

Analyse d'un système pédologique "sol rouge-sol jaune" : Comparaison des compartimentations établies sur des bases descriptives et par analyse factorielle des caractéristiques physico-chimiques

Henri Robain^a

Introduction

L'étude a porté sur la couverture pédologique d'un bassin versant élémentaire d'une superficie de 16 ha, situé à l'ouest de la Guyane Française dans la région de Saint Laurent du Maroni (Fig.1). Les sols sont développés sur le socle cristallin antécambrien et sont de type ferrallitique. Ces sols présentent une forte différenciation latérale, qui s'exprime notamment par leur couleur : l'amont du bassin versant est occupé par des sols rouges et l'aval, par des sols jaunes.

La première partie, présente les sols d'un point de vue morphologique en s'attachant plus particulièrement à leur organisation au long d'une toposéquence. Cette approche descriptive permet d'établir une première compartimentation de la couverture pédologique. La seconde partie présente une analyse factorielle portant sur les caractéristiques physico-chimiques des sols (analyse des correspondances multiples et classification ascendante hiérarchique). Cette analyse permet de mettre en évidence une seconde compartimentation de la couverture pédologique basée sur des données quantitatives moins subjectives que les données descriptives. La troisième partie confronte ces deux approches. Elle permet de valider l'approche descriptive et de la compléter par des données quantitatives. Il est alors possible de discuter des processus gouvernant la pédogenèse.

^aORSTOM BP 1857 Yaoundé

1 Analyse morphologique de la couverture pédologique

Avant de présenter les caractéristiques morphologiques des sols étudiés, il est utile de préciser certains concepts.

1.1 Notions d'horizons et de système de sols

Une couverture pédologique est une formation superficielle, généralement meuble. Elle résulte des transformations de la lithosphère sous l'action combinée de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère. Ces transformations correspondent à la succession de trois grands types de processus, plus ou moins interdépendants, qui peuvent varier au cours du temps : altération puis pédogenèse et enfin érosion. Il en résulte qu'une couverture pédologique n'est jamais homogène à un instant donné et qu'elle est rarement stable dans le temps. Elle correspond à un ensemble évolutif de volumes différents, parfois complexe mais toujours organisé. Ces volumes, dont les limites sont plus ou moins nettes, sont classiquement appelés horizons.

Sur une même verticale, une succession d'horizons définit un profil de sol. Dans certains cas, et en particulier dans celui qui nous intéresse ici, il existe aussi, au long d'un même versant, une importante variation latérale de la couverture pédologique. Il est alors peu pertinent, ni possible pratiquement d'ailleurs, de définir autant de profils de sol qu'il y a de superpositions d'horizons. Il est préférable de considérer le système de sols constitué par l'ensemble des différents horizons et leur organisation tant verticale que latérale. Il faut souligner que l'analyse minutieuse des interfaces entre horizons, permet de mettre en évidence des filiations, des relais ou des discordances et donc d'établir la nature et la dynamique des processus de genèse d'un système de sols. Cela a été montré par de nombreux auteurs tels que G.Bocquier (1971), R.Boulet (1974), D.Nahon (1976), A.Chauvel (1977), E.Fritsch (1984) ou Y.Lucas (1988), pour ne citer que les travaux les plus importants.

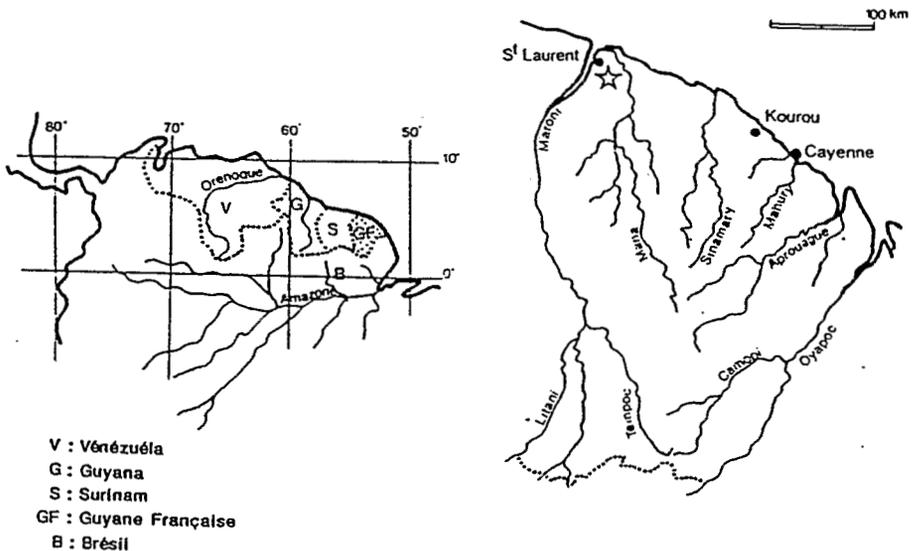


Figure 1 : Localisation du site d'étude.

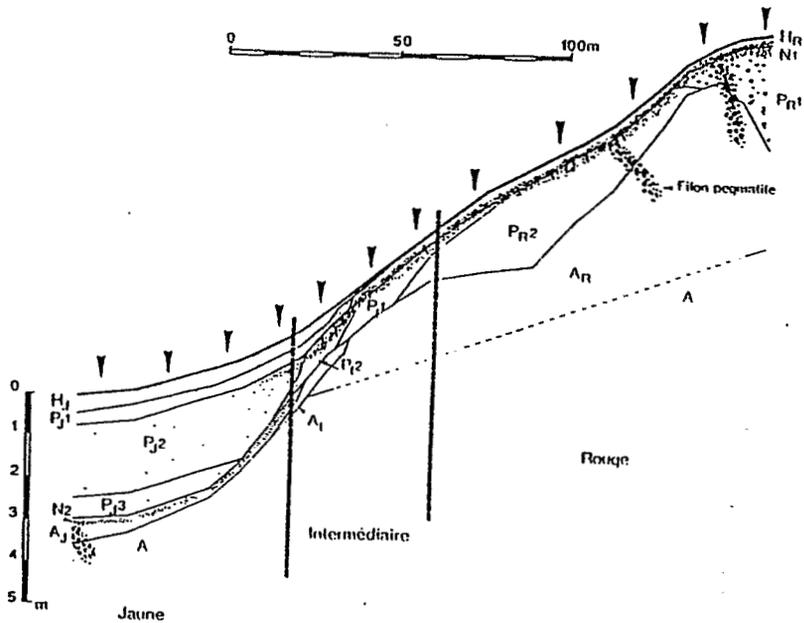


Figure 2 : Organisation morphologique du système de sols.

1.2 Organisation du système de sols

1.2.1 Présentation des horizons.

La description *in situ* de la couverture pédologique a permis de délimiter des horizons sur la base de caractéristiques morphologiques telles que la texture, la porosité ou la couleur (tableau 1).

Ces horizons peuvent être regroupés selon 2 critères (tableau 2) :

- L'un, vertical, correspond à un degré de transformation de plus en plus important par rapport à la roche. Il définit trois familles d'horizons : altération, pédoturbé et humifère (de bas en haut du sol) ;
- L'autre, latéral, correspond notamment à des différences de couleur. Il définit trois domaines de différenciation : rouge, intermédiaire et jaune (de l'amont à l'aval de la toposéquence).

Tableau 1: Caractéristiques morphologiques des horizons.

A : argileux, AS : argilo-sableux, SA : sablo-argileux, AL : argilo-limoneux, LA : Limono-argileux,
G : graviers (textures appréciées tactilement sur le terrain).

	Texture	Porosité	Couleur
H_R	A	Très forte	Brun-rouge sombre
H_J	AS	Forte	Interpénétration taches brun-gris et jaunes
N1	A+G	Très forte	Brun-rouge et nodules rouge-violacés
P_{R1}	A	Très faible	Rouge à taches violacées
P_{R2}	A	Faible	Rouge
P_{I1}	A	Faible	Rouge à taches jaunes croissant vers l'aval
P_{J2}	A	Faible	Jaune à taches rouges diminuant vers l'aval
P_{J1}	AS	Forte	Jaune ponctué d'ocre à taches gris-brun
P_{J2}	SA	Forte	Jaune
P_{J3}	AS	Moyenne	Jaune-brun
N2	A+G	Moyenne	Jaune-brun et nodules rouge-violacés
A_R	AL	Moyenne	Rouge-violacé
A_I	A	Moyenne	Rouge-violacé à glosses jaune pâle
A_J	A	Moyenne	Jaune à taches rouges et violacées
A	LA	Moyenne	Hétérogène blanc, jaune, rouge et violacé

Tableau 2: Regroupement des différents horizons.

Deux horizons figurant sur la même ligne se succèdent latéralement dans le domaine de différenciation. Les flèches signifient que l'horizon "déborde" dans le domaine adjacent.

Humifère	Jaune	Interméd	Rouge
	H_J	H_J	H_R
Pédoturbé	$P_{J1} \rightarrow$	$\leftarrow N1$	N1
	$P_{J2} \rightarrow$	$P_{I1} P_{I2} \rightarrow$	$\leftarrow P_{R1} P_{R2}$
	P_{J3}		
	N2		
Altération	$A_J \rightarrow$	A_I	A_R
	A	A	A

1.3 Les familles d'horizons.

- Les horizons d'altération sont notés A. On peut y reconnaître l'organisation de la roche sous-jacente. On distingue un isaltérite qui occupe la base de tout le système de sols et, au dessus, trois allotérites différents¹ ;
- Les horizons pédoturbés sont notés P. Les processus de pédogenèse ont totalement effacé les caractères lithorelictuels. Au sein de cette famille, on distingue le cas particulier des horizons gravillonnaires, notés N. En effet, ils sont constitués pour la plus grande partie de matériau pédoturbé, mais présentent aussi des éléments de taille centimétrique, indurés par des oxy-hydroxydes de fer, qui préservent des organisations lithorelictuelles (nodules) ;
- Les horizons humifères sont notés H. Ils sont fortement marqués par la matière organique et par l'activité de la biosphère (racines et faune du sol).

1.4 Les domaines de différenciation.

- Un domaine de sol rouge, indice R, occupe l'amont de la toposéquence et s'étend sur un versant convexe de pente assez forte (5 à 10%). Il est caractérisé par des horizons pédo-turbés de couleur dominante rouge, de texture argileuse et à faible macroporosité ;
- Un domaine de sol jaune, indice J, occupe l'aval, sur une plaine de pente faible (environ 1%). Il est caractérisé par des horizons pédoturbés de couleur jaune, de texture argilo-sableuse à sablo-argileuse et à forte macroporosité ;
- Ces deux domaines sont séparés par un domaine intermédiaire, indice I, d'une cinquantaine de mètres de large. Il est situé juste avant la rupture de pente concave qui conduit du versant à la plaine. Ce domaine comporte des horizons pédoturbés où sont juxtaposés des phases rouge et jaune et dont la porosité visible à l'oeil est assez faible.

1.4.1 Agencement des horizons.

La figure 2 présente l'organisation de ce système de sols. On ne retiendra ici que trois points remarquables :

- L'isaltérite(A) ne présente pas de variation latérale notable. Les variations latérales de la couverture pédologique ne correspondent donc pas à une hétérogénéité du substrat géologique ;
- Le domaine intermédiaire présente la plus grande complexité latérale, de nombreux horizons y apparaissant et y disparaissant successivement. Cependant, les biseaux entre deux horizons successifs ont la même forme : l'horizon qui se développe vers l'aval apparaît toujours au dessus de l'horizon qu'il

¹Un isaltérite correspond à une transformation isovolumique des minéraux altérables de la roche. Il présente donc une organisation identique à celle de la roche. Un allotérite correspond à une transformation isovolumique d'un isaltérite par la pédoturbation. Il conserve une organisation générale proche de celle de la roche (foliation par exemple), mais les minéraux originels ne sont plus identifiables (Y.Chatelin, 1974).

remplace. Par ailleurs, les gradients progressifs de variation de couleur permettent de supposer que les horizons qui apparaissent vers l'aval dérivent latéralement de ceux qui se trouvent à l'amont ;

- N1 recoupe presque tous les horizons pédoturbés (P_{R1} , P_{R2} , P_{I1} , P_{I2} et P_{J2}). Il faut signaler que les nodules présentent une organisation lithorelictuelle. Seul P_{R1} présente aussi des organisations lithorelictuelles, susceptibles de se différencier en nodules (taches violacées légèrement indurées). Pour les autres horizons pédoturbés, les nodules de N1 ne peuvent pas se différencier à partir du matériau sous-jacent. Il y a donc une discordance dans les séquences verticales de différenciation. Par ailleurs, la présence de filons de pegmatite conservés dans ces séquences verticales, permet d'affirmer que les différents horizons pédoturbés sont en place. La mise en place de N1 ne peut donc pas résulter d'un colluvionnement au long du versant. En conséquence, P_{R2} puis P_{I1} , P_{I2} et P_{J2} , se sont différenciés *pro parte* aux dépens de P_{R1} dont l'extension était initialement au moins aussi importante que l'extension actuelle de N1.

Ce dernier point permet d'établir que ce système de sol correspond à un système de transformation où le domaine de sol jaune se propage latéralement aux dépens du domaine de sol rouge. Le domaine intermédiaire correspond à la zone de transformation des horizons pédoturbés.

1.5 Conclusion

La compartimentation de la couverture pédologique constitue une base essentielle pour discuter de la genèse d'un système de sols et de sa dynamique d'évolution. Toutefois, la description des horizons peut être sujette à caution car elle dépend beaucoup de l'observateur². Il était donc important de valider cette première compartimentation, établie sur des bases morphologiques, par des données non subjectives, telles que des caractéristiques physico-chimiques des sols.

2 Analyse des caractéristiques physico-chimiques

2.1 Tableau d'analyse et méthode choisie

2.1.1 Données recueillies.

135 échantillons ont été prélevés au long de la toposéquence sur 13 profils distants d'environ 15m (Fig.2). Au niveau de chaque profil les échantillons ont été prélevés selon un pas de 20cm jusqu'à une profondeur comprise entre 2 et 3m. Ce plan de prélèvement selon un maillage régulier, a permis d'échantillonner correctement la majeure partie des horizons (à l'exception de A et A_J).

En plus de sa description morphologique, chacun des échantillons a été caractérisé au laboratoire par des analyses physico-chimiques :

- Granulométrie (6 fractions : argile, limons fins, limons grossiers, sables fins, sables grossiers et éléments >2mm) ;

²Une étude à ce propos a été menée par J.P.Legros et J.Argeles (1973), dans le cadre de l'évaluation des fiches de description STIPA. Elle révèle que selon les pédologues, les estimations semi-quantitatives (et même les descriptions, dans le cas de profils complexes) sont fortement variables.

- Teneur en carbone organique et en azote ;
- Teneur en fer total de la fraction <2mm ;
- pH eau et pH KCl ;
- Teneur en aluminium et en protons échangeables ;
- Capacité d'échange cationique (CEC) ;
- Teneur en bases échangeables et totales (K, Na, Mg, Ca).

Le tableau de données comporte donc 22 variables de base auxquelles s'ajoutent 7 variables correspondant à des combinaisons usuelles entre les variables de base :

- C_sN , rapport carbone sur azote ;
- MO, taux de matière organique (fonction linéaire du carbone) ;
- SBE et SBT, somme des cations basiques échangeables et totaux ;
- V, taux de saturation du complexe d'échange (SBE/CEC) ;
- AcE, acidité d'échange (somme de l'aluminium et des protons échangeables) ;
- TAc, taux d'acidité d'échange (AcE/(SBE+AcE)).

Cet ensemble de données peut se scinder en deux chapitres :

- La composition des horizons (granulométrie, teneur en matière organique et en fer) ;
- Leurs caractéristiques géochimiques (garniture cationique, propriétés d'échange et acidité).

2.1.2 Méthode choisie.

Ce tableau a été étudié grâce à une méthode d'analyse factorielle classique : l'analyse des correspondances multiples (ACM, programme ANCOR de la bibliothèque ADDAD-89) après mise sous forme disjonctive complète du tableau de données. 3, 4 ou 5 modalités ont été définies pour chacune des variables physico-chimiques grâce aux histogrammes de fréquence (tableau 3).

Tableau 3: Les 29 variables physico-chimiques.

N : nombre de modalités. Bornes des intervalles.

variables actives	N	Bornes						Unités
Argile	3	12	19	29	40			%
Limons fins	4	0	4	10	20	38		%
Limons gros.	3	1	3	4	8			%
Sables fins	5	5	8	11	14	18	24	%
Sables gros.	4	19	34	40	55	70		%
Éléments >2 mm	4	0	3	9	25	54		%
Fer total	4	1	4	6	9	13		%
Carbone	3	0	0,2	0,4	3			%
Azote	3	0	0,3	0,5	3,4			%
pH eau	4	4,2	4,9	5,1	5,4	5,7		log(H ⁺)
pH KCl	4	3,8	4,4	4,6	4,9	5,5		log(H ⁺)
Aluminium éch.	4	0	0,15	0,35	0,50	1,40		meq %
Protons éch.	3	0	0,05	0,10	0,50			meq %
CEC	3	0,04	0,12	0,20	0,76			meq %
Calcium éch.	2	0	0,04	0,65				meq %
Magnésium éch.	4	0	0,02	0,04	0,08	0,29		meq %
Sodium éch.	3	0	0,03	0,06	0,60			meq %
Potassium éch.	3	0	0,02	0,04	0,10			meq %
Calcium total	4	0	0,10	0,15	0,30	0,95		meq %
Magnésium total	4	0,02	0,20	0,30	0,40	0,62		meq %
Sodium total	3	0,03	0,09	0,12	0,50			meq %
Potassium total	4	0	0,16	0,32	0,44	0,73		meq %
Supplémentaires								
Matière organique	3	0	0,30	0,60	4,80			%
carbone/azote	4	1	8	11	13	21		%
Somme bases éch.	4	0	0,06	0,12	0,24	1,06		meq %
Somme bases totales	4	0,10	0,50	0,80	1,10	1,90		meq %
Saturation CEC	3	0	5	10	55			%
Acidité d'échange	3	0	0,35	0,65	1,80			meq %
Taux d'ac. d'échange	3	0	40	70	85			%

Par rapport aux techniques d'analyse géostatistique, qui peuvent sembler plus adéquates pour l'étude de données spatialisées, les méthodes d'analyse factorielle présentent l'avantage de permettre l'étude simultanée d'un grand nombre de variables, alors que les méthodes de cokrigage, n'autorisent que deux variables. Par ailleurs, les hypothèses d'exhaustivité et d'homogénéité du tableau de données, nécessaires aux analyses factorielles, sont moins difficiles à admettre en pédologie que les hypothèses, nécessaires à la géostatistique, de stationnarité (les valeurs restent du même ordre de grandeur en moyenne) et surtout d'ergodicité (l'écart entre deux valeurs ne dépend que de la distance qui les sépare). Enfin le codage des données, sous forme disjonctive complète, permet d'analyser simultanément des variables qualitatives et des variables quantitatives. Il a ainsi été possible d'adjoindre à l'analyse des caractéristiques physico-chimiques une variable nominale indiquant la nature de l'horizon échantillonné. Cette analyse nous donne deux types d'information qui seront abordés successivement :

- Les liaisons entre les différents paramètres mesurés ;
- L'établissement d'une structure physico-chimique de la couverture pédologique sur la base des ressemblances et des dissemblances entre les échantillons.

2.2 Liaisons entre les variables analysées

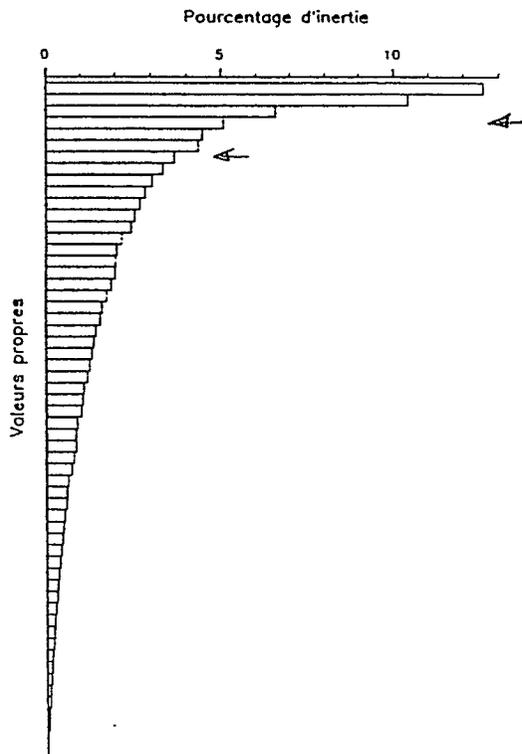


Figure 3 : Histogramme des inerties liées aux valeurs propres de l'ACM.

Les valeurs propres sont faibles et les pourcentages d'inertie associés aussi. Cependant il a été montré qu'une formule mathématique fondée sur ces nombres,

surtout dans le cas d'une ACM, ne révèle aucunement le nombre de facteurs significatifs. Toutefois, les ressauts d'intervalle relatif entre les facteurs sont un indice assez pertinent (J.P.Benzecri *et al.*,1982). On note sur la figure 3 que les intervalles relatifs séparant les 3e et 4e valeurs propres, ainsi que les 7e et 8e, correspondent à des ressauts importants. Le premier ressaut indique que la plus grande part de l'information contenue dans le tableau de données se trouve sur le premier plan factoriel (facteurs 1 et 2). Le second permet d'estimer qu'au delà du 6e facteur, les dispersions au long des axes ne sont plus suffisamment robustes pour être interprétées de façon sûre.

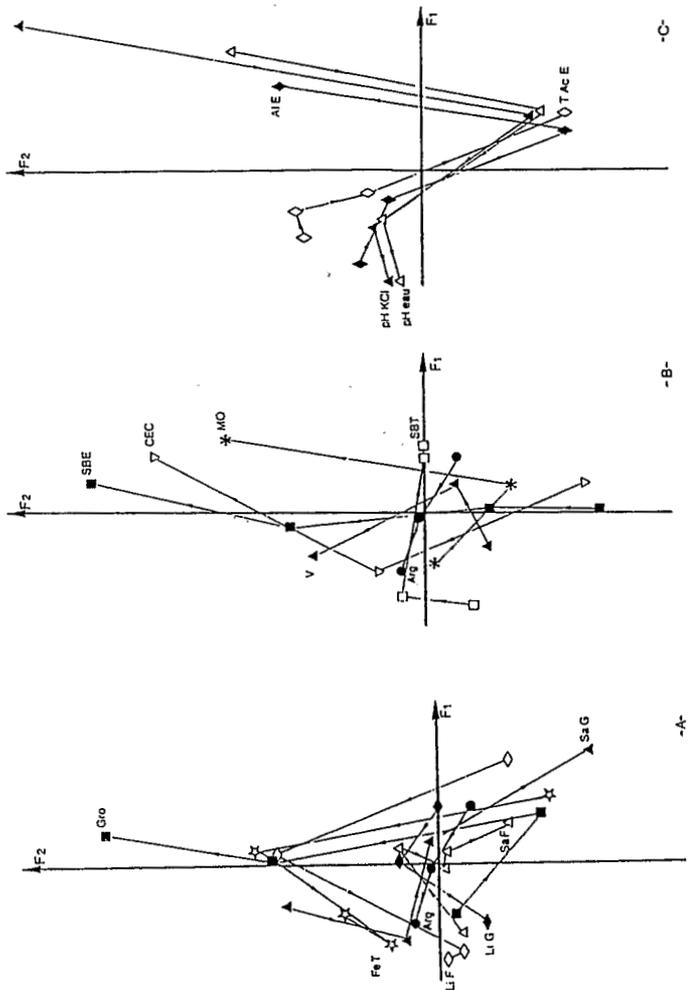


Figure 4 : Liaisons entre variables physico-chimiques dans le premier plan factoriel.

2.2.1 Variables de constitution.

La figure 4A montre que sur le premier plan factoriel, la majorité de ces variables se dispose au long de triangles dont la pointe est en haut : FeT et LiF sont sur des triangles aigus et varient dans le même sens, LiG et SaF sont sur des triangles écrasés et varient en sens inverse. Le sens de variation de SaF (modalités croissantes selon F1) est opposé à celui des trois autres variables. SaG et Arg se disposent plutôt sur la deuxième bissectrice et présentent des sens de variations opposés. On note que la première modalité de SaG se trouve à proximité des modalités intermédiaires de FeT et LiF (pointe des triangles). Enfin, la variable Gro présente un comportement particulier. Les deux premières modalités se disposent au long de la deuxième bissectrice alors que les suivantes s'alignent parallèlement au deuxième axe factoriel. La dernière modalité est très éloignée des modalités de l'ensemble des autres variables.

Les variables dont les modalités se disposent au long de formes similaires sont plutôt liées. Mais le nombre important de formes différentes indique qu'il n'existe pas de relation simple entre les variables de constitution, mais plutôt des liaisons entre certaines modalités de ces variables qui présentent des profils semblables. Les associations les plus nettes sont les trois groupes LiF1-SaF3-SaG4-Gro2-FeT1, Arg3-LiF4,3-LiG4-SaF1-SaG2-FeT3 et LiF2-SaG1-Gro3-FeT2. Du point de vue de la constitution des matériaux, le premier plan factoriel sépare donc les matériaux à texture sableuse associée à très peu de fer (1er groupe) les matériaux à texture argilo-limoneuse associée à beaucoup de fer (2e groupe), les matériaux à texture moyenne associée à peu de fer (3e groupe) et les matériaux graveleux (Gro4 isolé).

2.2.2 Variables géochimiques

La figure 4B montre que la somme des bases totales (SBT) se dispose parallèlement au premier axe factoriel et les faibles modalités, du côté négatif de l'axe, s'opposent aux modalités élevées. En revanche, la somme des bases échangeables (SBE), la CEC et dans une moindre mesure le taux de saturation du complexe d'échange (V) se disposent parallèlement au second axe factoriel et sont assez régulièrement réparties. Ces deux groupes de variables ont donc des dispositions perpendiculaires. Ceci montre qu'ils sont indépendants. En particulier, il n'existe pas de relation entre la quantité de cations basiques situés en position échangeable et la quantité de cations basiques contenue au total dans le sol. Les caractéristiques d'échange sont à rapprocher des teneurs en argile (Arg) et en matière organique (MO). Ici, les CEC les plus élevées s'associent avec les teneurs en matière organique élevées, les CEC intermédiaires s'associent avec les teneurs en argile élevées (qui s'associent aux plus faibles teneurs en matière organique), enfin les plus faibles CEC s'associent avec les faibles teneurs en argile (qui s'associent aux teneurs en matière organique intermédiaire).

Il n'apparaît donc pas de prépondérance nette d'un des deux constituants pour expliquer les valeurs de la CEC.

La figure 4C montre que les variables relatives à l'acidité (pH KCl, pH eau et AIE) ont la même forme, le sens de variation de AIE étant opposé à celui des pH. L'acidité de ces sols est donc fortement liée à la quantité d'aluminium situé en position échangeable. Ce qui est parfaitement cohérent avec la théorie. Le taux d'acidité d'échange ne suit que la branche gauche de la courbe décrite par ces trois premières variables. Il en résulte que les valeurs les plus élevées du taux d'acidité

d'échange sont essentiellement liées aux faibles teneurs en argile.

2.3 Structure physico-chimique du système de sols

En plus des fluctuations relatives entre les variables, il est possible d'établir une typologie des caractéristiques analytiques des sols étudiés. Pour cela, une classification ascendante hiérarchique des modalités des variables actives a été réalisée en prenant en compte les coordonnées sur les 6 premiers facteurs. Le tableau 4 présente les 8 classes terminales déterminées par la classification. Ces classes correspondent à des associations de modalités de variables, caractérisant différents matériaux ferrallitiques types. Elles définissent la structure physico-chimique du système de sols.

Les modalités correspondant aux valeurs intermédiaires des variables ont généralement une corrélation avec l'ensemble des 6 premiers facteurs inférieure à 50% et leur contribution à la constitution des groupes est faible.

En revanche, les modalités extrêmes ont généralement des corrélations élevées et contribuent fortement à la définition de la typologie.

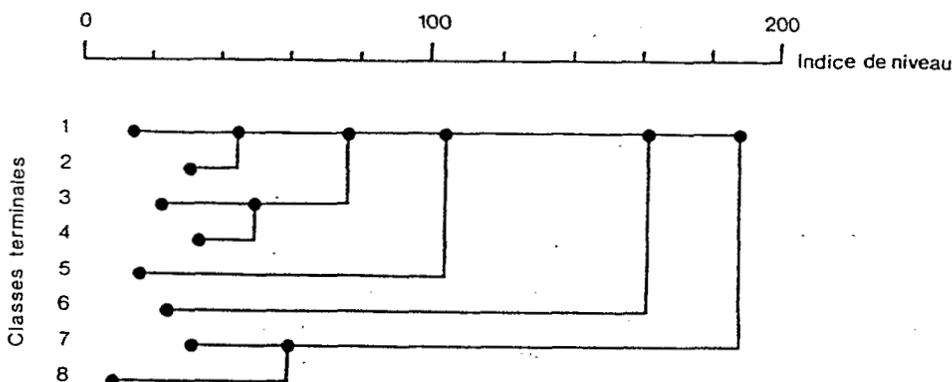


Figure 5 : Arbre simplifié de la CAH des caractéristiques physico-chimiques

Tableau 4: Regroupement des modalités des variables par CAH.

* : variables supplémentaires (adjointe à la classification des variables actives).

() : somme des corrélations aux 6 axes inférieure à 50%.

Classes terminales

	1	2	3	4	5	6	7	8
Arg		3					(2)	1
LiF	(3)		(2)		4			1
LiG		(2)	1		3			
SaF		1	(2)				(3 4)	(5)
SaG		(2)		1			(3)	4
Gro			(3)	4	1		2	
FeT		3	(2)	(4)				1
Cbn					1	3	2	
Azo	(2)					3	1	
MO		1				3	2	
CsN		3	2		1			4
CEC		2				3	1	
KE		(2)				3	1	
NaE		2	(3)				1	
MgE		(3)	(4)				(12)	
CaE		(2)					(1)	
SBE		3	4				12	
V			3				12	
KT		(2)	4		1			3
NaT			(3)		1			(2)
MgT		(2)			1	4	3	
CaT						(1 3 4)	(2)	
SBT		2	4		1			3
pHe		(4)	(3)				1	(2)
PHK		4			3		1	2
AlE		1			2		4	3
H ⁺ E			(1)				3	(2)
TAc		1	2				3	4

L'arbre présenté sur la figure 5 possède une forme assez caractéristique avec de longues "branches" partant toutes du "tronc" et ne se ramifiant qu'à leur extrémité. Ceci révèle que l'inertie intra-groupe est faible alors que l'inertie inter-groupe est élevée. La définition d'une structure sur la base d'une typologie des caractéristiques physico-chimiques est donc tout à fait fondée.

3 Comparaison entre structure physico-chimique et structure morphologique

Le paragraphe 2.2.2. signalait qu'une variable nominale repérant un échantillon en fonction de l'horizon dont il a été extrait, avait été placée en supplémentaire au cours de l'ACM. Il est donc possible de comparer la structure physico-chimique de ce système de sols avec sa structure morphologique

3.1 Pertinence de la délimitation morphologique des horizons

La figure 6, présente la disposition relative dans le premier plan factoriel, des individus (identifiés selon l'horizon auquel ils appartiennent) et de la variable nominale. L'ensemble des individus appartenant à un horizon définit un nuage de points. Tous ces nuages sont étirés selon le deuxième axe factoriel.

- Les nuages des horizons humifères (HR et HJ) sont dans le premier cadran du plan factoriel et sont très étirés ;
- Le nuage de l'horizon gravillonnaire (N1) est assez compact (à 2 exceptions près) et se place sur le second axe factoriel, du côté positif ;
- Les nuages des autres horizons se disposent grossièrement au long de la deuxième bissectrice. Les horizons du domaine rouge sont dans le 4e et le haut du 3e cadran, ceux du domaine jaune dans le second et ceux du domaine intermédiaire occupent une position centrale. On remarquera que seul le nuage PJ2 est compact et que le nuage PJ1 s'étire vers les horizons humifères pour s'interpénétrer avec le nuage HJ.

Ainsi, bien que les critères morphologiques ne soient pas intervenus dans le calcul des axes factoriels, on retrouve une bonne discrimination des individus selon leur différenciation. L'élément le plus remarquable est l'ordonnement des individus des horizons pédoturbés au long de la deuxième bissectrice selon leur couleur. Ceci montre notamment que la couleur d'un horizon est un critère intégrant un ensemble de caractéristiques physico-chimiques.

Du point de vue de la variable nominale, il apparaît que la disposition des modalités rend bien compte de la position relative des nuages. Ceci n'est pas évident a priori car, bien qu'une modalité X soit au barycentre des points appartenant à l'horizon X, sa projection sur un plan factoriel peut engendrer des dispositions trompeuses. Ce n'est pas le cas ici car les corrélations de cette variable supplémentaire aux premiers axes factoriels sont assez élevées (de l'ordre de 50%). Ceci montre encore une fois la bonne corrélation entre les caractéristiques

morphologiques et les caractéristiques physico-chimiques des sols. Il est donc possible de se baser sur cette variable pour préciser de façon claire les relations entre différenciation morphologique et différenciation physico-chimique.

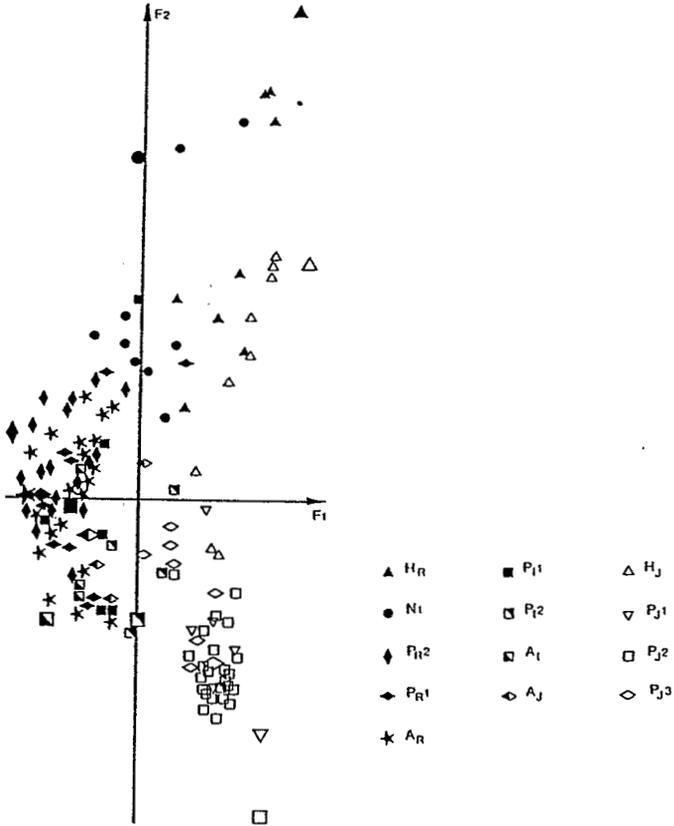


Figure 6 : Distribution des individus dans le premier plan factoriel.

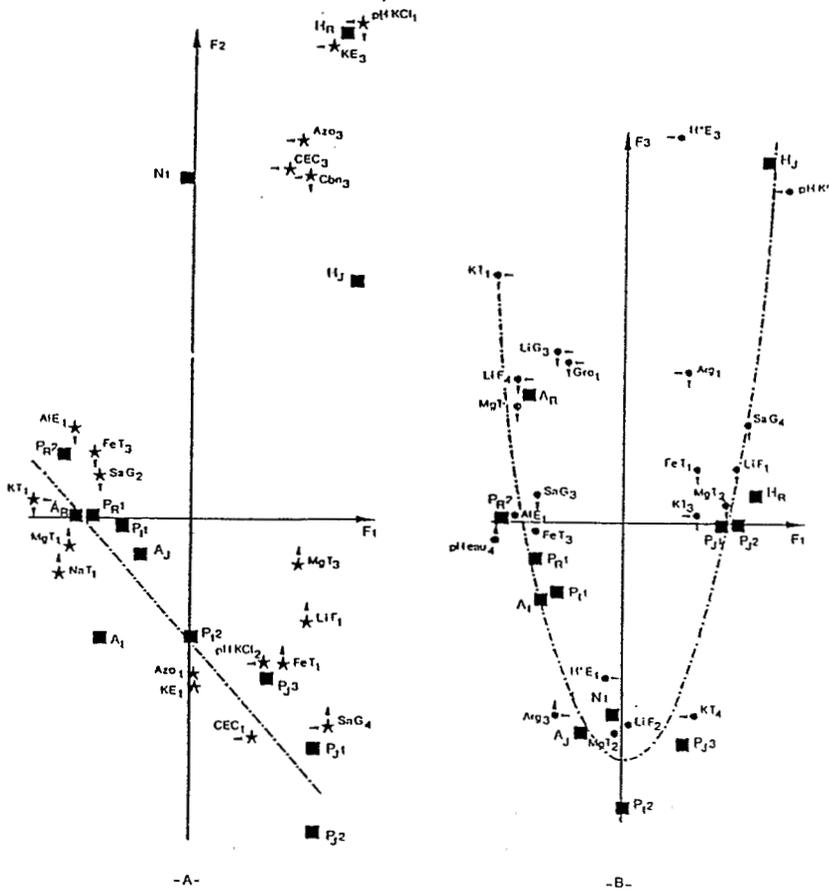


Figure 7 : Relations entre les variables physico-chimiques et la différenciation en horizons

La figure 7 présente une illustration de ces relations :

- Le premier plan factoriel (Fig.7a) met bien en évidence le caractère géochimique particulier des horizons humifères et de l'horizon gravillonnaire, qui présentent de fortes teneurs en matière organique, des CEC élevées et un pH acide. Les autres horizons appartiennent à un ensemble ordonné : ils s'alignent au long d'une droite selon leur coloration. Les caractères physico-chimiques accompagnant cette modification de couleur sont, pour les variables de constitution, une diminution des teneurs en argile et en fer total et une augmentation de la teneur en sable et, pour les variables géochimiques, une diminution de la CEC, une augmentation de l'aluminium échangeable et une acidification ;
- Le second plan factoriel (Fig.7b) montre que les horizons se disposent au long d'une parabole. Pour chacune des familles, les horizons se disposent en fonction de leur coloration : à mesure que l'on se déplace au long de la parabole on passe du rouge au jaune, en commençant par les horizons

d'altération, puis viennent les horizons pédoturbés et enfin les horizons humifères. Il apparaît donc ici une organisation qui rend compte à la fois du domaine de différenciation et de la famille des différents horizons.

3.2 Comparaison des deux partitions

Pour comparer les deux partitions, il est plus facile d'ajouter la variable nominale supplémentaire à la classification hiérarchique des variables physico-chimiques (tableau 5), car ceci évite de consulter simultanément un grand nombre de plans factoriels.

Tableau 5: Structure physico-chimique et différenciation morphologique des horizons.

Classe physico-chimique	Groupe morphologique	Horizons
1 2	i	PR^2 PR^1 & A_I
3 4	ii	P_J3 & A_J P_I1 & $N1$
5	iii	A_R
6	iv	H_R & H_J
7 8	v	P_I2 P_J1 & P_J2

En premier lieu, on note que les classes physico-chimiques correspondent toutes à un horizon au moins. Il apparaît donc que la typologie physico-chimique s'accorde bien avec la compartimentation en horizons établie sur la base de la description du système de sols.

En regroupant les classes physico-chimiques les plus proches (1-2, 3-4 et 7-8), on obtient une partition en 5 groupes morphologiques cohérents avec les deux paramètres de stratification de l'ensemble des horizons de ce système de sols (famille et domaine de différenciation) :

- i - Les horizons pédoturbés à dominante jaune (P_J1 , P_J2 et P_J2). Les horizons du domaine jaune ont des textures sablo-argileuse (SaG4, SaF5, LiF1 et Arg1), des taux d'acidité d'échange très élevés (TAc4), contiennent des quantités notables de cations totaux (KT3, MgT3 et CaT2) et peu de fer (FeT1). L'horizon jaune et rouge qui s'y associe est un peu plus argileux (Arg2) et se distingue par ses très faibles teneurs en bases échangeables (SBE1, NaE1, MgE1 et CaE1) ;
- ii - Les horizons humifères (HR et HJ). Ils sont naturellement caractérisés par une teneur élevée en matière organique (Cbn3, Azo3, MO3) mais aussi par de fortes CEC (CEC3) et une forte acidité (pHE1, pHK1, ALE4 H+E3 et AcE3) ;
- iii - L'allotérite rouge (AR). Il est caractérisé par une texture limoneuse et par des teneurs en bases totales très faibles (KT1, NaT1 et MgT1) ;
- iv - Des horizons du domaine de transformation (N1, PI1 et AJ) et l'horizon pédoturbé jaune profond (PJ3). Les horizons de cette classe présentent des caractéristiques plutôt intermédiaires. On note cependant quelques points particuliers de forte contribution dans la définition de la structure physico-chimique : N1 est caractérisé par des teneurs élevées en éléments grossiers (Gro4) et en fer (FeT4) et faibles en sables grossiers (SaG1) ; PI1, par une assez faible acidité (ALE2 et pHK3) ; PJ3, par des teneurs en potassium total élevées (KT4) ; AJ par des faibles teneurs en limons grossiers (LiG1). Il faut souligner que malgré son effectif d'échantillonnage faible, AJ s'associe bien à PJ3 qui en est le plus proche, tant géométriquement que morphologiquement. Par ailleurs, la forte diminution du taux de limons montre que, par rapport à l'allotérite rouge, cet horizon est fortement affecté par la pédoturbation ;
- v - Les horizons pédoturbés rouges (PR1 et PR2) et l'allotérite intermédiaire (AI). Les horizons rouges se caractérisent par une texture argileuse (Arg3, SaF1 et SaG2), par une forte teneur en fer (FeT3), et par une teneur assez forte en bases échangeables (SBE3, MgE3). PR2 se distingue par une forte teneur en limons fins (LiF3) et par une faible acidité (pHE4, pHK4, ALE1, AcE1 et TAc1). De même que pour l'allotérite jaune, il est intéressant de noter que l'allotérite du domaine intermédiaire se rapproche des horizons pédoturbés rouge.

1 Interprétations

Un travail antérieur (H. Robain, 1989) a permis d'établir que la différenciation latérale de ces sols correspond à un système de transformation (R. Boulet et al.,

1982). Dans la première partie, on a montré que les sols du domaine jaune se propagent latéralement aux dépens des sols du domaine rouge, le domaine intermédiaire correspondant à la zone de transformation. L'ACM permet d'établir que le passage du rouge au jaune¹ au sein de la famille des horizons pédoturbés (PR2, PI.1, PI2 et PJ2) correspond aussi à une évolution graduelle des caractéristiques physico-chimiques moyennes des différents horizons : acidification et concentration relative des particules grossières par élimination concomitante des particules fines et des oxydes de fer.

Il a été montré que l'élimination d'argile dans cette transformation correspond à une destruction des particules fines et non à leur éluviation (H.Robain, 1989). Par ailleurs, il a aussi été montré que le domaine intermédiaire subit d'importantes alternances d'humectation et de dessiccation qui rythment l'élimination des oxydes de fer (H.Robain, 1990). En effet le fer passe de l'état ferrique et immobilisé en conditions sèches, à ferreux et mobile en conditions humides. Ces deux phénomènes permettent de supposer que le processus de destruction des argiles observé ici, est analogue au processus nommé ferrollyse par R.Brinkman (1970). Pendant les périodes oxydantes de dessiccation, les oxydes de fer se fixent sur les sites d'échange en y remplaçant les cations alumineux. En revanche, pendant les périodes réductrices d'engorgement, les oxydes de fer passent dans la solution du sol sous forme ferreuse et peuvent migrer. Ils sont remplacés sur les sites d'échanges par des cations alumineux extraits des réseaux cristallins des argiles. Ce processus de destruction correspond bien à l'augmentation de l'acidité observée ici. Par ailleurs, la position des allotérites des domaines intermédiaire et jaune dans la typologie montre que ces horizons morphologiquement proches de la roche présentent des caractères propres aux horizons pédoturbés. Ce fait permet d'affirmer que l'évolution latérale de ce système de sol, qui concerne essentiellement les horizons pédoturbés, coïncide avec une évolution verticale, qui concerne les horizons d'altération sous jacents aux horizons transformés. En effet, le développement de la porosité qui se produit au cours de la transformation, entraîne une modification de la dynamique hydrique des sols : elle passe de superficielle et latérale dans le domaine rouge à profonde et verticale dans le domaine jaune. Il en résulte une pédoturbation des horizons de profondeur de plus en plus importante du domaine rouge au domaine jaune. Ce fait qui apparaissait bien morphologiquement se confirme par l'analyse des caractéristiques physico-chimiques.

2 Conclusion

Cette analyse montre que le sol est un objet qui présente une structure forte, tant du point de vue de sa morphologie que du point de vue de ses caractéristiques physico-chimiques. Cette structuration indique bien que le sol est un corps organisé. Mais il apparaît aussi ici que ce corps est un continuum où l'on passe plus ou moins graduellement d'un membre à un autre. En conséquence, la définition de limites (donc d'horizons), nécessaire à la compréhension de la genèse et du fonctionnement d'un système de sols, est une démarche conceptuelle qui ne correspond pas à une réalité objective. Toutefois, sur la base de cette approche, l'analyse statistique montre qu'il existe une bonne correspondance entre les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des sols. En particulier, la couleur, critère

¹L'évolution de couleur correspond aussi à une évolution de la porosité qui passe de faible à forte (cf.2.2.1)

souvent très discriminant du point de vue de la délimitation des horizons, intègre un nombre important de caractéristiques de constitution (texture, teneurs en fer et en matière organique).

On a vu que l'étude minutieuse de l'organisation géométrique d'un système de sols permet d'émettre des hypothèses robustes quant aux phénomènes pédogénétiques qui gouvernent sa différenciation. Il apparaît ici que l'analyse des caractéristiques physico-chimiques moyennes des différents horizons permet de mettre en évidence les grands processus d'évolution d'un système de sol à l'échelle du versant. La confrontation des structures morphologiques et physico-chimiques d'un système de sols permet donc de relier les phénomènes pédogénétiques observés à des processus d'évolution.

Références bibliographiques

- J.P.Benzecri et collaborateurs, 1982. - L'analyse des données. II-L'analyse des correspondances. Dunod Ed., Paris. 632p. G.Bocquier, 1971. - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse doc. sci. Strasbourg et Mém. ORSTOM 26, ORSTOM Ed., Paris. 365p.
- R.Boulet, 1974. - Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta. Equilibres dynamiques et bioclimats. Thèse doc. sci. Strasbourg et Mém. ORSTOM 85, ORSTOM Ed., Paris. 272p.
- R.Boulet, A.Chauvel, F.X.Humbel et Y.Lucas, 1982. - Analyse structurale et cartographie en pédologie. I-Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de séquence et leurs principaux apports à la connaissance des sols. Cah. ORSTOM sér. pédol. XIX(4), pp.309-322.
- R.Brinkman, 1970. - Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process. Geoderma 3, pp.199-206.
- A.Chauvel, 1977. - Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges dans la moyenne Casamance (Sénégal). Thèse doc. sci. Strasbourg et Mém. ORSTOM 62, ORSTOM Ed., Paris. 532p.
- Y.Chatelin, 1974. - Les sols ferrallitiques T.III. L'altération. I.D.T.n° 24, ORSTOM, Paris, 144p. E.Fritsch, 1984. - Les transformations d'une couverture ferrallitique en Guyane Française. Thèse doc. sci. Paris 7. 190p.
- J.P.Legros et J.Argeles, 1973. - Enquête sur la précision des descriptions des profils pédologiques. Doc. ronéo. INRA Montpellier, 16p.
- Y.Lucas, 1988. - Systèmes pédologiques en Amazonie Brésilienne. Equilibres dynamiques, déséquilibres et transformations. Thèse doc. sci. Poitiers. 250p.

- D.Nahon, 1976. - Cuirasses ferrugineuses et encroûtement calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structure, relais et coexistence. Thèse doct. Aix-Marseille 3, 232p.
- H.Robain, 1989. - Organisation et transformations dans une couverture ferrallitique de Guyane Française. Thèse doct. Paris 6, 189p.
- H.Robain, 1990. - Etude de la transformation latérale d'un horizon jaune compact en un horizon jaune poreux (système-sol de la crique Balate, Guyane Française). Actes du sémin. "Organisation et fonctionnement des altérites et des sols" 02/1990, sous presse.