

## Etat d'agrégation et rôle du fer dans des horizons fersiallitiques : analyse de données

R. LAMAR<sup>(1)</sup>  
L.M. BRESSON<sup>(2)</sup>

### RESUME

Des sols rouges fersiallitiques, épais et différenciés, se sont développés sur des pentes très abruptes du massif métamorphique de Thenia (Algérie). L'observation microscopique y révèle le développement d'une microstructure très nette qui, par son incidence sur le régime hydrique, explique la stabilité de cette couverture pédologique.

Dans les principaux horizons, les agrégats ont été séparés en classes de taille dans lesquelles le fer, le carbone organique et la cohésion ont été étudiés.

De l'analyse des relations taille-constitution-comportement, il ressort que (1) le développement de l'agrégation est fortement corrélé au fer amorphe : cette relation n'est pas perceptible si le fer est dosé sur l'ensemble de la terre fine : elle n'apparaît que si une séparation préalable des agrégats est effectuée ; (2) la distribution dimensionnelle des agrégats est aussi fortement corrélée au fer amorphe : les agrégats les plus fins sont les plus riches en fer amorphe ; (3) la cohésion des agrégats est plus liée au fer amorphe qu'à l'argile ou à la matière organique ; (4) c'est la fraction du fer amorphe extractible au pyrophosphate de sodium qui est la plus fortement corrélée.

**MOTS CLES :** Agrégation - Fer amorphe - Carbone organique - Fersialsols - Stabilité structurale.

### AGGREGATION STATE AND IRON PART WITHIN FERSIALLITIC HORIZONS : DATA ANALYSIS

*On a steep slope of the Thenia metamorphic massif (Algeria), thick and differentiated reddish fersiallitic soils (Rhodoxerals) have developed. Microscopic investigations of these soils showed a strong microstructure development which induced a high soil permeability and therefore explained the stability of the pedological mantle.*

*Within the main horizons, we divided aggregates into four grain size classes in which iron oxides, organic carbon and structural stability were determined.*

*The size-constitution-behaviour relationships showed that (1) the microstructure development was strongly related to amorphous iron ; this relationship was not perceptible if iron was determined on the whole < 2 mm fraction ; (2) the aggregate size distribution was also strongly related to amorphous iron : the finest aggregates were the richest in amorphous iron ; (3) the aggregate cohesion was more strongly related to amorphous iron than to organic matter content ; (4) the most strongly correlated fraction of amorphous iron was the sodium pyrophosphate extractible one.*

**KEY WORDS :** Aggregation - Amorphous iron - Organic carbon - Rhodoxerals - Structural stability.

(1) Institut de Biologie, Université de Sétif, 19000 Sétif, Algérie.

(2) Laboratoire de Science des Sols et Hydrologie, INA-PG, 78850 Thiverval-Grignon, France.

## INTRODUCTION

Le rôle moteur de l'évolution structurale dans la dynamique des couvertures pédologiques rubéfiées a déjà été montré par CHAUVEL (1977) pour les couvertures ferrallitiques de Casamance (Sénégal). Dans le massif métamorphique de Thenia (Algérie), l'existence d'une microstructure de type fersiallitique pourrait expliquer, par son incidence sur le fonctionnement hydrique, le maintien d'une couverture pédologique évoluée sur des versants pourtant très raides (LAHMAR, 1983 ; BACCOURI, 1984 ; LAHMAR et BRESSON, 1987).

Les sols fersiallitiques rubéfiés (Rhodofersialsols) sont caractérisés par une structure polyédrique anguleuse, fine et très stable, dans laquelle on considère généralement que le fer, tout comme dans les sols ferrallitiques rubéfiés, joue un rôle important, notamment sous forme de sesquioxides mal cristallisés. Ce rôle est souligné dans de nombreux travaux mettant en œuvre des techniques d'investigation simples ou sophistiquées sur des associations argiles 1/1-oxydes de fer provenant de sols (CHAUVEL, 1977 ; CAMBIER et PROST, 1981 ; CAMBIER et PICOT, 1988) ou de synthèse (CHAUVEL et al., 1976) et des associations argiles 2/1-oxydes de fer naturelles (COUGHLAN et al., 1973 ; GIOVANNINI et SEQUI, 1976b ; BRESSON, 1981 ; BRUAND, 1985 ; ROBERT et al., 1987) ou de synthèse (BLACKMORE, 1973 ; EL SWAIFY et EMERSON, 1975 ; WILKES et SCHWERTMANN, 1978 ; ROBERT et al., 1983, 1987).

Parmi les études menées sur les associations naturelles, certaines ont mis en œuvre des méthodes de caractérisation fine des sesquioxides de fer : diffraction des rayons X, spectrométrie Infra-Rouge (CAMBIER et PROST, 1981), microscopie électronique (BRESSON, 1981 ; CAMBIER et PROST, 1981 ; BRUAND, 1985) ; d'autres se sont attachées à analyser le comportement des associations argile-fer grâce à des études de dispersabilité et de microorganisation en fonction du potentiel de l'eau (CHAUVEL et al., 1976 ; CHAUVEL, 1977 ; BRUAND, 1985 ; ROBERT et al., 1987). En revanche, rares sont les travaux qui ont mené de front les deux approches (CHAUVEL, 1977 ; BRUAND, 1985).

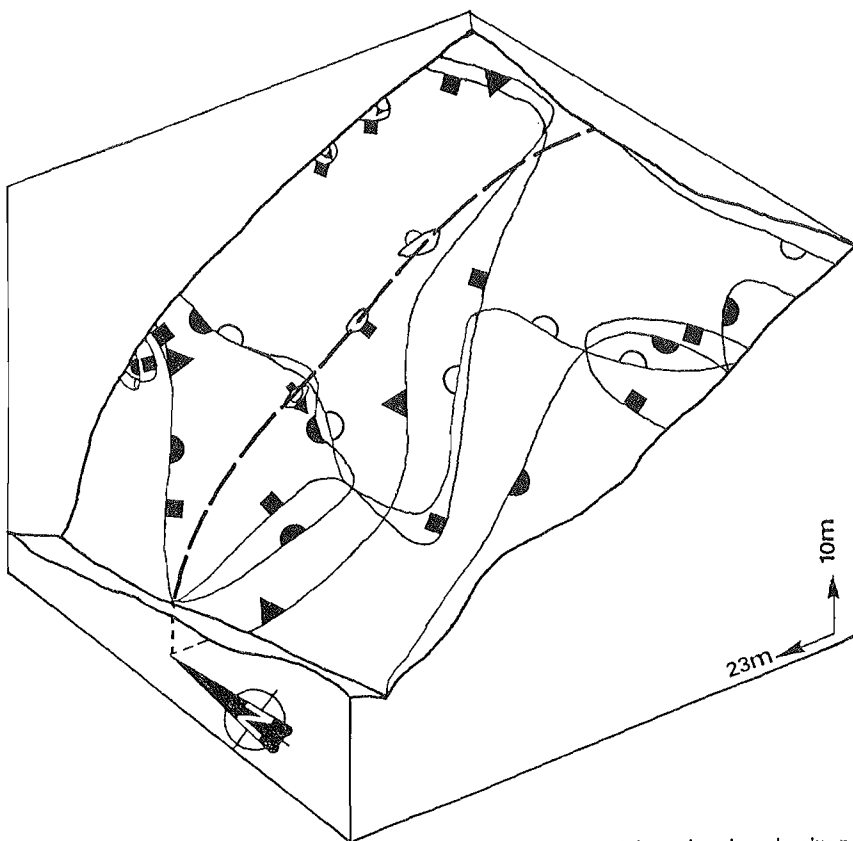
Au demeurant, les méthodes simples d'extraction « sélectives » du fer ont été généralement appliquées à la totalité de la terre fine : or, dans les sols étudiés, cette dernière contient du squelette grossier qui, bien que ne participant pas ou peu à l'agrégation, contient des quantités non négligeables de fer facilement extractible. De la même manière, l'étude du comportement hydrique des associations argile-fer a été généralement menée sur la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$ , qui ne peut expliquer à elle seule le comportement du sol en place.

C'est pourquoi, dans ce travail, nous avons fait porter notre effort sur l'étude simultanée caractérisation-comportement, avec des échantillons de sol dans un état aussi proche que possible de l'état naturel, quitte à utiliser des méthodes très simples et faciles à mettre en œuvre en toutes circonstances pour la caractérisation du fer et l'étude du comportement des associations argile-fer. Ainsi, nous avons réalisé une séparation des agrégats selon leur taille, dont le résultat est en lui-même une caractéristique physique importante. Et c'est sur ces différentes fractions que des caractérisations simples, tant de constitution (fer, matière organique) que de comportement (résistance à la désagrégation par sonification) ont été effectuées. Le rôle du fer a été alors examiné par analyse de données.





## I. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A) MATÉRIEL

Les échantillons étudiés proviennent des quatre horizons qui sont les plus répandus dans la couverture pédologique du massif de Thenia (Fig. 1), et qui sont significatifs de sa genèse et de son fonctionnement (LAHMAR et BRESSON,



Légende des horizons

	Horizon	NOIR
	,,	VIOLACE
	,,	ELUVIE
	,,	ARGILIQUE

(l'horizon apparaît du côté du signe)

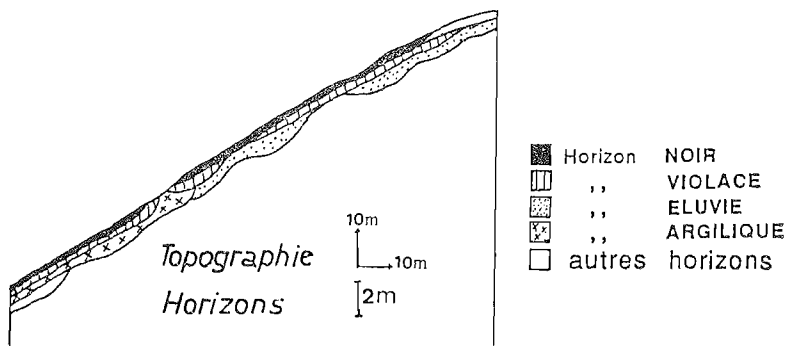


Figure 1 : Répartition des horizons Noir, Violacé, Eluvié et Argilique dans la couverture pédologique du massif de Thenia (Algérie). Bloc diagramme avec les courbes d'apparition des quatre horizons, et coupe.

*Distribution of the four studied horizons within the pedological mantle of Thenia massif (Algeria).*

1987 ; LAHMAR, 1988). Les horizons Eluvié et Argilique ont une signification pédogénétique : ils sont le résultat de processus de transfert au sein de la couverture pédologique. Les horizons Noir et Violacé ont, en revanche, une signification morphogénétique : leur distribution est le résultat de processus de transfert à la surface du sol.

Les principales caractéristiques physicochimiques de ces horizons sont données dans le Tableau I.

La structure observée sur le terrain (structure secondaire) est bien développée dans les horizons Noir, Argilique et Violacé, où elle est millimétrique à centimétrique, et peu développée dans l'horizon Eluvié, où elle est centimétrique.

En lames minces, la structure primaire des horizons Argilique et Violacé est très bien développée avec des microagrégats de 200 à 500  $\mu\text{m}$  (localement de 100 à 200  $\mu\text{m}$ ) surtout. Dans l'horizon Noir, les microagrégats sont plus grossiers (200 à 2000  $\mu\text{m}$ ) et peu développés (LAHMAR, 1983).

Tableau I Principales caractéristiques des horizons étudiés.  
*Main analytical data for the studied horizons.*

	FEAT	FECR	ARGI	CORG
	%	%	%	%
Noir	0.37	1.12	09.2	5.52
Violacé	0.22	1.45	12.6	2.03
Eluvié	0.16	1.50	08.4	0.99
Argilique	0.38	1.33	43.1	0.70

(FEAT= fer amorphe total, FECR= fer libre cristallisé, ARGI= argile, CORG= carbone organique)

## B) MÉTHODES

La terre fine, séchée à l'air et tamisée à 2 mm, a été aspergée de méthanol en aérosol et séchée sous infra-rouges pour réduire l'éclatement des agrégats au tamisage (BRAUDEAU, 1982). Les échantillons ont été par la suite tamisés à sec à travers une batterie de tamis de mailles respectives 630  $\mu\text{m}$  (à défaut de tamis à 700  $\mu\text{m}$ ), 500  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , ce qui a permis d'isoler les quatre classes d'agrégats mises en évidence en lames minces. Le tamisage à 2 mm détruit la surstructure d'ailleurs peu stable ici : l'échantillon récupéré ne contient donc que des agrégats primaires.

Dans chacune de ces classes, les « sables libres » ont été séparés sous loupe binoculaire et pesés.

Dans la fraction agrégée de chacune des classes, nous avons dosé : (1) le fer total par fusion alcaline (FETO), (2) le fer libre extrait au Dithionite-Citrate-Bicarbonate (MEHRA et JACKSON, 1960) qui correspond aux formes amorphe et cristallisée des oxyhydroxydes de fer, (3) le fer amorphe total extrait à l'Oxalate d'Ammonium (TAMM, 1922 ; SCHKERTMANN, 1964) qui correspond aux formes minérale et organique (FEAT), (4) le fer amorphe organique extrait au Pyrophosphate de Sodium (Mc KEAGUE, 1977) (FEPS) ; il semblerait, cependant, que ce réactif extraie aussi une partie du fer amorphe minéral (GIOVANNINI et SEQUI, 1976a ; JEANROY, 1983), (5) le carbone organique (méthode ANNE) (CORG). La fraction cristallisée du fer libre (FECR) est obtenue par différence entre le fer libre et le fer amorphe total. La fraction minérale du fer amorphe (FEAM) est obtenue par différence entre le fer amorphe total et le fer amorphe organique.

La stabilité structurale des agrégats est estimée par le temps qu'ils mettent pour se fragmenter complètement en particules inférieures à 100  $\mu\text{m}$  sous

l'effet d'un traitement de sonification en solution légèrement électrolytique. C'est un paramètre de cohésion à l'état humide qui est ainsi appréhendé. Les ultrasons ont peu été utilisés à une pareille fin (EDWARDS et BREMNER, 1967 ; HAMBLIN et DAVIES, 1976) : ils ont surtout été employés comme une alternative à la dispersion chimique des particules élémentaires du sol (BONFILS et DUPUIS, 1969 ; GENRICH et BREMNER, 1972a, 1972b, 1974, EDWARDS et BREMNER, 1967 a) ou à l'étude de ses fractions organo-minérales (WATSON et PARSONS, 1974 ; HINDS et LOWE, 1980b). Dans un cas comme dans l'autre, il y a, comme le souligne NORTH (1976), un manque de standardisation de la technique quant à (1) la puissance des appareils et la fréquence des vibrations qu'ils produisent, (2) le type d'appareil (cuve ou sonde), (3) le rapport solide/liquide sonifié et (4) le temps de l'opération. Au demeurant, l'énergie effectivement dissipée par l'échantillon n'est généralement pas connue (NORTH, 1976). Ces considérations rendent difficile la comparaison des résultats d'un auteur à l'autre, elles n'empêchent pas, cependant, la comparaison des résultats obtenus dans les mêmes conditions expérimentales. Dans ce travail, nous avons utilisé une sonde, dont les résultats sont meilleurs qu'une cuve (BONFILS et DUPUIS, 1967 ; GENRICH et BREMNER, 1972a), un rapport agrégats/solution de 1/8 (5 g d'échantillon/40 ml d'eau) tel que préconisé par CHABOUIS (1982). A cette solution a été rajouté 0,5 g de chlorure de calcium pour éliminer l'interférence de phénomènes de dissolution de Fe, Al, Si et C (HINDS et LOWE, 1980a). Le bécher en pyrex contenant le tout a été mis sous courant de réfrigération pour éviter l'échauffement au cours du traitement. La tête de sonde a été poncée pour réduire la cavitation (GENRICH et BREMNER, 1972b) ; le temps de sonification a été fixé initialement pour chaque échantillon, à 1 mn, 2 mn, 5 mn, 10 mn et 20 mn. Après chaque temps de sonification, l'échantillon a été passé à travers la batterie de tamis, et les refus des quatre tamis ont été séchés et observés sous la loupe binoculaire. Ce premier calage définit pour chaque échantillon une fourchette de temps de désagrégation : l'opération a été alors recommencée dans cet intervalle pour déterminer le temps précis au bout duquel les refus séchés ne contiennent plus d'agrégats.

## II. RÉSULTATS

### A) DISTRIBUTION DIMENSIONNELLE DES AGRÉGATS

Les résultats du fractionnement de 100 g de terre fine sont donnés dans le Tableau II.

La fraction inférieure à 100  $\mu\text{m}$  est plus abondante dans les horizons Violacé et Noir (environ 30 %) ; les « sables libres » sont plus abondants dans l'horizon Eluvié. D'une manière générale, la teneur en agrégats (poids total des agrégats/100 g) est de l'ordre de 60 % dans l'horizon Argilique, 50 % dans l'horizon Noir, 40 % dans l'horizon Violacé, et 35 % dans l'horizon Eluvié.

La distribution granulométrique des agrégats (Tabl. III) est quasi identique dans les horizons Violacé et Argilique. L'horizon Noir diffère par la distribution des agrégats des classes inférieures à 500  $\mu\text{m}$  ; la classe 500-200  $\mu\text{m}$  est plus abondante, la classe 100-200  $\mu\text{m}$  est moins abondante. Dans l'horizon Eluvié la classe 2000-630  $\mu\text{m}$  est plus abondante, la classe 200-100  $\mu\text{m}$  est moins abondante.

Tableau II : Résultats du fractionnement des horizons en classes d'agrégats.  
*Results of horizon splitting into aggregate classes.*

Horizons	Classe de taille ( $\mu\text{m}$ )	Teneur en agrégats pour 100g	Teneur en sables pour 100g	Total pour 100g
<b>Noir</b>	2000-630	19.0	11.9	30.9
	630-500	05.4	01.6	07.0
	500-200	14.9	05.1	19.9
	200-100	09.5	03.9	13.5
	total >100	48.8	22.6	71.4
	<100			28.6
<b>Violacé</b>	2000-630	16.6	12.0	28.6
	630-500	04.6	02.10	6.6
	500-200	09.4	04.7	14.0
	200-100	11.5	08.2	19.6
	total >100	42.0	26.9	68.9
	<100			31.1
<b>Eluvié</b>	2000-630	18.2	30.7	48.9
	630-500	03.5	03.7	07.3
	500-200	08.5	09.4	17.9
	200-100	03.4	05.1	08.4
	total >100	33.7	48.9	82.6
	<100			17.4
<b>Argilique</b>	2000-630	23.1	12.2	35.3
	630-500	05.8	01.6	07.4
	500-200	14.3	06.1	20.3
	200-100	16.6	07.8	24.4
	total >100	59.7	27.7	87.4
	<100			12.6

Tableau III : Distribution granulométrique des agrégats ( $> 100 \mu\text{m}$ )  
*Aggregate size distribution.*

Classes/Horizons	Noir %	Violacé %	Eluvié %	Argilique %
2000-630 $\mu\text{m}$	39.0	39.5	54.2	38.7
630-500 $\mu\text{m}$	11.0	10.8	10.5	09.7
500-200 $\mu\text{m}$	30.5	22.3	25.3	23.8
200-100 $\mu\text{m}$	19.5	27.3	10.0	27.7

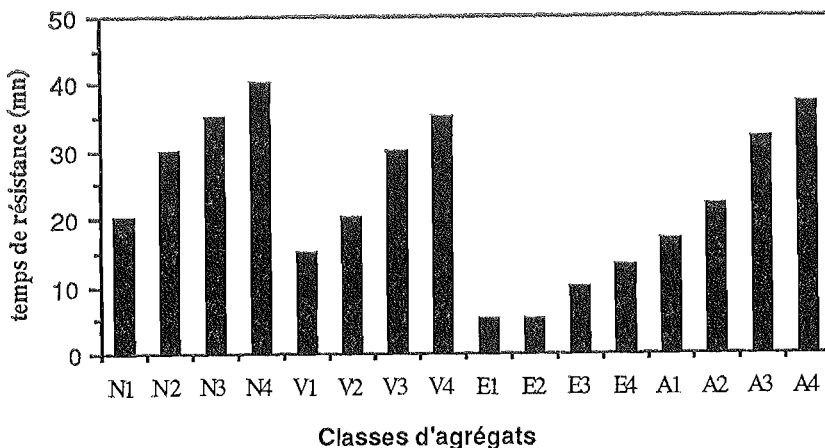
## B) CONSTITUTION DES AGRÉGATS

Les résultats obtenus (Tab. IV) montrent que les plus fortes teneurs en fer sont enregistrées dans les classes fines ( $< 500 \mu\text{m}$ ) de l'horizon Violacé, sauf pour le fer libre cristallisé, et dans l'ensemble des classes de l'horizon Argilique. Les plus fortes teneurs en fer amorphe sont celles de l'horizon Argilique. Le fer amorphe organique est plus abondant dans les classes de l'horizon Noir. La forme cristallisée du fer est plus importante dans les classes de l'horizon Eluvié.

Tableau IV : Formes du fer et du carbone organique dans chaque classe d'agrégats.  
*Iron oxides and organic carbon content of each aggregate class.*

	FETO	FEPS	FEAM	FECR	CORG
	%	%	%	%	%
<b>Noir</b>					
2000-630 µm	3.93	0.14	0.86	0.12	3.50
630-500 µm	4.29	0.17	0.96	0.14	5.50
500-200 µm	4.29	0.20	1.03	0.12	4.70
200-100 µm	4.65	0.21	1.06	0.09	4.50
<b>Violacé</b>					
2000-630 µm	4.65	0.06	0.50	0.84	0.50
630-500 µm	5.00	0.07	0.73	0.60	0.76
500-200 µm	5.86	0.07	0.88	0.52	0.48
200-100 µm	6.07	0.10	0.95	0.52	0.58
<b>Eluvié</b>					
2000-630 µm	5.00	0.04	0.25	0.83	0.38
630-500 µm	4.65	0.04	0.44	0.76	0.40
500-200 µm	4.65	0.05	0.45	0.83	0.38
200-100 µm	4.65	0.06	0.48	0.79	0.35
<b>Argilique</b>					
2000-630 µm	5.36	0.11	1.15	0.36	0.60
630-500 µm	5.72	0.12	1.66	0.38	0.58
500-200 µm	5.86	0.14	1.67	0.69	0.60
200-100 µm	6.07	0.15	1.66	0.85	0.54

FETO= fer total, FEPS= fer amorphe organique, FEAM= fer amorphe minéral, FECR= fer libre cristallisé, CORG= carbone organique.



Noir, V= Violacé, E= Eluvié, A= Argilique. 1= 2.000-630 µm, 2= 630-500 µm, 3= 500-200 µm, 4= 200-100 µm)

Figure 2 : Résistance des agrégats à la sonification

*Aggregate structural stability.*

Les plus fortes teneurs en substances organiques humifiées (CORG) sont enregistrées dans les classes de l'horizon Noir ; les plus faibles sont celles des classes de l'horizon Eluvié. Les teneurs des horizons Violacés et Argillique, sensiblement proches, sont également faibles. Il n'y a pas de différences importantes de teneur en carbone organique entre les différentes classes d'un même horizon.

### C) RÉSISTANCE DES AGRÉGATS A LA SONIFICATION

Le temps mis par les agrégats à se détruire quand ils sont sonifiés dans les mêmes conditions, traduit en partie leur cohésion à l'état humide, qui est un facteur important de leur stabilité structurale. Les résultats obtenus (Fig. 2) mettent en évidence que plus un agrégat est petit, plus sa résistance est grande, et ceci quelle que soit son origine. Mais, à taille égale, les agrégats de l'horizon Eluvié sont nettement moins stables que ceux des trois autres horizons.

### D) ANALYSE DES FACTEURS DE L'ÉTAT D'AGRÉGATION

Pour mieux saisir les relations existant entre la taille des agrégats, leur contenu en fer et en carbone organique ainsi que leur stabilité, nous avons eu recours à l'analyse en composantes principales (ACP).

L'ACP présentée ici (Fig. 3) a été effectuée sur les cinq variables qui se sont révélées avoir plus de poids sur l'agrégation dans une première ACP regroupant toutes les variables disponibles. Ce sont les variables : fer amorphe organique (FEPS), fer amorphe minéral (FEAM), fer libre cristallisé (FECR), carbone organique (CORG) et résistance à la sonification (RESI). Seize individus ont été considérés : les quatre classes d'agrégats (1 = 2000-630  $\mu\text{m}$ , 2 = 630-500  $\mu\text{m}$ , 3 = 500-200  $\mu\text{m}$ , 4 = 200-100  $\mu\text{m}$ ) dans les quatre horizons (N = Noir, V = Violacé, E = Eluvié, A = Argillique).

La variance sur l'axe 1 est de 3.4409 ; cet axe extrait 68.8 % de l'inertie du nuage de points. Sur l'axe 2, la variance est de 1.1128 ; l'inertie résiduelle qu'il extrait est de 22.3 %. L'essentiel de l'information contenue dans les résultats analytiques est donc consignée dans le plan 1,2 de l'ACP.

Le premier axe est formé de la contribution des variables FEPS (COR = 0.9552), RESI (COR = 0.7161), FECR (COR = 0.7090) et CORG (COR = 0.6463). L'axe 2 est formé en premier lieu de la contribution de la variable FEAM (COR = 0.5085) ; cette dernière variable contribue aussi à l'axe 1 (COR = 0.4144).

#### 1. Relation entre les constituants des agrégats et leur résistance à la sonification

Les corrélations linéaires entre les diverses variables (Tab. V) montre que le fer amorphe organique (FEPS) est corrélé positivement au fer amorphe minéral (FEAM) et négativement au fer libre cristallisé (FECR). Le carbone organique (CORG) est très significativement corrélé au fer amorphe organique (positivement) et au fer libre cristallisé (négativement).

La résistance des agrégats n'est corrélée qu'au fer amorphe ; cette corrélation est hautement significative avec la forme organique du fer amorphe.

Tableau V : Corrélations linéaires.

*Linear correlations.*

	FEPS	FEAM	FECR	CORG	RESI
la corrélation est significative au risque de:	FEPS 1.000				
0.05 si $R < 0.4973$	FEAM 0.646	1.000			
0.01 si $R < 0.6226$	FECR -0.767	-0.306	1.000		
0.001 si $R < 0.7419$	CORG 0.791	0.114	-0.839	1.000	
	RESI 0.813	0.698	-0.514	0.464	1.000



2. Relation entre les constituants des agrégats et leur taille

Les relations entre individus et variables se dégagent nettement de la lecture du plan 1,2 de l'ACP (Fig. 3) qui contient 91 % de l'information. Les classes d'agrégats se différencient globalement sur l'axe 1 vertical selon l'horizon, et, pour un même horizon, sur les deux axes selon leur taille.

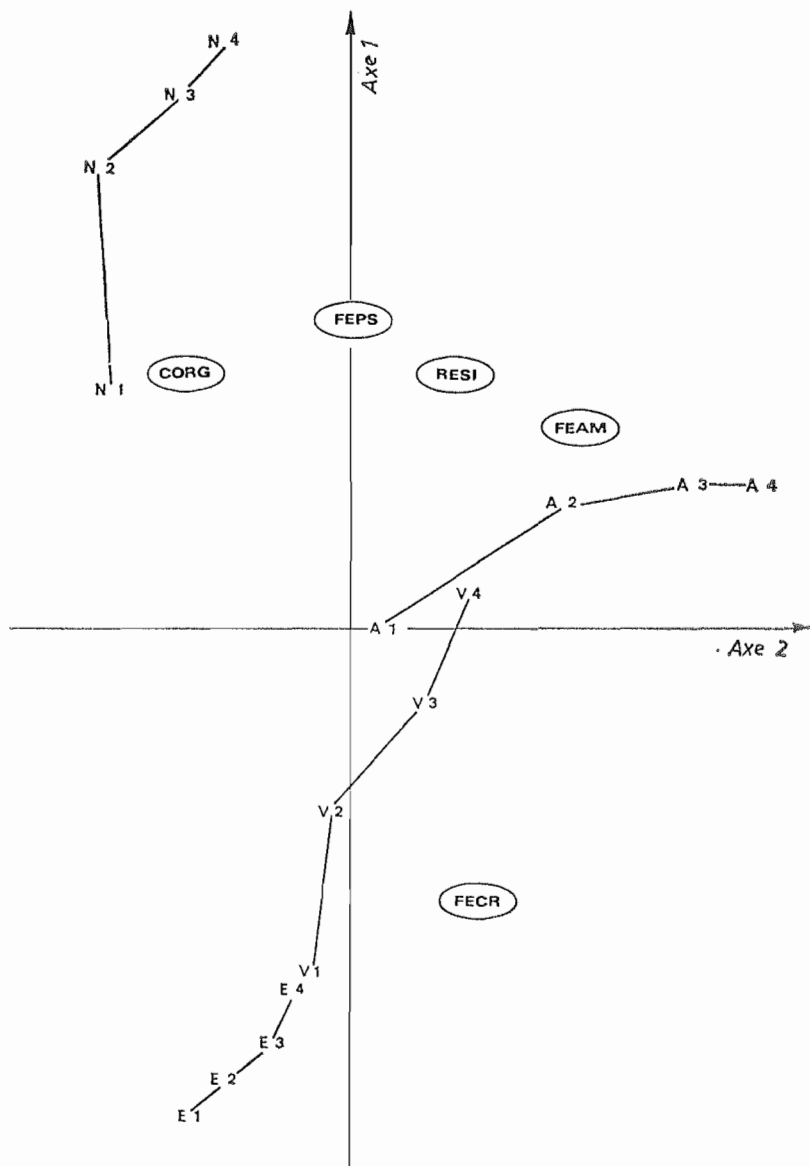


Figure 3 : Plan 1,2 de l'ACP. Axe vertical (1), axe horizontal (2).

PCA plan 1,2. Vertical axis (1), horizontal axis (2).

En ce qui concerne les horizons, il y a une très nette distinction entre l'horizon Noir, le plus riche en fer amorphe organique et en carbone organique, et l'horizon Eluvié, le plus pauvre en ces produits et le plus riche en fer libre cristallisé. En position intermédiaire, se trouvent les horizons Violacé et Argilique. Ce dernier contient plus de fer amorphe minéral et moins de fer libre que l'horizon Violacé.

En ce qui concerne les agrégats, la disposition des individus par rapport aux variables montre que les agrégats les plus riches en fer amorphe organique et les plus résistants sont aussi les plus petits : ceci est particulièrement net pour les horizons Noir et Violacé où les différentes classes se répartissent surtout selon l'axe 1. En revanche, les classes de l'horizon Argilique se différencient plus selon l'axe 2, c'est-à-dire en fonction du fer amorphe minéral. Pour l'horizon Eluvié, les classes se différencient selon les deux axes, mais faiblement.

### III. DISCUSSION

Il ressort de l'analyse de données que les variables « formes de fer libre » sont pertinentes dans leur ensemble puisqu'elles permettent de distinguer aussi bien les classes d'agrégats que les horizons.

Au niveau des constituants, le fer amorphe est davantage sous forme minérale que liée aux substances humiques, même dans les situations où ces dernières sont très abondantes.

En ce qui concerne les agrégats et indépendamment de l'horizon, les agrégats fins sont plus riches en fer amorphe que les agrégats grossiers. La résistance des agrégats à la sonification est d'autant plus élevée qu'ils sont petits. Ceci pourrait s'expliquer par des phénomènes de gonflement et/ou d'éclatement (HENIN, 1976), auxquels les agrégats grossiers, plus poreux, seraient plus sensibles ; ces phénomènes sont en effet susceptibles d'intervenir lors de l'immersion des échantillons dans l'eau pour la sonification. Cependant, le fait que la stabilité des agrégats de l'horizon Eluvié soit systématiquement inférieure à celle des autres horizons quelle que soit la classe, indique que les facteurs de constitution restent déterminants et que les différences de résistance sont liées en grande partie à des différences de cohésion. Les corrélations linéaires (Tab. V) et l'ACP (Fig. 3) montrent bien les fortes corrélations entre stabilité et fer amorphe, ce qui explique que les agrégats les plus fins qui sont aussi les plus riches en fer amorphe soient les plus stables. Cette conclusion rejoint les résultats obtenus sur le rôle des polycations métalliques par GIOVANNINI et SEQUI (1976b). De plus, c'est la fraction du fer amorphe liée à la matière organique qui est le plus corrélée à la résistance des agrégats, ce qui confirme les résultats de HAMBLIN (1977) sur le rôle des composés organo-minéraux.

Pour chaque horizon, on peut déterminer le taux d'agrégats (poids de la fraction agrégée  $> 100 \mu\text{m}$  en % de la terre fine). Ce dernier peut être considéré comme un des aspects du développement de la structure (concept utilisé dans les descriptions de terrain, qui est particulièrement fort dans les sols fersiallitiques).

Le taux d'agrégats (TAGR) et la résistance à la sonification (RESI) mesurée sur l'ensemble de la terre fine des horizons ont été comparés au taux d'argile (ARGI), de fer amorphe total (FEAT), de fer libre cristallisé (FECR), et de carbone organique (CORG) (Tab. VI).

Les résultats doivent être interprétés avec prudence car il n'y a que quatre individus. Cela étant, la matrice des corrélations linéaires (Tab. VII) ne montre pas de corrélation significative du taux d'agrégats avec la teneur en argile, pas plus qu'avec le fer amorphe ce qui paraît contradictoire avec les résultats obtenus sur les classes d'agrégats. Ceci peut s'expliquer par le fait que le fer amorphe dosé sur l'horizon comprend une fraction qui est incluse dans les

Tableau VI : Taux d'agrégats, teneur en argile, en fer amorphe et en carbone organique, et résistance des agrégats, sur l'ensemble de la terre fine.

*Aggregate ratio, clay, amorphous iron and organic carbon content, and aggregate resistance (< 2 mm fraction).*

	TAGR	FEAT	FECR	ARGI	CORG	RESI
	%	%	%	%	%	mn
Noir	48.8	0.37	1.12	09.2	5.52	90
Violacé	42.0	0.22	1.45	12.6	2.03	40
Eluvié	33.7	0.16	1.50	08.4	0.99	20
Argilique	59.7	0.38	1.33	43.1	0.70	45

Tableau VII : Corrélations linéaires.

*Linear correlations.*

	TAGR	FEAT	FECR	ARGI	CORG	RESI
TAGR	1.000					
FEAT	0.923	1.000				
FECR	-0.567	-0.839	1.000			
ARGI	0.837	0.584	-0.054	1.000		
CORG	0.059	0.416	-0.829	-0.493	1.000	
RESI	0.464	0.752	-0.974	-0.091	0.911	1.000

la corrélation est significative au risque de:  
 0.05 si R<0.9500  
 0.01 si R<0.9900  
 0.001 si R<0.9999

Tableau VIII : Formes du fer et carbone organique dans la fraction agrégée (> 100 µm) : résultat de la pondération des teneurs de chaque classe d'agrégats (Tab. IV) par son abondance relative (Tab. III).

*Iron oxides and organic carbon content in the aggregated fraction (> 100 µm) : weighted means of the data of each aggregate class.*

Horizons	FEAT %	FEPS %	FEAM %	FECR %	CORG %
Noir	1.14	0.17	0.96	0.12	4.28
Violacé	0.81	0.07	0.73	0.65	0.54
Eluvié	0.39	0.04	0.34	0.81	0.38
Argilique	1.59	0.13	1.47	0.58	0.58

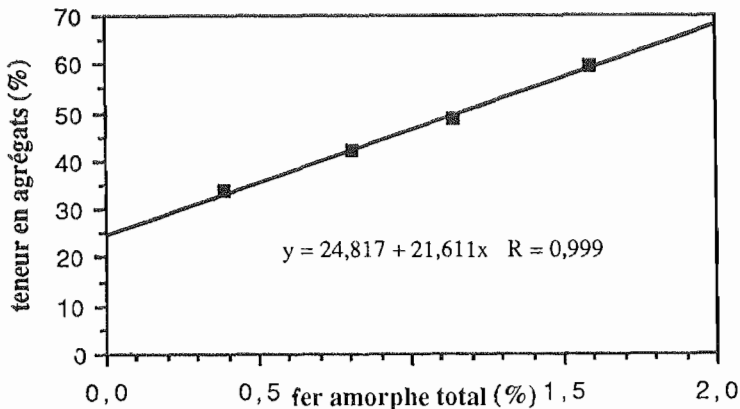


Figure 4 : Relation entre la teneur en agrégats et le fer amorphe de la fraction agrégée.  
*Relationship between aggregate ratio and amorphous iron content in the aggregated fraction.*

fissures du squelette et ne participe donc pas aux phénomènes d'agrégation. En effet, si on compare le taux d'agrégats d'un horizon non plus à sa composition totale mais à la constitution de sa fraction agrégée ( $> 100 \mu\text{m}$ ) (Tab. VIII), il apparaît que le taux d'agrégats est une fonction linéaire du fer amorphe total (Fig. 4).

Ainsi, l'analyse globale des horizons ne permet pas de mettre en évidence les relations étroites qui y existent pourtant entre le fer amorphe et l'état d'agrégation.

## CONCLUSION

L'analyse de l'état d'agrégation a été abordé par l'étude simultanée de la taille, des constituants et de la cohésion des agrégats. Ainsi, malgré l'utilisation de méthodes analytiques simples — mais qui ont l'intérêt de pouvoir être mises en œuvre en toutes circonstances —, on a pu préciser le rôle du fer dans la structure de sols fersiallitiques.

Le développement de la structure (taux d'agrégats) est étroitement lié au fer amorphe. Cette relation n'est pas évidente si on se contente d'un dosage du fer sur la terre fine : elle n'apparaît clairement que si on effectue une séparation préalable des agrégats.

La distribution dimensionnelle des agrégats, autre caractéristique importante de l'état structural, est elle aussi fortement corrélée au fer amorphe : les agrégats les plus petits sont, en effet, les plus riches en fer amorphe.

La cohésion des agrégats, appréciée par leur résistance à la sonification, est étroitement liée au fer amorphe, plus qu'à la matière organique. Cependant, c'est la fraction du fer amorphe extractible au pyrophosphate de sodium qui est généralement la plus fortement corrélée, bien que, même dans les horizons riches en matière organique, elle constitue une très faible proportion du fer amorphe total.

En définitive, la séparation granulométrique des agrégats apparaît comme un préalable très utile aux études ultérieures plus poussées qu'il conviendrait de mener sur la nature du fer, de la matière organique et de leurs conséquences sur l'état d'agrégation. Le protocole utilisé ici devra cependant être amélioré, notamment par la séparation de classes plus fines ( $< 100 \mu\text{m}$ ), au moins quand elles préexistent dans le sol, et aussi par une caractérisation texturale et éventuellement minéralogique de chaque classe.

Les auteurs remercient M. BACCOURI pour sa contribution technique à la réalisation de ce travail et P. STENGEL pour ses critiques constructives et ses utiles suggestions.

Reçu pour publication : Décembre 1988

Accepté pour publication : Juin 1989

## BIBLIOGRAPHIE

- BACCOURI M.**, 1984. — Le fer et la matière organique dans la couverture pédologique du massif de Thenia. Incidence sur la microagrégation. Mém. Ing. INA, Alger, 114 p.
- BLACKMORE A.V.**, 1973. — Aggregation of clay by the products of iron (III) hydrolysis. Aust. J. Soil. Res., **11**, 75-82.
- BONFILS** et **DUPUIS M.**, 1969. — Etude de la dispersion des colloïdes du sol à l'aide de vibrations ultra sonores. Bull. AFES, n° **1**, 13-22.

- BRAUDEAU E.**, 1982. — Fractionnement physique du sol. Méthode de séparation et étude du comportement d'agrégats de 0.050 à 2 mm. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., **XIX**, n° 4, 353-367.
- BRESSON L.M.**, 1981. — Ion micromilling applied to the ultramicroscopic study of soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., **45**, 568-573.
- BRUAND A.**, 1985. — Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse 3<sup>e</sup> Cycle, Univ. Paris VII, 226 p.
- CAMBIER P.** et **PROST R.**, 1981. — Etude des associations argile oxyde : organisation des constituants d'un matériau ferrallitique. Agronomie, **1** (9), 713-722.
- CAMBIER P.** et **PICOT C.**, 1988. — Nature des liaisons kaolinite-oxyde de fer au sein des microagrégats d'un sol. Sci. Sol, **26**, 223-238.
- CHABOUIS C.**, 1982. — Fractionnement granulométrique de la matière organique par dispersion aux ultrasons. INA-PG, multigr., 10 p.
- CHAUVEL A.**, 1977. — Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Trav. et Doc. ORSTOM, n° 62, Paris, 532 p.
- CHAUVEL A.**, **PEDRO G.** et **TESSIER D.**, 1976. — Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaolinitiques. Sci. Sol, **2**, 101-115.
- COUGHLAN K.J.**, **FOX W.E.** et **HUGHES J.D.**, 1973. — A study of the mechanisms of aggregation in a krasnozem soil. Aust. J. Soil Res., **11**, 65-73.
- EDWARDS A.P.** et **BREMNER J.M.**, 1967a. — Dispersion of soil particles by sonic vibrations. J. Soil Sci. **18**, 47-67.
- EDWARDS A.P.** et **BREMNER J.M.**, 1967b. — Microaggregates in soil. J. Soil Sci., **18**, 64-73.
- EL SWAIFY S.A.** et **EMERSON W.W.**, 1975. — Changes in physical properties of soil clay due to precipitated aluminium and iron hydroxides : I. Swelling and aggregate stability after drying. Soil Sci. Amer. Proc., **39**, 1056-1063.
- GENRICH D.A.** et **BREMNER G.M.**, 1972a. — A reevaluation of the ultrasonic vibration method of dispersing of soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **36**, 944-947.
- GENRICH D.A.** et **BREMNER G.M.**, 1972b. — Effect of probe condition on ultrasonic dispersion of soils by probe type ultrasonic vibrators. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **36**, 975-976.
- GENRICH D.A.** et **BREMNER G.M.**, 1974. — Isolation of soil particle size fractions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **38**, 222-225.
- GIOVANNINI G.** et **SEQUI P.**, 1976a. — Iron and aluminium as cementing substances of soil aggregates. I. Acetylacetone in benzene as an extractant of fractions of soil iron and aluminium. J. Soil Sci., **27**, 140-147.
- GIOVANNINI G.** et **SEQUI P.**, 1976b. — Iron and aluminium as cementing substances of soil aggregates. II. Changes instability of soil aggregates following extraction of iron and aluminium by acetylacetone in a non polar solvent. J. Soil Sci., **27**, 148-153.
- HAMBLIN A.P.**, 1977. — Structural feature of aggregates in some East Anglian silt soils. J. Soil Sci., **28**, 23-28.
- HAMBLIN A.P.** et **DAVIES D.B.**, 1976. — Influence of organic matter on the physical properties in some East Anglian soils of high silt content. J. Soil Sci. **27**, 12-22.
- HENIN S.**, 1976. — Cours de physique du sol. Tome I, ORSTOM, Paris, 159 p.
- HINDS A.A.** et **LOWE L.E.**, 1980 a. — Dispersion and dissolution effects during ultrasonic dispersion of gleysolic soils in water and in electrolyte. Can J. Soil Sci., **60**, 239-335.
- HINDS A.A.** et **LOWE L.E.**, 1980b. — The use of ultrasonic probe in soil dispersion and in the bulk isolation of organo mineral complexes. Can. J. Soil. Sci, **60**, 389-392.
- JEANROY E.**, 1983. — Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées. Evaluation par des réactifs chimiques d'extraction et apport de la spectrométrie Mössbauer. Thèse Univ. Nancy I, 169 p.
- LAHMAR R.**, 1983. — Une couverture pédologique en Grande Kabylie. Genèse et fonctionnement de deux séquences du massif de Thenia. Thèse Mag. INA, Alger, 149 p.

- LAHMAR R.**, 1988. — Les sols rouges lessivés sur micaschistes à chlorites ferrifères (Grande Kabylie, Algérie). Organisation de la couverture pédologique d'un bassin versant. Altération, Pédogenèse, Morphogenèse. Thèse Univ. Paris VI, Mém. Sc. Terre Univ. Curie, 88-15, Paris, 292 p.
- LAHMAR R.** et **BRESSON L.M.**, 1987. — Genèse et fonctionnement des sols fersiallitiques sur micaschiste du massif de Thenia, Algérie. Actes de la 7<sup>e</sup> Réunion Internationale de micromorphologie des sols, FEDOROFF, BRESSON et COURTY eds, AFES, Plaisir, 171-177.
- Mc KEAGUE J.A.** 1977. — Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols. Soc. Can. Sci. Sol., Ottawa, Canada.
- MEHRA O.P.** et **JACKSON M.L.**, 1960. — Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays Clay Miner., **7**, 3171327.
- NORTH P.F.**, 1976. — Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. J. Soil Sci., **27**, 451-459.
- ROBERT M., BENEAU G., HERVIO M.**, 1983. — Influence des polycations du fer et de l'aluminium sur les propriétés des argiles. Sci. du sol., **3-4**, 235-251.
- ROBERT M., VENU G., ABREU M.M.**, 1987. — Etudes microscopiques d'associations aluminium-argile ou fer-argile Actes de la 7<sup>e</sup> Réunion Internationale de micromorphologie des Sols, FEDOROFF, BRESSON et COURTY eds., AFES, Plaisir, 467-480.
- SCHWERTMANN U.**, 1964. — Differenzierung der Eisnoxide des Bonchens durch Extraktion mit ammonium-oxalate Lösung. Zeitschr. Pflanz. Düng. bodenk., 467-480.
- TAMM O.**, 1922. — Eine Methode zur Bestimmung der anorganischen Komponenten der Gelkcomplexes in Boden. Meddel. Stat. Skogs., **19**, 387.
- WATSON J.R.** et **PARSONS J.W.**, 1974. — Studies of soil organo-mineral fractions. I. Isolation by ultrasonic dispersion. J. Soil Sci., **25**, 1 15.
- WILKES B.M.** et **SCHWERTMANN U.**, 1978. — Micromorphology of synthetic soil aggregates. Proc. of the Vth International Working Meeting of Soil Micromorphology., DELGADO ed., Granada, 1387-1403.