

LES LUVISOLS

Les conceptions « classiques »

Denis BAIZE

Directeur de recherche retraité, Orléans

Résumé

Cet article tente de synthétiser tout ce que l'on sait sur les luvisols du nord de la France, principalement ceux développés dans les matériaux limoneux éoliens déposés sur certains plateaux ou terrasses durant le Quaternaire. C'est à leur propos qu'ont été élaborées les conceptions « classiques ».

Étant donné leur grande fertilité et donc leur importance agronomique, les différents types de luvisols ont été très étudiés et sont donc bien connus grâce aux travaux de Marcel Jamagne, confirmés et complétés par de nombreuses études cartographiques à échelles moyennes.

Outre la célèbre chronoséquence proposée par Jamagne dès 1973, seront présentées les conditions les plus favorables au développement des luvisols, selon la définition donnée à ce mot par le Référentiel pédologique, le système français de désignation des sols : « *Les luvisols sont caractérisés par l'importance prise par les processus d'argilluviation au sein d'un matériau originel unique, avec accumulation au sein du solum des particules déplacées* ».

Un deuxième article (à paraître sous peu) discutera d'un certain nombre d'objections faites à ces conceptions « classiques », présentera des travaux beaucoup plus récents et tentera de répondre à la question : devons-nous revoir nos conceptions ?

Mots-clés

Luvisols – illuviation – éluviation – limons – France - typologie

Summary

LUVISOLS - THE FRENCH « CLASSICAL » CONCEPTIONS

This article tries to summarize everything we know about the luvisols of northern France, mainly those developed in silty materials deposited by the wind on certain plateaus or alluvial terraces during the Quaternary. It is about them that the "classical" conceptions were elaborated.

Given their high fertility and therefore their agronomic importance, the different types of luvisols have been thoroughly studied and are therefore well known thanks to the several studies by Marcel Jamagne, confirmed and complemented by numerous soil mapping works at medium scales.

In addition to the famous chronosequence proposed by Jamagne since 1973, will be presented the most favourable conditions for the development of luvisols, according to the definition given to this word by the Référentiel pédologique, the French system of soil designation: *"Luvisols are characterized by the importance taken by argilluviation processes within a single parent material, with accumulation within the solum of displaced particles."*

A second article (to be published shortly) will discuss a number of objections made to these "classical" conceptions, will present much more recent studies and will try to answer the question: "should we review our conceptions".

Key-words

Luvisols - illuviation - eluviation - silty deposit - France - typology

Riassunto

LUVISOLS - LE CONCEZIONI FRANCESI "CLASSICHE"

Questo articolo tenta di sintetizzare tutto ciò che si sa sui luvisols del nord della Francia, principalmente quelli sviluppati nei materiali limosi eolici depositati su alcuni pianori o terrazze alluvionali durante il Quaternario. A loro proposito sono state elaborate delle concezioni "classiche".

Data la loro grande fertilità e quindi la loro importanza agronomica, i diversi tipi di luvisols sono stati molto studiati e sono quindi ben conosciuti grazie alle parecchie pubblicazioni di Marcel Jamagne, confermate e completate da numerosi studi cartografici a scala media.

Oltre alla celebre cronosequenza proposta da Jamagne dal 1973, saranno presentate le condizioni più favorevoli allo sviluppo dei luvisols, secondo la definizione data a questo termine dal Référentiel pédologique, il sistema francese di designazione dei suoli: *«I luvisols sono caratterizzati dall'importanza assunta dai processi di argilluviazione all'interno di un materiale originale unico, con accumulo all'interno del solum delle particelle spostate».*

Un secondo articolo (che sta per uscire presto) discuterà un certo numero di obiezioni fatte a queste concezioni «classiche», presenterà studi molto più recenti e tenterà di rispondere alla domanda: dobbiamo rivedere le nostre concezioni?

Parole chiave

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

Cet article tente de synthétiser ce que l'on sait sur les luvisols du nord de la France, principalement ceux développés dans les matériaux limoneux éoliens déposés sur certains plateaux et terrasses alluviales durant le Quaternaire. C'est à leur propos qu'ont été élaborées les conceptions classiques. Et nous verrons que la translocation de particules argileuses et leur accumulation en profondeur (l'argilluviation) est particulièrement facilitée et active dans ces types de matériaux. Mais il existe d'autres luvisols, nettement sableux en surface, qui seront également évoqués.

Les sols désignés comme luvisols, au sens du Référentiel pédologique, représentent de très grandes superficies dans le nord de la France (Picardie, Brie, Beauce Chartraine, Gâtinais, Champagne humide, Vexin, Haute Normandie, Boischaut Nord, Gâtine Tourangelle, Alsace, Sundgau, etc.) et dans la « *loess belt* » de Moyenne Belgique (Brabant, Hainaut, Hesbaye).

En outre, vu leur grande fertilité et donc leur importance agronomique, les différents types de luvisols ont été très étudiés et sont donc bien connus grâce aux travaux de Marcel Jamagne : dès 1969 ; thèse en 1973 ; suivis de bien d'autres publications. Ces travaux ont été confirmés et complétés par de nombreuses cartographies à échelles moyennes : Begon *et al.* (1976), Baize (1976), Roque et Hardy (1981), Isambert (1984), Froger *et al.* (1994) ; Roque (2007), pour ne citer que des auteurs français. Sur terrasses alluviales, des Néoluvisols développés dans des loess ont été décrits dans la vallée du Rhône (Bornand et Legros, 2007) et dans la vallée de l'Yonne en Sénonais (Baize et Voilliot, 1988). De nombreux auteurs belges ont également participé à l'acquisition des connaissances. Citons, parmi d'autres, Dudal (1952), van Ranst *et al.* (1982), Langohr (1986, 2001).

Ne seront pas évoquées ici les « boubènes » des terrasses alluviales du sud-ouest (Begon 1990 ; Begon et Jamagne, 1972), car les phénomènes d'altération de matériaux grossiers originaires des Pyrénées y prennent une place prépondérante.

Un deuxième article discutera d'un certain nombre d'objections faites à ces conceptions « classiques », présentera des travaux beaucoup plus récents et tentera de répondre à la question : devons-nous revoir nos conceptions ?

1. DÉFINITION DES LUVISOLS (RP 1992)

Voici la définition donnée du « Grand Ensemble de Références » des luvisols selon la première version publiée du Référentiel pédologique (AFES, 1992). Elle a été peu modifiée depuis.

« Seront rattachés aux luvisols les solums dont la nette différenciation morphologique résulte du processus d'illuviation d'argile, cette différenciation s'avérant un facteur prédominant dans leur comportement et fonctionnement. Des déplacements d'argile peuvent être observés dans des solums rattachés à d'autres Références, mais dans ce cas, soit ils sont de faible importance et/ou amplitude, soit ils constituent un processus secondaire par rapport à un autre processus considéré comme dominant ».

« Les luvisols sont caractérisés par l'importance prise par les processus d'argilluviation au sein d'un matériau originel unique (sans discontinuité lithologique importante), avec accumulation au sein du solum des particules déplacées ».

2. A QUOI RECONNAIT-ON LES LUVISOLS SUR LE TERRAIN ? ET APRÈS LECTURE DES RÉSULTATS D'ANALYSES ?

Le premier critère est un contraste textural important entre horizons supérieurs peu argileux, peu colorés et faiblement structurés et horizons plus profonds nettement plus argileux, plus colorés (couleur brune ou brun-orangé) et présentant une belle structure anguleuse polyédrique, cubique ou prismatique fine. Dès que l'on dispose des résultats des analyses granulométriques, on peut calculer l'**indice de différenciation texturale** (IDT). Celui-ci est en général compris entre 1,3 et 1,8 pour les Néoluvisols et > 1,8 pour les Luvisols Typiques et les Luvisols Dégradés.

Rappelons que l'IDT est le rapport entre le pourcentage d'argile de l'horizon le plus riche en argile et celui de l'horizon le plus pauvre en argile d'un même solum. Cet indice sert à quantifier l'ampleur des phénomènes d'illuviation verticale ou d'appauvrissement superficiel. Son utilisation implique de ne pas raisonner sur des horizons calcaires et de considérer des couples d'horizons BT/Ae, BT/E, BP/E, S/E ou S/Ae, et non des couples S/C, BT/C ou BP/C.

Cependant, un IDT de valeur notable n'est pas un critère suffisant. Dans le contexte des grandes plaines étasuniennes et européennes Bronger (1991) insiste sur le fait qu'une différence de taux d'argile de plus de 20 % n'est pas, à lui seul, un indice qui permette de conclure qu'un horizon est un horizon argilique selon la définition qu'en donnait la *Soil Taxonomy* à l'époque : « *it is not sufficient merely to identify an increase in clay content of > 20 % to designate a horizon genetically as an argillic horizon resulting from the process of clay illuviation* ».

Pour rattacher cette valeur d'IDT à un processus de « lessivage d'argile », il faut d'abord être certain que l'on n'est pas en présence de deux matériaux superposés de granulométrie différente, séparés par une **discontinuité lithologique** (solum bilithique). Ensuite, il faut bien prendre conscience du fait que de nombreux processus pédogénétiques sont susceptibles de donner naissance à des sols à fort contraste textural sans pour autant que l'on puisse les rattacher aux luvisols.

3. L'ARGUMENT MACRO- ET MICROMORPHOLOGIQUE : LES REVÊTEMENTS ARGILEUX

L'argument principal pour la reconnaissance des véritables Néoluvisols et Luvisols Typiques est l'existence de **nombreux revêtements argileux** sur les faces des agrégats et sur les parois des plus gros vides dans les horizons semi-profonds. Cela se voit déjà assez bien sur le terrain, notamment avec une loupe ou un compte-fil (*figure 1*), mais les revêtements (dits aussi « ferri-argilanes ») peuvent être observés encore mieux à la loupe binoculaire (sur agrégats) et sur des lames minces (en micromorphologie). Comme il est difficile de disposer de lames minces et que, de toutes façons, en obtenir nécessite des délais qui se comptent en semaines ou en mois, le mieux est d'observer les agrégats à la loupe binoculaire donc « à la maison ».

Ces revêtements ont un aspect cireux brillant; ce sont des « micro-alluvionnements » qui ennoient les microrugosités de la surface des agrégats. Ils tapissent également les parois des vides tubulaires, lieux de circulation préférentiels des suspensions. En contexte limoneux ou limono-argileux, leurs couleurs sont nettement plus brunes plus orangées ou plus rougeâtres que la matrice des agrégats. Ils sont plus difficiles à distinguer dans le cas d'horizons bariolés, marqués par des traits hydromorphes.

En micromorphologie, c'est-à-dire à l'examen au microscope de lames minces par transparence, que voit-on ? Les « cutanes d'illuviation » (appelés également « argilanes » ou « ferri-argilanes » ou « *clay skins* ») sont des revêtements formés suite à un déplacement de matières (en solution ou en suspension) suivi d'un dépôt. Les argilanes d'illuviation sont faciles à reconnaître en lames minces (*figures 2 - 3 et 4*):

- par leur pureté (ils sont constitués presque uniquement d'argile et de fer); ils diffèrent nettement de la matrice (qui, elle, contient des particules limoneuses voire sableuses);
- par leur limpidité et par la bonne orientation de toutes leurs particules argileuses élémentaires, ce qui leur confère une bonne biréfringence en lumière polarisée et analysée;
- et, souvent, leurs fines couches successives bien visibles (argilanes striés).

Une des premières publications françaises présentant ces revêtements en micromorphologie est celle de Jamagne et Fedoroff (1969) dans laquelle est publiée une belle planche photos de 12 lames minces en couleurs

Il ne faut pas confondre les **cutanes d'illuviation**, relativement épais, avec les cutanes de tension (« *stress cutans* »). Ces derniers sont de fins revêtements dus à une réorientation *in situ* des particules argileuses sous l'effet de forces mécaniques différentielles comme le cisaillement. Ils ne résultent pas d'un dépôt. Lorsque les études micromorphologiques étaient encore toutes nouvelles en France (années 1960), la distinction entre ces deux types de cutanes n'était pas toujours clairement faite. Bullock et Thompson (1985) mettent eux aussi l'accent sur la difficulté persistante à l'identification de l'argile orientée par des contraintes par rapport à l'argile illuviale.

Figure 1: Revêtements argileux rougeâtres sur faces d'agrégats. Horizon BT d'un Luvisol Typique (photo N. Duigou) - Ils sont cireux, lisses, brillants, et présentent des teintes plus vives que la matrice.
Figure 1: Reddish clay coatings on aggregate faces. BT horizon of a "Luvisol Typique". They are waxy, smooth, shiny, and have brighter hues than the matrix.



Figure 2: Ferri-argilanes sur parois de vides dans un horizon BT à matrice limoneuse (Néoluvisol - région de Coulommiers). Lumière polarisée et analysée (photo F. van Oort).
Figure 2: Ferri-argillans covering the walls of voids in a BT horizon with a silty matrix (Néoluvi-sol - Coulommiers area). Polarized and analysed light.

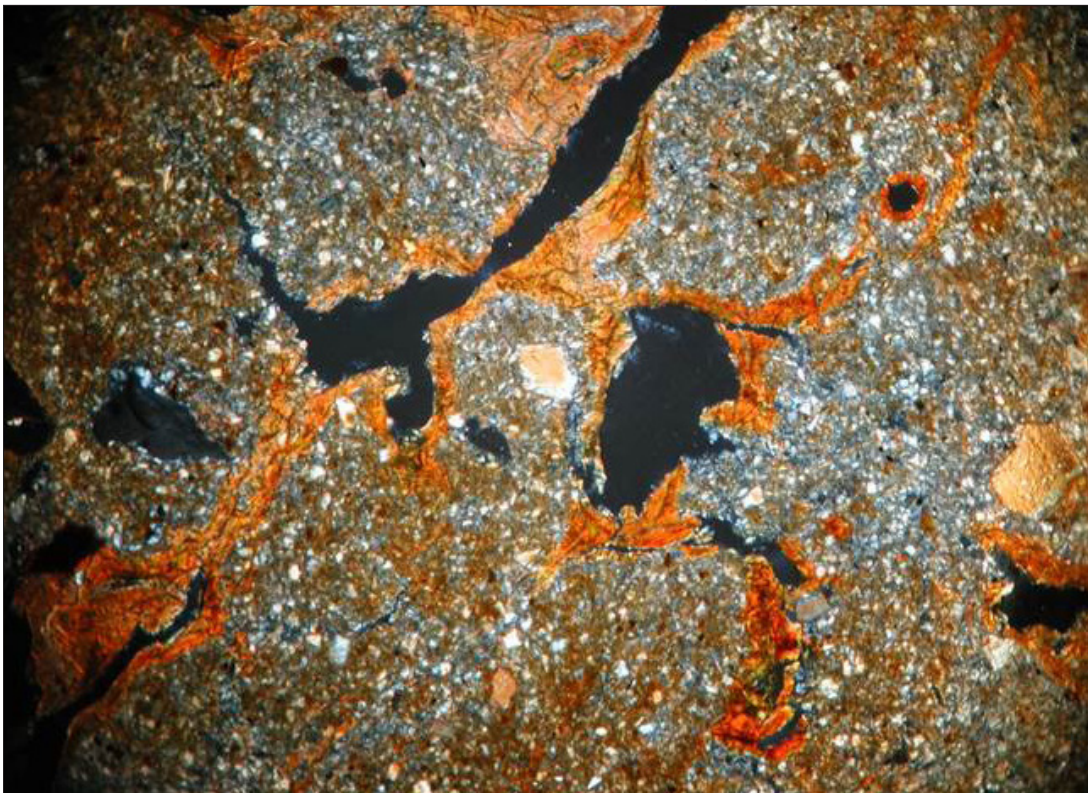


Figure 3 : Ferri-argilane sur face d'agrégat. L'épaisseur du revêtement argileux lité est d'environ 0,4 mm.

À gauche : lame mince vue en lumière dite « naturelle ».

À droite : La même lame mince vue en lumière polarisée et analysée.

Figure 3 : Ferri-argillan on an aggregate face. The thickness of the layered clay coating is about 0,4 mm.

On the left : thin section seen in polarized light known as "natural light" ;

On the right : the same thin section seen in polarized and analysed light.

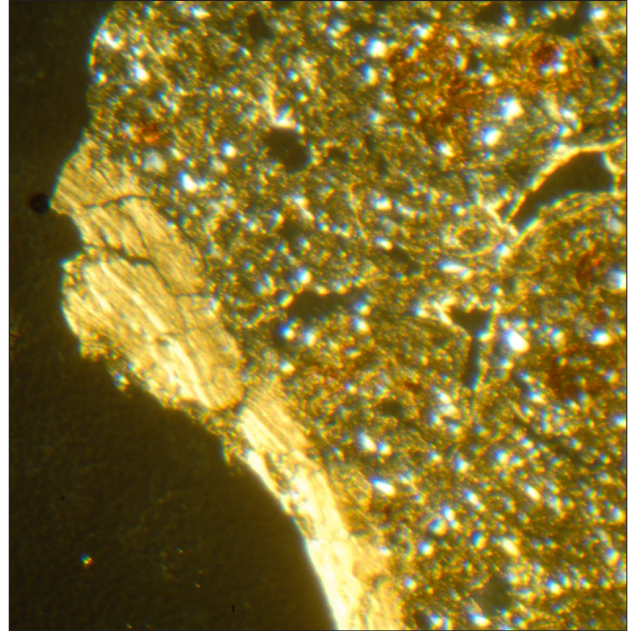
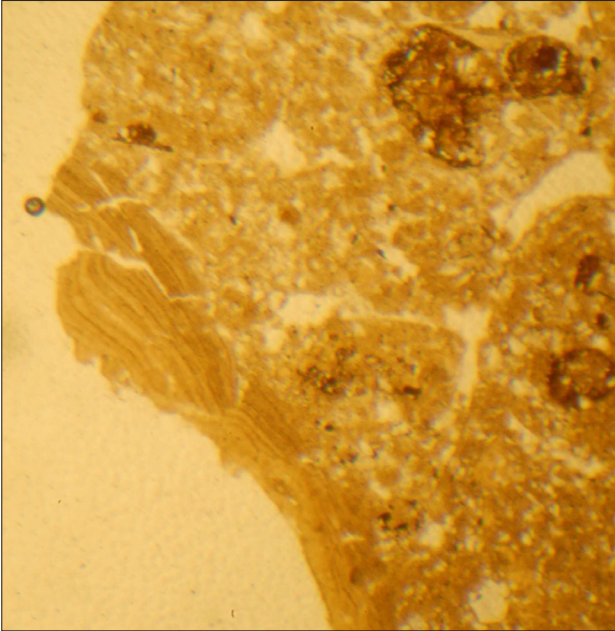
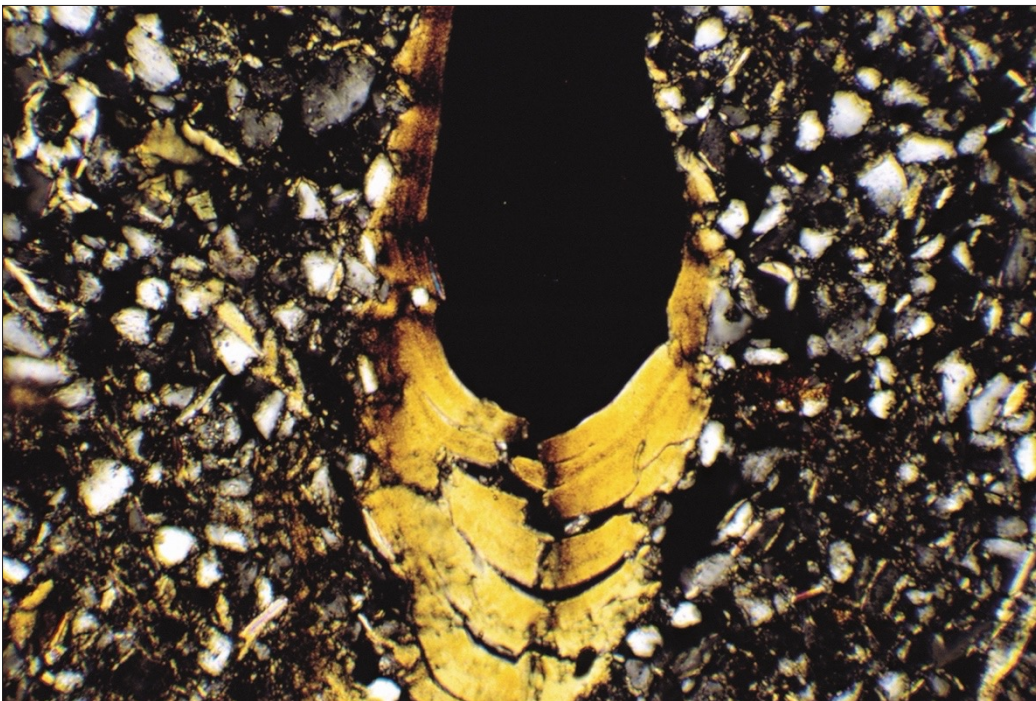


Figure 4 : Argilane de vide vu à fort grossissement. Limons du Bassin parisien – Région de Marle – (photo M. Jamagne).

Figure 4 : Argillan on a void, seen at high magnification. Silty deposits of the Paris basin. Marle area.



4. RAPPEL DES RÉSULTATS DES TRAVAUX DE MARCEL JAMAGNE

4.A. La chronoséquence des sols issus de dépôts limoneux quaternaires dans le Bassin parisien

Sa première version (Jamagne, 1973) est présentée sur la *figure 5*. On notera que ce schéma a connu une demi-douzaine de versions (en noir et blanc) ne différant que par les désignations des types de sols, désignations qui ont évolué au cours du temps, de 1973 à 2011 (Jamagne, 2011).

Les processus successifs sont les suivants.

Phase 1: Altération et brunification

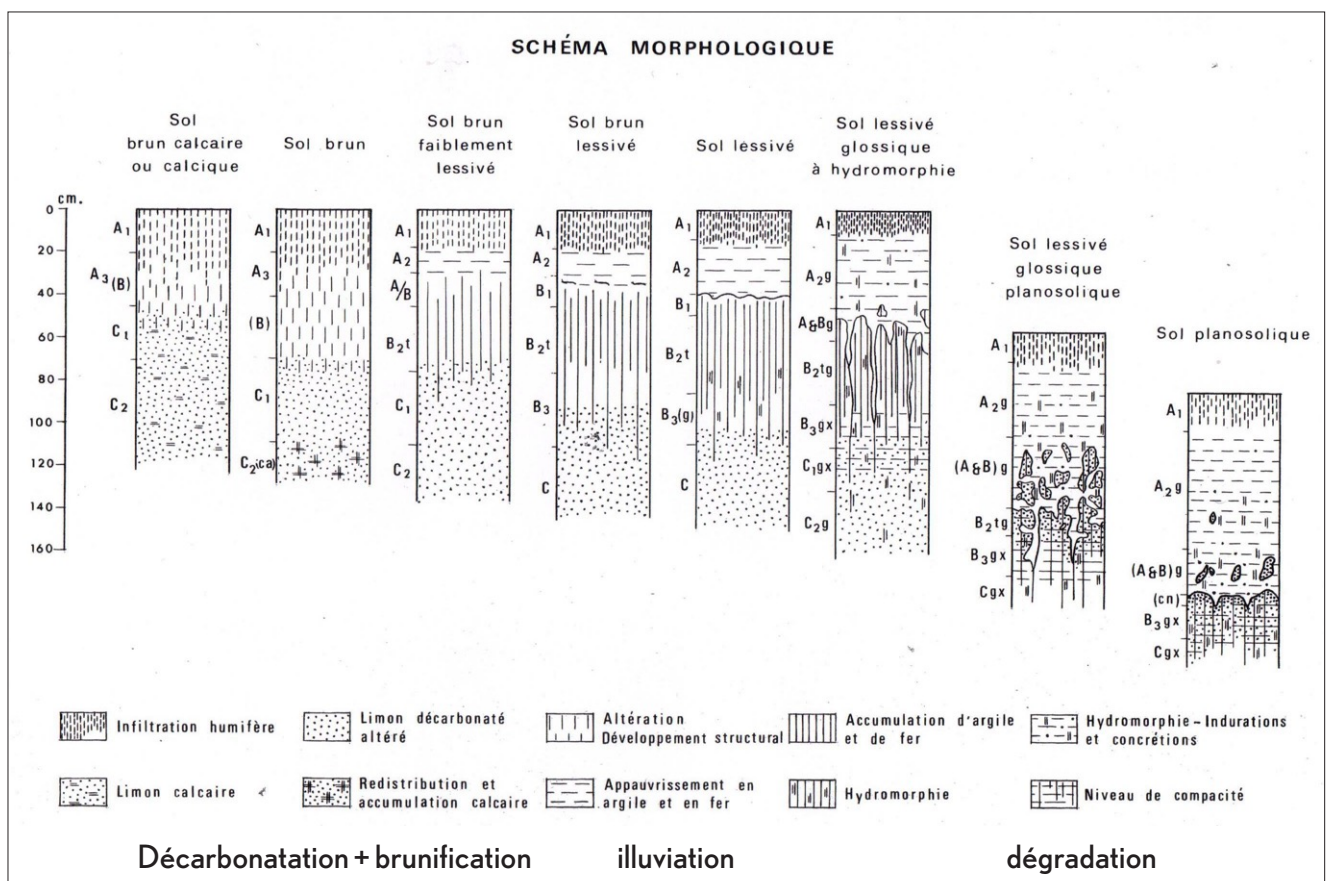
- décarbonatation totale rapide (car faible teneur en calcaire et petits cristaux éparpillés facilement accessibles); genèse d'une porosité facilitant la circulation de l'eau; libération de minéraux argileux emprisonnés dans les particules calcaires;
- altération des minéraux altérables → libération d'argiles de néoformation et d'oxydes de fer + structuration en agrégats (→ formation d'un horizon structural S);

Figure 5: « 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.

Figure 5: "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.



Phase 2 : Éluviation / illuviation primaire en milieu aéré, début de désaturation du complexe adsorbant

- illuviation verticale d'argile (surtout les plus fines – argiles 2/1 et smectites) donnant progressivement naissance au couple horizon E éluvié/horizon BT illuvié ;
- colmatage progressif de l'horizon BT, d'où résulte un début d'engorgement au contact E / BT et la formation d'un horizon Eg éluvial rédoxique ;

Phase 3 : Évolution géochimique forte en milieu chimiquement désaturé et temporairement réducteur - « dégradation » et illuviation secondaire

- intensification de l'engorgement – successions de phases de réduction et de phases de réoxydation - séparation des argiles et du fer qui leur était associé ;
- désaturation complète du complexe adsorbant ; aluminisation des feuillets d'argiles ;
- « dégradation » géochimique des minéraux argileux au sommet du BTg, formation de « glosses » et, plus généralement, de volumes blancs appauvris en argile (horizon BTgd) ; « dégradation diffuse » ;
- éventuellement « planosolisation » secondaire ultime : la dégradation détruit la totalité de l'ancien horizon BTgd jusqu'à un plancher subhorizontal. On parvient alors à un stade évolutif où le solum rassemble un certain nombre de caractères d'un planosol mais il s'agit d'un planosol « secondaire », c'est-à-dire consécutif à une longue phase initiale d'argilluviation.

4.B. Zoom sur l'illuviation préférentielle des argiles fines et l'éventuelle migration des limons les plus fins

Dans le cadre de sa thèse, Jamagne (1973) a fait réaliser sur une dizaine de solums des granulométries détaillées distinguant 8 fractions mais selon des coupures inhabituelles. En effet, la fraction **argiles** (AT) a été subdivisée en **argiles fines** (AF - 0 à 0,2 μm) et en **argiles grossières** (AG - 0,2 à 2 μm — par centrifugation) tandis que la fraction **limons fins** a été subdivisée en LF1 (2 à 10 μm) et LF2 (10 à 20 μm). Des données granulométriques aussi détaillées sont très rarement disponibles.

Il s'agit toujours de sols développés dans des matériaux limoneux, d'apports récents ou plus anciens, dans lesquels les **sables grossiers** sont quasiment inexistantes et où la fraction **sables fins** représente presque toujours moins de 4 %.

Sur les valeurs numériques ainsi obtenues sur ces dix fosses, j'ai voulu vérifier si les argiles fines migraient plus que les argiles grossières et si les limons les plus fins étaient également affectés par l'illuviation. Pour ce faire, j'ai recalculé les deux rapports suivants :

- Le rapport argiles fines / argiles totales (AF/AT) = [0 à 0,2 μm] / [0 à 2 μm]
- et le rapport limons les plus fins / somme des fractions limons (LF1 / LT) = [2 à 10 μm] / [2 à 50 μm]

Sur les 10 fosses, 7 montrent très clairement une moindre valeur du rapport AF/AT dans les horizons supérieurs éluviés (*Tableau 1*), rapport d'autant plus faible que l'on se trouve près de la surface du sol. Il ne semble pas faire de doute que les argiles fines sont plus mobilisées que les argiles plus grossières.

En revanche, en ce qui concerne l'éventuelle migration préférentielle des limons les plus fins, les calculs effectués sur les données de Jamagne pour tous les horizons superposés des 10 fosses ne donnent pas de résultat probant, malgré la séparation entre LF1 et LF2. Il est vrai que ces séparations sont des opérations de laboratoire délicates (densimétrie, méthode de Mériaux, 1954) et que les résultats sont donc chargés d'une incertitude non négligeable.

Tableau 1: Rapports AF/AT calculés pour 7 solums de la thèse de Jamagne (1973 - pages 178 à 229).

Sur fond gris : horizons de surface éluviés

Sur fond orange : horizons profonds illuviés

3 solums de gauche développés dans des «limons d'apports récents»

4 solums de droite développés dans des «limons d'apports plus anciens».

Table 1: Fine clay/total clay ratios calculated for 7 sola of the thesis of Jamagne (1973 - pages 178 to 229).

Highlighted in grey: eluviated surface horizons.

Highlighted in orange: illuviated deep horizons.

The three sola on the left developed in recently deposited silty sediments.

The four sola on the right developed in silty sediments deposited much anciently.

Rapport argiles fines / argiles totales - AF/AT						
Laon 1	Vervins 10	Épernay 3	Montmirail 32	Montmirail 31	Montmirail 15	Château Thierry 22
0,46						
0,43	0,36	0,27	0,33	0,37	0,35	0,37
0,55	0,41	0,30	0,36	0,40	0,34	0,45
0,53	0,41	0,44	0,48	0,36	0,44	0,52
0,57	0,56	0,53	0,64	0,50	0,57	0,52
0,58	0,52	0,55	0,64	0,56	0,58	0,57
0,68	0,52	0,56	0,65	0,57	0,53	0,53
0,63	0,52	0,54				

5. LES NÉOLUVISOLS ET LES LUVISOLS TYPIQUES

Au stade Néoluvisol comme au stade Luvisol Typique l'argilluviation est un phénomène « mécanique », un simple transfert de particules qui intervient dans une gamme de pH comprise entre 7,5 et 5,5. Ce phénomène génère une **limite** relativement **régulière et horizontale** entre les horizons E et BT. Tant que les processus d'oxydo-réduction sont négligeables, le fer reste associé aux argiles et migre donc avec elles.

5.A. Néoluvisols

L'horizon E est modérément appauvri, encore assez coloré, assez bien structuré et aéré. Le BT correspond à la définition du BT typique, notamment il présente des revêtements argileux sur les faces d'agrégats. La transition entre l'horizon E et l'horizon BT est assez progressive. En contexte de matériaux parentaux limoneux, l'IDT est généralement compris entre 1,3 et 1,8.

5.B. Luvisols Typiques

L'horizon E est nettement appauvri en argile et en fer. Il est légèrement décoloré, modérément à peu structuré ou à structure instable. L'horizon BT présente tous les caractères requis, avec un rapport argile fine/argile grossière plus élevé que pour les Néoluvisols. La transition entre horizon E et horizon BT est nette.

En contexte de matériaux parentaux limoneux, l'IDT est supérieur à 1,8.

- Lorsque la durée de pédogenèse augmente,
- que l'horizon BT se colmate progressivement,
- que des phases d'engorgements temporaires s'installent au contact entre horizon E et horizon BT lequel est de moins en moins perméable,

- que ces engorgements s'intensifient et se maintiennent plus longtemps, générant des cycles de réduction / réoxydation,

...alors il n'est pas rare d'observer des traits rédoxiques au contact entre la base des horizons E et la partie supérieure des horizons BT (notations Eg et BTg).

Les Luvisols Typiques évoluent alors progressivement en **Luvisols Typiques rédoxiques** puis, lorsque le processus de « dégradation » débute, vers les **Luvisols Dégradés**. En ces conditions, le fer a tendance à se dissocier des argiles.

Entre les Luvisols Typiques rédoxiques dans lesquels les engorgements et leurs conséquences sont jugées de moindre importance que l'argilluviation verticale et les Rédoxisols pour lesquels les engorgements et les contraintes qui y sont liées sont considérées comme de première importance, on peut désigner certains sols comme des **Luvisols-Rédoxisols** (double rattachement).

6. LES LUVISOLS DÉGRADÉS

Jamagne, 1973 ; Jamagne, 1978 ; Jamagne et Pédro, 1981 ; Isambert, 1984 ; Montagne, 2006 ; Montagne et al., 2013

La dégradation dont il s'agit est une « **dégradation morphologique** » qui résulte d'une dégradation géochimique des minéraux argileux, sous l'influence de phénomènes d'oxydo-réduction. Elle aboutit à la genèse de volumes **très appauvris en fer et en argile** bien visibles sur le terrain, même lors d'un **sondage à la tarière**. En effet, c'est l'horizon situé au contact entre horizons éluviés Eg et horizons enrichis en argiles BTg qui présente ce phénomène. Il se caractérise morphologiquement par :

- la juxtaposition de 3 ou 4 couleurs (brun-orangé, beige, blanc et noir) ;
- et présente des **différences de texture** et de taux de fer considérables (voir données analytiques - *Tableaux 2 et 3*).

Il est codé BTgd ou E&BTgd et parfois désigné sous la dénomination d'« horizon hétérogène ». Cet horizon était nommé « horizon B textural fortement tacheté » par les pédologues belges (Langohr, 1986).

Il faut bien distinguer les volumes très clairs voire blancs (volumes « dégradés ») et les simples volumes « éluviés » appauvris en argile et en fer, sans dégradation des minéraux argileux, qui sont plutôt beiges.

Morphologiquement, on distingue trois types de dégradation : **glossique** (en langues), **planosolique** ou **diffuse** (*figure 6*). Les deux premiers types constitueraient deux voies d'évolution distinctes : la voie « glossique » dans des matériaux à potentiel de structuration élevé et bonne perméabilité ; la voie « planosolique » dans des matériaux à potentiel de structuration faible et mauvaise perméabilité. La dégradation diffuse est un stade intermédiaire ou un état initial.

La dégradation, qui est géochimique et qui se marque morphologiquement, semble naître d'abord préférentiellement le long des plus grosses fissures verticales donnant naissance à des « **glosses** » qui s'auto-accroissent ou s'auto-entretiennent (flux d'eau plus importants). Le plus souvent, s'installe ensuite une **dégradation** beaucoup plus « **diffuse** » qui « dévore » irrégulièrement l'horizon BTgd.

Au contraire, dans certaines régions de l'est de la France, des « glosses » profondes remarquablement dessinées et symétriques, régulièrement espacées, pourraient avoir été induites par des phénomènes périglaciaires comme des « **fentes en coin** ».

Enfin, certains solums présentent un phénomène de dégradation poussé à l'extrême, au point de « ronger » presque totalement l'ancien horizon BT (*figure 7*).

Figure 6 : Deux Luvisols Dégradés

A gauche : sous cultures – Faux-Perche
(Photo B. Nicoullaud)

A droite : sous forêt - Gâtinais de l'Yonne
(Photo D. Montagne)



Figure 6 : Two Luvisols Dégradés.

On the left : under cultivation – Faux Perche.

On the right : under forest - Gâtinais de l'Yonne.



7. CARACTÉRISATION ANALYTIQUE DES HORIZONS HÉTÉROGÈNES

Un des grands mérites de Montagne dans sa thèse (2006) est d'avoir réalisé une quantification et une analyse chimique extrêmement précises des quatre types de volumes juxtaposés dans un horizon dit « hétérogène » codé E&BTgd. Il est vrai qu'il a été aidé par plusieurs techniciens qui ont travaillé de longues heures à séparer de tout petits volumes pédologiques selon leur couleur. Le résultat figure au [tableau 2A](#).

- Dans les langues dégradées des Luvisols Dégradés, comme dans l'horizon E, on note une très faible abondance des argiles les plus fines et donc un rapport AF/AT faible. Cela dénote la disparition sélective des argiles les plus fines smectitiques (soit par éluviation soit par destruction géochimique) au profit des particules les plus grosses, notamment les kaolinites (héritées), les micas, les chlorites et le quartz très fin.
- Si l'on s'intéresse au rapport entre le taux de limons grossiers (LG = 20-50 μm) et celui des limons fins (LF = 2-20 μm) on constate que l'éluviation au sein des Néoluvisols affecterait également les particules limoneuses les plus fines.

Tableau 2 : Analyses granulométriques et chimiques relatives aux horizons E&BTgd

Table 2: Granulometric and chemical data relating to E&BTgd horizons

A. Distinction de 4 types de volumes par leur couleur dans un horizon E&BTgd (Montagne, 2006)

	Argile	Fer total	Mn total	
	%	%	mg/kg	Interprétation
Volumes ocres	28-32	3,3-4,1	240-300	horizon BT non dégradé
Volumes brun pâle	18-22	1,4-1,5	160-240	volumes éluviés
Volumes gris-blancs	17-20	1,0-1,1	100-110	volumes "dégradés"
Volumes noirs		4,5-4,9	4200-5800	films et nodules Fe-Mn

B. Luvisols Dégradés de Champagne humide (solum Prusy – Baize, 1976):

Prélèvements sélectifs dans des horizons hétérogènes. Fer libre selon méthode Deb.

		Argile %	Fer libre %	Interprétation
Horizon E&BTgd	Volumes clairs	22,1	0,92	volumes "dégradés"
	Volumes ocre	29,8	2,56	volumes non dégradés
Horizon BTg	Volumes ocre	33,2	2,01	volumes non dégradés de l'horizon BTg
(120-170 cm)	Volumes gris-bleu	40,3	0,18	illuviation secondaire

Tableau 3 : Sols issus de formations loessiques du nord de la France. Prélèvements sélectifs. Données granulométriques moyennes (Jamagne et Pédro, 1981).

Table 3: Soils developed in loess deposits of northern France. Selective samples. Average particle size distribution data.

NÉOLUVISOLS				LUVISOLS			LUVISOLS DÉGRADÉS			
Argiles (0-2 µm)	AT %	AF %	ratio AF/AT	AT %	AF %	ratio AF/AT	AT %	AF %	ratio AF/AT	
	Horizon éluvial E	18,5	9,1	0,49	15,7	6,2	0,39	13,2	4,8	0,36
langues dégradées							15,7	4,6	0,29	
Horizon BT2	28,9	16,5	0,57	29,2	16,9	0,58	29,8	17,8	0,60	
revêtements argileux	59,7	42,9	0,72	50,9	30,2	0,59	33,2	16,8	0,51	
Horizon BT3	24,2	12,9	0,53	27,1	14,5	0,54	29,4	17,6	0,60	
Horizon C	20,6	10,5	0,51	23,3	11,2	0,48	23,9	11,7	0,49	
IDTs	1,6	1,8		1,9	2,7		2,3	3,7		
Limons (2-50 µm)			ratio LG/LF						ratio LG/LF	
Horizon éluvial E			1,91						1,38	altération poussée m microdivision des LG --> LF
langues dégradées									1,42	
Horizon BT2			1,58						1,45	
Horizon BT3			1,81						1,54	

AT = taux d'argiles totales (0-2 µm)
 AF = argiles fines (0-0,2 µm)
 LF = limons fins (2-20 µm)
 LG = limons grossiers (20-50 µm)

Figure 7 : Luvisol (très) Dégradé (Champagne Humide - Yonne)

Ce solum montre un degré de dégradation très avancé de l'horizon hétérogène BTgd. En outre un horizon d'accumulation ferro-manganique est bien visible en profondeur.

Figure 7 : Luvisol Dégradé (Champagne Humide - Yonne)

This solum shows a high degree of degradation of the heterogenous BTgd horizon. In addition a ferro-manganic accumulation is visible at depth.



- En revanche la diminution de ce même rapport LG/LF dans les horizons E des Luvisols Dégradés, serait le signe d'une microdivision des limons grossiers en particules limoneuses plus petites.

Jamagne et Pédro (1981) ont synthétisé des résultats de la thèse de Jamagne (1973) lequel avait fait séparer et quantifier les « argiles fines » (AF = particules $< 0,2 \mu\text{m}$ - *Tableau 3*) aussi bien dans des horizons pris dans leur ensemble que dans des échantillons sélectifs (revêtements argileux, langues dégradées). À la lecture de ce tableau, on constate :

- Que, dans le cas des Néoluvisols et Luvisols Typiques, les revêtements sont beaucoup plus riches en argile totale (AT) que les horizons BT qui

les contiennent ; et ces revêtements sont composés surtout d'argiles fines. Ce sont donc les fines qui sont les plus sujettes à déplacements.

- L'IDT croit avec le degré d'évolution des sols, et l'IDT calculé sur les argiles fines est bien supérieur à celui calculé pour les argiles totales. Cela renforce l'idée que les argiles les plus fines sont les plus mobiles.
- À mesure de l'évolution depuis les Néoluvisols jusqu'aux Luvisols Dégradés, la proportion d'argiles fines par rapport à l'argile totale dans les argilanes décroît nettement (de 72 % à 51 %). Ce qui indique que les revêtements des Luvisols Dégradés contiennent aussi des argiles plus grossières et sont moins « purs ». Cela a été confirmé par les examens de lames minces.

8. PROPOSITIONS POUR UNE SYNTHÈSE

8.A. Décomposition de l'argilluviation en mécanismes élémentaires

Le processus d'argilluviation implique une succession de trois mécanismes élémentaires.

1. Détachement : Sous l'influence de quoi une particule argileuse se détache et devient potentiellement mobile ? Instabilité structurale de l'horizon de départ ? Insuffisance de ciments ? Flux d'eau ayant une grande compétence¹ ?

2. Déplacement : La particule migre à travers le réseau poral des horizons supérieurs, entraînée par l'eau, probablement en plusieurs « étapes ». En effet, l'argilluviation verticale **n'est certainement pas un processus continu** (tout au long de l'année). Il est probable que les premières grosses pluies d'automne tombant sur un solum relativement sec, provoque un « gros alluvionnement » à travers la macroporosité et notamment les fissures inter-agrégats, largement ouvertes. Mais ces fissures se prolongent-elles jusqu'en surface (dans les horizons A ou LE) ?

3. Immobilisation : pour quelle raison la particule se sédimente-t-elle ? Ici, à une certaine profondeur et pas ailleurs, pour s'immobiliser définitivement et former progressivement l'horizon BT ?

Pour l'argilluviation, les lois de l'alluvionnement s'appliquent : compétence des flux d'eau, etc. sous l'influence dominante de la gravité.

¹ Aptitude d'un fluide à déplacer des particules d'une taille donnée.

8.B. Conditions nécessaires pour qu'il y ait formation de Néoluvisols puis de Luvisols Typiques

- Un climat suffisamment pluvieux où les précipitations excèdent largement l'évapo-transpiration réelle.
- Un matériau parental suffisamment perméable.
- La **présence de particules argileuses mobilisables**. Dans un sable quartzueux pur, la formation de Néoluvisol n'est pas possible, faute d'argile. Il ne faut pas non plus que les particules argileuses soient immobilisées dans des agrégats très stables.

Quand l'argilluviation est le processus dominant, favorisé par l'existence d'un **matériau** et d'un **climat** favorables, cela a des conséquences morphologiques majeures. Au fil du temps, se forment progressivement et successivement un Néoluvisol puis un Luvisol Typique² (cf. le phylum évolutif des sols issus de matériaux lœssiques ou de limons anciens — *figure 5*). Si la durée de pédogenèse se prolonge suffisamment sous un climat adéquat, on ira même jusqu'au stade Luvisol Dégradé, assez courant en France.

Il est possible de préciser les conditions qui se prêtent le mieux à la formation puis à l'évolution des luvisols sous nos climats.

Matériaux parentaux :

Ce sont les matériaux limoneux déposés et bien triés par l'action du vent à longue distance qui sont les plus favorables (pouvant être remaniés ensuite anciennement par ruissellement). Ils présentent une granulométrie initiale où dominent les fractions limoneuses (limons totaux = 65 à 75 %), particulièrement les limons grossiers (rapport limons grossiers / limons fins généralement nettement supérieur à 1 sauf dans les régions marginales comme le Gâtinais de l'Yonne où ce ratio est égal à 1). Ils comportent peu de sables fins (à l'exception des lœss sableux du Nord Pas-de-Calais et de Belgique) et pratiquement pas de sables grossiers ni d'éléments grossiers. Enfin, ils n'ont pas été tassés par des sédiments venus se superposer ultérieurement.

Dans le Bassin parisien, il faut bien distinguer :

- des **lœss récents** (âge 10 000 - 12 000 ans ?) avec encore 10 à 15 % de CaCO₃, que l'on trouve presque toujours en profondeur aujourd'hui ou bien
- des « **limons anciens** » (âge 40 000 ans ?) aujourd'hui non calcaires. Étaient-ils calcaires initialement ? Peut-on parler de « lœss anciens » ? On l'ignore car on ne trouve plus trace aujourd'hui de ces matériaux intacts, ils ont été entièrement transformés par la pédogenèse.

Leur composition minéralogique est dominée par quartz et les feldspaths. Ils contiennent assez peu de minéraux primaires altérables, ce sont pourtant ces altérables qui ont fourni les minéraux argileux des horizons BT et BC limono-argileux ou argilo-limoneux et une partie des « argiles » soumises ensuite à l'illuviation.

Dans le cas des lœss français dans lesquels il y a peu de calcaire (de 10 à 20 %), le résidu non calcaire de la décarbonatation totale (essentiellement **limoneux**, mais pas seulement) est peu différent du matériau initial, mais **encore plus poreux**, la dissolution des particules calcaires laissant place à des vides.

Relief, position topographique :

Aujourd'hui on observe le plus souvent ces sols (et leurs matériaux parentaux) en position de plateaux. Mais ces positions sont celles de leur conservation, pas forcément celles du dépôt des lœss ou des limons anciens. Plus rarement on en observe sur des versants et en position de terrasses alluviales (Bornand et Legros, 2007).

² Néoluvisols, Luvisols Typiques et Luvisols Dégradés sont des termes désignant chacun une «référence» du Référentiel pédologique 2008 (AFES, 2009). C'est pourquoi les initiales doivent être écrites en capitales. En revanche, luvisols n'est pas le nom d'une référence mais celui d'un chapitre (ou «grand ensemble de références»). C'est un terme générique.

Durée :

Plus l'âge du dépôt limoneux est grand, plus le sol est avancé dans son évolution vers le stade Luvisol Dégradé. Les sols issus de loëss récents ne dépassent pas le stade « Luvisol Typique » peu rédoxique.

Climat :

C'est un climat tempéré océanique, ou à tendance continentale (Alsace). Le régime hydrique se caractérise par la dominance des flux d'eau descendants. Toutes choses égales par ailleurs, plus le climat est pluvieux, plus la pédogenèse est rapide et plus l'évolution dans le sens du lessivage d'argile, de l'engorgement et de la désaturation du complexe adsorbant des horizons supérieurs, de la « dégradation morphologique » sera avancée.

Exemple 1 : un gradient très fort et rapide de climat est observable dans le Sundgau (sud de l'Alsace – Roque et Hardy, 1981). On y observe le passage de Luvisols Typiques relativement sains au nord, dans le secteur de Mulhouse, à des Luvisols Dégradés très engorgés au sud.

Exemple 2 : Gâtinais de l'Yonne (Baize, 1993) : les sols issus de limons du sud-est de cette petite région naturelle sont beaucoup plus rédoxiques et « dégradés » que ceux situés plus au nord-ouest. Ceci est en lien direct avec l'accroissement de la pluviométrie et des altitudes (d'environ 150 m au nord-ouest jusqu'à 250 et 290 m en limite sud-est). Conséquence : un paysage beaucoup plus forestier et boisé au sud-est qu'au nord-ouest.

Attention, cependant : les climats qui se sont succédé pendant les 10000 ou 40000 dernières années ne sont pas identiques à celui d'aujourd'hui !

Nature et profondeur du substrat :

Toutes choses égales par ailleurs, ce facteur joue un grand rôle sur le fonctionnement hydrique des couvertures pédologiques. Des substrats argileux peu perméables (par ex. les argiles à meulières du Bassin de Paris) ralentissent considérablement le drainage vertical naturel des sols formés au-dessus dans la couverture limoneuse et génèrent beaucoup plus rapidement des sols beaucoup plus engorgés (Luvisols-Rédoxisols ; Luvisols Dégradés).

Exemples : Hurepoix, Brie humide et Brie boisée, Faux Perche, Gâtinais de l'Yonne, Champagne humide...

Inversement, quand les « limons des plateaux » reposent sur des calcaires (ou des sables), les sols restent sains, c'est-à-dire sans traits hydromorphes, beaucoup plus longtemps.

Exemples : dans le Vexin et en Beauce chartraine.

8-C. Autres matériaux parentaux

Il existe également des luvisols sableux (en surface) développés dans certains matériaux qui se prêtent au transfert vertical d'argiles.

Exemple de la fosse F 14, située au sud-est de Puiseaux (Loiret) dans un îlot boisé (Baize *et al.*, 2016). Le sol est développé dans une formation calcaire redistribuée au Quaternaire (FCR). Ce matériau parental contient 45 % de sables grossiers siliceux (200 à 2000 μm) qui proviennent de la molasse du Gâtinais, formation géologique qui affleure à proximité, et non pas des sables de Fontainebleau qui sont des sables fins (50 à 200 μm). La décarbonatation totale, sur une épaisseur de 85 cm, de la FCR riche en sables quartzeux a libéré un matériau relativement filtrant et contenant suffisamment d'argile pour que se développe une argilluviation notable avec formation d'un Luvisol Typique sableux en surface (12 % d'argile dans l'horizon E, 30 % dans l'horizon BT).

Autre exemple : les sols de la plaine de Pierrelaye (van Oort *et al.*, 2013 ; Baize *et al.*, 2016). Au fil du temps, le mélange [sables quartzeux + poudre calcaire] se décarbonate totalement et libère des particules argileuses qui migrent dans un milieu sableux pour former en profondeur un horizon BT sablo-argileux rougeâtre.

8.D. Actions de l'homme

Prenons l'exemple extrême des Luvisols Dégradés. Les interventions de l'homme pour leur mise en culture entraînent une triple révolution.

1. Une révolution dans l'ambiance physico-chimique : les chaulages, fertilisations, amendements provoquent la resaturation du complexe adsorbant et la remontée du pH aux environs de 7,5 alors que précédemment ces sols étaient franchement acides et désaturés sous forêts.
2. Une révolution dans le régime hydrique par disparition de la forêt et sous l'effet du drainage agricole (effet variable en fonction de la distance au drain – cf. Montagne, 2006 ; Montagne *et al.*, 2013).
3. Une révolution dans la nature, la quantité et les gradients de matières organiques dans les horizons de surface. La faible quantité de matières organiques dans ces horizons Ae (voire Ea) limoneux donne naissance à un fort risque de battance, de ruissellement et donc d'érosion.

La morphologie générale du solum reste souvent assez semblable (*figure 6*) mais les fonctionnements sont totalement modifiés.

9. DANS LES ANNÉES 1990, DES QUESTIONS DEMEURAIENT QUANT AU FONCTIONNEMENT PRÉSENT ET À VENIR DES LUVISOLS

En **milieu forestier**, l'argilluviation et la dégradation géochimique sont-elles toujours actives aujourd'hui dans les luvisols ? Le climat actuel y est-il encore favorable ? Mêmes questions en **contexte cultivé non drainé** comme en **contexte cultivé drainé**.

Un certain nombre d'éléments de réponse figurent dans des travaux plus récents, notamment ceux de Mercier (Mercier, 1998) et autres travaux réalisés sur le bassin versant du Grand Morin, en Brie (Penven *et al.*, 1998, 2000).

9.A. La thèse de Mercier

Elle s'est attachée à déterminer la nature granulométrique et organominérale des matières en suspension issues d'un réseau de drainage en période de crue. L'application de ces méthodes a permis de préciser la nature du transfert particulaire dans des sols drainés du Bassin parisien. Le sol du site étudié était un « sol brun lessivé » (un Néoluvisol) du bassin versant du Grand Morin.

Les particules transportées sont très fines : la majorité < 200 nanomètres. En outre 80 % de la charge en suspension est associée à la fraction < 0,45 µm (argiles fines).

Ce qui apparaît avant tout, ce sont les modifications qu'induit le drainage dans l'évolution pédologique. La charge particulaire comprend une forte proportion de phyllosilicate 2/1 (smectites, interstratifiés) mais aussi une proportion non négligeable de kaolinite et de quartz, généralement peu affectés. Les particules transférées proviennent de l'horizon superficiel et les temps de transferts pour arriver au réseau de drainage, gouvernés par les crues, sont incomparablement plus courts que ceux des processus classiques de pédogenèses en milieu tempéré. L'accumulation des particules dans le bas du profil semble limitée.

... Une modification importante du processus pédologique est induite par le drainage en terme non seulement d'évolution du sol mais également de sa perte en éléments fins.

Des réponses sont fournies aux questions posées ci-dessus. En schématisant :

- Y a-t-il encore entraînement des particules argileuses ? OUI !
- L'entraînement est-il plutôt accéléré ? OUI !
- Les particules (provenant de l'horizon L) quittent-elles le sol *via* les drains pour partir dans les ruisseaux OUI !
- Continuent elles à aller vers le BT ? NON !

Trois questions demeurent :

1. Les éléments de réponse présentés ci-dessus sont-ils valables également pour les Luvisols Typiques rédoxiques et les Luvisols Dégradés ?
2. Quelles sont les conséquences pour les transferts de pesticides et d'éléments en traces ?
3. En contexte cultivé drainé la « dégradation morphologique » est-elle stoppée ?

Certaines réponses ont été données par des travaux contemporains ou plus récents (cf. *ci-après*).

9.B. Les travaux de Penven, Muxart *et al.*

Penven *et al.* (2000) ont suivi pendant deux ans les pertes de matières en suspension (MES - filtrées à 0,45 μm) à l'exutoire d'un réseau de drainage d'une parcelle de 6,4 ha dans le bassin versant du Grand Morin (Brie). Les sols y sont des « sols bruns lessivés » dont les horizons Btg contiennent entre 25 et 30 % d'argile.

Selon l'année considérée, les pertes en MES vont de 990 à 1 500 kg par an pour cette parcelle, soit de 0,15 à 0,23 t/ha/an.

Dans leur conclusion, les auteurs écrivent : « A l'érosion de surface, s'ajoutent les pertes en sol par le réseau de drainage agricole. En effet, cette pratique tend à diminuer le ruissellement et donc l'érosion des sols, mais, a contrario, elle contribue à la charge en MES des cours d'eau qui collectent les eaux issues des drains. Ainsi elle participe activement à l'érosion insidieuse des sols et à leur appauvrissement en particules fines à moyen terme (Penven *et al.* 1998). En effet, même si les flux spécifiques annuels évacués par le réseau de drainage sont relativement modestes (maximum de 0,23 t/ha/an en année humide), ces exportations sont chroniques. De plus, Mercier (1998) a montré qu'il s'agit des particules les plus fines (particules < 0,2 μm) ... En l'absence de réseau de drainage enterré, celles-ci étaient lessivées depuis l'horizon Ap pour s'accumuler au sein de l'horizon Btg. Désormais elles peuvent être évacuées hors du profil du sol, modifiant ainsi le processus naturel de la pédogenèse ainsi, qu'à terme, la conductivité hydraulique de cet horizon profond.

Par ailleurs en Brie, l'utilisation du ^{137}Cs a montré que les MES des eaux de drainage étaient particulièrement riches en cet isotope (particulièrement les smectites de la fraction < 0,2 μm , Mercier, 1998) de même que l'horizon Ap, les horizons sous-jacents en étant dépourvus (Sogon, 1999). Ces données tendraient à démontrer également qu'une partie importante des particules mobilisées et exportées en Brie est prise en charge dans l'horizon Ap ».

10 ARGILLUVIATION « RÉCENTE » SUPERPOSÉE À DE VIEILLES PÉDOGENÈSES

Il s'agit de sols ayant évolué par argilluviation après une très longue pédogenèse antérieure développée dans des matériaux très argileux (70 %). Les matériaux argileux sont pourtant censés se prêter mal à l'illuviation verticale d'argile.

Exemple : les « terres d'Aubues » et les « sols issus des argiles à chailles » des plateaux de basse Bourgogne (Baize, 1991 ; 2012). Il y a au moins deux preuves de cette argilluviation verticale :

- Une différenciation texturale très marquée (dans un même matériau dont l'homogénéité initiale a été vérifiée : une argile de décarbonatation totale de calcaires durs) ; on dose de 20 à 30 % d'argiles granulométriques dans les horizons supérieurs, de 40 à 70 % en profondeur (*figure 9*).
- Des revêtements argileux et ferrugineux très abondants et très nets, aussi bien sur les faces d'agrégats que sur cailloux et pierres (chailles), visibles à l'œil nu comme en lames minces (*figures 10 et 11*). Dans le cas des horizons profonds des « terres d'Aubues », la totalité des agrégats est recouverte de ferri-argilanes rougeâtres (code Munsell 7,5 YR 4/4 voire 5 YR 4/6 ou 4/8). Pourtant, la terre fine obtenue par concassage des agrégats, constituée essentiellement de matrice, n'a pas du tout la même couleur : elle est ocre jaune.

Figure 9: « Terre d'Aubue profonde » issue de l'altération à très long terme d'un calcaire oxfordien (Baize, 2012). Noter le contraste textural qui se traduit par un fort contraste de couleurs.

Figure 9: Thick "Terre d'Aubue" arising from the very long-term weathering of an Oxfordian limestone. To be noted the textural contrast which is reflected by a strong contrast in colours.



Trois raisons expliquent cet apparent paradoxe :

- i) un climat (ancien) suffisamment pluvieux ;
- ii) des horizons argileux à belle structure fine et très stable (Bruand, 1985) d'où des transferts verticaux toujours possibles ;
- iii) une pédogenèse de très longue durée (1 à 2 millions d'années – Baize, 2012).

Un autre exemple d'argilluviation se surimposant à de très vieilles altérations est fourni par les ultisols localisés entre les rivières Yonne et Cure (Baize, 2019). Outre une intense argilisation *in situ* des minéraux primaires altérables, ces sols montrent également des ferri-argilanes liés à des redistributions de particules argileuses (Baize, 2019 ; page 40).

11. HOMMAGE À PHILIPPE DUCHAUFOUR

Rappelons, car il n'est pas possible de disserter sur les luvisols sans le citer, que Philippe Duchaufour (1948 ; 1951) fut parmi les premiers à distinguer et à expliquer clairement la différence majeure entre le processus mécanique de « lessivage » des argiles et la podzolisation (baptisée, plus tard en 1964 : « acidocomplexolyse »). Antérieurement, à la suite de l'école russe, on parlait de « podzols primaires » et de « podzols secondaires ».

Duchaufour, 1951 – p. 648 et 649

« Les analyses aux rayons X des éléments fins montrent que les horizons A₂ et B contiennent essentiellement des argiles de même composition ; seules la quantité de ces argiles ainsi que celle des oxydes de fer diffèrent, l'horizon B pouvant en contenir 3 à 5 fois plus que l'horizon A. Il s'agit donc bien d'un simple entraînement, sans aucune modification chimique des éléments minéraux, ce qui explique l'utilisation du vocable : lessivage ».

« C'est dans la formation d'une grande quantité d'humus acide à décomposition lente (« terre de bruyères ») produit par la Lande à Ericacées, ou les repeuplements en résineux et notamment en Pin sylvestre, qu'il faut chercher la cause essentielle de la podzolisation. La matière organique très acide de surface donne, en se décomposant, une grande quantité d'acides humiques noirs, colloïdaux et dispersés qui, en migrant en profondeur, exercent une véritable dégradation chimique du substratum minéral ».

Figure 10 : Lame mince taillée dans un horizon profond d'une « terre d'Aubue profonde » de Basse Bourgogne. Lumière polarisée et analysée (Baize , 2012). Outre les épais revêtements argileux tapissant les espaces inter-agrégats, on observe aussi de nombreuses papules qui pourraient être des revêtements finement fragmentés par pédoturbation et/ou cryoturbation.

Figure 10: Thin section made in a deep horizon of a « terre d'Aubue » in Low Burgundy. Polarized and analysed light. In addition to the thick clay coatings covering inter-aggregate spaces, one can observe numerous papules which could be ferri-argillanes fragmented by pedoturbation and/or cryoturbation.

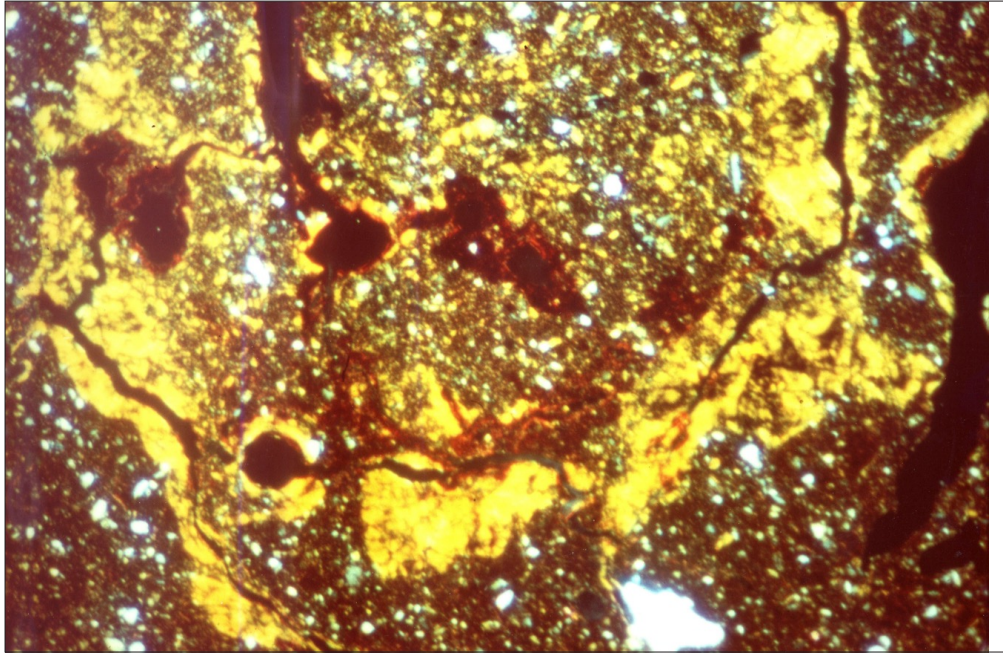


Figure 11 : Sol développé dans des « argiles à chailles ». Comparaison entre des éléments grossiers extraits des horizons éluvies E et des éléments grossiers extraits des horizons argilluvies BT qui présentent des teintes orangées liées à des revêtements argilo-ferriques.

Figure 11: Soil developed in "clays with cherts". Comparison between coarse fragments extracted from eluvial E horizons and those extracted from illuvial BT horizons which show orange hues associated to ferri-argillanes.



12. CONCLUSION

En France, la définition des luvisols est assez précise et stricte. Le processus principal, sinon unique, est le transfert vertical de particules argileuses depuis les horizons supérieurs vers des horizons plus profonds où ces particules se sont accumulées (AFES, 2009). Nous avons vu que les meilleures conditions pour le développement rapide de l'argilluviation sous nos climats (éluviation d'argiles + illuviation) s'observent dans le cas des matériaux limoneux ou sableux non tassés mais comportant cependant une quantité suffisante de particules < 2 μm mobilisables.

En revanche, la translocation verticale de particules argileuses est pratiquement impossible dans les sols dont le matériau parental est un sédiment marin argileux (ou qui devient argileux très rapidement après une altération modérée, tels les « sables verts » glauconieux (Baize, 1983). Il s'agit de matériaux déposés lentement au fond des mers, puis fortement compactés par d'autres sédiments venus par-dessus ultérieurement. La structure grossière de leurs horizons semi-profonds et la fermeture des fissures inter-agrégats en période humide ne se prêtent pas du tout à des mouvements verticaux de matières mais à des évacuations latérales (planosols).

Depuis 2007 un certain nombre d'objections ont été présentées pour contester ou au moins nuancer fortement ces conceptions que l'on peut considérer comme « classiques ». Et des travaux utilisant des techniques modernes, autrefois inconnues, ont été entrepris pour vérifier ou quantifier les phénomènes de lessivage ou d'argilluviation. La présentation de ces critiques et de ces travaux sera l'objet d'un autre article à paraître.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFES, 1992 - Référentiel Pédologique 1992 (D. Baize et Girard M.C. coord.). INRA Éditions, Paris. 222 p.
- AFES, 2009 - Référentiel pédologique 2008 (D. Baize et Girard M.C. coord.). Quae éditions, 480 p.
- Baize D., 1976 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Tonnerre. Carte + Notice 143 p. Inra Éditions, Paris. 243 p.
- Baize D., 1983 - Les planosols de Champagne humide - Pédogenèse et fonctionnement. Thèse. Nancy. Inra Versailles, 385 p.
- 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., 1993 - Petites régions naturelles et paysages pédologiques de l'Yonne. Inra Orléans. Notice 191 p. + carte à 1/200 000 en couleurs.
- 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, pp. 31-48.
- Baize D. et Voilliot J.P., 1988 - Carte des sols de l'Yonne à 1/50 000. Feuille Joigny. Notice, 142 p. Station Agronomique de l'Yonne.
- Baize D., van Oort F. et Nédélec H., 2016 - Un facteur majeur de la pédogenèse après décarbonatation dans le cas de formations superficielles calcaires redistribuées au quaternaire : la nature des résidus non carbonatés. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 23, pp. 173-192.
- Begon J.-C., 1990 - Les sols de boulbène du Toulousain. In: *Les sols de Boulbènes*. Afes, section du sud-ouest. 9 p. + annexes.
- 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 p.
- Bornand M. et Legros J.-P., 2007 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Saint Étienne. Inra. 283 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.
- Bruand A., 1985 - Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau argileux d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse Dr. Spécialité Université Paris VII, 225 p.
- Bullock P. and M.L. Thompson, 1985 - Micromorphology of Alfisols. pp. 17-47. In: L.A. Douglas and M.L. Thompson (eds.), *Soil Micromorphology and Soil Classification* (SSSA Special Publication, n° 15), Madison/Wise.

- Duchaufour P., 1948 - Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française. Annales de l'E.N.E.F., thèse, 332 p.
- Duchaufour P., 1951 - Lessivage et podzolisation. Revue Forestière Française, 1951, n°10, pp. 647-652.
- Dudal R., 1952 - De la genèse des sols sur limon loessique. Pédologie, 2, pp. 22-26.
- Froger D., Moulin J. et Servant J., 1994 - Typologie des sols : les terres de Gâtines, Boischaut Nord, Pays Fort, Touraine-Berry. Chambres d'agriculture du Cher, de l'Indre, de l'Indre-et-Loire et du Loir-et-Cher. 129 p.
- Isambert M., 1984. Carte pédologique de la France à 1/100 000. Feuille Châteaudun. Notice explicative. Versailles, Inra éditions, 259 p.
- 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. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. 286 D, pp. 25-27.
- Jamagne M., 2011 - Grands paysages pédologiques de France. Quae éditions. 598 p.
- Jamagne M. et Fedoroff N., 1969 - Comparaison micromorphologique de quelques sols sur limon du Bassin parisien. Mémoire hors série Société Géologique de France, n° 5, pp. 73-80.
- Jamagne M. et Pedro G., 1981. Les phénomènes de migration et d'accumulation de particules au cours de la pédogenèse sur les formations limoneuses du Nord de la France. Essai de caractérisation du processus de « lessivage ». Paris, Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série IIA : Sciences de la Terre et des planètes, 292 (19), pp. 1329-1332.
- Langohr R., 1986 - La pédologie et l'évolution de l'utilisation des terres dans la région limoneuse de Belgique. Hommes et Terres du Nord, 2-3, pp. 94-97
- 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.
- Mercier P., 1998 - Contribution méthodologique à l'étude des matières en suspension : application au transfert particulaire en sol drainé. Thèse de doctorat en Sciences de l'eau. Engref, Paris, 173 p.
- Mériaux S., 1954 - Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. III. Méthode densimétrique. Annales Agronomiques, II, pp. 149-205.
- 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.
- van Oort F., Thiry M., Foy E., Fujisaki K. et Van Vliet-Lanoë B., 2013 - Pédogenèse polyphasée et transferts de polluants métalliques contraints par des structures cryogéniques. Le cas des sols sous épandages massifs d'eaux usées dans la plaine agricole de Pierrelaye. Étude et Gestion des Sols, 20, 2, pp. 7-26.
- Penven M.-J., Muxart T., Bartoli F., Bonte P., Brunstein D., Cosandey C., Gouy V., Irace S., Leviandier T. et Sogon S., 1998 - Petits bassins ruraux et pollutions diffuses ch. 4 : pp. 159-210. In. La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un Système fluvial anthropisé, Meybeck et al (Ed). Elsevier, Paris, 749 p.
- Penven M.-J., Muxart T., Cosandey C. et Andrieu A., 2000 - Contribution du drainage agricole enterré à l'érosion des sols en région tempérée (Brie). pp. 128-144. In : Bulletin du réseau érosion n° 20. IRD et GTZ.
- Roque J., 2007. Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Meaux. Notice explicative. Inra Orléans, 196 p.
- Roque J. et Hardy R., 1981 - Étude agro-pédologique dans le Sundgau. Inra Versailles. 309 p.
- Sogon S., 1999 - Érosion des sols cultivés et transport des matières en suspension dans un bassin versant de Brie. Application des traceurs radioactifs naturels et magnétiques. Thèse de l'université Paris 1, 304 p.
- 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-I, pp. 27-44.

