

LES LUVISOLS

Devons-nous revoir nos conceptions ?

Tentative de clarification

Denis BAIZE

Directeur de recherche retraité, Orléans

Résumé

Faisant suite à un premier article qui détaille les conceptions françaises relatives aux luvisols élaborées dans les années 70-80, le présent article expose d'abord un certain nombre d'objections faites à ces conceptions que l'on peut considérer comme « classiques ». Parmi ces critiques, certaines sont plus pertinentes que d'autres. Ensuite, sont rapportés les résultats de toute une série de travaux beaucoup plus récents portant sur la thématique des luvisols et du lessivage des particules argileuses.

Enfin, la dernière partie de l'article porte sur les problèmes de vocabulaire et les confusions conceptuelles qui en découlent.

Mots-clés

Luvisols - illuviation - éluviation - lessivage - limons - France - typologie

Summary

LUVISOLS : Should we rethink our (French) conceptions ? Attempt at clarification

following a previous article detailing the French conceptions of luvisols developed in the 1970s and 1980s, this article first sets out a number of objections to these conceptions that can be considered «classic». Some of these criticisms are more relevant than others. The results of a series of much more recent studies about luvisols and leaching of clay particles are then reported.

The last part of the article deals with vocabulary problems and the conceptual confusions that result from them.

Key-words

Luvisols - illuviation - eluviation - lessivage - clay translocation - silty material - France - typology

Riassunto

LUVISOLS : Dobbiamo rivedere i nostri concezioni francesi? Tentativo di chiarimento

Facendo seguito ad un primo articolo che dettaglia le concezioni francesi elaborate negli anni 70-80 relative ai "luvisols", il presente articolo espone anzitutto un certo numero di obiezioni fatte a queste concezioni che si possono considerare come «classiche». Alcune di queste critiche sono più pertinenti di altre. Vengono poi riportati i risultati di una serie di lavori molto più recenti sul tema dei "luvisols" e della traslocazione delle particelle argillose.

Infine, l'ultima parte dell'articolo discute i problemi di vocabolario e le confusioni concettuali che ne derivano.

Parole chiave

Luvisols - illuviazione - eluviazione - traslocazione d'argille - depositi limosi - Francia - tipologia

Un premier article (Baize, 2024) s'est efforcé de synthétiser tout ce que nous avons appris sur les luvisols et sur les processus pédogénétiques qui mènent à la formation de ce type de sol, au sens que le Référentiel pédologique donne à ce mot : des sols qui se sont formés essentiellement par translocation verticale d'argile avec accumulation en profondeur des particules déplacées (argilluviation).

Dans le présent article seront envisagées un certain nombre d'objections faites à ces conceptions qui datent des années 70 et 80 et que l'on peut considérer comme « classiques ». Certaines de ces critiques sont tout à fait recevables, notamment le fait que les bilans de matières entre argiles éluviées dans les horizons supérieurs et celles illuviées en profondeur ne semblent jamais « boucler » correctement. D'autres relèvent de confusions regrettables.

Puis seront présentés des travaux plus récents (postérieurs à l'année 2000) réalisés sur des sols développés dans des matériaux limoneux déposés au Quaternaire et que l'on peut considérer a priori comme des luvisols.

Partout dans le monde des sols à plus ou moins forte différenciation texturale ont été décrits. Pour expliquer leur formation, le phénomène d'illuviation, quoique reconnu mondialement, est également remis en cause au profit de bien d'autres processus telle la bioturbation, l'érosion sélective des fines par action éolienne ou hydrique, la néogenèse d'argile en profondeur par altération des minéraux primaires (*cf. ci-dessous § II.4 et III.2*).

Finalement il apparaît un problème de vocabulaire. Les mots « lessivage » et « sols lessivés », utilisés depuis longtemps, ont entraîné et entretiennent toujours la confusion. De très nombreux sols lessivés, c'est-à-dire qui connaissent un lessivage des particules argileuses, ne peuvent pas être désignés comme des luvisols, étant donné la définition assez stricte de ce concept en France (AFES, 2008).

INTRODUCTION

Dans les années 1960, les « sols lessivés » étaient à la mode en France et on en a vu partout, dès que les horizons de surface montraient des teneurs en argile nettement moindre par rapport aux horizons sous-jacents, et même si ces horizons profonds étaient très argileux (45 à 70 %). Ainsi, en Forêt d'Orléans, en Sologne et ailleurs, des sols furent désignés comme « sols lessivés » qui sont de nos jours rattachés aux planosols primaires (*cf. encadré*).

D'une part, toute superposition d'horizons moins argileux au-dessus d'horizons plus argileux ne correspond pas nécessairement à un **luvisol**, au sens que le Référentiel pédologique (AFES, 2009) donne à ce terme. D'autre part il faut être conscient que le processus d'éluviation / illuviation de particules argileuses existe un peu partout sous climats suffisamment pluvieux, dans différents contextes géologiques et granulométriques, sans forcément mener à la formation de sols correspondant au concept français de luvisols.

De tels revêtements (nommés aussi argilanes) ont été observés par Legros (1975 ; 1976) dans des altérites de granites (Massif du Pilat), par Curmi (1979) dans les arènes du granite de Pontivy et évoqués également par Fedoroff (1974) également en milieu granitique.

Dans sa thèse, Fresse (1978) décrit des argilanes très spectaculaires, formés en contexte de formations limono-sableuses de terrasses dans le Bassin d'Autun (*figures 1 et 2*). Dans des horizons profonds d'« ultisols » développés dans des alluvions de très hautes terrasses mio-pliocènes, Baize, (2019) a observé des revêtements argileux dans un contexte sablo-argileux (*figure 3*). Lors de la réalisation de la carte de Saint-Jean d'Angely, Salin (2000) a obtenu des photos de lames minces montrant de très beaux ferri-argilanes déposés dans des horizons profonds d'un sol développé dans des « argiles à châtaigniers » (*figures 4 et 5*).

Figure 1 : Revêtements argileux sur parois de vides et grains de sables grossiers - Horizon Btg - profondeur 60-90 cm. Fort grossissement (× 63). Lumière "naturelle" - Contexte limono-sableux détritique. Bassin d'Autun (Fresse, 1978). Photo C. Le Lay.

Figure 1 : Clay coatings on voids walls and sand grains. Btg horizon. Magnification × 63. Polarized light. Sandy-silty detrital context. Autun Basin.

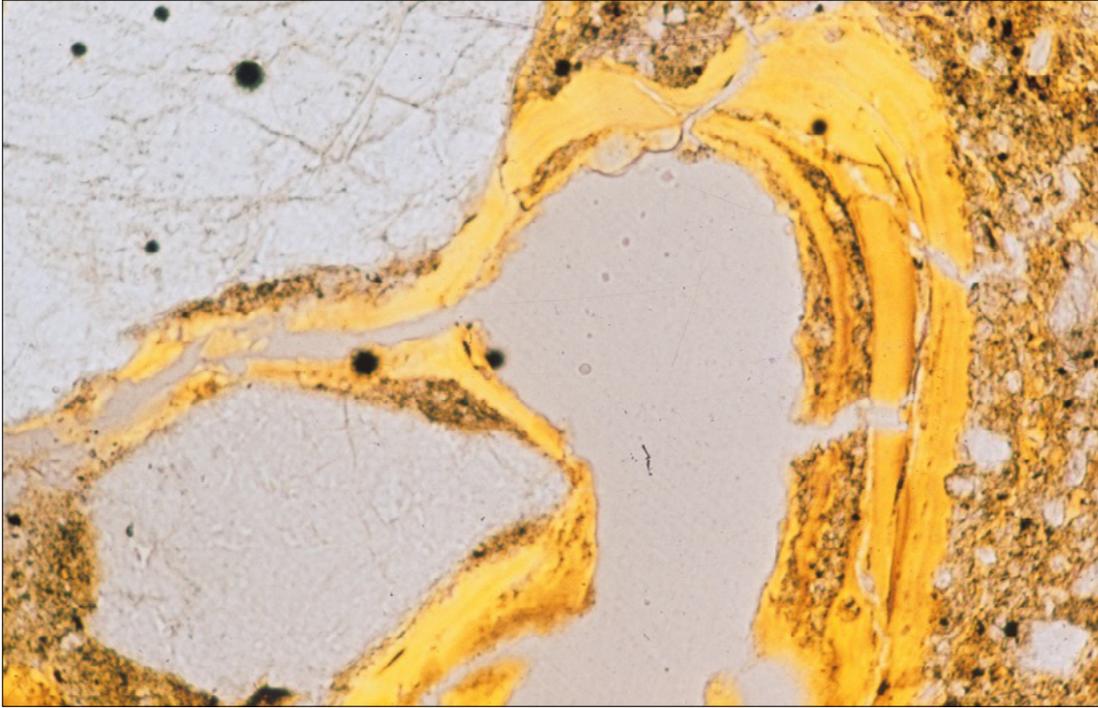


Figure 2 : Revêtements argileux lités, très hétérogènes comportant des lits limoneux et sableux. Horizon Bcn - profondeur 90-110 cm. Fort grossissement (× 63). Lumière "naturelle" - Contexte limono-sableux détritique. Bassin d'Autun (Fresse, 1978). Photo C. Le Lay.

Figure 2 : Layered clay coatings, very heterogeneous, with silty and sandy beds. Bcn horizon - depth : 90-110 cm. Magnification × 63. Polarized light. Sandy-silty detrital context. Autun Basin.

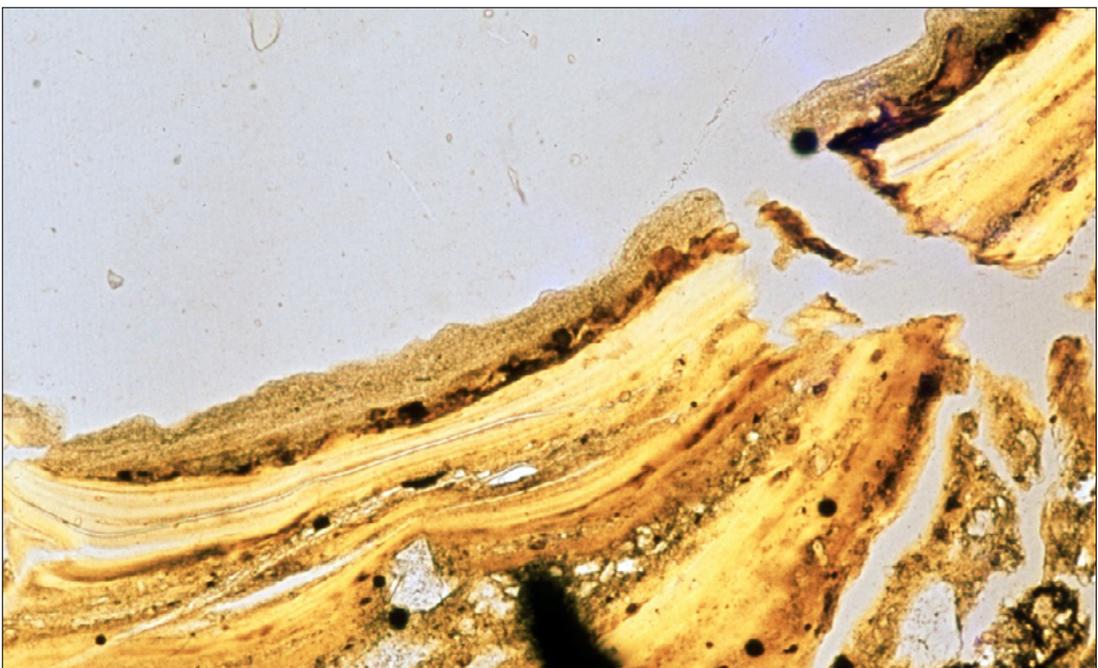
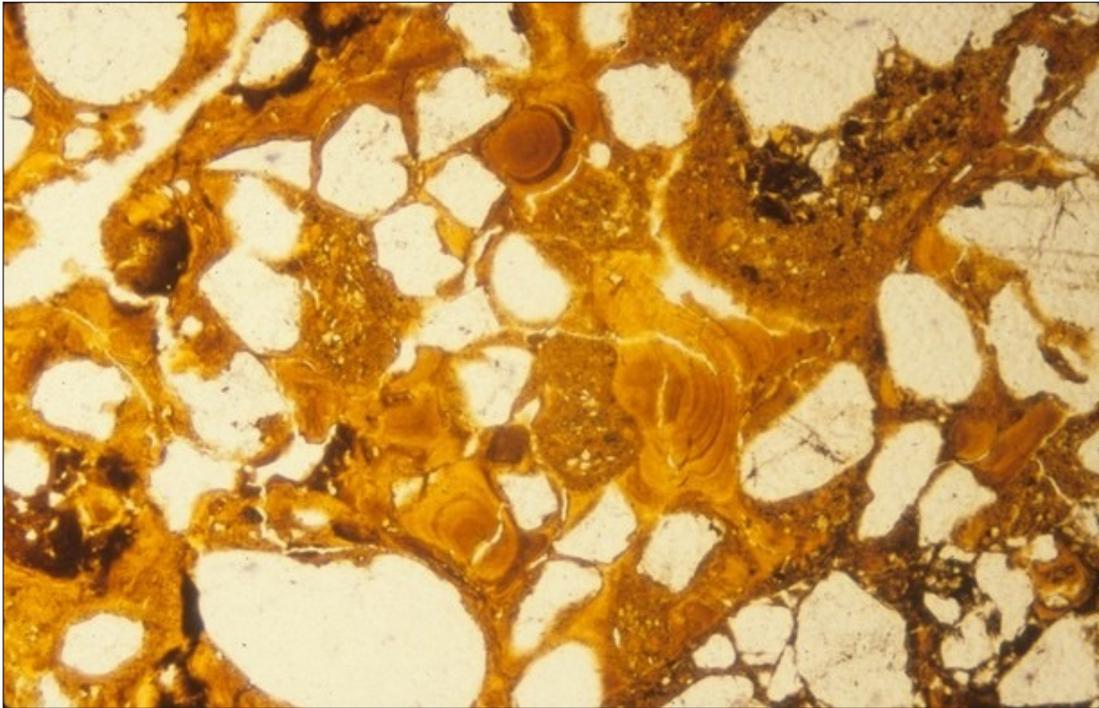


Figure 3 : Ferri-argilanes d'interstices formés en contexte sablo-argileux. Horizon profond d'un « ultisol » développé dans des alluvions de très hautes terrasses mio-pliocènes (Baize, 2019). Lumière "naturelle". La photo fait 2,5 mm de largeur. Photo C. Le Lay.

Figure 3 : *Interstitial ferri-argillans formed in a sandy-clay context. Deep horizon of an "ultisol" developed in Mio-Pliocene high alluvial terraces. Polarized light. The picture is 2,5 mm wide*



Des sols lessivés qui ne montrent pas de revêtements argileux !

Dans un article qui a le mérite de présenter les premiers véritables vertisols français observés dans le sud-est de la Beauce, Fedoroff et Fiès (1968) décrivent également des « *vertisols dégradés* », développés dans une « *argile à sables grossiers* » burdigalienne en Forêt d'Orléans. Ces sols sont immédiatement baptisés « *sols lessivés hydromorphes* » sur les deux seuls critères : « *l'indice d'entraînement atteint presque 1,5* » et « *la dissociation du complexe argile-fer* » ce qui favoriserait la migration des particules argileuses. Les auteurs avouent ingénument « *qu'il n'y a pas de revêtements d'argiles visibles sur le terrain* » ni d'ailleurs en lames minces, seulement « *de très nombreux cutanes de tension* ». Puis ils tiennent le raisonnement suivant : puisqu'on n'observe pas de revêtements argileux, c'est qu'ils ont été déformés par un « *micro-remaniement important au fur et à mesure qu'ils se forment* ».

La lecture de l'article permet de constater que l'horizon de surface contient 38 % d'argile, tandis que les horizons plus profonds en contiennent plus de 50 %, et que cet horizon superficiel ne fait que 10 cm d'épaisseur ! Aujourd'hui on reconnaîtrait là un planosol comme ceux décrits par Brêthes (1993) en Forêt d'Orléans, partiellement tronqué ou un solum en tout début de planosolisation.

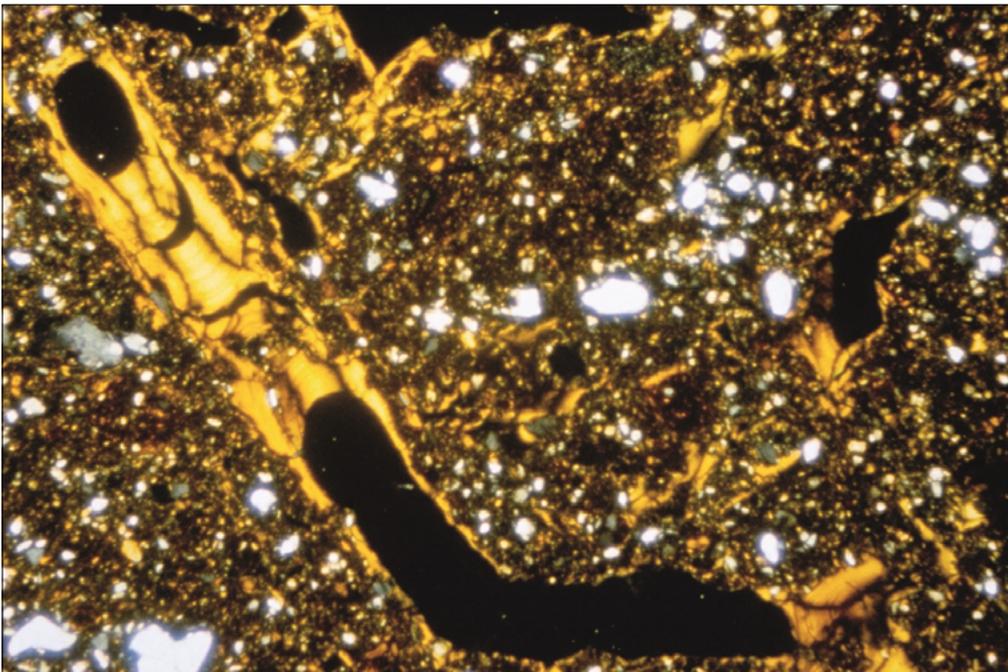
Figure 4 : Horizon profond d'un sol développé dans une « argile à châtaigniers ». Grossissement $\times 30$. Lumière « naturelle ». Commune de Saint-Vincent-la-Châtre (Salin, 2000). Photo C. Le Lay.

Figure 4 : Deep horizon of a soil developed in a "chestnut clay" (Saint-Vincent-la-Châtre). Magnification $\times 30$. Polarized light.



Figure 5 : Même sol que la *Figure 4*. Horizon encore plus profond. Grossissement $\times 30$. Lumière polarisée et analysée. Photo C. Le Lay.

Figure 5 : The same soil as in *Figure 4*. Much deeper horizon. Magnification $\times 30$. Polarized and analysed light.



I. OBJECTIONS FAITES À LA THÉORIE CLASSIQUE

Comme l'écrivait Phillips (2001): « *La formation de contrastes texturaux verticaux est un sujet important et controversé en pédologie* ». C'est le moins que l'on puisse dire.

I.1 Les objections de J.-P. Legros (2007)

En France, les premières objections sont venues de Legros (2007). Dans son ouvrage, « *Les grands sols du monde* », cet auteur présente le « *modèle classique de lessivage* » (pages 301 et suivantes) puis son « *approche nouvelle du lessivage* » (page 304 et suivantes).

Dans cet ouvrage Legros emploie à la fois le vocabulaire de la classification CPCs et de la WRB ainsi qu'une désignation des horizons peu précise. Il utilise la notion d'horizon B au lieu de bien distinguer les horizons S et les horizons BT comme le fait le Référentiel pédologique et comme le faisait déjà la CPCs (1967).

1 Confusions entre planosols « primaires » et « secondaires » suite à une interprétation fautive des schémas de Jamagne

A la lecture des pages 97 et 301 à 307, on peut constater que Jean-Paul Legros, confond les **planosols primaires** (ceux directement développés à partir de matériaux sédimentaires argileux peu perméables – Baize, 1983 ; 1995) et les **planosols secondaires** (stade ultime de l'évolution de certains Luvisols Dégradés développés dans des matériaux limoneux) évoqués initialement par Begon et Jamagne (1972).

Cette confusion, qui nuit fortement à sa démonstration, intervient à plusieurs reprises :

- Figure 3.2 en bas de page 97 (*Figure 6*) ; Trois remarques sur cette figure : 1°) le luvisol issu de loess tel qu'il est présenté n'a pas d'horizon A₂ (aujourd'hui codé E) ; 2°) le Bt devient un Bg on ne sait pourquoi ; 3°) le stade ultime, selon Jamagne, à droite, n'est pas un planosol mais un planosol secondaire, ce qui change tout ! Cette confusion se retrouve dans le texte : « *On atteint le stade sol dégradé encore appelé Planosol* ».
- à la page 302, ligne 24 (où il n'est pas précisé qu'il s'agit de planosols secondaires) ;
- Figure 8.8 page 303, (*Figure 7*) ; dans cette figure, le stade « sol lessivé » a disparu mais, surtout, est présentée une équivalence erronée entre PLANOSOL (selon la WRB) et « Lessivés dégradés » (selon la CPCs, 1967) !

Figure 6 : Évolution temporelle d'un loess et du sol correspondant (Legros, 2007 - *Figure 3.2, page 97*).

Figure 6 : Evolution over time of a loess and the corresponding soil (Legros, 2007 - *Figure 3.2, page 97*).

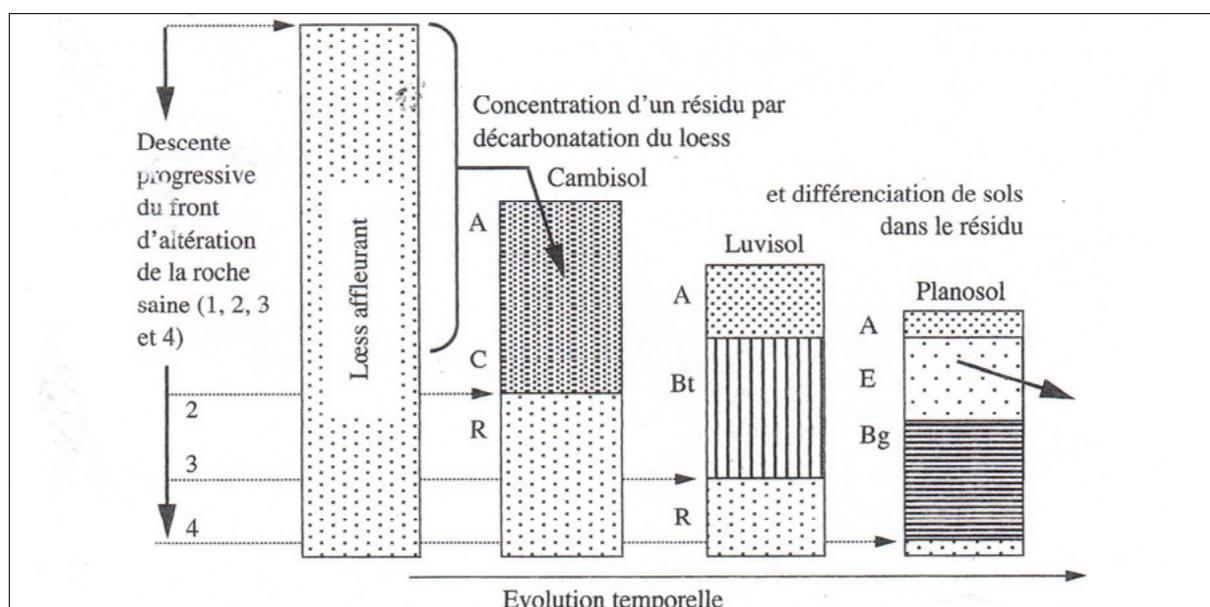
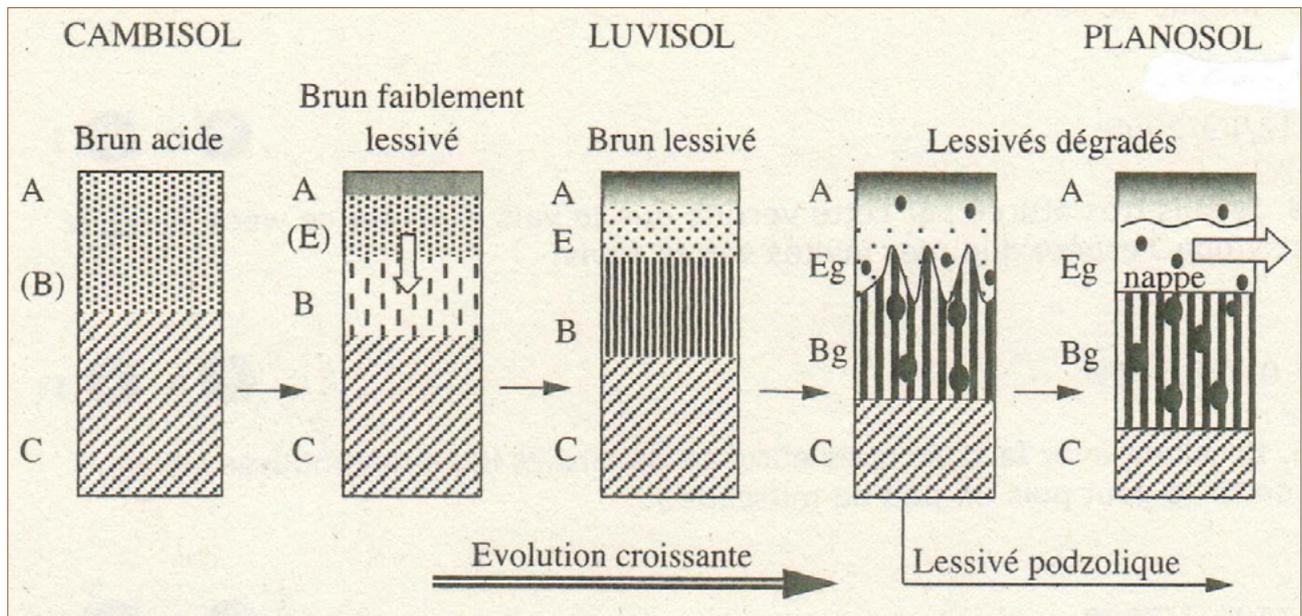


Figure 7 : La Figure 8.8 du livre de Legros (2007, page 303). Légende : « Séquence d'évolution du Cambisol au Planosol (WRB) ou du sol brun acide au sol lessivé dégradé (CPCS). [Jamagne 1973, simplifié] ».

Figure 7 : Figure 8.8 of the book of Legros (2007, page 303). Legend: "Evolution over time from Cambisol to Planosol (WRB) or from the "sol brun acide" to the "sol lessivé dégradé" (CPCS). [Jamagne 1973, simplified]".



- à la page 304 où les travaux de Baize (1983) sur les planosols primaires de Champagne humide sont évoqués à tort pour illustrer les « limites du schéma classique »; tout au long de son chapitre 8 Legros utilise l'argument selon lequel il n'y a pas d'argiles illuviées dans les horizons B des planosols étudiés par Baize (1983) pour contester « la théorie classique du lessivage ». À nouveau il y a confusion entre planosols primaires et secondaires.
- et en haut de la page 305 où il est écrit: « Dans les horizons B des planosols, il n'y a pratiquement pas de revêtements argileux ».

Cette méprise est regrettable. Elle pourrait résulter du refus d'utiliser les notions et le vocabulaire du Référentiel pédologique. Elle rajoute de la confusion dans un débat déjà suffisamment complexe.

L'utilisation par Legros du vieux système de notation où la lettre B sert à désigner tous les horizons non situés en surface n'aide pas le lecteur à s'y retrouver. Ce n'est pas par hasard que le Référentiel pédologique, depuis son origine, tient à distinguer l'horizon BT qui est notablement enrichi en argiles illuviales et l'horizon S où il n'y en a pas ou très peu. Il est alors plus facile de distinguer les luvisols caractérisés par la superposition E/BT et les planosols caractérisés par la superposition E/S.

2 Quel est le meilleur modèle naturel pour l'étude de l'illuviation ?

En outre, en haut de la page 307, J.P. Legros déclare :

« Notre façon de voir les phénomènes, liée à nos travaux sur granite [Legros, 1982], est très proche de celle de Bornand qui a travaillé sur les cailloutis de la vallée du Rhône [1978] et de celle de Baize qui s'est intéressé aux Planosols sur argiles glauconieuses [1983]'. Pour bien comprendre comment les sols lessivés et Planosols se différencient, il est préférable de travailler dans des milieux où le matériel initial est une roche en place dont on peut observer, de bas en haut du profil, l'attaque et la disparition progressive. Au contraire, les limons éoliens ou bien les résidus de décarbonatation, permettent certes d'observer de très beaux sols lessivés mais ne facilitent pas l'étude de leur fabrication ».

¹ En réalité, Baize (1983; 1989) n'a pas étudié seulement des planosols issus d'argiles glauconieuses mais également des planosols issus de sédiments argileux marins plus ordinaires.

Cette argumentation me paraît discutable. Certes, on observe des phases importantes d'illuviation d'argile dans les très vieux sols d'altération développés dans des cailloutis rhodaniens étudiés par Bornand (1978). Certes, Baize a consacré de nombreuses publications aux « terres d'Aubues » des plateaux de Basse Bourgogne (la dernière en 2012), sols argileux résiduels dans lesquels la phase pédogénétique la plus récente consiste en une illuviation massive de particules argileuses. Mais il s'agit de cas complexes présentant des successions de très fortes altérations initiales sur de longues durées, cas où il est difficile de démêler altérations, translocations d'argiles et pertes de matières hors des solums (notamment dans le réseau karstique sous-jacent).

Au contraire, il me semble que **les limons lœssiques se prêtent très bien à l'étude de l'argilluviation comme principal processus de pédogenèse récente des luvisols sous nos climats**. C'est également ce qu'explique Bronger (1991) dans un long chapitre consacré aux horizons argiliques dans les sols de lœss récents sous pédoclimat « *ustic* ». Cet auteur écrit :

« because a lithologic discontinuity is often difficult to exclude, micromorphology is essential for identifying clay illuviation. In particular, microlaminated fine clay plasma or illuviation argillans are unequivocal signs of clay illuviation. This is particularly conspicuous in Holocene but also in Pleistocene soils derived from loess, where the fine clay plasma, or the illuviation argillans, contrasts sharply with the rest of the fabric. For this reason, our thoughts and investigations concentrate primarily on soils derived from loess or loess-like parent material in both eastern Europe and the United States ».

3 Théorie de l'« enfoncement progressif »

J.-P. Legros la définit ainsi, de façon imagée : « *chaque horizon du profil « mange » ou « ronge » au niveau de sa limite inférieure (qui est aussi sa limite avant), celui qui le précède vers le bas. En même temps, il est « mangé » au niveau de sa limite supérieure (qui est aussi sa limite arrière) par celui qui le surmonte* ». Effectivement, cette théorie est séduisante et semble parfaitement correspondre à la réalité.

Ce phénomène peut être illustré par la *figure 7* de l'article de Baize (2024). Dans ce solum, l'horizon BTgd est presque entièrement « dévoré » par l'horizon Eg éluvié qui le surmonte.

4 Revêtements argileux

Toujours selon Legros (2007 – page 305), « *la plupart des auteurs soulignent que les revêtements argileux trouvés en B dans les sols lessivés et caractérisés en lames minces sont insuffisants pour expliquer leur enrichissement en argile (Bronger, 1991). Certains estiment que ces revêtements disparaissent par pédoturbation, c'est-à-dire intégrés à la masse du sol par l'activité biologique et les phénomènes de retrait-gonflement affectant les argiles. Mais, dans la plupart des sols, on n'a pas la preuve de ces transformations supposées* ».

Dans la citation de J.P. Legros qui précède, la seule référence bibliographique mentionnée est celle de Bronger, 1991. Dans les dernières pages, Bronger conclut ainsi (page 81) :

*« In the central and northern parts of the transition from forest to prairie and in the prairies especially in the central and northern part of the Great Plains of the United States, not only Udolls, but also Borolls, Ustolls, and even Aridisols with a ≥ 20 % higher clay content in subsoil are widespread. This Bt horizon is referred to genetically as a horizon of clay illuviation, or an argillic horizon. But from the micromorphology of about 300 thin sections studied, we must conclude that **the clay maximum** in more than 20 main and widespread soil series on uneroded stable surfaces of Typic and Aridic Argiborolls, Udic, Typic, and Aridic Argiustolls, and Ustollic Haplargids (all free of Na⁺) **cannot be explained by clay illuviation, or only to a very slight extent**. Argiudolls in the former tall-grass prairie show very small amounts of illuviation argillans. Only the Typic Hapludalf ... shows the micromorphological features of clay illuviation. »*

Du paragraphe précédent, j'extrais le point majeur suivant : « *À partir d'environ 300 lames minces étudiées... le maximum d'argile... ne peut pas être expliqué par l'illuviation d'argile, ou seulement dans une très faible mesure* ». Mais, dans ce paragraphe, il s'agit clairement de Mollisols ou d'Aridisols dans lesquels le système américain reconnaît l'existence d'horizons argiliques sur de simples critères granulométriques. Dans ce système de l'USDA, seuls les Alfisols peuvent être valablement assimilés à nos luvisols. Comme nous le verrons aux § *I.2 et III.4*, la confusion règne dans la Soil Taxonomy comme dans la WRB à cause de définitions trop vagues des horizons Bt ou de l'horizon argilique.

5. Des bilans déséquilibrés

En outre, les pertes en argile telles qu'estimées dans les horizons supérieurs éluviés Ae et E (qui sont aujourd'hui généralement peu épais) seraient très loin d'équilibrer les gains en argile dans les horizons BT (qui sont souvent fort épais). Cela est vrai et constitue une véritable difficulté, déjà évoquée par Marcel Jamagne (communication personnelle) et par différents auteurs. On peut citer Phillips (2001): « *Paton et al. (1995) argue convincingly that illuviation is inadequate as a general explanation for the development of TCS [texture-contrast soils]. There are several lines in their argument, but the most fundamental is evidence that in many soils there is simply too much clay in the subsoil to have been derived from the overlying horizons* ».

Ce constat a également été fait par Bockheim et Hartemink (2013): « *Mass-balance studies show that only part of the clay in the argillic horizon of humid soils originated from translocation out of an eluvial horizon. Synthesis of clays from the soil solution or suspension is an important source of the clay, as well as weathering in situ* ».

Il est probable qu'une certaine proportion des particules argileuses illuviées sont venues se répartir d'une manière diffuse et donc peu visible au sein de la matrice des horizons BT récepteurs. Mais, en outre, de nombreux auteurs font appel à la **pédoturbation** (cf. encadré) ou à la **bioturbation** pour expliquer l'émiettement d'anciens argilanes qui deviendraient alors invisibles ou difficilement reconnaissables (Sauzet 2012; 2016). D'autres évoquent **l'action du gel** aux périodes périglaciaires dans les secteurs les plus septentrionaux de France et en Belgique (VanVliet *et al.*, 1992). On peut envisager également des phénomènes d'érosion superficielle et l'érosion sélective des fines (voir ci-après § III.2).

N'oublions pas également que, avant de devenir un horizon BT par transfert puis **accumulation absolue** de particules argileuses, l'horizon BT a **d'abord** été un horizon S d'altération, siège d'une néogenèse d'argile *in situ* non négligeable, d'où une teneur en argile initiale (i. e. avant le démarrage de l'illuviation) supérieure à celle du matériau parental intact. Ladite altération de certains minéraux primaires n'a aucune raison de s'être arrêtée et a continué à se développer parallèlement à l'illuviation débutante.

Rappelons que, du point de vue minéralogique, les loëss de l'Europe du Nord-Ouest, se caractérisent par une nette prédominance du quartz dans les fractions sableuses et limoneuses (60 à 70 %). Dans les fractions limons (2 à 50 µm), les autres minéraux sont représentés en proportion décroissante par des feldspaths calcosodiques et potassiques, des micas (muscovite, biotite), de la chlorite ainsi que par des quantités mineures d'amphiboles (hornblende magnésienne), d'autres minéraux lourds (épidote, grenat), parfois un peu de glauconie et des argiles (smectite, vermiculite, illite – Jamagne 1973; van Ranst *et al.*, 1982; Antoine, 2002; Jamagne *et al.*, 1984). Sans oublier 10 à 20 % de calcaire selon les régions.

Ces loëss contiennent donc un certain nombre de minéraux assez facilement altérables: des feldspaths calcosodiques, de la biotite, des hornblendes et, peut-être, des pseudo-sables de glauconie qui, en fait, sont des boulettes d'argiles (glauconite). En outre les particules calcaires sont susceptibles de libérer leurs impuretés argileuses. Enfin, certains auteurs font appel à la microdivision de particules de chlorites ou de micas de la dimension de limons, donnant naissance à des argiles fines (Hardy et Elsass, 2010).

C'est bien ce qu'affirme Jamagne (2011, p. 99): « *L'altération initiale des loëss, faisant partie du phénomène de « lehmification », correspond essentiellement: - à une légère augmentation de la teneur en argile fine, constituée de minéraux argileux gonflants, par suite d'une libération consécutive à la décarbonatation; - à une microdivision d'éléments de la taille des limons fins amenant, associée à de faibles néoformations, une augmentation du taux d'argile granulométrique* ». Mais il est difficile de quantifier ces phénomènes d'altérations modérées et de microdivision.

Dans le passé les quantifications des masses d'argiles déplacées étaient très difficiles. Certaines techniques modernes d'analyse d'images sont désormais disponibles (Sauzet, 2016 - voir ci-après - § II.4).

6 Des critiques réitérées

Lors des Journées d'Étude des Sols qui se sont tenues au Bourget-du-Lac en 2014, Legros a présenté une communication intitulée: « *Le lessivage: un concept à dépeussier à grande eau* ». Voici quelques phrases qui sont extraites de son résumé (Legros, 2014):

« Un concept ancien devenu un dogme... » « Une réalité non réductible au lessivage de l'argile... » « La non-opérabilité du modèle « lessivage dominant »... »

Mais en conclusion il écrit : « Au total, on peut obtenir un sol brun peu différencié avec beaucoup de transferts d'argile à la base (Legros – 1976) ou un planosol sans beaucoup de marques de redistribution. » **Il ne faut donc pas associer de trop près les concepts « lessivage » et « luvisol ».** Cette fois, on peut être totalement d'accord avec Jean-Paul Legros car c'est une des principales conclusions du présent article (cf. § III.4 et III.5).

1.2 L'article de Quénard *et al.* (2011)

En 2011, Quénard *et al.* ont publié un article dans *Geoderma* dont un des objectifs principaux était d'estimer « *the occurrence of lessivage as a major soil forming process* » à partir des données de la base DoneSol. Cet article ne remet pas totalement en cause le processus d'argilluviation verticale mais il jette surtout un doute sur la véritable fréquence en France des « *luvisols* » et « *albeluvisols* ».

Quénard a repris cet article dans sa thèse (2011) dont il constitue le chapitre 1.

1 Principaux résultats

Ne seront retenus de cet article que deux résultats que les auteurs semblent considérer comme majeurs :

- « *We showed that lessivage is responsible for the formation of Luvisols and Albeluvisols in only 1 % to 12 % of cases* ».
- « *In half of the cases, the current pH of the soil profiles is no longer favourable to lessivage due to agricultural liming practices* ».

2 Fréquence des luvisols et albeluvisols en France

Un des principaux résultats présentés dans cette publication constituait une nouvelle sensationnelle :

« *0.8 % to 1.6 % of the 1946 Luvisol and Albeluvisol profiles, respectively, were formed by lessivage. Accounting for the profiles in which the parent material is entirely pedogenetised, the percentage of profiles in which lessivage is a major process ranges from 7 % to 12 %. We can therefore conclude that the lessivage process is dominant in 1 % to 12 % of cases. Based on this analysis, we demonstrated that lessivage, which is usually considered a major soil forming process, is not as common as described in the literature* ».

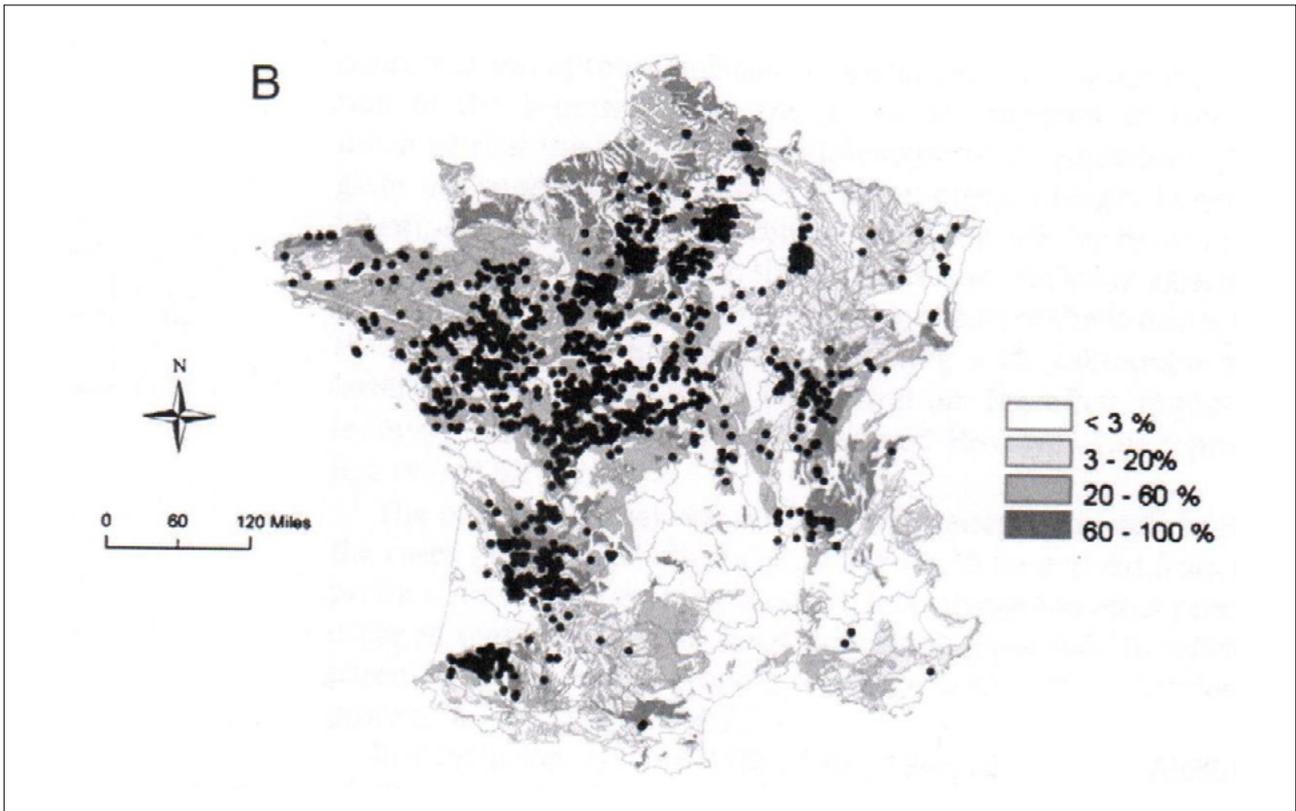
0,8 % à 1,6 % des 1946 profils initialement sélectionnés (soit seulement 6 à 31 profils pour toute la France) seraient des sols à processus de lessivage dominant (c'est-à-dire de véritables luvisols au sens français de ce terme) ! Un tel résultat aurait dû interpeller les auteurs tant il est surprenant ! Quand on regarde la figure 1B de l'article en question (*figure 8*), que l'on voit où se situent les luvisols et al.beluvisols rassemblés dans DoneSol et que l'on connaît un peu les sols de la moitié nord de la France, il est évident qu'il y a dans cette base de données beaucoup plus que 31 profils de vrais Néoluvisols, Luvisols Typiques et Luvisols Dégradés (tous considérés comme des Luvisols ou Albeluvisols par la WRB) !

Partout où de grandes superficies sont couvertes soit par des « limons récents » (löss) soit des « limons anciens », on observe des sols plus ou moins différenciés par argilluviation, plus ou moins marqués par des engorgements, à divers stades d'évolution en fonction de l'âge du dépôt limoneux. On peut citer les territoires des cartes pédologiques à 1/100 000 déjà publiées : Châteaudun, Chartres, Laon, Meaux, Tonnerre, Saint-Dizier, Langres, Dijon. Auxquelles on peut ajouter l'étude des sols de l'Oise (Begon *et al.*, 1976), l'étude des sols du Sundgau (Roque et Hardy, 1981), la thèse de Jamagne et diverses coupures de la carte à 1/50 000 des sols de la région Centre.

Cette première étonnante assertion est atténuée par la prise en compte de sols dont le matériau parental a été entièrement « pédogénétié ». Mais, 7 % à 12 % des 1946 profils sélectionnés initialement représentent entre 136 et 234 profils de véritables luvisols pour toute la France. Ce qui semble encore fort peu.

Figure 8 : Localisation de tous les profils de luvisols et albeluvisols rassemblés dans DoneSol (Quénard et al., 2011, Figure 1B).

Figure 8 : Sampling location of all of the Luvisol and Albeluvisol profiles gathered in DoneSol (Quénard et al., 2011, Figure 1B).



3 Comment les auteurs en sont-ils arrivés à une telle conclusion ?

Tout d'abord, l'objectif n'est pas clair. Voici quelques membres de phrase extraits de l'article :

- « *the existence of lessivage is somewhat controversial...* »
- « *This analysis was performed to estimate the occurrence of lessivage as a major soil forming process...* »
- « *We showed that lessivage is responsible for the formation of Luvisols and Albeluvisols in only 1 % to 12 % of cases...* »
- « *the approach performed to determine whether lessivage was the dominant soil forming process for the 1946 Luvisol and Albeluvisol profiles selected from DoneSol* ».

Tout le monde, y compris les auteurs de l'article, admet l'existence du « lessivage » mais quelle en est la part dans la formation de tel ou tel type de sol ? Accessoire ? Majeure ? Principale ? Unique ? S'agit-il de lessivage vertical, latéral ?

Une première origine de ces étranges résultats : l'ambiguïté des termes

Une des principales ambiguïtés qui traverse tout l'article est l'ambiguïté sur le mot « luvisol ». Les auteurs utilisent la définition de la WRB : un luvisol est défini par la présence d'un « horizon argique » lequel, malheureusement, était défini à cette époque uniquement sur des critères granulométriques. Voici ce que l'on pouvait lire dans la WRB (2006) : « *Un horizon argique est un horizon subsuperficiel ayant une teneur en argile nettement plus élevée que l'horizon sus-jacent* ».

En conséquence, cette catégorie de la WRB inclut de « vrais luvisols » au sens français de ce terme (des sols dont l'essentiel de la morphologie et du fonctionnement consiste en translocation verticale de particules

argileuses) mais aussi beaucoup d'autres sols présentant une nette différenciation texturale, notamment ceux évoqués par Baize (1995) et désignés par lui comme « *autres solums argileux appauvris en argile* ».

En ce qui concerne l'horizon argique, il est signalé très clairement dans la WRB, que ce soit la version en anglais de 2006 ou dans la version en français de 2015, que : « *La différenciation texturale peut être due à :*

- *une accumulation illuviale d'argile,*
- *une formation pédogénétique d'argile prédominante dans le sous-sol,*
- *une destruction d'argile dans l'horizon de surface,*
- *une érosion sélective de l'argile en surface,*
- *un mouvement ascendant de particules plus grossières, dû au gonflement-retrait,*
- *une activité biologique, ou*
- *une combinaison de plusieurs de ces différents processus ».*

En revanche, dans le RP 2008 (comme dans ses versions précédentes), les sols véritablement et principalement formés par argilluviation verticale sont les Néoluvisols, Luvisols Typiques et Luvisols Dégradés, tous définis par le couple d'horizons majeurs E/BT ou Eg/BTg ou Eg/BTgd.

Une deuxième origine possible de ces étranges résultats est le mode de sélection initiale. Dans le texte (p. 137 colonne de droite), il est écrit « *Among the 31,888 soil profiles in DoneSol, 2034² (6.4 %) consist of Luvisols and Albeluvisols* ».

D'où une première série de questions. Quelle a été la première clé pour sélectionner les 2034 Luvisols et al.beluvisols dans DoneSol ? La simple « étiquette » de la colonne type de sol ? Si la réponse est oui, selon quel système : le Référentiel pédologique ou la CPCS ? Selon quelles modalités ? Luvisols et Luvisols dégradés selon le RP ? Sols lessivés et sols lessivés dégradés selon la CPCS ? Les Néoluvisols (anciennement désignés comme sols bruns lessivés) ont-ils été pris en compte ?

Bilans de masse

Puis, comment passe-t-on de cette sélection initiale aux sols où il y existerait véritablement argilluviation » ? A regarder l'organigramme, il semble que ce soit uniquement sur des critères de **ratios granulométriques** et de calculs de « **bilans de masse** ».

Page 139 (colonne de gauche), on peut lire : « *Mass balance calculations show that Luvisols and Albeluvisols have gains equal to losses (+/-50%) in about 1 % of the profiles; thus, they were probably formed by lessivage* ».

Mais comment prendre en compte la totalité des horizons BT ou la totalité des horizons E dans de tels bilans ? Dit autrement : comment reconstituer la totalité d'un vrai luvisol (et faire des bilans de masse complets) avec seulement 2 - 3 ou 4 analyses d'horizons superposés, seules disponibles dans une base de données cartographiques ?

En outre, « *This calculation also requires the bulk density values of the different horizons. These data are rarely available in the DoneSol database. When unavailable, the bulk density was assumed to range from 1.3 to 1.45 for the A/E-horizons (I. Cousin, pers. comm.), from 1.48 to 1.61 with a median of 1.54 for the B-horizon, and from 1.53 to 1.65 with a median of 1.58 for the C-horizon* ». Les auteurs admettent clairement qu'ils ont introduit des données de densité apparentes estimées et non mesurées.

Enfin, pourquoi vouloir que les pertes d'argiles (dans les horizons A et E) équilibrent parfaitement les gains (dans les horizons BT) alors que tout le monde sait que ces gains, difficiles à quantifier, ne sont jamais équilibrés par les pertes estimées en [A+E] et qu'il faut chercher d'autres causes pour expliquer la masse d'argile mesurée en BT (voir § III.2). Sans oublier le fait que l'on peut aussi envisager une réduction d'épaisseur des horizons éluviés supérieurs, par suite d'une érosion partielle...

² Comment sommes-nous passés de 2034 à 1946 profiles ? Voici l'explication : « *Among the 31,888 soil profiles in DoneSol, 2034 (6,4%) consist of Luvisols and Albeluvisols... The ITD meets conditions characteristic of argic horizon development in 96% of cases... this represents 1946 of the 2034 available profiles* ».

4 Petite conclusion intermédiaire

Il est probable que beaucoup de sols classés comme « luvisols » dans DoneSol, faute de mieux ou faute d'information suffisante, sont développés dans deux matériaux superposés ou bien que les processus de lessivage d'argile, bien réels, se surimposent à des matériaux déjà fortement altérés. D'autres sols, enfin, auraient dû probablement être désignés comme planosols. Cependant, les conclusions de cet article paru dans Geoderma, relatives à la très faible fréquence des « véritables » luvisols dans le nord de la France semblent excessives.

Les clés utilisées par Quénard et ses co-auteurs et les hypothèses servant de bases à ce modèle de tri ne me semblent ni très claires ni très convaincantes. Il y a trop d'incertitudes. Revisiter la base DoneSol avec des yeux plus critiques et d'autres clés d'entrée pour en avoir le cœur net serait nécessaire. Mais cela serait un travail considérable d'une utilité discutable.

II TRAVAUX RÉCENTS

Les théories dites « classiques » relatives à l'illuviation dans les luvisols ayant été plus ou moins remises en cause, un certain nombre d'études ont été lancées récemment, certaines ayant utilisé des techniques qui n'existaient pas dans les années 70 et 80 (analyse d'image assistée par ordinateur, isotopes naturels ou artificiels, modélisation).

II.1 Le cas des sols limoneux de Moyenne Belgique (Langohr, 2001)

Ce pédologue a consacré un article à l'anthropisation du paysage pédologique belge. En ce qui concerne les sols de Moyenne Belgique issus de lœss, voici ses conclusions.

Dans la région des lœss, les sols fortement dégradés, ou « *sols lessivés à glosses et fragipan* », très acides et pauvres en bases, peuvent encore être observés dans les zones forestières actuelles, à condition que le pâturage ait été absent ou au moins très limité. Ces sols sont représentatifs du paysage pédologique qui existait déjà il y a quelque 7000 ans, quand les premiers fermiers néolithiques s'installèrent au moins temporairement. Le pâturage sous forêt a transformé graduellement ces sols fortement dégradés à cause de l'intensification du biomalaxage du sol par les vers anéciques et par les taupes. Ces sols restent très acides et pauvres en bases.

« Leur mise en culture a également accéléré la bioturbation et augmenté le pH et la saturation du complexe adsorbant. Les sols qui dominent aujourd'hui dans la région des lœss, considérés comme des « sols bruns lessivés », correspondent en fait à des sols fortement dégradés anciens qui ont été mis en agriculture depuis de nombreux siècles. L'érosion, le biomalaxage et l'application d'importantes quantités d'engrais organiques et minéraux les ont transformés en sols très fertiles. Tous ces éléments fournissent des arguments pour considérer ces sols comme faisant partie des Anthroposols. Toutefois il est proposé de les maintenir dans les taxons actuels mais de les différencier au moyen d'un intergrade « bioagrique » pour tenir compte de nos connaissances actuelles sur l'origine et la dynamique particulière de ces sols qui aujourd'hui couvrent la majeure partie de la région des lœss ».

II.2 Les travaux de Montagne (2006 ; et al., 2013)

Ils traitent essentiellement de l'impact du **drainage** et de la mise en culture sur le processus de **dégradation morphologique** dans le cas de Luvisols Dégradés du Gâtinais de l'Yonne. La comparaison a été menée sur un même site entre un sol sous forêt et un sol agricole drainé depuis 16 ans, situés à quelques mètres de distance l'un de l'autre. Des analyses détaillées ont été faites dans les différents horizons observés dans une tranchée de 7 m creusée perpendiculairement aux drains. Les prélèvements ont été réalisés à différentes distances du drain (-300 ; -60 ; + 60 ; +110 ; + 210 et +400 cm).

Des bilans de matière ont été réalisés. « *Les volumes ocre résiduels de l'horizon BTgd ont été considérés comme représentatifs de l'horizon illuvié avant dégradation et choisis comme état de référence en*

remplacement du matériel parental plus classiquement utilisé [qui n'existe plus]. Un tel choix permet de quantifier les flux de matière liés au processus de dégradation morphologique **indépendamment de l'ensemble des processus antérieurs et notamment du processus d'illuviation primaire**. Les calculs ont finalement été effectués en utilisant le quartz comme invariant ».

Voici quelques éléments de conclusion (Montagne *et al.*, 2013) :

« La dégradation morphologique sous forêt a conduit sur une durée de l'ordre de la dizaine de milliers d'années, à l'exportation de 90 kg/m² de fraction < 2 µm, de 12 200 g/m² de fer et à des redistributions entre volumes d'environ 35 à 60 g/m² de Mn soit environ 45 %, 55 % et 30 % des stocks de fraction < 2 µm, de Fe et de Mn initialement contenus dans l'horizon illuvial non dégradé. Après la mise en culture, le chaulage a permis d'éviter des pertes d'environ 50 kg/m² de fraction < 2 µm, de 7 000 g/m² de fer et de limiter à 30 à 40 g/m² les redistributions de Mn pour la position +400. Enfin, le réseau de drainage a conduit localement (position +60 cm) à l'exportation de 70 kg/m² de fraction < 2 µm et de 7 500 g/m² de fer.

« Les deux évolutions de la structure des horizons Eg&BT - au sens de l'organisation spatiale des volumes dégradés et non dégradés - et des propriétés physiques des volumes dégradés sont favorables à une accélération des flux d'eau traversant les volumes dégradés et finalement à une augmentation de l'intensité du processus d'éluviation ».

« Nous avons démontré que la mise en culture est un facteur d'évolution des sols capable de ralentir le phénomène de dégradation morphologique, du fait du chaulage, ou au contraire de l'accélérer, suite à l'implantation d'un réseau de drainage »... « sous forêt, les processus d'oxydo-réduction sont nécessaires au développement du phénomène de dégradation morphologique. En revanche, la dégradation morphologique sous l'impact du drainage semble principalement sous contrôle des processus de transfert particulaire, sans réduction préalable des oxyhydroxydes de fer ».

Les travaux de Montagne et de Langohr soulignent les diverses influences de l'anthropisation sur le fonctionnement, l'évolution et donc la morphologie des luvisols, mais ils ne remettent pas en cause les schémas connus de l'illuviation initiale.

II.3 Les expériences de Quénard (2011)

Le lecteur peut se reporter soit à la thèse de Quénard (2011) soit à l'article dans Geoderma (Cornu *et al.*, 2014) qui en reprend les principaux résultats.

Les travaux ont consisté en une série d'expériences réalisées au laboratoire, menées sur des échantillons non perturbés de formes cylindriques (15 cm de haut et 15 cm de diamètre) prélevés dans deux luvisols entre 35 et 50 cm de profondeur.

Le dispositif comprenait d'une part un test d'éluviation fait sur des échantillons présentant 30 % d'argile et contenant des smectites (échantillons nommés L1) et, d'autre part, un test d'illuviation fait sur des colonnes constituées des échantillons L1 superposés à d'autres échantillons contenant 16 % d'argile et dépourvus de smectites (nommés L2).

Après une sélection à partir des données du RMQS, trois sites ont été re-prélevés. Malheureusement, les échantillons L1 (« La brosse ») supposés représenter un horizon E avec environ 19 % d'argile en contiennent 30,7 %, ce qui est beaucoup trop pour représenter correctement un horizon éluvié limoneux de luvisol.

Ces colonnes ont été soumises à un nombre croissant d'évènements pluvieux artificiels (jusqu'à 28) de diverses durées et de deux intensités (20 mm/h et 6 mm/h). Après chaque pluie, une succion a été appliquée à la base des colonnes (-30 hPa puis montant jusqu'à -220 hPa) jusqu'à dessèchement. L'eau percolée a été pesée à la fin de la période de ressuyage et la concentration en particules déterminée grâce à des mesures de turbidité. Enfin, la caractérisation minéralogique de ces particules a été réalisée par diffraction des rayons X sur lames orientées normale et glycolée.

Voici quelques éléments de conclusion extraits du résumé (Cornu *et al.*, 2014) :

« The eluviation experiment showed that the release of particles was not the determining process for leaching. We also showed that the smectite selectivity of eluviation was not continuous over time. Both physical and chemical processes were identified as acting on both eluviation and illuviation ».

Dans sa thèse, à la page 227, Quénard a écrit :

« Nos résultats mettent en évidence que seule une fraction des particules mises en suspension dans l'horizon d'éluviation est fixée dans l'horizon d'illuviation. Les expérimentations fournissent une fourchette de 20 à 80 % de fixation. Si cette fourchette est très large, elle représente néanmoins un résultat original dans la littérature ».

Cette assertion est reprise dans l'article en anglais, légèrement modifiée :

« Concerning illuviation, experiments showed that from 25 to 90 % of the eluviated particles were retained in the deeper horizon. Although large, to our knowledge this range represents the first quantification of illuviation ».

Certes, de nombreuses précautions expérimentales ont été prises *« so that the conditions were favourable for leaching and as close as possible to field conditions »*. Cependant les conclusions tirées de ces expérimentations au laboratoire, dans des conditions très artificielles, paraissent difficilement généralisables aux sols dans leur milieu, que celui-ci soit naturel ou cultivé.

II.4 Les travaux d'Ophélie Sauzet

Voici de larges citations de trois publications du plus grand intérêt (Sauzet 2012 ; 2016 et 2017).

1 Présentation - Démarche

« Ce travail tente de quantifier les variations d'intensité du lessivage en réponse à la mise en culture et à l'apport de matières organiques exogènes. Notre approche est basée sur le couplage de la micromorphologie et de l'analyse d'images assistée par ordinateur en vue d'une quantification systématique et automatique de l'abondance surfacique de traits pédologiques spécifiques du lessivage. L'échelle microscopique permet en effet de caractériser avec précision les traits pédologiques et elle est donc à privilégier pour découpler et caractériser les multiples processus mis en jeu dans la genèse des contrastes texturaux. L'analyse d'images sur lames minces de sol permet quant à elle i) de quantifier et caractériser micromorphométriquement les revêtements argileux, et ii) de traiter un grand nombre d'échantillons permettant de garantir la représentativité spatiale et statistique des quantifications effectuées.

« Trois luvisols ont été sélectionnés : un luvisol sous forêt (FOR) et deux luvisols issus du dispositif QualiAgro, le premier cultivé sans apport de matières organiques (CULT) et le second avec apport régulier de fumier (FUM). Localisés sur le même plateau des Alluets dans les Yvelines et formés dans un même matériau parental, ces trois luvisols ne se distinguent ainsi que par leur mode d'occupation forestier ou agricole et, pour les deux luvisols cultivés, par l'apport ou non de matières organiques exogènes ».

L'abondance des traits d'accumulation d'argiles dans un horizon profond est illustrée par la *figure 9*.

Le développement et la validation de la quantification de l'abondance des revêtements argileux par analyse d'images sont présentés par Sauzet comme *« Une innovation méthodologique majeure »*. Le lecteur désireux de connaître les détails de ces techniques se reportera à Sauzet (2016).

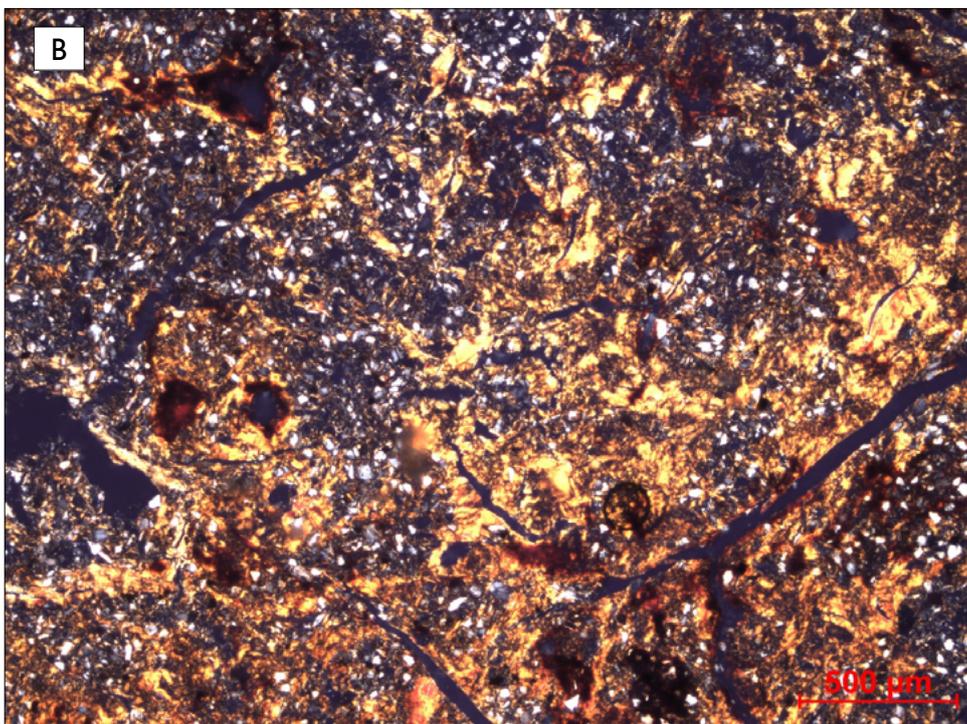
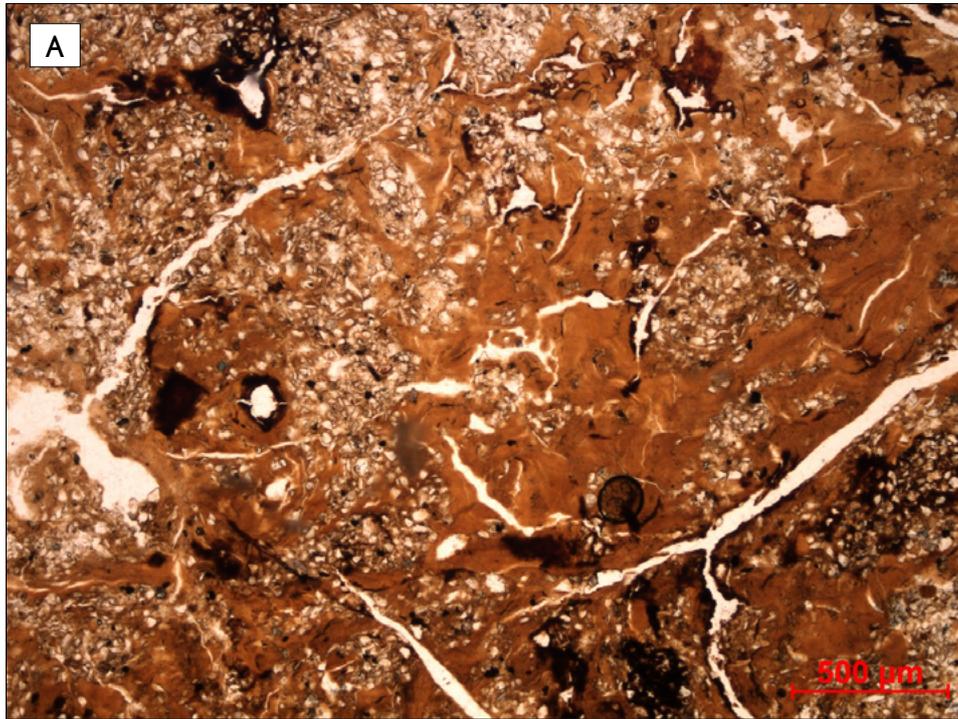
2 Principaux résultats : masses d'argiles illuviées

« La quantité totale de fraction < 2 µm illuviée est comprise entre un minimum de 700 t/ha pour le profil FOR et un maximum de 1100 t/ha pour le profil CULT alors que le profil FUM présente une quantité intermédiaire (800 t/ha). Ainsi, 150 ans de mise en culture ont été suffisants pour induire une augmentation significative de l'intensité du processus d'illuviation... A l'inverse, une dizaine d'années d'apports répétés de matières organiques tendent à limiter l'augmentation de l'intensité du lessivage en réponse à la mise en culture.

A partir des données analytiques présentées dans la thèse de Sauzet (2016) à la page 26, il est possible de faire quelques calculs simples. Si l'on admet que les particules argileuses arrivées dans les horizons BT par illuviation et quantifiées par Sauzet venaient des horizons E, on arrive aux chiffres du *tableau 1*.

Figure 9 : Luvisol cultivé avec apports de fumier (FUM). Horizon BT2 (80-90 cm). Les Alluets (Sauzet, 2016). Photos O. Sauzet. A : Lumière dite « naturelle ». B : Lumière polarisée et analysée.

Figure 9 : Cultivated luvisol with repeated manure inputs (FUM). BT2 horizon (80-90 cm). Les Alluets. A : Light known as "natural". B : Polarized and analysed light.



Les horizons A et E ou LE1, LE2 et E/BT ont été rassemblés et considérés comme horizons de départ. Les horizons BT, BT/C et C/BT ont été rassemblés et considérés comme horizons d'arrivée. Toutes les valeurs sont exprimées en t/ha (tonnes par hectare).

Tableau 1: Calculs établis pour les trois sites de la thèse de Sauzet (2016).

Table 1: Calculations established for the three sites of Sauzet's thesis (2016)

		Poids total d'argiles quantifié aujourd'hui (2016)	Apports d'argiles par illuviation tels que quantifiés par Sauzet	Poids total initial d'argiles	Poids d'argiles éluviées en % du poids initial d'argiles dans les horizons E	Poids d'argiles illuviées en % du poids initial d'argiles dans les horizons BT
FORET	Horizons A et E	830		1530	-46%	
	Horizons BT	4140	+ 700	3440		+20%
CULT	Horizons LE	1000		2100	-52%	
	Horizons BT	4003	+ 1100	2903		+38%
FUM	Horizons LE	982		1782	-45%	
	Horizons BT	3994	+ 800	3194		+25%

On voit (colonnes de droite) qu'environ la moitié de la quantité d'argiles présente initialement dans les horizons de surface éluviés est partie vers les horizons BT. Mais ces argiles déplacées ne représentent qu'une modeste part de la quantité d'argiles présente aujourd'hui dans les horizons BT.

Voici deux autres citations, toujours extraites de Sauzet (2016).

« Il est classiquement admis que le pH joue un rôle de premier plan dans le processus de lessivage et que la gamme de pH favorable à la mobilisation des particules est comprise entre 5 et 6,5. Ainsi, seul le sol forestier, avec un pH juste au-dessus de 5 dans les horizons A et E, présenterait des pH favorables au processus d'éluviation. A l'inverse, les profils CULT, avec un pH de 6,6 et surtout FUM avec un pH supérieur à 7, présenteraient des pH trop élevés pour être favorables au lessivage. Le lessivage plus intense observé dans le profil CULT par rapport au profil FOR suggère ainsi que, contrairement au modèle classiquement accepté, le pH n'a qu'un impact limité sur l'intensité du lessivage ou, pour le moins, que la gamme de pH favorable au lessivage doit être révisée venant confirmer nombre de résultats récents allant dans le même sens ».

« Le volume de sol bioturbé depuis 10 000 à 15 000 ans, est compris entre 65 % du volume total à 40 cm de profondeur et 20 à 30 % du volume total à 150 cm de profondeur soit une masse de sol déplacée de l'ordre de 6 500 t/ha ou 1 700 t/ha de fraction fine. Le processus d'illuviation est, quant à lui, à l'origine d'un flux de fraction fine de 1 100 t/ha. Les processus étudiés se sont montrés sensibles et étonnamment réactifs aux forçages anthropiques. Deux cents ans de mise en culture ont eu pour résultats : i) une évolution de la structuration des sols sur au moins un mètre de profondeur, ii) une modification de l'architecture du volume de sol remanié par les vers de terre, et iii) une intensification du processus de lessivage. Une dizaine d'années d'apports répétés de fumier ont à l'inverse été en mesure de tamponner la plupart de ces évolutions ».

II.5 Les 42 parcelles de Versailles (van Oort et al., 2016)

Dans le cadre du célèbre dispositif des 42 parcelles à l'Inra de Versailles, cette étude récente (van Oort et al., 2016) a montré que, en seulement 85 ans, mais sous des conditions expérimentales extrêmes (répétition chaque année de divers traitements, en jachère nue), certaines micro-parcelles ont vu s'accroître l'éluviation d'argile dans l'horizon de surface du sol (un Néoluvisol issu d'un loess calcaire apparaissant entre 85 et 120 cm). Dans les micro-parcelles témoins (sans traitements), la teneur en argile de 17,6 % correspondrait à une diminution d'environ 2 % d'argile en 85 ans. Mais les auteurs constatent une perte d'environ 6 % d'argile (13,4 % en 2014 vs 19,5 % en 1929) dans les micro-parcelles ayant reçu des traitements sodiques (KCl, sylvinite).

« Les conditions physicochimiques dans les sols sous traitements [d'ions] 'monovalents' avec la présence de proportions significatives de Na⁺ et/ou K⁺ et un milieu faiblement acide, sont favorables à la dispersion des minéraux phyllosilicatés. Le processus d'argilluviation y est donc amplifié par rapport aux parcelles 'témoins' et explique les diminutions simultanées de la teneur en fraction < 2 μm et de la CEC dans l'horizon de surface. La diminution de la teneur en argile est plus importante quand Na est l'ion monovalent dominant... [et quand] les valeurs de pH sont inférieures à ≈ 6,5, car au-dessus, la proportion de Ca⁺⁺ est importante ».

II.6 Modélisation des transferts verticaux (Jagercikova et al., 2017)

Voici quelques extraits de l'article publié dans *Journal of Soil and Sediments*.

« In this study, we examine matter transfer in four eutric Luvisols through an isotopic approach based on ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb(xs), and meteoric ¹⁰Be. These isotopes differ with respect to chemical behavior, input histories, and half-lives, which allows us to explore a large time range. Their vertical distributions were modeled by a diffusion-advection equation with depth-dependent parameters. We estimated a set of advection and diffusion coefficients able to simulate all isotope depth distributions and validated the resulting model by comparing the depth distribution of organic carbon (including ^{12/13}C and ¹⁴C isotopes) and of the 0–2-μm particles with the data.

The four Luvisols developed... on loess deposited... in northern France during glacial eras and until 15000-17000 years BP. They have thus undergone pedogenesis for at least the last 15000 years and developed from the same parent material under similar climatic and topographic conditions (slope < 1 %). ... In Mons, Luvisols (under cropland and grassland) are developed from several metres of loess and are thus well drained, whereas in Feucherolles, clay and gritstone deposits are found at approximately 1,5 m depth. Finally, in Boigneville, chalk is reached at approximately 80 cm depth. Luvisols in Feucherolles exhibit features of morphologic degradation due to the change of parent material with depth.

Regarding clay translocation, we conclude that i) it is possible to simulate the formation of a Bt-horizon at the appropriate depth by restricting modelling to vertical solid transfers and ii) the 0-2 μm fraction bulge is rapidly formed (within a few decades after the beginning of the simulation), demonstrating that clay translocation is a rapid process. We also highlight that vertical solid matter transfer explains a maximum of 24 % of the 0-2μm accumulation in the Bt-horizon, the rest being due to other processes, such as in situ weathering of primary minerals and clay neo-formation ».

Il faudrait être un bon expert pour juger de la pertinence des estimations introduites dans la modélisation. L'étude, menée sur quatre sols assez différents (épaisseurs, substrats), développés dans divers « limons des plateaux », ne met pas en cause la réalité de l'argilluviation verticale mais estime sa contribution à un maximum de 24 % de la quantité d'argile présente dans les horizons d'accumulation BT.

III CONCLUSIONS GÉNÉRALES

On observe des sols à profil textural différencié (i. e. des horizons à texture plus grossière au-dessus d'horizons à texture plus fine) partout dans le monde. Ces sols ont donné lieu à de très nombreuses études et controverses quant au poids relatif du processus d'illuviation verticale de particules argileuses dans leur genèse et leur développement.

III.1 Universalité des processus de transferts d'argiles

Des processus d'éluviation et d'illuviation sont reconnus dans d'autres types de sols et de pédogenèse que les luvisols. Pour certains d'entre eux, l'éluviation des minéraux argileux et du fer dans les horizons supérieurs ne donne pas lieu à une illuviation des mêmes éléments plus bas dans le solum. Les argiles mobilisées en suspension sont **évacuées latéralement**, les eaux de pluies ne pouvant pénétrer un plancher imperméable peu profond. C'est le cas des « planosols primaires » et des Pélosols Différenciés (Baize, 1983 ; Baize, 1995 ; AFES, 2009 – *Figures 10 et 11*).

Des **déplacements verticaux d'argile** sous forme colloïdale peuvent être observés dans d'autres solums rattachés à d'autres références du Référentiel pédologique 2008, mais dans ce cas, soit ils sont de faible importance et/ou amplitude, soit ils constituent un processus considéré comme secondaire par rapport à un autre processus considéré comme dominant. En effet, il arrive souvent que des processus d'éluviation/illuviation verticale se sont superposés à des pédogenèses antérieures beaucoup plus anciennes et beaucoup plus longues (Baize, 2024). C'est le cas des Fersialsols Éluviques (AFES, 2009), des « terres d'Aubues » profondes et des « argiles à chailles » de Basse Bourgogne (Baize, 1991 ; Baize, 2012) et des « ultisols » développés dans des terrasses d'alluvions très anciennes entre l'Yonne et la Cure au nord de Vézelay (Baize, 2019). Dans tous ces cas, l'argilluviation est attestée à la fois par des horizons supérieurs très appauvris en argile contrastant avec des horizons beaucoup plus argileux sous-jacents et surtout par l'existence de nombreux ferri-argilanes, sans qu'on puisse faire appel à une hétérogénéité du matériau parental.

Pour illustrer l'existence de sols qui ne correspondent pas au concept de luvisols mais qui présentent des traits d'illuviation, on peut citer également les Phaeosols Mélanoluviques de Bulgarie et de Roumanie (AFES, 2009). Ils sont caractérisés par la présence d'horizons BT « mélanoluviques » (codés BTh) où l'on observe de nombreux revêtements organo-argileux sur les faces des agrégats. Le taux d'argile du BTh est supérieur à celui des horizons superficiels sus-jacents (codés Aso), conséquence à la fois d'une illuviation verticale d'argiles mais aussi et surtout d'une importante formation d'argile *in situ* par altération des minéraux primaires. Il s'agit en effet le plus souvent de sols anciens, fort épais (> 1,5 m), n'ayant pas connu de périodes glaciaires, et développés dans des formations superficielles initialement beaucoup plus argileuses que des lœss.

Dans le contexte d'éluviation ou d'illuviation pour compléter la désignation de non-luvisols, le RP 2008 (AFES, 2009) propose deux qualificatifs :

- « **appauvri** » pour qualifier un solum (autre qu'un luvisol, un Pélosol Différencié ou un 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. Ce terme peut qualifier des brunisols, des pélosols, etc.
- « **luvique** » pour qualifier un solum (autre qu'un luvisol) présentant des traits d'illuviation d'argile, jugés insuffisants cependant pour constituer un véritable horizon BT (brunisols, Arénosols, Nitosols, Phaeosols Hapliques, etc.) ;

En ce qui concerne la *Soil Taxonomy*, Bockheim et Hartemink (2013) signalent les faits suivants :

« *There are three diagnostic subsurface horizons in Soil Taxonomy that are defined on the basis of clay illuviation of silicates clays : (1) the argillic horizon (2) the kandic horizon, and (3) the natric horizon. In addition to diagnostic subsurface horizons, there are two diagnostic soil characteristics that are based on clay movement : (1) abrupt textural change and (2) lamellae... Clay illuviation is recognized in ST at some level in 10 of the 12 orders, including orders (Alfisols, Ultisols), suborders (...) and subgroups (...). Forty-*

Figure 10 : Deux grands processus affectant les particules argileuses sous climats tempérés humides. Représentation schématisée des luvisols vs planosols primaires (sous forêt). Dans cette **Figure**, le luvisol est issu de loess et le planosol est développé à partir d'un sédiment marin argileux faiblement calcaire.

Figure 10 : Two major soil forming process affecting clay particles in humid temperate climates. Schematic representation of luvisols vs primary planosols (under forest). In this picture the luvisol developed from a loess and the planosol developed from a clayey marine sediment.

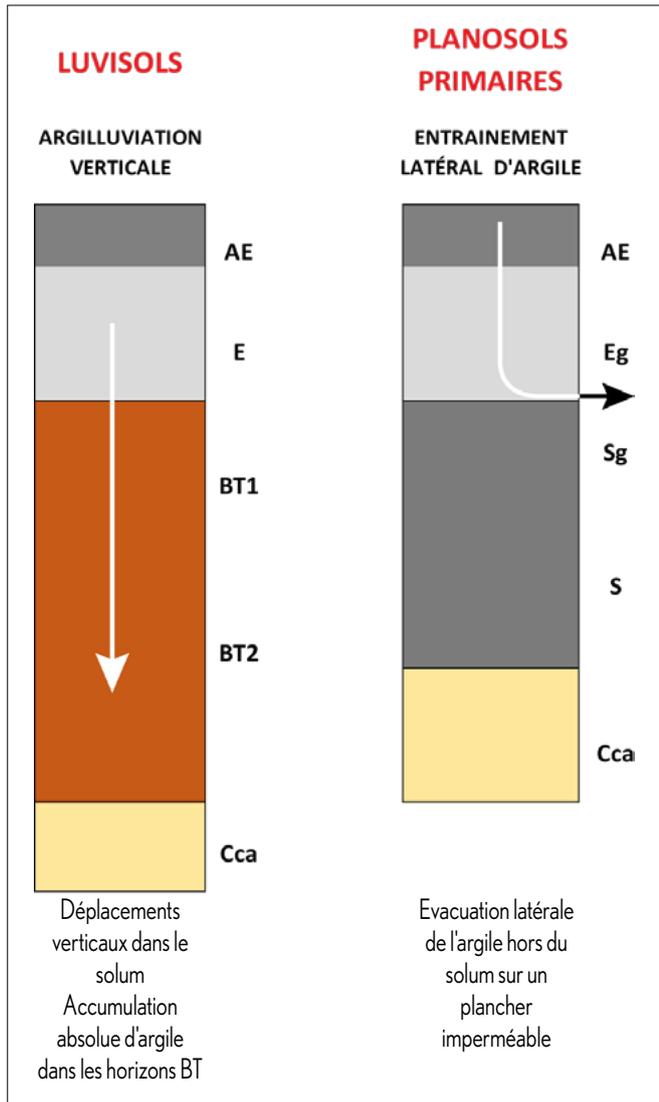


Figure 11 : Planosol sableux en surface, argilo-sableux en profondeur, issu de l'altération des "sables verts" suivi par une « planosolisation » (Champagne humide). Noter la "dégradation morphologique" à la partie supérieure des horizons Sg verts.

Figure 11 : Planosol with sandy upper horizons and with sandy clayey ones at depth. It developed due to the weathering of "green sands" followed by the planosolisation" process (Champagne humide). To be noted the "morphological degradation" at the top of green Sg horizons.



four percent of the soil series in the USA contain taxonomically defined argillic, natric or kandic horizons. Other soils contain a Bt horizon so that more of than half of the soils of the country feature clay illuviation. All of the soil-forming factors play an important role in processes leading to the development of horizons of clay enrichment ».

III.2 Autres processus menant à des sols à profil textural différencié

Bockheim et Hartemink (2013), parmi beaucoup d'autres, insistent sur les causes multiples de la genèse des sols à horizons enrichis en argile.

« *The genesis of clay-enriched horizons is complicated. In his discussion of the origin of texture-contrast soils, Phillips (2001) states: « Multiple causality is likely and attempts to apply any single explanation to a county-size area (and sometimes to a pedon) are not likely to be successful. The implication is not that pedologists should abandon the search for generalizations, but that the context in which laws and generalizations are developed needs rethinking. Explanatory constructs should be formulated not with the notion that a single explanation is likely to be applicable to most soils, but with the idea that multiple causality and polygenesis are likely, and that location-specific characteristics cannot be ignored ».*

Cette pluralité des processus susceptibles de participer à la genèse de « sols à fort contraste textural » est également envisagée dans la WRB (IUSS, 2015) à l'occasion de la définition et de la description générale de **l'horizon argique**, horizon diagnostique des Luvisols dans ce système (*voir ci-avant, § II.2.3*).

La **bioturbation** comme facteur de différenciation de sols à texture contrastée, a été étudiée par Phillips (2007) mais ce sont les travaux de Sauzet (2016) qui se sont efforcés de quantifier ce phénomène parallèlement aux transferts verticaux d'argile par illuviation.

L'**érosion sélective** a été très souvent décrite par Roose. Cet auteur (e.g. 2010) précise que, sous climats tropicaux et méditerranéens, l'érosion en nappe sur pente douce ne peut déplacer que les particules les plus fines. La couche arable s'appauvrit en particules légères (argiles + limons + matières organiques) par **érosion sélective** (dite aussi squelettisation des horizons de surface). Il ne reste à la surface du sol qu'un lit de sables délavés. Ce phénomène d'érosion sélective n'affecterait que les quelques millimètres les plus superficiels. Mais s'il perdure sur plusieurs décennies, il peut aboutir à un appauvrissement général de l'horizon supérieur labouré.

III.3 Des difficultés conceptuelles et pratiques

La désignation des sols et le rattachement à tel ou tel référentiel national ou international n'est pas chose aisée. Il y a toutes sortes de difficultés tant théoriques que pratiques.

Rappelons que l'on ne peut pas dire qu'un solum « **est** » un luvisol. C'est nous les pédologues qui, collectivement, avons élaboré le concept de luvisol à partir d'observations répétées et théorisées. Certains solums que nous étudions correspondent très bien à notre concept central (heureusement !) et nous les rattachons sans difficulté à la catégorie des luvisols. Mais il n'est pas étonnant que, dans le milieu naturel, de nombreux solums s'éloignent plus ou moins de l'orthotype conceptuel. D'autant que l'argilluviation verticale est un processus très général sous nos climats et qu'il n'affecte pas seulement les luvisols. Or, d'un pays à un autre, il y a de notables différences dans la définition du concept central de « luvisol ».

Donc, des personnes moins expérimentées et moins au fait des référentiels officiels, peuvent très bien hésiter et se tromper lorsqu'elles se sentent obligées de mettre une étiquette aux sols qu'elles ont observés.

Sans oublier les difficultés de « traduction » pour passer d'un système à un autre (CPCS → RP puis RP → WRB) par des personnes (souvent des stagiaires) qui doivent opérer ces « équivalences » bien des années après l'étude de terrain et n'ont jamais vu les sols en question. Ceci est probablement advenu dans la base de données DoneSol mais cela ne remet nullement en cause son intérêt opérationnel.

III.4 Une question de définition – Confusion internationale

Beaucoup de gens ont cru traiter de vrais luvisols (ou de vrais alfisols) et ont cherché les signes évidents de l'argilluviation, notamment les revêtements... sans les trouver. Certains auteurs en ont déduit que ces revêtements ont existé mais qu'ils ont été détruits et fragmentés soit par bioturbation soit en conséquence de la nature gonflante des minéraux argileux (*cf. encadré*).

Pour illustrer cette notion d'« horizons argilliques sans *clay skins* », il suffit de rappeler la notion d' « horizon Bt dynamique » qui a été en vogue à la fin des années 1960 (Fedoroff 1968 ; Fedoroff et Fiès, 1968 ; Fedoroff et Rossignol, 1969) et de citer un extrait de l'article de Nettleton *et al.* (1969).

Nettleton et ses co-auteurs ont étudié des sols de l'Arizona, de Californie et de l'Oregon :

« All but one have a clay increase from the A to B horizon that is sufficient to meet the clay requirement of argillic horizons. ... There are no clay skins in Bt horizons with high shrink-swell potentials where the plasmic fabrics show that the horizons have been under stress. Shrinking and swelling may prevent clay skins from being formed and it may destroy preexisting clay skins. ... Nevertheless, there is evidence that these horizons were formed through illuviation of clay and they should continue to be recognized as argillic horizons ».

Cet article illustre bien la confusion conceptuelle introduite par la notion d'horizon argillique aux États-Unis à cette époque. Le contraste textural est suffisant pour admettre l'existence d'un horizon Bt. Mais, en micromorphologie, on ne voit aucun « *clay skin* » correspondant à des argiles d'illuviation. Si on n'en voit pas c'est qu'ils ont été détruits. On peut donc, même sans argument micromorphologique, continuer à désigner ces horizons comme des horizons argilliques.

Bronger signale la même chose (*cf. la citation ci-dessus au § I.1.4*). Aux USA, de nombreux sols dans lesquels les pédologues étatsuniens considèrent qu'il existe un horizon Bt ne montrent pas de revêtements d'illuviation.

D'un système de classification à un autre, voire d'une version à une autre du même système, les définitions ont changé tandis que le mot restait le même.

Les luvisols étaient ainsi définis dans la Légende de la carte mondiale des sols (FAO-Unesco, 1975) :

« Sols ayant un horizon argilique dont le taux de saturation en bases (déterminé par NH_4OAc) est égal ou supérieur à 50 pour cent, au moins dans la partie inférieure de l'horizon B... n'ayant pas d'horizon mollique ; n'ayant pas d'horizon E albique recouvrant un horizon faiblement perméable... ».

Et l'horizon argilique recevait cette définition : *« Un horizon B argilique est un horizon qui contient des argiles phylliteuses illuviales. Cet horizon se forme au-dessous d'un horizon éluviaal ».* Il est certain que *« qui contient des argiles illuviales »* est une formulation vague qui n'implique nullement que cet horizon B soit formé **principalement** par des apports d'argiles illuviées.

Dans la WRB (qui est la lointaine descendante de la Légende FAO), les **luvisols** ont longtemps été définis ainsi (IUSS Working group, 2015) :

- Page 10 : « Sols à sous-sol enrichi en argile » et « argiles à forte activité, teneur élevée en bases ».
- Page 117 (dans la clé de reconnaissance) : « Autres sols ayant un horizon argilique commençant à ≤ 100 cm de la surface du sol ».

Quant à l'**horizon argilique**, il est défini ainsi (page 6) : *« Couche subsuperficielle avec contenu en argile nettement plus élevé que dans la couche sus-jacente et/ou présence d'argile illuviale ».*

Le glissement historique de l'horizon argilique à l'horizon argique a sans doute facilité le travail des pédologues à travers le monde, selon l'idée qu'on doit pouvoir reconnaître et nommer les sols sur le terrain sans recourir à de coûteuses analyses ou à la réalisation de lames minces. Malheureusement, ce glissement a modifié complètement le champ de reconnaissance des « luvisols » et a introduit une confusion bien regrettable.

III.5 Choix des termes

Décidément, les mots « sol lessivé » et « lessivage » étaient décidément trop ambigus. Un horizon supérieur « lessivé » (c'est-à-dire appauvri en argile) peut être présent dans toutes sortes de solums dans lesquels le processus principal est un appauvrissement latéral (voire une dégradation géochimique primaire) et non un transfert vertical.

Dès 1966, à propos des sols ferrallitiques, Aubert et Segalen signalaient déjà que les termes « lessivé » et « lessivage » étaient source de confusions.

Mais, nous venons de le voir, le mot « luvisol » est lui aussi devenu ambigu, selon le système de désignation des sols auquel on se rattache. La confusion maximale est atteinte en ce qui concerne la définition et la signification pédogénétique de l'horizon Bt.

- Aujourd'hui les pédologues français ont pris la bonne habitude de distinguer :
- La **lixiviation** : entraînement de matières sous formes solubles.
- Le départ sélectif de particules argileuses en suspension hors des horizons supérieurs est nommé **éluviation**.
- Les **transferts verticaux** de particules argileuses avec accumulation absolue dans des horizons plus profonds correspondent à l'illuviation ou **argilluviation** : ils mènent, notamment, à la formation progressive des **luvisols**.
- Les **transferts latéraux** avec évacuation des particules fines dans les eaux de nappes hypodermiques temporaires circulant latéralement mènent à un appauvrissement en argile superficiel et, progressivement, à la formation de **planosols**.
- La « **dégradation géochimique** » c'est l'altération *in situ* des minéraux argileux, en milieu acide et temporairement réducteur.

Dans le Référentiel pédologique 2008, les notions de **luvisols** et de **planosols** sont désormais clairement explicites et permettent de bien distinguer les deux morphologies et les deux types de fonctionnements hydriques, vertical vs latéral.

III.6 Que conclure ?

Selon moi, les conceptions classiques résistent parfaitement à la critique, à condition de donner des définitions claires à tous les mots de notre vocabulaire et de ne pas tout mélanger (notamment les luvisols « vrais » et les planosols). Il est vrai que le mot **lessivage**, qui ne concerne que le départ des particules et non la direction des transferts ni les lieux de dépôt des matières transportées, est trop vague. Legros a donc raison lorsqu'il écrit (2014) : « *il ne faut donc pas associer de trop près les concepts « lessivage » et « luvisols ».*

Sans doute les différentes critiques doivent nous pousser à être toujours plus clairs et plus précis dans nos conceptions, définitions et rédactions.

REMERCIEMENTS

À Ophélie Sauzet et Folkert vanOort qui m'ont aimablement fourni une ou plusieurs de leurs photos.

ANNEXE :

Évolution de la présentation schématique de la chronoséquence de Jamagne.

Au moins cinq figures ont illustré successivement la chronoséquence théorique de Jamagne. Leur graphisme a peu évolué au cours du temps mais leur auteur s'est efforcé d'adapter la désignation des différents types de sols à la terminologie du moment : CPCS puis Référentiel pédologique. Ci-dessous sont présentées ces cinq versions (figures 12 à 16).

Figure 12 : « Interprétation pédogénétique de la séquence observée sur limons loessiques dans le nord de la France. Évolution des caractères morphologiques » selon Jamagne (1973). La désignation « sol lessivé glossique planosolique » est étrange car quelque peu contradictoire.

Dans un article publié en anglais dans *Geoderma* (Pédro et al., 1978) cette même version présente les types de sols avec leurs correspondances selon le Soil Taxonomy.

Figure 12 : "Pedogenetic interpretation of the sequence observed on loess deposits in the north of France. Evolution of morphological characters" according to Jamagne (1973). The designation "sol lessivé glossique planosolique" is rather strange because it is somewhat contradictory.

In an article published in *Geoderma* (Pédro et al., 1978), this same version presents the soil types and their correspondences according to the Soil Taxonomy.

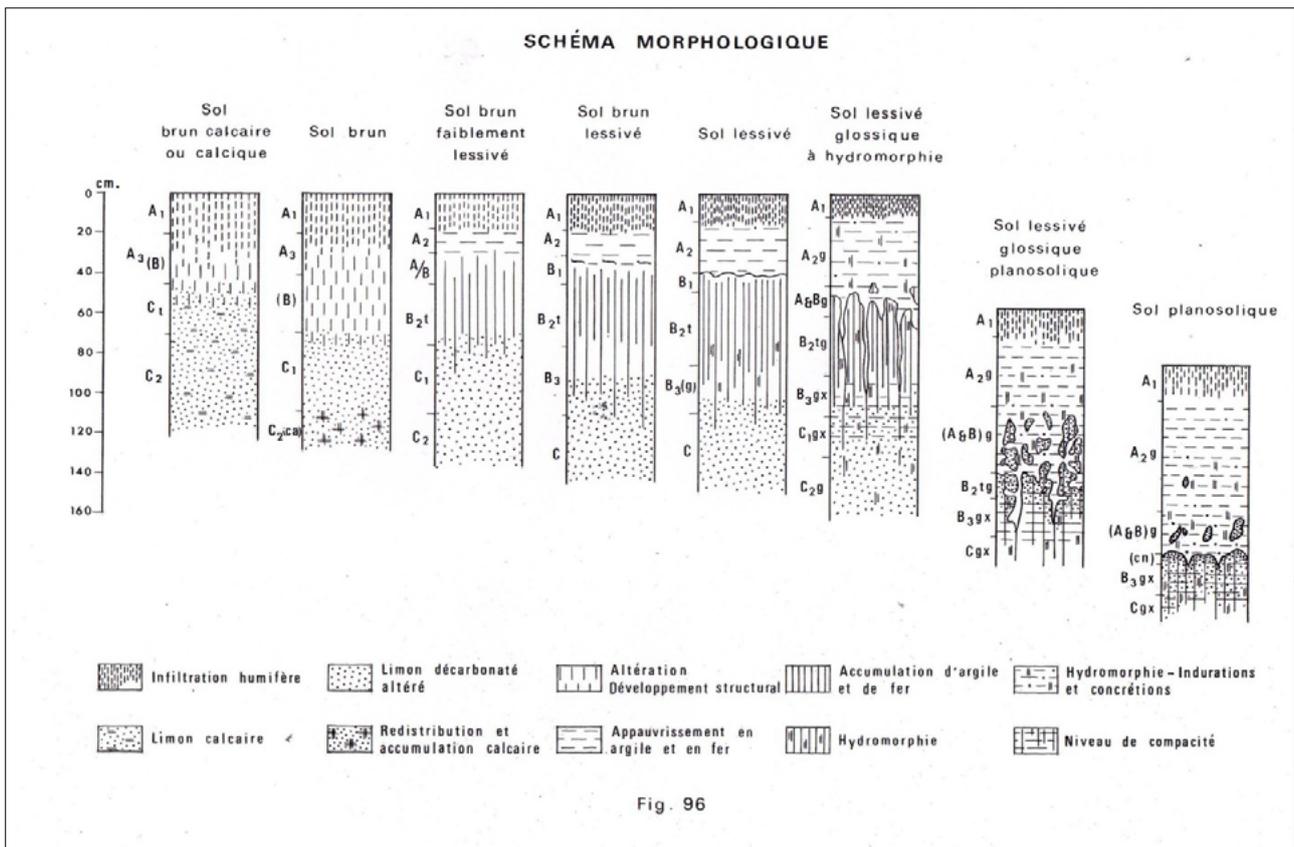


Figure 13 : Séquence d'évolution sur formations limoneuses – Schéma morphologique (Jamagne, 1978).

Figure 13 : Evolution sequence on silty materials according to Jamagne (1978)

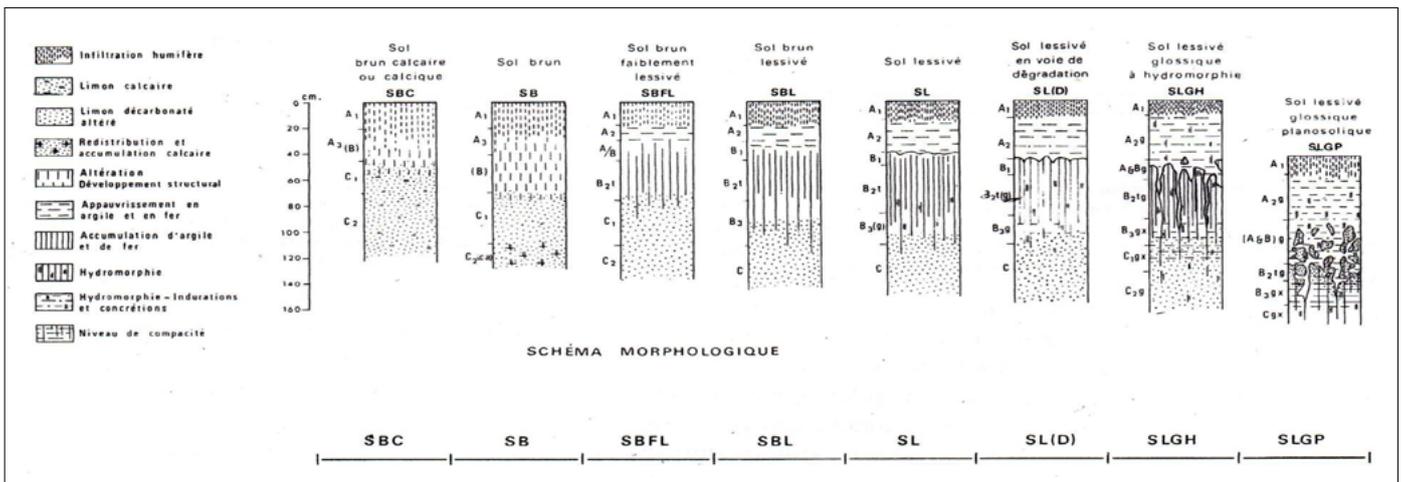


Figure 14 : Séquence d'évolution sur formations limoneuses (Jamagne et Begon, 1984). On notera que cet article et ce schéma ne s'appliquent pas seulement au Bassin parisien.

Figure 14 : Evolution sequence on silty materials according to Jamagne & Begon (1984). This article and this diagram are not solely focused on the Paris Basin.

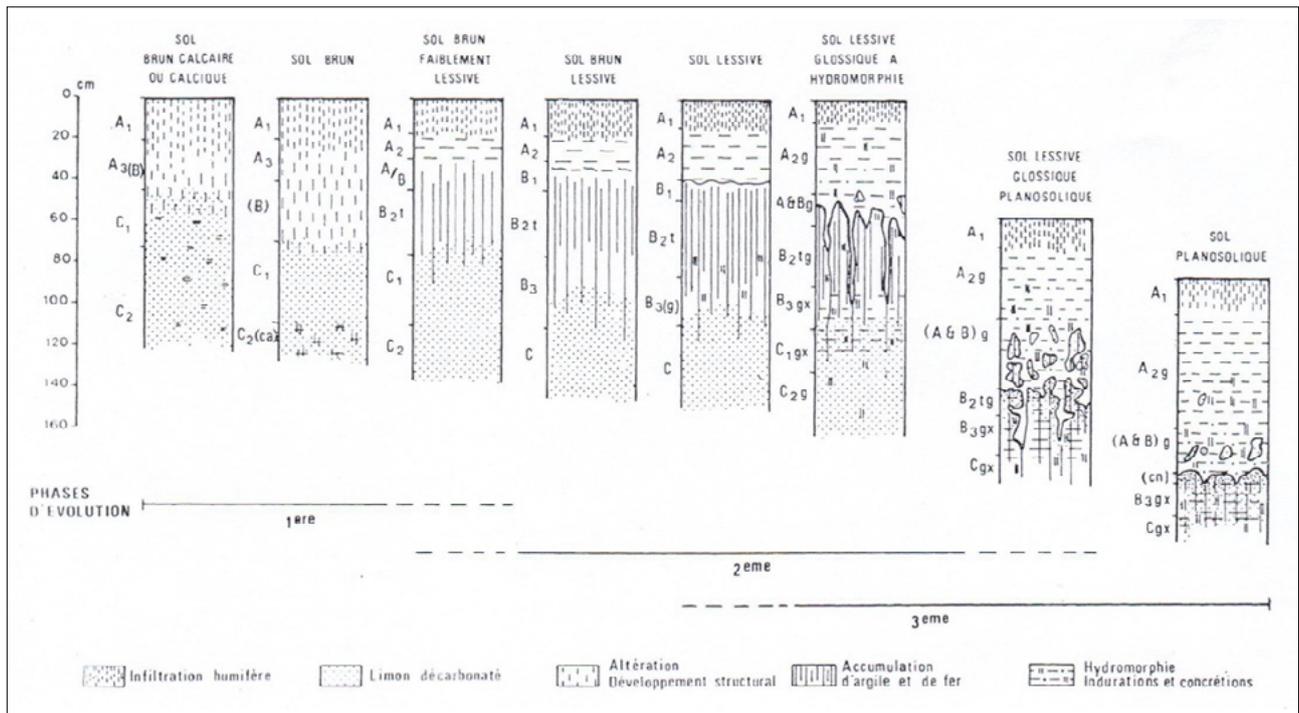


Figure 15 : Séquence d'évolution dans les formations limoneuses du nord du Bassin de Paris (Jamagne 2011).
 Noter l'introduction des désignations des horizons et des sols selon le Référentiel pédologique.

Figure 15 : Evolution sequence in the silty deposits of the north of the Paris Basin, according to Jamagne (2011).
 To be noted, the introduction of the terminology of the "Référentiel pédologique".

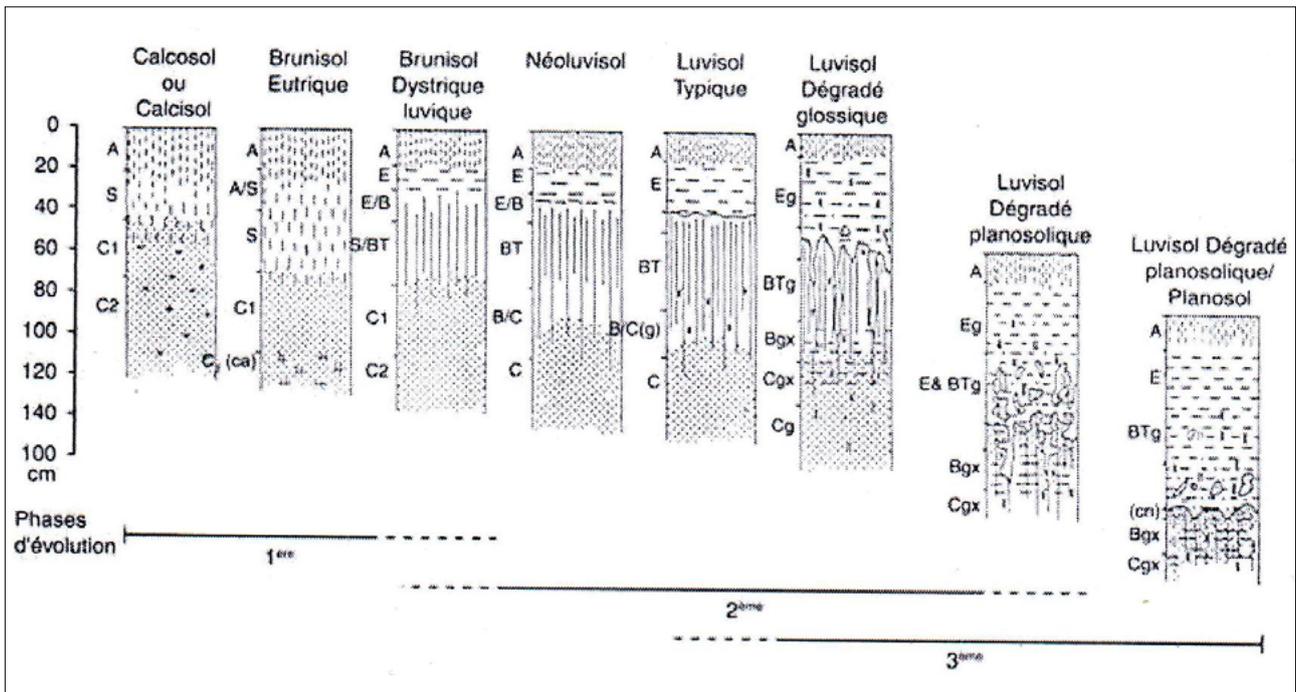
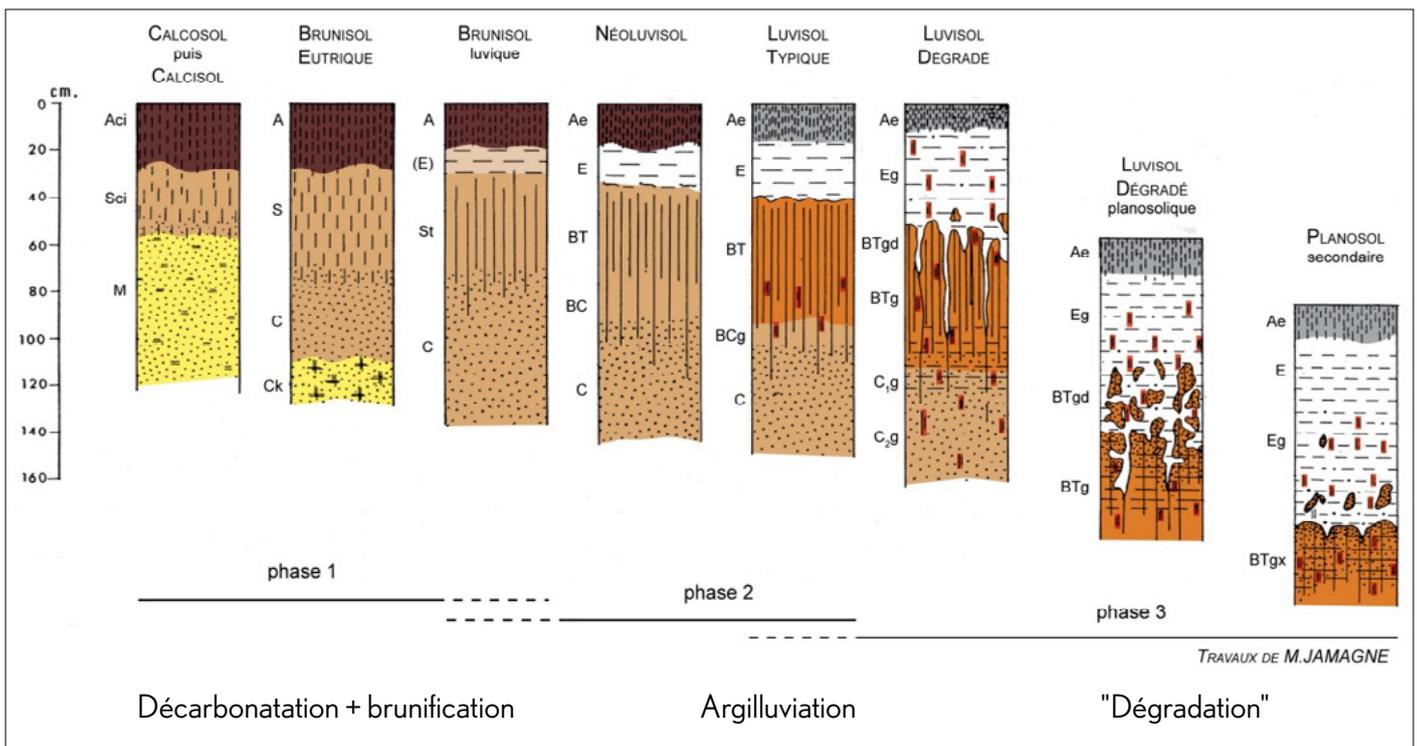


Figure 16 : La chronoséquence théorique des sols issus de loëss et de limons anciens, selon Jamagne, 2011.
 La mise en couleurs et quelques modifications des désignations ont été faites par Baize en 2017.

Figure 16 : Theoretical chronosequence of soils developed in loess and old silty deposits, according to Jamagne (2011).
 Colouring and some changes to the designations have been made by Baize in 2017.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFES, 2009 - Référentiel pédologique 2008 (D. Baize et Girard M.C. coord.). Quae éditions, 480 p.
- Antoine P., 2002 - Les loëss en France et dans le nord-ouest européen. *Revue française de géotechnique*, 99, pp. 3-21.
- Aubert G. et Ségalen P., 1966 - Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cahiers Orstom, Série Pédologie*, 4 (4), pp. 97-112.
- Baize D., 1983 - Les planosols de Champagne humide - Pédogenèse et fonctionnement. Thèse. Nancy. Inra Versailles, 385 p.
- Baize D., 1989 - Planosols in the « Champagne humide » region, France. A multi-approach study. *Pédologie*, XXXIX-2, Ghent, 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*, 29, pp. 265-287
- Baize D., 1995 - Les sols argileux appauvris en argile sous climat tempéré humide. *Planosols texturaux, Pélosols Différenciés et autres solums. Étude et Gestion des Sols*, 2 (4), pp. 227-240.
- Baize D., 2012 - Les « terres d'Aubues » de Basse Bourgogne: nouvelle synthèse et bilan de matières à très long terme. *Étude et Gestion des Sols*, 19, 3-4, pp. 139-161.
- Baize D., 2019 - Une curiosité géologique et pédologique: les ultisols des très hautes terrasses d'alluvions miopliocènes entre Yonne et Cure (France). *Étude et Gestion des Sols*, 26 (1), pp.31-48.
- Baize D., 2024- Les luvisols - les conceptions classiques. <https://denis-baize.fr/documents/LUVISOLS-conceptions-V4.pdf>
- Begon J.-C., Jamagne M., 1972 - Sur la genèse de sols limoneux hydromorphes en France. In: Pseudogley and Gley. Schlichting E & Schwertmann U. (ed.) C. R. des commissions V et VI de l'AISS. Stuttgart, pp. 307-316.
- Begon J.-C., Hardy R., Mori A., Roque J., Jamagne M., 1976 - Les sols du département de l'Oise. Carte et notice explicative de la carte des sols et de la carte des aptitudes culturales à 1/100 000. Inra et DDA de l'Oise. 333 pages.
- Brêthes A., 1993 - Les types de stations forestières de l'Orléanais. ONF, Fontainebleau, 400 p.
- Bockheim J.G. & Hartemink A.E., 2013 - Distribution and classification of soils with clay-enriched horizons in the USA. *Geoderma*, vol. 209-210, pp. 153-160.
- Bornand M., 1978 - Altération des matériaux fluvioglaciers, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse, Université de Montpellier 2, 329 p.
- Bronger A., 1991 - Argillic horizon in modern loess soils in an ustic soil moisture regime: comparative studies in forest-steppe and steppe areas from Eastern Europe and the United States. *Advances in Soil Science*, vol. 15, pp.41-90.
- Cornu S., Quénard L., Cousin I., Samouëlian A., 2014 - Experimental approach of leaching: Quantification and mechanisms. *Geoderma*, 213, pp. 357-370.
- CPCS, 1967 - Classification des sols. Travaux de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols 1963-1967. Document multcopié, 96 p.
- Curmi P., 1979 - Altération et différenciation pédologique sur granite en Bretagne. Étude d'une toposéquence. Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSA-INRA Rennes. 176 p.
- FAO Unesco, 1975 - Carte mondiale des sols. Volume 1 Légende. 62 p.
- Fedoroff N., 1968 - Genèse et morphologie de sols à horizon B textural en France atlantique. *Science du sol*, 1, pp. 29-65.
- Fedoroff N. et Fiès J. C., 1968 - Les vertisols du sud-est de la Beauce. *Bull Afes*, 1, pp.19-32.
- Fedoroff N., 1974 - Les transferts de particules solides dans les sols sur granite. Trans. 10th Congr. of ISSS. Moscow, USSR. Vol. VI:219-225.
- Fedoroff N. et Rossignol J.P., 1969 - Les boubènes sur limons des terrasses de la Garonne. *Bull. Afes*, 5, pp. 37-42.
- Fresse J.-C., 1978 - Contribution à l'étude des formations superficielles détritiques de l'Est de la France: les sols hydromorphes à profil différencié du bassin d'Autun. Thèse, Université de Dijon. 138 p.
- Hardy M., Elsass F., 2010 - Mise en évidence de la microdivision des chlorites dans un Luvisol Dégradé. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 17, 1, pp. 35-46.
- IUSS Working Group WRB, 2015 - Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde N° 106. FAO, Rome. 204 pages.
- Jagercikova M., Cornu S., Boulès D., Evrard O., Hatté C. & Balesdent J., 2017 - Quantification of vertical solid matter transfers in soils during pedogenesis by a multi-tracer approach. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 17 (2), pp. 408-422.
- Jamagne M., 1973 - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du nord de la France. Thèse. Gembloux. 445 p.

- Jamagne M., 1978 - Les processus pédogénétiques dans une séquence évolutive progressive sur formations limoneuses en zone tempérée froide et humide. *C.R. Acad. Sci.*, t. 286 D, pp. 25-27.
- Jamagne M., 2011 - Grands paysages pédologiques de France. Quae éditions. 598 p.
- Jamagne M. et Begon J.-C., 1984 - Les sols lessivés de la zone tempérée. Apport de la pédologie française. In: Livre jubilaire du cinquantenaire. Afes, 350 p.
- Jamagne M., De Coninck F., Robert M. et Maucorps J., 1984 - Mineralogy of clay fractions of some soils on loess in northern France. *Geoderma*. 33, pp. 319-342.
- Langohr R., 2001 - L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien - Apports de l'archéopédologie. *Étude et Gestion des Sols*, vol 8 (2), pp. 103-118.
- Legros J.P., 1975 - Origine et évolution des accumulations litées argileuses dans les arènes des régions tempérées humides. Cas du Mont Pilat (bordure orientale du Massif Central Français, département de la Loire). *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 281, p. 1817.
- Legros J.P., 1976 - Migrations latérales et accumulations litées dans les arènes du massif cristallin et cristallophyllien du Pilat (Ardèche, Loire, Haute-Loire). *Science du sol*, pp. 205-220.
- Legros J.-P., 1982 - L'évolution de la granulométrie au cours de la pédogenèse. Approche par simulation sur ordinateur. Application aux sols acides sur matériaux cristallins en zone tempérée. Thèse. Montpellier. 463 p.
- Legros J.P., 2007 - Les grands sols du monde. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 574 p.
- Legros J.P., 2014 - Le lessivage : un concept à dépeussier à grande eau. 12^{es} Journées d'étude des sols, le-Bourget-du-lac. Afes, pp. 77-78.
- Montagne D., 2006 - Impact de la mise en culture et du drainage sur l'évolution récente des sols : cas des Luvisols dégradés de l'Yonne, Thèse Université d'Orléans, 210 p.
- Montagne D., Cousin I. et Cornu S., 2013 - Dégradation morphologique et agriculture : quantification des évolutions pédologiques à court terme sous contraintes anthropiques. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 20, 2, pp. 137-149.
- Nettleton W.D., Flach K.W. & Brasher B.R., 1969 - Argillic horizons without clay skins. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 33, pp. 121-125.
- van Oort F., Proix N., Paradelo R., Delarue G., Breuil S., Baize D. et Richard A., 2016 - Dernières nouvelles de 42 vieilles parcelles. Indicateurs d'évolutions pédologiques infra-centenaires en Néoluvisol de loess nu, sous contrainte d'application continue de matières fertilisantes. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 23, pp. 143-162.
- Paton T.R., Humphries G.S. & Mitchell P.B., 1995 - Soils. A new global view. Yale Univ. Press, New York, 213 pages.
- Pédro G., Jamagne M. & Begon J.C., 1978 - Two routes in genesis of strongly differentiated acid soils under humid, cool-temperate conditions. *Geoderma*, 20, 173-189
- Phillips J.D., 2001 - Contingency and generalization in pedology, as exemplified by texture-contrast soils. *Geoderma* 102, pp. 347-370.
- Phillips J.D., 2007 - Development of texture contrast soils by a combination of bioturbation and translocation. *Catena* 70, pp. 92-104.
- Quénard L., Samouëlian A., Laroche B., Cornu S., 2011 - Lessivage as a major process of soil formation : a revisitation of existing data. *Geoderma*, vol. 167-168, pp. 135-147.
- Quénard L., 2011 - Analyse d'un processus pédogénétique par une approche expérimentale : le lessivage des argiles dans le sol. Thèse, Université d'Orléans. 284 p.
- Roose É., 2010 - La dégradation des terres et l'érosion des sols. pp. 21-31. In: *Gestion des eaux et des sols au Maroc*. É. Roose, M. Sabir et A. Laouina éd. IRD éditions, Marseille.
- Roque J. et Hardy R., 1981 - Étude agro-pédologique dans le Sundgau. Inra Versailles. 309 p.
- Salin R., 2000 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Saint-Jean d'Angely (à paraître).
- Sauzet O., 2012 - Quantification de la dynamique sous contrainte anthropique du lessivage et de la bioturbation à l'échelle pluri-décennale. Apport de la micromorphologie. Mémoire, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement. 2012. Thiverval-Grignon. 51 p.
- Sauzet O., 2016 - Quantification par approche micromorphologique couplée à de l'analyse d'images de l'effet de la mise en culture et de l'apport de matières organiques sur l'intensité et la dynamique des processus de lessivage et de bioturbation à l'échelle pluri-décennale. Thèse Université Paris-Saclay. 238 p.
- Sauzet O., 2017 - Quantification de la sensibilité du lessivage au mode d'occupation des sols. Note à l'Académie d'Agriculture, 8 pages.
- Van Vliet-Lanoe B., Fagnart J.P., Langohr R. et Munaut A., 1992 - Importance de la succession des phases écologiques anciennes et actuelles dans la différenciation des sols lessivés de la couverture loessique d'Europe occidentale: argumentation stratigraphique et archéologique. *Science du sol*, vol. 30, 2, pp.75-93.
- Van Ranst E., De Coninck F., Tavernier R. & Langohr R., 1982 - Mineralogy in silty to loamy soils in Central and High Belgium in respect to autochthonous and allochthonous materials. *Bull. Soc. Belge de Géologie*, 91-1, pp. 27-44.