

# Les **GRANDS PROCESSUS PÉDOGÉNÉTIQUES** du territoire français

## **ZOOM sur le PROCESSUS** **d'ÉLUVIATION / ILLUVIATION verticale** **de PARTICULES ARGILEUSES** **menant → à la formation des LUVISOLS**

par **Denis BAIZE**



# La PÉDOGENÈSE

## **Définition (Baize, 2004) :**

Ensemble des processus concourant à la formation et à l'évolution des couvertures pédologiques, au cours du temps, à partir des matériaux parentaux.

Synonyme : **évolution pédogénétique.**

La **pédogenèse** est une évolution très lente, entièrement **située dans le passé** et qui de ce fait échappe à l'observateur. Celui-ci en est donc réduit à essayer de la reconstituer, grâce à des démarches et approches variées.

En revanche, les **fonctionnements actuels** des couvertures pédologiques (fonctionnements hydrique, structural, thermique, physico-chimique) intéressent beaucoup plus les utilisateurs et les aménageurs et ils peuvent être suivis au jour le jour.

Ces deux notions ne sont pas antinomiques, bien au contraire. La pédogenèse n'est que la **sommation**, sur des centaines ou des milliers d'années, des résultats des dynamiques journalières, saisonnières et annuelles.

Le solum que nous observons, décrivons et analysons aujourd'hui est la résultante de l'action de **plusieurs processus pédogénétiques successifs et/ou simultanés** ayant agi sur un matériau initial.

## Le FONCTIONNEMENT PRÉSENT du SOLUM...

...peut être caractérisé par :

- pédoclimat ;
- régime hydrique et dynamique structurale ;
- végétation ;
- forme d'humus ;
- pH ;
- état du complexe d'échange ;
- composition des eaux de drainage.

En revanche,

**la MORPHOLOGIE et les CONSTITUANTS du solum étudié =**

- **héritage** de la roche-mère
- + **effets des différents processus pédogénétiques** intervenus dans le passé.

Tout ce que l'on peut **observer aujourd'hui** (aspects macro- et micro-morphologiques) **et analyser** (analyses granulométriques, chimiques et minéralogiques) est relatif à **ce qui est resté sur place** et qui résulte de transformations plus ou moins importantes.

# GRANDS PROCESSUS PÉDOGÉNÉTIQUES (GPP)

## Qu'est ce ?

- ensemble de petits phénomènes élémentaires simultanés ou se succédant dans le temps
- agissant sur une longue durée
- transformant un MP en sol puis un sol ayant une certaine morphologie en un sol ayant une autre morphologie
- donc ensemble de petits phénomènes localisés (**sub-millimétriques**) amenant à de **grandes modifications morphologiques** (nature et succession des horizons) et **fonctionnelles** (notamment f. hydrique et structural, f. physico-chimique et biochimique) à l'échelle verticale **décimétrique-métrique** ; à l'échelle latérale **décamétrique-hectométrique** (versants).

L'altération d'un mica noir dans un micro-site n'est pas un GPP mais cette altération peut y contribuer.

La transformation d'un BRUNISOL EUTRIQUE en LUVISOL TYPIQUE (via le stade NÉOLUVISOL) grâce au processus d'"éluviation / illuviation" est un GPP.

*cf. ci-dessous.*

# Quels PROCESSUS PÉDOGÉNÉTIQUES dans l'hexagone ?

## 0°) Fragmentation mécanique – division - microdivision

### 1°) Processus initiaux : altération de certains minéraux du matériau parental

a) altération des minéraux primaires "altérables" (micas noirs, ferromagnésiens, feldspaths...) en de nombreux micro-sites donnant lieu à des **néoformations** *in situ* (minéraux dits "secondaires" = oxydes de fer, minéraux argileux, etc.)

b) cas particulier : **dissolution** totale du gypse et de la calcite (avec évacuation totale des substances dissoutes par lixiviation)

cas de la **décarbonatation totale** d'une roche (libérant → un résidu lequel va former le vrai MP du solum)

cas de la **décarbonatation partielle progressive** d'un solum calcaire → gradients, accumulations relatives des éléments insolubles

### 2°) Libération du fer hors des réseaux cristallins des minéraux primaires ; association des oxydes de fer (s.l.) ainsi formés avec les minéraux argileux et des MO humifiées

→ complexe [A-H-Fe] dit "argilo-humique"

### 3°) Accumulation de carbonate de calcium par précipitation : formation d'encroûtements

après **transfert vertical** dans le solum (ou dans le réseau karstique souterrain = stalagmites, stalactites, tufs calcaires) ou latéral (le long de la pente) *Le processus 3 résulte du 1b*

#### 4°) Lixiviation

= **entraînement d'éléments en solution** (alcalins, alcalino-terreux, ammonium, parfois silice, anions divers)  $\neq$  entraînement de **particules en suspension** pour lequel on emploie, de préférence, le mot "illuviation".

#### 5a°) Acquisition d'une **structure pédologique** en agrégats (vs structure lithique)

#### 5b°) Acquisition d'une **structure pédobiologique** (ou construite) dans l'horizon de surface action des vers de terre anéciques

**1 + 2 + 5 = genèse des BRUNISOLS**

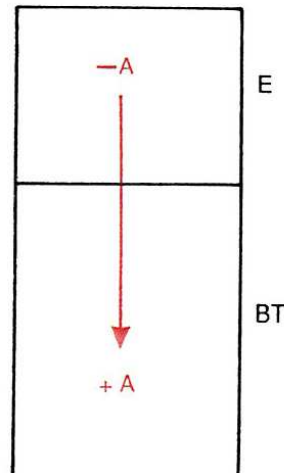
#### 6°) **Entraînement d'argiles (éluviation + illuviation) : argilluviation**

\* départ de particules argileuses d'horizons supérieurs qui s'appauvrissent progressivement (codés E)

\* transferts à dominance verticale  $\rightarrow$  **LUVISOLS** (avec accumulation absolue dans un horizon de profondeur moyenne codé BT)

\* à dominance latérale  $\rightarrow$  **PLANOSOLS** (avec évacuation dans les eaux d'une nappe hypodermique temporaire) = **appauvrissement par entraînement latéral**

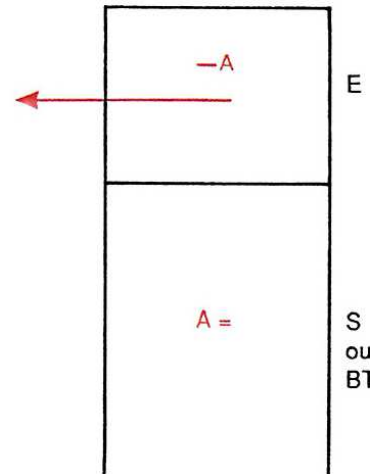
### ARGILLUVIATION VERTICALE



1

déplacements  
dans le solum

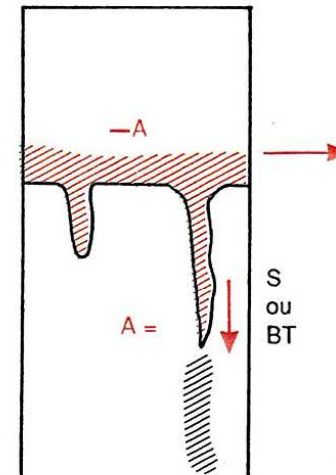
### ENTRAÎNEMENT LATÉRAL d'ARGILE



2

évacuation latérale  
hors du solum

### DÉGRADATION GÉOCHIMIQUE des ARGILES



3

évacuation hors du  
solum (planosols) ou  
accumulation dans  
des gloses grises  
profondes (Luvisols  
Dégradés)

**accumulation absolue  
d'argile en BT**

**7°) "Dégradation morphologique" = altération/destruction des minéraux argileux en conditions de désaturation du complexe adsorbant et de réduction temporaire (cf. ci-dessous) n'intervient pas seulement dans le cas des Luvisols Dégradés mais aussi dans certains planosols (stades avancés) et même dans le cas de "dégradosols" !**

**8°) Podzolisation :**

- altération des minéraux altérables sous l'influence de MO à composition particulière (acido-complexolyse),
- mobilité et transferts de complexes organo-métalliques,
- → différenciation d'horizons semi-profonds enrichis en MO et/ou en fer (codés BP)

**9°) Décolorations et ségrégation de fer au sein d'un même horizon**

engorgements temporaires en présence de fer - cycles d'oxydo-réduction

**10°) Réduction généralisée du fer au sein d'un même horizon**

engorgements permanents (ou quasi-) en présence de fer – réduction et solubilisation du fer

**11°) Accumulation d'oxydes de fer formant ciment**

résulte du 10 après transfert vertical (alios, grepp) ou latéral (grison)

**12°) Accumulation de matières organiques non ou peu décomposées en milieu saturé d'eau = turbification**

**13°) Cryoturbation ou géliturbation**

horizons déformés ou mélangés avec d'autres par le gel (actuel en montagne ou ancien : phases froides du Quaternaire).



## **ZOOM sur le "lessivage des argiles" ou ÉLUVIATION / ARGILLUVIATION verticale → formation de LUVISOLS vrais**

### **Pourquoi ce choix ?**

- \* cas bien connu, bien étudié (travaux de Jamagne), confirmés par de nombreuses cartographies (Isambert, Roque, Baize, Maucorps, pédologues de l'école de Studer, etc.)
- \* sols représentant de grandes superficies agricoles en France (Picardie, Brie, Beauce, Vexin, Nord, Haute Normandie, Boischaut Nord, Touraine, Alsace, Sundgau, etc.)
- \* qui intéresse le laboratoire UR SOLS (Orléans).

**Le processus d'éluviation / argilluviation d'argile existe un peu partout (par ex. dans les « arènes » granitiques)... sans forcément mener à la formation de Luvisols !**

### **Pour qu'il y ait formation de LUVISOLS, il faut 3 conditions :**

- \* climat suffisamment pluvieux où  $P \gg \gg ETR$  (climat trop sec = NON)
- \* un matériau suffisamment perméable (matériaux argileux = NON)
- \* présence d'argiles dispersables et lessivables (sables quartzes = NON)

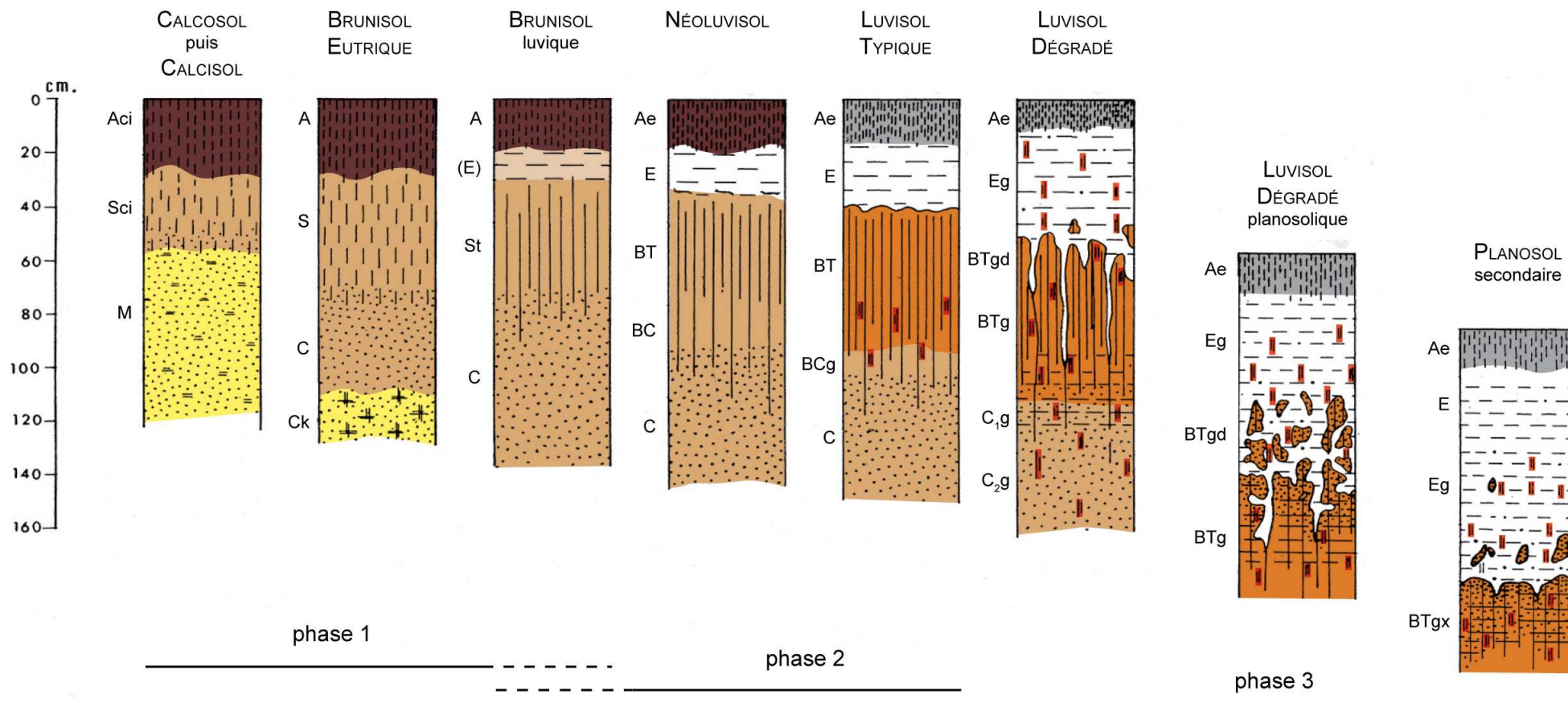
Quand processus dominant, favorisé par l'existence d'un matériau et d'un climat favorables → conséquences morphologiques majeures → phylum des LUVISOLS issus de matériaux loessiques.

Il existe également de vrais LUVISOLS sableux (en surface) développés dans **certains** matériaux.

# Rappel des résultats des travaux de M. Jamagne

**Chronoséquence théorique** (solums issus de lœss)

(contestés désormais par J.P. Legros)



décarbonatation + brunification

argilluviation

"dégradation"

TRAVAUX DE M. JAMAGNE

## **Processus successifs :**

### **Phase 1 : altération & 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 d'argiles emprisonnées 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) ;

### **Phase 2 : éluviation / illuviation primaire en milieu aéré, désaturation progressive du complexe**

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

### **Phase 3 : évolution géochimique forte en milieu chimiquement désaturé et temporairement réducteur – dégradation et illuviation secondaire**

- accroissement de l'engorgement – processus d'oxydo-réduction, séparation argiles / fer ;
- désaturation progressive 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 BTgd jusqu'à un plancher sub-horizontale.

## CONDITIONS OPTIMALES pour la GENÈSE des LUVISOLS

### **Matériaux parentaux :**

matériaux bien triés par l'action du vent à longue distance (pouvant être remaniés ensuite anciennement par ruissellement) d'où une granulométrie où dominant les fractions limoneuses (LT = 65 à 75 %), particulièrement les limons grossiers (rapport LG/LF généralement nettement supérieur à 1 sauf dans les régions marginales comme le Gâtinais de l'Yonne où ce ratio = 1). 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.

\* Lœss récents (12.000 ans) avec encore 10 à 15 % de  $\text{CaCO}_3$ , que l'on trouve presque toujours en profondeur aujourd'hui

ou

\* "limons anciens" (âge 40.000 ans ?) non calcaires (s'ils l'ont jamais été) dont on ne trouve plus trace aujourd'hui, car entièrement transformés par la pédogenèse.

**Minéralogie** : dominance du quartz et des feldspaths. Rôle important de la chlorite (notamment comme minéral porteur d'ETM – M. Hardy, 1998) ? Assez peu de minéraux primaires altérables, ce sont pourtant eux qui ont fourni les minéraux argileux des horizons BT et BC limono-argileux ou argilo-limoneux et les "argiles" soumises ensuite à l'illuviation.

**Nature granulo et abondance du résidu non calcaire** : dans ce cas où il y a peu de calcaire (moins de 15 %), le résidu (essentiellement limoneux) est peu différent du matériau initial (mais encore plus poreux).

**Relief, position topo** : aujourd'hui en position de plateaux (ces positions sont celles de leur conservation, pas forcément celles de dépôt des MP), plus rarement versants et terrasses alluviales.

**Durée** : Plus l'âge du dépôt limoneux est grand, plus le sol est avancé dans son évolution vers les Luvisols Dégradés. Les sols issus de loess récents ne dépassent pas le stade "Luvisol Typique" peu rédoxique.

**Climat** : tempéré océanique, ou à tendance continentale (Alsace) régime hydrique à 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 → passage de Luvisols Typiques relativement sains au nord, à des Luvisols Dégradés très engorgés au sud.

Exemple 2 : Gâtinais de l'Yonne : les sols issus de limons du sud de cette région sont beaucoup plus rédoxiques et dégradés que ceux situés plus au nord. Lien direct avec la pluviométrie et l'altitude. Conséquence : un paysage beaucoup plus forestier et boisé au sud qu'au nord.

**Attention : le climat des 10.000 ou 40.000 dernières années n'est pas celui d'aujourd'hui !**

## **Nature et profondeur du substrat :**

TCEPA, ce facteur joue un grand rôle sur le fonctionnement hydrique des couvertures pédologiques. Des substrats argileux peu perméables (par ex. les argiles à Meulière du Bassin de Paris) ralentissent considérablement le drainage vertical naturel des sols et génèrent beaucoup plus rapidement des sols beaucoup plus engorgés (Luvisols-Rédoxisols).

Exemple : 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 beaucoup plus longtemps

Exemple : Vexin, Beauce chartraine, autre ?

## **Actions de l'homme :** Cas extrême des Luvisols Dégradés

- révolution dans l'ambiance physico-chimique (saturation du complexe, pH) par chaulages, fertilisation, amendements ;
- révolution dans le régime hydrique par disparition de la forêt ; et par le drainage agricole (effet variable en fonction de la distance au drain) ;
- révolution dans la nature, la quantité et les gradients de MO dans les horizons de surface  
→ battance, ruissellement et érosion

La morphologie reste très semblable mais fonctionnements totalement modifiés !

## Les LUVISOLS DÉGRADÉS

La « dégradation morphologique » = dégradation géochimique des minéraux argileux, sous l'influence de phénomènes d'oxydo-réduction...

... → aboutissant à la genèse de volumes **très appauvris en fer ET en argile** bien visibles sur le terrain (même à la tarière) car tricolore et différences de texture dans un même horizon.

Bien distinguer ces volumes très clairs voire blancs et les simples volumes "éluviés" appauvris en argile et en fer, sans dégradation des minéraux argileux !

Ci-dessous : un Luvisol Dégradé du Faux Perche (à gauche) et un autre près de Charny (Gâtinais de l'Yonne – à droite).







## CARACTÉRISATION des HORIZONS HÉTÉROGÈNES (codés E&BTgd)

Thèse de David Montagne (2006) – distinction de 4 types de volumes par leur couleur dans un horizon hétérogène :

	A %	Fe 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 (horizon E)
* 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

Luvisols Dégradés de Champagne Humide (solum Prusy – Baize, 1976) :

Prélèvements sélectifs dans des horizons hétérogènes

		A %	FeL %
<b>Horizon E&amp;BTgd</b>	volumes clairs :	22,1	0,92
	volumes ocres :	29,8	2,56
<b>Horizon BTg (120-170 cm)</b>	volumes ocres :	33,2	2,01
	volumes gris-bleu :	40,3	0,18

# CRAS Jamagne et Pédro, 1981 :

# Prélèvements sélectifs

## JAMAGNE et PÉDRO, CRAS, 1981

Formations limoneuses loessiques du nord de la France

Données granulométriques moyennes

### NÉOLUVISOLS

### LUVISOLS

### LUVISOLS DÉGRADÉS

Argiles (0-2 µm)	ratio		
	AT %	AF %	AF/AT
Horizon éluvial E	18,5	9,1	0,49
langues dégradées			
Horizon BT2	28,9	16,5	0,57
revêtements argileux	59,7	42,9	0,72
Horizon BT3	24,2	12,9	0,53
Horizon C	20,6	10,5	0,51
<b>IDTs</b>	<b>1,6</b>	<b>1,8</b>	

ratio		
AT %	AF %	AF/AT
15,7	6,2	0,39
29,2	16,9	0,58
50,9	30,2	0,59
27,1	14,5	0,54
23,3	11,2	0,48
<b>1,9</b>	<b>2,7</b>	

ratio		
AT %	AF %	AF/AT
13,2	4,8	0,36
15,7	4,6	0,29
29,8	17,8	0,60
33,2	16,8	0,51
29,4	17,6	0,60
23,9	11,7	0,49
<b>2,3</b>	<b>3,7</b>	

enrichissement relatif en Q et Kaol.

### Limons (2-50 µm)

Limons (2-50 µm)	ratio
	LG/LF
Horizon éluvial E	1,91
langues dégradées	
Horizon BT2	1,58
Horizon BT3	1,61

LF affectés également par l'éluviation

ratio
LG/LF
1,38
1,42
1,45
1,54

altération poussée microdivision des LG --> LF

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)

## Théorie de Legros sur le « lessivage » (Legros, 2007 – chapitre 8)

## Ses arguments

\* dans son livre (page 298) le premier exemple d'argilluviation qu'il prend est celui des arènes granitiques (horizons C) du Mont Pilat (Loire). Il ne s'agit pas de Luvisols, même s'il y a bien des mouvements d'argiles de néoformation. Aussi intéressante que puisse être sa petite expérience personnelle, cela ne remplace pas une vue générale du domaine des vrais luvisols !

\* Quand on fait des bilans, les pertes en argile calculées en E sont très loin d'équilibrer les « gains » en argile dans le BT (qui est souvent fort épais) **VRAI** – mais, avant de devenir un vrai BT par accumulation absolue de particules argileuses, le BT a d'abord été un horizon S d'altération avec une néogénèse d'argile in situ parfois non négligeable (par rapport à l'horizon C sous-jacent).

En outre les minces horizons [Ae + E] observables aujourd'hui ont peut-être été plus ou moins tronqués (car en surface, et à structure peu stable), ce qui fausse les bilans !

\* Dans les Planosols, il y a essentiellement des pertes latérales, presque rien qui va en profondeur **VRAI** mais, justement, les planosols primaires (étudiés par Baize, 1983) et les luvisols (étudiés par Jamagne) ont des matériaux parentaux et des fonctionnements hydriques totalement différents ! Legros confond les PLANOSOLS primaires (cf. Baize) et les PLANOSOLS secondaires (cf. Jamagne) !

On ne peut pas oublier les nombreux et beaux **revêtements argileux** qui tapissent chenaux, méso-pores et faces d'agrégats comme des "micro-alluvions" ! Très bien visibles en lames minces !

## Décomposition de l'argilluviation en mécanismes élémentaires

### a) Détachement :

- Sous l'influence de quoi une particule se détache ?
- Instabilité structurale ? Manque de ciments ? Grand flux d'eau ayant une grande compétence ?

### b) Déplacement

- elle migre à travers le réseau poreux de l'horizon E, entraînée par l'eau, probablement en plusieurs "étapes"

### c) Immobilisation

- pour quelle raison se sédimente-t-elle ? Ici, dans le BT, et pas ailleurs ?
- pour s'immobiliser définitivement ?

S'appliquent les lois de l'alluvionnement : **compétence** des flux, etc.

...sous l'influence dominante de la **gravité** ?

### 3 IDÉES SUPPLÉMENTAIRES

\* L'argilluviation verticale n'est probablement **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 interagrégats, largement ouvertes.

Problème : ces fissures existent-elles en surface (dans l'horizon L) ?

\* L'argilluviation "mécanique" (simple transfert de particules) génère une limite relativement régulière et horizontale entre les horizons E et BT. En revanche, la dégradation géochimique 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" l'horizon BTgd.

\* Dans certaines régions (Est de la France), des "glosses" remarquablement dessinées et symétriques, régulièrement espacées, pourraient être induites par des phénomènes périglaciaires comme des "fentes en coin".

## QUESTIONS sur le PRÉSENT et l'AVENIR

\* En **milieu forestier**, l'argilluviation est elle toujours active aujourd'hui dans les Luvisols (climat) ?

\* En **contexte cultivé non drainé** (Néoluvisols), l'argilluviation est elle toujours active ?

\* En **contexte cultivé drainé**, l'argilluviation est elle toujours active ?

*réponses dans la thèse de Pascale Mercier (1998) Néoluvisols*

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

Est-ce vrai également pour les Luvisols rédoxiques et les Luvisols Dégradés ?

Conséquences pour les transferts de pesticides et d'ETM !

En **contexte cultivé drainé** la "dégradation" est-elle stoppée ?

## Quelques CONCLUSIONS-CLÉS de la thèse de Pascale MERCIER

...ce travail s'est attaché à déterminer la nature granulométrique et organo-minérale 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 les sols drainés du Bassin parisien. Le site étudié = sol brun lessivé du bassin versant du Grand Morin.

Les particules transportées sont très fines : la majorité < 200 nanomètres - 80% de la charge en suspension est en effet associée à la fraction < 0,45  $\mu\text{m}$ .

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.