturales se perfectionneront.

BIBLIOGRAPHIE

- ADJANOHOON (E.). — 1964. Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire Centrale. Mém. ORSTOM, n° 7, 219 p.
- AHN (P.M.). — 1959. Soil — vegetation relationships in the western forest areas of Ghana. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. UNESCO. Recherches sur la zone tropicale humide, Paris, pp. 75-84.
- AUBERT (G.). — 1959. Influence de divers types de végétation sur les caractères et l'évolution des sols en région équatoriales ainsi que leurs bordures tropicales semi-humides. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. UNESCO, Recherches sur la zone tropicale humide, Paris, pp. 41-47.
- AUDRY (P.). — 1965. Premiers résultats partiels d'une étude d'évolution des sols comparée au Tchad. Coll. Conserv. Annal. Fertil. Sols, Khar-toum, 96-112.
- BEADLE (N.C.W.). — 1966. Soil phosphate and its role in molding segment of the Australian flora and vegetation, with special reference to xeromorphy and sclerophylly. Ecology, vol. 47, n° 6, pp. 992-1007.
- BERGER (J.M.). — 1964. Interprétation des résultats des analyses des échantillons de terre pour le centre de la Côte d'Ivoire. Station Centrale d'Expérimentation Agricole, Bouaké, IV, 31 p. multigr.
- BOSSER (J.), RIQUIER (J.). — 1952. Notice sur les cartes d'utilisation des sols. Feuille de Kianja-soa. I.R.S.M., Tananarive, carte au 1/200.000^e.
- BOSSER (J.), ROCHE (P.). — 1956. Notices sur les cartes d'utilisation des sols. 1. Feuille d'Andilamena. I.R.S.M., Tananarive, 24 p., carte au 1/40.000^e.
- BOUYER (S.). — 1958. Corrélation entre les résultats culturaux et les teneurs en phosphore du sol dans le cas des sols ferrugineux tropicaux du Sénégal. Int. Soc. Soil Science. Commissions II et VI. 1958. Hamburg, vol. II, pp. 244-249.
- BRAUD (M.), DAESCHNER (C.), MEGIE (C.), RICHARD (L.). — 1959. Application de la méthode des variantes systématiques à l'étude des fumures minérales. Possibilités d'un diagnostic foliaire du cotonnier. Coton et Fibres tropicales, vol. XIV, fasc. 3.
- CHAMINADE (R.). — 1964. Etude des carences minérales du sol, par l'expérimentation en petits vases de végétation. Science du Sol, n° 2.
- CHAMPION (J.), DUGAIN (F.), MAIGNIEN (R.), DOMMERGUES (Y.). — 1958. Les sols de bananeraies et leur amélioration en Guinée. Fruits, vol. 13, nos 9-10, pp. 415-462.
- CHAMPSOLOIX (R.). — 1960. Le ray dans quelques villages des Hauts-Plateaux du Viet-Nam. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France, Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 46-62.
- COMBEAU (A.), OLLAT (C.), QUANTIN (P.). — 1961. Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. Relations entre les rendements et les résultats d'analyses des sols. Fertilité, n° 13, pp. 27-39.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.). — 1964. Observations sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. II, n° 1, pp. 3-11.
- DABIN (B.). — 1954. Les problèmes d'utilisation des sols à l'Office du Niger. Conf. Interfr. Sols. 2. 1954. Léopoldville, vol. II, pp. 1165-1176.
- DABIN (B.). — 1956. Interprétation agronomique des analyses de sols, cas particulier de l'azote et du phosphore. Congr. Int. Sci. Sol. 6. 1956. Paris, vol. D, pp. 403-409.
- DABIN (B.). — 1956. Contribution à l'étude de la fertilité des terres de Barre. Agron. trop., t. XI, n° 4, pp. 490-506.
- DABIN (B.). — 1961. Les facteurs de fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. Bull. Ass. Etude Sol, n° spécial, pp. 108-130.
- DABIN (B.). — 1962. Relations entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux. Ann. agron., vol. 13, n° 2, pp. 111-140.
- DABIN (B.). — 1962. Utilisation des études pédologiques pour la détermination du potentiel de fertilité des sols tropicaux. Bull. techn. Inform. Ingénieurs Serv. agric., n° 172, pp. 1-8.
- DABIN (B.). — 1962. Etude pour la reconversion des cultures de Caféier dans la République de Côte d'Ivoire. Pédologie. BDPA-ORSTOM, Paris, 2 vol., 333 p. multigr.
- DABIN (B.). — 1963. Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. Les formes du phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., n° 3, pp. 27-42.
- DABIN (B.). — 1964. Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. II, fasc. 1, pp. 29-40.
- DABIN (B.). — 1964. Etude des formes du phosphore dans quelques sols des Antilles. Action sur l'alimentation phosphatée de la canne à sucre. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. II, fasc. 2, pp. 5-12.

- DABIN (B.), LENEUF (N.). — 1960. Les sols de Bananeraies de la Côte d'Ivoire. *Fruits*, vol. 15, n° 1, pp. 3-27 ; n° 2, pp. 77-88 ; n° 3, pp. 117-127.
- DANSEREAU (P.). — 1952. The varieties of evolutionary opportunity. *Rev. can. Biol.*, II, 4, pp. 305-388.
- DURAND (J.H.). — 1965. Technique utilisable pour dresser les cartes de mise en valeur des sols. IRAT, Nogent-sur-Marne, 20 p. multigr.
- DUVIGNEAUD (P.), DENAEYER-DE SMET (S.). — 1960. Action de certains métaux lourds du sol (cuivre, cobalt, manganèse, uranium) sur la végétation du Haut-Katanga. in : *Rapports du Sol et de la Végétation*. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 121-139.
- FERRI (M.G.). — 1959. Aspects of the soil-water-plant relationships in connexion with some brazilian types of vegetation. *Sols et végétation des régions tropicales*. Travaux Coll. Abidjan. UNESCO, Recherches sur la zone tropicale humide, Paris, pp. 103-109.
- FORESTIER (J.). — 1959-1960. Fertilité des sols des Cafésières en République Centrafricaine. *Agron. trop.*, t. XIV, n° 3, pp. 306-348 ; t. XV, n° 1, pp. 9-37.
- HENIN (S.). — 1960. Le profil cultural. SEIA, Paris, 320 p.
- KOECHLIN (J.). — 1961. La végétation des savanes dans le Sud de la République du Congo. *Mém. ORSTOM*, n° 1, 310 p.
- LE HOUEROU (H.N.). — 1962. Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. 1^{re} partie. Les milieux naturels, la végétation. Thèse 1959. *Mém. Inst. Rech. Sahariennes*. H.S. n° 6, Alger, 283 p.
- LEMEE (G.). — 1959. Effets des caractères du sol sur la localisation de la végétation en zones équatoriale et tropicale humide. *Sols et végétation des régions tropicales*. Travaux Coll. Abidjan. UNESCO, Recherches sur la zone tropicale humide, Paris, pp. 25-39.
- RICHARDS (P.W.). — 1957. *The tropical rain forest*. Cambridge Univ. Press.
- RICHARDS (P.W.). — 1959. — The types of vegetation of the humid tropics in relation to the soil. *Sols et végétation des régions tropicales*. Travaux Coll. Abidjan. UNESCO, Recherches sur la zone tropicale humide, Paris, pp. 15-21.
- SCHMID (M.). — 1960. Influence de la végétation sur la conservation du sol et sur la restauration de la fertilité des terres en zone intertropicale humide. in : *Rapports du sol et de la végétation*. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 28-45.
- SCHMID (M.). — 1962. Contribution à la connaissance de la végétation du Viet-Nam : le massif Su-Annamitique et les régions limitrophes. Thèse. Orsay, 426 p. multigr.
- SCHMID (M.). — 1964. Aperçu sur la végétation occupant les alluvions récentes de la partie méridionale de l'Indochine. Les problèmes scientifiques des deltas de la zone tropicale humide et leurs implications. *Actes Coll. Dacca. UNESCO, Recherches sur la zone tropicale humide*. Paris, pp. 235-241.
- SEGALEN (P.). — 1960. L'étude de la végétation et la prospection pédologique. Cas particulier de l'Ouest et du Nord-Ouest de Madagascar. in : *Rapports du sol et de la végétation*. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 155-159.
- SIMONNEAU (P.). — 1960. Influence de la salinité sur les plantes et les cultures en Afrique du Nord. in : *Rapports du sol et de la végétation*. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 140-149.
- SPECHT (R.L.), GRIVES (R.H.). — 1966. A comparison of the Phosphorus nutrition of australian heath plants and introduced economic plants. *Austr. J. Bot.*, vol. 14, n° 2, pp. 201-221.
- TERCINIER (G.). — 1962. Les sols de la Nouvelle-Calédonie. *Sah. ORSTOM. sér. Pédol.*, n° 1, 51 p.
- TROCHAIN (J.L.). — 1940. Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. *Mém. IFAN*, n° 2, Larose, Paris, 433 p.
- VELLY (J.), CELTON (J.), ROCHE (P.). — 1967. Fertilisation de redressement après diagnostic des carences minérales sur les sols de culture sèche à Madagascar. Trois parties. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive.
- WALTER (H.). — 1964. Die vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung I. Die tropischen und subtropischen Zonen. Gustav Fischer, Jena.
- WEBB (L.J.). — 1965. The influence of the soil parent materials on the nature and distribution of Rain Forests in South Queensland. Symposium on ecological research in humid tropics vegetation. 1963. Kuching, Sarawak. Government of Sarawak, Unesco, Kuching, pp. 3-14.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Secrétariat d'État aux Affaires Étrangères

techniques rurales en afrique

10

pédologie et développement

B. D. P. A.

O. R. S. T. O. M.

1970

techniques rurales en afrique

10

pédologie et développement

A la demande du Secrétariat d'Etat
et pour faciliter la tâche des ingénieurs travaillant en Afrique

Ce document a été établi par un groupe de travail
auquel ont collaboré,

l'Office de la Recherche Scientifique et Technique
Outre-mer,

le Bureau pour le Développement de la Promotion
de l'Agriculture.

