Variabilité verticale de la composition granulométrique des limons de Petite Beauce (France).

P. Chéry, O. Lavialle, Hocine Bourennane, Dominique King, Ary Bruand

▶ **To cite this version:**

P. Chéry, O. Lavialle, Hocine Bourennane, Dominique King, Ary Bruand. Variabilité verticale de la composition granulométrique des limons de Petite Beauce (France).. Étude et Gestion des Sols, 1999, 6, pp.4, 185-196. hal-00089054

HAL Id: hal-00089054
https://insu.hal.science/hal-00089054

Submitted on 9 Aug 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Variabilité verticale de la composition granulométrique des limons de Petite Beauce (France)

P. Chéry(1)(3), O. Lavialle(2), H. Bourennane(3), D. King(3), A. Bruand(3)

(1) Ecole Nationale d'Ingénieur des Travaux Agricoles de Bordeaux, Laboratoire Sols et Paysages, 1 cours du Général de Gaulle, BP 201, 33175 Gradignan Cedex

(2) Ecole Nationale d'Ingénieur des Travaux Agricoles de Bordeaux, Laboratoire Analyse de Scènes Naturelles, 1 cours du Général de Gaulle, BP 201, 33175 Gradignan Cedex

(3) Institut National de la Recherche Agronomique, Centre de Recherche d'Orléans, Unité de Science du Sol - SESCPF, BP 20619, 45166 Olivet Cedex

RÉSUMÉ

En Petite Beauce, les matériaux limono-argileux à argilo-limoneux (limons de Beauce) présentent fréquemment une augmentation de la teneur en argile avec la profondeur. L'actuelle couverture pédologique s'étant développée dans ces matériaux, une telle différenciation granulométrique peut résulter soit de processus pédologiques, soit de processus sédimentaires. L'origine de cette différenciation n'ayant pas été clairement établie, l'objectif de cette étude est de la discuter sur la base d'un ensemble d'analyses granulométriques.

La composition granulométrique de 138 horizons a été déterminée au laboratoire. Ces horizons étaient issus de 40 fosses pédologiques réparties sur un secteur d'environ 2500 ha. Les résultats ont montré l'existence de deux groupes d'horizons caractérisés par des teneurs moyennes en argile de 31,5 et 37,2 %, et limon grossier de respectivement 29,8 et 23,8 %. Ces teneurs ainsi que le rapport LF/LG sont significativement différentes entre les deux groupes d'horizons au seuil de 1 %. Lorsqu'il y a localement superposition d'horizons appartenant à ces deux groupes, les horizons les moins argileux sont toujours situés au-dessus de ceux qui sont le plus argileux. La distribution verticale se fait donc toujours dans le même ordre.

De tels résultats indiquent que la différence de teneur en argile a pour origine deux apports successifs de sédiments éoliens ; il s'agit par conséquent d'une discontinuité d'origine sédimentaire.

Mots clés

Limon, Beauce, ACP, classification, granulométrie.

SUMMARY

VERTICAL VARIABILITY OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF LOAM IN PETITE BEAUCE (FRANCE)

In the Petite Beauce (South-east of Paris), clayey-loam to loamy-clay materials overlie Aquitanian limestones (Lorain, 1973 ; Gigout, 1973 ; Ménillet, 1981). These materials would be aeolian sediments that formed during the Quaternary (Macaire, 1971, 1972a and b).

Reçu : mars 1998 ; Accepté : décembre 1999

The soils are poorly differentiated and show a slight increase in clay and CaCO3 content with depth (Arrouays et al., 1989; Isambert and Duval, 1992; Bourennane, 1992; Nicoullaud et al., 1995). The origin of this textural differentiation is still under discussion. The presence of Ca CO3 in many soils is not in favour of an origin by clay illuviation as suggested by several authors (Arrouays et al., 1989; Isambert and Duval, 1992; Bourennane, 1997). Another hypothesis would be the existence of two distinct phases of aeolian sedimentation (Ould- Mohamed, 1995; Chéry, 1995). Within this context, the objective of the study is to characterise the textural differentiation as accurate as possible and to look for data enabling a better understanding of such a differentiation.

The site (2500 ha) is located between Orléans an Chateaudun (Figure 1). The soils are eutric and calcaric Cambisol (FAO, 1989). Clay minerals are smectite and illite mainly and kaolinite secondarily (Ould-Mohamed, 1991; Chéry et al., 1996b). A calcareous crust is often present at the bottom of the soil and the upper part of the Aquitanian limestones is cryoturbated (Ould-Mohamed and Bruand, 1994). Locally heterogeneous sandy-clay to clayey-sand materials are present between the clayey-loam to loamy-clay materials and the Aquitanian limestones (Macaire, 1972; Gigot and Fedoroff, 1973; Gigout, 1973; Chéry et al., 1996a and b). Samples from soils developed in the clayey-loam to loamy-clay materials were collected in 40 pits throughout the site (Figure 1). The particle size distribution and CaCO3 content were determined in the laboratory on 138 samples. Statistical analysis was performed by using LOSANGE and STAT-ITCF software.

Results showed that the average thickness of the clayey-loam to loamy-clay materials is 46 cm and confirmed the slight increase in clay content with depth (Figure 2, Table 1). The frequency histogram of the clay content is bimodal (Figure 3). Several groups of horizons were identified on the basis of the Principal Component Analysis and one group - the calcareous horizons - was particularly well delineated (Figures 4, 5 and 6, Table 3). Then a hierarchy classification enabled the distinction of three set of horizons (Table 2). The two main sets of horizons corresponded on one hand to a set of horizons with an average clay and silt content equal to 31.5 and 29.8 %, respectively and to another one with a clay and silt content of 37.2 and 23.8 %, respectively (Table 3). The average clay content of these two sets and their coarse-silt and fine-silt ratio were significantly different (Student's test, Table 3). This coarse-silt and fine-silt ratio difference indicates a discontinuity as earlier shown by Baize and Chrétien (1994) for other soils. The horizons with the greatest clay content lie on the cryoturbated limestones and therefore is the oldest material. It may be the remnant of a material resulting from the dissolution of the Aquitanian limestones. It may be also an aeolian sediments of which the high clay content would be related to the presence of the sandy-clay to clayey-sand materials overlying the Aquitanian limestones in the region. As for the set of horizons with the low clay content, they would correspond to a aeolian sediment.

Consequently our data showed that the textural differentiation studied is related to the presence of a discontinuity within the clayey-loam to loamy-clay materials which overlie the Aquitanian limestones in the Petite Beauce. This discontinuity would originate either from the aeolian sedimentation process indicating the presence of two successive sedimentation phases or from the deposit of an aeolian sediment above the remnant of a soil developed in the decarbonation residue from the Aquitanian limestones

Key-words

Loam, PCA, classification, particle size distribution

RESUMEN

VARIABILIDAD VERTICAL DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS LIMOS DE LA PEQUEÑA BEAUCE

En Pequeña Beauce, los materiales de limoso-arcillosos a arcillo-limosos (limos de Beauce) presentan frecuentemente un aumento del contenido en arcilla con la profundidad. La cubierta pedológica actual se desarrolla en estos materiales; una tal diferenciación granulométrica puede resultar sea de procesos pedológicos, sea de procesos sedimentarios. El origen de esta diferenciación no está bien establecido, el objetivo de este estudio es discutirla sobre la base de un conjunto de análisis granulométricos.

La composición granulométrica de 138 horizontes fue determinada en laboratorio. Estos horizontes provienen de 40 perfiles pedológicos localizados en un sector de aproximadamente 2500ha. Los resultados mostraron la existencia de dos grupos de horizontes caracterizados por contenidos medios en arcilla de 31,5 y 37,2% y en limo grueso de 29,8 y 23,8 respectivamente. Estos contenidos son significativamente diferentes en el umbral de 1%. Cuando existe localmente superposición de horizontes que pertenecen a estos dos grupos, los horizontes menos arcillosos se localizan siempre encima de los que son más arcillosos. La distribución vertical se hace siempre en el mismo orden.

Tales resultados indican que la diferencia de contenido en arcilla tiene por origen dos aportes sucesivos de sedimentos eólicos; se trata, por consecuencia, de una discontinuidad de origen sedimentario.

Palabras claves

Limo, Beauce, ACP, clasificación, granulometría.

En Petite Beauce, le calcaire aquitanien est recouvert par une formation superficielle d'âge quaternaire, limono-argileuse à argilo-limoneuse dont l'origine serait éolienne (Macaire, 1971, 1972a et b). Dans ces formations d'épaisseur variable appelées " limons de Beauce ", les sols qui s'y sont développés sont généralement peu différenciés (Arrouays et al., 1989 ; Duval et Isambert, 1992). En effet, seule la teneur en calcaire varie nettement dans les profils de sol (Duval et Isambert, 1992 ; Bourennane, 1992 et 1997 ; Ould-Mohamed, 1995 ; Chéry, 1995 ; Nicoullaud et al., 1995). Ces mêmes études ont aussi révélé que lorsque l'épaisseur de la formation est supérieure à quelques décimètres, les horizons seraient sensiblement plus argileux en profondeur. L'origine d'une telle différenciation reste controversée. Duval et Isambert (1992) et Bourennane (1997) l'interprètent plutôt comme étant le résultat d'une différenciation sur place par illuviation au sein d'un matériau à l'origine homogène. Macaire (1972a) avait d'ailleurs antérieurement noté la présence de cette différenciation et indiqué qu'elle pouvait effectivement résulter d'un processus d'illuviation. Cependant, l'état saturé du complexe d'échange sur toute l'épaisseur du sol ainsi que la rareté des revêtements d'argile ne sont guère en faveur de cette hypothèse (Chéry, 1995). Une autre hypothèse consiste à expliquer le gradient vertical de teneur en argile par deux phases successives de sédimentation éolienne, c'est-à-dire par une discontinuité sédimentaire (Chéry et al., 1996a et b).

Jusqu'à maintenant, aucun argument décisif n'a pu être avancé en faveur de l'une ou de l'autre de ces hypothèses. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est par conséquent de préciser, dans un premier temps, la variabilité de teneur en argile au sein de la couverture de sol et dans un second temps, de rechercher des arguments permettant de préciser l'origine de la différenciation verticale.

MATERIEL ET METHODES

Localisation et description des sols étudiés

Le secteur d'étude est localisé dans la partie nord-est de la Petite Beauce. Il se situe à mi-chemin entre Orléans et Châteaudun, sur les communes de Péronville, Villamblain, Villampuy, La Chapelle-Onzerain, Tournoisis et Prénouvellon (figure 1). Il couvre une surface d'environ 2500 hectares. Le paysage présente une morphologie générale faiblement ondulée, les pentes sont peu marquées et les dénivelées faibles (de 117 à 137 m) (Bourennane, 1997).

Les sols du secteur sont principalement des sols bruns calciques à calcaires (CPCS, 1967), des Calcisols ou des Calcosols selon le Référentiel Pédologique (AFES, 1995), ou des Cambisols eutriques ou calcariques (FAO, 1989). Des analyses minéralogiques réalisées sur la fraction < 2 µm d'échantillons issus de plusieurs fosses du secteur d'étude, montrent la présence de minéraux argileux 2:1 de type smectite et illite et de minéraux de type kaolinite sans variation sensible de leur proportion en fonction de la profondeur (Ould-Mohamed, 1991 ; Chéry, 1995, Chéry et al., 1996b).

A la base de la formation limono-argileuse à argilo-limoneuse, on rencontre fréquemment un encroûtement calcaire discontinu, puis sous-jacents, des matériaux calcaires cryoturbés (Ould-Mohamed, 1991 ; Ould-Mohamed et Bruand, 1994). Ces matériaux calcaires cryoturbés sont le plus souvent organisés en poches de plusieurs générations qui sont imbriquées les unes dans les autres. A la base des matériaux cryoturbés, on retrouve les matériaux du substratum calcaire d'âge aquitanien (calcaire de Beauce). Ces calcaires sont d'origine lacustre à laguno-lacustre et de faciès très variable (Lorain, 1973 ; Gigout, 1973 ; Ménillet, 1981). Sur notre secteur d'étude, deux faciès sont représentés :

- un faciès calcaire pulvérulent, gris à blanc, friable et d'aspect "marneux". Après décarbonatation, ces matériaux présentent une granulométrie essentiellement argileuse.

- un faciès calcaire dur, fragmenté, blanc à jaunâtre, très difficilement pénétrable à la " tarière ".

Localement, des observations ont mis en évidence des matériaux argilo-sableux à sablo-argileux très hétérogènes intercalés entre les formations limono-argileuses et les calcaires d'âge aquitanien. De telles formations correspondraient à une extension occidentale de matériaux d'origine fluviatile d'âge burdigalien constituant plus à l'est les formations des sables et argiles de Sologne (Macaire, 1972 ; Chéry et al., 1996a et b). Ces matériaux correspondraient à des remplissages des dépressions karstiques du calcaire de Beauce (Gigot et Fedoroff, 1973 ; Gigout, 1973).

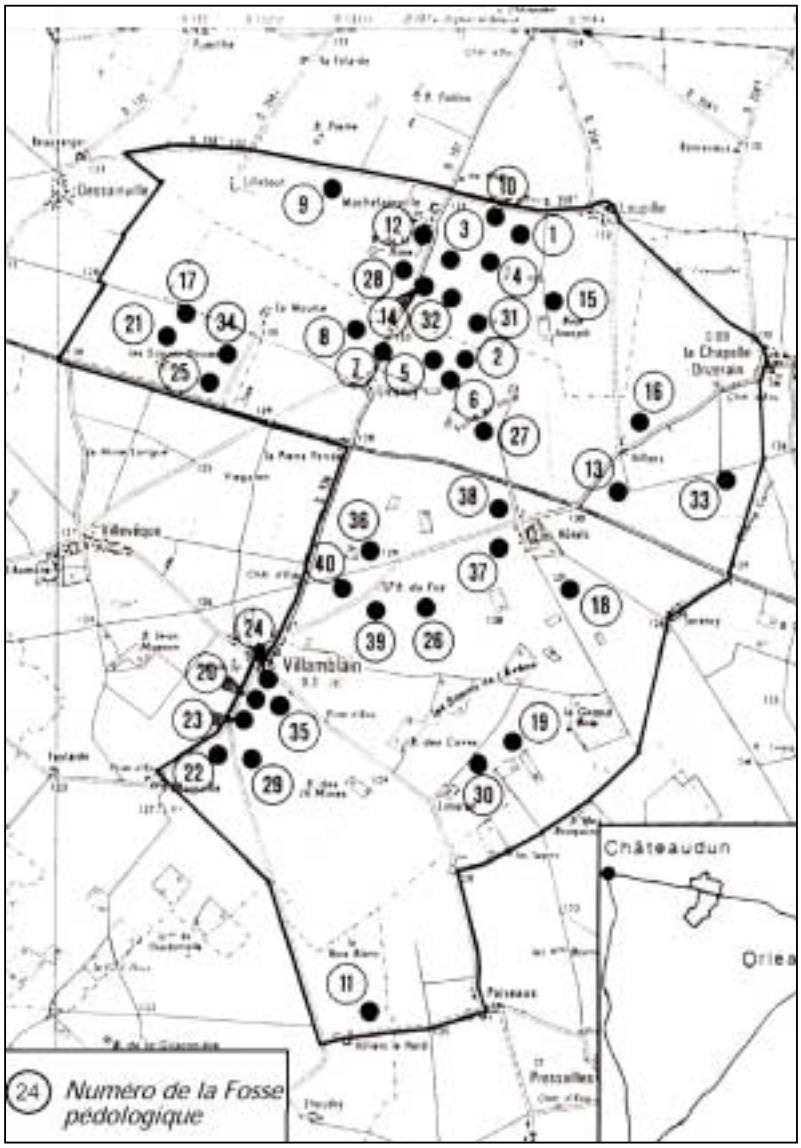
Echantillonnage

L'échantillonnage des sols a été réalisé à partir de 40 fosses pédologiques réparties sur le secteur d'étude (figure 1). 138 échantillons ont été prélevés, dans différents horizons, à des profondeurs comprises entre 5 cm et 1 m. Sur chaque échantillon préalablement tamisé à 2 mm, ont été réalisées une analyse granulométrique en 5 fractions après décarbonatation et une mesure de la teneur en calcaire total. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire d'analyses des sols de l'INRA d'Arras en utilisant la méthode de la pipette de Robinson basée sur la loi de Stokes.

Analyses statistiques

L'ensemble des traitements statistiques a été effectué avec le logiciel LOSANGE développé à l'ENITA de Bordeaux et le logiciel STAT-ITCF développé par l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages. Trois types de traitements statistiques ont été réalisés :

Figure 1 - Localisation des fosses pédologiques sur le secteur d'étude.
Figure 1 - Localization of the pedological pits in the study site.



- des traitements statistiques " classiques " (moyenne, écart-type, médiane...) et des histogrammes qui permettent de présenter de façon synthétique le jeu de données et d'en visualiser la dispersion globale (Crauser et al., 1989) ;

- une analyse en composantes principales (ACP) qui est une méthode d'analyse statistique multivariée. Cette méthode, purement algébrique et géométrique, ne présuppose aucune hypothèse de lois sur les données traitées. Elle consiste en la recherche d'une hiérarchisation de l'information contenue dans un tableau de données, et ceci par le calcul des axes d'allongement maximum d'un nuage de points selon plusieurs axes. Cette méthode, permet de mettre en évidence les interrelations entre les variables et les éventuelles ressemblances entre individus ou groupes d'individus présentant les mêmes caractéristiques sur un axe donné (Sanders, 1989). L'ACP est une méthode qui ne s'applique qu'aux variables quantitatives. De nombreux ouvrages décrivent en détails cet outil statistique couramment utilisé en science du sol (Philippeau, 1986 ; Sanders, 1989 ; Saporta, 1990). Dans cette étude, l'ACP nous permettra de comparer, de hiérarchiser et de sélectionner les individus et les variables les plus pertinentes de notre tableau de données ;

- une classification ascendante hiérarchique (CAH) qui est une méthode automatique de classification complémentaire de l'ACP, dans la mesure où elle permet de classifier les individus ou les groupes d'individus déjà mis en évidence par l'ACP. La CAH procède par agrégations successives d'individus puis de groupes d'individus en fonction de leurs ressemblances par rapport à un ensemble de critères. L'objectif premier de la CAH, comme d'ailleurs de toute classification, est de répartir une population en groupes d'observation homogènes, chaque groupe étant bien différencié des autres (Roux, 1985). Les individus ainsi analysés sont progressivement regroupés selon leur degré de ressemblance jusqu'à l'obtention d'une unique classe les regroupant tous. Cette procédure implique alors le choix de deux critères permettant le regroupement des individus et des classes d'individus (Sanders, 1989). De nombreux critères de regroupement existent, nous avons donc fait des choix en rapport avec les objectifs de notre étude et le type de variables que nous utilisons. Le premier critère concerne le choix de la distance entre individus (indice qui mesure combien deux individus sont différents). Dans cette étude, nous avons choisi la distance euclidienne comme critère de ressemblance entre 2 individus, ce critère étant le plus pertinent lorsque les variables utilisées sont quantitatives. Le second critère s'intéresse à la distance entre groupes d'individus (critère d'agrégation qui détermine une distance entre classes). De nombreux critères d'agrégation existent, impliquant quelquefois des résultats différents (Jambu, 1978). Le critère d'agrégation utilisé ici, consiste à définir la distance entre deux groupes comme étant la distance euclidienne entre leurs centres de gravité.

Méthode d'étude

La méthode utilisée dans ce travail consiste, dans un premier temps, à étudier les caractéristiques générales des sols rencontrés et d'en dégager les principales grandeurs statistiques concernant la granulométrie (5 fractions exprimées en pourcentage de terre fine non calcaire), la teneur en calcaire et les profondeurs d'apparition de la base des différents horizons. Puis, dans un second temps, de hiérarchiser et de classifier les groupes d'horizons selon leur constitution granulométrique en utilisant les méthodes de l'ACP et de la CAH combinées. Ainsi, la CAH nous permettra de distinguer les groupes d'horizons et de visualiser leur comportement selon les axes les plus représentatifs de l'ACP. Nous nous appuierons alors sur le plan principal de l'ACP pour résumer et classifier l'information recueillie. Ensuite, nous comparerons les caractéristiques granulométriques des différents groupes d'horizons ainsi obtenus et nous regarderons si ces groupes sont significativement différents par des tests de comparaisons de moyennes. Enfin, nous étudierons les squelettes granulométriques de deux groupes d'horizons de manière à conclure sur l'origine de la différenciation de la partie la plus fine de leur granulométrie.

RESULTATS ET DISCUSSION

Caractéristiques générales des sols étudiés

Les matériaux limono-argileux à argilo-limoneux sont d'épaisseur variable (épaisseur moyenne de l'ordre de 50 à 60 cm) et recouvrent l'ensemble du secteur. La couleur varie du brun foncé (10YR3/3) au brun (10YR4/3) jusqu'au brun jaune foncé (10YR4/4) en fonction de la profondeur. Cette variation de couleur est vraisemblablement à mettre en relation avec celle de la teneur en matière organique. La structure est généralement très nette, de type polyédrique sub-anguleuse à polyédrique fine dans tous les horizons, avec parfois une juxtaposition de structures polyédrique sub-anguleuse et grumeleuse dans l'horizon superficiel. Lorsque le substrat calcaire est suffisamment profond (> 30 cm), les horizons présents en surface sont généralement décarbonatés. Lorsque c'est le cas, le complexe d'échange demeure néanmoins saturé par l'ion Ca^{2+}. Des carbonates secondaires apparaissent en profondeur sous la forme de nodules de la taille des sables grossiers ou de graviers et de pseudomycélium. Un encroûtement calcaire discontinu est souvent présent à la base de la formation limono-argileuse à argilo-limoneuse. Le profil calcaire est donc nettement différencié avec une décarbonatation superficielle et des reprécipitations carbonatées en profondeur, et ce jusque dans les poches de cryoturbation.

Notons que, lorsque le substrat calcaire est proche de la surface (< 30 cm), les horizons limono-argileux à argilo-limoneux sont carbonatés dès la surface. Il s'agit là très vraisemblablement d'une recarbonatation secondaire à la suite de la mise en culture.

Quant à la teneur en argile, elle tend effectivement à augmenter avec la profondeur de l'ordre de quelques pourcents et ceci pour toutes les fosses pédologiques observées (figure 2).

Caractéristiques générales des horizons étudiés

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau 1. La teneur moyenne en argile de la population étudiée, ainsi que la médiane, sont d'environ 34 %. L'écart-type, indicateur de la dispersion de la population, est de 3,6 %. On note que les teneurs moyennes en limon fin (LF) et en limon grossier (LG) sont équivalentes (environ 32 %). Quant aux teneurs en sable fin (SF) et sable grossier (SG), elles sont similaires et nettement inférieures à 2 %.

Si l'on examine maintenant les teneurs en carbonates ($CaCO_3$), on constate que, contrairement aux variables granulométriques, moyenne et médiane sont nettement différentes (plus de 50 % des horizons ne sont pas carbonatés). Ceci traduit bien le fait que certaines fosses présentent des horizons calcaires dès la surface, alors que d'autres fosses révèlent des profils totalement décarbonatés superficiellement.

L'histogramme de fréquence des teneurs en argile montre une distribution bimodale (figure 3). Le premier mode se situe entre 30 et 32 % d'argile et le second entre 35 et 36 %. Cette distribution bimodale laisse donc supposer l'existence de deux populations distinctes dans les horizons argilo-limoneux.

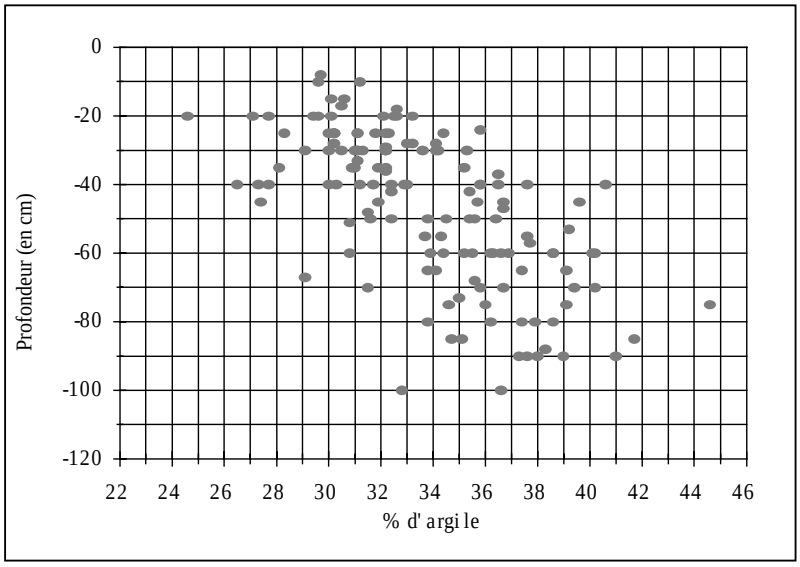
Analyse de la variabilité

Bien que l'ensemble des données soit exprimé dans la même unité (en %), les fractions granulométriques SF et SG ont des valeurs numériques faibles. La dispersion absolue correspondante est alors faible dans ce cas. C'est pourquoi, pour ne pas sous-estimer d'éventuelles différences pour des fractions peu représentées, nous avons choisi de traiter les données en les réduisant et les centrant préalablement. Notons également que dans un souci de lisibilité, l'interprétation de l'ACP n'a été réalisée que sur 3 axes qui représentent à eux seuls plus de 84 % de l'information.

En observant l'espace des variables selon les axes 1 et 2 (figure 4), on constate que les variables " argile " et " limon " sont dans la même direction mais s'opposent. Ceci traduit le fait que ces variables sont corrélées mais évoluent en sens opposé. Ainsi, quand la teneur en argile diminue, la teneur en limon (LF + LG) augmente, ce qui est effectivement le cas puisque la teneur en sable (SF + SG) est faible. A contrario, les variables SF et SG sont regroupées et sont perpendiculaires aux variables " argile " et " limon " sur le cercle 1-2. Ceci

Figure 2 - Teneur en argile des horizons limono-argileux à argilo-limoneux en fonction de la profondeur.

Figure 2 - Clay content of the clayey-loam to loamy-clay horizons with respect to depth.



indique que les variables SF et SG sont très peu corrélées aux variables " argile " et " limon ".

Si l'on observe les autres cercles de corrélation et notamment le cercle 1-3 (figure 5), on remarque que les variables SF et SG sont toujours regroupées mais que par contre, les variables LF et LG sont séparées et même perpendiculaires. On constate également que c'est la variable LG qui reste le mieux corrélée à la variable " argile " et ceci de façon négative.

Cette analyse permet de tirer les premières conclusions concernant la variabilité de composition granulométrique des horizons argilo-limoneux. Ainsi, lorsque la teneur en argile diminue, la teneur en LG croît indépendamment de la teneur en LF (le rapport LF/LG varie). D'autre part, même si les variables " teneurs en SF et en SG " semblent corrélées de façon négative avec la variable " teneur en argile " sur la figure 5, l'analyse des coefficients de corrélation infirme cette hypothèse car ils ne sont pas significatifs au seuil de 1 % ; la teneur en sable va rester indépendante des variations de teneurs en argile mais également des teneurs en LF. Enfin, on remarque que, quels que soient les axes représentés, les teneurs en SF et en SG sont toujours corrélées.

Constitution de groupes d'horizons

L'ACP et plus particulièrement l'étude des plans 1-2 et 1-3 (espace des individus) permet la distinction de plusieurs groupes d'horizons. En étudiant de plus près ces groupes, on constate la présence d'un ensemble d'horizons fortement éloigné sur l'axe 1 et qui représente les individus les plus calcaires (figure 6). Cependant, il est difficile de distinguer, à partir de l'analyse des plans 1-2, 1-3 et 2-3, les horizons qui sont les plus argileux de ceux qui le sont le moins.

De manière à réaliser cette distinction, nous avons effectué une classification ascendante hiérarchique (CAH) qui a mis en évidence 3 grandes classes d'horizons (tableau 2). Ces classes ont été reportées sur le plan 1-2 issu de l'ACP (figure 6). Ainsi, nous avons pu visualiser la répartition de ces classes d'horizons selon les axes 1 et 2 qui représentent à eux deux plus de 68 % de l'information. On constate alors que les horizons les plus argileux se situent plutôt dans la partie " nord-ouest " du graphique et que les individus les moins argileux se placent à l'opposé,

Tableau 1 - Statistiques sur les caractéristiques granulométriques des horizons argilo-limoneux (résultats exprimés en pourcentage de terre fine non calcaire).

Table 1 - Statistics of the particle-size distribution of the clayey-loam to loamy-clay horizons (results are expressed as percentage of the non-calcareous < 2 mm fraction).

138 individus	Profondeur (cm)	$CaCO_3$ (%)	Argile (%)	Limon Fin (%)	Limon Grossier (%)	Sable Fin (%)	Sable Grossier (%)
Minimum	-100	0	24,6	27,3	23,8	0,9	0,0
Maximum	-8	17,7	44,6	38,2	37,0	3,9	4,6
Médiane	-40	0	33,7	31,4	31,7	1,6	1,1
Moyenne	-46,4	1,3	33,8	31,6	31,5	1,7	1,4
Ecart-type	21,9	2,9	3,6	2,1	2,9	0,5	1,0

c'est-à-dire dans la partie " sud-est ". Quant aux horizons les plus calcaires (9 individus), ils constituent bien un groupe à part, à l'extrême droite du graphique.

Caractéristiques des groupes d'horizons

Après avoir individualisé ces différents groupes d'horizons, nous avons étudié leurs caractéristiques propres en comparant leurs grandeurs statistiques respectives. Le tableau 3 rappelle les grandeurs statistiques des deux premiers groupes et permet la comparaison des horizons les plus argileux avec les horizons les moins argileux.

La teneur moyenne en argile du groupe 1 (horizons les moins argileux) est de 31,5 % avec un écart-type de 1,9 %. Le groupe 2 (horizons les plus argileux) possède un teneur moyenne en argile de 37,2 % avec un écart-type de 2,1 %. On remarque également que les teneurs en sable fin et sable grossier des deux groupes ne sont pas significativement différentes (respectivement 1,6 et 1,3 %). D'autre part, on note que la teneur en limon grossier est supérieure à celle des limons fins dans le groupe 1 alors que la tendance s'inverse dans le groupe 2 (tableau 3). Toutefois, l'écart entre les deux teneurs moyennes en LF et LG ne varie pas sensiblement en valeur absolue (1,6 % pour le groupe 1 et 1,9 % pour le groupe 2). On constate enfin que la teneur moyenne en limon

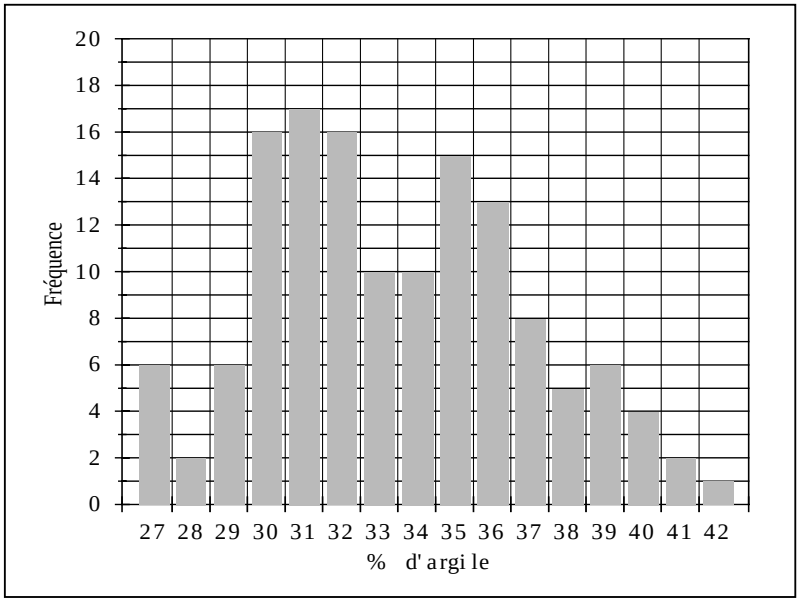


Figure 3 - Histogramme de fréquence des teneurs en argile des horizons limono-argileux à argilo-limoneux.

Figure 3 - Frequency histogram of the clay content of the clayey-loam to loamy-clay horizons.

Figure 4 - Représentation de l'espace des variables selon les axes 1 et 2.

Figure 4 - Unit circle showing the correlation of horizon variables with the first two principal components.

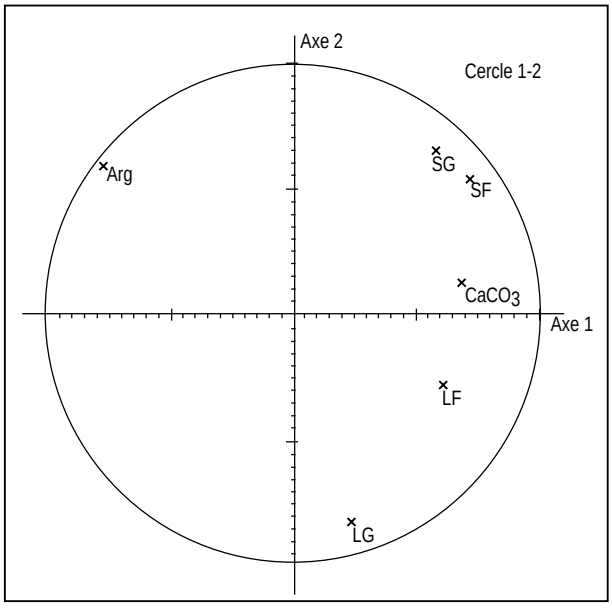
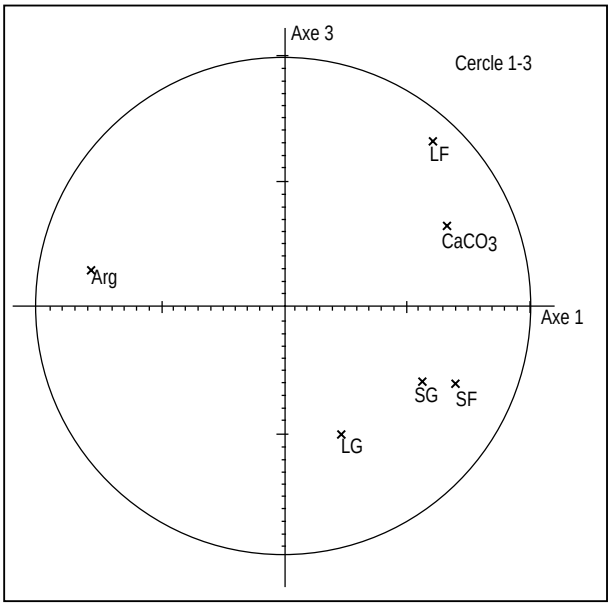


Figure 5 - Représentation de l'espace des variables selon les axes 1 et 3.

Figure 5 - Unit circle showing the correlation of horizon variables with the first and third principal components.



fin varie d'environ 1 % entre les deux groupes pour une variation de presque 5 % de la teneur moyenne en limon grossier.

Un test de comparaison de moyennes (test t de Student) a été réalisé sur les teneurs en argile des deux groupes d'horizons ainsi individualisés. Ce test permet de conclure que les moyennes des teneurs en argile des groupes 1 et 2 sont significativement différentes au seuil de 1 % (la probabilité pour qu'une variable T de Student (test bilatéral) soit supérieure à |t| calculé est quasi nulle, dernière ligne du tableau 3). De la même manière, un test a été réalisé pour comparer les teneurs en limon grossier des 2 groupes et a aussi permis de conclure à la différence significative de leurs moyennes au seuil de 1 % (tableau 3).

Enfin, l'étude du rapport LF/LG permet de caractériser l'origine, pédologique ou sédimentaire, des différents matériaux (Baize et Chrétien, 1994). En d'autres termes, si ce rapport reste constant entre deux horizons superposés, on pourra en déduire que la différenciation des matériaux sera essentiellement due à des phénomènes d'illuviation d'argile (différenciation autochtone). Dans le cas contraire, on pourra alors parler d'origine sédimentaire de la différenciation des matériaux (différenciation allochtone). La comparaison des moyennes des rapports LF/LG des deux groupes d'horizons par un test de Student montre qu'elles sont significativement différentes au seuil de 1 % et ceci même si les différences des teneurs en LG et LF entre les deux groupes semblent bien

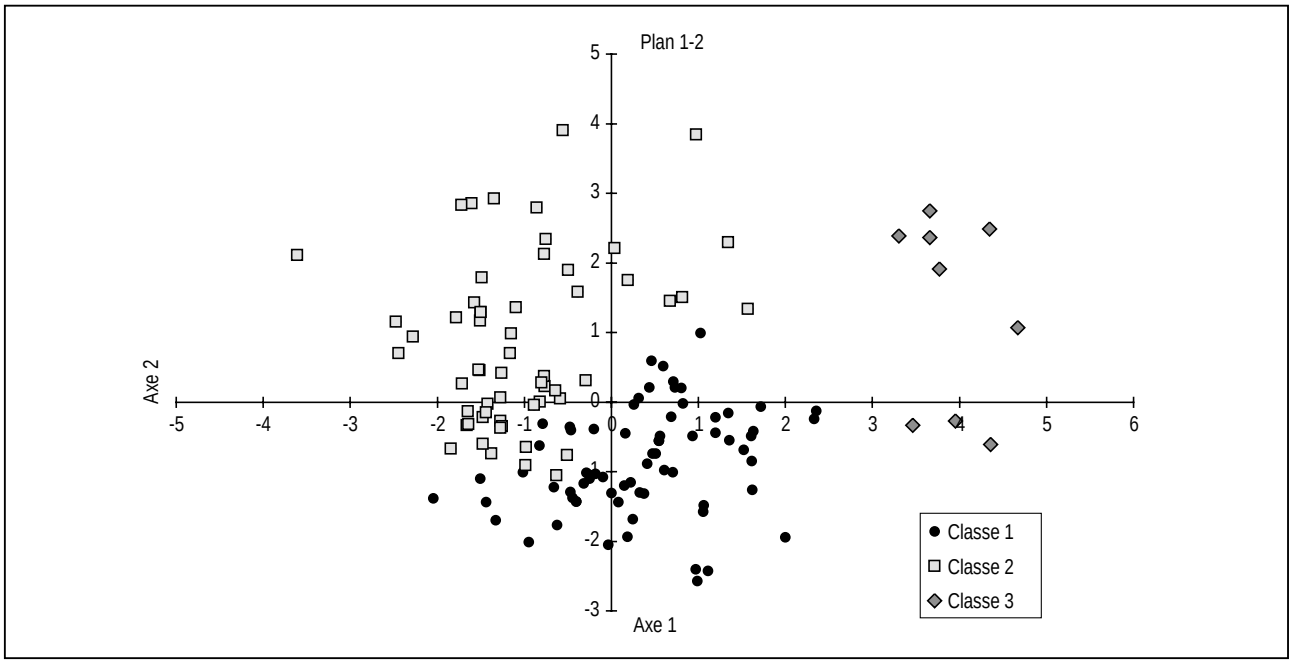
Tableau 2 - Répartition des individus par classes.
Table 2 - Repartition of the horizons among the three classes.

N° de classe	Effectif	Numérotation des individus					
1	71	F01H1	F01H2	F01H3	F01H4	F02H1	F02H2
		F03H1	F03H2	F03H3	F03H4	F04H1	F05H1
		F06H1	F07H1	F08H1	F08H2	F09H1	F09H2
		F10H1	F11H1	F11H2	F12H1	F12H2	F13H1
		F13H2	F14H1	F15H1	F15H2	F15H3	F15H4
		F16H1	F16H2	F17H1	F17H2	F17H6	F18H1
		F21H1	F21H2	F22H1	F22H2	F22H3	F23H1
		F24H1	F24H2	F24H3	F25H1	F26H1	F26H2
		F26H3	F27H1	F28H1	F29H1	F29H2	F29H3
		F29H4	F30H1	F30H2	F30H3	F31H1	F31H2
		F32H1	F33H1	F33H2	F33H3	F34H1	F35H1
		F38H1	F38H2	F38H3	F39H1	F39H2	
2	58	F03H5	F04H2	F06H2	F06H3	F07H2	F07H3
		F07H4	F08H3	F08H4	F09H3	F09H4	F10H2
		F10H3	F11H3	F11H4	F11H5	F12H3	F13H3
		F13H4	F13H5	F13H6	F14H2	F14H3	F15H5
		F16H3	F16H4	F16H5	F16H6	F17H3	F17H4
		F17H5	F18H2	F18H3	F18H4	F18H5	F19H1
		F19H2	F19H3	F23H2	F23H3	F23H4	F24H4
		F25H2	F25H3	F25H4	F27H2	F28H2	F28H3
		F28H4	F32H2	F32H3	F33H4	F33H5	F34H2
		F34H3	F34H4	F36H1	F36H2		
3	9	F20H1	F20H2	F22H4	F31H3	F35H2	F37H1
		F37H2	F40H1	F40H2			

Nomenclature :
Classe 1 : horizons les moins argileux
Classe 2 : horizons les plus argileux
Classe 3 : horizons calcaires

F = n° de fosse – H = n° de l'horizon dans la fosse
ex. F18H2 = 2e horizon de la fosse 18
ex. F16H6 = 1er horizon de la fosse 16

Figure 6 - Représentation de l'espace des individus selon les axes 1 et 2.
Figure 6 - Horizons plotted against the first two principal components of horizon variables.



ténues.

Si l'on considère maintenant les profondeurs pour lesquelles on rencontre ces deux sous-populations d'horizons, on remarque que les horizons les moins argileux se situent à une profondeur moyenne de 34 cm, alors que les horizons les plus argileux se rencontrent à une profondeur moyenne de 63 cm (tableau 3). Les deux groupes d'horizons sont donc bien toujours superposés, ceux appartenant au groupe 2 étant sous-jacents à ceux du groupe 1. La distribution des deux types d'horizon se fait par conséquent toujours dans le même ordre.

L'ensemble de ces résultats laisse donc supposer que l'origine de la différenciation des matériaux argilo-limoneux en groupes d'horizons serait plutôt d'origine sédimentaire que pédologique et que les dépôts de " limons " ainsi individualisés pourraient être de nature et d'âge différents.

Origine de la variation de teneur en argile

La différence significative de la taille des limons entre les deux groupes d'horizons et la distribution ordonnée de ces derniers dans le secteur d'étude indiquent l'existence d'une discontinuité dans le profil qui peut s'expliquer par :

- soit la différenciation d'une première couverture de sol à partir des produits de dissolution des calcaires aquitaniens (horizons appartenant au groupe 2) puis son recouvrement par un matériau d'origine éolienne (horizons appartenant au groupe 1). La teneur en argile plus élevée pour le groupe 2 s'expliquerait par les caractéristiques de la fraction non calcaire présente au sein des calcaires aquitaniens. Il serait alors intéressant de préciser la granulométrie et le rapport LF/LG de la fraction non carbonatée du calcaire aquitanien ;

- soit l'existence de deux apports éoliens successifs (horizons appartenant au groupe 2, puis ceux appartenant au groupe 1) sans que le premier apport n'ait subi de pédogenèse intense. La teneur en argile plus élevée du groupe 2 s'expliquerait par l'influence de matériaux argilo-sableux d'âge burdigalien (formation des sables et argiles de Sologne). Ceux-ci sont en effet plus fréquents que ne l'indiquent les cartes géologiques, remplissant des dépressions à la surface des calcaires aquitaniens dans le secteur d'étude (Chéry et al., 1996a et b). L'enrichissement en argile se serait alors réalisé par l'action d'intenses phénomènes de cryoturbations qui ont affectées la grande majorité des matériaux durant les dernières glaciations. Par la suite, la formation éolienne correspondant au groupe 1 se serait déposée sans subir de modifications de composition granulométrique. Cette formation éolienne aurait eu pour origine des formations géologiques moins argileuses et à teneur en limon grossier plus élevée. Ces dernières formations n'ont pas encore été identifiées ;

- soit par le développement d'une première couverture de sol, les horizons appartenant au groupe 1 correspondraient alors à ce que les sédimentologues et les géomorphologues appellent, vers l'ouest de la France, les " limons bruns feuilletés " d'âge Début

Tableau 3 - Comparaison des caractéristiques granulométriques des deux sous populations d'horizons limono-argileux à argilo-limoneux (résultats exprimés en pourcentage de terre fine non calcaire).

Table 3 - Comparison of the particle-size distribution characteristics of the clayey-loam to loamy-clay horizons (results are expressed as percentage of the non-calcareous < 2 mm fraction).

	Profondeur d'apparition (cm)	$CaCO_3$ (%)	Argile (%)	Limon Fin (%)	Limon Grossier (%)	Sable Fin (%)	Sable Grossier (%)	LF/LG
Groupe 1	71	71	71	71	71	71	71	71
Minimum	-100	0	27,1	27,6	29,8	0,9	0,0	0,78
Maximum	-10	8,2	35,6	36,9	37,0	2,6	2,6	1,22
Mode	-30	0	32,2	31,6	34,4	1,8	0,8	0,91
Médiane	-30	0	31,6	31,6	33,7	1,6	1,2	0,93
Moyenne	-34,3	1,0	31,5	32,0	33,6	1,6	1,3	0,96
Ecart-type	15,5	1,8	1,9	1,9	1,7	0,3	0,7	0,09
Groupe 2	58	58	58	58	58	58	58	58
Minimum	-100	0	33,8	27,3	23,8	1,1	0,1	0,86
Maximum	-24	17,7	44,6	35,9	33,1	2,7	4,6	1,43
Mode	-60	0	35,8	30,7	30,5	1,2	0,7	1,03
Médiane	-60	0	36,7	30,7	29,1	1,6	0,9	1,05
Moyenne	-63,3	0,5	37,2	30,9	29,0	1,6	1,3	1,07
Ecart-type	17,8	2,3	2,1	1,8	2,2	0,4	1,0	0,11
P [T > | t |]	0,000	0,150	0,000	0,001	0,000	0,410	0,834	0,000

Glaciaire, ceux-ci remaniant les formations antérieures (paléosol loessique éémien, sédiments tertiaires) (Lautridou, 1985). Selon Jamagne (1973), la base des formations loessiques récentes (d'âge würmien) serait d'ailleurs constituée dans le bassin de Paris par des paléosols datés du Riss. Ces formations possèdent une couleur brun rougeâtre (teinte 7,5YR) et une structure polyédrique angulaire très bien développée qui leur confère un aspect fendillé d'où le terme de " limon rouge fendillé " qui leur a été donné. De telles formations constitueraient alors des paléohorizons d'illuviation ou d'altération issus de sols originaux fortement tronqués. Les sols actuels ne seraient donc pas illuviés mais plutôt développés sur un " paléohorizon BT " ou un " paléohorizon S ". Quoiqu'il en soit, si les formations étudiées s'avéraient analogues à celles décrites dans la littérature, elles correspondraient à la description d'une séquence weichsélienne (Lautridou, communication orale).

Quelle que soit l'hypothèse retenue, il existe bien une discontinuité au sein de la couverture limono-argileuse à argilo-limoneuse dans le secteur étudié et la couverture pédologique actuelle s'est différenciée dans l'ensemble des formations recouvrant les calcaires aquitaniens.

CONCLUSION

A partir de l'étude des caractéristiques granulométriques de plus d'une centaine d'échantillons issus d'un secteur de Petite Beauce, nous avons pu démontrer l'existence de deux groupes d'horizons superposés possédant des teneurs en argile et en limon grossier différentes avec la profondeur, les plus profonds ayant une teneur en argile plus élevée.

L'existence de ces deux groupes d'horizons indique la présence d'une discontinuité au sein de la formation limono-argileuse à argilo-limoneuse. Cette discontinuité, vraisemblablement d'origine sédimentaire, traduit soit la présence d'une formation éolienne recouvrant une couverture pédologique qui s'est différenciée à partir des calcaires aquitaniens, soit la présence de deux phases de sédimentation éolienne séparées par une phase de pédogenèse ayant générée des paléosols fortement tronqués à la base des formations les plus récentes, soit encore deux phases de sédimentation sans que les premiers apports n'aient subi de pédogenèse intense.

Bien que la différence de teneur en limon grossier soit suffisante pour conclure à l'existence d'une discontinuité au sein de la formation limono-argileuse à argilo-limoneuse présente en Petite Beauce, les différences n'en demeurent pas moins

faibles entre les deux groupes d'horizons (comme le montre également leurs teneurs en sables quasi similaires). Cette ressemblance s'explique vraisemblablement par l'influence de l'intense activité biologique qui par brassage a eu pour effet de réduire les différences de composition, et ceci, d'autant plus facilement que les différences de composition ne devaient pas être très importantes à l'origine, et qu'il s'agissait de formations de faible épaisseur.

Enfin, cette étude constitue un apport à la connaissance des matériaux limono-argileux à argilo-limoneux qui recouvrent la Beauce. La discontinuité mise en évidence en Petite Beauce a en effet toutes les chances d'être également présente dans d'autres zones de la Beauce.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM. J.J. Macaire et J.P. Lautridou pour leurs précieux commentaires de lecture.

BIBLIOGRAPHIE

AFES, 1995 - Référentiel Pédologique, INRA éd., Paris.

Arrouays D., Duval O. et Renaux B., 1989 - Esquisse des paysages pédologiques du Loiret. Notice explicative de la carte pédologique du Loiret à 1/250 000, S.E.S.C.P.F-INRA, Orléans, 185 p.

Baize D. et Chrétien J., 1994 - Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne. Particularités morphologiques et pédogéochimiques. Etude et Gestion des Sols, Vol. 1, n° 2, pp. 7-27.

Bourennane H., 1992 - Analyse et modélisation de la distribution spatiale d'un volume pédologique d'après des critères morphométriques. Application au limon argileux sur un secteur de Beauce. D.E.A. Géosciences filière Pédologie, Université de Nancy I.

Bourennane H., 1997 - Etude des lois de distribution spatiale des sols de Petite Beauce. Application à la cartographie d'un horizon par couplage de méthodes morphométriques et géostatistiques. Thèse de l'Université d'Orléans, 217 p.

Chéry P., 1995 - Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce. Thèse de l'Université de Nancy I, 241 p.

Chéry P., Dabas M., Bruand A. et Voltz M., 1996a - Epaisseur de la couverture de sol et prospection géophysique par des méthodes électriques : étude de cas en Petite Beauce. Géologues, 109, pp. 17-23.

Chéry P., Bruand A., Dabas M., Renaux B. et Raison L., 1996b - Composition et extension d'une formation sableuse à argilo-sableuse recouvrant localement des calcaires aquitaniens à l'ouest de la Beauce. Bulletin d'Information du Bassin de Paris, Vol. 33, n° 2, pp. 15-19.

CPCS, 1967 - Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Classification des sols. Grignon (France), Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 87 p.

Crauser J.P., Harvatopoulos Y. et Sarnin P., 1989 - Guide pratique d'analyse des données. Les éditions d'organisation, 140 p.

Duval O. et Isambert M., 1992 - Notice explicative de la carte pédologique de Villamblain (Beauce) au 1/10.000ème. Contrat de recherche site expérimental de Villamblain. Rapport période 1991-1992. S.E.S.C.P.F. INRA, 38 p. et annexes.

FAO, 1989 - Carte Mondiale des Sols (1/5 000 000). FAO, Paris.

Gigot Cl. et Fedoroff N., 1973 - Notice explicative de la carte géologique au 1/50.000ème. Feuille de Patay (XXI-19), B.R.G.M, Orléans.

Gigout M., 1973 - L'altération périglaciaire du calcaire de Beauce. *In* : Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U, 78 p.

Jamagne M., 1973 - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du nord de la France. Thèse de doctorat d'état de l'Université de Gembloux, 440 p.

Jambu M., 1978 - Classification automatique pour l'analyse des données. 1-méthodes et algorithmes. Editions Dunod Paris, 310 p.

Lautridou J.P., 1985 - Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du nord-ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse de doctorat de l'Université de Caen, Centre de Géomorphologie, 908 p.

Lorain J.M., 1973 - La géologie du calcaire de Beauce. *In* : Le Calcaire de Beauce. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U, 78 p.

Macaire J.M., 1971 - Etude sédimentologique des formations superficielles sur le tracé de l'autoroute A10 entre Artenay et Meung / Loire. Thèse 3e cycle Université d'Orléans, 104 p.

Macaire J.M., 1972a - Sur le limon de la Beauce au Nord-Ouest d'Orléans (Loiret). Comptes Rendus à l'Académie des Sciences, Paris, tome 274, pp. 1 892-1 895.

Macaire J.M., 1972b - Le limon des plateaux dans le Loiret sur le tracé de l'autoroute A10. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 61, pp. 37-41.

Ménillet F., 1981 - Les lithofaciès des calcaires de Beauce (Stampien à Aquitanien) du Bassin de Paris (France). Bull. B.R.G.M, section IV, 1, pp. 15-25.

Nicoullaud B., Darthout R. et Duval O., 1995 - Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. Etude et Gestion des Sols, Vol. 2, n° 3, pp. 183-200.

Ould-Mohamed S., 1991 - Prise en compte de l'organisation du sol dans l'étude des transferts d'eau et de solutés. D.E.A. de pédologie, Université de Nancy I, 56 p.

Ould-Mohamed S. et Bruand A., 1994 - Morphology, location in voids and origin of secondary calcite in soils from Beauce (France). Soil Micromorphology : studies in management and genesis. A.J. Ringrose-Voase, G.S. Humphreys (eds.). Developments in Soil Science 22. Elsevier, Amsterdam, pp. 27-36.

Ould-Mohamed S., 1995 - Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de Petite Beauce. Application d'un modèle d'infiltration et incidence sur le lessivage du nitrate. Thèse de l'Université d'Orléans, 184 p.

Philippeau G., 1986 - Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales. Notice de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages, Services des études statistiques, Paris, 63 p.

Roux M., 1985 - Algorithmes de classification. Editions Masson, Paris, 151 p.

Sanders L., 1989 - L'analyse statistique des données en géographie. Collection Alidade, GIP RECLUS, Maison de la Géographie, Montpellier, 268 p.

Saporta G., 1990 - Probabilités, analyse des données et statistique. Editions Technip-Paris, 488 p.