

## MISE AU POINT D'UNE METHODE DE FRACTIONNEMENT EN AGREGATS\*

Hervé COLLEUILLE \*\*

Le principe du fractionnement repose sur la notion de friabilité du sol et la bimodalité du spectre poral des sols. S'inspirant de quelques méthodes de fractionnement basées sur l'intervention d'un solvant organique, nous avons recherché les conditions opératoires les plus appropriées, notamment la teneur en eau initiale des échantillons, pour que le fractionnement soit plus une individualisation et une séparation d'agrégats préexistants qu'une fragmentation arbitraire qui ne tiendrait compte ni de l'assemblage des constituants, ni de l'état hydrique de l'échantillon.

Nous avons montré, dans le chapitre I, la nécessité de mieux définir, identifier et séparer les agrégats du sol. En s'appuyant sur les acquis des formules préexistantes, il s'agit de proposer une nouvelle méthode pour fractionner les échantillons de sols en éléments structuraux naturels, constitutifs d'un niveau d'organisation donné.

Dans ce chapitre, nous présenterons les objectifs et les principes du fractionnement en agrégats, et nous définirons précisément les différentes étapes du protocole de fractionnement. Nous proposerons, ensuite, une méthode d'analyse des agrégats issus du fractionnement, basée sur l'analyse des distributions dimensionnelles des agrégats et la séparation des sables libres.

### 1 OBJECTIFS DU FRACTIONNEMENT EN AGREGATS

L'étude morphologique du sol à différentes échelles d'observation, a montré depuis longtemps l'aspect organisé du sol en plusieurs niveaux hiérarchisés (OADES et WATERS, 1991), chaque niveau correspondant à un assemblage relativement homogène d'éléments structuraux, auxquels on donne le nom générique d'agrégats. La caractérisation morphologique de la structure du sol devrait passer par une détermination préalable de ses niveaux d'organisation, à l'image de l'approche des micromorphologues (BULLOCK et al., 1985).

---

\* Extrait de thèse soutenue le 10/12/1993 sous le titre "Approche physiques et morphologiques de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales" (Chapitre IV, pp. 91-127).

\*\* ORSTOM, BONDY, FRANCE.

Sur le terrain, s'il est assez facile de reconnaître un horizon de sol, de lui associer un ou plusieurs types d'assemblage et d'en prélever un fragment (motte) représentatif, il est beaucoup plus difficile de différencier les niveaux d'organisations d'ordre inférieur autrement que par une analyse micromorphologique sur lame mince ; or celle-ci ne donne pas la possibilité de séparer et de manipuler les éléments structuraux constitutifs. C'est dire que si l'on reconnaît bien dans une motte de sol un ou plusieurs sous-niveaux de structure, aucune méthode n'existe actuellement qui permette de résoudre cette motte en ses agrégats élémentaires<sup>1</sup> ou secondaires<sup>2</sup>, c'est-à-dire constitutifs d'un niveau d'organisation donné.

Pourtant, comme nous l'avons vu précédemment, de nombreuses méthodes de fractionnement d'un échantillon de sol ont été proposées, mais les objectifs étaient tout autre :

- d'obtenir les différentes fractions de la matière organique (e.g. FELLER, 1979 ; ANDREUX et al., 1980 ; TURCHENEK et OADES, 1979) ;
- d'évaluer la stabilité structurale (e.g. TIULIN, 1928 ; BAVER et ROADES, 1932 ; YODER, 1936 ; HENIN, 1938) ou d'obtenir un indice de structure (e.g. BOYD et al., 1983 ; UTOMO et DEXTER, 1981).

La plupart de ces méthodes de fractionnement sont basées sur le principe selon lequel un niveau d'organisation correspond à une force de cohésion déterminée, qui peut être rompue par un traitement chimique ou énergétique.

Seules quelques études se sont attachées au fractionnement pour identifier et séparer les éléments structuraux naturels du sol (TRI, 1968 ; HENIN et SANTAMARIA, 1975 ; BRAUDEAU, 1982 ; KANE et MOTT, 1983). Ces auteurs ont montré que par l'intervention d'un solvant organique, comme l'alcool éthylique ou méthylique, il était possible d'obtenir des unités structurales non dénaturées.

Cependant les agrégats obtenus ne correspondent pas à un niveau d'organisation structurale précis, en raison d'un manque de normalisation des protocoles de fractionnement proposés, de la sous-estimation de l'importance de l'état hydrique initial des échantillons de sol sur le produit du fractionnement.

S'inspirant de la méthode de fractionnement proposée par BRAUDEAU en 1982, l'objectif de ce travail sera de rechercher les conditions opératoires les plus appropriées, et notamment l'état d'humidité des échantillons, pour que le fractionnement soit plus une individualisation et une séparation d'agrégats préexistants qu'une fragmentation arbitraire qui ne tiendrait compte ni de l'assemblage, ni de l'état hydrique de l'échantillon.

<sup>1</sup> Les agrégats élémentaires sont les agrégats visibles en micromorphologie, de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  à quelques millimètres, formés de l'assemblage des particules primaire fines du sol, indépendamment des particules grossières du squelette, et séparés les uns des autres par des traits pédologiques particuliers (cutanes...).

<sup>2</sup> Les agrégats secondaires correspondent à des assemblages d'agrégats élémentaires incorporant des sables et limons grossiers.

## 2 MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Les échantillons de sol

Les sols retenus pour la mise au point du protocole expérimental et son application, proviennent des deux séquences pédologiques que nous avons présentées dans le chapitre II :

- une séquence de sols ferrallitiques-ferrugineux de Basse-Casamance ;
- une séquence de sols alluviaux à caractère verticale, de la vallée du fleuve Sénégal.

Les principales caractéristiques physico-chimiques des échantillons retenus pour élaborer la méthode de fractionnement sont présentées dans l'annexe IV.1.

Le volume de sol considéré dans cette étude est de l'ordre de 60 à 100 cm<sup>3</sup>. Il peut s'agir soit d'une motte de sol prélevée telle quelle au sein de l'horizon de sol, soit d'un prélèvement cylindrique découpé par un carottier, à bords tranchants, sans perturbation de la structure. Ce volume de sol est jugé représentatif de l'horizon. Les échantillons ont été prélevés au champ et placés dans des sachets hermétiques afin de conserver l'organisation de la phase solide (e.g. VAN OORT, 1984).

### 2.2 Le principe du fractionnement en agrégats

Le principe du fractionnement est basé sur deux propriétés générale des sols :

- la friabilité du sol, c'est-à-dire la propriété du sol, à se déliter en agrégats millimétriques cohérents, dans des gammes d'humidité du sol particulières (UTOMO et DEXTER, 1981) ;
- la bimodalité du spectre poral des sols, correspondant à l'existence d'une séparation entre un système microporal où les eaux et solutés sont retenus par capillarité (porosité texturale ou intra-agrégats (élémentaires)), et un système macroporal, où l'écoulement des eaux et solutés est plus rapide (porosité structurale ou porosité inter-agrégats) (NIKIFOROFF, 1941 ; FIES et STENGEL, 1984).

La démarche retenue se base sur l'utilisation d'un liquide organique qui permet d'affaiblir les forces de liaisons inter-agrégatives, sans dénaturer la cohésion interne des agrégats. Le méthanol semble le plus approprié pour répondre aux objectifs fixés parce qu'il possède les propriétés suivantes :

- une miscibilité totale avec l'eau sans formation d'azéotrope, contrairement à l'éthanol

(BRAUDEAU, 1982) : ainsi le méthanol assure la disparition complète de l'eau par évaporation ;

- une viscosité du liquide peu élevée : la diffusion à travers les milieux poreux est supérieure à celle de l'eau, de l'éthanol et de leurs mélanges (MALICK et al., 1979) ;

- une taille moléculaire proche de l'eau permettant son incorporation au sein de la structure même des argiles (CHEN et al., 1987 ; CHARTRES et al., 1989). BRINDLEY et al., 1969 montrent que l'acétone peut provoquer une expansion des espaces interparticulaires et interfoliaires dans le cas de smectites, contrairement au dioxane et au méthanol ;

- une chaleur de vaporisation également peu élevée : la tension superficielle développée au sein de l'échantillon lors de l'évaporation du méthanol est pratiquement négligeable par rapport celle de l'eau et restreint par conséquent les forces capillaires provoquant le retrait (MALICK et al., 1979) ;

- une constante diélectrique beaucoup plus faible que celle de l'eau : le méthanol provoque un faible retrait/gonflement par rapport à l'eau, mais légèrement plus élevé par rapport à l'acétone ou au dioxane (MURRAY et QUIRK, 1980) ;

- une faible réactivité chimique (GREENE-KELLY, 1974).

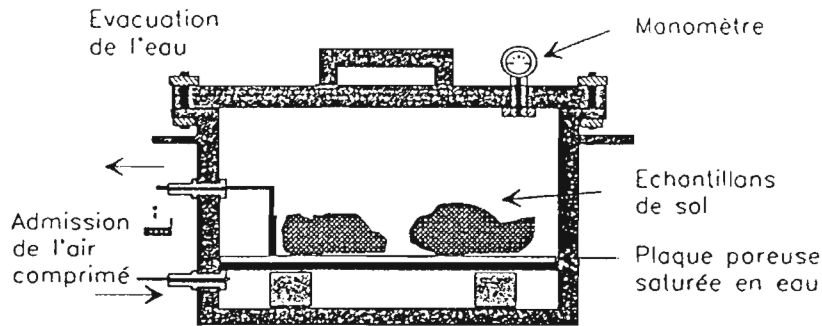
Enfin, il est à noter que le méthanol possède un prix relativement modique par rapport au dioxane (CHARTRES et al., 1989), et une toxicité moindre : le dioxane est cancérigène et explosif (MORAN et al., 1989). Cependant, le méthanol est aussi un produit inflammable, il émet des vapeurs toxiques qui peuvent entraîner une baisse de l'acuité visuelle aboutissant à la cécité (PICOT et GRENOUILLET, 1989). Il est donc impératif de réaliser le fractionnement sous une hotte aspirante.

## 2.3 Mode opératoire

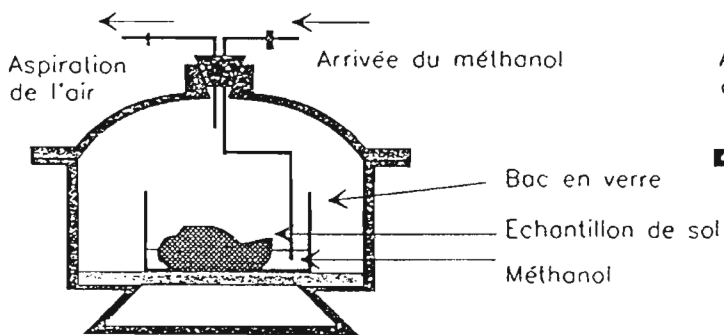
Le protocole proposé s'effectue en trois étapes principales :

### 2.3.1 Mise en équilibre de l'échantillon de sol à l'état hydrique désiré

Placés sur une plaque poreuse, les échantillons de sol sont réhumectés lentement par capillarité jusqu'à saturation. Cette opération s'effectue à la pression atmosphérique, ce qui semble permettre la réhumectation complète des échantillons (en moins de 24 H) sans affecter la structure (DICKSON et al., 1991). Les échantillons sont ensuite placés sur la plaque poreuse de l'appareil de RICHARDS (1941) et soumis à la pression correspondant à l'état hydrique désiré (fig. IV.1a).

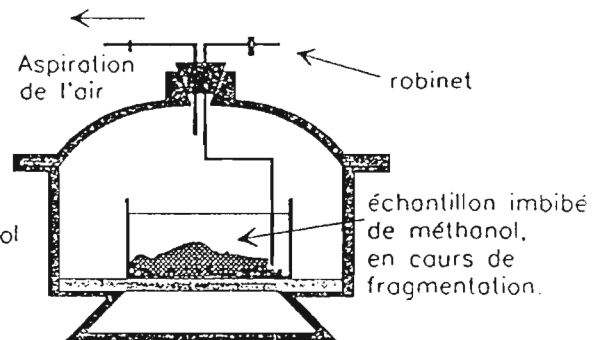


**a** Mise en équilibre de l'échantillon de sol à l'état hydrique désiré

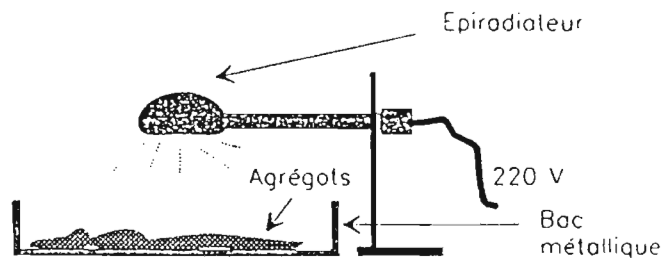


Enceinte en verre type dessiccateur

**b** Imbibition lente de l'échantillon par le méthanol



**c** Immersion complète de l'échantillon dans le méthanol



**d** Séchage des agrégats sous lampe infra-rouge

**Figure IV.I :**  
Dispositif expérimental permettant le fractionnement d'un échantillon de sol non remanié en agrégats.

### 2.3.2 Imbibition lente de l'échantillon par du méthanol

La méthode mise au point consiste à humecter puis à imbiber lentement l'échantillon de sol par du méthanol.

La pénétration du méthanol dans l'échantillon s'effectue, en premier lieu, par humectation lente à la base de l'échantillon (fig. IV.1b). Les mécanismes de désagrégation par éclatement des agrégats, pouvant être provoqués par la compression de l'air piégé dans la motte de sol lors de l'humectation, sont réduits par la mise en contact du méthanol dans une enceinte en verre sous vide contrôlé (YODER, 1936 ; HENIN, 1938 ; EMERSON, 1954). Le niveau du méthanol est ensuite augmenté lentement jusqu'à l'immersion complète de l'échantillon, évitant toute turbulence qui pourrait éroder l'échantillon et disperser les particules fines (e.g. CONCARET, 1967 ; STENGEL, 1979 ; BOIFFIN, 1984) (fig. IV.1c).

Cette étape correspond au fractionnement de l'échantillon : lors de l'imbibition de l'échantillon par le méthanol on constate l'individualisation puis le détachement progressif des éléments structuraux (planche IV : photos 5 et 6), enfin l'écroulement complet de l'échantillon après immersion.

Le méthanol semble entraîner la suppression des forces de capillarité dans la macroporosité, puis, par échange d'eau avec la microporosité intra-agrégat, provoque le retrait des agrégats lorsque ceux-ci sont saturés en eau. Ce retrait semble fournir l'impulsion nécessaire à la séparation des agrégats entre eux.

### 2.3.3 Séchage et tamisage des agrégats

La dernière étape du protocole consiste à sécher les agrégats obtenus sous un système de lampes infra-rouge (épiradiateur à silice) (fig. IV.1d). L'atmosphère chaude et sèche créée par les lampes permet d'éviter la condensation atmosphérique consécutive au refroidissement, lors de l'évaporation du méthanol (BRAUDEAU, 1982). Les unités structurales restent ainsi individualisées lors du séchage qui dure une quinzaine de minutes, tout au plus, selon la teneur en eau initiale de l'échantillon.

Les éléments structuraux obtenus par fractionnement sont alors bien individualisés, cohérents et relativement résistants pour subir l'ensemble des manipulations nécessaires à l'étude des agrégats eux-mêmes, ou de leur constitution physico-chimique.

Ainsi, en vue de leur étude, les agrégats sont ensuite tamisés à sec sur une batterie de vingt-six tamis de 16 mm à 50  $\mu\text{m}$  et conservés dans des tubes plastiques hermétiques.

### 3 RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Présentation des résultats

Les résultats du fractionnement sont présentés par la distribution dimensionnelle des agrégats, soit sous forme d'histogramme de poids des agrégats par classe de taille (fig. IV.2a), soit sous forme de courbe de poids cumulée (fig. IV.2b) pour 100g de sol sec.

Les mailles des tamis utilisés sont rangées selon une suite géométrique (de raison  $10\sqrt[10]{10}$ ), l'axe des abscisses représente, en fait, la taille des agrégats en données logarithmiques.

Chaque fractionnement a fait l'objet de trois répétitions. La variabilité est donnée par l'écart-type du poids moyen des agrégats par classe de taille.

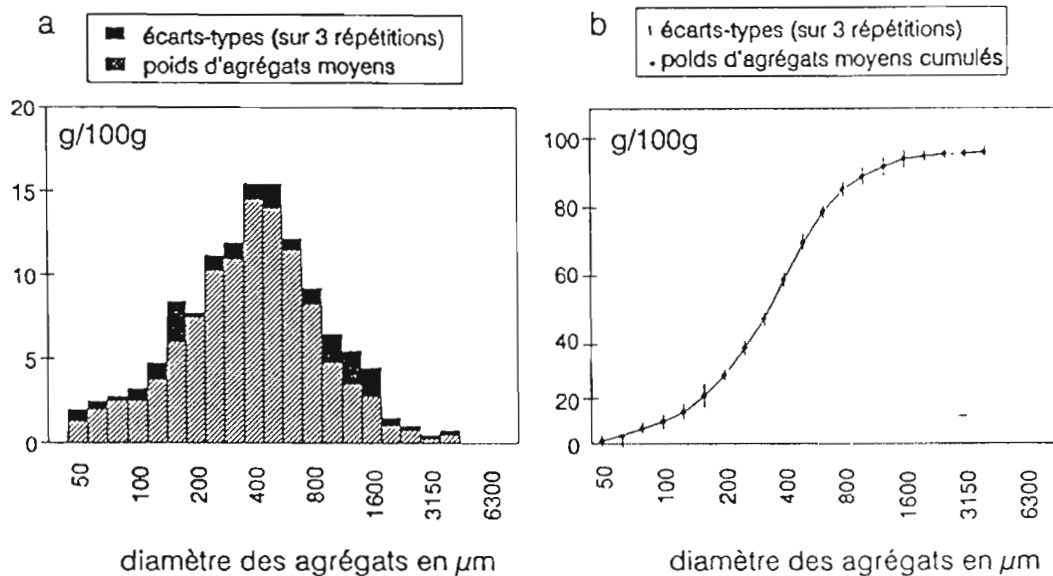


Figure IV.2 :

Mode de présentation des distributions dimensionnelles d'agrégats issus du fractionnement (3 répétitions) :

- histogramme des poids moyens d'agrégats pour 100g de sol sec (a) ;
- courbe des poids moyens cumulés d'agrégats pour 100g de sol sec (b).

#### 3.2 Etude des modalités de l'humectation et de tamisage

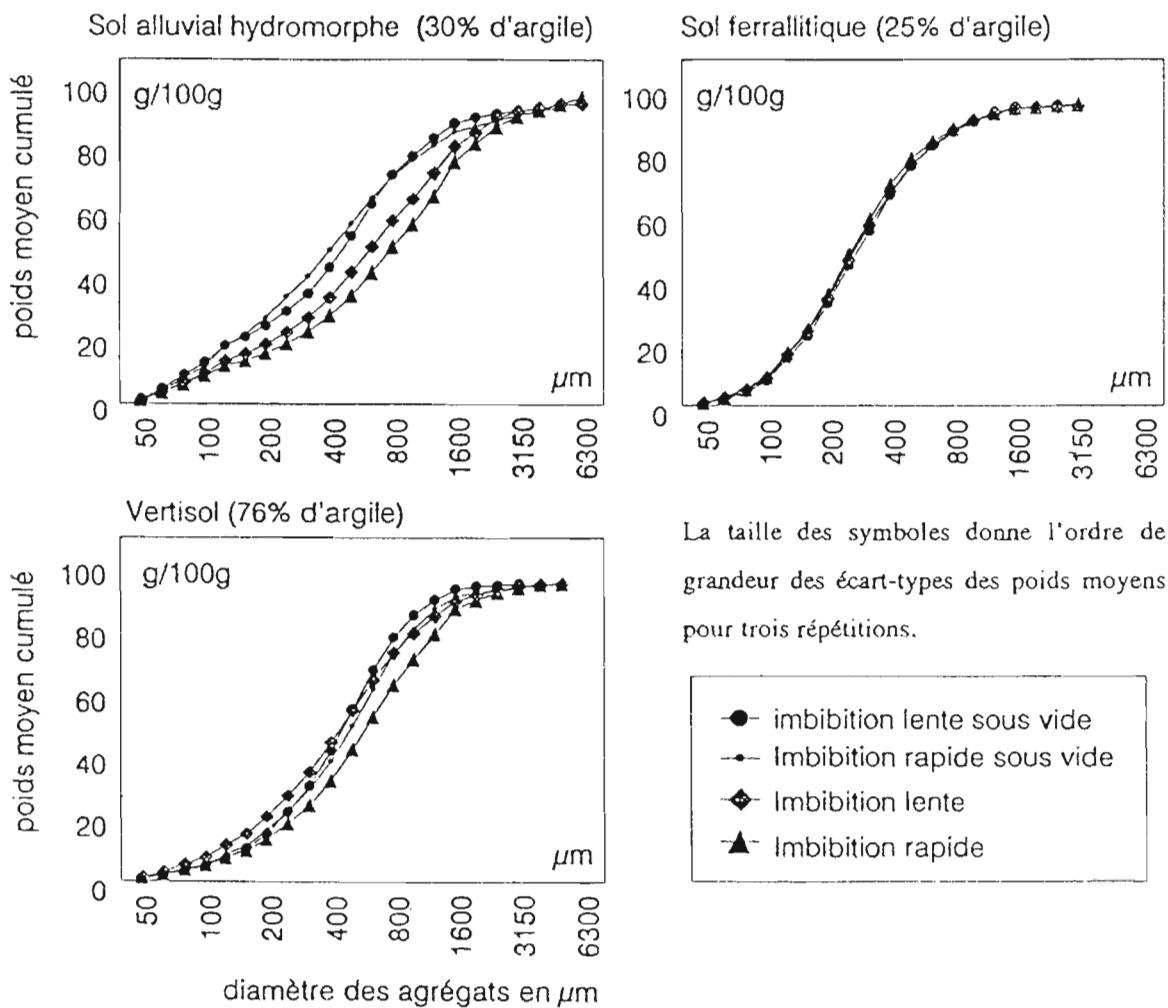
L'analyse des distributions dimensionnelles d'agrégats, complétée par une appréciation visuelle du fractionnement et du séchage des agrégats, nous permet d'apprécier l'influence du mode d'humectation des échantillons de sol sur le produit du fractionnement.

### 3.2.1 Etude des modalités de l'humectation

Quatre modalités ont été testées sur trois types de sols différents : alluvial hydromorphe, vertique et ferrallitique (fig. IV.3) :

- imbibition lente sous vide contrôlé ;
- imbibition rapide sous vide contrôlé ;
- imbibition lente à la pression atmosphérique ;
- imbibition rapide à la pression atmosphérique.

Les échantillons testés ont été mis dans un état hydrique donné ( $pF=3$ ), avant de subir une imbibition par capillarité, puis une submersion par du méthanol.



**Figure IV.3 :**

**Influence du mode d'humectation des échantillons de sols sur la distribution du poids moyen d'agrégats par classe de taille.**



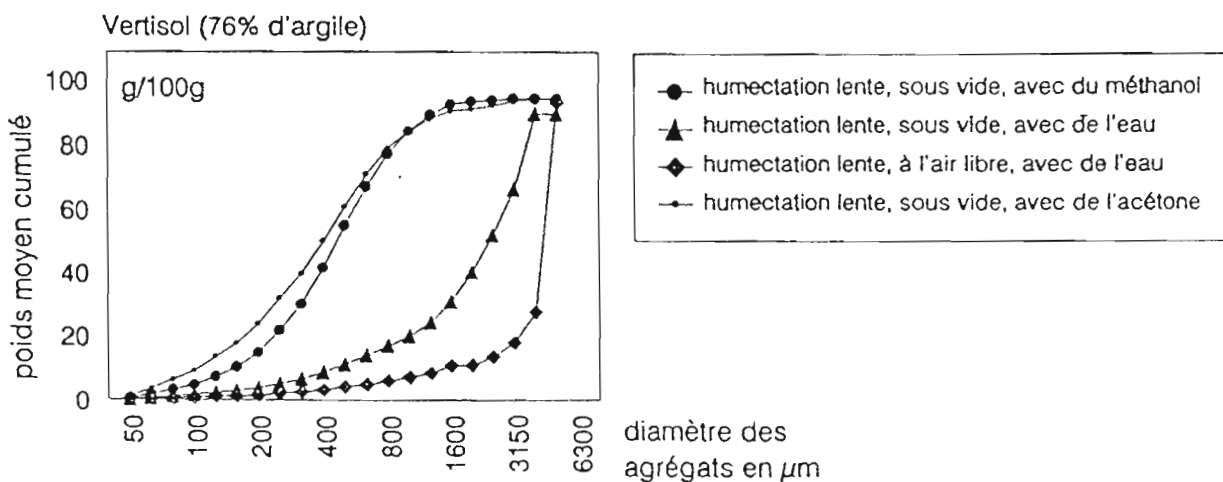
Sur la figure IV.3, on constate que les mécanismes de désagrégation par éclatement (provoqué par la compression de l'air piégé dans le matériau de sol, dispersion des argiles) sont plus importants pour les sols argilo-limoneux à faible stabilité structurale, plus faibles pour les sols vertiques non sodiques et négligeables pour les sols ferrallitiques.

Pour ces échantillons une imbibition trop brutale, ou à l'air libre, provoque la désagrégation des agrégats et la dispersion des colloïdes. Lors du séchage, la formation d'une croûte par coalescence des agrégats explique l'abondance des "agrégats" de grande taille. Ces mécanismes de désagrégation puis de réagrégation des agrégats s'expriment également par une plus grande variabilité des résultats sur 3 répétitions.

En résumé, on retiendra que pour l'ensemble des sols testés, c'est l'imbibition, sous vide et lente qui semble la plus appropriée.

### 3.2.2 Etude de l'influence du liquide d'humectation

A titre de comparaison, nous avons également effectué des fractionnements suivant le même protocole, mais en utilisant, cette fois-ci, de l'eau et de l'acétone comme liquide d'imbibition. La figure IV.4 montre les distributions dimensionnelles des agrégats obtenus avec un échantillon de vertisol non salé :



**Figure IV.4 :**

Influence du liquide d'imbibition sur la distribution du poids moyen d'agrégats par classe de taille (pour 3 répétitions).

L'imbibition puis la submersion par l'eau, même lente et sous vide, provoque toujours la dispersion des argiles et, lors du séchage, la formation d'une croûte par coalescence des agrégats. La variabilité des résultats pour trois répétitions est plus élevée que pour le méthanol et les agrégats obtenus correspondent essentiellement à des assemblages hétérogènes d'agrégats et de colloïdes argileux.

Les distributions dimensionnelles des agrégats issus d'un fractionnement à l'acétone et au méthanol diffèrent légèrement. BRINDLEY et al. (1969) montrent que l'acétone peut provoquer une expansion des espaces interfoliaires dans le cas de smectites, contrairement au méthanol. Cette propriété pourrait expliquer le pourcentage plus élevé des petits agrégats dans le cas de l'utilisation d'acétone, qui serait dû à la rupture des particules argileuses.

En résumé, le méthanol permet de fractionner l'échantillon de sol, puis lors de son évaporation, de l'assécher rapidement et complètement sans formation de croûte, contrairement à l'eau.

### 3.2.3 Etude de l'influence de la durée de tamisage

L'échange eau-méthanol s'accompagne toujours d'un petit retrait favorisant l'affermissement des agrégats (GREENE-KELLY, 1973 ; BRAUDEAU, 1982). Cet affermissement, loin d'être un handicap, permet la stabilisation de la structure des agrégats et ainsi toutes les manipulations nécessaires pour accéder à l'étude des agrégats.

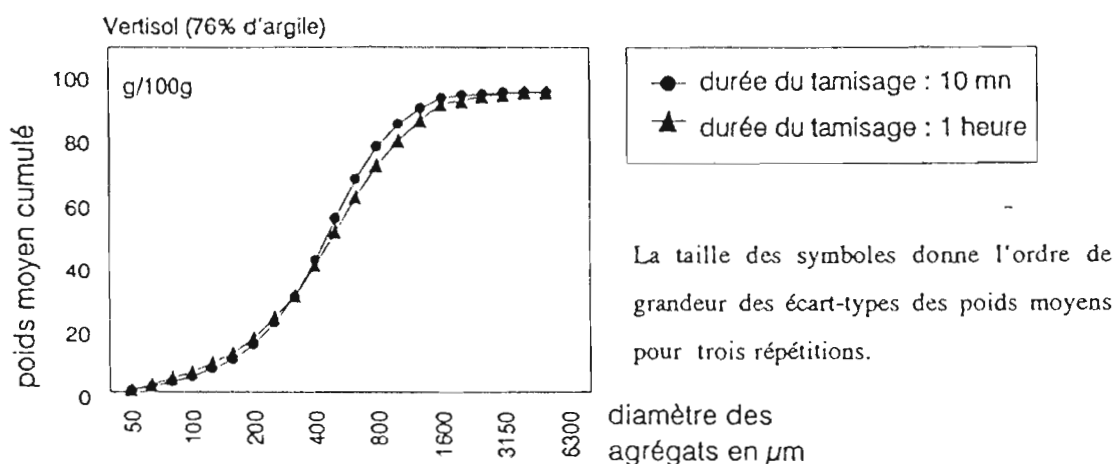


Figure IV.5 :

Influence de la durée du tamisage sur la distribution du poids moyen d'agrégats par classe de taille.

Le tamisage à sec ne provoque pas de désagrégation des agrégats traités au méthanol ; seul un émoussage négligeable peut être constaté, sous loupe binoculaire, sur certains agrégats.

Une durée de tamisage de 10 minutes environ, par série de tamis, est préconisée pour séparer les agrégats par classe de taille. La prolongation de la durée du tamisage jusqu'à 1 heure ne provoque qu'une désagrégation superficielle, quasi-négligeable en regard de la variabilité entre trois répétitions (fig. IV.5).

Le tamisage sous l'eau est le point faible des techniques traditionnelles de fractionnement par l'eau, car les agrégats humides sont plastiques et peu cohérents, et leur morphologie s'altère au cours de cette opération. Par contre le tamisage à sec ne semble pas provoquer de dégradation des agrégats traités au méthanol.

### 3.3 Choix de l'état hydrique initial des échantillons de sol

De nombreux auteurs ont montré l'influence de l'état hydrique initial des échantillons de sols dans les processus de désagrégation à l'eau (CERNUDA et al., 1954 ; PANABOKKE et QUIRK, 1957 ; COUSEN et FARRER, 1984 ; LE BISSONNAIS, 1988 ; MBAGWU et BAZZOVI, 1988 ; KAY et DEXTER, 1990). Par contre, la prise en compte de l'état hydrique des échantillons de sol a été, la plupart du temps, négligée par les auteurs s'intéressant au fractionnement en agrégats.

#### 3.3.1 Etude expérimentale

Des essais de fractionnement à différents états hydriques ont été pratiqués afin de déterminer l'état hydrique optimum pour fractionner les échantillons de sols en agrégats :  $pF=1$ ,  $pF=2$ ,  $pF=3$ ,  $pF=4,2$ , échantillon sec à l'air et séché à  $105^{\circ}\text{C}$  dans une étuve.

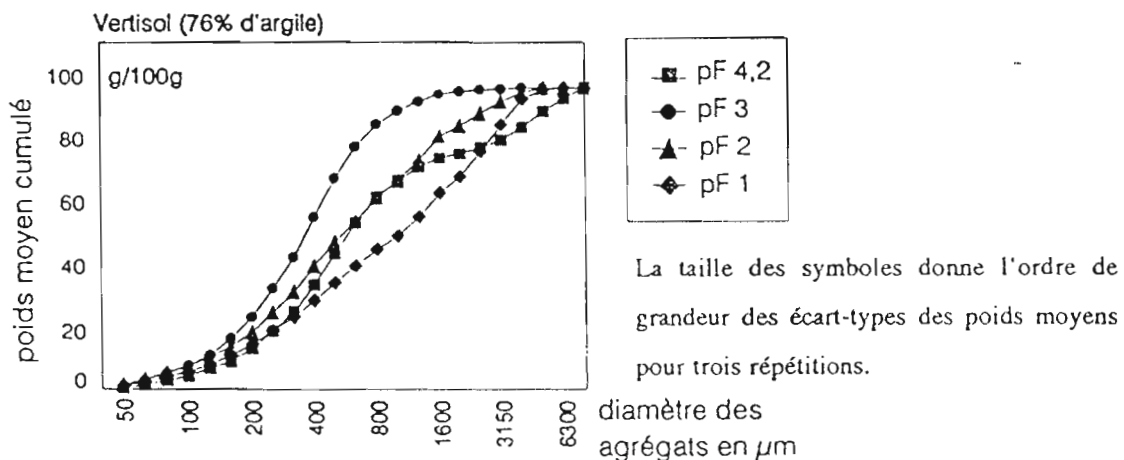
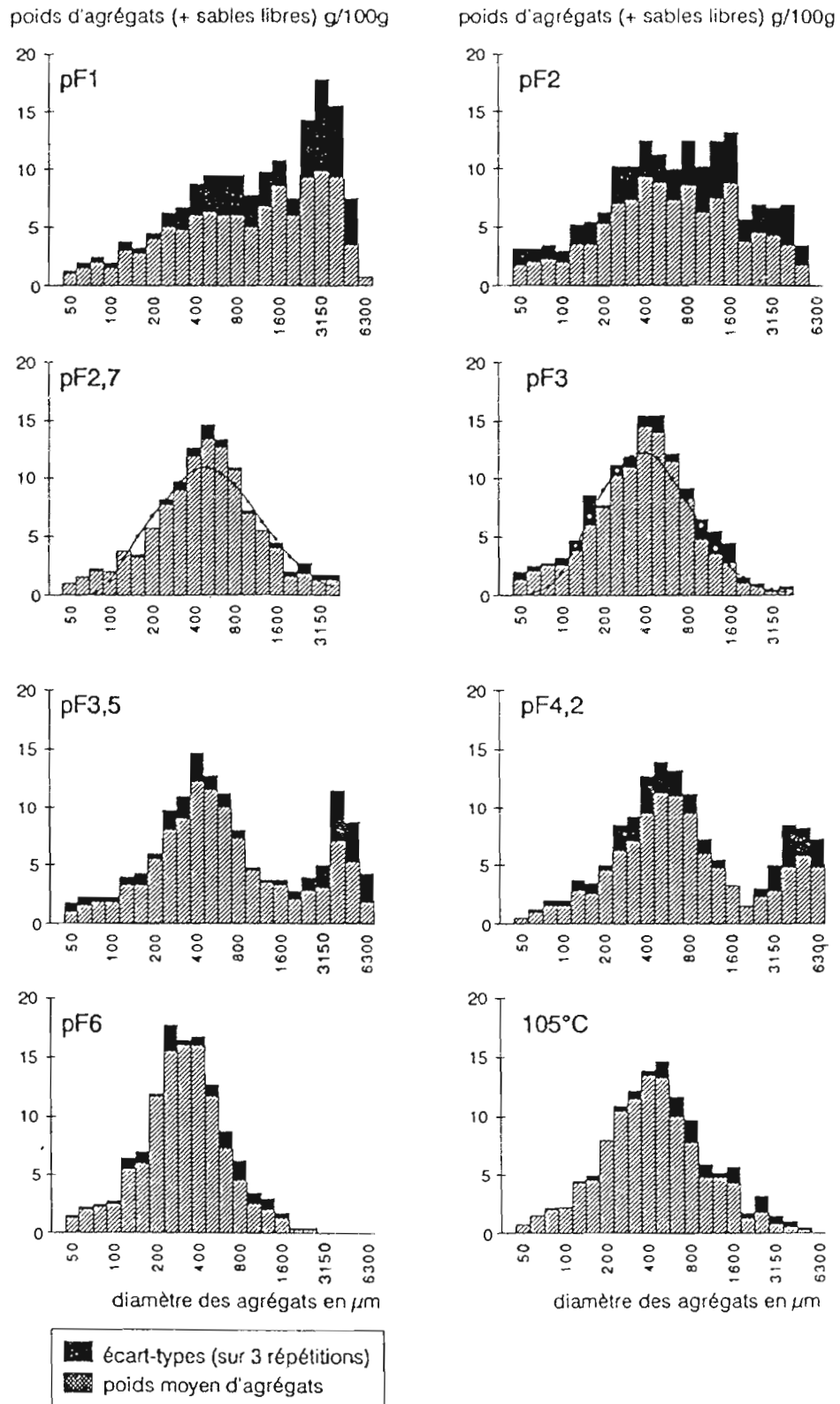


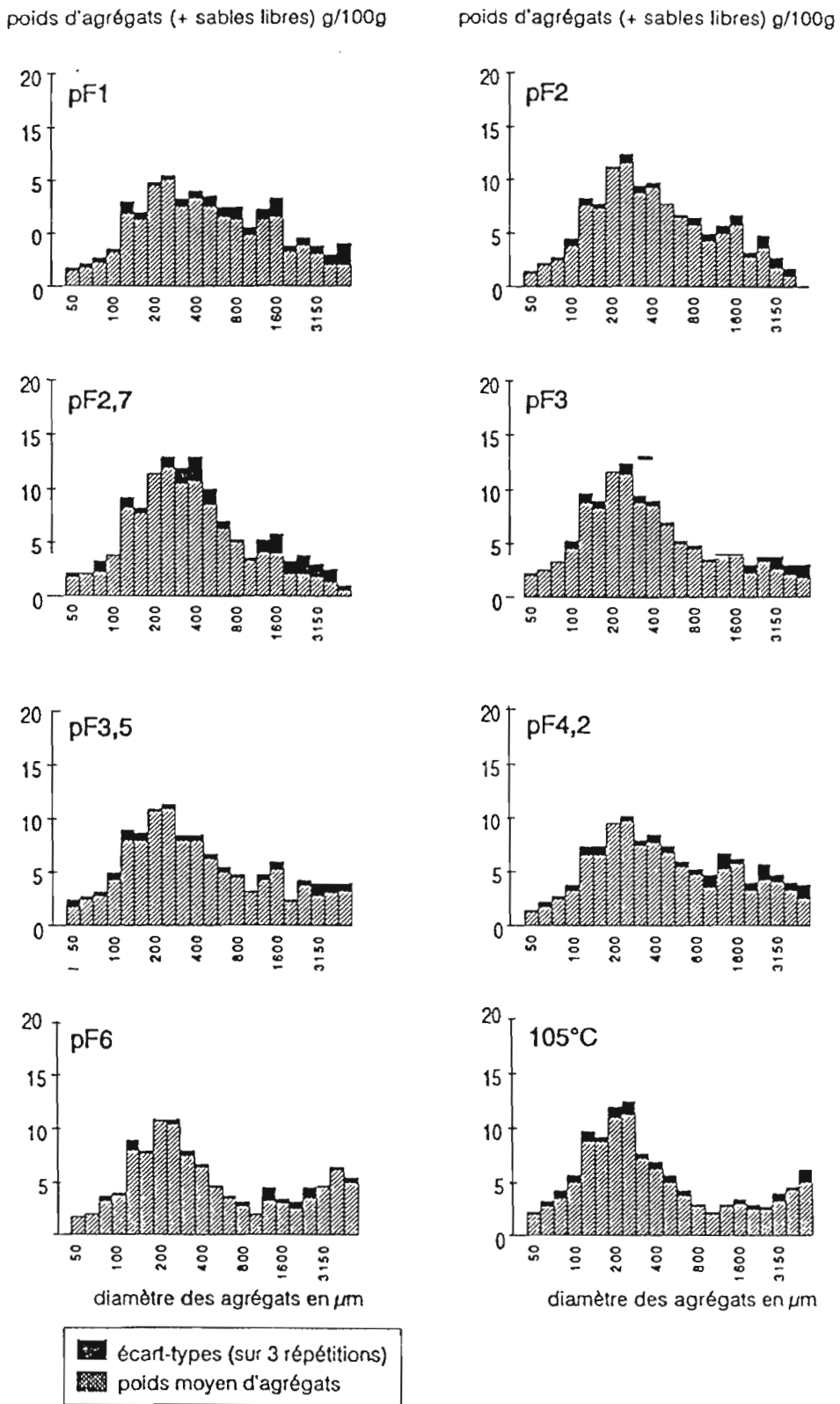
Figure IV.6 :

Influence de l'état hydrique initial des échantillons de sol sur la distribution du poids moyen d'agrégats par classe de taille. (échantillon A1, horizon supérieur).

La figure IV.6 montre les courbes de poids moyens cumulés d'agrégats d'un sol vertique non salé, fractionné à différents états hydriques. Les histogrammes de poids moyens d'agrégats par classe de taille de deux grands types de sols (vertisol non salé et sol ferrallitique) sont présentés aux pages suivantes sur les figures IV.7 et IV.8. D'autres exemples sont donnés dans l'annexe IV.2.

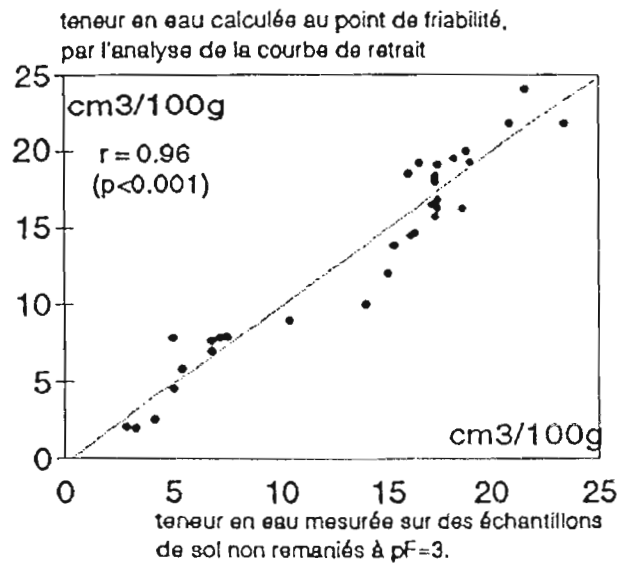


**Figure IV.7 :**  
**Influence de l'état hydrique initial d'un échantillon de vertisol sur la distribution du poids moyen d'agrégats par classe de taille.**  
**Vertisol non salé (A1) : horizon supérieur (0-35 cm) (76% d'argile)**



**Figure IV.8 :**  
 Influence de l'état hydrique initial d'un échantillon de sol ferrallitique sur la distribution du poids moyen d'agrégats par classe de taille.  
 Sol ferrallitique rouge "amont" : horizon B2 (25% d'argile)

en eau à  $pF=3$ . Nous constatons également pour l'ensemble de nos échantillons (fig. IV.11) une relation statistique linéaire (de pente 1 et passant par l'origine) entre la teneur en eau à ce point et celle à  $pF=3$ .



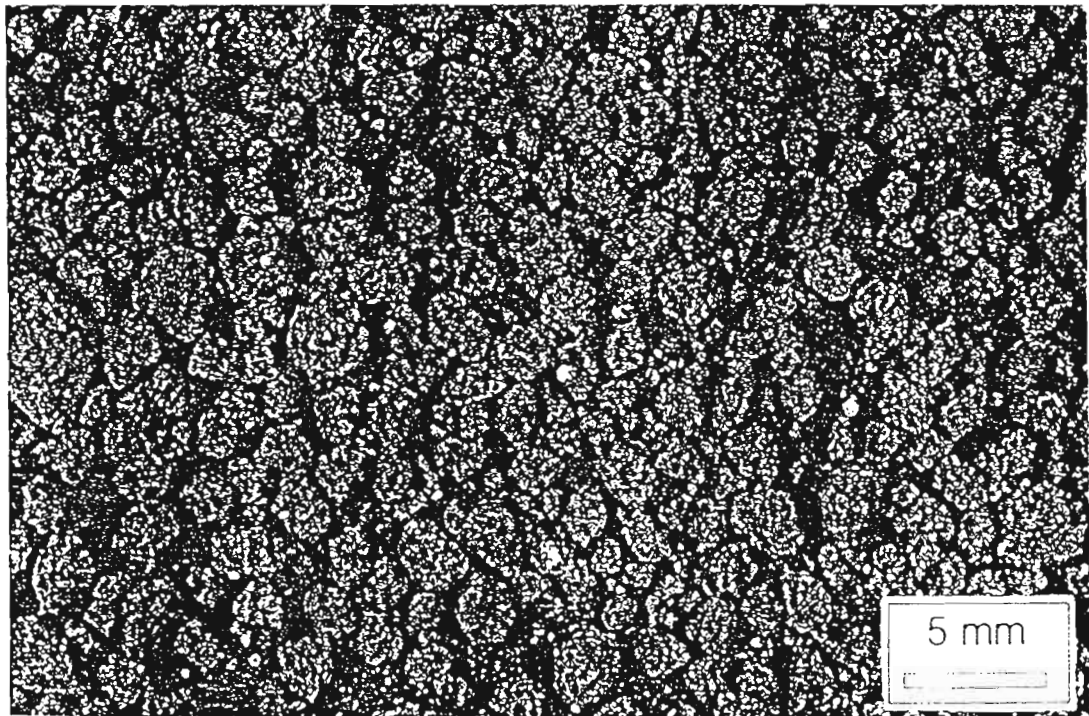
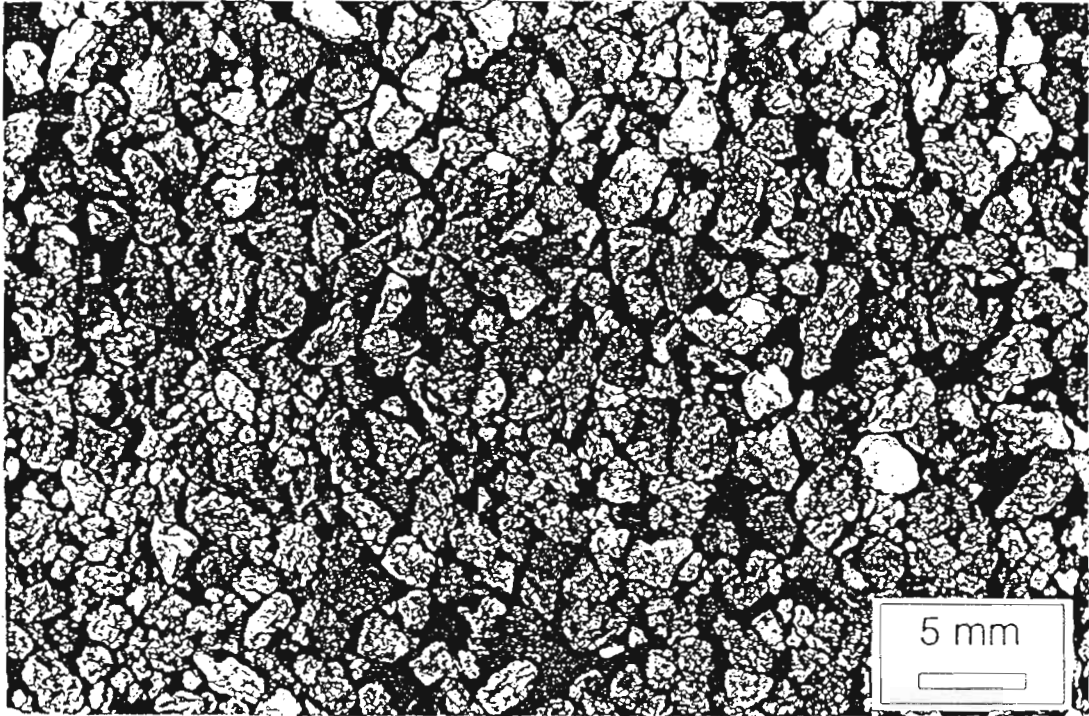
**Figure IV.11 :**

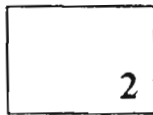
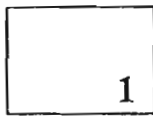
Relation entre teneur en eau mesurée sur des échantillons non remaniés à  $pF=3$ , et teneur en eau calculée, au point de friabilité, par l'analyse de la courbe de retrait de cet échantillon non remanié.

Ce point de friabilité est défini par BRAUDEAU (1988) comme étant le point exact où l'eau entourant les agrégats a complètement disparu. Il correspond bien à l'état hydrique préconisé pour fractionner un échantillon de sol en ses agrégats constitutifs.

En résumé, de nombreux auteurs, utilisant des techniques très différentes, s'accordent sur le fait que le sol possède des propriétés physiques particulières dans une gamme de  $pF$  proche de 3. La meilleure fragmentation d'un échantillon de sol serait obtenue au maximum de fissuration, ou d'anisotropie, de cet échantillon, c'est-à-dire au maximum d'individualisation des agrégats. C'est donc la gamme de  $pF$  de 2,7 à 3 qui semble la plus appropriée pour fractionner un échantillon de sol en éléments structuraux naturels du sol.

Nous avons proposé un protocole de fractionnement en agrégats, qui a pour objectif de séparer les éléments structuraux naturels du sol. Il est important de vérifier si les agrégats issus du fractionnement correspondent bien à des éléments structuraux naturels, préexistants dans le sol. Pour cela les agrégats issus du fractionnement seront comparés à ceux observés dans une lame mince de l'échantillon "mère" non remanié, imprégné par de la résine, à  $pF=3$ .



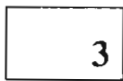
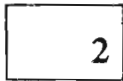
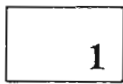


**Planche photographique V :**  
**AGREGATS ISSUS DU FRACTIONNEMENT**  
(photos en lumière naturelle)

**Photo 1 : macro-agrégats d'un vertisol**

**Photo 2 : macro-agrégats d'un sol ferrallitique rouge "amont" (horizon B2)**





**Planche photographique VI :**  
**AGREGATS D'UN SOL FERRALLITIQUE**  
**(rouge "amont"-horizon B2)**

observés en lumière transmise sous microscope optique polarisant

Photo 1 : microorganisation d'un échantillon non remanié

Photo 2 : détail de la microorganisation d'un échantillon non remanié :  
macro-agrégats, micro-agrégats (agrégats élémentaires),  
et squelette (quartz)

Photo 3 : macro-agrégats issus du fractionnement

Photo 4 : micro-agrégats (ou agrégats élémentaires) issus du fractionnement

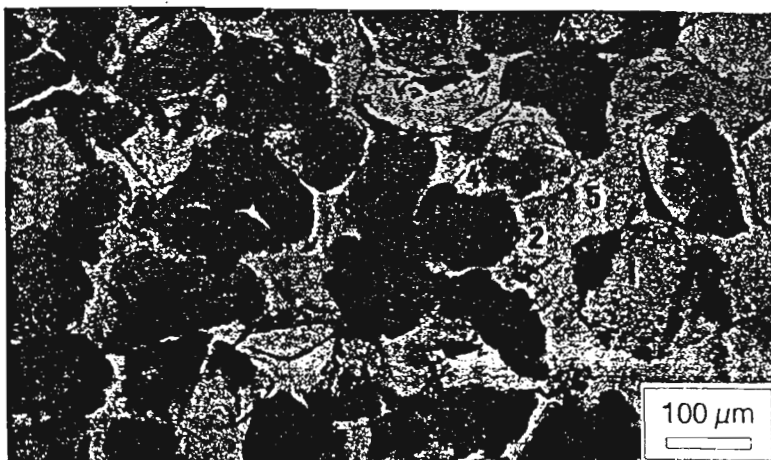
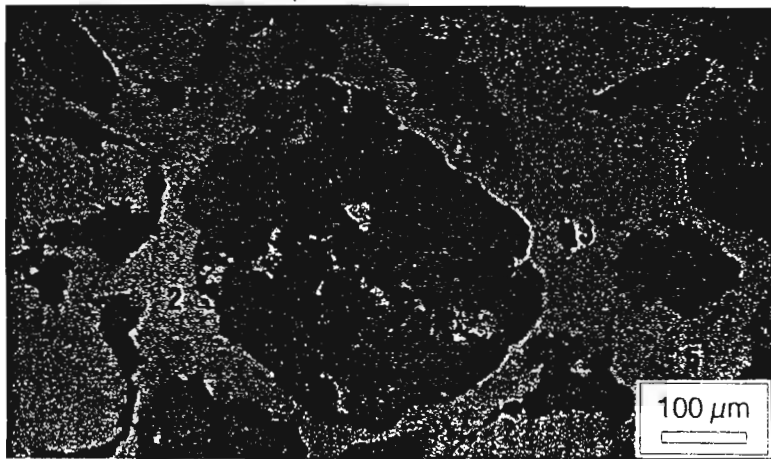
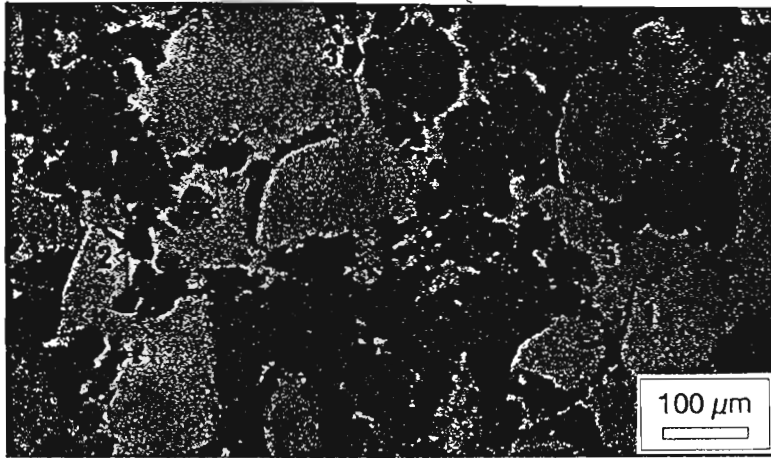
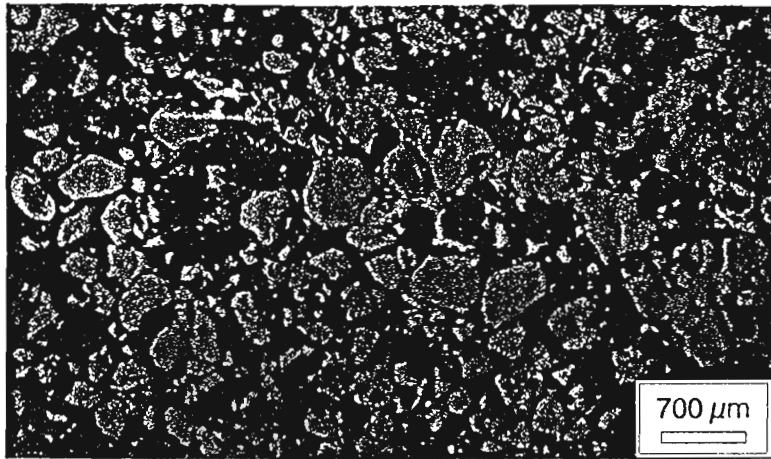
1 : quartz

2 : micro-agrégat

3 : macro-agrégat

4 : cutane

5 : vide



### 3.4 Observation micromorphologique des agrégats

La caractérisation des différents niveaux d'organisation des échantillons analysés sera présentée plus en détail, dans le chapitre V pour les sols ferrallitiques et ferrugineux, et dans le chapitre VII pour les vertisols. Dans ce paragraphe, nous présenterons uniquement quelques points caractéristiques de la morphologie des agrégats.

Les planches photographiques I V et V montrent les agrégats issus du fractionnement d'échantillons de sols (ferrallitiques et vertiques) avant tamisage (planche IV : photo 4) et après tamisage (planche V).

On remarque que les agrégats sont cohérents, propres et, dans l'ensemble, de forme sub-arrondie pour les sols ferrallitiques, et sub-angulaire pour les vertisols. Ils ne semblent pas présenter des traces de dégradation ou d'érosion particulières.

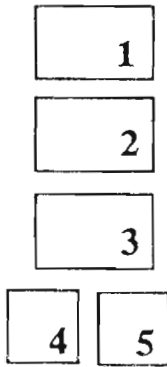
Les planches photographiques VI (sols ferrallitiques) et VII (vertisols) présentent les agrégats issus du fractionnement vus, cette fois-ci, en coupe, et les agrégats observés sur les échantillons non remaniés correspondants. On distingue, pour les sols ferrallitiques, des agrégats élémentaires formés uniquement par l'assemblage des particules primaires les plus fines (de taille  $< 250 \mu\text{m}$ ) (planche VI : photo 4) et des agrégats secondaires formés par l'assemblage d'agrégats élémentaires, de limons grossiers et de sables ( $> 250 \mu\text{m}$ ) (planche VI : photo 3).

Ce fait est moins net pour les agrégats des vertisols, en raison de la faible proportion de sables et limons grossiers dans ces sols.

Les agrégats issus du fractionnement et les agrégats non remaniés présentent des similitudes morphologiques frappantes : en dehors des critères de taille et de forme, c'est l'existence de traits pédologiques caractéristiques, soulignant l'individualité des agrégats, qui atteste de la validité du protocole de fractionnement. En effet d'après BREWER (1960) les agrégats de sol peuvent être identifiés par la présence de cutanes, c'est-à-dire par l'existence d'une modification de la texture ou d'une différenciation plasmique entre les agrégats.

Les agrégats semblent avoir été séparés les uns des autres selon des surfaces structurales reconnaissables sur les lames minces d'échantillons de sol indurés à  $pF=3$  par la présence de cutanes. Ces cutanes sont très nettes dans les sols ferrallitiques étudiés et correspondent à de fins liserés biréfringents micrométriques, enveloppant l'ensemble des microagrégats de sol (planche VI : photo 4).

Pour les sols vertiques, les cutanes sont différentes : il s'agit de cutanes de "contraintes mécaniques", de "stress-cutans" selon la définition de BREWER (1960). Elles sont révélées par des motifs de biréfringence striés plus accentués à la périphérie des agrégats. Cependant, il est



**Planche photographique VII :  
AGREGATS DE VERTISOLS**

observés en lumière transmise sous microscope optique polarisant

**Photo 1 : microorganisation d'un échantillon non remanié (horizon profond)**

**Photo 2 : détail de la microorganisation d'un échantillon non remanié  
(horizon supérieur)**

**Photo 3 : macro-agrégats issus du fractionnement (horizon profond)**

**Photo 4 : micro-agrégats (ou agrégats élémentaires) issus du fractionnement  
(horizon profond)**

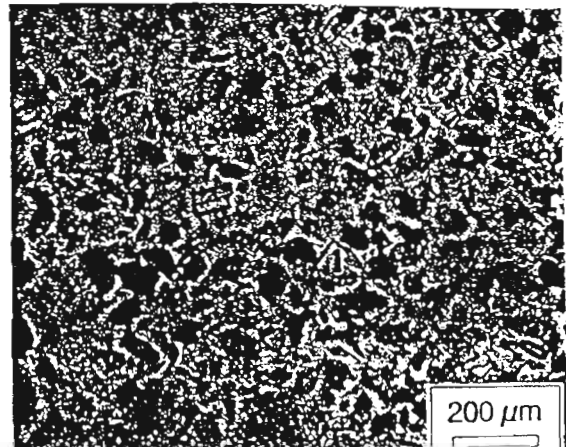
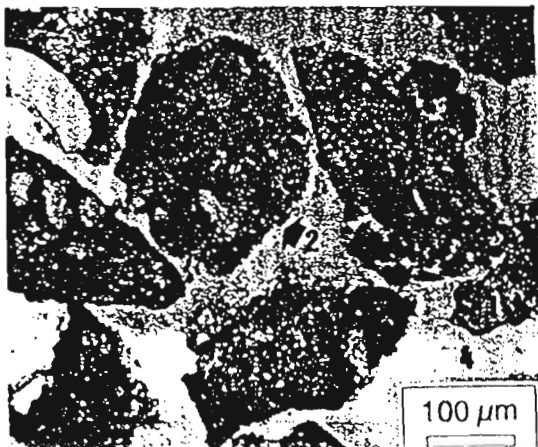
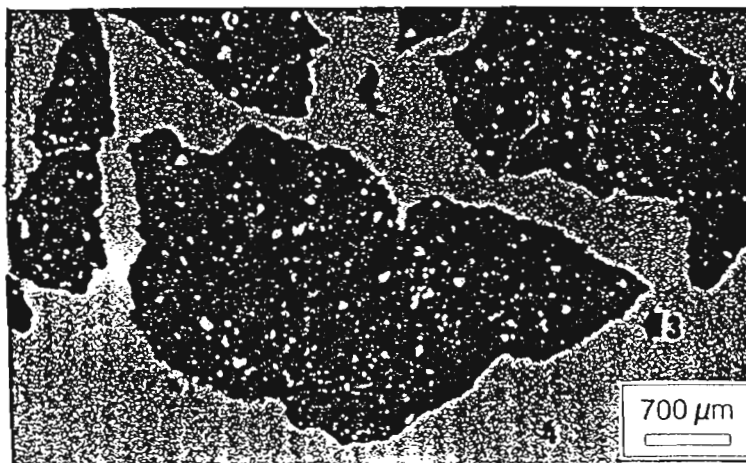
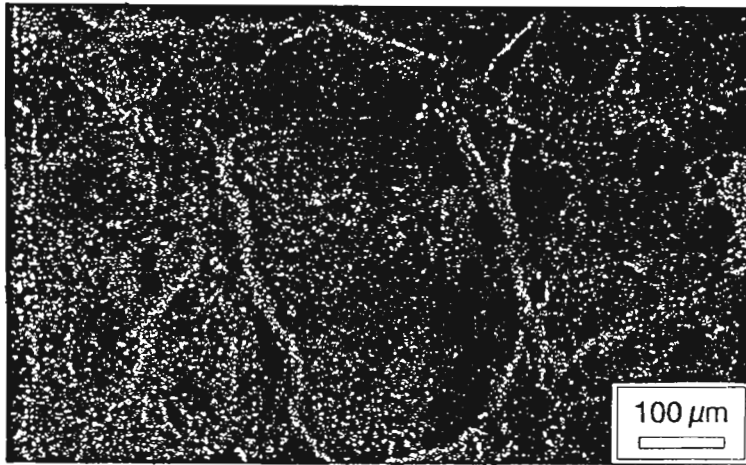
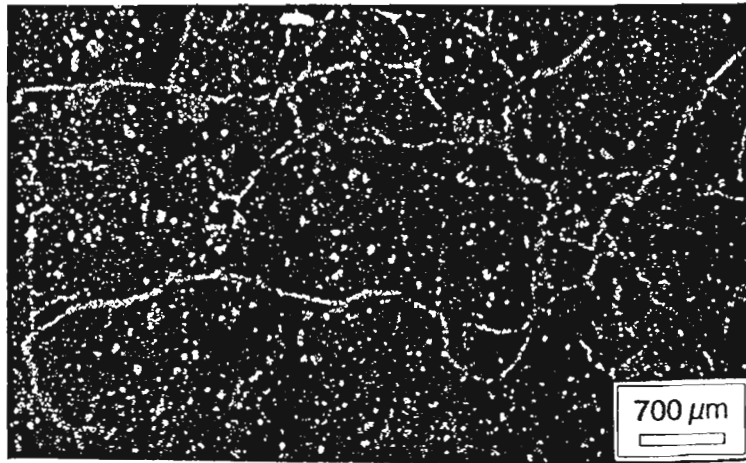
**Photo 5 : micro-agrégats et limons grossiers/sables libres issus du fractionnement**

1 : quartz

2 : micro-agrégat

3 : macro-agrégat

4 : vide



à souligner que ces traits pédologiques s'observent également à l'intérieur des agrégats, témoignant ainsi de la faible individualité des agrégats et de la constante homogénéisation de ces sols (planche XI : photos 3 et 4). Sous la loupe binoculaire, les faces des agrégats de vertisols sont franches, souvent conchoïdales et lisses, correspondant à des faces de micro-glissement (planche V : photo 1).

En résumé pour l'ensemble des sols testés, un potentiel hydrique voisin de  $pF=2,7 - pF=3$  semble le plus propice au fractionnement complet et reproductible de l'échantillon en agrégats. La reproductibilité des résultats du fractionnement et la comparaison de la morphologie des agrégats issus du fractionnement avec les agrégats observés dans les échantillons non remaniés de sol permettent de supposer que le fractionnement a isolé des agrégats naturels du sol, constitutifs d'un ou de plusieurs niveaux d'organisation structurale du sol.

### 3.5 Séparation des sables libres

Les classes d'agrégats obtenues après fractionnement et tamisage contiennent des agrégats vrais (stricto sensu) et des sables libres, c'est-à-dire des sables non inclus dans les agrégats. C'est surtout le cas pour les sols ferrallitiques et ferrugineux qui sont peu argileux, et où les sables non agrégés et nus se trouvent en quantité importante parmi les agrégats. Dans ce cas, afin d'étudier et caractériser la distribution dimensionnelle des agrégats seuls, il est nécessaire de pouvoir la distinguer de celle des sables libres.

#### 3.5.1 Estimation des sables libres

La distribution des sables libres peut être appréciée par un comptage sous loupe binoculaire. D'un point de vue pratique et même conceptuel, il faut noter que la séparation entre agrégats et sables libres n'est pas chose aisée dans les sols sableux ferrugineux. En effet de nombreux quartz présentent des incrustations et imprégnations de plasma argileux, d'oxydes et oxy-hydroxydes de fer. La séparation de ces sables sous loupe binoculaire est alors délicate notamment dans la gamme de taille inférieure à  $200 \mu m$ .

L'observation à la loupe binoculaire détermine un pourcentage en nombre des sables libres ( $ni$ ) par rapport au nombre des grains dans chaque classe granulométrique. Ce pourcentage est ensuite transformé en masse de sables libres ( $pi$ ) pour 100 grammes de sol sec par la formule suivante :

$$(pi) = [(ni) \cdot ds / ((100 - ni) \cdot dag + ni \cdot ds)] \cdot mi$$

où  $dag$  représente le volume massique des agrégats,  $ds$  le volume massique des sables, et  $mi$  la masse d'agrégats et sables libres pour 100 g de sol sec.

## Conclusions de la deuxième partie :

---

Nous avons proposé un protocole de fractionnement du sol, qui a pour objectif de séparer les éléments structuraux naturels du sol, et de les conserver en vue de l'étude de leur morphologie, constitution et comportement.

S'inspirant de quelques méthodes de fractionnement basées sur l'intervention d'un solvant organique et notamment de celle proposée par BRAUDEAU en 1982, nous avons recherché les conditions opératoires les plus appropriées, principalement la teneur en eau initiale des échantillons, pour que le fractionnement soit plus une individualisation et une séparation d'agrégats préexistants qu'une fragmentation arbitraire qui ne tiendrait compte ni de l'assemblage, ni de l'état hydrique de l'échantillon.

La méthode mise au point consiste à immerger lentement l'échantillon de sol dans le méthanol. Il semblerait que le méthanol qui est entièrement miscible à l'eau, occupe la macroporosité grâce à son fort pouvoir de diffusion, supprime les forces de capillarité et par échange d'eau avec la microporosité intra-agrégat, en provoque le retrait, ce qui favorise le fractionnement en agrégats.

Pour l'ensemble des sols testés, un potentiel hydrique compris entre  $pF=2,7$  et  $pF=3$  semble le plus propice à une fragmentation complète et reproductible de l'échantillon en agrégats. Cette reproductibilité et la confrontation entre la morphologie des agrégats issus du fractionnement et ceux observés sur lame mince d'échantillons non remaniés et humides correspondants, permet de supposer que la fragmentation a isolé les agrégats constitutifs naturels élémentaires.

L'estimation des sables libres (sables non inclus dans les agrégats) permet de calculer la distribution des agrégats stricto sensu. Ces distributions sont présentées, soit sous forme d'histogramme de poids moyens d'agrégats, soit sous forme de courbe de poids moyen cumulé d'agrégats, pour 100g de sol sec et pour trois répétitions. Les distributions dimensionnelles d'agrégats sont caractérisées par leurs moyenne et écart-type. L'ajustement des distributions à une loi log-normale facilite la comparaison des courbes entre elles.

Pour mieux juger de la validité de la technique de fractionnement, il conviendrait de confronter le produit du fractionnement avec les caractéristiques physiques des échantillons non remaniés correspondants. C'est cette confrontation entre une approche morphologique et une approche physique que nous proposons d'appliquer, dans la suite de ce travail.