

Les sols argileux appauvris en argile sous climat tempéré humide

PLANOSOLS texturaux, PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS et autres solums

Denis Baize

I.N.R.A., Unité de Science du Sol, SESCOF, 45160 Ardon - France

RÉSUMÉ

Sous climats tempérés humides, les sols développés à partir de matériaux sédimentaires argileux sont presque toujours appauvris en argile dans leurs horizons supérieurs, lorsqu'ils n'ont pas été tronqués par l'érosion en terrains cultivés.

Souvent confrontés, au cours de leurs travaux de cartographie, à des solums montrant un appauvrissement en argile morphologiquement très net (un changement textural brusque s'ajoutant à une forte différenciation texturale), les pédologues français ont peu à peu forgé deux catégories typologiques reconnues par le Référentiel Pédologique 1995 : les PLANOSOLS texturaux et les PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS. Les deux premières parties de cet article seront consacrées à décrire la morphologie et le fonctionnement de ces deux catégories de sols.

Mais, dans les mêmes paysages de plaines sédimentaires, de très nombreux solums peuvent être observés où l'appauvrissement en argile est évident mais qui ne présentent pas tous les caractères requis pour être rattachés aux PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS ou aux PLANOSOLS. Mal reconnus, peu étudiés et difficiles à rattacher aux référentiels habituels, ces solums seront envisagés dans une troisième partie.

Les quatre études approfondies réalisées en France et au Luxembourg sur les PÉLOSOLS et sur les PLANOSOLS (Nguyen Kha, 1973 ; Baize, 1983 ; Lamotte, 1986 ; Van Den Broek, 1989) mènent toutes aux mêmes conclusions : il y a départ latéral de particules argileuses et de limons fins évacués en suspension par des nappes perchées temporaires à écoulement latéral.

Tous les sols envisagés au cours de cet article ont en commun un climat tempéré océanique plus ou moins typique, avec une influence plus continentale en Lorraine (températures moyennes annuelles de l'air comprises entre 9 et 11 °C ; température moyenne de Janvier de + 0,5 à + 5 °C ; température moyenne de Juillet de 17 à 19 °C ; précipitations moyennes annuelles comprises entre 600 et 1000 mm, bien réparties tout au long de l'année). Leurs matériaux parentaux sont des roches sédimentaires argileuses marines ou lagunaires, datant du Trias, du Lias, du Crétacé inférieur, de l'Eocène ou du Miocène. Ces roches peuvent être calcaires ou non, le plus souvent riches en calcium et magnésium à l'origine. Parfois la roche-mère est une formation résiduelle résultant de la décarbonatation d'une craie glauconifère ou d'un dépôt loessique quaternaire. Ce ne sont jamais des alluvions. Dans le cas de sols argileux alluviaux, aucun gradient d'argile ne peut être observé.

Le processus d'appauvrissement en argile débute en milieu neutre, juste après la fin de la décarbonatation des matériaux calcaires. Il intervient ensuite dans un milieu de plus en plus acide, l'acidité étant finalement renforcée par l'acidolyse des minéraux argileux.

PLANOSOLS et PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS peuvent être observés en situations planes ou sur pentes faibles. Les autres sols argileux appauvris en argiles sont situés sur des versants plus pentus. Dans ce cas, une "course" débute entre les processus pédogénétiques

donnant naissance à des horizons de surface à texture plus grossière et les processus d'érosion qui tendent à tronquer la partie supérieure des solums, notamment sous cultures.

En conclusion (figure 4), il est établi que l'appauvrissement en argile se développe sous climat tempéré humide à chaque fois qu'un fonctionnement latéral est possible, c'est-à-dire lorsque le solum montre une faible perméabilité verticale due à un plancher argileux. Une pente est également nécessaire même si elle est très faible. L'appauvrissement en argile est un processus qui s'auto-accélère mais un tel phénomène ne peut modifier fortement la morphologie d'un solum que s'il peut agir pendant un long temps dans un paysage stable, protégé de l'érosion. C'est pourquoi les sols argileux appauvris en argile sont beaucoup plus fréquents sous forêts que sous cultures.

L'appauvrissement en argile et en fer est un processus naturel : les eaux vont rapidement rejoindre les ruisseaux et les rivières, chargées de particules argileuses. Les conséquences de ce "lessivage latéral" sont le départ rapide dans les eaux de sub-surface non seulement des argiles fines mais aussi de tous les produits ou déchets apportés dans les parcelles (pesticides, nitrates, éléments traces métalliques, etc.).

Mots clés

Sol argileux - appauvrissement - PÉLOSOL - PLANOSOL

SUMMARY

CLAY-IMPOVERISHED CLAYEY SOILS IN HUMID TEMPERATE CLIMATE

In humid temperate climate the soils developed in clayey sedimentary materials most often show clay-impoverishment in their upper horizons when not truncated by recent erosion. Being often faced during surveys with clayey soils showing a strong textural differentiation, French pedologists gradually built up two typological categories recognized by the Référentiel Pédologique 1995 : "textural PLANOSOLS" and "PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS" to which the two first parts of this paper are devoted.

Within the same landscapes of sedimentary plains, very numerous solums can be observed in which clay-impoverishment is evident but which do not present sufficiently distinct characters in order to be linked with PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS or with PLANOSOLS. Not very well studied, not very easy to be linked with usual taxonomies, these solums are dealt with in the third part of this paper.

The four detailed studies performed in France and Luxembourg (namely Nguyen Kha, 1973 ; Baize, 1983 ; Lamotte, 1986 ; Van Den Broek, 1989) lead to the same conclusion : a great amount of clay particles and a few fine silts are removed laterally from the upper horizons by subsurface water flows.

All the soils studied in this article have in common a more or less typical oceanic temperate climate, with a more continental trend in Lorraine (mean annual air temperatures between 9 and 11 °C ; mean temperature of January from + 0,5 to + 5 °C ; mean temperature of July from 17 to 19 °C ; mean annual rainfall between 600 and 1 000 mm, well spread over the year). Their parent materials are sedimentary marine or lagoonal clays dating from Trias, Lias, lower Cretaceous, Eocene or Miocene. These rocks are calcareous or not, most often initially rich in calcium and magnesium. Sometimes the parent materials are residual weathering formations, resulting from decarbonation of glauconiferous chalk or of quaternary loess-like deposits. They never are alluvium. In alluvial clay soils, no clay gradient can be observed. Are these materials too recent ? Is the cause a lack of slope thus a lack of lateral water flow ?

The clay-impoverishing process starts in a neutral soil, just after the end of the decarbonation of calcareous materials. It then goes on in an increasingly acid medium, the acidity being finally enforced by acidolysis of clay minerals.

PLANOSOLS and PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS can be observed in flat situations or on gentle slopes. Other clay-impoverished soils can be located on rather steep valley sides. In this case a "race" starts between pedological processes forming coarse textured horizons and erosion processes which can truncate the topsoil, particularly when under cultivation.

In conclusion (figure 4), it can be stated that clay-impoverishment develops in a humid temperate climate as often as a lateral functioning is possible, i.e. when the soil shows a low vertical permeability due to a clay-pan. A slope is necessary too, even if very slight. Clay-impoverishment is a self-accelerating process. Such a phenomenon can only strongly modify the solum morphology if it can act for a long time in stable landscapes, sheltered from erosion. That is why clay-impoverished clay soils are much more frequent under forest than under cultivation.

Some consequences for environmental preservation can be drawn : great amounts of water are rapidly flowing at shallow depth, carrying away clay particles and associated iron. This takes place in a non calcareous medium. In such soil mantles, organic and inorganic pollutants can be quickly redistributed in the landscape, whether under forest or under cultivated land.

Key-words

Clayey soil - impoverishment - PELOSOL - PLANOSOL.

RESUMEN**LOS SUELOS ARCILLOSOS EMPOBRECIDOS EN ARCILLA BAJO CLIMA TEMPLADO HÚMEDO****Planosoles texturales, Pelosoles Diferenciados y otros perfiles**

Bajo clima templado húmedo, los suelos desarrollados a partir de materiales sedimentarios arcillosos son casi siempre empobrecidos en arcilla en los horizontes superiores, cuando no fueron troncados por la erosión en campos cultivados.

Frecuentemente confrontados, en el curso de sus trabajos de cartografía, a perfiles mostrando un empobrecimiento en arcilla morfológicamente muy neto (un cambio textural brusco añadiéndose a una fuerte diferenciación estructural), los pedólogos franceses han, poco a poco, forjado dos categorías tipológicas reconocidas por el Referencial Pedológico 1995 : Los planosoles texturales y los Pelosoles Diferenciados. Las dos primeras partes de este artículo serán consagradas a describir la morfología y el funcionamiento de estas dos categorías de suelos

Pero, en los mismos paisajes de planicies sedimentarias, muy numeros perfiles pueden ser observados donde el empobrecimiento en arcilla es evidente pero no presentan todos los caracteres necesarios para ser ligados a los Pelosoles Diferenciados o a los Planosoles. Poco reconocidos, poco estudiados y difíciles de ligarlos a las referencias habituales, estos perfiles serán discutidos en una tercera parte.

Los cuatro estudios profundizados realizados en Francia y en Luxemburgo sobre los Pelosoles y los Planosoles (Nguhen, 1973 ; Baize, 1983 ; Lamotte, 1986 ; Van Den Brœck, 1989) llegan todos a las mismas conclusiones : hay salida lateral de partículas arcillosas y de limos finos evacuados en suspensión por mantos superficiales temporarios con escurrimiento lateral.

Todos los suelos considerados en este artículo tienen en común un clima templado oceánico más o menos típico, con influencia más continental en Lorraine (temperaturas medias anuales del aire entre 9 y 11 °C ; temperaturas medias de enero de 0,5 a 5 °C ; temperatura medias de julio de 17 a 19 °C ; precipitaciones medias anuales entre 600 y 1 000 mm., bien repartidas o lo largo del año). Sus materiales parentales son rocas sedimentarias arcillosas marinas o lagunarias, del Triásico, del Cretácico inferior, del Eoceno o del Mioceno. Estas rocas pueden ser calcáreas o no, a menudo ricas en calcio y magnesio al principio. A veces la roca madre es una formación residual que resulta de la decarbonatación de una creta glauconífera o de un depósito de loess cuaternario. Jamás son aluviones. En el caso de los suelos arcillosos aluviales, ningún gradiente de arcilla puede ser observado.

El proceso de empobrecimiento en arcilla empieza en medio neutro, después del fin de la decarbonatación de los materiales calcáreos. Después interviene en un medio cada vez más ácido, el acidez siendo reforzado por el acidólisis de los minerales arcillosos.

“Planosoles” y “Pelosoles Diferenciados” pueden ser observados en situación planas o sobre pendientes ligeras. Los otros suelos arcillosos empobrecidos en arcillas están localizados sobre vertientes de pendientes más fuertes. En este caso, una “carrera” empieza entre los procesos pedogenéticos dando nacimiento a horizontes de superficie con textura más gruesa y los procesos de erosión que tienden a troncar la parte superior de los perfiles, particularmente en los campos cultivados.

En conclusión (figura 4), está establecido que el empobrecimiento en arcilla se desarrolla bajo clima templado húmedo cada vez que un funcionamiento lateral es posible, es decir cuando el perfil muestra una pequeña permeabilidad vertical debida a una capa arcillosa. Una pendiente es igualmente necesaria incluso si es muy ligera. El empobrecimiento en arcilla es un proceso que se autoacelera pero un tal fenómeno no puede modificar fuertemente la morfología del perfil solo si este puede actuar duramente en un paisaje estable, protegido de la erosión. De ahí que los suelos arcillosos empobrecidos en arcillas sean más frecuentes bajo selva que cultivos. El empobrecimiento en arcilla y en hierro es un proceso natural : las aguas se escurren rápidamente en los arroyos y los ríos, cargados en partículas arcillosas. Las consecuencias de esta “lixiviación lateral” son la salida rápida en las aguas de sub-superficie no solamente de las arcillas finas pero también de los productos o desechos aportados en las parcelas (pesticidas, nitratos, elementos metálicos, etc.)

Dans les régions tempérées humides, les sols développés à partir de matériaux sédimentaires argileux sont presque toujours appauvris en argile dans leurs horizons supérieurs, lorsqu'ils n'ont pas été tronqués par l'érosion en terrains cultivés.

Souvent confrontés, au cours de leurs travaux de cartographie, à des solums montrant un appauvrissement en argile morphologiquement très net (un changement textural brusque s'ajoutant à une forte différenciation texturale), les pédologues français ont peu à peu forgé deux catégories typologiques reconnues par le Référentiel Pédologique 1995 : les PLANOSOLS texturaux et les PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS. Les deux premières parties de cet article seront consacrées à décrire la morphologie et le fonctionnement de ces deux catégories de sols.

Mais, dans les mêmes paysages de plaines sédimentaires, de très nombreux solums peuvent être observés où l'appauvrissement en argile est évident mais qui ne présentent pas tous les caractères requis pour être rattachés aux PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS ou aux PLANOSOLS. Mal reconnus, peu étudiés et difficiles à rattacher aux référentiels habituels, ces solums seront envisagés dans une troisième partie.

En dernier lieu, seront précisés les processus mis en jeu, les facteurs de l'existence de tous ces sols plus ou moins appauvris en argile et les causes de leurs différences.

LES PLANOSOLS TEXTURAUX "PRIMAIRES"

Remarques préliminaires

Nous n'envisagerons dans ce chapitre que les PLANOSOLS "pédomorphes" c'est-à-dire dont la différenciation texturale résulte uniquement de l'évolution pédogénétique de sédiments initialement argileux. "Pédomorphe" s'oppose donc à "sédimorphe" qui qualifie un solum dont la différenciation texturale est la conséquence d'une sédimentation hétérogène de la roche-mère (on disait auparavant "lithomorphe" ; Favrot et Legros, 1972).

En outre, nous traiterons surtout des PLANOSOLS pédomorphes primaires c'est-à-dire de ceux dont la différenciation s'est opérée directement à partir d'un matériau argileux et non des PLANOSOLS pédomorphes secondaires dont la morphologie planosolique résulte d'un processus pédogénétique antérieur : - soit par exemple une intense illuviation d'argile dans des matériaux limoneux aboutissant à très long terme au colmatage d'un horizon profond devenant imperméable (Bégon et Jamagne, 1972 ; Jamagne et Bégon, 1984) ; - soit une forte néoformation d'argile par altération de minéraux primaires volcaniques et granitiques suivie d'une illuviation puis d'un colmatage (Feijtel *et al.*, 1988).

Caractéristiques :

Pour être rattaché pleinement aux PLANOSOLS "texturaux" (PLANOSOLS TYPIQUES et PLANOSOLS DISTAUX) un solum doit cumuler les quatre caractères suivants (Référentiel Pédologique 1995) :

1°) Une forte **différenciation texturale** entre horizons supérieurs pauvres en argile, assez perméables (notés E), et horizons plus profonds, beaucoup plus argileux et très peu perméables (notés S ou BT) et constituant le "plancher".

2°) Entre les horizons E et les horizons S structuraux, il y a un "**changement textural brusque**". Cela signifie qu'en quelques centimètres comptés verticalement, la teneur en argile passe du simple à plus du double ou presque (par exemple de 16 à plus de 32 % d'argile ou de 25 à plus de 45 % d'argile).

3°) Le contact E/S doit être **sub-horizontale**, ce qui exclut un contact en glosses larges et profondes.

4°) Saisonnièrement, les horizons E sont (au moins en partie) le siège de **nappes perchées temporaires à écoulement essentiellement latéral**. Il en résulte des phénomènes d'oxydo-réduction qui se marquent par des décolorations et/ou des précipités d'oxy-hydroxydes de fer.

Le caractère "albique" dans l'horizon E est fréquent mais non obligatoire.

Pédogenèse et fonctionnement

A notre connaissance, deux auteurs seulement ont étudié de façon approfondie la pédogenèse des PLANOSOLS texturaux pédomorphes primaires en France.

Baize (1983, 1989) a consacré sa thèse aux PLANOSOLS de Champagne Humide, sols actuellement très acides, issus de diverses argiles ainsi que des "sables verts" du Crétacé inférieur. Des études granulométriques, physico-chimiques, minéralogiques et micromorphologiques ont été menées sur 7 solums sélectionnés à partir de 60 fosses. Le régime hydrique des sols a été suivi pendant 5 ans sur deux sites. En voici les principales conclusions.

ζ 200 à 420 mm de pluies sont évacuées annuellement par des nappes perchées temporaires à écoulement latéral.

ζ **4 bilans isoquartz** ont confirmé que la forte différenciation texturale résulte de l'entraînement latéral de particules argileuses hors des horizons de surface, sans accumulation notable dans les horizons profonds (*tableau 1*).

ζ **L'évolution texturale** a pu être reconstituée comme suit, en 3 phases.

PHASE 1 : Création d'une macro-porosité structurale physique et biotique, jusqu'à un **plancher structural**. Début d'une circulation latérale de l'eau = début de l'appauvrissement (Cf. PÉLOSOLS).

PHASE 2 : Petit à petit, l'appauvrissement et l'altération allant croissants, le plancher structural s'approfondit et se trans-

forme en **plancher textural**.

PHASE 3 : Les horizons superficiels présentent une porosité croissante par rapport aux horizons sous-jacents qui demeurent fort peu perméables. Le débit d'eau circulant latéralement s'accroît et l'appauvrissement s'auto-accélère. Le caractère planique ne peut que se renforcer.

ζ **L'évolution physico-chimique** peut être décrite en cinq étapes.

ÉTAPE 1 : début de la structuration pédologique et de l'altération (libération du fer). Décarbonatation (si le matériau parental était calcaire). Formation d'argile par désagrégation des grains de glauconie (cas des "sables verts" albiens).

ÉTAPE 2 : approfondissement des trois processus mentionnés ci-dessus. Début de désaturation du complexe adsorbant. Les minéraux argileux demeurent inaltérés. Tendance à l'engorgement des horizons de surface par les eaux de pluie.

ÉTAPE 3 : apparition de véritables traits hydromorphes à faible profondeur en relation avec des cycles réduction/réoxydation. Accroissement de la désaturation du complexe et début de l'aluminisation. Ouverture progressive des feuillets des argiles micacées.

ÉTAPE 4 : aggravation des engorgements. Une acidité minérale assez forte (pH < 5,0) s'installe progressivement. Un phénomène d'illuviation secondaire débute, résultant de la "dégradation" des minéraux argileux au sommet des horizons S (Pédro *et al.*, 1978). Dans un milieu aussi désaturé et temporairement réducteur, les argiles se dissocient du fer et sont susceptibles d'être évacuées séparément.

ÉTAPE 5 : acidité et engorgements continuent de croître. Possibilité d'une destruction totale de certains minéraux argileux par autolyse acide. La podzolisation a été observée dans les horizons de surface (suite à un changement de la végétation, par exemple) mais elle n'est nullement obligatoire.

Un certain nombre de facteurs peuvent ralentir grandement ces évolutions tant physiques que physico-chimiques et limiter la descente progressive du "changement textural brusque". On peut citer : i) la présence de CaCO₃ dans le matériau parental

(remontée du Ca⁺⁺ par le cycle bio-géochimique) ; ii) des teneurs en argile > 50 % (dans de tels cas, il y a une énorme quantité d'argile à désaturer, à évacuer ou à altérer) ; iii) matériau parental très peu perméable (par exemple à granulométrie bimodale argilo-sableuse - ou à sédimentation très dense) en conséquence de quoi tous les processus viennent se heurter à un véritable "claypan" ; la dynamique de l'eau est totalement latérale et l'abaissement du contact planique est beaucoup plus lent.

A l'inverse, certains facteurs accélèrent la différenciation du solum : i) l'existence de sulfures dans la roche-mère dont l'oxydation peut causer précocement une très forte acidité minérale (transformation de pyrite en jarosite - cas des "sables verts" albiens) ; ii) matériaux moins argileux et plus perméables ; iii) zones où transitent des flux d'eaux plus importants, d'où un appauvrissement en argile plus rapide.

ζ La formation des PLANOSOLS pédomorphes primaires de Champagne humide est donc liée à deux facteurs stationnels : des roches-mères argileuses peu perméables et une position topographique sub-horizontale. A la différence des matériaux sableux et limoneux, ces matériaux argileux connaissent, dès l'origine, une dynamique hydrique essentiellement latérale.

Deuxième auteur à avoir travaillé sur les PLANOSOLS en France, Lamotte (1986) a étudié de tels sols en Forêt d'Orléans, développés dans une formation sableuse et argileuse deltaïque du Burdigalien. Il se livre à une "analyse structurale" très approfondie d'une parcelle forestière.

Sauf dans les fonds des petits talwegs, les couvertures pédologiques présentent toujours la même superposition d'horizons (*figure 1*) : - des horizons sableux, à structure particulière, épais de 60 cm environ, d'abord humifères et noirâtres puis bruns, enfin nettement blanchis et présentant de nombreux gros nodules ferrugineux ; - des horizons argilo-sableux à structure prismatique, panachés gris et rouille ; - enfin, débutant entre un et deux mètres de profondeur, des horizons argileux lourds, plastiques, dépourvus de sables, gris-verdâtres.

Les conclusions de Lamotte sont que le contact inférieur argile sableuse/argile lourde verdâtre résulte de la sédimenta-

Tableau 1 - PLANOSOLS de Champagne Humide (Baize, 1983). Bilans isoquartz - pertes et gains de matière (en kg/dm²).

Table 1 - Isoquartz balances - losses and gains of matter (in kg/dm²).

| Solum : | Héry | Pontigny | Flogny | Rebourseaux |
|------------------------------|--------|----------|--------|-------------|
| Pertes dans les horizons E : | - 4,57 | - 3,02 | - 3,81 | - 3,48 |
| <i>Losses in E horizons</i> | | | | |
| Gains dans les horizons S : | + 0,69 | + 0,85 | + 1,14 | + 0,04 |
| <i>Gains in S horizons</i> | | | | |

tion deltaïque. Mais, en ce qui concerne le contact planique supérieur sable/argile sableuse, il conclut que "le contact planique serait le siège d'une double transformation (désargilisation et déferrification) agissant "per descensum" et affectant l'horizon argilo-sableux à son sommet pour ne laisser sur place qu'un squelette quartzé et des reliques (nodules ferrugineux)...".

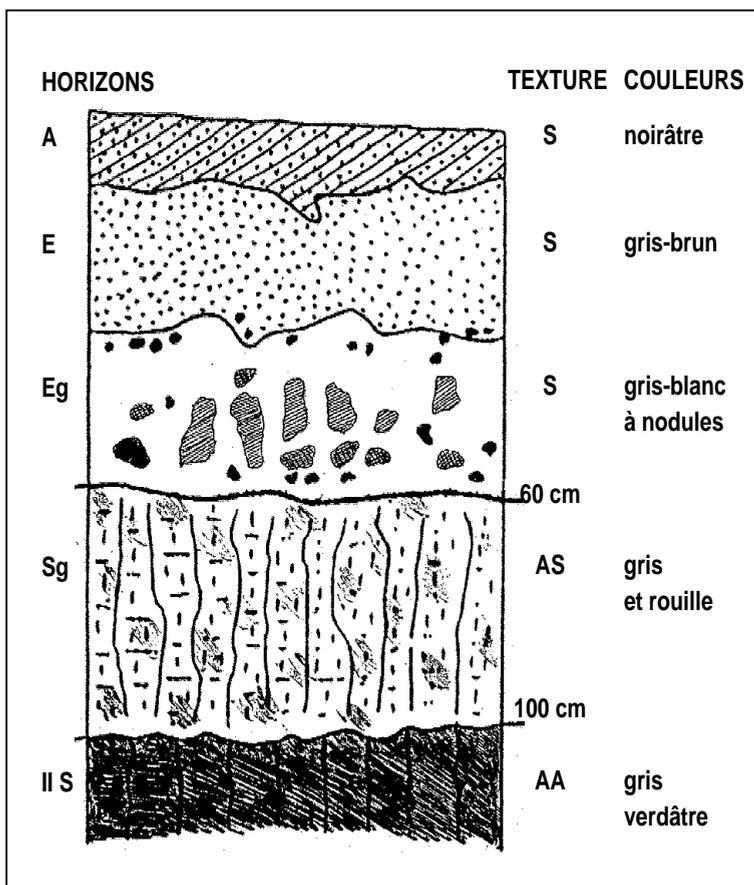
LES PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS

Caractéristiques (d'après le Référentiel Pédologique 1995)

Pour être rattaché aux PÉLOSOLS, un solum doit être : - argileux ou argileux lourd dès la surface ou à proximité de la surface ; - riche en limons fins ; - très peu évolué au plan géochimique ; - mais présentant une **structuration marquée** plus ou moins verticale - et des **propriétés physiques et hydriques défavorables** (passage rapide "du mastic au béton" pour une faible diminution de la teneur en eau).

Figure 1 - Morphologie du solum étudié par LAMOTTE (1986) en Forêt d'Orléans.

Figure 1 - Morphology of the solum studied by LAMOTTE.



Dans le cas particulier des PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS (antérieurement appelés "pélosols pseudogley") deux caractères additionnels sont nécessaires. D'une part, un horizon pauvre en argile doit exister en surface, limoneux ou limono-argileux (en tous cas moins de 30 % d'argile), et ne devant pas excéder 30 cm d'épaisseur.

D'autre part, des engorgements temporaires se manifestent à la base de cet horizon, donc à faible profondeur, et provoquent des difficultés d'implantation, de survie et de croissance aux cultures annuelles comme aux essences forestières.

Pédogenèse et fonctionnement

La première étude publiée en France date de 1965. Il s'agit d'un article signé par Bonneau, Duchaufour, Millot et Paquet. Puis Nguyen Kha consacre sa thèse aux PÉLOSOLS en 1973. Le même auteur publie ensuite un article avec Rouiller et Souchier (1976). Tous ces travaux traitent de sols situés en Lorraine, issus d'argiles ou de marnes du Trias. On peut aussi se référer à des études plus cartographiques ou agronomiques : - les notices des cartes pédologiques à 1/100 000 feuilles Saint Dié (Bonneau *et al.*, 1978) et Saint Dizier (Dutil, 1992 - levés 1968-1973) ; - la thèse de Florentin (1982), etc.

L'article de Nguyen Kha *et al.* de 1976 débute en faisant le point des acquis de la thèse publiée trois ans plus tôt : "au point de vue pédogénétique, les PÉLOSOLS sont caractérisés surtout par des mécanismes d'altération très discrets attestés par la prédominance des minéraux argileux hérités... Ces caractéristiques de sols faiblement évolués sont en totale opposition avec des pertes de matières particulièrement élevées que font ressortir les bilans d'altération. Le déficit de matière ainsi calculé dans les PÉLOSOLS serait dû à un appauvrissement mécanique superficiel par entraînement sélectif d'argiles fines...".

L'article expose les résultats obtenus grâce à un dispositif expérimental de terrain : des plaques métalliques étanches enfoncées dans le sol à 20 et 60 cm de profondeur. Ce dispositif a permis de vérifier et de quantifier ces pertes d'argiles sur un PÉLOSOL uniformément argileux situé sur une pente de 25 %. Les eaux recueillies à 20 cm de profondeur

correspondent à un ruissellement dit "hypodermique", celles recueillies à 60 cm de profondeur correspondent plutôt à des eaux de drainage oblique. La composition des particules en suspension dans ces eaux est présentée aux *tableaux 2 et 3*. Sur deux années d'observation, les pertes de matières par ruissellement hypodermique représentent 400 kg/ha/an, soit 0,4 pour mille de l'argile de l'horizon 0-20 cm, et 600 kg/ha/an par drainage oblique qui peuvent provenir de l'ensemble des horizons supérieurs (0-60 cm).

L'hypothèse des "limons allochtones"

Les différents auteurs ayant travaillé en Lorraine font tous appel à des "limons allochtones" pour expliquer la présence d'horizons "légers" à la partie supérieure des PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS. Ils soulignent en général l'absence d'argilanes et donc l'absence de "lessivage d'argile" mais ils ne présentent guère d'arguments pour étayer cette hypothèse de deux matériaux superposés, sauf, parfois, un argument granulométrique.

Il est vrai que le simple calcul des "squelettes" fait souvent

apparaître des différences granulométriques entre l'horizon de surface pauvre en argile et les horizons argileux immédiatement sous-jacents, les horizons superficiels semblant nettement plus riches en sables. Ceci fait naturellement penser à l'existence de deux couches sédimentaires différentes.

Cependant l'argument granulométrique pris isolément est dangereux à manier, et ce pour quatre raisons :

- Nous sommes en présence d'horizons riches en argiles, saturées en calcium et magnésium, difficiles à disperser ; il faut parfois un pré-traitement aux ultra-sons pour obtenir une bonne dispersion donc une bonne granulométrie.

- Une autre hypothèse déjà évoquée par Bonneau *et al.* (1965) est l'existence de grandes variations granulométriques dans la roche-mère, variations qui se retrouveraient aujourd'hui dans les horizons du solum.

- Nguyen Kha (1973) a établi dans sa thèse que, dans les fractions granulométriques limons fins, il y a beaucoup de minéraux phylliteux susceptibles de se micro-diviser par altération modérée, passant de la fraction limons fins à la fraction

Tableau 2 - Granulométries comparées de l'horizon A1 du Pélosol (0-20 cm) et des suspensions recueillies dans les eaux (Nguyen Kha *et al.*, 1976).

Table 2 - Compared particle size distributions of the A1 horizon of the Pélosol and of suspensions collected in waters.

| | Argiles <i>Clays</i> | Limons fins <i>Fine silts</i> | Limons grossiers <i>Coarse silts</i> | Sables totaux <i>Total sands</i> |
|--|-------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| | < 2 μm | 2-20 μm | 20-50 μm | 50-2000 μm |
| Horizon A1 | 51 | 28 | 11 | 10 |
| Ruissellement <i>Subsurface runoff</i> | 90 | 9 | 1 | |
| Drainage oblique <i>Oblique deep flow</i> | 93 | 7 | tr. | |

Tableau 3 - Granulométries et teneurs pondérales en carbone des fractions < 2 μm de l'horizon A1 du Pélosol (0-20 cm) et des suspensions recueillies dans les eaux (Nguyen Kha *et al.*, 1976).

Table 3 - Particle size distributions and weight carbon contents of fine fractions < 2 μm in the A1 horizon of the Pélosol and of suspensions collected in waters.

| | Argiles fines (< 0,2 μm) <i>Fine clays (< 0,2 μm)</i> | | Argiles grossières (0,2-2 μm) <i>Coarse clays (0,2-2 μm)</i> | |
|--|---|----------|---|----------|
| | Poids g/100g | C g/100g | Poids g/100g | C g/100g |
| Horizon A1 | 43 | 2 | 57 | 7 |
| Ruissellement <i>Subsurface runoff</i> | 76 | 7 | 24 | 9 |
| Drainage oblique <i>Oblique deep flow</i> | 86 | 6 | 14 | 9 |

argile.

- Enfin, l'expérimentation menée par Nguyen Kha *et al.* (1976) montre qu'il y a aussi appauvrissement en particules de la taille des limons fins, d'où une possible accumulation relative des particules les plus grossières.

Il y a deux types d'arguments qui vont à l'encontre de cette hypothèse de "limons" allochtones :

- Dans la plupart des cas, l'épaisseur des horizons limoneux est de 50 cm ou moins : 30, 20, 15 cm. De telles épaisseurs font plus penser à des horizons pédogénétiques en cours de formation qu'à des "placages de limons".

- Puisque l'appauvrissement en argile est actif dans les PÉLOSOLS, on comprend aisément que la prolongation de cet appauvrissement pendant plusieurs milliers d'années puisse mener à la formation *in situ* d'horizons de surface pauvres en argile, donc autochtones.

En 1989, le débat était donc loin d'être clos. Il manquait une étude focalisée sur les relations entre les horizons de surface moins argileux et les horizons plus profonds, très argileux. Il était admis comme probable que les deux cas pouvaient exister : soit horizons pédogénétiques soit "limons" allochtones,

selon les circonstances locales.

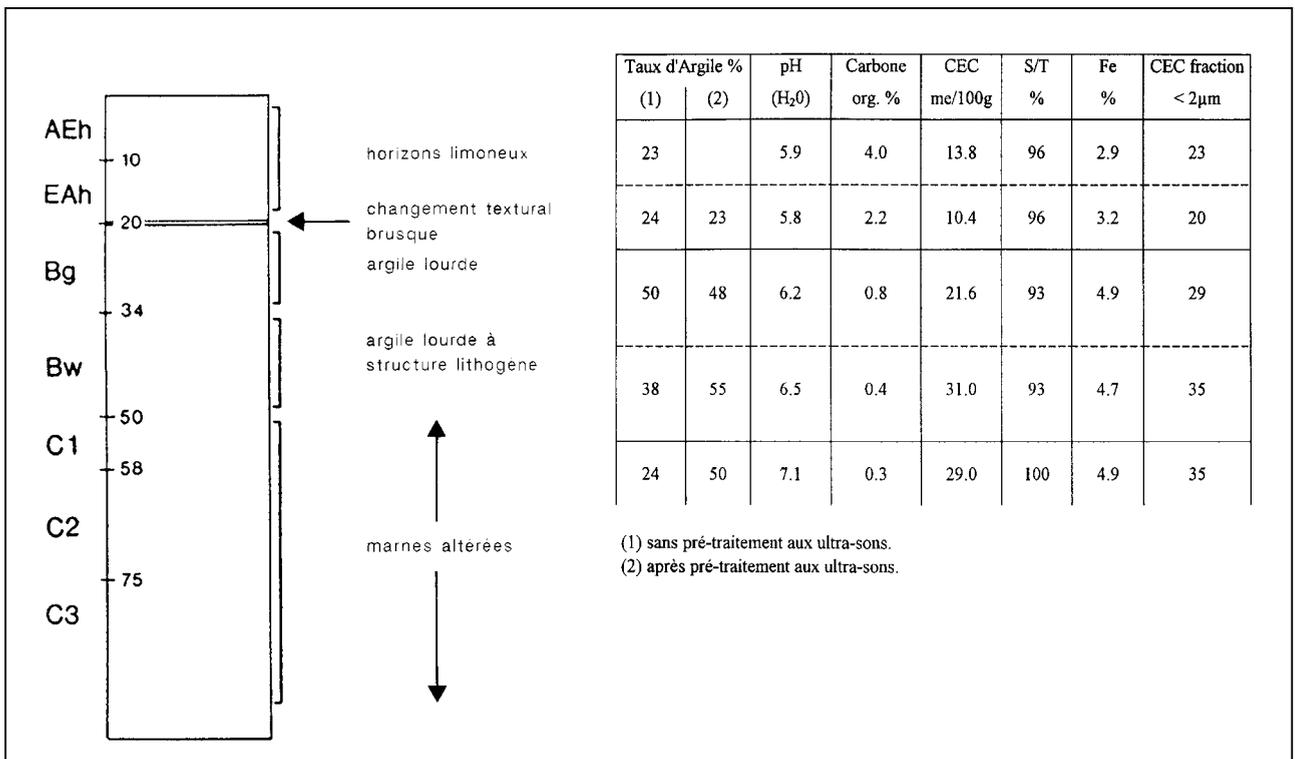
Cette même année, le débat s'est enrichi grâce à la thèse de Van Den Broek (1989). Cet auteur réalisa une étude pédologique et hydrologique d'un bassin versant forestier au Luxembourg. Un solum fut particulièrement étudié, intermédiaire entre PLANOSOL TYPIQUE et PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ (figure 2), développé à partir des marnes bariolées du Keuper ("Steinmergel").

Les deux horizons supérieurs de texture limoneuse et présentant une macroporosité biologique ont été notés AEh et EAh. Leur épaisseur cumulée n'est que de 20 cm. A cette profondeur, on observe un passage brutal à un horizon argileux, tacheté, à structure polyédrique anguleuse, noté Bg. De 24 % d'argile dans l'horizon EAh on passe à 50 % d'argile dans le Bg. De 34 à 50 cm est décrit un horizon argileux Bw ayant conservé pour l'essentiel une structuration lithologique. Au delà de 50 cm de profondeur sont les horizons C correspondant aux marnes peu altérées. En outre, il est signalé que le contact planique occasionne à certaines époques de l'année l'apparition d'une nappe perchée temporaire.

Après avoir vérifié l'homogénéité initiale du matériau parental, Van Den Broek constate :

Figure 2 - Quelques éléments relatifs au solum étudié par Van den BROEK (1989).

Figure 2 - Some elements relating to the solum studied by Van den BROEK.



- l'absence de maximum du rapport argile fine/argile totale dans l'horizon Bg (un tel maximum est classiquement considéré comme caractéristique du lessivage d'argile) ;
- une teneur constante en argile dans les horizons Bg, Bw et C1 (après pré-traitement aux ultrasons) ;
- l'absence d'argilanes en Bg ;
- une composition minéralogique des argiles constante sur toute l'épaisseur du solum, les minéraux argileux étant simplement hérités des marnes du Keuper sous-jacentes.

Une première conclusion est que l'horizon codé initialement Bg est bien un horizon d'altération résultant seulement de la transformation physique du matériau parental. La conclusion finale de Van Den Broek est que "le mécanisme qui joue le rôle majeur dans le développement du changement textural brusque est le transport latéral d'argile dispersée" (sans oublier un peu de limon fin).

On voit donc que les quatre études approfondies faites en France et au Luxembourg sur les PÉLOSOLS et sur les PLANOSOLS mènent toutes aux mêmes conclusions : **il y a départ latéral de particules argileuses et de limons fins.**

AUTRES SOLUMS ARGILEUX APPAUVRIS EN ARGILE

Caractéristiques morphologiques

Ces solums ressemblent plus ou moins aux deux catégories qui viennent d'être présentées. Il y a toujours des différences importantes de teneurs en argile dans le solum, les horizons supérieurs étant nettement plus pauvres. Mais, par rapport aux PLANOSOLS TYPIQUES, il leur manque toujours **au moins un caractère** :

- souvent la **transition** est assez **graduelle**, elle se fait en 20, 30 ou 40 cm ;
- ou bien les **signes d'hydromorphie** sont **modestes voire absents**, ne correspondant pas à l'existence de nappes saisonnières durables ;
- ou bien le **contraste textural** est **insuffisant** et il n'y a **pas de véritable horizon E**, car l'horizon supérieur n'a pas de couleur claire et garde une texture assez argileuse, même s'il y a de notables différences de teneurs en argile avec les horizons S sous-jacents (par exemple 40 à 58 %).

Les exemples sont très nombreux dans la littérature et notamment dans les notices de cartes à 1/100 000 ou 1/50 000. Les pédologues cartographes ont rencontré de grosses difficultés pour désigner ou classer ces solums argileux plus ou moins appauvris.

Le plus souvent, ils ont été apparentés aux "sols bruns lessivés" plus ou moins hydromorphes (Bonneau *et al.*, 1978). D'autres dénominations ont été employées, s'appuyant sur tel

ou tel caractère comme l'acidité ou la différenciation texturale. Tributaires des connaissances de l'époque où elles ont été formulées et de la maturation des concepts de PLANOSOLS et de PÉLOSOLS, elles paraissent aujourd'hui peu satisfaisantes car incapables de rendre compte à la fois du caractère d'appauvrissement en argile et de la profonde différence de comportement et de genèse de ces solums avec les LUVISOLS.

- "sols vertisoliques brunifiés en surface" (Bonneau *et al.*, 1965)
- "sols apparentés aux sols lessivés glossiques hydromorphes" (Bégon *et al.*, 1977)
- "sols apparentés aux sols bruns lessivés hydromorphes" (Baize, 1980)
- "sols apparentés aux sols lessivés dégradés - sols planosoliques" (Isambert, 1984)
- "pseudogley sur sable et argile, peu désaturé" (Girault, 1988)
- "sols bruns acides" et "sols à comportement planosolique" (Boutin *et al.*, 1990).

A noter enfin la formule descriptive retenue dans la notice de la carte Saint Dizier (Dutil, 1992) : "sols argilo-limoneux à profils différenciés par un gradient d'argile (rattachés aux pélosols)".

Interprétation

Si l'on excepte les sols notoirement "à deux couches", il peut s'agir :

- soit de PLANOSOLS "adultes" qui auraient été tronqués ;
- soit de sols encore jeunes, en début d'appauvrissement ;
- soit de sols à fonctionnement hybride, intergrades PLANOSOLS-LUVISOLS, développés dans des matériaux argileux, argilo-limoneux ou argilo-sableux (Baize, 1983).

Désignation selon le Référentiel Pédologique

Des catégories ont été spécialement définies pour les sols fortement différenciés présentant un contact planique marqué (cf. ci-dessus) : PLANOSOLS TYPIQUES (auxquels on peut ajouter des qualificatifs comme pedomorphe, sédimorphe, d'appauvrissement, etc.) et PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS. Mais comment désigner au mieux les autres solums argileux appauvris en argile ?

Outre le qualificatif "argileux" qui doit être employé pour rappeler la texture dominante du solum dans les horizons de moyenne profondeur, le qualificatif "appauvri" est nécessaire. En voici la définition (Référentiel Pédologique 1995).

Appauvri : qualifie un solum (autre que LUVISOL, PÉLOSOL DIFFÉRENCIÉ ou PLANOSOL) dont les horizons de surface ont été appauvris en argile par un processus pédologique *in situ*. Le processus est insuffisant pour conduire à la différenciation d'horizons E typiques.

Exemples de désignations :

- PÉLOSOL BRUNIFIÉ appauvri, sub-saturé, issu d'argile hettan-

gienne,

- BRUNISOL MÉSOSATURÉ argileux, rédoxique, appauvri, argilo-sableux en profondeur, à eumull, issu des argiles du Blésois,

- CALCISOL argileux, appauvri, cultivé, issu de marne grise sinémurienne.

Le qualificatif "planosolique" peut également être utile : il qualifie un solum où il y a passage sub-horizontale et sans transition entre un horizon E et un horizon BT ou entre un E et un horizon S ou entre un E et un FS (qualifie des non-PLANOSOLS).

Exemple : BRUNISOL RESATURÉ argileux, appauvri, planosolique, cultivé, de marne cénomaniennne glauconieuse.

On pourrait même envisager un rattachement double du genre BRUNISOL - PLANOSOL. Tout dépend des propriétés du solum à dénommer : de la différenciation texturale et de la netteté de la transition entre horizons supérieurs appauvris et horizons sous-jacents non appauvris.

CARACTÈRES COMMUNS DE TOUS LES SOLS ÉVOQUÉS - LOCALISATION

La carte de la figure 3 présente les principales localisations connues des sols argileux appauvris en argile dans le Bassin Parisien. Tous les sols envisagés au cours de cet article ont en commun un certain nombre de caractères stationnels.

Climat

C'est un climat tempéré océanique plus ou moins altéré, avec une influence plus continentale en Lorraine.

Températures moyenne annuelle : comprises entre 9 et 11 °C ;
Température moyenne de janvier : comprise entre + 0,5 et + 5 °C ;

Température moyenne de juillet : comprise entre 17 et 19 °C ;

Un certain nombre de données relatives au régime pluviométrique figurent au tableau 4. Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 600 et 1 000 mm. On notera, en outre :

- que ces pluies sont assez bien réparties tout au long de l'année,

- que les régions les plus arrosées sont aussi celles qui connaissent le plus grand nombre de fortes pluies.

L'existence du phénomène d'appauvrissement en argile et l'occurrence de PLANOSOLS ne sont donc pas liées à un climat à saisons contrastées.

Matériaux originels

- Le plus souvent, il s'agit d'argiles sédimentaires du Trias, Lias, Crétacé inférieur, Eocène, Miocène, etc., calcaires ou non calcaires, en général initialement riches en calcium et magnésium.

- Parfois, il s'agit de matériaux d'altération : résidus de décarbonatation de craies glauconieuses ou de formations calcaires loessoïdes redistribuées au Quaternaire ; ou bien horizons argileux résultant de l'altération de pseudo-sables glauconieux.

- Ce ne sont jamais des alluvions argileuses des vallées. Dans ces alluvions fines, on n'observe pas de gradient d'argile. Sont-elles trop récentes ? Ou bien est-ce l'absence de pente qui entraîne l'absence de circulation latérale d'eau et donc l'ab-

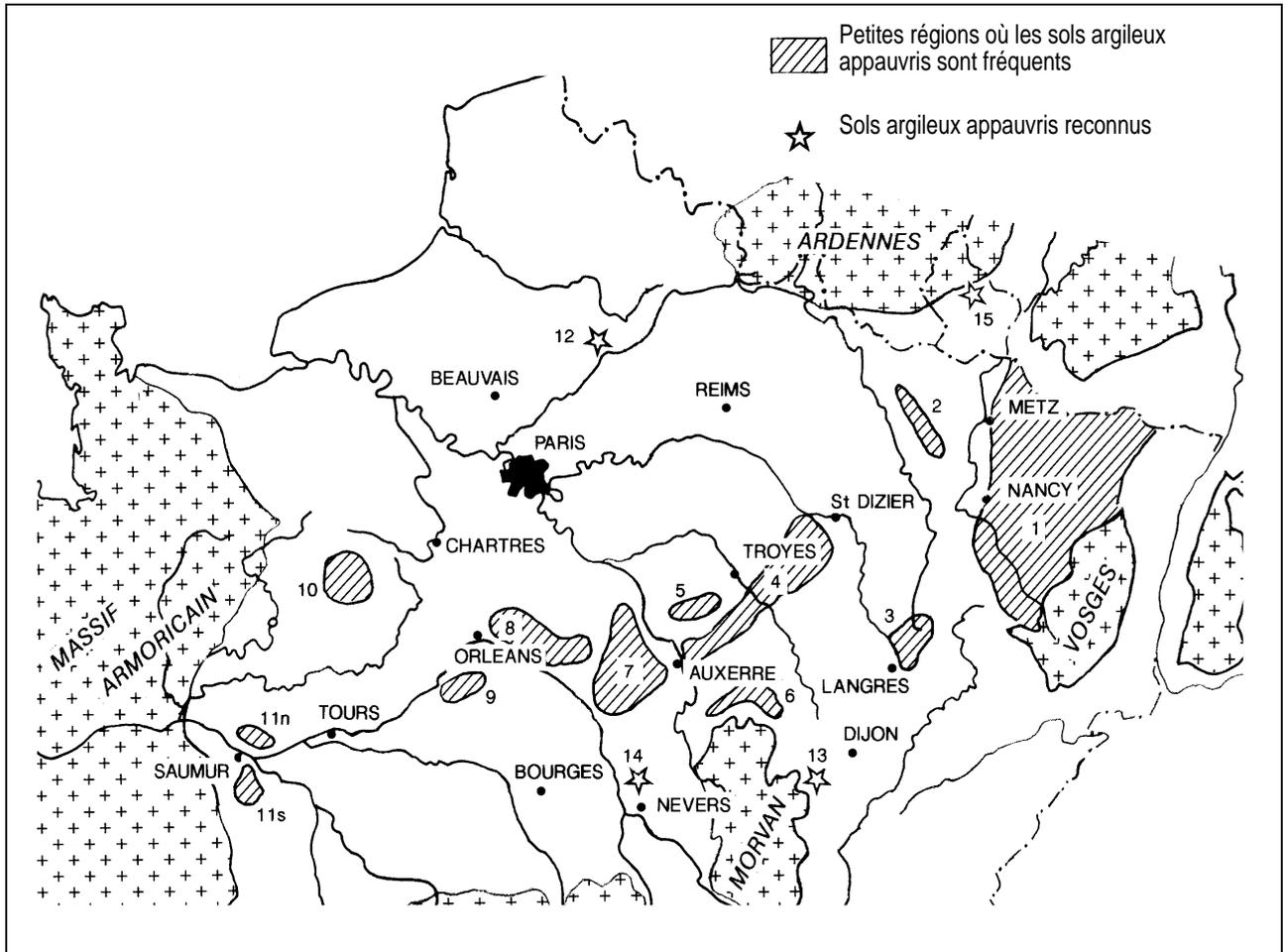
Tableau 4 - Données relatives aux précipitations.

Table 4 - Data relating to rainfall.

| Ville | Précipitations moyennes mensuelles et annuelles (en cm - période 1951-1970) | | | | | | | | | | | | (1) | (2) | |
|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|----|
| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | | | Σ |
| Chartres (28) | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 55 | 149 | 39 |
| Paris (75) | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 62 | 162 | 42 |
| Orléans (45) | 6 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 62 | 156 | 41 |
| Beauvais (60) | 6 | 5 | 4 | 4 | 5 | 6 | 5 | 7 | 6 | 5 | 6 | 7 | 66 | 162 | 45 |
| Tours (37) | 7 | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 72 | 157 | 47 |
| Bourges (18) | 6 | 6 | 5 | 5 | 7 | 6 | 5 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 72 | 166 | 49 |
| Dijon (21) | 6 | 5 | 5 | 5 | 7 | 8 | 4 | 8 | 7 | 5 | 7 | 6 | 73 | 147 | 46 |
| Metz (57) | 6 | 6 | 5 | 5 | 7 | 7 | 6 | 8 | 6 | 5 | 6 | 7 | 74 | 159 | 49 |
| Nevers (58) | 7 | 6 | 6 | 5 | 8 | 7 | 5 | 8 | 8 | 6 | 7 | 8 | 81 | 166 | 55 |
| Langres (52) | 9 | 8 | 7 | 6 | 8 | 8 | 6 | 9 | 8 | 7 | 8 | 8 | 92 | 171 | 64 |

(1) nombre de jours avec précipitations (> 0,1 mm)
(1) number of days with precipitation (i.e. > 0,1 mm)

(2) nombre de jours avec précipitations > 5 mm
(2) number of days with precipitations > 5 mm)

Figure 3 - Localisation des sols argileux appauvris en argile dans le nord de la France.**Figure 3** - Location of clay-impoverished clayey soils in northern France.**Petites régions - Little regions :**

1. Trias et Lias de Lorraine
2. Woevre
3. Bassigny (Benoit-Janin, 1985)
4. Champagne Humide (Aube et Yonne) (Dutil, 1992 ; Baize, 1980, 1983, 1989, 1994)
5. Plateau d'Othe (Girault, 1990 ; Baize, 1994)
6. Lias de Terre Plaine - Yonne (Baize et Voilliot, 1985 ; Baize, 1994)
7. Gâtinais oriental et Puisayes (Girault, 1988 ; Baize, 1994)
8. Forêt d'Orléans et Gâtinais du sud-ouest (Brêthes, 1993 ; Arrouays, 1987 ; Emberck, 1992)
9. Blésois
10. Perche (Isambert, 1984)
11. Saumurois nord et sud (Morlat, 1975 ; Boutin *et al.*, 1990)

Secteurs plus localisés - More restricted areas :

12. Noyonnais (Bégon *et al.*, 1977)
13. extrême sud de l'Auxois (Fresse, 1978 ; Chrétien, 1995)
14. région de La Machine - Nièvre
15. site étudié par Van Den Broek (Larochette - Luxembourg).

sence d'appauvrissement ?

- Ce ne sont pas non plus des matériaux d'altération anciens à caractères fersiallitiques voire ferrallitiques, issus de la dissolution de roches calcaires, lesquels gardent une bonne perméabilité et dans lesquels une importante illuviation verticale d'argile se manifeste (Callot, 1975 ; Baize, 1991).

Conditions physico-chimiques

Le processus d'appauvrissement débute en milieu neutre, juste après la décarbonatation s'il s'agit de matériaux calcaires à l'origine. Il se prolonge ensuite en milieu de plus en plus acide.

Position topographique

Les PLANOSOLS et PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS sont souvent observés en positions planes ou sur de faibles pentes tandis que les autres sols appauvris en argile sont souvent situés sur des versants à pentes notables. Mais alors s'engage ce que l'on peut appeler une "course-poursuite" entre les processus de pédogenèse appauvrissante et les phénomènes d'ablation de la partie supérieure des solums, surtout en secteurs cultivés.

CONCLUSION - PROCESSUS EN CAUSE

(figure 4)

À l'échelle mondiale, le concept de PLANOSOL, essentiellement morphologique et fonctionnel, est un faciès de **convergence** de différentes évolutions pédogénétiques (Dudal, 1973 ; Faivre, 1977 ; Raunet, 1977 ; Morras, 1979 ; Rossignol, 1984).

Sous climat tempéré humide, l'appauvrissement en argile se développe à chaque fois qu'il y a **fonctionnement hydrique latéral** dans les couvertures pédologiques. Ceci implique une mauvaise perméabilité verticale de certains horizons qui constituent des **planchers imperméables** et ceci suppose la présence d'une **pente**, même très faible.

On notera que l'appauvrissement est un processus qui s'auto-accélère. Mais un tel phénomène ne peut marquer nettement la morphologie des solums que s'il peut se manifester durablement dans des **paysages stables, protégés de l'érosion**. C'est pourquoi les sols argileux appauvris en argile sont beaucoup plus fréquents sous forêts que sous cultures où ils sont souvent plus ou moins tronqués.

Dans le nord de la France, l'appauvrissement en argile par transports particuliers est un processus précoce qui débute et fonctionne en milieu neutre. La désaturation du complexe d'échange et l'acidification concomitante ne se développent qu'à long terme. Les phénomènes d'altération des minéraux argileux en milieu acidifié et sous l'influence des alternances d'oxydo-réduction n'apparaissent que dans le cas de PLANOSOLS déjà fortement différenciés.

Les PÉLOSOLS DIFFÉRENCIÉS sont des sols à différenciation

limitée car développés dans des matériaux très argileux, donc évoluant lentement. Dans le schéma d'évolution physico-chimique présenté au début de cet article à propos des PLANOSOLS de Champagne humide, ils n'en sont encore qu'à l'étape 2. Leur évolution vers de véritables PLANOSOLS est possible mais elle prendra un long temps et nécessitera une stabilité durable des paysages.

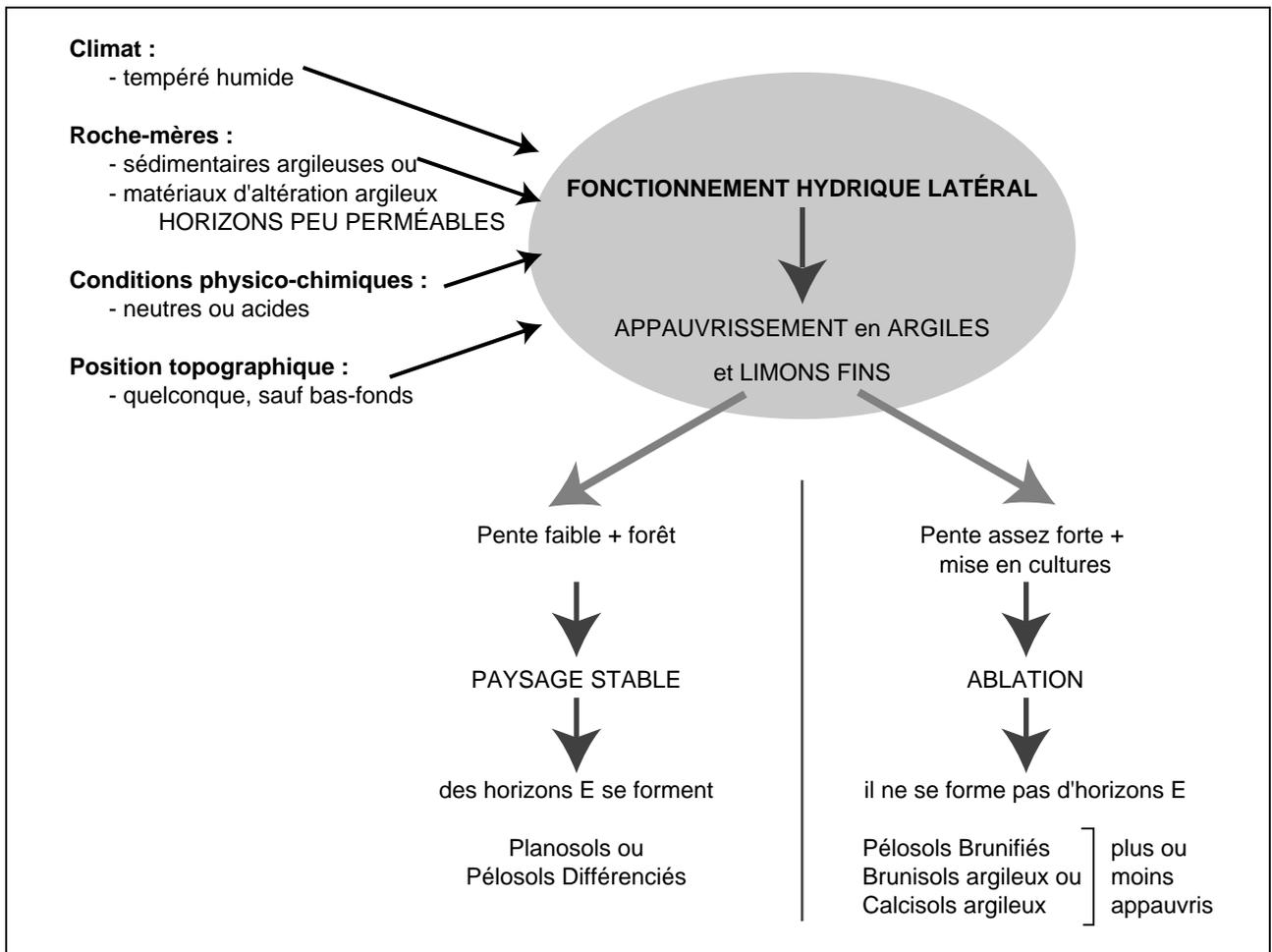
Les PLANOSOLS développés à partir d'argiles ou d'argiles sableuses sédimentaires sont aujourd'hui aux étapes 3, 4 ou 5, en fonction de la durée de leur pédogenèse et de la nature granulométrique ou minéralogique du sédiment initial. Nombre d'entre eux, demeurés sous forêts, montrent une très forte aluminisation du complexe adsorbant et une dissolution des minéraux argileux, morphologiquement bien visible sous la forme d'un liseré blanchi à la partie supérieure des agrégats du premier horizon argileux, correspondant à la concentration relative des minéraux quartzeux de la taille des limons et des sables (squelettanes résiduels). Le processus mis en jeu serait une "dégradation" (Pédro *et al.*, 1978) c'est-à-dire une autolyse acide liée à l'aluminium voire une "ferrolyse" où le fer ferreux joue le rôle majeur de fournisseur de protons (Brinkman, 1979 ; Espiau et Pédro, 1983). Mais, même à ce stade, les transports particuliers latéraux continuent (Baize, 1983, 1989).

L'appauvrissement en argile (et en fer) est un processus naturel : les eaux vont rapidement rejoindre les ruisseaux et les rivières, chargées de particules argileuses. Ceci explique d'ailleurs que les alluvions les plus récentes, dans toutes les régions concernées, sont presque toujours très argileuses.

Ces pertes de matières par "lessivage latéral" ne s'arrêtent pas lors de la mise en culture, bien au contraire. Les conséquences sont le départ rapide dans les eaux de surface non seulement des argiles fines mais aussi de tous les produits ou déchets apportés dans les parcelles (pesticides, nitrates, éléments traces métalliques, etc.).

BIBLIOGRAPHIE

- A.F.E.S., 1995 - Référentiel Pédologique 1995., INRA, Paris. 332 pages.
- Arrouays D., 1987 - Carte des sols de la région Centre à 1/50 000. Feuille Bellegarde du Loiret. INRA Orléans - Ch. Agric. Loiret. 184 pages.
- Baize D., 1980 - Carte pédologique de France à 1/100 000, feuille Tonnerre. INRA, Versailles. 243 pages.
- Baize D., 1983 - Les PLANOSOLS de Champagne Humide. Pédogenèse et Fonctionnement. Thèse Université Nancy I. INRA éditions, Versailles. 360 pages.
- Baize D., 1989 - PLANOSOLS in the Champagne Humide region (France). A multi-approach study. Pédologie. XXXIX-2, pp. 119-151.
- Baize D., 1991 - Sols et formations superficielles sur calcaires durs dans le sud-est du Bassin Parisien. Première synthèse. Science du Sol, vol. 29, pp. 265-287.
- Baize D., 1994 - Petites régions naturelles et paysages pédologiques de

Figure 4 - Schéma général de l'évolution des sols argileux appauvris en argile sous climat tempéré humide.**Figure 4** - General pattern of the evolution of clay-impoverished clayey soils in humid temperate climate.

l'Yonne. Carte à 1/200 000 et notice 191 p. INRA Orléans.

Baize D. et Voilliot J.P., 1985 - Carte des sols de L'Yonne à 1/50 000. Feuille Noyers. Station Agronomique de l'Yonne, Auxerre. 141 pages.

Bégon J.C. et Jamagne M., 1972 - Sur la genèse de sols limoneux hydromorphes en France. In Pseudogley & Gley - Transactions of Commission V and VI of the I.S.S.S. pp. 307-316.

Bégon J.C., Hardy R., Mori A., Roque J. et Jamagne M., 1977 - Les sols du département de l'Oise. INRA Versailles, 333 p. + 2 cartes.

Benoit-Janin P., 1985 - Carte pédologique de France à 1/100.000. Feuille Langres. INRA Orléans, 130 pages.

Bonneau M., Duchaufour Ph., Millot G. et Paquet H., 1965 - Note sur certains sols vertisoliques formés en climat tempéré. Bull. Service Carte Géologique d'Alsace Lorraine, 17, 4, pp. 325-334.

Bonneau M., Faivre P., Gury M., Hétier J.M. et Le Tacon F., 1978 - Carte pédologique de France à 1/100.000. Feuille Saint Dié - INRA Versailles, 159 pages.

Boutin D., Froger D. et Rassineux J., 1990 - Carte des sols de la Vienne et de

la région Centre à 1/50 000. Feuille Loudun. 265 pages.

Brêthes A., 1993 - Les types de station forestière de l'Orléanais. O.N.F., 400 pages.

Brinkman R., 1979 - Ferrolysis, a soil forming process in hydromorphic conditions. Wageningen. 2 volumes - 1 : papers - 2 : thesis.

Broek T.M.W. Van den, 1989 - Clay dispersion and pedogenesis of soils with an abrupt contrast in texture. University of Amsterdam, 130 pages.

Callot G., 1975 - Carte pédologique de France à 1/100.000. Feuille Angoulême. INRA Versailles. 171 pages.

Chrétien J., 1995 - Carte pédologique de France à 1/100.000. Feuille Beaune. INRA Orléans. 286 pages.

Dudal, R., 1973 - PLANOSOLS. Pseudogley and Gley. C.R. des comm. V et VI de l'A.I.S.S. ; pp. 275-285.

Dutil P., 1992 - Carte pédologique de France à 1/100.000. Feuille Saint Dizier - INRA Orléans, 220 pages.

Eimberck M., 1992 - Carte des sols de la région Centre à 1/50 000. Feuille Montargis. INRA Orléans - Ch. Agric. Loiret. 206 pages.

Espiau P. et Pédro G., 1983 - Etude du phénomène de ferrolyse par voie expé-

- rimentale. Production d'acidité d'échange et mise en évidence du rôle catalytique des minéraux argileux. *Science du Sol*, 3-4, pp. 173-184.
- Faivre P., 1977 - Sols à profil différencié planosoliques à horizon BT noir de Colombie. *Science du Sol*, n° 2, pp. 95-110.
- Favrot J.C. et Legros J.P., 1972 - A propos d'un type de sol hydromorphe observé en France : le planosol lithomorphe. *Bull. A.F.E.S.*, 6 : 243-249.
- Feijtel T.C., Jongmans A.G., Van Breemen N. et Miedena R., 1988 - Genesis of two PLANOSOLS in the Massif Central, France. *Geoderma*, 43 : 249-269.
- Florentin L., 1982 - Contribution à la connaissance des sols hydromorphes et apparentés de Lorraine et leurs réponses au drainage. Thèse 3ème cycle. 157 pages.
- Fresse J.C., 1978 - Les sols hydromorphes à profil différencié du bassin d'Autun. Thèse 3ème cycle. Dijon, 134 p.
- Girault D., 1988 - Les stations forestières de la Puisaye. CEMAGREF. Nogent sur Vermisson. 246 pages.
- Girault D., 1990 - Les stations forestières du Pays d'Othe. CEMAGREF. Nogent sur Vermisson - Etudes Forêt n° 3 ; 174 pages.
- Isambert M., 1984 - Carte pédologique de France à 1/100.000. Feuille Châteaudun - INRA Orléans. 259 pages.
- Jamagne M. et Bégon, 1984 - Les sols lessivés de la zone tempérée. Apport de la pédologie française. *A.F.E.S.*, Livre jubilaire. pp. 55-76.
- Lamotte M., 1986 - Etude des relations morphologiques, génétiques et hydrodynamiques entre horizons sableux superficiels et argileux sous-jacents, sur un versant de la Forêt d'Orléans. DEA de Pédologie. 74 pages.
- Morlat R., 1975 - Les sols du Saumurois : pédologie et utilisation agronomique appliquée au vignoble. Thèse spécialité Université de Poitiers. 127 p. + annexes.
- Morras H.J.M., 1979 - Discussion sur les mécanismes de pédogenèse des PLANOSOLS et d'autres sols apparentés. *Science du Sol*, n° 1 ; pp. 57-66.
- Nguyen Kha, 1973 - Recherches sur l'évolution des sols à texture argileuse en conditions tempérées et tropicales. Thèse Doctorat ès Sciences, Nancy. 156 p.
- Nguyen Kha et Paquet H., 1975 - Mécanismes d'évolution et de redistribution des minéraux argileux dans les PÉLOSOLS. *Sciences Géologiques Bull.* 28, 1, p. 15-28.
- Nguyen Kha, Roullier J. et Souchier B., 1976 - Premiers résultats concernant une étude expérimentale du phénomène de l'appauvrissement dans les PÉLOSOLS. *Science du Sol*, n° 4, pp. 259-267.
- Pêdro G., Jamagne M. et Bégon J.C., 1978 - Two routes in genesis of strongly differentiated acid soils under humid, cool-temperate conditions. *Geoderma*, 20 ; pp. 173-189.
- Raunet M., 1977 - Étude du milieu naturel du bassin du Gidabo (Éthiopie). I.R.A.T.
- Rosignol J.P., 1984 - Les PLANOSOLS du nord de l'Uruguay. *Cah. ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXI, n° 1, pp. 57-78.