

CHAPITRE X

LES FACTEURS CHIMIQUES DE LA FERTILITE DES SOLS (MATIERE ORGANIQUE ; PHOSPHORE)

B. DABIN

INTRODUCTION

L'analyse chimique des sols est utilisée par les pédologues pour préciser les bases de la classification des sols, mais également pour caractériser un ensemble de propriétés qui agissent directement ou indirectement sur la croissance des plantes.

En ce qui concerne le choix des fertilisants, d'autres techniques sont préconisées : analyses des végétaux, diagnostic foliaire, essais en pots, essais aux champs. Ces techniques ne doivent pas être opposées mais plutôt associées, les unes étant le complément indispensable des autres pour parvenir à un résultat précis.

Le principal intérêt de l'analyse des sols est de donner, par un test relativement rapide sur un échantillon prélevé à un moment quelconque de l'année, avec ou sans culture, des renseignements fondamentaux sur la nature du milieu qui doit servir à l'alimentation des plantes.

La difficulté réside dans le choix des techniques analytiques et dans le fait que chaque résultat d'analyse doit faire l'objet d'une interprétation en fonction de la méthode utilisée, du type de culture, du type de sol, du climat, etc.

Il n'existe pas de recette simple d'interprétation ; néanmoins, il semble possible d'énoncer quelques règles générales qui serviront de guide à l'interprétation. On devra par ailleurs faire appel à son jugement et à son expérience pour adapter les solutions générales aux problèmes particuliers de chaque région et de chaque sol.

10.1. - La matière organique dans les sols tropicaux.

10.1.1. Comparaison entre la matière organique des sols tempérés et la matière organique des sols tropicaux.

Dans les sols des régions tempérées, les agronomes ont constaté une grande stabilité du taux de matière organique des sols ; ce n'est qu'après de nombreuses années de culture sans fumure organique que des diminutions sensibles des taux de carbone et d'azote ont été décelées.

Si le maintien d'un stock minimum de matière organique reste une préoccupation surtout en ce qui concerne la structure physique des sols, dans l'immédiat, le travail du sol, ainsi que des apports massifs d'engrais minéraux en particulier d'engrais azotés, suffisent généralement à maintenir les rendements des récoltes à un niveau élevé.

Sur le plan agronomique, une teneur élevée en carbone n'indique pas toujours un sol fertile, mais plutôt un sol où les conditions de transformation de la matière organique sont difficiles (sols acides, sols trop humides, etc.). Quant à l'azote, la fourniture de cet élément aux plantes dépend plus des conditions de minéralisation (fonction de la température, de l'humidité, de la nature du sol) que du stock global sous forme organique.

Dans les sols tropicaux, le problème se pose différemment, bien qu'il y ait lieu de distinguer les sols des régions sèches des sols des régions humides. Dans les classes des sols isohumiques, des sols à sesquioxydes, des vertisols, ainsi que des sols hydromorphes minéraux, l'humification des matières organiques est rapide ; seuls certains sols hydromorphes organiques possèdent des matières organiques grossières à C/N élevé, mais qui sont néanmoins susceptibles d'évoluer après drainage et chaulage du sol. L'humus des sol tropicaux possède une certaine stabilité, néanmoins, la minéralisation de l'azote est toujours assez rapide et dépend surtout, comme il sera montré plus loin, des conditions d'humidité du sol et du pH.

D'autre part, certains facteurs influent sur le taux d'humus : soit mauvaises conditions d'accumulation (climat trop sec, absence de végétation, sol trop sableux), soit destruction rapide de l'humus (entraînement par érosion). Ces facteurs peuvent amener des variations très importantes du taux d'azote total dans les sols. Donc, puisque la minéralisation est rapide et que le stock peut être très variable, l'importance du stock d'azote total joue un rôle important dans la fertilité, c'est donc là une différence essentielle avec les pays tempérés ; et de très nombreux dosages d'azote total dans des sols de fertilité connue ont montré l'importance de cette mesure dans les diagnostics de fertilité.

La matière organique n'agit pas seulement comme source d'azote, il a déjà été montré son importance dans les problèmes de structure et de rapports eau et sol. Par ailleurs dans les sols où les colloïdes minéraux font défaut ou n'ont qu'une très faible capacité d'échange de bases (cas des sols à kaolinite), la matière organique est le principal constituant permettant la fixation des bases (capacité d'échange 300 mé pour 100 g), et il semble aussi que le phosphore total et assimilable, soit lié en grande partie à la matière organique. Pour toutes ces raisons et d'autres encore, la matière organique des sols tropicaux est un facteur essentiel de leur fertilité chimique.

Taux d'équilibre de l'humus.

Est-il nécessaire dans ces conditions de vouloir à tout prix augmenter le stock d'humus des sols, la réponse est très variable suivant les cas.

Dans la plupart des sols vierges sous végétation naturelle **non dégradée**, il existe un taux de matière organique que l'on peut considérer comme taux d'équilibre ; il est extrêmement variable suivant les types de sol. Il correspond assez généralement à de bonnes propriétés du sol. La mise en culture provoque souvent une diminution rapide du taux de matière organique, et il est alors nécessaire de prendre des mesures de conservation et d'amélioration du stock d'humus, dans d'autres cas, le taux de l'humus reste très stable malgré la mise en culture.

Dans tous les cas, l'expérience montre qu'il est très difficile par une fertilisation organique de dépasser le taux d'équilibre, c'est donc lui qui doit servir de base pour la fertilisation organique. Il est important de conserver ou d'atteindre ce taux d'équilibre, il est vain de vouloir le dépasser.

En plus de la quantité d'humus déterminée par les dosages de carbone et d'azote du rapport C/N ou même des colloïdes humiques totaux, il existe aussi un problème de qualité.

Qualité de l'humus.

Actuellement, il n'existe que peu de méthodes pour juger la qualité de l'humus. La richesse en bases et en phosphore par rapport à la quantité d'azote et les proportions relatives en acide humique et acide fulvique ainsi que les fractions d'acides humiques gris, intermédiaires et bruns semblent être en relation avec la qualité de l'humus au point de vue fertilité.

Si le taux de matière organique sous végétation naturelle non dégradée semble représenter un optimum du point de vue quantitatif, il ne représente pas toujours l'optimum qualitatif qui peut être très largement amélioré par des enrichissements en éléments minéraux (phosphore, calcium, magnésium) surtout dans les sols lessivés ou les sols formés sur roches acides et pauvres. La fertilisation minérale est donc le complément indispensable de la conservation du stock organique d'équilibre.

10.1.2. Variations du taux de matière organique dans les sols tropicaux.

Régions semi-arides, 400 à 600 mm de pluie annuelle. (Longue saison sèche, 9 mois ; courte saison des pluies, 3 mois).

Dans les régions semi-arides, les taux de matière organique des sols sont généralement très bas ; ils sont de 0,3 à 0,4 % dans les sols sableux (ferrugineux tropicaux non lessivés) et d'environ 1 % dans les sols argileux (sols bruns argileux, vertisols). Les taux d'azote total varient de 0,02 à 0,04 %. Cette matière organique est assez bien répartie et assez constante sur environ 0,50 m de profondeur.

La mise en culture ne diminue que très faiblement le taux de matière organique du sol (sauf érosion éolienne dans les sols sableux). L'apport d'amendements organiques (engrais verts) n'améliore que très faiblement le taux de matière organique (le résidu humifié stable d'une matière organique enfouie n'est que de 11 % de la quantité introduite, il peut passer à 20 % avec apport d'engrais azotés).

Malgré les taux de matière organique et d'azote très bas, certains sols vierges sortant de longue jachère peuvent être fertiles (1 500 à 3 000 kg d'arachide dans les sols sableux, 1 500 à 3 000 kg de coton-graine dans les sols argileux). Cette fertilité est due vraisemblablement à une activité biologique intense pendant la courte saison des pluies, et elle dépend beaucoup du pH du sol ; la fertilité est en relation avec la vitesse de nitrification et la fixation d'azote atmosphérique. Dans ces sols, la fertilité est très bonne vers pH 7 et devient rapidement très mauvaise au-dessous de pH 6. Les sols des régions arides réagissent très généralement aux engrais azotés ; les engrais phosphatés ont des réactions variables, fonction de la richesse en phosphore des sols.

Une conséquence de la pauvreté en matière organique est la mauvaise structure des sols, surtout pour les sols argileux ; ces sols sont souvent très compacts et présentent de larges fentes de retrait en saison sèche ; en période des pluies ou sous irrigation, les terres sont battantes et imperméables (culture du coton dans les sols alluviaux). Cette structure peut être améliorée provisoirement par le travail du sol qui nécessite une forte dépense d'énergie. L'augmentation de la teneur en calcium échangeable peut permettre le développement d'une structure polyédrique fine en surface qui améliore la perméabilité et les conditions de travail du sol.

Le repos sous jachère où les engrais verts peuvent avoir une action favorable sur la porosité du sol et l'enracinement, même s'ils n'augmentent pas ou peu le stock organique, les engrais verts jouent un rôle important dans les sols sableux. Ils protègent le sol contre l'érosion et améliorent le profil cultural et l'enracinement (culture arachidière) de même les feuilles de *Faidherbia albida* augmentent fortement les rendements.

Régions semi-humides, 600 à 1 200 mm de pluie annuelle. (5 à 7 mois de saison sèche).

Cette zone climatique correspond aux sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés et à la limite des sols faiblement ferrallitiques, on y observe également des vertisols, des sols hydromorphes, etc.

La matière organique qui provient des racines des grandes graminées est encore assez bien répartie en profondeur, elle est à peu près constante entre 0 et 20 cm, mais diminue de moitié entre 20 et 40 cm, puis progressivement au-dessous.

Les taux sont extrêmement variables suivant le type de sol ; la teneur en éléments fins et le pH influent considérablement sur le taux de matière organique (de 0 à 15 cm). Entre 10 % et 60 % d'(argile + limon), le taux de matière organique varie de 1 % à 3,5 % à pH = 6 et de 2 à 5 % à pH = 7.

FORESTIER (1959) fait intervenir le rapport $\frac{S'}{A + L}$

où S = somme des bases en mé 100 g.

A + L = (argile + limon) %.

Lorsque ce rapport est constant, le taux de matière organique croît proportionnellement au taux de (A + L).

Pour une certaine valeur de (A + L), le taux de matière organique croît avec le rapport $\frac{S'}{A + L}$ (par exemple, pour des valeurs moyennes 25 % de A + L, la matière organique passe de

1,5 % à plus de 3 % lorsque $\frac{S'}{A + L}$ passe de 0,5 à 1,2).

Ces règles donnent une valeur chiffrée approximative à l'action des « stabilisateurs d'humus » qui sont des colloïdes minéraux et des cations comme le calcium, permettant une meilleure fixation de l'humus sur l'argile.

Il faut tenir compte en outre, dans les sols tropicaux, de la résistance accrue à l'érosion offerte par des agrégats stables, argileux et humifères et bien saturés en ion calcium.

Evolution de la matière organique par la culture : Dans un sol de savane de la République Centrafricaine la perte de matière organique dans un sol protégé contre l'érosion est d'environ 20 % en 3 ans. Si le sol est soumis à l'érosion, cette perte de 20 % peut avoir lieu en un an.

Si la jachère se reconstitue rapidement, la régénération du sol peut être rapide : un à deux ans. Si le sol est appauvri et que la jachère ne se reconstitue que lentement, laissant l'érosion poursuivre son action, la régénération peut être très lente : 10 ans.

Si l'on conjugue la protection antiérosive et une fertilisation organique et minérale, il est possible de maintenir le taux de matière organique du sol avec des jachères réduites.

Tableau 9

CHIFFRES OBTENUS A LA STATION I.R.C.T. DE BOUAKE (COTE-D'IVOIRE) SUR SOL FERRUGINEUX TROPICAL LESSIVE A 25 % (A + L) SUR 0-20 CM

	Culture de coton			Sommels des bases échangeables	
	C %	N %	P ₂ O ₅ %	pH	S mé/100 g
• Sols sous culture récente non améliorés (coton 1 500 kg/ha)	0,895	0,083	0,44	6,3	6,46
• Sols améliorés par 20 années de fumier de ferme (coton 3 000 kg/ha)	1,167	0,077	1,83	6,5	9,17
	1,17	0,11	2,11	6,8	12,85
• Sols érodés (rendements en coton médiocres) ..	0,489	0,052	0,32	6,1	2,43

Comme il est possible de le constater, les sols recevant de très fortes fumures organiques et cultivés d'une façon à peu près continue conservent leur taux de matière organique à peu près constant et voisin d'un taux d'équilibre (sol sous culture récente). Par contre, les observations de terrain montrent dans les sols améliorés un horizon humifère d'une couleur noire plus foncée, avec une meilleure structure que dans le sol non amélioré. Cet aspect différent de l'humus ne se manifeste pas sur le taux de carbone et d'azote.

Sols ferrallitiques faiblement désaturés

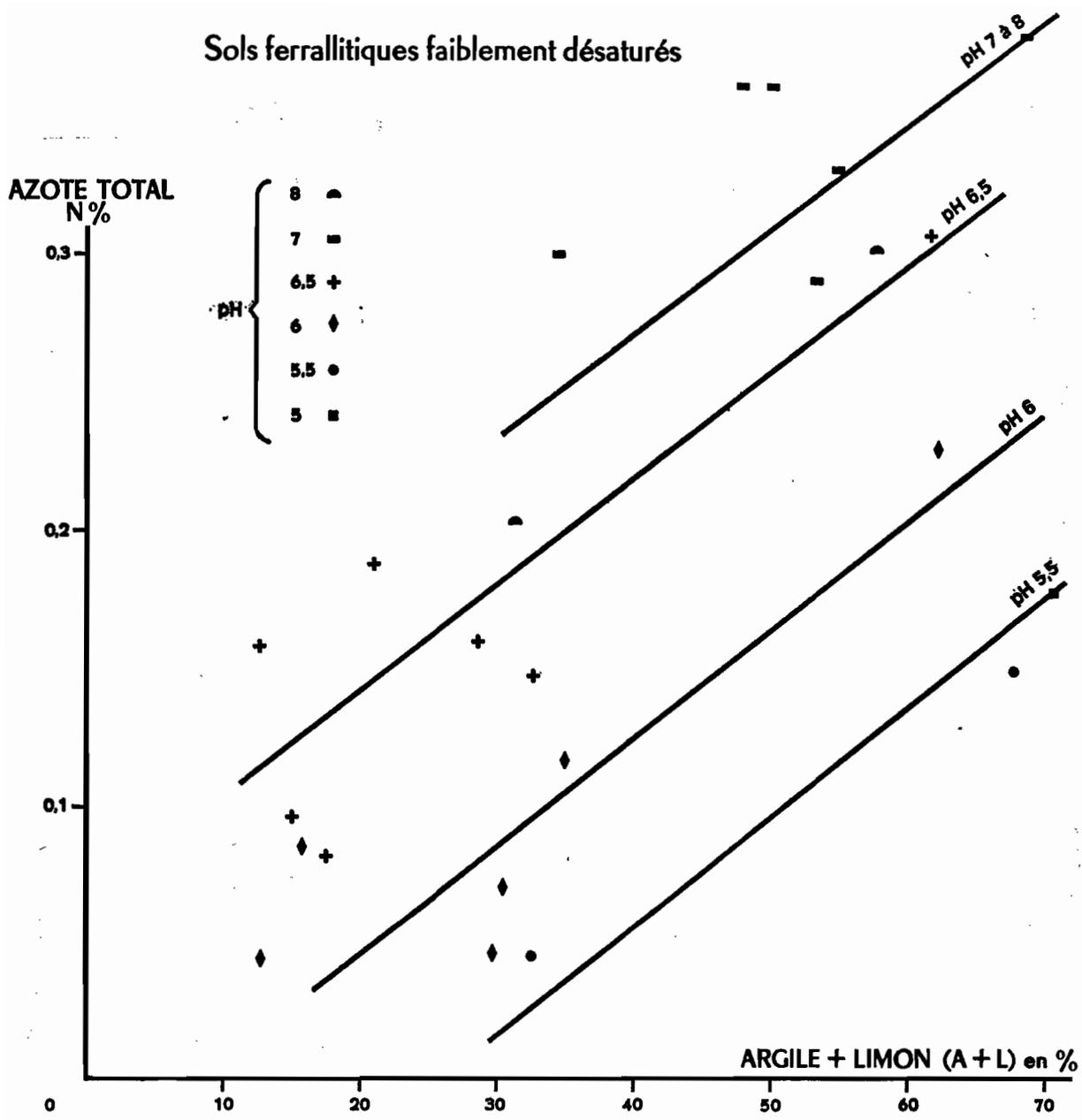


Fig. 24 - Relation entre la teneur en azote total, argile, limon, le pH dans les sols ferrallitiques faiblement désaturés.

En revanche, on note un accroissement considérable de phosphore total multiplié 4 à 5 fois et du taux de bases environ doublé. Le pH présente également une augmentation sensible, le rendement en coton est doublé. Dans ce cas, intervient certainement une amélioration de la qualité de l'humus qui se manifeste ici par des rapports plus élevés $\frac{P_2O_5}{N}$ et $\frac{S}{N}$.

Dans certains sols de République Centrafricaine on a noté une diminution de stabilité structurale dans des sols aux taux de carbone à peu près constants. Cette diminution semble correspondre à un accroissement du rapport $\frac{\text{acides fulviques}}{\text{acides humiques}}$ et également à l'accroissement du rapport.

Sols ferrallitiques moyennement désaturés

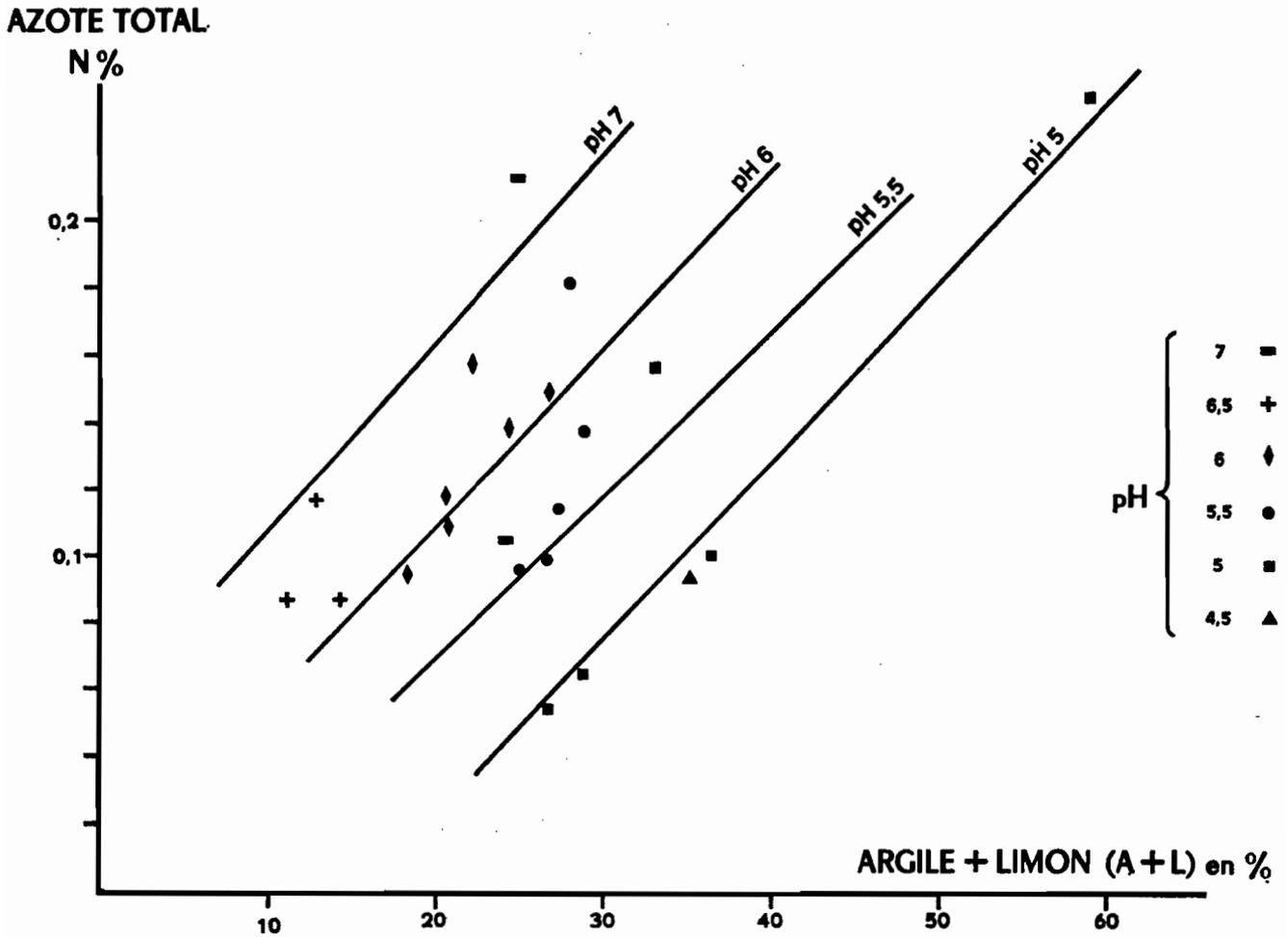


Fig. 25 - Relation entre la teneur en azote, la teneur en argille + limon, le pH dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés.

$$Y = \frac{\text{acides humiques bruns} + \text{acides humiques intermédiaires}}{\text{acides humiques gris}}$$

$$Y = 38,69 + 3,6 \text{ Is (où Is : Indice d'instabilité de HENIN).}$$

Dans les sols érodés de Bouaké où le rendement en coton est médiocre, les taux de carbone et d'azote sont diminués environ de moitié, les taux de phosphore et de bases sont faibles, le pH s'est acidifié. D'après les études de B. DABIN confirmées par les observations de J.M. BERGER (1964) pour obtenir de bonnes récoltes dans ces sols, le taux d'azote total ne doit pas descendre en dessous de 0,8 ‰, le taux de phosphore total ne doit pas descendre au-dessous de 0,7 ‰ et le pH doit se situer entre 6 et 6,5.

Dans ces régions où la pluviométrie reste assez limite, les normes d'interprétation doivent être plus sévères que dans le cas des sols irrigués. Ces normes d'interprétation varient en fonction des types de sol, des indications plus complètes seront données plus loin.

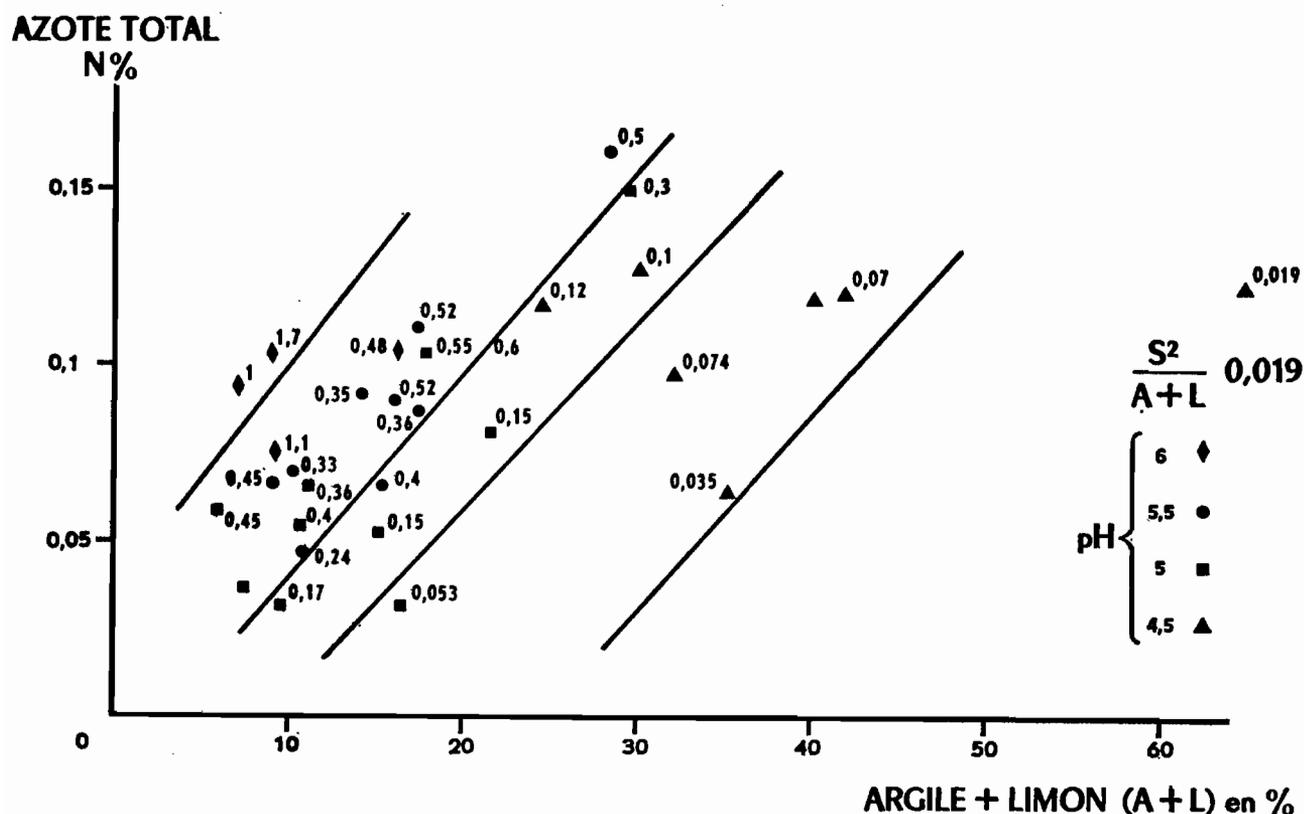


Fig. 26 - Relation entre la teneur en azote, la teneur en argile + limon, le pH dans les sols ferrallitiques fortement désaturés.

Les sols des régions humides, 1200 à 2000 mm de pluie.

Ces sols se trouvent généralement sous végétation forestière qui apporte environ 10 tonnes de matière organique par ha et par an ; cette matière organique se décompose très rapidement, il n'y a que très peu de débris végétaux à la surface du sol, même sous forêt dense le sol est souvent nu. L'épaisseur de l'horizon humifère diminue au fur et à mesure que l'on se retrouve sous une pluvio-

métrie plus élevée. En moyenne, la plus grande partie de la matière organique se trouve entre 0 et 5 cm, entre 5 et 10 cm, elle tombe à la moitié de la teneur superficielle, entre 10 et 20 cm, environ au 1/3, et au-dessous de 20 cm, la diminution est très rapide.

Les prélèvements moyens de surface doivent donc être effectués entre 0 et 10 cm. Comme dans le cas des sols de savane, le taux de matière organique en surface peut varier de 1 à 6 % et même davantage en fonction du taux d'argile + limon, et du pH, c'est-à-dire de la saturation en bases du complexe absorbant ; il est possible également d'utiliser l'indice de FORESTIER $\left(\frac{S^*}{A + L}\right)$ en corrélation avec le taux de matière organique.

Trois graphiques représentent les variations du taux d'azote total dans l'horizon superficiel (0-10 cm) des sols ferrallitiques de Côte-d'Ivoire, en fonction du taux d'(argile + limon) et du pH (Fig. 24, 25, 26). Il s'agit d'une relation assez lâche qui n'a pas été calculée statistiquement).

— **Sols ferrallitiques très désaturés**, où les taux d'azote varient de 0,03 % à 0,15 % avec des pH variant de 4,5 à 6.

— **Sols ferrallitiques moyennement désaturés** où les taux d'azote varient de 0,05 % à 0,2 % avec des pH variant de 4,5 à 7.

— **Sols ferrallitiques faiblement désaturés** où les taux d'azote varient de 0,05 à 0,4 % avec des pH variant de 5 à 8.

Inversement, la somme S des bases échangeables est fonction du taux d'azote total proportionnel au taux de matière organique, qui dans ces sols devient l'élément essentiel permettant la fixation des bases, puisque l'argile de type kaolinique n'a qu'une capacité de fixation très faible.

Les variations des taux de matière organique, et bases échangeables, ont été suivies en Côte-d'Ivoire, sous divers types de culture dans des parcelles expérimentales d'érosion. Les résultats sont présentés dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10

EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE SOUS CULTURE DANS LES SOLS FERRALLITIQUES TRES DESATURES (SOLS SUR SABLES TERTIAIRES DE BASSE COTE-D'IVOIRE)

		3 années d'expérience					
		Terre érodée Kg/ha	MO %	N %	C/N	S mé/100 g	Indice de structure
Témoin	Forêt	2 800	2,85	0,151	11	1,4	1 350
Culture	2 ans plante de couverture 1 an maïs	77 540	2,5	0,099	14,8	0,3	1 100
Sol	3 ans	335 391	1,24	0,059	12,4	0,14	700

Tableau 11

CULTURE INDUSTRIELLE D'ANANAS (ONO COTE-D'IVOIRE)

	MO %	N %	C/N	S mé/100 g	Indice de structure
1 an de culture	1,5	0,069	12,6	3,13	910
4 ans de culture	1,21	0,044	15,9	0,828	900
6 ans de culture	1,21	0,04	17	0,634	840
Régénération 4 ans Pennisetum purpureum	2,46	0,08	17,7	2,48	1 350

Sols ferrallitiques faiblement désaturés

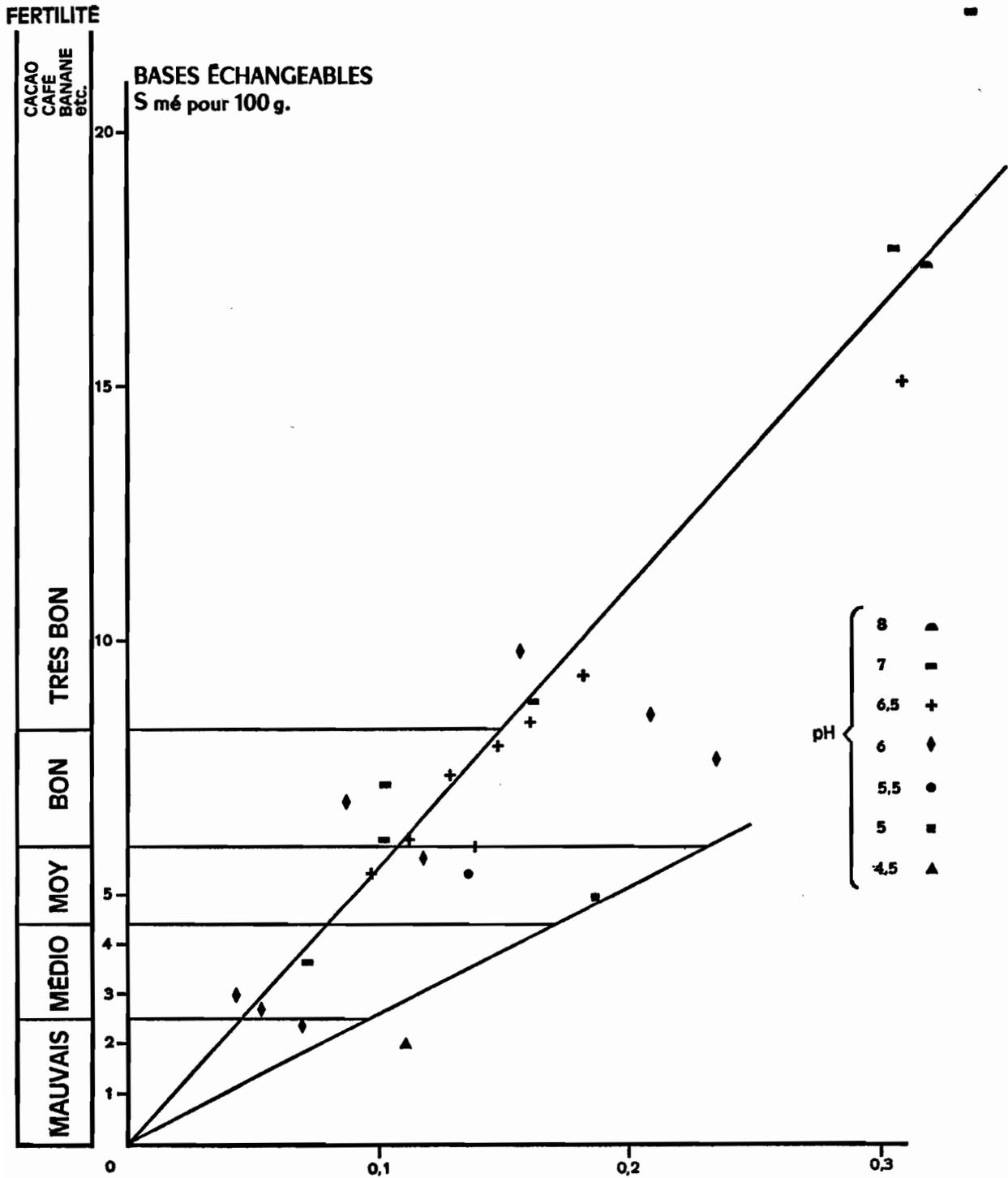


Fig. 27 - Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques faiblement désaturés.

Sols ferrallitiques moyennement désaturés

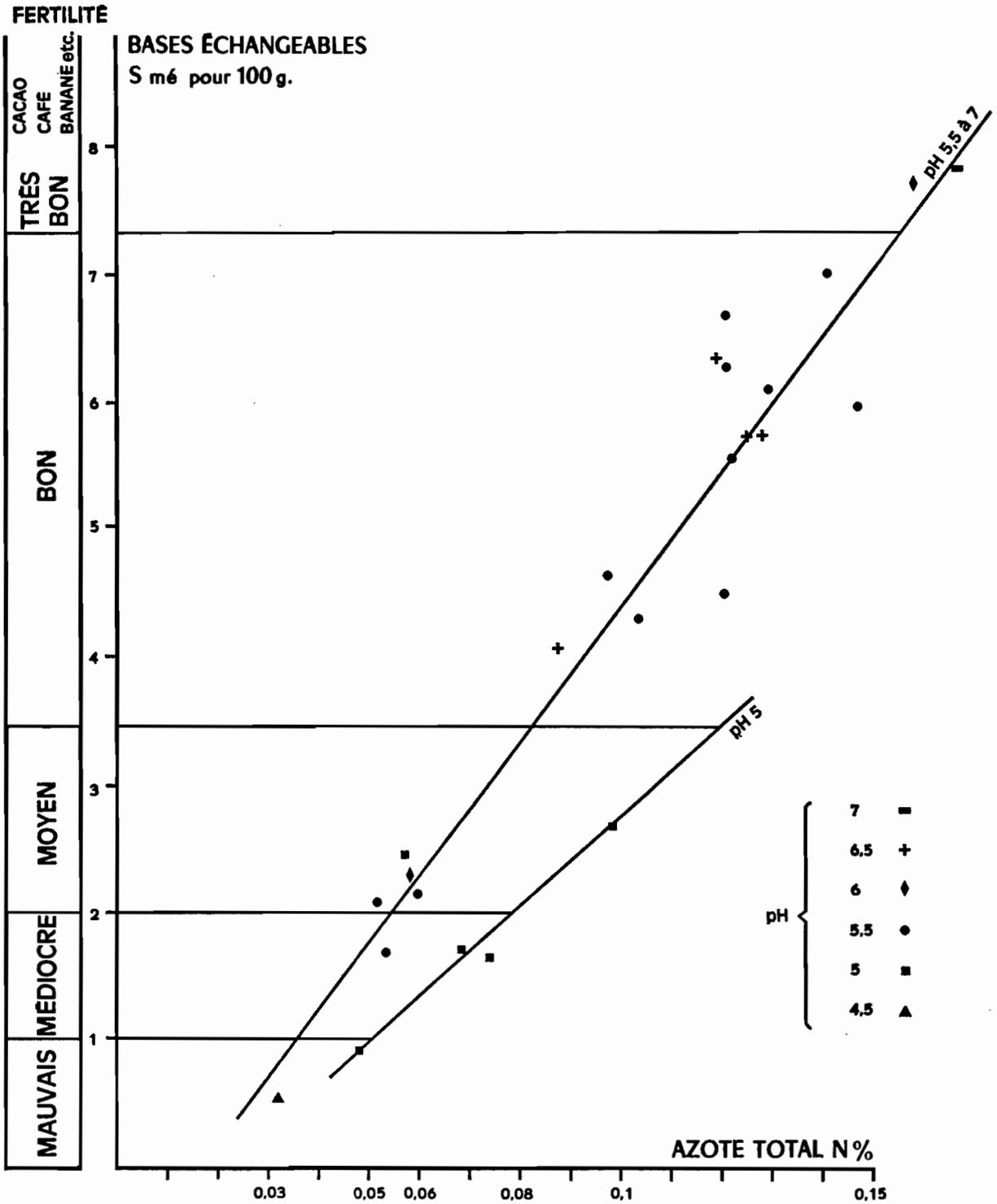


Fig. 28 - Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés.

Sols ferrallitiques très désaturés

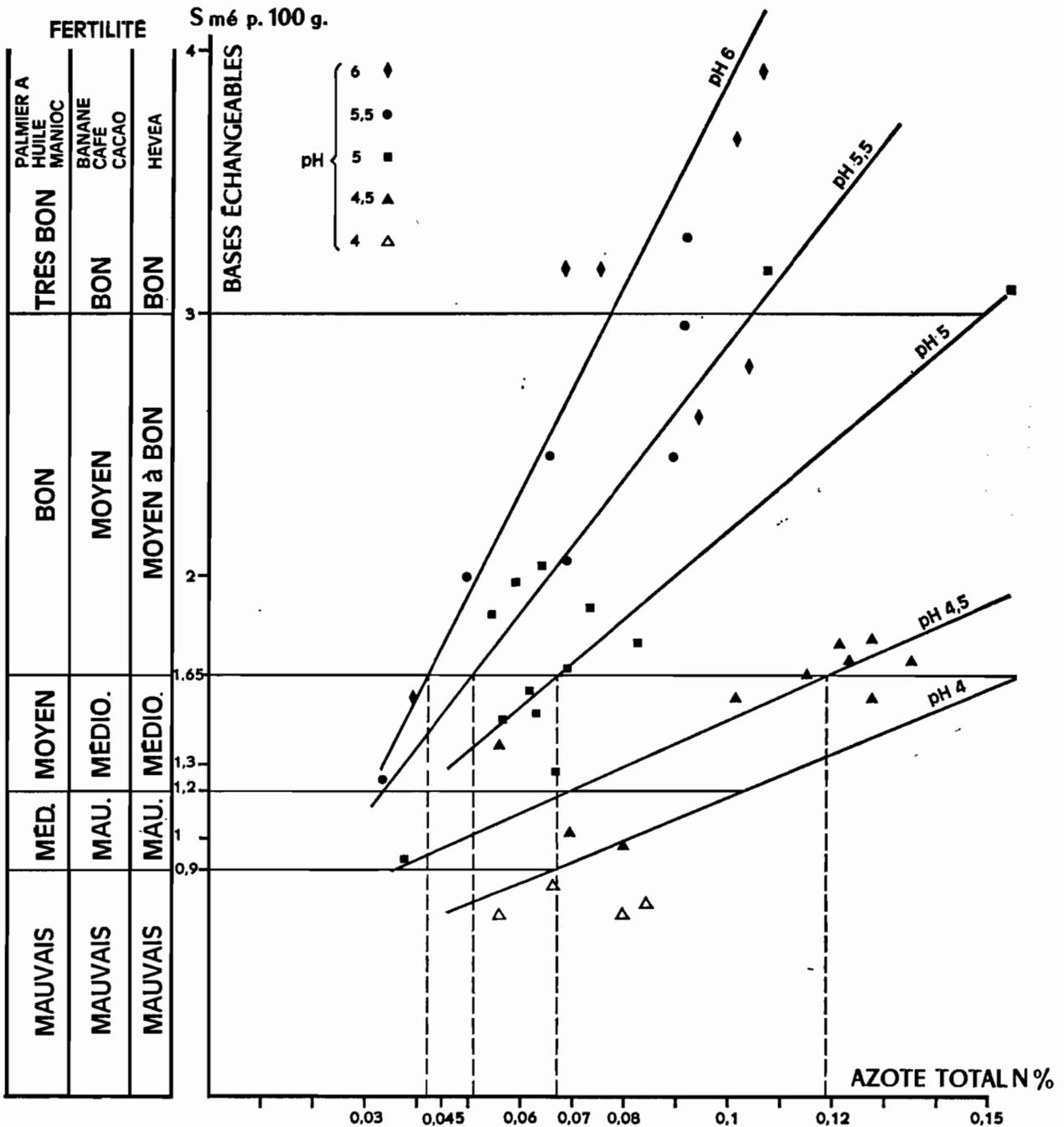


Fig. 29 - Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques fortement désaturés.

- La perte de terre en sol nu est de près de 100 t par ha et par an.
- La perte de matière organique en trois ans est de 50 à 75 %, elle peut atteindre 50 % dès la première année.
- La teneur en bases après trois ans varie de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{10}$ du taux d'origine.
- Une culture protectrice (couverture de maïs) maintient à peu près le taux de carbone, mais il y a baisse du taux d'azote et des bases. Une jachère à *Pennisetum purpureum* pendant 4 ans redonne sensiblement la richesse du sol à l'origine.
- L'indice de structure varie dans le même sens que le taux de matière organique.

Essai de synthèse.

Sous un climat donné et dans un type de sol donné, on constate un accroissement de fertilité en fonction du taux de matière organique et d'azote, lorsque le $\frac{C}{N}$ est voisin de 10 à 12.

Mais si on veut établir une correspondance générale dans divers types de sols, il n'existe pas de relation simple entre taux d'azote et rendement. Le même rendement en coton (2 000 kg/ha) peut s'obtenir avec 0,35 ‰ et avec 3,5 ‰ d'azote total, c'est-à-dire 10 fois plus. Par contre, il a été constaté que dans le premier cas, le pH était de 7, et dans le second cas le pH était de 5 ; à la suite de nombreuses observations tant en climat sec qu'en climat humide ou sous irrigation, quelques règles générales ont pu être établies.

Si l'on considère les intervalles suivants :

N ‰	Matière organique ‰
0,1 à 0,25	0,17 à 0,43
0,25 à 0,45	0,43 à 0,76
0,45 à 0,8	0,76 à 1,35
0,8 à 1,5	1,35 à 2,55
1,5 à 3	2,5 à 5,1
3 à 6	5,1 à 10,1

En passant d'un intervalle à l'intervalle supérieur, on note un accroissement net de la fertilité, ceci pour la plupart des cultures.

La texture du sol doit cependant être moyenne (20 à 40 % A + L) dans les cas des textures extrêmes : inférieure à 10 % de A + L et supérieure à 50 % de A + L. Il faut appliquer un facteur de correction, environ 25 % en plus de rendement dans les cas des textures sableuses et 25 % en moins environ dans le cas des textures argileuses.

Pour un même intervalle de teneur en matière organique, la fertilité des sols peut être équivalente si leur pH est équivalent ; par contre si le pH augmente dans les limites de 4 à 7,5, la fertilité croît dans le même sens ; pour un même pH, la fertilité croît avec la teneur en azote total.

On aboutit ainsi à une échelle générale de fertilité où N total et pH jouent un rôle compensateur l'un de l'autre (Fig. 30).

Ce rôle de compensation est dû vraisemblablement à l'action du pH sur l'activité biologique du sol, la vitesse de minéralisation de l'azote (ammonification, nitrification, etc.) étant d'autant plus grande que le pH est plus proche de la neutralité, et d'autant plus faible que le pH est plus acide :

En réalité, ce n'est peut-être pas le seul facteur à invoquer, l'échelle de fertilité ci-jointe est entièrement empirique, les intervalles et les appréciations du niveau de fertilité (bon, moyen, médiocre, etc.) proviennent d'observations réelles sur des cultures pratiquées dans des conditions convenables.

Echelle de Fertilité pH

N%	Riziculture aquatique						Cultures diverses sèches					
	7	6	5,5	5	4,5	7	6,5	6	5	4,5		
10	exceptionnel						exceptionnel					
9	exceptionnel						exceptionnel					
8	exceptionnel						exceptionnel					
7	exceptionnel						exceptionnel					
6	exceptionnel						exceptionnel					
5	exceptionnel						exceptionnel					
4	exceptionnel						exceptionnel					
3	exceptionnel						exceptionnel					
2,5	exceptionnel						exceptionnel					
2	exceptionnel						exceptionnel					
1,5	exceptionnel						exceptionnel					
1,2	exceptionnel						exceptionnel					
1	exceptionnel						exceptionnel					
0,9	exceptionnel						exceptionnel					
0,8	exceptionnel						exceptionnel					
0,7	exceptionnel						exceptionnel					
0,6	exceptionnel						exceptionnel					
0,5	exceptionnel						exceptionnel					
0,4	exceptionnel						exceptionnel					
0,3	exceptionnel						exceptionnel					
0,2	exceptionnel						exceptionnel					
0,1	exceptionnel						exceptionnel					

Fig. 30 - Echelle de fertilité pour diverses cultures en fonction de l'azote total et du pH.

1.3. Quelques exemples.

Tableau 12

CULTURE DU COTON IRRIGUE DANS LES SOLS DE REGIONS SEMI-ARIDES (500 mm de pluie)

Type de sol	N ‰	pH	Rendement Kg/ha coton/graine
Sol hydromorphe moyennement humifère sur alluvions (Niger)	2,9	4,38	1 500
Vertisol du Deltal Central Nigérien (Mali)	0,35	7	1 700
Sol brun sub aride argileux (DCN-Mali)	0,38	6,5	1 400
Sol brun sub aride argileux	0,24	6,7	1 100
Sol brun sub aride argileux	0,39	6,2	950
Sol ferrugineux tropical peu lessivé beige - limoneux (DCN-Mali)	0,25	6,2	890
Sol ferrugineux tropical peu lessivé ocre-argileux (DCN-Mali)	0,44	5,4	350

Dans les conditions de culture irriguée existant à l'époque des prélèvements ci-dessus, un rendement de 1 500 kg était considéré comme moyen. Pour un taux d'azote total d'environ 0,35 ‰, l'action du pH sur le rendement peut être établie comme suit :

pH	5	5,5	6	6,5	7
Indice de rendement	200	500	1 000	1 500	2 000
Appréciation	Très mauvais	Mauvais	Médiocre	Moyen	Bon

Dans les conditions de culture non irriguée, un rendement « moyen » peut se situer à un niveau plus bas (800 à 1000).

Tableau 13

CULTURE DU COTON NON IRRIGUE EN REGION SEMI-HUMIDE, 1.200 mm DE PLUIE
SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX LESSIVES (BOUAKE, COTE-D'IVOIRE)

N ‰	pH	Rendement coton kg/ha	Appréciation
0,5	6	1 000	Moyen à médiocre
0,43	6,5	1 500	Moyen à bon
0,9	6,5	2 000	Bon à très bon
0,9	6,5	2 500	Bon à très bon
1	7	3 000	Très bon à exceptionnel

Tous les chiffres ci-dessus sont obtenus dans d'excellentes conditions culturales (stations expérimentales), car le rendement en coton peut varier considérablement en fonction des traitements anti-parasitaires et des techniques culturales.

Culture du manioc en région semi-humide, 800 mm de pluie.

Tableau 14

ANECHO (SUD-TOGO). SOL FAIBLEMENT FERRALLITIQUE (TERRE DE BARRE)
(chiffres contrôlés par la Féculerie de Ganavé)

N ‰	pH	Rendement T/ha	Appréciation
0,39	5,3	5 T	Bas
0,44	5,1	5 T	Bas
0,56	5,4	20 T	Médiocre
0,56	6	40 T	Moyen
0,72	5,9	40 T	Moyen
0,67	6,1	40 T	Moyen
1,1	6	60 T	Bon

Le manioc est une plante qui peut donner des rendements très élevés, même dans des sols relativement pauvres.

Sols des régions humides.

Tableau 15
CULTURE DU CACAO EN BASSE COTE-D'IVOIRE SUR SOLS FERRALLITIQUES TRES LESSIVES PLUS OU MOINS DEGRADES

N ‰	pH	Rendement kg/ha	Appréciation
0,53	4,6	240	très bas
0,7	4,6	300	médiocre à bas
0,6	5,3	630	médiocre à moyen
1,03	5,9	1 200	bon

Il est plus difficile de donner une appréciation sur les rendements, car les plantations ne sont pas toujours parfaitement entretenues.

Tableau 16
CULTURE BANANIERE EN BASSE COTE-D'IVOIRE

Type de sol	N ‰	pH	Rendement	Appréciation
sol ferrallitique sur sable	0,56	4,5	moins de 10 T/ha	très bas à médiocre
sol hydromorphe	1,5	4,5	20 T/ha	moyen
sols ferrallitiques sur roches	1,5	7	40 T/ha	très bon à exceptionnel
basiques	3	7	40 à 60 T/ha	exceptionnel

Même en basse Côte-d'Ivoire avec 1 700 mm de pluie, la culture bananière nécessite des arrosages d'appoint.

D'après DUGAIN, dans les sols hydromorphes de Guinée, riches en matière organique, la variation du rendement en banane en fonction du pH est la suivante :

Tableau 17
RENDEMENT DES BANANERAIES EN GUINEE, EN FONCTION DU pH

pH	5	5,5	6
indice de rendement	100	152	182

Il serait possible de multiplier les exemples, des cultures comme le maïs, la canne à sucre, le caféier, etc., suivent sensiblement les mêmes règles de fertilité chimique que le cacaoyer ou le bananier, en ce qui concerne l'équilibre N total - pH.

Le palmier à huile semble être une plante peu exigeante à ce point de vue, des rendements moyens peuvent être obtenus (avec enrichissement potassique du sol) dans des sols classés « médiocres » dans l'échelle de fertilité, par exemple (N compris entre 0,6 ‰ et 1 ‰ et pH = 4,5).

Cette échelle de fertilité bouleverse un peu les notions traditionnelles en ce qui concerne les limites du pH des plantes. Dans les sols tropicaux, ces limites semblent beaucoup plus larges qu'il

n'est indiqué dans certains manuels d'agriculture générale, il subsiste cependant certaines préférences par exemple : sols acides, pH < 6 pour palmier à huile et hévéa, théier, sols plutôt neutre (pH > 6) pour café, cacao, banane, maïs, canne à sucre, etc., mais l'action du pH est essentiellement une action indirecte qui conditionne l'alimentation azotée des plantes par l'intermédiaire de l'activité biologique ; un cas particulier est celui de la culture rizicole qui est étudiée séparément. L'action directe du pH existe surtout dans les cas extrêmes (inférieur à 4 ou supérieur à 8,5) cas de toxicité aluminique ou manganique, toxicité sodique, etc., carences diverses en oligo-éléments, etc.

1.4. - Problème de l'azote minéral dans les sols tropicaux.

Cas des sols exondés. Ce problème a été assez étudié au point de vue microbiologique mais pas assez au point de vue chimique, c'est-à-dire de l'évolution des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ solubles dans les sols en fonction des saisons. MOULINIER (1962), dans les sols de Bingerville (Côte-d'Ivoire), sous forte pluviométrie, 1 700 mm, avec trois mois de saison sèche (janvier-février-mars) a observé les résultats suivants :

Les teneurs en azote nitrique et ammoniacal présentent des variations rapides en dents de scie, car une pluie même faible lessive rapidement les nitrates ; cette teneur remonte assez rapidement entre les pluies si l'humidité est suffisante. Il existe cependant une variation à plus forte amplitude et l'on note un maximum d'azote minéral dans les sols durant la période sèche (janvier-février-mars), les teneurs minima s'observent dès juillet (début de grande saison des pluies), dans tous les cas, la teneur en azote ammoniacal est élevée par rapport à la teneur en azote nitrique (sol à pH fortement acide). La production d'azote nitrique est très fortement accrue par le chaulage qui augmente le pH du sol qui tend vers la neutralité.

En conclusion, l'azote minéral s'accumule en saison sèche et il faut effectuer des semis précoces pour éviter les pertes d'azote par lessivage, en début de saison des pluies, cette conclusion semble assez générale et a été vérifiée pour la culture sèche du coton (Tchad) ou celle de l'arachide (Sénégal). Les rendements augmentent avec la précocité des semis. L'accroissement du pH provoque une plus forte production de nitrates (il y a aussi une augmentation de la nitrification au début des pluies).

B. DABIN (1954-1956) a effectué des mesures de vitesse de nitrification dans différents sols et sous différentes cultures.

Dans les terres de Barre (sols faiblement ferrallitiques) au Togo, le rendement en manioc suit assez étroitement la vitesse de nitrification :

pas de nitrification, même après 18 jours	rendement 5 à 6 t/ha
début de nitrification au bout de 15 jours	rendement 10 t/ha
début de nitrification 5 à 6 jours	rendement 30 à 40 t/ha

Cas des sols de rizière. En ce qui concerne le riz, le résultat se trouve inversé :

Sol hydromorphe argileux (pH 5 à 5,5) ; rendement en riz élevé ; début de nitrification 21 jours.

Sol brun sub-aride argileux (pH 6,5 à 7) ; rendement en riz moyen ; début de nitrification 13 jours.

Vertisol (pH 7 à 8) ; rendement en riz mauvais ; début de nitrification 8 à 9 jours.

Dans le cas du riz, le rendement est en raison inverse de la vitesse de nitrification.

Il est d'ailleurs possible de vérifier directement sur le terrain la présence de nitrites par le réactif de Griess, dans le sol de rizière. Lorsque le réactif donne un résultat négatif, pas de nitrites, les plants sont verts et vigoureux. Lorsque le réactif donne un résultat positif, les plantes sont jaunes.

Dans des essais en pots sur sol argileux, du sulfate d'ammoniaque amené en surface (où il peut nitrifier) donne un développement moitié moindre que du sulfate d'ammoniaque enfoui entre 15 et 20 cm, où il ne nitrifie que très faiblement. La réaction de Griess est positive dans le premier cas, négative dans le second cas.

Evaluation de la fertilité des rizières en fonction du taux d'azote total et du pH.

Dans les sols du Delta central nigérien pour des teneurs en azote total comprises entre 0,15 ‰ et 1 ‰, les rendements en riz sont sensiblement proportionnels au taux d'azote total, par exemple à pH 6, ils peuvent varier de moins de 1 000 kg/ha à plus de 5 000 kg/ha, dans des sols à texture suffisamment fine.

Les variations de pH modifient les rendements ; au-dessous de pH 5, dans des sols à teneur en azote peu élevée, les rendements baissent fortement ; entre pH 5 et 6, les rendements augmentent rapidement ; entre pH 6 et 7, les rendements baissent légèrement ; au-delà du pH 7, les rendements baissent rapidement. Il semble donc qu'un optimum de rendement s'observe autour de pH 6. Cette action du pH est surtout sensible dans les sols dont le taux d'azote total est inférieur à 1 ‰, au-delà, les variations de rendement sont très atténuées. Il semble bien que la valeur du pH règle les rapports $\text{NH}_4^-/\text{NO}_3^+$, la vitesse de nitrification étant accélérée au-delà de pH 7 et ralentie au-dessous de pH 6. Le riz s'alimente principalement à partir d'azote ammoniacal ; les engrais nitriques en particulier sont sans effet, alors que le sulfate d'ammoniaque donne une réaction importante et immédiate sur la croissance et les rendements.

Un autre facteur qui agit sur la nitrification est la texture du sol. Dans les sols à texture grossière, même en milieu inondé, l'alimentation du riz est mauvaise, dans les sols à texture fine et structure compacte, la nitrification est très ralentie sauf à pH supérieur à 7 (vertisols).

Un facteur très important de fertilité est la période de mise en eau des rizières. Les rizières semées directement au semoir avant les pluies commencent leur levée avec la pluie, et la mise en eau se fait au bout de 15 jours ou trois semaines lorsque les plants de riz ont atteint 20 cm de haut, à ce moment, on observe dans de nombreux sols un jaunissement généralisé des plants, l'analyse du sol révèle alors de fortes quantités de nitrites. Pendant la levée à sec, l'ammonium s'est transformé en nitrate, après la mise en eau, celui-ci a été entraîné à faible profondeur et a été réduit en nitrite qui peut avoir une action toxique (mais entraîne surtout une perte d'azote ammoniacal).

Pour éviter ce phénomène de jaunissement des rizières, la solution adoptée consiste à semer directement le riz par avion sous une lame d'eau continue de 10 cm d'épaisseur, la nitrification ne peut se produire par manque d'oxygène ou est très ralentie, le jaunissement n'a pas lieu. En cas de jaunissement, le remède consiste à apporter un complément de sulfate d'ammoniaque.

Un tableau général de fertilité en fonction de l'azote total et du pH a été établi pour la riziculture humide, et complète le tableau concernant les cultures diverses (Fig. 30).

Tableau 18
EXEMPLES DE RENDEMENT EN RIZ DANS LE DELTA CENTRAL NIGERIEEN

Types de sols	N ‰	pH	Rendement en paddy Kg/ha
Sol brun aride argileux	0,6	6,2	4 000
Sol hydromorphe minéral argileux-limoneux	0,6	5,5	3 000
	0,62	6,8	2 800
Sol hydromorphe moyennement humifère (Guinée)	2	4,5	2 400 (fort besoin en P)
Sol ferrugineux tropical peu lessivé limoneux	0,3	6	2 200
Sol ferrugineux tropical ocre argileux	0,37		2 000
Vertisol	0,4	7,5	900
Vertisol	0,25	7,5	600

10. - Le phosphore dans les sols tropicaux.

2.1. Introduction.

Les sols tropicaux sont généralement considérés comme étant pauvres en phosphore, et il est vrai que la majorité des sols tropicaux acides, pauvres en calcium, et matière organique, ne possèdent qu'une très faible quantité de phosphore « assimilable » d'après les techniques courantes utilisées pour les sols tempérés.

Comme il a été indiqué dans un autre chapitre, les sols à sesquioxydes, en particulier sols ferrugineux tropicaux et sols ferrallitiques, contiennent du phosphore sous forme de phosphates de fer et d'aluminium, ces phosphates ayant la propriété d'être très peu solubles dans l'eau et dans la plupart des réactifs acides courants.

En réalité, dans le sol, il ne s'agit pas de composés chimiques simples, mais de liaisons complexes pouvant être hydrolysées différemment. Il semble à présent démontré que les plantes peuvent s'alimenter à partir de ces phosphates liés aux sesquioxydes ; il existe également d'autres formes encore moins solubles, phosphates d'inclusion, phosphore organique, etc.

2.2. Le Phosphore total. Analyse.

Jusqu'à présent, il a surtout été fait appel à l'empirisme pour déterminer la richesse en phosphore dans les sols tropicaux, les techniques courantes (méthode DYER, méthode TRUOG) ne donnant que des chiffres très bas (3 à 20 ppm P_2O_5) dans la plupart des cas ; on a essayé de déterminer la réserve en phosphore du sol. La méthode utilisée est l'attaque à l'acide nitrique concentré et bouillant pendant 5 heures. Cette méthode ne donne peut-être pas la totalité du phosphore, mais elle s'est avérée simple et reproductible.

Deux constatations importantes ont été faites (DABIN 1956) : d'une part, quel que soit le type de sol, la pluviométrie, la roche-mère, il existe une relation statistique entre N total et P_2O_5 total, le rapport $\frac{N}{P_2O_5}$ moyen variant de 2 à 4 suivant la richesse en azote du sol ; d'autre part, dans un sol donné, la richesse du sol et la réaction aux engrais varient en fonction de la teneur en P_2O_5 total, les normes d'interprétation pouvant varier d'un type de sol à l'autre (Fig. 31, 32).

Exemples.

Sols des régions semi-arides. Dans les sols de rizière du Mali (Delta Central Nigérien) qui avaient été considérés comme très pauvres en phosphore par les premiers agronomes (1930-1945) de très nombreux essais d'engrais phosphatés ont réalisés après 1945. Ces essais d'engrais phosphatés ont été effectués avec des doses pouvant être élevées de 0,5 t à 5 t/ha (pour saturer le pouvoir de fixation) en utilisant des formes très variées : phosphates naturels, bicalciques, superphosphates, et n'ont donné que très rarement des résultats positifs. Par contre, les engrais azotés, employés seuls, donnaient des excédents spectaculaires de rendement, et les engrais binaires azote, phosphore, n'étaient pas supérieurs à l'azote seul.

Les analyses de plantes dans les témoins ou avec l'azote seul, ont révélé une composition correcte de la plante et une forte exportation de phosphore provenant du sol, il a bien fallu se rendre à l'évidence : même avec un taux de P_2O_5 jugé très bas (0,3 ‰), le sol pouvait fournir suffisamment de phosphore pour une récolte de 3 à 5 tonnes de paddy à l'hectare.

En revanche, des essais réalisés dans d'autres sols ont montré des réactions variables aux engrais phosphatés, l'analyse du phosphore total a donné des résultats deux à cinq fois plus faibles que précédemment.

Enfin, des essais en pots, c'est-à-dire avec une quantité de terre limitée, ont mis en évidence des réactions nettes aux engrais phosphatés.

Tableau 19
RELATIONS ENTRE P_2O_5 TOTAL DANS LE SOL ET REACTION AUX ENGRAIS DANS LES RIZIERES DU MALI

P_2O_5 total ‰	Réaction aux engrais
0,04 0,06	réaction nette aux engrais phosphatés employés seuls
0,17 0,19	réaction aux engrais phosphatés seulement en présence d'engrais azotés réaction nette avec le sulfate d'ammoniaque employé seul.
0,25 0,27	pas de réaction aux engrais phosphatés

Le taux d'azote total de ces sols varie de 0,5 à 0,6 ‰, le pH varie de 5,5 à 6. Ce résultat obtenu en culture rizicole a été confirmé en culture cotonnière.

Tableau 20
CULTURE DU COTON DANS LES SOLS DU MALI (SOLS BRUNS SUBARIDES)

P ₂ O ₅ total ‰	Réaction aux engrais
0,1 ‰	réaction aux engrais phosphatés seuls
0,1 à 0,2 ‰	réaction faible aux engrais phosphatés seuls réaction nette en présence d'engrais azotés
0,2 à 0,3 ‰	pas de réaction avec engrais phosphatés seuls action des engrais azotés et phosphatés peu supérieure à engrais azotés seuls
0,35 à 0,45 ‰	seuls les engrais azotés agissent.

Des résultats analogues ont été obtenus dans les sols à coton de la Gesirah (Soudan). Les taux d'azote total de ces sols ne dépassent pas 0,35 à 0,45 ‰, le pH est voisin de 7, les rendements en coton graine peuvent atteindre 2 000 kg/ha et plus.

Seuls les engrais azotés agissent, les taux de phosphore total sont de l'ordre de 0,4 ‰.

Dans les sols à arachide (Sénégal-Niger) qui sont des sols très sableux et très pauvres en azote, l'action des engrais phosphatés s'est avérée efficace dans de nombreux cas. Néanmoins, les

Tableau 21
TENEURS EN AZOTE TOTAL ET PHOSPHORE TOTAL (HORIZON SUPERIEUR)
DANS DIFFERENTS SOLS D'AFRIQUE OCCIDENTALE

Origine des prélèvements	N ‰	P ₂ O ₅ ‰	Observations	Origine des prélèvements	N ‰	P ₂ O ₅ ‰	Observations Sols chimiquement
Sols alluvionnaires de la boucle du Niger.	0,3	0,15	Sols pauvres.	Terres noires sur roches basiques du TOGO. Pluviométrie 1 200 mm.	0,78	0,502	assez riches mais à structure compacte.
	0,25	0,15			0,78	0,562	
	0,37	0,13			0,84	0,446	
Pluviométrie 500 à 600 mm.	0,4	0,2	Sols de fertilité moyenne.	Sols latéritisés sur Gabbros Sotoubous TOGO. Pluviométrie 1 400 mm.	1,17	0,43	Sols très gravillonnaires.
	0,5	0,25			1,17	0,36	
	0,53	0,21			1,01	0,67	
Sols irrigués.	0,6	0,25	Sols de fertilité correcte.	Sols latéritisés sur granito-gneiss TOVE-TOGO. Pluviométrie 1 700 mm.	0,78	0,311	La fertilité croît fortement avec le taux d'azote et phosphore.
	0,6	0,3			1,3	0,63	
		0,3			1,4	0,73	
Terres de Barre du TOGO.	0,39	0,17	Sols pauvres.	Sols latéritisés sur granito-gneiss TOVE-TOGO. Pluviométrie 1 700 mm.	1,6	0,65	Sols en moyenne assez fertiles. La fertilité croît avec le taux d'azote et de phosphore.
	0,39	0,19			2,18	0,72	
	0,39	0,14			2,18	0,82	
	0,33	0,13			0,72	0,36	
	0,39	0,25			0,72	0,41	
Pluviométrie 700 à 1 100 mm.	0,50	0,228	Sols de fertilité correcte.	Sols de la Basse Côte d'Ivoire. Pluviométrie supérieure à 2 000 mm.	1	0,56	Sols de forêt.
	0,56	0,228			1,5	0,66	
	0,56	0,24			1,5	0,62	
	0,61	0,42			1,23	0,64	
	0,72	0,42			2,3	0,81	
Sols alluvionnaires de la Vallée de l'Ouémé au Dahomey. Pluviométrie 1 200 mm. Sols Inondés.	1	0,48	Sols assez riches.	Sables lagunaires du SUD-TOGO. Pluviométrie 700 mm.	2,82	0,98	Très pauvres pour les cultures annuelles. Termitières plus riches.
	1,4	0,75			0,36	0,14	
	2	0,44			0,39	0,15	
	2	0,84			0,29	0,33	
	2,4	0,66			0,57	0,34	

analyses de phosphore total ont montré que cette action se produisait lorsque la teneur en acide phosphorique était inférieure à 0,15 ‰ de P₂O₅ total. Il n'existait que de faibles réactions aux phosphates, pour des teneurs supérieures.

Sols des régions semi-humides. Dans les sols des régions plus humides, Togo, Dahomey, Nord Côte-d'Ivoire, etc., les dosages de phosphore total ont montré que les limites de réaction aux engrais phosphatés se situaient à un niveau plus élevé.

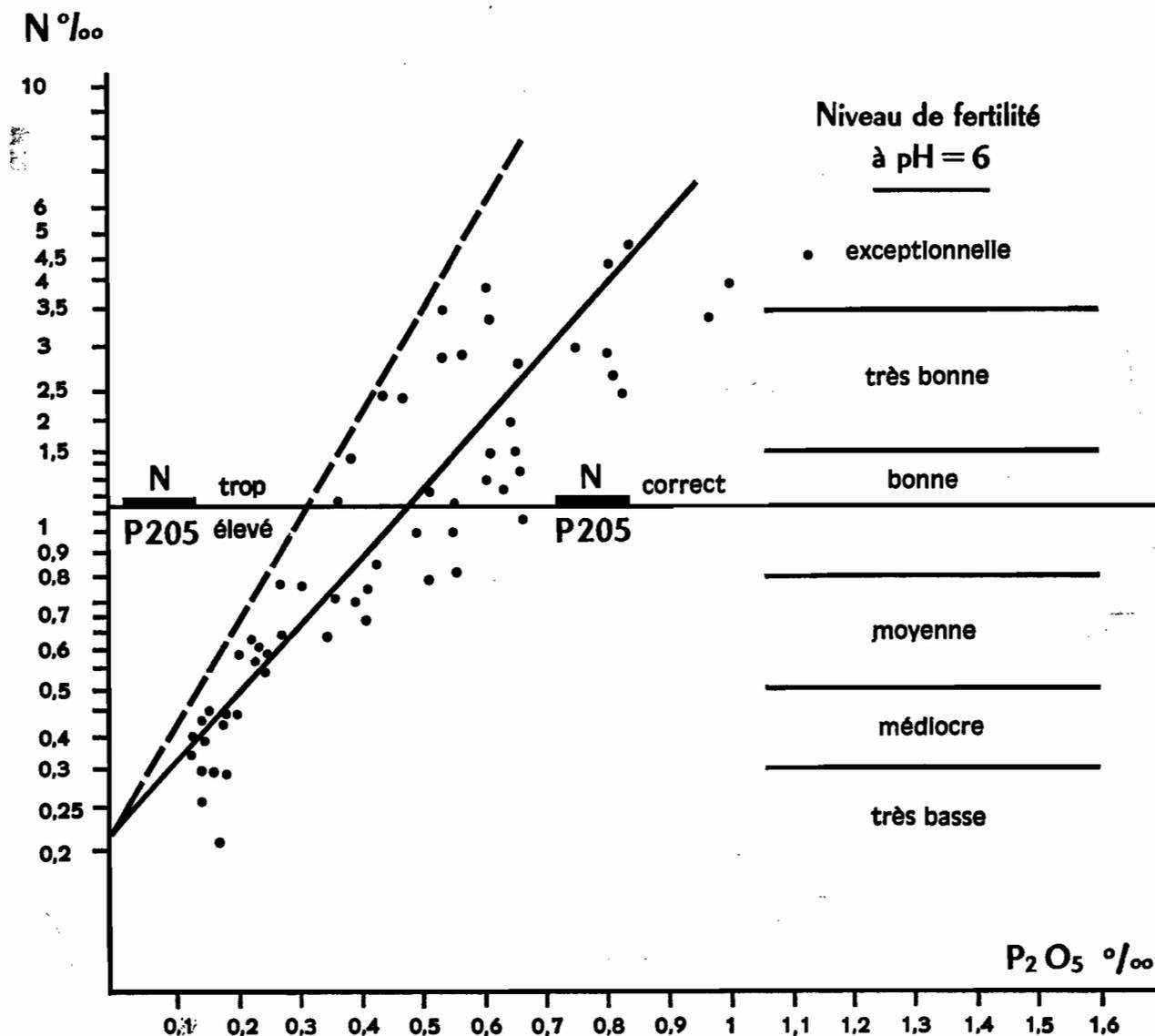


Fig. 31 - Appréciation du niveau de fertilité en fonction de l'azote et de l'acide phosphorique

Tableau 22
 CULTURE DU COTON EN MOYENNE COTE-D'IVOIRE
 (D'après DABIN et BERGER)

P ₂ O ₅ ‰ total	Fertilité
inférieur à 0,4 ‰	pauvre
0,4 à 0,7 ‰	médiocre
0,7 à 0,9 ‰	moyenne
supérieur à 0,9 ‰	riche

Sols ferrugineux tropicaux lessivés (Bouaké).

Dans les sols de fertilité moyenne, le taux d'azote total varie de 0,8 à 1,4 ‰, le pH varie de 6,3 à 6,5. La teneur en P₂O₅ se situe au-dessous de 0,7 ‰ (Tabl. 22).

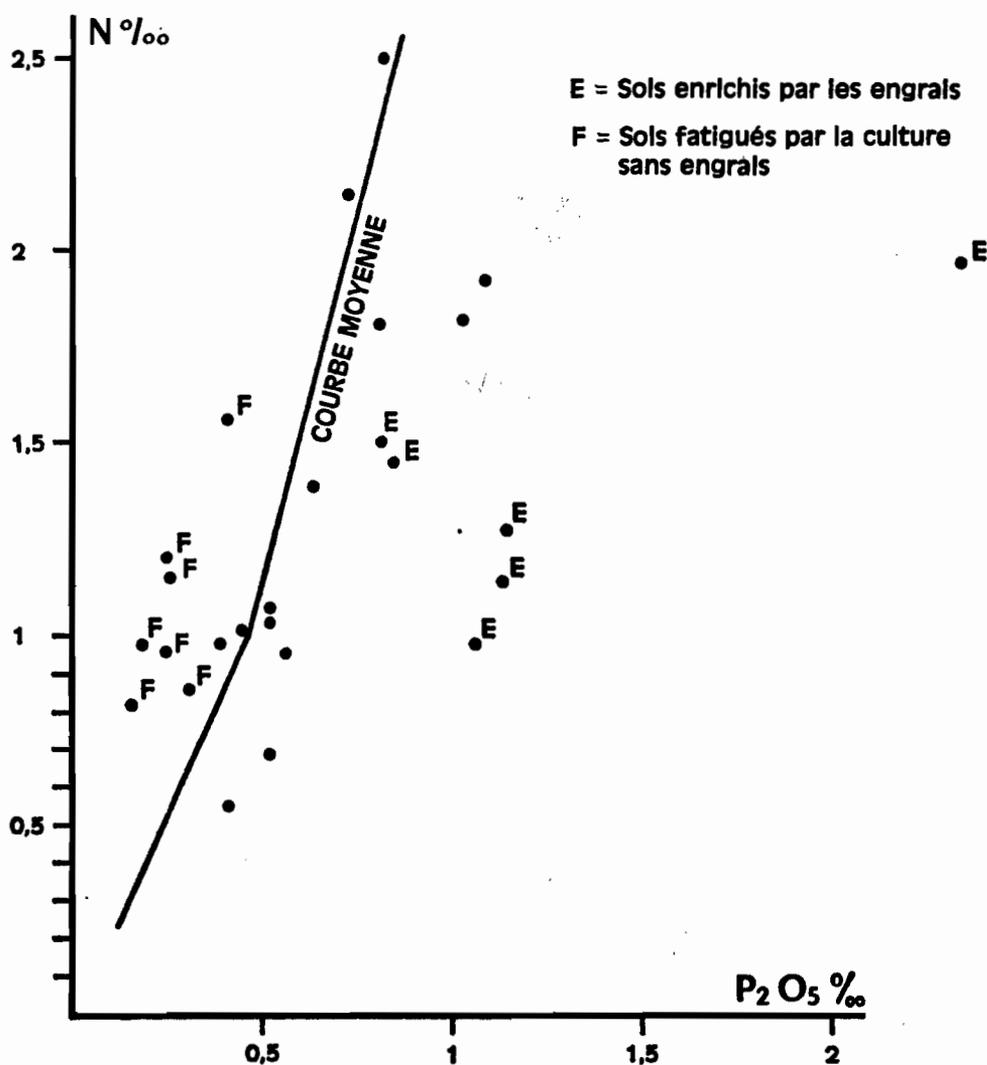


Fig. 32 - Relation entre la teneur en azote total, l'acide phosphorique total et la fertilité dans des sols ferrallitiques moyennement désaturés.

Ces normes sont assez sévères en raison du déficit de pluviométrie de ces régions et peut-être de la grande richesse en fer mobile dans ces sols.

Sols des régions humides. En basse Côte-d'Ivoire, une région très cultivée correspond à la zone des dépôts sablo-argileux tertiaires, le sol est de type ferrallitique très désaturé.

Dans les sols non dégradés, les engrais phosphatés ne donnent pas de réaction (Fig. 33), des essais effectués sur manioc ont montré que le meilleur engrais dans ces sols est le nitrate de potassium (carence en azote et potassium), l'addition d'engrais phosphatés ne donne aucun accroissement de rendement par rapport au nitrate de potassium. Les taux de P_2O_5 total dans ces sols dépassent généralement 0,5 à 0,7 ‰. Dans les sols appauvris la réaction du phosphore peut apparaître.

MOULINIER (1962) donne la relation suivante entre le phosphore total et le rendement des cacaoyères dans les sols ferrallitiques sur schistes de Côte-d'Ivoire.

Tableau 23

Rendement en Cacao kg/ha	P_2O_5 total ‰
100	0,15
300	0,25
600	0,35
800	0,45

Essai de synthèse.

Les quantités minima de phosphore indiquant un besoin net en phosphore dans les sols sont variables suivant les cas, si l'on reporte ces teneurs sur le graphique représentant les variations de phosphore total en fonction d'azote total, on s'aperçoit qu'elles sont voisines ou inférieures aux teneurs de la courbe statistique moyenne (Fig. 32).

Entre 0,15 et 1,5 ‰ d'azote total, le rapport $\frac{N}{P_2O_5}$ de la courbe moyenne est d'environ 2. Lorsque $\frac{N}{P_2O_5}$ est inférieur à 2, les sols réagissent rarement aux engrais phosphatés. Entre 2 et 4, les sols

réagissent diversement. Lorsque $\frac{N}{P_2O_5}$ est supérieur à 4, les sols sont généralement carencés en phosphore.

MOULINIER (1962) signale que dans le cas de la culture caféière, pour un taux d'azote de 2 ‰, le phosphore doit être supérieure à 0,5 ‰, ($\frac{N}{P_2O_5}$ non supérieur à 4), en culture cacaoyère $\frac{N}{P_2O_5}$ ne doit pas être supérieur à 2, pour obtenir de bons rendements ; le cacaoyer est plus exigeant en phosphore que le caféier.

Dans les sols sur sables tertiaires non dégradés $\frac{N}{P_2O_5}$ est voisin de 1 (DABIN), ces sols ne réagissent pas aux engrais phosphatés.

Dans les sols cultivés en cacaoyer depuis de nombreuses années, le taux de P_2O_5 total diminue fortement $\frac{N}{P_2O_5}$ peut atteindre 2 et le dépasser, le besoin en phosphore apparaît (Fig. 32 et 33).

2.3. - Le phosphore assimilable.

Méthode DYER. La méthode DYER (acide citrique à 2 %) est une technique très utilisée en France où elle donne de bons résultats sauf dans les sols calcaires. Elle a été essayée dans les sols des régions sèches (Delta Central Nigérien), les résultats obtenus étaient de l'ordre de 3 ppm ou 0,003 ‰ de P_2O_5 , même dans des sols ne réagissant pas aux engrais phosphatés. A la suite d'apports massifs de phosphate tricalcique (5 000 kg/ha) le taux de P_2O_5 total du sol est passé de 0,25 ‰ à 0,58 ‰ et la teneur en P_2O_5 citrique a atteint 0,17 ‰.

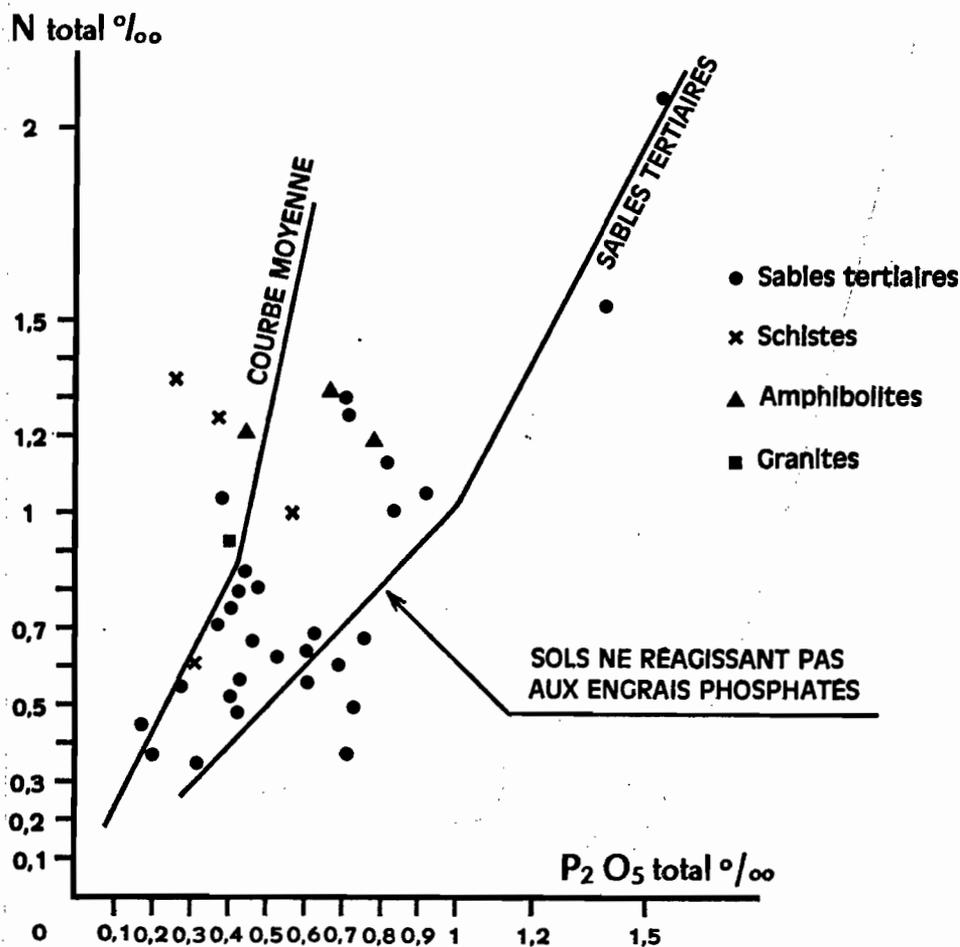


Fig. 33 - Relation entre la teneur en azote total, l'acide phosphorique total, la fertilité dans des sols ferrallitiques très désaturés.

Dans les sols des régions plus humides, Côte-d'Ivoire en particulier, la méthode citrique s'est avérée plus utilisable. Dans les sols de bananeraie diversément enrichis en phosphore par des apports d'engrais, une relation phosphore total, phosphore assimilable citrique a été établie (Fig. 36). Ce graphique montre que jusqu'à 0,5 ‰ de phosphore total, la teneur en phosphore citrique reste très faible de l'ordre de 50 ppm (0,05 ‰). Au-delà de 0,5 ‰ de phosphore total le phosphore citrique augmente proportionnellement au phosphore total.

Il semble donc que cette valeur de 0,5 ‰ de phosphore total dans la majorité des sols, où le taux d'azote varie autour de 1 ‰, correspond à une valeur limite au-delà de laquelle le phosphore n'est fixé que faiblement sur le sol, et passe entièrement à l'état assimilable ; au-dessous de 0,5 ‰,

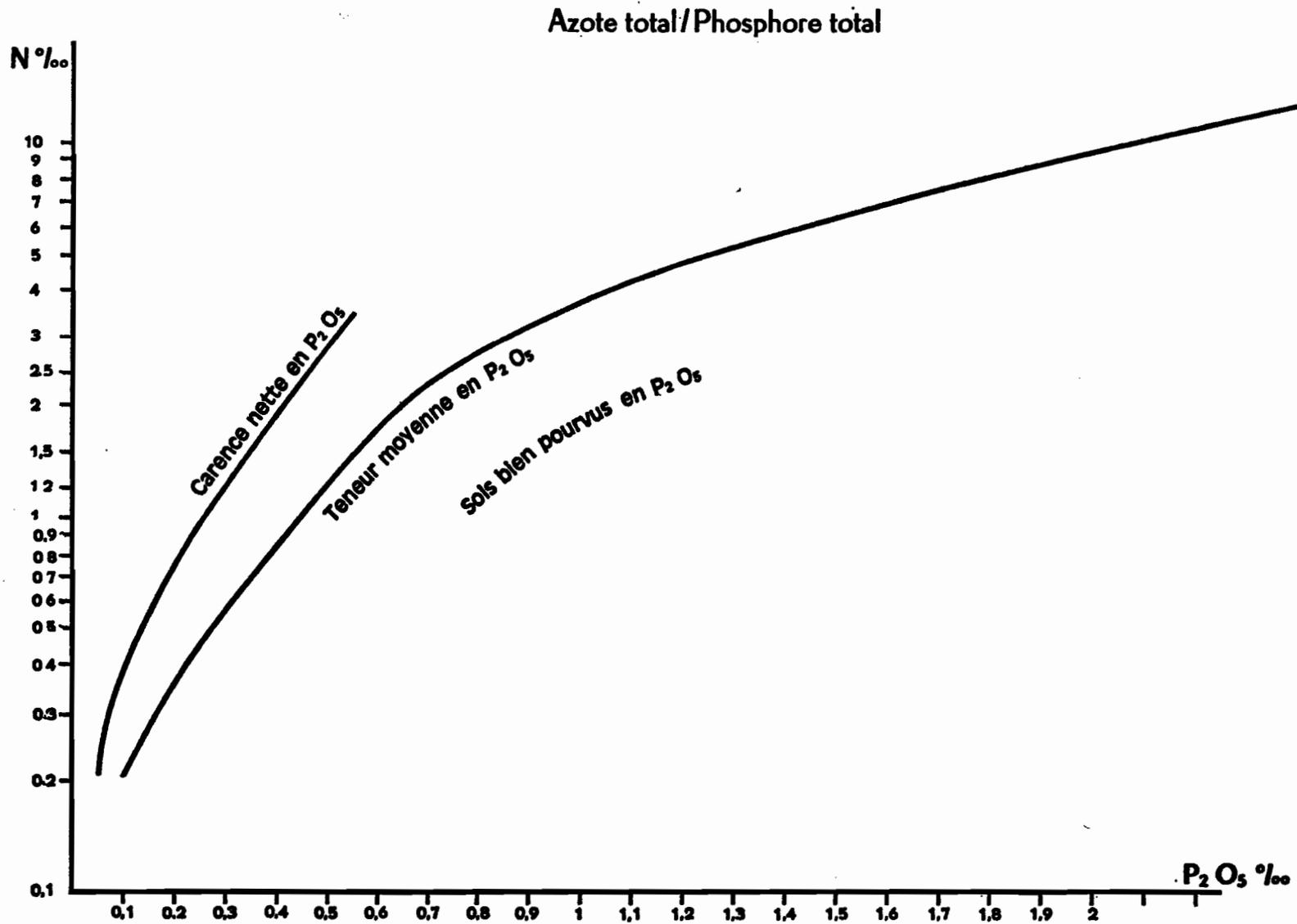


Fig. 34 - Abaque de fertilité pour les sols tropicaux tenant compte de l'azote total et l'acide phosphorique total.

le phosphore est donc fortement fixé sur le sol. Cette limite de fixation se situe vers le rapport $\frac{N}{P_2O_5} = 2$.

Une courbe identique a été dressée pour les sols ferrugineux tropicaux lessivés de la région Bouaké. La limite au-delà de laquelle le phosphore passe totalement à l'état assimilable se situe au-dessus de 0,7 ‰ de phosphore total. Cette limite de fixation n'est pas seulement fonction du rapport

$\frac{N}{P_2O_5}$ mais peut l'être aussi d'autres facteurs comme la teneur en fer mobile dans le sol.

Méthode de TRUOG. La méthode de TRUOG (extraction par l'acide sulfurique 0,002 N tamponné à pH 3,5 par le sulfate d'ammoniaque) donne d'excellents résultats dans les sols des pays tempérés, faiblement acides, neutres ou faiblement calcaires ; son intérêt résidait autrefois dans la facilité de dosage colorimétrique directe des extraits. A présent, même les extraits organiques peuvent être dosés directement par voie colorimétrique (DUVAL).

Dans la plupart des sols de Côte-d'Ivoire, même bien pourvus en phosphore, les doses dépassent rarement 20 ppm de P_2O_5 .

FORESTIER en République Centrafricaine (1960) a appliqué la méthode TRUOG à la culture du caféier. Il a étudié les réactions aux engrais et la composition des feuilles de caféier en fonction de la composition du sol. Dans des sols contenant 20 à 30 ‰ d'éléments fins (A + L), une teneur de 15 ppm est suffisante pour assurer une bonne alimentation des plantes. Dans des sols contenant 10 ‰ d'éléments fins, la limite peut descendre à 10 ppm. Ces taux limites sont si bas qu'ils correspondent à la limite de sensibilité des dosages et sont donc sans intérêt pratique.

Méthode de CHANG et JACKSON. Cette méthode a permis d'apporter quelques explications aux résultats un peu incohérents obtenus avec les techniques précédentes.

Cette méthode consiste à séparer les différentes formes de phosphore liées aux différents éléments fixateurs, calcium, fer, aluminium, elle permet de distinguer les formes de phosphore d'inclusion, entourées d'une pellicule d'oxydes et donc très fortement rétrogradées, elle permet aussi par différence de déterminer le phosphore organique.

Le phosphore soluble est extrait par NH_4Cl .

Le phosphore lié à Al est extrait par FNH_4 0,5 N à pH 7.

Le phosphore lié à Fe est extrait par $NaOH$ 0,1 N.

Le phosphore lié à Ca est extrait par SO_4H_2 0,5 N.

Le phosphore d'inclusion est extrait par chélation et réduction par l'hydrosulfite de soude (qui dissout les pellicules de sesquioxydes).

Le phosphore organique peut être extrait après destruction de la matière organique par H_2O_2 ou par calcination.

Les résultats montrent que la forme dominante de phosphore dans le sol est la forme d'inclusion (la plus stable), ensuite vient la forme organique, également très stable, enfin les formes de phosphore liées au calcium, au fer et à l'aluminium sont en proportions variables en fonction du pH du sol. Dans les sols acides, les formes liées au fer dominant. Dans les sols neutres ou calcaires, les formes liées à calcium dominant.

Les formes liées à l'aluminium varient peu en fonction du pH mais semblent conditionner assez étroitement la fertilité des sols.

RELATION "N" TOTAL $P_2 O_5$ TOTAL — $P_2 O_5$ ASSIMILABLE (méthode Dyer)

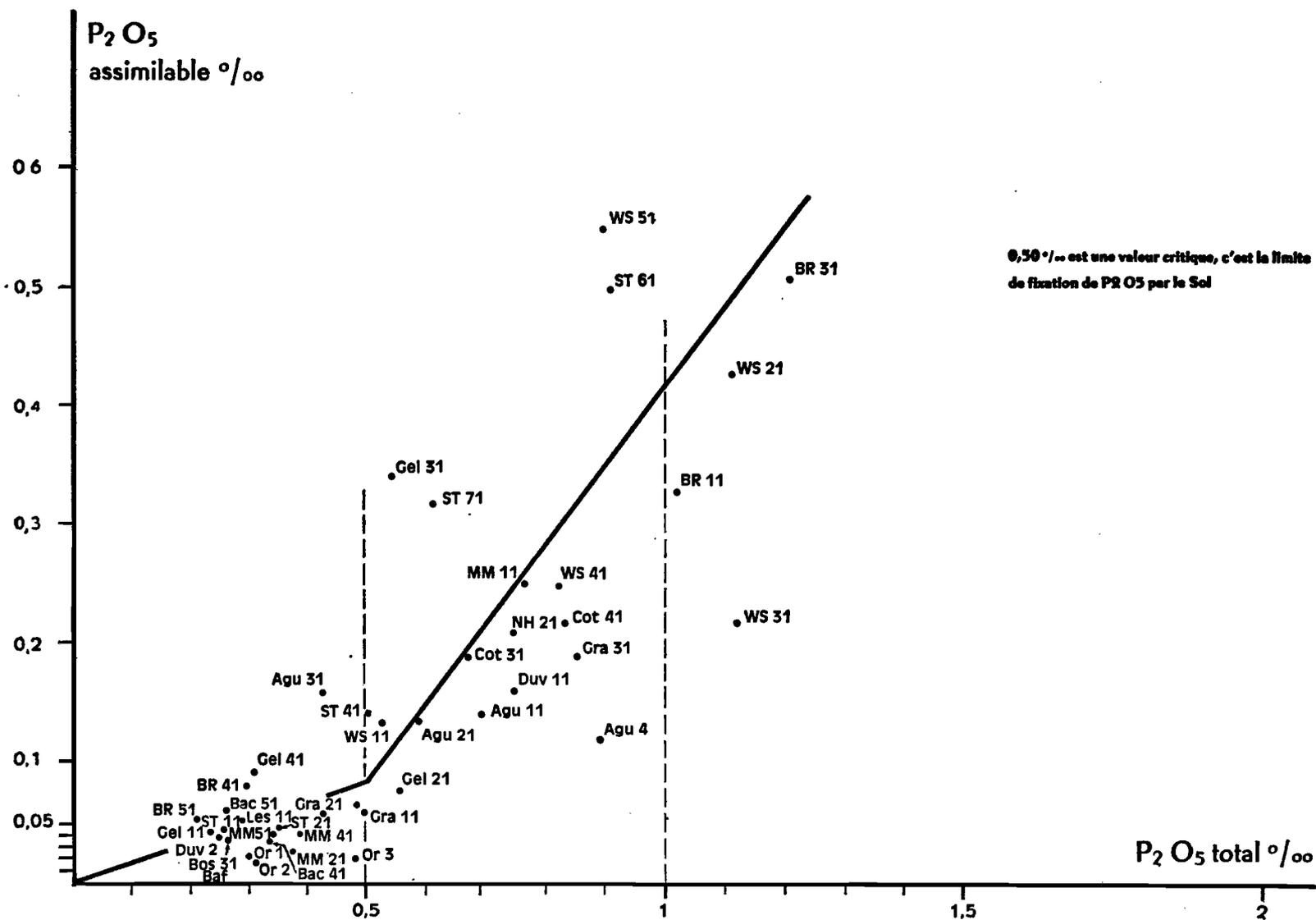


Fig. 36 - Relation entre l'acide phosphorique assimilable (Méthode Dyer) et l'acide phosphorique total (bananeraies de Côte d'Ivoire)

Tableau 24
CONTENU EN DIVERSES FORMES DE PHOSPHORE DE QUELQUES SOLS DE COTE-D'IVOIRE

P en ppm	Sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire Sols ferrallitiques très lessivés, Adiopodoumé sols à pH 4,5			Sol faiblement ferrallitique désaturé Bamoro sol à pH 7
	sol érodé	sol sous forêt	sol amélioré par la culture	sol très fertile
P Al	7,5	12,5	32,4	42
P Ca	2,5	2	6,25	78
P Fe	60	50	45	7,5
P Fe inclusion	310	210	160	200
P organique	62,5	110	130	120

Les chiffres sont exprimés en ppm de P (environ moitié des chiffres exprimés en P_2O_5).

Les sols ont été classés par ordre de fertilité croissante, **dans les sols acides** le phosphate de fer domine, il a tendance à diminuer quand la fertilité augmente ; le phosphate de chaux est très faible, il augmente dans le même sens que la fertilité ; 6,25 ppm en P correspond à 15 ppm en P_2O_5
 $\frac{P_2O_5}{P} = \frac{71}{31}$, c'est-à-dire à la quantité considérée comme convenable par la méthode de TRUOG qui dans ces sols n'extrait que le phosphore lié au calcium.

Le phosphore lié à l'aluminium croît d'une façon nette avec la fertilité ; dans les sols acides, il semble que ce soit la forme la plus intéressante à doser. L'acide citrique est susceptible dans une certaine mesure d'extraire le phosphore lié à l'aluminium.

Dans le sol fertile à pH neutre, c'est le phosphore lié au calcium qui domine, le phosphore lié à l'aluminium vient en second et est relativement élevé, le phosphore lié au fer est en faible quantité. Les phosphates d'inclusion et le phosphore organique ne semblent pas en liaison directe avec la fertilité ; dans les exemples suivants, on ne considère donc que les formes de phosphore fraîchement précipitées.

Tableau 25
SOLS REAGISSANT AUX ENGRAIS PHOSPHATES

P en ppm	Sols ferrugineux tropicaux	Sols ferrallitiques - Antilles	Sols à allophanes- Antilles
P Al	7,5	22,5	25
P Ca	3,75	25	7,5
P Fe	10	110	15

Dans ces sols, les teneurs en phosphate d'aluminium et en phosphate de chaux sont faibles, les teneurs en phosphate de fer peuvent être élevées.

Tableau 26
SOLS NE REAGISSANT PAS AUX ENGRAIS PHOSPHATES

P en ppm	Sol ferrallitique lessivé Côte d'Ivoire	Sols à Montmorillonite réaction limite	Antilles sol très riche en phosphore
P Al	67,5	15	37,5
P Ca	7,5	56	195
P Fe	60	20	50

Il semble bien que la richesse en phosphore assimilable dans les sols acides soit en relation avec la somme P Al + P Ca. Cette somme doit être au moins égale à **70 ppm de P** soit 0,165 ‰ de P₂O₅. Ces chiffres sont convenables et se rapprochent des normes utilisées dans les pays tempérés pour le phosphore assimilable.

Dans les sols à pH neutre, le phosphate de fer semble être en grande partie assimilable, l'extrait au réactif TRUOG donne un chiffre sensiblement égal à la somme P Al + P Ca + P Fe, néanmoins, dans ces sols P Fe est en faible quantité.

Dans les sols calcaires, P Ca domine très largement et n'est qu'en partie assimilable, il est alors nécessaire d'utiliser une autre technique pour déterminer la fraction assimilable du phosphate de chaux.

Essai d'utilisation d'une méthode unique. En raison de l'importance de la fraction phosphate d'aluminium, utilisable aux différents pH, un réactif composé d'un mélange :

FNH₄ 0,5 N + CO₃NaH 0,5 N tamponné à pH 8,5

permet d'extraire le phosphore lié à l'aluminium, grâce au fluorure d'ammonium ; quant au carbonate acide de sodium agissant dans un temps court, il n'extrait que partiellement le phosphate de fer en sol acide, et partiellement le phosphate de chaux en sol calcaire.

D'après des essais récents, ce réactif donne des résultats identiques à la méthode TRUOG dans les sols neutres ou faiblement calcaires, et il donne des résultats en corrélation avec le phosphore citrique et le phosphore total dans les sols tropicaux acides, son pouvoir d'extraction est cependant supérieur à celui de l'acide citrique ce qui le rend plus intéressant dans les sols où la teneur en phosphore est médiocre.

Fixation du phosphore sur les sols. La présence de sesquioxydes provoque une forte fixation du phosphore dans les sols tropicaux, mais ce phosphore fixé peut être néanmoins en grande partie utilisable par les plantes ; des essais de fixation avec des phosphates solubles à l'eau ont donné des chiffres trop élevés et incompatibles avec la pratique agricole. Après enrichissement en phosphore du sol, il est préférable de remplacer les équilibres dans l'eau par des équilibres dans l'acide citrique ou un autre réactif (Olsen modifié - ci-dessus), et d'établir la courbe phosphore total phosphore assimilable, pour déterminer un taux utile de fixation du phosphore.

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.

