

Les vides sont, comme dans le cas précédent, constitués par des cavités régulières et irrégulières à parois émoussées, ainsi que par un nombre assez important de chenaux, associés à quelques fentes jointives.

Les traits pédologiques sont nombreux et divers, liés d'une part à l'intensité de l'évolution, d'autre part à l'augmentation de l'endohydro-morphie.

Les revêtements argileux sont très nombreux dans le Bt. Certains tapissent les parois des vides et les faces des agrégats, d'autres sont fragmentés et inclus dans le fond matriciel. Ces revêtements paraissent plus ferriques que ceux des stades précédents.

Dans des sols très évolués, et où la dégradation est déjà accentuée, on peut observer au niveau de l'horizon B₃, sur les faces verticales de structure, des revêtements assez fins, jaune très clair, qui pourraient correspondre à des phénomènes d'illuviation secondaire liées à la dégradation (Vé Coninck et al., 1968).

La présence de grains du squelette dans certains revêtements composés est fréquente à ce stade d'évolution.

Les cuitanes caractéristiques sont soit des ferriargilanes d'illuviation simples, soit des ferriargilanes composés associés à des squeletanes. On note la présence assez fréquente de concentrations noires en films discontinus : manganes vraisemblablement. Des fragments de ferriargilanes ne sont pas rares dans le fond matriciel.

D'autres concentrations plasmiques apparaissent sous forme de glaeules : nodules essentiellement ferriques à limites assez nettes, ou plus diffuses : énonodules ou halos glaeulaires. De véritables concrétions bien délimitées sont également observables.

Les gédotubules les plus fréquents sont des isotubules de remplissage massif, et des striotubules de remplissage progressif.

Quelques cristallites ferriques sont disséminées dans les horizons B_{2t} et B₃.

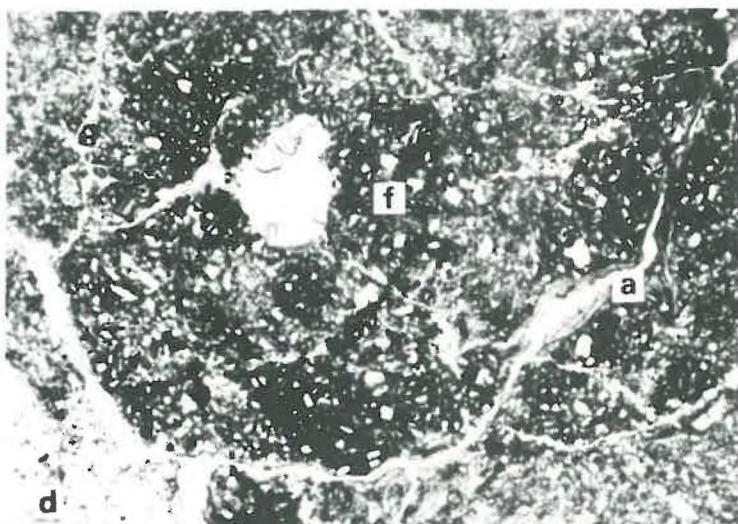
5.12.6. SOL LESSIVE GLOSSIQUE A HYDROMORPHIE.

A ce stade d'évolution, on constate une généralisation de la dégradation à toute la partie supérieure du solum.

Le profil type présente la succession d'horizons suivants : A₁ - A_{2g} - A & B_g - B_{2tg} - B_{3gx} - C_{1gx} - C_{2c}.

Le squelette présente dans certaines zones une hétérogénéité, les fractions les plus fines y étant relativement plus représentées. Dans les langues d'altération on observe des plages dans lesquelles le plasma argileux a disparu pratiquement en totalité.

Le plasma est très hétérogène et marqué par des formes variées de ségrégations ferriques, il présente d'une manière générale une biréfringence plus faible qu'au stade précédent. Les dépôts d'oxydes de fer prennent une importance considérable et sont particulièrement nombreux à la partie inférieure du A₂ et dans la zone d'altération de l'horizon Bt. Ils imprègnent localement un fond matriciel qui peut avoir conservé son assemblage plasmique, ainsi que certains traits pédologiques, et provoquent donc une véritable "fossilisation" de ces caractères (Frei et Cline, 1949 - Mac Caleb, 1950 - Thorp et al., 1959 - Arnold, 1963 - Bullock, 1968). D'autres zones présentent un plasma paraissant considérablement déferrisé sous l'influence des conditions réductrices du milieu. Il a pratiquement disparu par plages dans le A₂ et les "glosses".



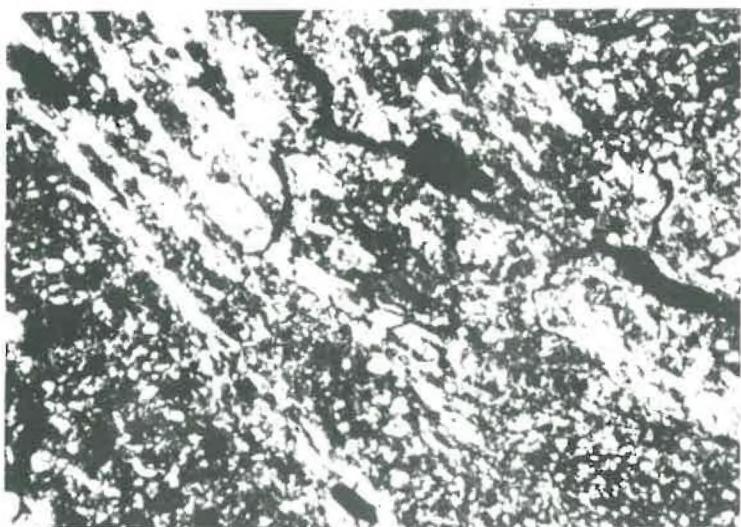
Horizon A & Bg - Sol lessivé glossique
hydromorphe - Haute-Brie - Nodule
ferrugineux (f) ayant fossilisé locale-
ment le fond matriciel à assemblage
plastique in-situ piquée, ainsi que
des argillans jaunes (a) - Dans le
coin inférieur gauche, remarquer la
tache de dégradation (d).

L. N. x 70.

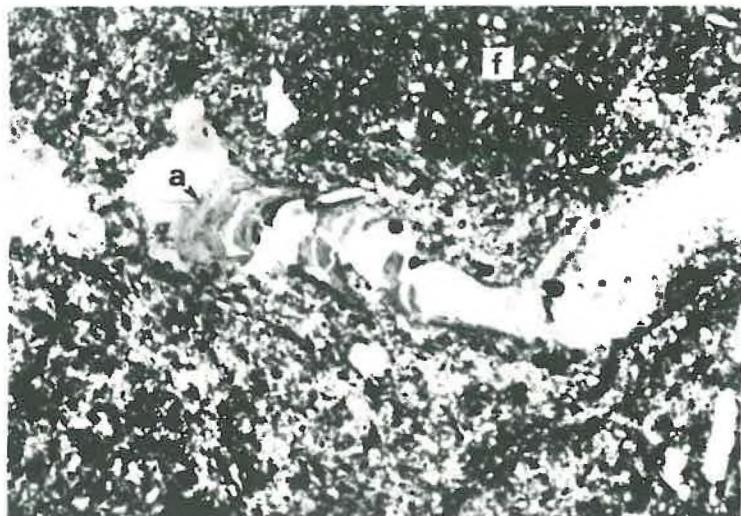


Horizon B₂ - Sol lessivé glossique
hydromorphe - Haute-Brie - Concen-
tration complexe argilo-ferrique (a)
avec limon fin interstratifié (l) - Nom-
breuses ségrégations ferriques (f) -

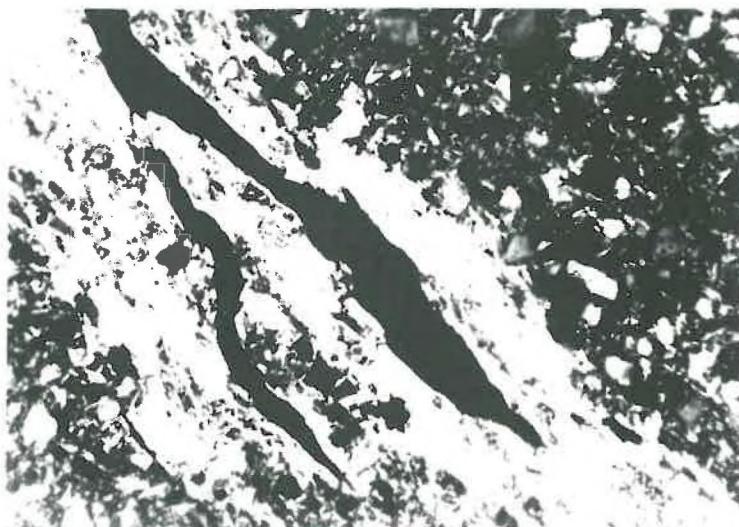
L. N. x 70.



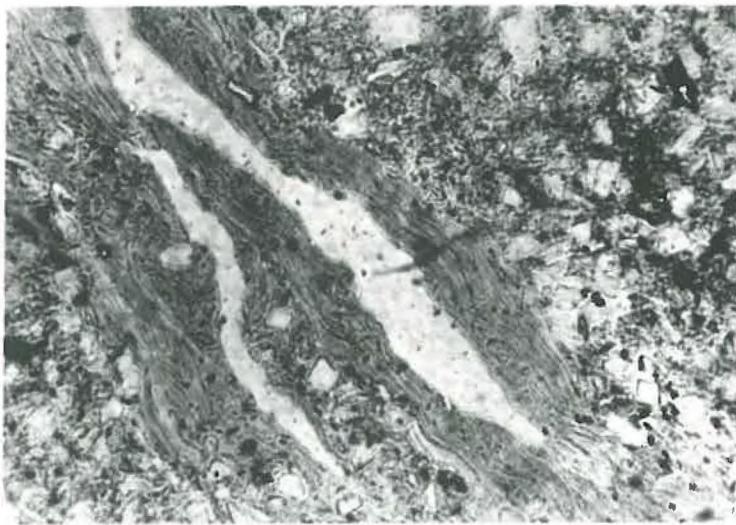
Id. - L. P. x 70.



Horizon A & Bg - Sol lessivé glossique à pseudogley - Haute-Brie - Imprégnation du fond matriciel par les oxydes de fer (f) - Dégradation des ferri-argilanes primaires (a) - L. N. x 70;



Horizon B_{tg} - Sol lessivé glossique à pseudogley - Haute-Brie. Concentrations complexes : argilanes d'illuviation hydromorphe secondaire et squeletanes associés - L. P. x 80 .



Id. - L. N. x 80 .

Les séparations plasmiques sur squelette sont peu représentées dans les horizons supérieurs, mais le sont d'une manière très générale dans le reste du profil. Des séparations allongées en bandes ou partiellement incurvées, du type masepique, apparaissent dans le fond matriciel dès la partie moyenne de l'horizon B_2t et jusqu'au B_3gx .

Les assemblages plasmiques varient donc du type squelsepique peu marqué à silasepique dans les horizons supérieurs au type in-ma-squelsepique dans les horizons B, avec vasepique associé.

Le caractère masepique paraît assez nettement développé au niveau de l'horizon fragipan, ce qui correspondrait à un maximum de contraintes mécaniques et de compaction. Très localement les types squel-masepique ou squel-bimasepique peuvent être dominants.

L'assemblage élémentaire, du type granulaire ou intertextique dans les horizons supérieurs, passe à un assemblage nettement porphyrique dans le reste du solum. La distribution relative du squelette et du plasma est localement très hétérogène.

Les vides sont très variés sur l'ensemble du profil. On observe en surface des orthocavités régulières à irrégulières, en association avec de petits vides d'entassement. De nombreux chenaux apparaissent ensuite, à parois émoussées, avec quelques chambres irrégulièrement réparties. Au niveau du B_3gx on note enfin des fentes jointives, localement déviées, qui correspondent vraisemblablement aux faces structurales importantes de la structure prismatique à sous-structure lamellaire de cet horizon compact.

Les traits pédologiques sont très nombreux. Les revêtements argileux prennent une importance considérable dans les horizons B. Certains d'entre eux, très épais, colmatent les vides dans lesquels ils se sont formés, particulièrement au niveau du B_3 .

Les cutanes deviennent, à ce stade, particulièrement complexes et présentent des aspects très différents :

- certains constituent des ferriargilanes simples, modérément orientées, avec individualisation d'oxydes de fer. On y note une perte de biréfringence assez nette par rapport aux stades d'évolution antérieurs.
- d'autres sont formés d'une alternance irrégulière de couches les unes argileuses, les autres constituées essentiellement de grains de limon fin : ferriargilanes et squeletanes composés.
- d'autres enfin présentent, interstratifiés dans les couches argileuses, de fines bandes sombres vraisemblablement constituées par des formes d'individualisation du fer ou du manganèse.

En relation avec ces cutanes des vides, s'observent également un certain nombre de cutanes argileux de diffusion.

Dans la partie inférieure de l'horizon B_2tg et au niveau du B_3gx apparaissent généralement dans ces sols des argillances jaune clair, qui correspondent aux revêtements argileux grisâtres observés sur le terrain, et souvent assez épais.

On peut les considérer comme des concentrations plasmiques dues à une illuviation secondaire, c'est-à-dire formées par des argiles déferrifiées provenant d'une altération en milieu hydromorphe. Mises en suspension dans un milieu réducteur, elles ont perdu une grande partie de leurs oxydes de fer avant de migrer (De Coninck et al., 1968).

Des fragments de ferriargilanes s'observent localement, réenglobés dans le fond matriciel vraisemblablement par l'action de contraintes mécaniques. D'autre part, dans les sols développés sur limons anciens ou de la base du cycle récent, l'action du gel a provoqué la redistribution dans la masse de nombreux fragments de concentrations plasmiques.

Dans les horizons B, les ségrégations ferriques présentent des degrés d'individualisation variables, certaines imprègnent le fond matriciel, d'autres forment des "sesquanes" sur les parois des vides.

On observe des ferrahès et manganès assez nombreux dans les vides interagrégats (Bouma et al., 1968).

Les glaébulles sont largement représentés par des nodules et des concentrations ferriques. Les limites des nodules du A₂ et du A & Bg sont en général assez nettes. Dans l'horizon de dégradation, elles fossilisent localement les caractères de l'horizon Bt du stade précédent ; les indices en sont plus progressives dans les horizons Bt et Bg. Des concrétions très typiques à organisation concentrique s'observent en de nombreux endroits.

Des striotubules ne sont pas rares au contact entre les horizons B₂tg et B₃gx, leur contenu d'argile et de limon fin correspondrait à une phase de remplissage analogue aux processus de formation des cutanes composés dont nous avons parlé ci-dessus. Ici également quelques glaébulles ferriques très fins sont réparties dans le bas du solum.

Il faut remarquer qu'un maximum de concentrations plasmiques argileuses s'observent au niveau du B₃, alors que la teneur en argile maximum est située au niveau du B₂t. Ce caractère a déjà été signalé par d'autres auteurs (Bouma et al., 1968-1969).

5.12.7. SOL LESSIVE HYDROMORPHE DU TYPE "PLANOSOLIQUE".

L'intensification simultanée des conditions réductrices et des phénomènes d'illuviation peut amener l'apparition de types de sols dont les caractères sont très proches de ceux des planosols.

On note l'atténuation progressive puis la disparition des reliques de Bt présentes dans le A₂, tandis qu'un nivelllement de la partie supérieure de l'horizon Bt apparaît, en liaison avec une discontinuité granulométrique très marquée entre A₂ et Bt.

L'horizon A₂ est blanchi, particulièrement au niveau de contact entre ces deux horizons, où un liseré très délavé apparaît, vraisemblablement dû à une circulation latérale de solutions très réductrices.

Le profil cst du type : A₁ - A₂g - (A & B)g - B₂tg - B₃gx - Cgx.

D'autre part, lorsque le sol est très hydromorphe, un niveau de concrétionnement ferrique se présente à la partie supérieure du niveau compact, et peut constituer un horizon cn.

Les caractères micromorphologiques ne diffèrent pas sensiblement de ceux décrits pour les sols glossiques, scules quelques particularités sont à noter.

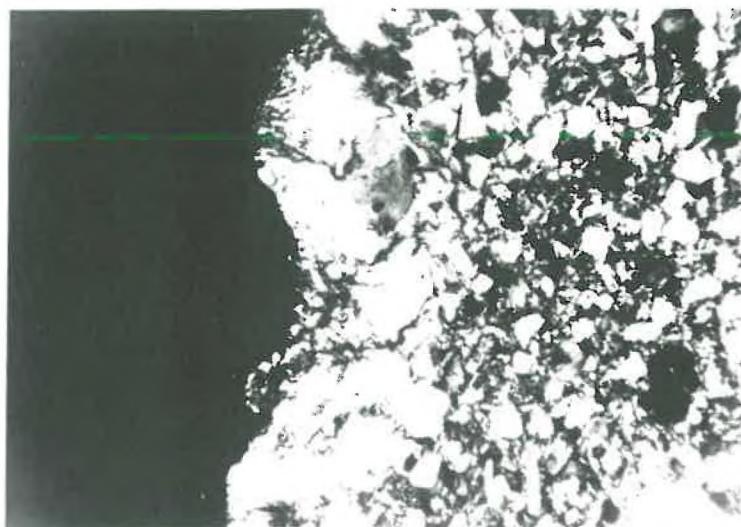
Le squelette est assez homogène dans le A₂, mais présente une hétérogénéité assez importante dans le Bt du fait de redistribution dans des concentrations plasmiques du type argilanes composés et iso- et striotubules.

Le plasma est très hétérogène dans l'horizon Bt ; argilo-ferrique, il présente de nombreux dépôts ferriques et concentrations très individualisées. Le plasma a pratiquement totalement disparu dans le liseré blanchâtre marquant la limite entre l'horizon A₂ et l'horizon B₂t.

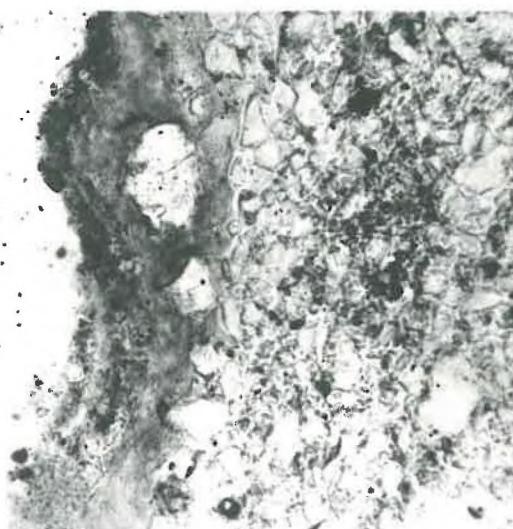
Les séparations sont nombreuses, du type squelespique, masepique et bimasepique essentiellement, l'assemblage plasmique peut être qualifié de squele-bima-masepique.

L'assemblage élémentaire du A₂ est granulaire, ainsi que celui observable dans les tubules divers, celui du Bt est typiquement porphyrique.

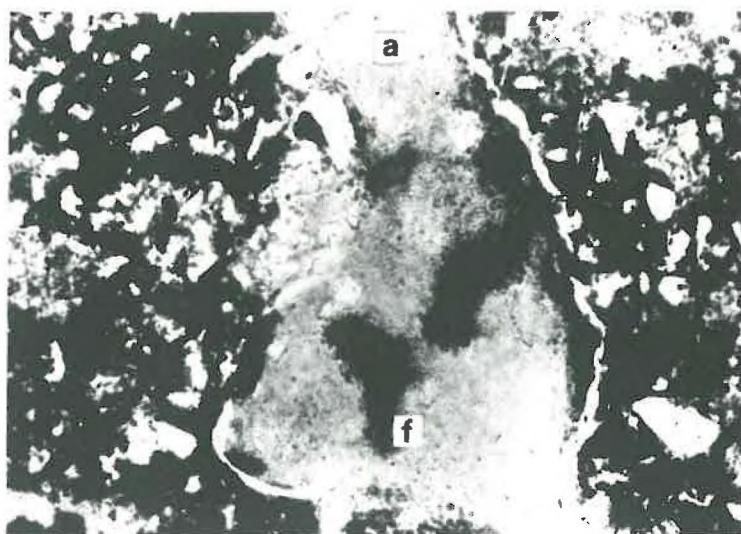
En ce qui concerne les vides, on observe par rapport au stade précédent une augmentation des fentes jointives et déviées.



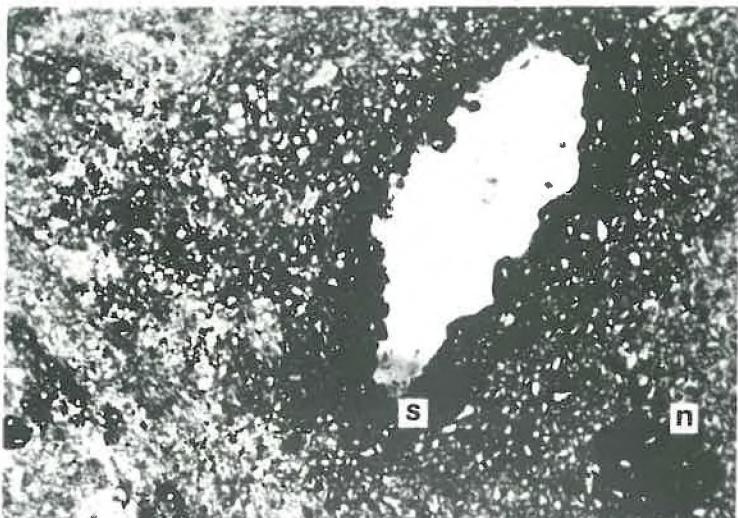
Horizon B₃ gx - Sol lessivé glossique à pseudogley - Haute-Brie. Argilane caractéristique de l'illuviation hydromorphe secondaire, jaune très clair, déferrisé et peu organisé - L. P. x 80.



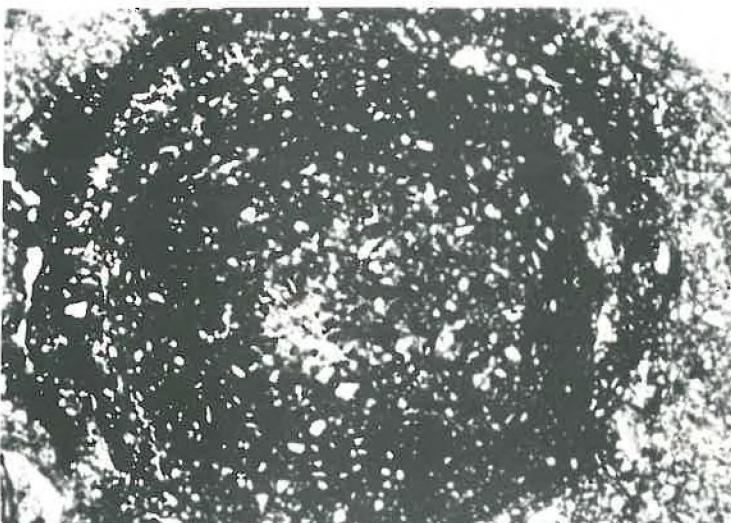
Id. - L. N. x 80.



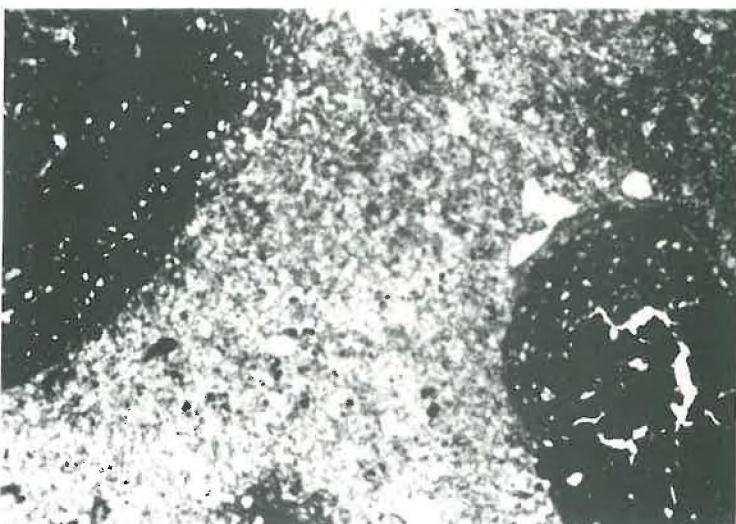
Même horizon - Amas argileux d'illuviation hydromorphe, constitué essentiellement d'argile fine (a), envahi par les oxydes de fer (f) - L. N. x 80.



Horizon B_{tg} - Sol lessivé en voie de dégradation - Ardennes - Sesquanes de vide très caractéristique (s), et petit nodule ferrique (n) - L. N. x 70.



Horizon A & B_g - Sol lessivé glossique à pseudogley - Haute - Brie - Concentration ferrique à organisation concentrique typique - L. N. x 70.



Horizon B_{cn} - Sol lessivé glossique à tendance planosolique - Tardenois - Nodules ferriques dont le plus petit résulte vraisemblablement d'un colmatage de vide - L. N. x 70.

TABLEAU DESCRIPTIF SYNTHETIQUE DES DIFFERENTS STADES D'EVOLUTION

Stades d'évolution Unités de description ↓	Matériaux initial Loess calcaire	Sol brun	Sol brun lessivé	Sol lessivé	Sol lessivé en voie de dégradation	Sol lessivé glossyque hydromorphe
<u>S. Matrix</u>						
<u>Squelette</u>	Dominé par la fraction 2-50µ, avec grains de sable grossier - quartz, feldspaths, zircon, tourmaline, épidoite, hornblende, glauconie, biotite ... Homogène + CaCO ₃ détritique.	Homogène.	Homogène.	Assez homogène.	Assez homogène, distribution particulière de limon fin.	Assez homogène; limon fin redistribué.
<u>Plasma</u>	Homogène - Argileux.	Moins homogène, plus orienté - Argileux.	Peu homogène - Argileux à argilo-ferrrique.	Assez hétérogène - Argilo-ferrrique. Bien orienté.	Assez hétérogène - Argilo-ferrrique. Imprégnations ferriques.	Très hétérogène - Argilo-ferrrique. Hétérofringance plus faible. Nombreux dépôts d'oxydes de fer. Imprégnations "fossiliisant" traits pédologiques.
<u>Séparations plasmiques</u>	Quelques séparations sur squelette, ou indépendantes dans la masse.	En taches isolées et sur squelette.	Typiquement sur squelette et en taches isolées.	NOMBREUSES sur squelette et en taches dans la masse. Bien orientées.	Sur squelette, isolées et en bandes.	Sur squelette, en bandes, isolées, subcutanées.
<u>Assemblages plasmiques</u>		Squel-insepique.	in-squelsepique.	in-squelsepique.	in-ma-squelsepique.	in-ma-squelsepique, localement squel-masepique.
<u>Structure de base</u> <u>Assemblage élémentaire</u>	SK > Pl > V Intertextique.	SK > Pl > V Intertextique.	SK > Pl > V Intertextique à aggloméré. Porphyrique localement.	SK > Pl > V Aggloméré à porphyrique Assemblage plus dense.	SK > Pl > V Porphyrique - Dense dans B ₃ '	SK > Pl > V Porphyrique en B, granulaire à intertextique en A ₂ .
<u>Vides</u>	Vides d'entassement, cavités ortho, vésicules.	Cavités et chenaux à parois émoussées.	Cavités et chenaux plus nombreux.	Cavités et chenaux plus étroits en B.	Cavités et chenaux assez nombreux.	Vides d'entassement et cavités ortho en A ₂ , cavités, chenaux, chambres en B, "Fentes jointives" en B ₃ '. Faible porosité en B ₃ .
<u>Traits pédologiques</u>						
<u>Orthic. Séparations (voir plasma)</u>						
<u>Concentrations Cutanées</u>	Calcitanes de diffusion.	Quelques argilanes dans mésopores.	Ferri-argilanes jaunes à jaune-rougeâtre fortement orientées.	Ferri-argilanes jaunes et rouge-jaune assez fortement orientées - Cutanées de diffusion - Cutanées fragmentées.	Ferri-argilanes nombreux, certaines très ferriques, modérément orientées - Simples ou composés - Squelettes et manganes - Fragments de cutanées.	Ferri-argilanes simples ou composés, faiblement biréfringents - Squelettes - Manganes - Sesquaines - Cutanées de diffusion - Argilanes jaune clair secondaires. Fragments de ferri-argilanes
<u>Glebules</u>			Quelques isotubules.	Nodules ferriques en B ₂ t/B ₃ . Quelques isotubules.	Nodules ferriques, énodulés et halos glebulaires. Isotubules et strictotubules.	Nodules et concrétions en A ₂ - Ségrégations en B. Strictotubules assez nombreux. Quelques papules.
<u>Divers</u> <u>Hérités - Pédoreliques</u>				Quelques cristallites.	Quelques cristallites.	Cristallites. Quelques fragments de concentrations redistribuées.

Les traits pédologiques dominants sont très analogues à ceux observés dans les sols glossiques. Au demeurant, on note cependant une augmentation assez importante des ferriargilanes de diffusion et des fragments de concentrations diverses intégrées dans le fond matriciel.

Les glaebules du type concrétions sont très nombreux, à organisation concentrique typique. Les tubules, iso- et striotubules sont nombreux.

La différence avec le stade du sol glossique consiste donc essentiellement en une certaine uniformisation au sein du A₂, une augmentation de la compacité du Bt avec intensification des caractères d'hydromorphic.

5.12.8. DISCUSSION ET CONCLUSIONS.

L'étude en lames minces des sols développés sur matériaux limoneux, et particulièrement sur loess nous a permis de compléter très utilement les observations de terrain et les données analytiques.

En fonction du degré d'évolution de plus en plus important des sols, on peut constater essentiellement :

- l'apparition d'une hétérogénéité progressive du squelette et du plasma
- le développement des séparations plasmiques. Il apparaît tout d'abord des séparations autour des grains du squelette et sous forme d'îlots isolés dans la masse du plasma ; elles s'individualisent progressivement tandis que leur nombre augmente. Des séparations plus importantes se dissocient ensuite, allongées en bandes plus ou moins parallèles, ou aux abords des vides,
- la modification des assemblages au niveau des horizons B, lié à une compacité de plus en plus marquée du sous-sol. On passe du type intertextique au type aggloméré, puis enfin à un assemblage porphyrique. Ce phénomène semble en relation étroite avec l'augmentation progressive de la densité apparente qu'on y enregistre en fonction de l'évolution. Dès que le stade porphyrique est atteint, des alternances de dessication et réhumectation provoqueraient des contraintes mécaniques qui se traduiraient par l'apparition d'assemblages plasmiques du type masepique.
- le développement progressif des concentrations plasmiques. Les revêtements argileux sont d'abord minces et se déposent en premier lieu sur les parois des vides. Ils envahissent ensuite la surface des agrégats structuraux. Ils s'épaissent progressivement, colmatant petit à petit les vides. À un stade de dégradation avancé on observe une fragmentation et une perte de birefringence des concentrations plasmiques du type ferriargilanes dans la partie supérieure du Bt, ainsi que l'apparition de revêtements d'illuviation secondaire hydromorphe, assez épais, et de couleur claire dans la partie inférieure du Bt ainsi que dans le B₂. Ces cutanes, sous l'effet d'une action mécanique ou faunique, peuvent être localement fragmentés et intégrés au fond matriciel.

- l'apparition des caractères d'hydromorphie en relation avec l'évolution des oxydes de fer. Cet élément migre et se dépose isolément dès qu'une réduction temporaire intervient ; il se forme d'abord des ségrégations à faible teneur en oxydes qui diffusent dans le fond matriciel et le consolident. Des halos glaébulaires sont progressivement placés à des nodules et des concrétions plus nettes. Des revêtements ferrugineux sur les parois des vides n'apparaissent que dans les sols les plus évolués. Des ségrégations diffuses fossilisent localement le fond matriciel qu'elles ont imprégné.

Des sesquianes, ferranes et manganes, sont très caractéristiques des parois des vides interagrégats. On observe d'autre part, dans les stades les plus évolués, un maximum de concentrations plasmiques au niveau des horizons B₃.

Selon les notions de *Kubiena* (1948 - 1953 - 1956), il semble que nous aurions affaire à des matériaux du type "Braunerde", avec présence de "Braunlehm-Teilplasma", et de "Braunlehm" sous forme de concentrations "cutanées". Les limons anciens et les paléosols se caractériseraient par l'abondance de "Braunlehm-Teilplasma" en partie relique, comme étant lié à des conditions de formation nettement différentes de celles régnant actuellement dans la région étudiée.

Sur la base des observations micromorphologiques effectuées, et des données morphologiques, géomorphologiques et analytiques, certaines hypothèses peuvent être avancées sur la genèse des sols limoneux.

Les sols bruns lessivés à revêtements simples de couleur jaune auraient évolué essentiellement postérieurement à la période atlantique, alors que les revêtements plus rougeâtres, avec localisation individualisation ou décomplexation des oxydes de fer seraient caractéristiques d'une pédogenèse datant de cette époque.

Les revêtements très complexes à dépôts de limon fin, liés à une dégradation plus ou moins importante de la partie supérieure du sol, seraient, lorsqu'ils sont présents sur toute la profondeur des horizons B, caractéristiques de sols anciens, datant de la base du cycle récent.

Dans les sols limoneux, dominés par une fraction squelettique importante, les caractéristiques micromorphologiques : distribution du plasma, séparations et concentrations plasmiques, différenciation des principaux traits pédologiques, sont essentielles dans l'étude des processus d'évolution.

La différenciation et la dynamique propre des divers horizons pédogénétiques peut donc être mise en évidence.

Les données micromorphologiques reflètent fort bien l'influence des processus fondamentaux de la pédogenèse aux différents stades d'évolution :

- phase primaire d'altération et de réorganisation du plasma,
- phase d'éluviation/illuviation avec apparition de concentrations plasmiques importantes,
- phases secondaires de dégradation, d'illuviation et d'hydromorphie.

Nous voyons donc que les données de la micromorphologie prennent une importance certaine dans la définition des différents types de sols développés sur matériaux loessiques.

5.13. EVOLUTION DE LA GRANULOMÉTRIE.

Dans ce chapitre de synthèse nous allons interpréter l'ensemble des observations que nous avons été amenés à faire sur l'évolution des différentes fractions granulométriques en fonction des stades d'évolution.

Partant de l'altération du loess original, nous envisagerons ensuite le comportement de différents types de profil. Pour ce faire, des moyennes ont été calculées pour les horizons caractéristiques d'un ensemble de profils du type sol brun lessivé, sol lessivé et sol grossier, qui représentent les principaux stades observés. Un certain nombre de détails seront mis en évidence par l'analyse de sols représentatifs.

Enfin, seront intégrées les données résultant de l'analyse d'échantillons particuliers provenant de zones appauvries ou enrichies en argile.

Nous avons vu que d'une manière générale les matériaux que nous avons étudiés sont assez homogènes quant aux fractions supérieures à 50 microns. Généralement pauvres en sable, certains limons sont cependant un peu plus sableux et paraissent évoluer plus rapidement.

En ce qui concerne les fractions limoneuses, nous avons pu constater que le rapport limon grossier / limon fin varie avec l'âge de la mise en place des sédiments. D'une manière générale il est supérieur à 2 dans les limons récents qui portent des sols modérément évolués, il est inférieur à 2 dans les limons anciens. Ces derniers, quand ils sont en place, portent des sols très fortement évolués, tandis que lorsqu'ils ont été affectés par des phénomènes de redistribution ils sont caractérisés par une pédogenèse moins avancée.

5.13.1. Les premiers processus intervenant dans l'altération des matériaux loessiques paraissent correspondre essentiellement d'une part à une libération d'argile fine au niveau du front de décarbonatation, d'autre part à une microdivision d'éléments provenant de la fraction limoneuse 10-20 μ , enfin, peut-être de néoformations discrètes.

L'ensemble devrait justifier de l'augmentation de la teneur en argile observée entre les niveaux de loess et les horizons d'altération.

5.13.2. Nous allons examiner les résultats obtenus par le calcul des moyennes des teneurs en argile pour les horizons A₂, B_{2t} et C des trois principaux stades. Les chiffres ont été obtenus à partir d'une douzaine de profils pour chaque type d'évolution.

Le tableau ci-dessous donne les résultats des teneurs en argile totale et en argile fine (0-0,2 μ), ainsi que les indices d' entraînement calculés, c'est-à-dire le rapport des horizons B_{2t} aux horizons A₂.

	Sol brun lessivé (SBL)	Sol lessivé (SL)	Sol lessivé glossyque (SLG)
	0-2 µ : 0-0,2 µ	0-2 µ : 0-0,2 µ	0-2 µ : 0-0,2 µ
A ₂	18.9 : 9.6	15.6 : 5.3	13.0 : 5.6
B _{2t}	29.0 : 16.7	29.3 : 14.8	29.1 : 16.9
C	20.2 : 11.2	24.4 : 9.8	23.8 : 11.0
I ^{ce}	1.53 : 1.74	1.88 : 2.79	2.24 : 3.02

Un schéma illustre la répartition dans les différents horizons (fig. 97).

Plusieurs points importants peuvent immédiatement être mis en évidence.

- On constate que les teneurs en argile totale des horizons B_{2t} sont pratiquement égales dans les trois cas : 29/30 %. Nous serions donc tentés de penser que, compte tenu de la composition granulométrique globale, cette valeur constitue une sorte de seuil difficile à dépasser par des phénomènes d'illuviation et que, sauf cas particulier, un enrichissement supplémentaire ne peut plus intervenir. Au-delà de ce stade l'enrichissement se traduirait par un approfondissement de l'horizon illuvial.
- L'augmentation des indices d'entraînement de l'argile totale, respectivement 1,5 - 1,9 - 2,2, est donc essentiellement due à l'appauvrissement progressif de l'horizon A₂ qui perd plus de 3 % entre les deux premiers stades et plus de 2,5 entre les deux derniers.
- La variation la plus marquée pour les teneurs en argile fine est enregistrée dans l'horizon A₂, entre les stades sol brun lessivé et sol lessivé. Cette variation est bien mise en évidence par la comparaison des indices : 1,7 - 2,8 - 3,0. Cette donnée pourrait constituer un des caractères les plus typiques dans les processus d'illuviation.

RÉPARTITION DES TENEURS EN ARGILE

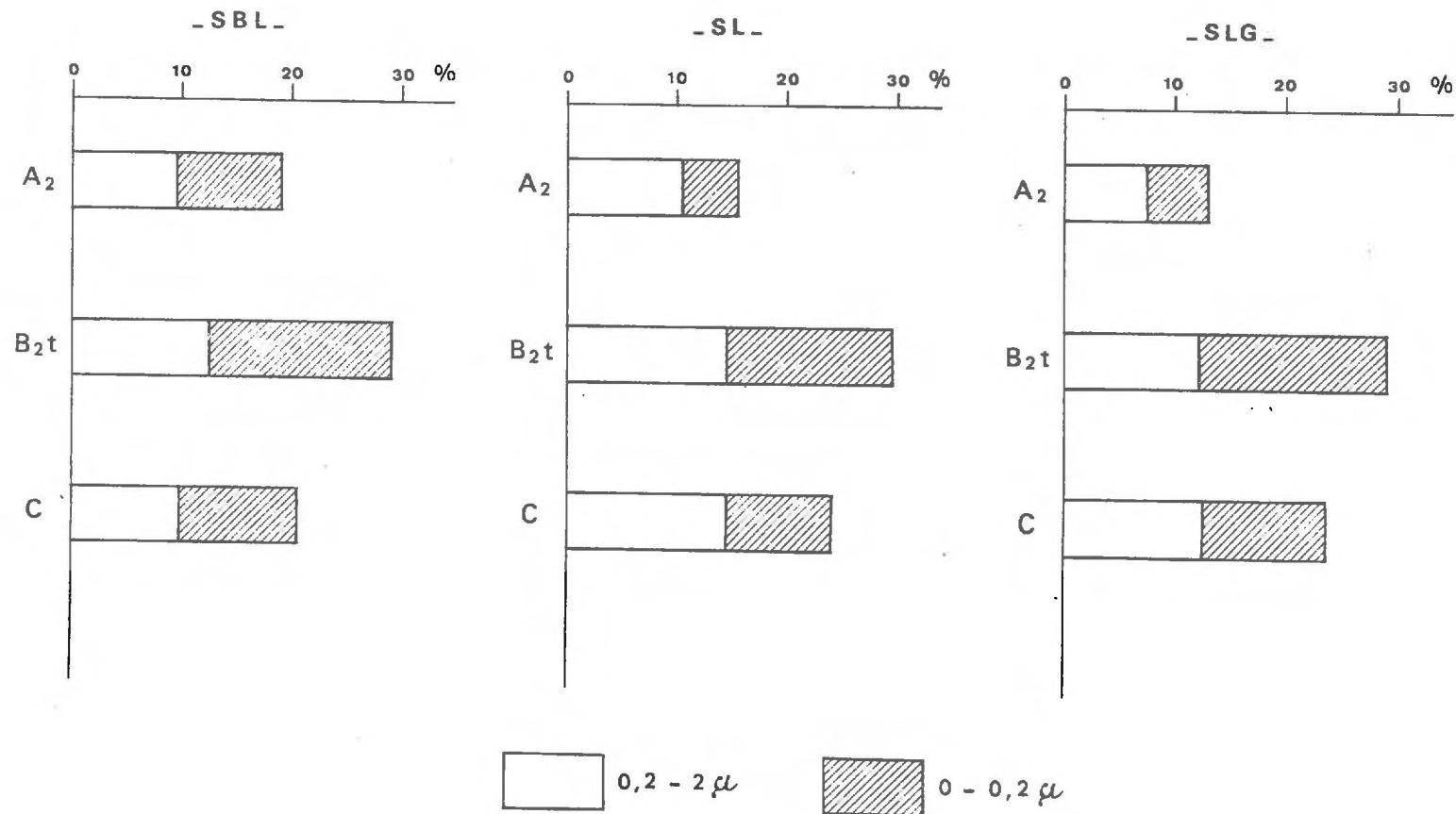


Fig. 97

- Dans le sol brun lessivé, on observe des teneurs en argile fine relativement importantes par rapport à l'argile grossière, avec, au demeurant, une légère migration de cette dernière.
Dans les deux autres degrés d'évolution on constate une certaine uniformisation des teneurs en argile grossière dans le bas du solum, avec enrichissement en argile fine plus important dans le sol glossique.
- La diminution de la teneur en argile fine dans l'horizon A₂, entre les stades sol brun lessivé et sol lessivé, pourrait correspondre à un seuil limite à partir duquel l'argile grossière commence à se déplacer également de manière assez importante.

5.13.3. Dans le but d'obtenir plus de précision sur les variations des teneurs en argile dans les solums, nous avons choisi quelques profils caractéristiques dont les répartitions en fonction de la profondeur sont indiquées sur la figure suivante (fig. 98).

Les profils Essigny 3 et Soyécourt représentent les sols bruns lessivés (SBL). On y constate une variation peu importante de la répartition de l'argile grossière, avec cependant un maximum relatif au niveau du B_{21t}; l'argile fine présente une distribution assez typique avec maximum au niveau du B_{22t}. Au demeurant, la teneur la plus élevée s'observe dans les deux cas au niveau B_{21t}, par le jeu du cumul des deux répartitions.

Il faut de plus noter d'une part un solum plus profond pour Essigny, d'autre part une diminution plus marquée de l'argile fine au niveau du A₂ dans le profil de Soyécourt.

Remarquons que le profil CR47, étudié en détail dans la partie précédente, présente des caractéristiques tout à fait semblables aux deux profils présentés.

Les sols lessivés (SL) sont représentés par les profils Laon 1 et Vervins 10.

Sur le schéma de Laon 1 on constate une distribution plus marquée de l'argile grossière, avec un maximum toujours localisé au niveau de la partie supérieure de l'horizon Et; l'argile fine se répartit par contre ici plus profondément, sur toute l'épaisseur des horizons B. La teneur la plus élevée en argile totale s'observe toujours à la partie supérieure du Bt.

Les courbes du profil Vervins 10 nous montrent pour l'argile grossière une répartition de l'accumulation plus profonde, jusqu'au niveau de l'horizon B/C. La répartition de l'argile fine est encore plus caractéristique : minimum marqué dans le A₂, accumulation profondément répartie ensuite. Le maximum de teneur en argile se localise dans le B_{22t}.

Le profil Montmirail 15 caractérise un sol lessivé glossique (SLG) très typique sur le plan répartition granulométrique.

L'argile grossière montre un maximum au niveau de l'horizon de dégradation Bg & A. Le "profil" de l'argile fine est particulièrement typique : diminution nette en Ap et A₂, répartition en profondeur ensuite.

Il faut noter ici que l'augmentation de la fraction grossière dans l'horizon Bg & A est vraisemblablement liée à la teneur importante de cette fraction dans les plages dégradées.

La distribution des argiles dans le profil Chateau 22 met enfin en évidence la tendance planosolique de certains sols fortement évolués à hydromorphie (SLGP).

Les deux fractions argileuses montrent une accumulation marquée dès le niveau de l'horizon A_g & B_g , très mince dans ce cas-ci. La répartition de l'argile fine présente d'autre part un maximum dans l'horizon B_{22t} ; il s'agit d'un véritable colmatage de l'horizon B_t d'accumulation.

5.13.4. Tout au cours de notre étude nous avons exposé des résultats concernant l'analyse d'échantillons particuliers, spécialement sélectionnés. Nous allons tenter une synthèse relative à leurs caractéristiques granulométriques. Rappelons que ces prélèvements concernent tout particulièrement d'une part des revêtements argileux, d'autre part des plages de dégradation.

Au chapitre 4.4. nous avons tout d'abord mis en évidence une différence fondamentale entre les revêtements argileux des sols modérément évolués dont l'illuviation s'est effectuée en milieu aéré, et ceux liés à des conditions d'hydromorphie.

La teneur en argile des premiers varie entre 40 et 65 %, avec une quantité d'argile fine très importante, environ 70 %; celle des seconds n'est que légèrement supérieure à 30 %, avec des quantités d'argile fine et d'argile grossière pratiquement équivalentes. Il faut donc noter dans ces derniers une teneur en fractions limoneuses assez considérable.

- Un examen des variations du rapport limon grossier / limon fin a été effectué, particulièrement dans les sols glossiques. Une analogie assez évidente a été observée pour ce rapport granulométrique entre les horizons A_2 et les plages dégradées des niveaux correspondants. D'autre part, aucune tendance particulière n'a été relevée par comparaison entre les revêtements argileux et l'intérieur des agrégats correspondants.

L'analyse du rapport argile fine / argile grossière est plus intéressante à envisager.

Entre les horizons A_2 et le reste du solum on constate, comme nous l'avons déjà mentionné, une diminution marquée de l'argile fine en surface dès le stade du sol lessivé. Dans les sols dégradés cette diminution apparaît encore plus manifeste dans les zones dégradées.

- La comparaison des valeurs AF/AG des produits d'illuviation et des "matrices" correspondantes est très évocatrice, nous pouvons la schématiser de la façon suivante :

SBL	Rev.	>>	Matrice
SL	R	>	M.
SLG	R	< à <<	M.

Ceci met en évidence la variation progressive de la constitution des revêtements en fonction de l'évolution, et ce particulièrement en liaison avec les phénomènes de dégradation.

Les idées émises au paragraphe 4.46. concernant la répartition de l'argile sont confirmées par quelques moyennes calculées sur les profils les plus évolués parmi les sols glossiques, les chiffres suivants ayant été obtenus par le rapport AF/AG.

$\underline{A_2}$:	0.58	Degr. : 0.42
$\underline{B_{2t}}$:	1.48	Rev. : 1.02
$\underline{B_{3ex}}$:	1.50		

**DISTRIBUTION DES ARGILES
DANS QUELQUES PROFILS CARACTÉRISTIQUES**

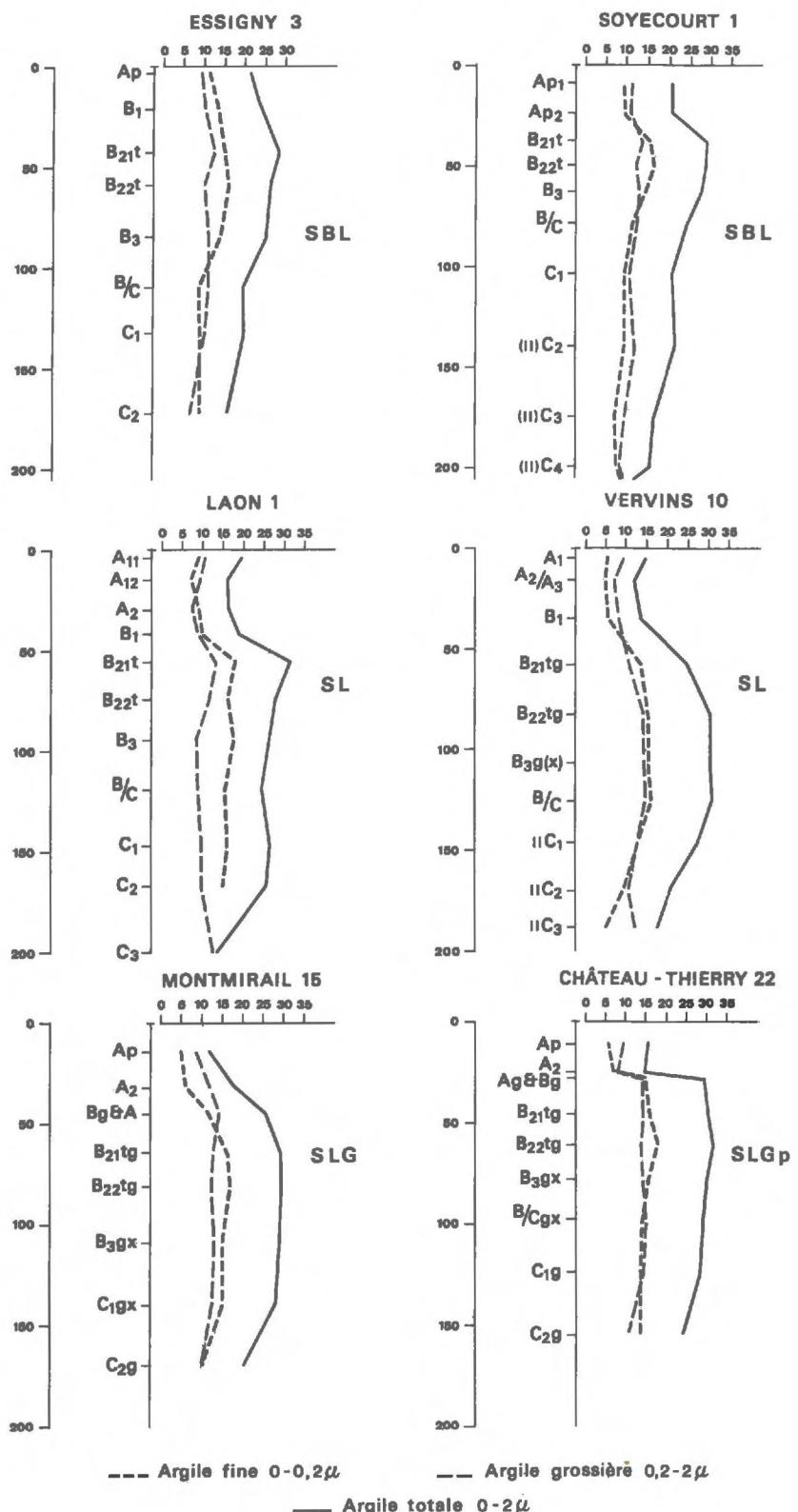


Fig. 98

D'où enrichissement de l'ensemble de la matrice des horizons B_{2t} et B₃ en argile fine.

5.13.5. En conclusion, nous allons reprendre successivement les différents processus intervenant dans la différenciation granulométrique des principaux stades d'évolution.

- altération des matériaux limoneux lessigues -

Augmentation de la teneur en argile des horizons d'altération due à une libération d'argile fine au niveau du front de décarbonatation, intervention probable de mécanismes de microdivision, essentiellement à partir de la fraction limoneuse 10-20 µ, et vraisemblablement, à un degré moindre, d'argilogenèse par altération.

- stade du sol brun, et début du processus d'illuviation -

Probabilité d'une argilification légèrement plus importante au niveau de l'horizon (B). Déplacements localisés d'argile fine dans des pores de diamètre moyen, ainsi que sur les faces des agrégats de l'horizon structural.

- stade du sol brun lessivé -

Migration d'argile fine de manière assez nette jusqu'en B_{2t}, d'argile grossière légèrement en B_{21t}; le maximum d'enrichissement apparaissant à la partie supérieure de l'horizon Bt. On pourrait en déduire une sélection progressive, l'argile fine migrant plus bas que la fraction grossière. Les revêtements prélevés, les plus évidents sur le plan morphologique, contiennent une grande quantité d'argile avec dominance très nette d'argile fine.

L'horizon Bt s'épaissit et sa teneur en argile atteint progressivement 30 %, l'indice d'entraînement calculé étant voisin de 1,5/1,6.

- stade du sol lessivé -

L'argile fine se déplace de plus en plus profondément, se répartissant dans l'ensemble des horizons B, aux dépens de l'horizon A₂; l'argile grossière se déplace plus nettement que dans le cas précédent avec en un premier temps un maximum dans la partie supérieure de l'horizon Bt. Cette dernière fraction paraît ensuite atteindre également les horizons plus profonds, provoquant le déplacement du maximum d'argile totale en B_{2t}. Ce maximum se maintient aux environs de 30 %; valeur qui, d'après d'autres travaux, constituerait une limite pour l'enrichissement d'un matériau de la composition granulométrique que nous étudions (Monnier et Fies, 1972).

Les revêtements argileux ont une composition légèrement différente de ceux du stade précédent, à savoir une teneur en argile un peu moins importante comportant moins d'argile fine.

- stade du sol lessivé grossigue -

L'horizon A₂ s'appauvrit encore en argile fine et argile grossière, en s'épaissant aux dépens de la partie supérieure de l'horizon Bt. L'analogie entre les rapports des fractions limoneuses des matériaux provenant du A₂ et des plages dégradées en est une confirmation; ces dernières apparaissent d'autre part comme les plus appauvries en argile fine. Les deux types d'argile se répartissent profondément dans un horizon Bt épais, un maximum d'argile grossière se localisant cependant dans le niveau d'altération A & B.

L'analyse des revêtements des agrégats structuraux des sols typiques de ce stade confirme ces déplacements : teneur moyenne en argile et quantités d'argile fine et grossière pratiquement équivalentes.

- stade du sol à "tendance planosolique" -

Ce type est marqué par l'amincissement de l'horizon de dégradation A & B qui provoque une variation texturale abrupte entre A_2 et Bt. Une augmentation de la teneur en argile fine au niveau B₂₂t serait typique de l'enrichissement dans la masse que nous venons d'évoquer dans le cas du sol glossique.

Les résultats que nous avons obtenus complètent ceux publiés antérieurement par Cline (1949) quant à l'approfondissement de l'horizon argillique sans augmentation de la teneur en argile, par Sullock (1968), Ranney et Beatty (1969) en ce qui concerne les zones de dégradation des sols glossiques, par Vanderford et Shaffer (1966) sur l'importance des teneurs en argile fine dans les niveaux compacts. Ils précisent notamment dans le détail le comportement des fractions argileuses au cours d'une évolution progressive des phénomènes de lessivage, ce qui n'avait pas été fait jusqu'à présent.

5.14. MATIERE ORGANIQUE

La matière organique est certainement un facteur d'évolution très important. Cependant, l'influence d'une mise en culture plus ou moins ancienne se marque sur la grande majorité des sols étudiés, et une analyse détaillée de la composition de la matière organique ne nous a pas paru de nature à nous apporter un grand nombre d'éléments d'interprétation, compte tenu de ce fait.

Nous nous bornerons donc à analyser les résultats assez globaux concernant les teneurs et le rapport C/N.

Au demeurant, en ce qui concerne la profondeur d'infiltation de la matière organique au travers de la séquence théorique d'évolution, on observe une diminution manifeste de l'épaisseur de l'horizon A_1 , ainsi qu'un humus de plus en plus brut, des stades peu évolués aux stades fortement dégradés hydromorphes.

5.14.1. La majorité des horizons de culture des sols bruns lessivés contiennent de 1,8 à 2,6 % de matière organique à C/N compris entre 9 et 10. Rappelons que la partie supérieure de certains horizons Bt a été fortement enrichie en matière organique par des actions anthropiques anciennes et intense activité biologique, il s'agit d'horizon "argilliques" du type "agrique" selon la nomenclature américaine.

Sous prairie permanente les teneurs des horizons A_{11} sont naturellement plus élevées : 5,0 à 5,7, avec des rapports C/N de 10 à 11.

Sous forêt nous avons enregistré en surface des valeurs comprises entre 4,4 et 5,3 % de matière organique, les rapports C/N pouvant monter aux environs de 12/13.

Les horizons Ap des sols lessivés sont moins riches que les précédents : 1,8 à 2,0 %, à C/N toujours proche de 9/10. Sous prairie : teneurs d'environ 5 %, et C/N de 13.

Sous végétation naturelle les teneurs en A₁₁ sont assez variables, allant de 5/6 à 8/10 % selon la composition de la flore ; le rapport C/N, pratiquement toujours supérieur à 12, peut atteindre 15 localement.

Les sols lessivés glossiques sous culture présentent des teneurs voisines de 1,8/2,0 % dans les horizons supérieurs, le rapport C/N étant toujours proche de 10.

Sous forêt, tout comme pour les sols lessivés, les teneurs sont variables : 5,5 à 9,0 %, et rapport C/N compris entre 12 et 17.

Les humus les plus bruts, à C/N les plus élevés, jusqu'à 19, s'observent en Ardennes. Une étude des liaisons entre la matière organique, l'aluminium et le fer serait certainement intéressante à réaliser sur ces types de sols.

On constate donc que pour les sols cultivés une uniformisation due à l'action de l'homme est intervenue dans les horizons de surface. Nous verrons cependant qu'à teneur en matière organique égale, les sols plus ou moins évolués présentent une sensibilité différente au phénomène d'érosion du type battance, du fait essentiellement de la variation dans la composition granulométrique.

Au demeurant, le type de matière organique, grossièrement caractérisé par son rapport C/N paraît plus directement lié à la nature de la couverture végétale qu'au stade d'évolution du sol.

Nous avons mis en relation, dans des graphiques que nous présentons en annexe, le rapport C/N avec d'une part le pH, d'autre part la saturation du complexe.

Peu d'interprétations sont possibles, seules quelques constatations peuvent être faites :

- les échantillons à rapport C/N supérieur à 12,5 ont toujours un pH inférieur à 4,5 et un taux de saturation inférieur à 30 %,
- les échantillons à rapport C/N inférieur à 12 ont toujours un pH supérieur à 4,9 et un taux de saturation supérieur à 70 %.

Nous avons également pu constater que les niveaux superficiels à rapport C/N supérieur à 13 contiennent une quantité importante d'aluminium, sous forme libre et sous forme échangeable sur le complexe absorbant.

5.14.2. Indépendamment des quelques observations que nous venons de faire, relativement peu d'éléments semblent pouvoir être obtenus par l'étude de la matière organique sur les sols que nous avons été amenés à étudier, compte tenu de l'objectif de notre travail. Il est cependant probable qu'une étude approfondie des constituants organiques des différents types d'humus que nous avons rencontrés sous végétation forestière serait à même de nous fournir des données intéressantes. Nous n'avons malheureusement pas eu la possibilité matérielle de la réaliser.

5.15. LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET HYDRODYNAMIQUES.

L'évolution des sols limoneux qui fait l'objet de notre étude dépend notamment de deux processus fondamentaux : illuviation et hydromorphie.

De ce fait, les possibilités de déplacements mécaniques, sous forme colloïdale ou soluble, des éléments dans le solum, dépendent étroitement des caractéristiques hydriques, de la porosité, de la stabilité de la structure, et d'une manière plus générale, de la perméabilité. Les interférences de ces propriétés sur les processus physico-chimiques sont importantes et il nous a paru indispensable de les traiter également.

Il faut noter de plus que pour des matériaux à teneur en fractions limoneuses aussi importante que ceux qui nous occupent, la stabilité des horizons de surface intervient pour une part très importante dans les phénomènes d'érosion, et, par voie de conséquence, dans la répartition des différents types de sols dans le paysage.

Ce dernier facteur est également très important à considérer en ce qui concerne les techniques culturales, une grande différence existant entre les valeurs enregistrées sous végétation naturelle et sous culture.

Nous envisagerons successivement des chiffres obtenus par calcul de moyennes sur un certain nombre de profils, ensuite la part prise par les caractéristiques physiques dans les processus d'évolution, enfin l'origine des phénomènes d'hydromorphie affectant les sols les plus évolués.

5.15.1. Les chiffres obtenus sont présentés dans les tableaux ci-dessous, concernant successivement la densité apparente, la porosité totale et la stabilité structurale, tandis que nous fournirons quelques données générales sur la réserve en eau et la perméabilité des sols hydromorphes. En ce qui concerne les caractéristiques physiques, nous avons jugé opportun d'introduire les valeurs enregistrées au niveau de l'horizon B_3 , compte tenu du rôle qu'il joue en tant que zone de transition entre le solum proprement dit et les horizons C.

Quand le comportement des sols ardennais le justifiait, ils ont été introduits séparément dans l'analyse et les commentaires (S. L. A.).

Densité apparente.

	S _{SL}	SL	S _{LG}	S _{LA}
A ₂	1.52	1.38	1.40	1.38
B _{2t}	1.57	1.66	1.62	1.55
B ₃	1.58	1.69	1.79	1.65
C	1.53	1.68	1.75	1.67

L'examen de ce tableau amène un certain nombre de commentaires.

La variation entre les différents horizons du SBL est très faible, on notera simplement une augmentation en profondeur. Les chiffres correspondant au SL montrent une diminution en surface et une tendance en profondeur analogue à celle du stade précédent, renforcée cependant ; un maximum très peu marqué se manifeste au niveau de l'horizon B_3 .

Dans le SLG la variation est plus nette encore, et les horizons se différencient d'autant mieux : le B_2t dégradé est un peu moins dense tandis que l'horizon B_3 , très compact, présente une densité apparente moyenne de près de 1,8.

Le SLA apparaît d'une manière générale comme peu dense en A_2 et B_2t , les niveaux profonds présentant des caractères très analogues à ceux du stade SL.

L'évolution la plus importante entre les trois stades typiques de la séquence s'observe donc au niveau du B_3 dont la densité apparente croît pratiquement de 1,6 à 1,8, cet horizon devenant de plus en plus compact.

Cette évolution est confirmée par l'examen du tableau suivant donnant la variation de la porosité totale.

Porosité totale.

	SBL	SL	SLG	SLA
A_2	42	46	44	45
	;	;	;	;
B_2t	40	37	38	41
	;	;	;	;
B_3	39	33	29	35
	;	;	;	;
C	39	34	31	33
	;	;	;	;

Les caractères mis en évidence pour la densité apparente apparaissent très nettement ici : valeurs très analogues pour les horizons A_2 des différents types, diminution de la porosité du B_2t au stade SL, diminution spectaculaire du niveau du B_3 entre les stades SBL - SL et SLG : de 40 à 30 %. La variation dans l'horizon C est semblable mais moins importante cependant.

La variation de ces caractères indique une perméabilité de plus en plus faible au niveau situé sous l'horizon Bt. La compacité de cette couche augmente donc et on observe des conditions d'engorgement de plus en plus marquées au contact des horizons Bt et B_3 . Ceci apparaît donc comme l'origine d'une hydromorphie secondaire du sol, liée à l'intensité de l'évolution, débutant au stade du sol lessivé pour s'intensifier fortement dans les sols lessivés glossiques et à tendance planosolique.

Caractéristiques hydrodynamiques.

La détermination des teneurs en eau pondérales aux points caractéristiques de pF 2,5 : capacité de rétention et pF 4,2 : point de flétrissement, a été effectuée sur un nombre très important d'échantillons. Nous avons pu en déduire une teneur théorique moyenne en eau utile.

Nous avons constaté que la variation était relativement peu importante entre les différents horizons des principaux types de sols. La raison en est vraisemblablement la nature elle-même des sédiments que nous avons étudiés, où la teneur en éléments inférieurs à 20 microns est toujours très élevée.

La majorité des valeurs obtenues pour l'eau utile est comprise entre 16 et 20 %, elle est le plus souvent de l'ordre de 17/18 %.

Certaines variations se présentent cependant :

- teneurs moyennes assez nettement inférieures pour les limons relativement sableux du Scissonnais, où elles peuvent descendre à 14, voire 12 %.
- des valeurs assez faibles s'observent également au niveau des horizons compacts du type fragipan : B₃gx et Cgx des sols lessivés glossiques.
- les plus élevées sont enregistrées pour les niveaux supérieurs des sols ardennais, très riches en matière organique, où elles peuvent être supérieures à 20 %.

Ces résultats confirment donc la très grande réserve en eau des sols de limons, pratiquement la plus importante parmi les formations du nord de la France.

Stabilité de la structure.

Nous avons repris dans les deux tableaux ci-dessous un ensemble de valeurs caractérisant la stabilité structurale des sols limoneux.

Le premier regroupe les moyennes obtenues pour les indices de stabilité : Log. 10 Is et de percolation : Log. 10 K, des différents horizons caractéristiques, pour des sols situés sous végétation naturelle.

Le second donne les valeurs obtenues pour les stades SBL, SL et SLG situés sous culture, et ce pour les deux horizons de surface, les données des horizons profonds ne diffèrent pratiquement pas de celles fournies par le premier tableau.

Remarquons que les valeurs données pour le test de percolation sont celles correspondantes à la première heure, suffisantes pour notre interprétation.

	SBL		SL		SLG		SLA	
	Is	: K						
A ₂	1.00	: 1.55	1.16	: 1.28	1.30	: 1.13	0.98	: 1.20
B ₂ t	1.75	: 1.11	1.84	: 1.15	1.65	: 1.03	1.65	: 0.85
B ₃	1.90	: 1.10	2.08	: 0.62	2.25	: 0.42	2.15	: 0.60
C	2.15	: 1.05	2.04	: 0.80	2.16	: 0.58	2.10	: 0.65

	SBL	SL	SLG
	Is : K	Is : K	Is : K
Ap/A ₂	1.80 : 1.24	1.70 : 1.20	2.00 : 1.07
B _{2t}	1.84 : 1.12	1.90 : 1.00	1.67 : 0.93

De manière à rendre l'interprétation plus commode, ces différentes valeurs ont été portées en graphique dans la figure suivante (fig. 99 - V.N. = Végétation naturelle - C. = Cultures).

L'examen des valeurs présentées dans le premier tableau nous amène aux constatations suivantes.

Au stade SBL on observe une instabilité de plus en plus grande en profondeur, avec un maximum en C, niveau du matériau originel. La percolation est de moins en moins bonne de haut en bas du profil.

La variation pour le SL est analogue, mais plus accentuée. Au demeurant, on observe une valeur d'instabilité légèrement plus élevée au niveau du B₃, tant pour le test Is que pour le test K.

Le stade SLG présente des données très caractéristiques mettant en évidence la perte de stabilité importante au niveau de l'horizon compact : Log Is de 2,25, Log 10 K de 0,42.

Le SLA montre un comportement très semblable au SLG, mais moins accentué.

L'analyse entre les différents stades est également très intéressante.

On note en effet pour les horizons supérieurs une perte sensible de stabilité et de possibilité de percolation du stade SBL au stade SLG, tandis que le SLA est particulièrement stable du fait des teneurs importantes en matière organique des horizons supérieurs de ces sols typiquement forestiers.

L'horizon Bt le plus instable est celui du SL, tandis que celui du SLG possède une stabilité un peu plus importante, peut-être du fait de certaines indurations ou cimentations par les oxydes de fer.

La variation des valeurs correspondant aux horizons B₃ est importante, et dénote la perte de stabilité de plus en plus importante de ce niveau en fonction de l'évolution. Notons que le stade SLG présente la transition la plus marquée entre horizons B_{2t} et B₃, Log 10 Is : 1,65/2,25, Log 10 K : 1,03/0,42.

Les valeurs des horizons C montrent une tendance analogues, bien que moins marquée, à celle de l'horizon sus-jacent. Remarquons cependant la stabilité très faible du C du stade SBL qui représente celle d'un matériau classique très peu évolué.

Nous constatons donc à nouveau ici l'importance prise par l'horizon B₃ et plus généralement par la zone de transition B_{2t}/B_{3x} dans le comportement physique des sols limoneux. Ce niveau constitue progressivement une barrière instable, compacte, s'opposant à la percolation de drainage, et créant à sa partie supérieure une zone d'engorgement qui devient une vraie nappe perchée dans les sols les plus évolués.

Nous avons vu que ces propriétés sont très importantes à prendre en considération pour les problèmes de mise en valeur, et tout particulièrement pour l'assainissement (Henin - Gras - Monnier, 1969).

L'examen du second tableau nous montre l'influence de la mise en culture sur la stabilité de structure des sols limoneux.

La comparaison avec les données du premier tableau nous permet tout d'abord de constater, d'une manière générale, une perte de stabilité et de possibilité de percolation assez nette.

La différence entre les valeurs obtenues respectivement pour les horizons A₂ sous végétation naturelle et sous culture est notamment importante pour les différents stades. Celle enregistrée pour les horizons Bt est moins importante, mais nette cependant. On notera une variation de stabilité entre horizons A₂ et B₂ moins grande sous culture que sous végétation naturelle.

La mise en culture provoque donc essentiellement une perte de stabilité des niveaux directement soumis à l'action anthropique.

Entre les différents stades, les variations mises en évidence par l'analyse du premier tableau sont confirmées. L'horizon supérieur est notamment de plus en plus instable du stade SBL au stade SLG.

Les valeurs caractéristiques de cet horizon expliquent la grande sensibilité des sols lessivés limoneux aux phénomènes de battance et d'érosion. Remarquons également qu'il s'agit de matériau où le rapport limon/argile est très élevé, ce qui constitue un facteur très favorable à l'action de ce type de processus.

Il ne nous a pas été possible de reprendre ici l'ensemble des données correspondant à l'action des différents prétraitements mais nous pouvons dire que, d'une manière générale, les tests de stabilité indiquent une sensibilité de l'ensemble du solum aux prétraitements air et benzène, caractéristiques des terres assez mal cimentées, riches en fractions limoneuses, et relativement pauvres en matière organique.

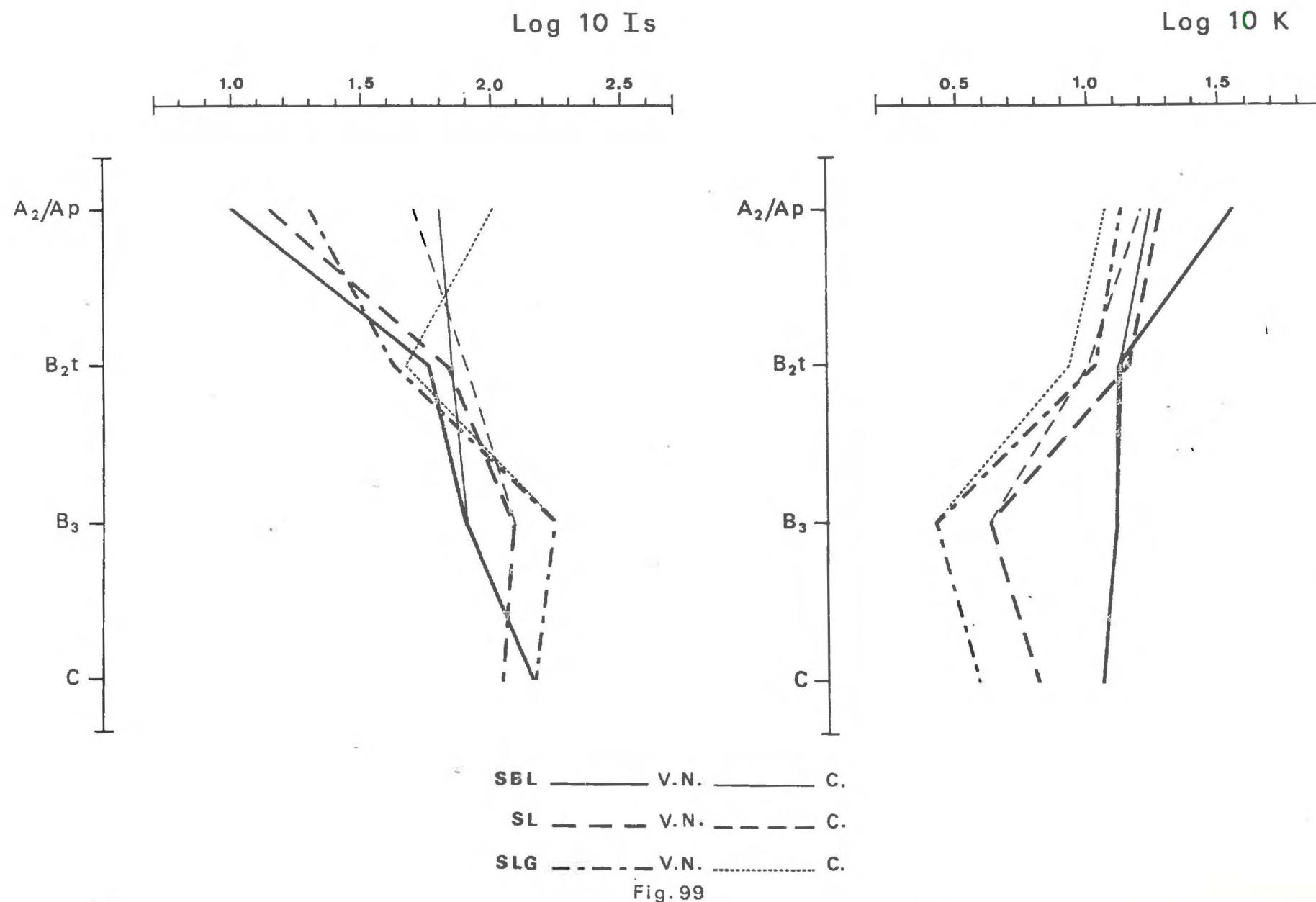
Enfin, nous citerons pour mémoire quelques résultats de coefficients de conductivité hydraulique obtenus par la méthode "Thiem" reprise par la section d'hydraulique du C. E. R. A. F. E. R..

Les déterminations ont été effectuées sur des sols lessivés glos-siques hydromorphes où une nappe aquifère temporaire remonte pratiquement en surface lors des périodes très humides. Les résultats confirment la différence très importante de perméabilité entre les parties supérieures et inférieures du solum, le coefficient passe de 1,5 m/jour dans les horizons A à moins de 0,5 m/jour dans les horizons les plus compacts.

5.15.2. En conclusion, nous pouvons dire que la part prise par la variation des caractéristiques physiques dans l'évolution des sols limoneux est loin d'être négligeable.

Leur étude a notamment permis de mettre en évidence l'importance que prend progressivement le niveau de transition situé sous l'horizon Bt dans le comportement hydrique des sols et l'évolution générale du solum. On y observe en effet une augmentation de la densité apparente, et de la compacité, une diminution de la porosité, de la stabilité structurale et de la perméabilité.

STABILITÉ STRUCTURALE



Nous en déduisons que ce niveau est à l'origine tout d'abord d'engorgements, ensuite de l'apparition d'une nappe aquifère à caractère temporaire créant un milieu réducteur favorable aux phénomènes de dégradation. L'hydromorphie des sols lessivés les plus développés apparaît donc comme typiquement secondaire par rapport à l'évolution générale du sol.

*

*

*

5.2. EVOLUTION GEOCHIMIQUE ET MINERALOGIQUE

Trois aspects fondamentaux seront envisagés dans ce chapitre.

La désaturation et l'acidification progressives seront tout d'abord traitées par l'étude de la variation du complexe absorbant et du pH (5.21.).

Ceci nous permettra ensuite d'aborder le comportement géochimique du fer (5.22.) et de l'aluminium (5.23.).

L'évolution minéralogique pourra enfin être développée grâce aux éléments fournis par la variation de la capacité d'échange cationique (5.24.) et les données cristallochimiques (5.25.).

Cette présentation dynamique, complétant les données regroupées au chapitre précédent, nous amènera à la synthèse globale du dernier chapitre.

5.21. EVOLUTION DU COMPLEXE ABSORBANT - pH.

Nous avons vu qu'une partie très importante des sols limoneux étudiés sont actuellement intensément mis en culture. De ce fait la saturation du complexe est généralement très importante et les pH élevés.

Certains sols ont d'autre part visiblement été anciennement cultivés puis postérieurement abandonnés à la friche ou replantés en essences forestières. D'autres enfin paraissent avoir été de tout temps laissés à la forêt.

Il nous a fallu tenir compte de ces différents cas pour interpréter les données concernant l'acidité et la saturation.

Nous allons, dans ce chapitre, regrouper l'ensemble des résultats obtenus en ce qui concerne la garniture cationique du complexe absorbant dans les différents types de sols étudiés, tant sous culture qu'en conditions de milieu plus naturelles.

Partant de l'altération du process original, nous verrons d'une part l'évolution générale au travers de la succession des types de développement, d'autre part les variations observées entre les horizons caractéristiques de chaque type de sol.

Comme dans les chapitres qui précédent, nous présenterons tout d'abord des garnitures cationiques moyennes, ainsi que les variations du pH.

Ensuite, étant donné l'importance prise par le comportement de l'aluminium dans les sols fortement évolués, nous examinerons la répartition de la forme échangeable de cet élément dans un certain nombre de profils caractéristiques.

L'état du complexe absorbant d'échantillons particuliers sera alors analysé.

Nous tenterons enfin de préciser l'évolution générale de la garniture du complexe absorbant dans la séquence d'évolution générale des matériaux limoneux.

Les teneurs en éléments échangeables seront toujours exprimées en pour cent de la capacité d'échange totale de la terre fine : valeur T.

5.21.1. Nous avons vu au chapitre 3.5. qu'au cours de l'altération primaire des matériaux loessiques peu de variations étaient enregistrées dans la répartition des teneurs en bases échangeables, hormis une augmentation du Ca dans les niveaux les plus altérés, tous ces horizons étant saturés et à pH élevé.

Nous avons calculé une garniture cationique moyenne pour trois niveaux caractéristiques de la "lehmification" : B/C : horizon lehmifié, C₁ : loess décarbonaté, C₂ : loess calcaire.

Les résultats sont présentés ci-dessous :

	Ca	Mg	K	Na
B/C	88.8	7.6	2.0	1.6
C ₁	83.9	12.1	2.2	1.8
C ₂	82.9	12.2	2.3	2.6

Quelques tendances peuvent être déduites de l'examen de ce tableau. La décarbonatation et l'altération paraissent liées à une augmentation progressive du Ca sur le complexe, tandis qu'on observe une diminution des autres cations, particulièrement nette pour le magnésium.

Ceci complète et précise donc nos conclusions de la troisième partie.

5.21.2. Afin de cerner le mieux possible l'évolution du complexe absorbant nous avons dissocié plusieurs facteurs d'influence : - le degré d'évolution - la nature des dépôts dans une certaine mesure - l'occupation actuelle du sol.

Le tableau suivant présente donc les garnitures cationiques moyennes en pourcent de la capacité d'échange, avec indication de la somme des bases échangeables Ca, Mg, K et Na : Σ_1 , qui correspond donc au taux de saturation, ainsi que la teneur en Al échangeable lorsqu'il est présent. La somme Σ_2 correspond à $\Sigma_1 + \text{Al}$.

Les pH H₂O moyens sont indiqués, et nous commencerons par en préciser quelque peu les valeurs.

G A R N I T U R E C A T I O N I Q U E E N % D E T

Occupation ↓	-Horizons → caractéristiques-	A ₂										B ₂ ^t										C									
		Ca	Mg	K	Na	Σ ₁₋	Al	Σ ₂₋	pH	Ca	Mg	K	Na	Σ ₁₋	Al	Σ ₂₋	pH	Ca	Mg	K	Na	Σ ₁₋	Al	Σ ₂₋	pH						
SOI S/VEGETATION "NATURELLE"	SBL - -	92,0	4,2	2,3	1,5	100,0	-	-	6,4	84,5	11,1	3,0	1,4	100,0	-	-	7,0	81,2	15,7	2,1	1,0	100,0	-	-	6,5						
	SL - -	26,1	14,1	3,3	0,5	44,0	35,0	79,0	4,9	57,2	20,9	2,3	0,9	81,3	19,7	101,0	5,2	66,4	20,2	2,1	1,1	89,8	11,0	100,8	5,2						
	SLG - -	20,3	14,6	2,8	0,9	38,6	41,5	80,1	4,6	42,6	20,3	1,9	1,1	65,9	35,5	101,4	5,1	57,9	24,5	1,5	2,4	86,3	10,7	97,0	5,2						
	SLA - ARDENNES	8,0	3,0	6,6	0,4	23,0	51,5	74,5	4,6	15,3	15,7	2,8	0,7	34,5	56,0	90,5	4,9	33,5	22,8	2,1	0,8	59,2	33,6	92,8	5,1						
	SL (G)- ARDENNES	9,4	7,3	2,6	0,4	19,8	57,1	76,9	4,3	21,9	19,2	2,0	0,6	43,8	63,0	106,8	4,7	50,0	24,1	2,5	1,0	77,6	19,5	97,1	5,1						
CULTIVES	SBL - PICARDIE	88,2	6,8	4,0	1,0	100,0	-	-	7,9	89,1	7,1	2,3	1,5	100,0	-	-	7,9	88,9	8,0	2,0	1,1	100,0	-	-	7,7						
	SBL - THIERACHE	86,2	9,7	3,3	0,8	100,0	-	-	6,3	90,6	6,8	1,7	0,9	100,0	-	-	7,2	86,5	11,0	1,6	0,9	100,0	-	-	7,2						
	SBL - SOISSONNAIS	81,5	13,1	4,3	1,1	100,0	-	-	7,9	82,3	14,7	2,1	0,9	100,0	-	-	7,6	81,0	14,2	2,5	2,0	100,0	-	-	7,8						
	SL - -	90,8	5,5	2,8	0,9	100,0	-	-	6,3	92,0	4,9	2,2	0,9	100,0	-	-	6,9	86,2	10,7	1,8	1,3	100,0	-	-	6,5						
	SLG - -	84,9	10,4	2,8	1,4	99,5	0,5	100,0	7,0	82,0	13,9	2,1	1,1	99,5	0,5	100,0	7,0	72,8	22,7	1,8	1,4	98,7	1,3	100,0	6,1						

GARNITURE CATIONIQUE EN % DE T.

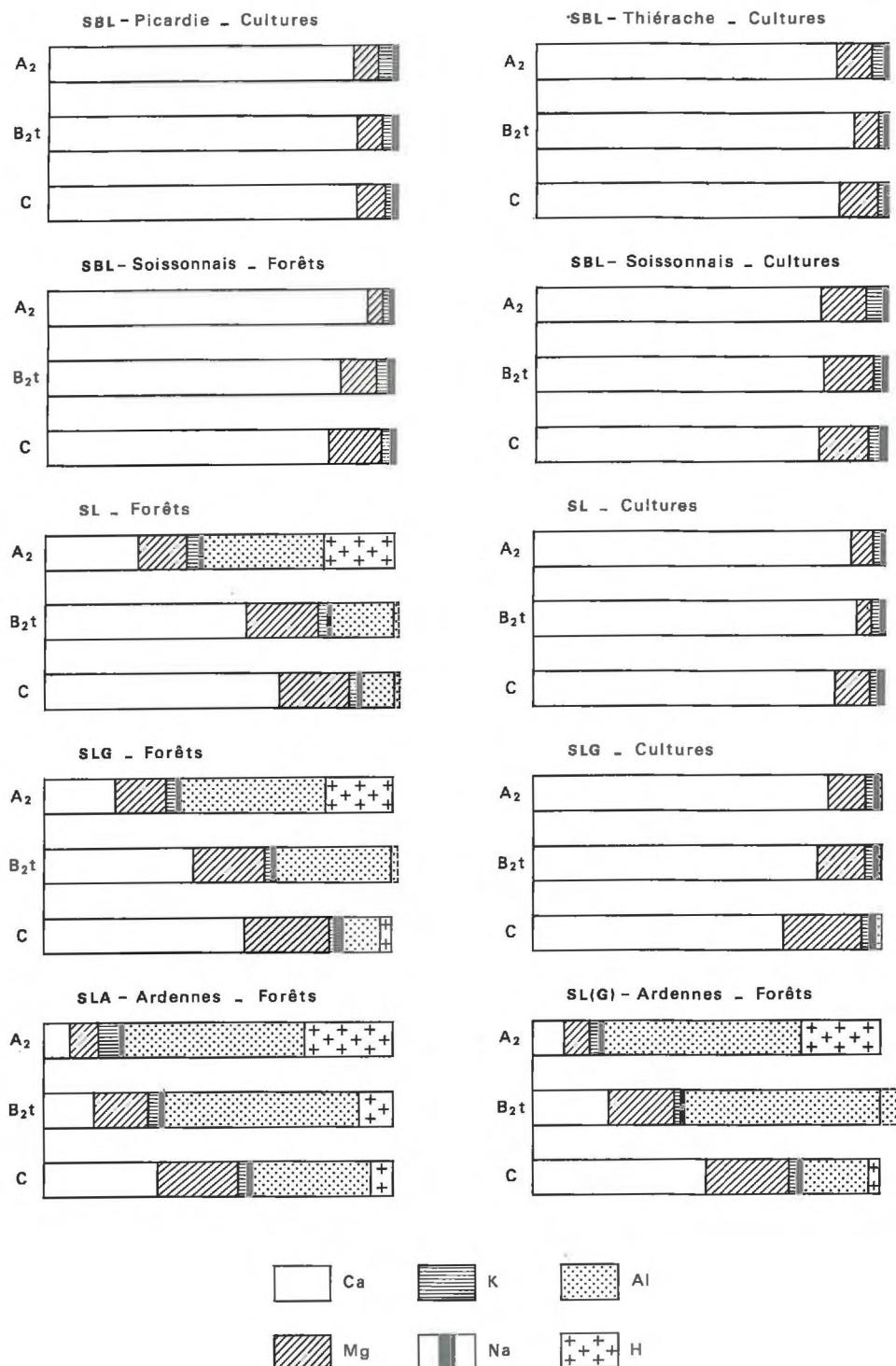


Fig. 100

- Les sols bruns lessivés actuellement sous culture possèdent sur l'ensemble des horizons des pH généralement compris entre 7,5 et 8,0 ; lorsqu'ils sont situés sous prairie permanente leur pH descend et est compris entre 6,4 et 7,2 dans l'horizon humifère, les valeurs ne variant pratiquement pas en profondeur.

Sous forêt ils sont légèrement plus acides dans les horizons profonds : pH compris entre 6,3 et 7,0.

- Les sols lessivés sont, sous végétation naturelle, assez nettement désaturés et présentent des pH variant de 4,5 à 5,2 dans les horizons supérieurs à des valeurs comprises entre 5 et 6 en profondeur. En zones cultivées les pH sont généralement compris entre 6 et 7 sur toute l'épaisseur du sol.

Au fur et à mesure de l'évolution une désaturation et acidification plus marquées se manifestent dans le sol.

- Ainsi les sols lessivés glossigues dégradés montrent des valeurs de pH assez proches de celles des sols lessivés en surface, mais légèrement plus faibles dans le B₂t, tandis qu'en profondeur les valeurs sont identiques. La mise en culture provoque naturellement une augmentation de la saturation, essentiellement dans la partie supérieure du solum, les pH des autres horizons restant inférieurs à ceux des niveaux correspondants des sols lessivés.

- Les sols développés dans les limons de couverture de la plate-forme ardennaise, et situés sous d'anciennes forêts, sont les plus acides que nous ayons rencontrés, le pH y varie relativement peu ; il est compris entre 4 et 5 sur toute la profondeur des horizons pédogénétiques.

Les données du tableau sont reprises dans la figure suivante, qui représente sous forme schématique la variation de la garniture cationique, ce qui permet d'en faire une analyse plus commode (fig. 100).

- En ce qui concerne tout d'abord les sols sous "végétation naturelle".

Le SBL, saturé sur toute la profondeur du sol montre du haut en bas une diminution de Ca au profit de Mg, K et Na restant pratiquement stationnaires.

Le SL possède un complexe partiellement désaturé et offre des caractères très différents. Le Ca et le Mg augmentent en profondeur, particulièrement le premier, tandis que K diminue et que Na augmente légèrement. En ce qui concerne Al, il complète pratiquement la garniture dans le B₂t et le C tandis qu'en A₂ une quantité assez importante d'hydrogène échangeable est présente.

Le stade SLG montre beaucoup d'analogies avec SL, avec cependant quelques variantes :

- désaturation plus prononcée, aux dépens essentiellement de Ca - rapport Ca/Mg voisin de 1 dans le A₂ - diminution un peu importante de K en profondeur - réapparition de H échangeable dans l'horizon C.

Les sols très acides sur limons ardennais ont fait l'objet d'une analyse séparée, justifiée par leur situation particulière et l'ancienneté de la couverture forestière. Sur la base de l'importance des phénomènes

d'illuviation et des caractères de dégradation nous avons dissocié des sols lessivés acides (SLA), et des sols lessivés à tendance glossoïque (SL(G)). Les deux types sont très fortement désaturés et présentent des quantités importantes d'Al sur le complexe.

L'évolution dans les profils est voisine de celle observée pour SLG : augmentation de Ca et Mg en profondeur, diminution de K, légère augmentation de Na. Il faut cependant noter un rapport Ca/Mg pratiquement constant en A₂ et B_{2t}, et voisin de 1.

- Les sols sous culture fournissent bien naturellement des données très différentes.

Compte tenu de l'influence possible de la composition des matériaux originels par région naturelle, des moyennes ont été établies pour trois types de SBL : Picardie - Thiérache - Soissonnais.

Le dernier se distingue des deux autres par une plus grande richesse en Mg et une augmentation assez sensible de Na en profondeur. On peut déceler d'une manière générale une diminution de K de haut en bas du profil.

Le SL montre une teneur en Mg assez importante en surface, par rapport au B_{2t}.

La garniture cationique du complexe des horizons du SLG varie de A₂ à C : diminution de Ca, augmentation de Mg, apparition en B_{2t} et C de traces d'Al certainement des vestiges de l'évolution sous végétation naturelle.

D'une manière générale la mise en culture provoque essentiellement une augmentation très nette de la saturation en Ca des trois horizons caractéristiques, tout particulièrement A₂ et B_{2t}. On constate naturellement une augmentation très importante du rapport Ca/Mg au niveau de ces horizons tandis que K et Na paraissent relativement peu affectés par l'influence anthropique.

5.21.3. Pour six profils représentatifs des sols désaturés nous présentons la répartition de l'aluminium échangeable sous deux formes : d'une part en % de la valeur T, d'autre part en milliéquivalents pour 100 g de terre fine. Sont donc représentés le stade SL : Vervins 10, le stade SLG (cultures) : Montmirail 15, le stade SLG (forêt) : Montmirail 31 et 32, un sol polycyclique dégradé : La Fère 6 et un sol lessivé acide ardennais : Hirson 55 (fig. 101).

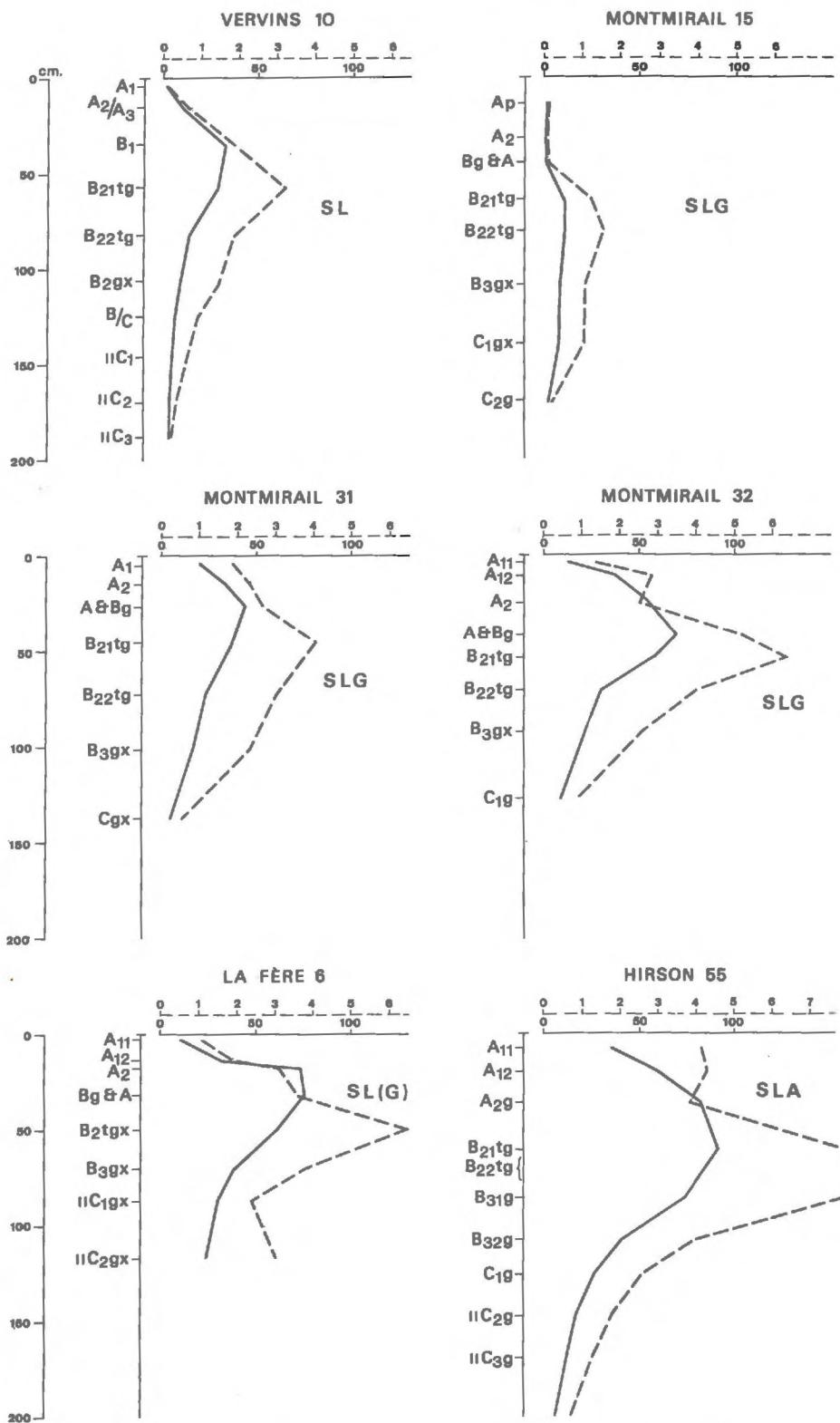
La comparaison de ces différentes courbes montre immédiatement la localisation précise du maximum d'aluminium échangeable sur le complexe. Nous l'observons en effet pour SL au niveau de l'horizon B₁, pour le SLG dans l'horizon d'altération A & B de façon très caractéristique, pour le SLA à la partie supérieure du Bt.

C'est-à-dire d'une manière générale dans les horizons en voie d'altération.

A titre de comparaison, il faut noter que la teneur en méq. la plus élevée s'observe bien naturellement au niveau où la valeur T est la plus importante, c'est-à-dire au niveau du taux d'argile, au sein de l'horizon Bt.

Entre les stades SL et SLG on constate une répartition plus profonde de Al échangeable. Le profil SLG sous culture indique la présence de traces de Al jusqu'au niveau du B_{2t} où la distribution constatée dans les autres profils se retrouve, avec un léger décalage.

ALUMINIUM ÉCHANGEABLE



— Al. échangeable - % T. - - - Al. échangeable - mEq. 100g. terre

Fig. 101

SOL LESSIVE GLOSSIQUE

	Ca	Mg	K	Na	Σ_1	Al	Σ_2
A ₂	20.3	14.6	2.8	0.9	38.6	41.5	80.1
D	35.0	22.1	2.6	1.5	61.2	42.3	103.5
B _{2t}	42.6	20.3	1.9	1.1	65.9	35.5	101.4
R	61.0	26.1	2.0	2.6	91.7	10.8	102.5

GARNITURE CATIONIQUE EN % DE T.

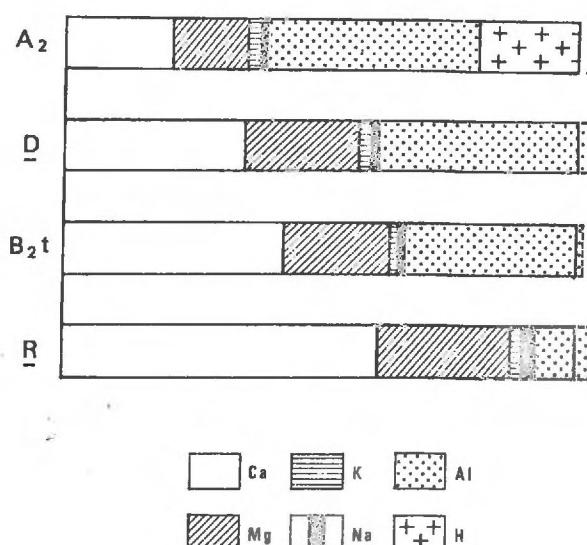


Fig. 102

Le sol très acide des Ardennes confirme l'importance prise par Al sur le complexe absorbant.

5.21.4. Il nous a semblé intéressant de pouvoir comparer la garniture cationique des échantillons particuliers : zone de dégradation (D) et produite d'illuviation hydromorphe (R) dans les sols glossiques fortement évolués. Les quelques analyses que nous avons à notre disposition sont très homogènes et nous en avons fait les moyennes pour D et pour R.

Nous les présentons ci-après sous forme d'un tableau et d'un schéma (fig. 102) dans lesquels nous avons inclus les données des horizons A₂ et B_{2t} du sol lessivé glossique provenant du tableau général que nous avons commenté plus haut.

On constate donc que les plages dégradées ont une garniture cationique en transition entre le A₂ et la B_{2t}. On observe, par rapport au A₂ une augmentation en Ca et Mg, les valeurs de K et Na étant peu différentes.

Les échantillons ont été prélevés essentiellement au niveau des horizons A & B, et les caractères mis en évidence pour cet horizon sont confirmés : teneur maximum en Al échangeable et disparition de l'hydrogène présent dans le A₂.

Les revêtements diffèrent de l'horizon B_{2t} par une saturation plus importante : Ca, Mg et Na mieux représentés. Nous pouvons supposer que l'action des eaux de percolation le long des faces d'agrégats où se localisent les revêtements pourrait en être au moins partiellement responsable.

5.21.5. La variation de la garniture cationique des horizons du sol varie donc de manière assez importante entre les différents stades d'évolution définis.

Au cours de l'altération du matériau loessique et des premiers stades de différenciation des profils peu de modifications sont observées, seule une augmentation du Ca et une diminution du Mg sur le complexe peuvent être notées dans les niveaux altérés.

Au stade du sol brun lessivé, à complexe toujours saturé, l'évolution apparaît inverse et le Ca diminue en profondeur en faveur de Mg.

Une désaturation progressive du complexe intervient dès le stade du sol lessivé, et s'intensifie dans les sols glossiques ; elle atteint un maximum dans les sols ardennais très acides.

En fonction de la profondeur on constate dans tous ces sols :

- une augmentation en Ca et Mg,
- une diminution en K,
- une légère augmentation en Na.

L'Al apparaît sur le complexe dès que l'acidité est suffisante, et présente un maximum dans une zone localisée à la partie supérieure de l'horizon Bt, et de façon préférentielle dans les niveaux de dégradation A & B pour les sols glossiques.

En ce qui concerne les proportions relatives de l'aluminium et de l'hydrogène échangeable en fonction du pH et de la nature des horizons : hémorganiques ou minéraux, nos résultats paraissent en bonne conformité avec ceux d'autres auteurs, Lefèvre-Drouet (1963-1966), Schertrmann (1966).

De ces quelques données on peut déduire un lessivage préférentiel de Ca en conditions acides, également de Mg, ainsi que peut-être une augmentation de K issue de l'altération minéralogique dans la partie supérieure des profils.

Nous noterons également dans les niveaux les plus acides : A₂ du stade SLG, A₂ et B_{2t} des sols ardennais, un rapport Ca/Mg voisin de 1 qui pourrait constituer un équilibre dans des conditions de milieu de ce type.

Enfin, nous remarquons pour l'ensemble des sols situés sous culture une augmentation très importante en Ca de l'ensemble des horizons constitutifs, K et Na paraissant relativement indifférents aux actions anthropiques de resaturation.

5.21.6. Nous avons été amené à comparer les valeurs du pH à celles du taux de saturation du complexe absorbant.

Certaines difficultés vraisemblablement propres en partie au protocole analytiques pour la détermination du Ca échangeable perturbent de manière importante les possibilités d'interprétation pour les prélèvements dont le pH est supérieur à 6.

Pour illustrer le comportement des deux types de valeurs, nous avons porté en graphique d'une part l'ensemble des échantillons des profils présentés dans ce travail dont le pH H₂O est inférieur à 6, d'autre part les moyennes issues du tableau récapitulatif du complexe absorbant, et répondant au même critère. Ces documents sont présentés en annexe.

Le premier graphique montre une dispersion des points obtenus qui s'alignent cependant dans une direction privilégiée. Signalons simplement que les niveaux à saturation inférieure à 50 % sont tous à pH inférieur à 5. Le second signale une relation plus marquée entre les données reportées.

Un dernier graphique situé en annexe nous montre la relation, au demeurant assez lâche, entre le pH H₂O et la saturation du complexe en Al échangeable. Chaque point représente un horizon caractéristique des quatre types de sols les plus acides : SL - SLG - SLA - SL(G).

Cet ensemble de données nous montre donc que les phénomènes de lessivage et de désaturation interviennent avec le plus d'intensité lors du passage du stade sol brun lessivé au stade sol lessivé. Il est donc vraisemblable que c'est l'apparition de ces conditions acides, liées à l'hydromorphie croissante, qui permet l'intervention du processus de dégradation de l'horizon Bt.

5.22. LE COMPORTEMENT DU FER

La démarche que nous allons suivre pour analyser la dynamique du fer dans les sols étudiés est analogue à celle utilisée pour la composition granulométrique.

C'est-à-dire que nous allons voir les étapes suivantes : altération - examens de moyennes sur horizons caractéristiques - profils types - échantillons particuliers - conclusions.

Une attention particulière sera attachée au comportement du fer par rapport à l'argile.

Rappelons que les déterminations effectuées sont essentiellement celles du Fer libre DEB, du Fer soluble HCl, ainsi que certaines analyses totales.

5.22.1. Les premiers stades d'évolution des matériaux loessiques nous montrent une augmentation progressive de la teneur en fer libre de la terre totale en fonction de l'altération : de 1,20/1,40 % de Fe₂O₃ dans le loess à près de 1,80 dans les niveaux dits "lehmifiés".

Nous avons vu au chapitre 3.5. qu'en rapportant ces teneurs aux quantités d'argile on obtenait des valeurs inverses, c'est-à-dire une décroissance de bas en haut : 9,5 en moyenne dans les matériaux originels pour environ 7,0 dans les niveaux altérés.

Ceci semblerait signifier que ces premiers processus d'altération ne libèrent que des quantités relativement peu importantes de fer, et confirmerait la dominance des processus mécaniques sur les processus géochimiques.

5.22.2. Tout comme pour la granulométrie, quelques chiffres moyens ont été obtenus à partir des mêmes profils caractéristiques. Nous avons cependant introduit une unité de transition : sols en voie de dégradation, ou sols lessivés (dégradés) = SL(D), pour l'intérêt qu'elle présente dans l'étude de la dynamique du fer.

Le tableau ci-dessous donne les teneurs en fer libre exprimées en Fe₂O₃ % de la terre totale, pour trois niveaux caractéristiques, ainsi que les indices : rapports teneur du Bt / teneur du A₂.

	Sol brun lessivé SBL	Sol lessivé SL	Sol lessivé (dégradé) SL(D)	Sol lessivé glossique SLG	
A ₂	1.24	1.15	1.16	1.14	
B ₂ t	2.01	2.06	2.20	2.45	
C	1.64	1.65	1.74	2.11	
I ^{ce}	1.62	1.79	1.90	2.15	

On peut noter les caractères suivants :

- L'augmentation de l'indice entre les stades SBL et SL est liée à l'appauvrissement du A₂, tandis que les différences entre, d'une part, SL et SL(D), d'autre part, SL(D) et SLG paraissent dues essentiellement à l'enrichissement du Bt.

- L'indice du SBL est supérieur à celui enregistré pour l'argile, et compte tenu d'une teneur en C un peu inférieure à celle enregistrée pour les horizons "lehmifiés", ceci pourrait indiquer un certain "lavage" des formes de fer libéré par une première altération.
- Les autres indices sont légèrement inférieurs à ceux calculés pour l'argile. Cela pourrait éventuellement être mis en relation, tout au moins pour les stades les plus évolués, avec des processus d'altération secondaire.

Nous avons pensé intéressant de présenter ci-dessous les différentes teneurs du tableau précédent rapportées à l'argile totale (Fer 1./Arg.x 100).

	SBL	SL	SL(D)	SLG
A ₂	6.96	6.92	8.08	8.68
B _{2t}	6.91	6.86	7.53	8.41
C	8.02	6.61	7.25	9.00

Nous remarquons tout d'abord des valeurs inférieures à 7 pour SBL et SL, excepté pour le niveau C du SBL, des valeurs supérieures à 7 pour SL(D) et SLG.

En ce qui concerne SBL les valeurs enregistrées correspondent à celles obtenues dans l'étude de l'altération du loess, l'horizon C correspondant à un matériau modérément "lehmifié".

Un approfondissement du solum se marque au stade SL avec cependant des valeurs croissantes de bas en haut.

Les stades SL(D) et SLG montrent d'une part, une augmentation progressive de ce rapport en fonction de l'évolution, d'autre part une différence bien marquée entre les horizons A₂ et B_{2t}, les valeurs les plus élevées étant enregistrées dans la partie supérieure. La valeur de 9,0 au niveau du C du SLG pourrait être mis en relation avec les processus d'hydromorphie caractérisant ce sol, nous y reviendrons.

5.22.3. La figure suivante (fig. 103) donne, pour quelques profils caractéristiques, quatre courbes représentant successivement :

- la répartition du fer libre en % de terre totale,
- la répartition du fer HCl en % de terre totale,
- la variation de la teneur en fer libre rapportée à l'argile,
- la variation de la teneur en fer libre rapportée à l'argile fine 0-0,2 microns.

- On constate immédiatement que la répartition du fer libre par rapport à la terre totale présente, pour tous les profils, beaucoup d'analogies avec celle de l'argile. Peu de compléments peuvent donc être apportés à ce que viennent de nous indiquer les interprétations des moyennes.

**DISTRIBUTION DU FER
DANS QUELQUES PROFILS CARACTÉRISTIQUES**

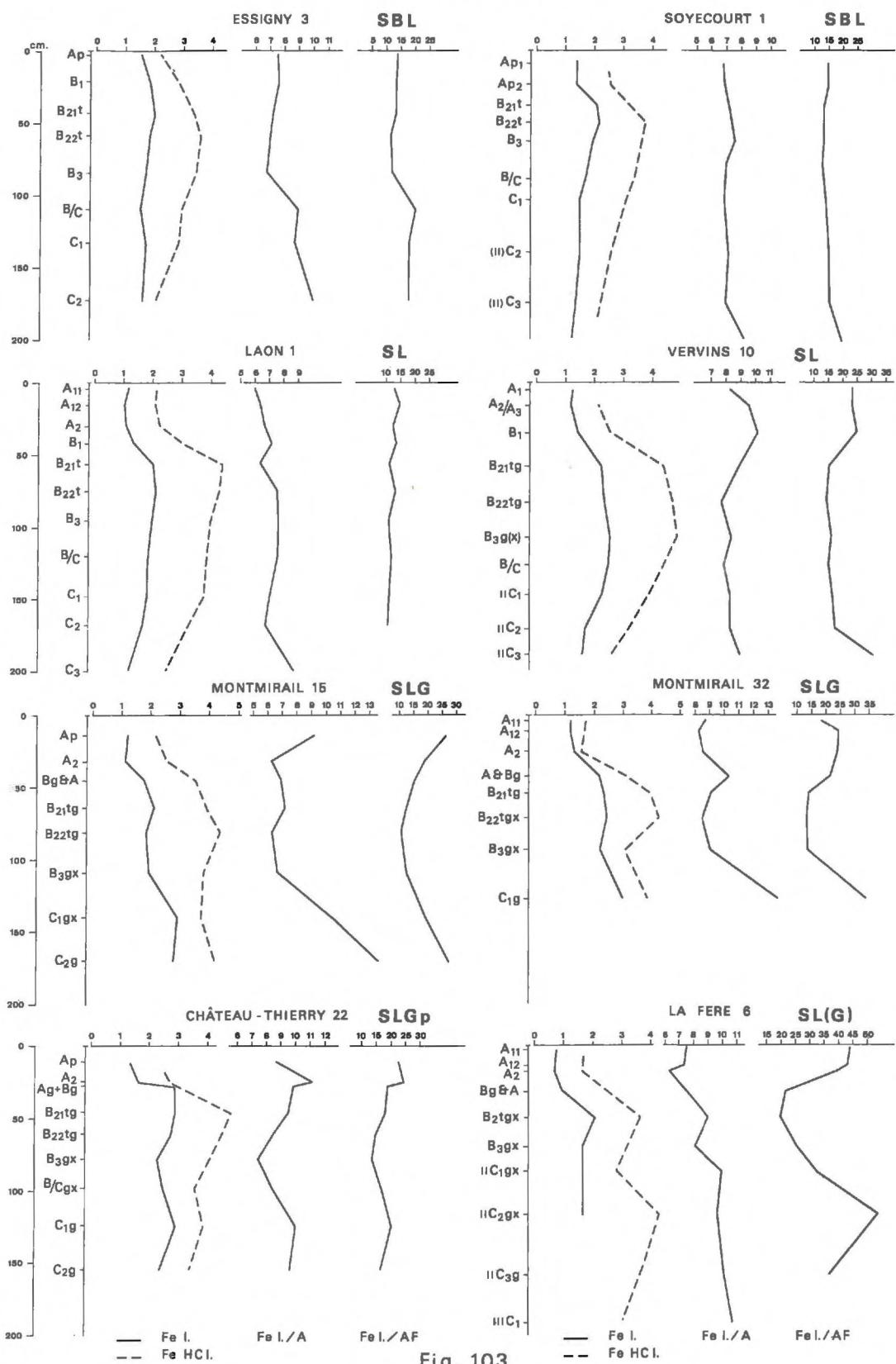


Fig. 103

- Par contre, la comparaison des courbes de répartition du fer libre et du fer HCl nous indique une différence maximum au niveau des horizons B, là où l'enrichissement en valeur absolue est le plus important, dû à l'illuviation et peut-être à des processus d'altération. La valeur la plus élevée du fer HCl se situe à la partie moyenne ou inférieure de l'horizon argillaire.

Par ailleurs, les sols dégradés montrent une différence minimum aux niveaux des horizons les plus altérés : A₂ et A & B, où les rapports fer libre / fer HCl sont les plus élevés.

- L'examen des courbes du rapport fer libre / argile demande une analyse par stades d'évolution.

- SBL (Profils EN 3 et Soyécourt). La variation est très peu importante, on notera simplement une augmentation dans le bas du solum, qui correspond à ce que nous avons relevé dans les niveaux de loess peu évolué.

- SL (Profils Laon 1 et Vervins 10). La répartition présente essentiellement une augmentation au niveau de l'horizon B₁, modérée pour le profil Laon 1, nette pour Vervins 10, une diminution est ensuite enregistrée dans la masse des horizons B, tandis que les valeurs augmentent à nouveau dans les horizons C. Cette variation par intensification dans le B₁ pourrait correspondre à un début d'altération en milieu acide.

- SLG (Profils Montmirail 15-32 - Château 22). Un maximum assez net marque l'horizon d'altération A & B dans les sols glossiques ; ce phénomène est confirmé dans le sol à tendance planosolique où ce niveau est cependant très peu épais.

Une autre augmentation importante se présente au niveau de la fluctuation de la nappe dans ces sols à hydromorphie ; dans le bas du solum pour les sols glossiques, sur l'horizon Bt pour le sol planosolique. L'abondance de nodules ferriques en serait vraisemblablement la cause.

- Les courbes de distribution fer libre / argile fine mettent encore plus nettement en évidence les processus d'évolution.

- SBL Très peu de variations sont à enregistrer, moins importantes que dans le cas précédent ; on notera à nouveau une augmentation dans les horizons profonds.

- SL Le profil Laon 1 se rapproche des SBL, tandis que Vervins 10 marque une différence en se rapprochant du stade suivant : augmentation en A₂ et B₁ confirmant la tendance à l'altération. Augmentation moins importante dans le bas du solum.

- SLG Les processus d'altération et d'hydromorphie se manifestent ici de manière évidente par :
- un maximum bien net en A₂ et A & B : altération en milieu acide et réducteur.
- une diminution au niveau des horizons Bt, Bggx y compris : accumulation d'argile fine déferrifiée.
- une augmentation au niveau de la fluctuation importante de la nappe : horizons profonds pour SLG, sur le Bt compact pour le sol "planosolique".

Le profil La Fère 6, que nous avons inclus à titre comparatif, montre une analogie très nette avec le stade SLG, le dernier type de courbe indique clairement ici l'accumulation importante d'argile fine rubéfiée, riche en fer, au niveau du paléosol enfoui.

5.22.4. Nous allons voir maintenant ce que nous a apporté l'examen des résultats d'analyses du fer dans les échantillons particuliers : revêtements, plages dégradées, zones d'accumulation, matrices.

Nous envisagerons ici des données de fer libre par rapport à la terre totale et à l'argile, ainsi que la comparaison fer libre / fer HCl.

Les résultats présentés au chapitre 4.4. ont montré la différence de teneur en fer libre des revêtements "primaires", liés à des conditions de milieu non réductrices, et "secondaires", déplacés en conditions typiques d'hydromorphie. Les premiers sont très riches en fer libre, les seconds sont très appauvris en fer aisément mobilisable.

Le tableau ci-dessous donne pour deux groupes de revêtements typiques les principaux éléments concernant le fer.

	Fer libre / terre totale en %	Fer libre / argile x 100	Fer libre / Fer HCl x 100
<hr/>			
Revêtements "primaires"			
V.14	3.17	4.8	41
V.10	2.40	3.7	35
H.16	2.27	4.0	32
V.3	2.77	5.3	46
V.2	2.43	4.7	44
<hr/>			
Revêtements "secondaires"			
C.T.22	0.46	1.2	15
M.15	0.28	0.9	13
M.30	0.41	1.2	14
M.31	0.31	1.1	15
M.32	0.39	1.3	18

- Nous voyons donc que les revêtements du premier type sont riches en fer, mais que comparativement aux échantillons des horizons pris globalement, les teneurs en fer libre rapportées à l'argile sont moins élevées. Peut-être pourrait-on considérer un rapport de 4 à 5 comme typique des complexes argilo-ferriques susceptibles de migrer en milieu aéré. La moyenne des rapports fer libre / fer HCl est sensiblement du même ordre que celle des argiles de matrice.

- Ceux du second type se caractérisent par des valeurs très basses pour les trois types de données : 0,30 à 0,50 pour les teneurs, 0,9 à 1,3 pour le rapport fer libre / argile, 13 à 18 pour le rapport fer libre / fer HCl ce qui est particulièrement bas.

On peut en déduire un appauvrissement très important en fer libre extrait par réduction avant migration et par altération en milieu agressif. Un rapport fer libre / argile voisin de 1 caractériserait la migration d'argile dégradée en milieu hydromorphe.

Pour mettre en évidence certains aspects de la dynamique du fer dans les sols fortement évolués, nous présentons ci-dessous un tableau donnant les valeurs des teneurs en fer libre rapportées à l'argile de quatre profils typiques pour des échantillons sélectifs : plages dégradées, revêtements, zones oxydées en bordure d'agrégats, matrice des agrégats.

	M. 15	M. 31	M. 32	C.T. 22
Dég.	5.6	6.5	5.4	5.4
Revêt.	0.9	1.2	1.3	1.2
Z. ox.	15.6	17.5	20.0	11.6
Matr.	9.2	9.4	10.4	9.5

Ces chiffres permettent de constater que les zones dégradées contiennent moins de fer libre que la matrice des horizons Bt, mais sensiblement plus que les revêtements, les argiles y seraient en voie de déferrisation. Notons que dans ces plages dégradées le rapport fer libre / fer HCl est, d'une manière générale, voisin de 45.

Les zones oxydées en bordure d'agrégats sont très enrichies en fer libre, le rapport fer libre / fer HCl y est généralement compris entre 60 et 80.

- Rappelons également nos conclusions partielles du chapitre 4.4., traitant des résultats d'analyses chimiques globales : altération et déferrisation marquées des revêtements d'illuviation hydromorphe, par rapport aux revêtements primaires et aux matrices des horizons B, - appauvrissement en fer des zones dégradées par rapport aux matrices.

5.22.5. Si nous reprenons successivement les différents stades de développement, nous voyons se dessiner une évolution qui dépend étroitement des conditions d'altération et d'hydromorphie.

- altération des matériaux limoneux loessiques.

La "lehmification" s'accompagne d'une faible libération de fer dont l'apparition est vraisemblablement masquée par les phénomènes d'argilification.

- stades sol brun et sol brun lessivé.

Une augmentation du fer libre et du fer HCl se dessine au niveau des horizons B, qui s'accentuera dans les stades d'évolution suivants.

Il faut donc noter que le rapport fer libre / fer HCl ne pourra jamais être interprété indépendamment du niveau où le matériau a été prélevé. Les différences les plus importantes, donc les rapports les plus faibles, seront tout observés au niveau de la partie moyenne du B, les rapports les plus importants dans les horizons appauvris.

Le déplacement de constituants argilo-ferriques permet une différenciation de plus en plus nette de la répartition du fer. Au demeurant, les quantités de fer liées à l'argile paraissent toujours assez constantes et proches de celles caractérisant les matériaux originels.

On retrouve dans les horizons C des caractères propres au matériau loessique original.

- stade du scl lessivé.

L'horizon A₂ s'appauvrit en fer qui se répartit dans un horizon argillique plus profond qu'au stade précédent ; nous enregistrons une augmentation de l'indice d'entraînement calculé du fer libre.

L'apparition de conditions d'engorgement et de désaturation amènent ensuite une certaine altération localisée dans l'horizon A₂ et la partie supérieure du Bt. De plus une individualisation progressive entre argile et fer se manifeste dans la partie supérieure du solum ; les revêtements argileux restent cependant toujours assez riches en fer libre.

- stade du scl lessivé glossiguo.

L'indice d'entraînement du fer libre s'accroît d'une manière sensiblement égale à celui de l'argile.

Un niveau d'individualisation et d'altération maximum probable se localise au niveau logique des horizons A₂ et A & B. Un enrichissement en produits d'illuviation profondément déferrisés caractérise les horizons d'accumulation.

Les niveaux de fluctuation de la nappe phréatique, et les nombreuses accumulations de fer que l'on y observe sont très bien caractérisés par la variation de la teneur en fer libre rapportée à l'argile.

- stade du sol à "tendance planosolique".

Le niveau d'altération devient très peu épais, localisé au contact de l'horizon Bt très compact.

C'est dans cette même couche que l'influence de la nappe se manifeste tout naturellement.

La différence de comportement du fer par rapport à l'argile, que nous venons de mettre en évidence dans les stades les plus avancés de notre séquence, a déjà été évoquée à de nombreuses reprises auparavant par divers auteurs. Il faut citer les travaux de Pérot, Manil, Grossman, Arnold, Gebhardt, Kundler, Duchaufour, Brinkman.

Les analyses propres aux revêtements argileux correspondant aux différents stades d'évolution nous ont cependant permis d'atteindre un meilleur degré de précision dans la connaissance de la dynamique du fer dans les sols lessivés.

5.23. LE COMPORTEMENT DE L'ALUMINIUM

L'importance prise par la dynamique de l'aluminium dans l'évolution des sols en milieu désaturé a été mise en évidence à de nombreuses reprises. Compte tenu des conditions d'évolution dans les stades les plus acides des sols limoneux nous avons considéré cet élément comme un critère essentiel (Duchaufour, 1964-1966-1968).

Plusieurs formes d'aluminium ont été étudiées : aluminium libre, échangeable, total. Le présent chapitre traite exclusivement de la forme libre, la dynamique de la forme échangeable ayant été analysée en 5.21..

Nous verrons successivement les données fournies par quelques moyennes, celles issues de l'examen de profils types, enfin celles concernant des échantillons particuliers.

5.23.1. Au cours de notre étude nous avons pu constater que le comportement de l'aluminium dans les sols est sensible aux conditions d'acidité et d'intervention anthropique. Aussi les valeurs moyennes dont nous allons parler ne peuvent-elles indiquer que des tendances évolutives. Les variations peuvent être assez importantes, et il convient évidemment d'en tenir le plus grand compte pour les interprétations.

Etant donné leur dynamique particulière en ce qui concerne l'élément considéré, et leur acidité particulièrement élevée, nous avons traité les sols lessivés acides des Ardennes séparément.

Nous présentons ci-dessous un tableau qui donne, pour les horizons caractéristiques, les teneurs en aluminium libre, exprimées en $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ \%}$, de la terre totale ainsi que des indices calculés entre B_2t et A_2 . Quatre types de sols sont représentés : trois stades d'évolution classiques et le sol lessivé acide ardennais.

	Sol brun lessivé	Sol lessivé	Sol lessivé glossique	Sol lessivé acide (Ard.)
A_2	1.23	1.43	1.40	3.56
B_2t	1.77	2.26	2.32	3.22
C	1.25	1.72	1.64	2.05
I^{ce}	1.44	1.58	1.65	-

De l'examen de ce tableau il ressort immédiatement un caractère important, à savoir une relative indépendance vis à vis des phénomènes d'entraînement d'argile et la relation évidente avec les processus d'altération.

- Les indices théoriques d'entraînement sont plus faibles que ceux de l'argile et du fer, leur variation est moindre entre les différents stades : 1,4 - 1,6 - 1,7.

- La teneur moyenne enregistrée dans l'horizon A₂ augmente immédiatement entre SBL et SL puis varie peu entre SL et SLG, tandis que celle du Bt augmente progressivement.

Les sols ardennais se dissocient nettement par une répartition très typique de sols très acides, montrant une courbe d'altération caractéristique.

Comme pour le fer nous présentons ensuite les différentes teneurs du tableau précédent rapportées à l'argile totale (A1 l./Arg. x 100).

	SBL	SL	SLG	SLA (Ard.)
A ₂	6.5	9.2	10.7	18.9
B ₂ t	6.2	7.7	8.0	12.2
C	6.4	7.0	6.9	10.4

Les chiffres obtenus pour SBL indiquent visiblement l'absence de processus d'altération.

Dès le stade du SL on constate d'une part une augmentation très nette dans la partie supérieure du sol, d'autre part une augmentation générale en fonction du stade d'évolution. Ceci nous paraît constituer un critère très valable de l'intensité de l'altération.

Les trois valeurs du sol ardennais sont très nettement plus élevées que pour les trois autres ensemble.

5.23.2. Afin d'obtenir plus de détail sur la répartition et la dynamique de l'aluminium, nous avons repris dans la figure suivante (fig. 104) quelques profils caractéristiques : sols lessivés (Laon 1 et Vervins 10), sols lessivés glossiques (Montmirail 15 et 32), sol à tendance planosolique (Château 22), sol polyphasé dégradé (La Fère 6), sol lessivé acide ardennais (Hirson 55).

Pour chacun d'entre eux nous présentons :

- la répartition de l'aluminium libre en % de terre totale,
- la répartition de la teneur en aluminium libre rapportée à l'argile totale.

- L'interprétation du premier type de courbes montre pour SL et SLG une tendance analogue à la variation de la répartition de l'argile. Pour le sol dit "planosolique" on observe un maximum marqué à la partie supérieure du Bt, correspondant à une altération localisée. Le SLA des Ardennes offre, comme nous l'avons vu, un profil d'altération typique.

DISTRIBUTION DE L'ALUMINIUM
DANS QUELQUES PROFILS CARACTÉRISTIQUES

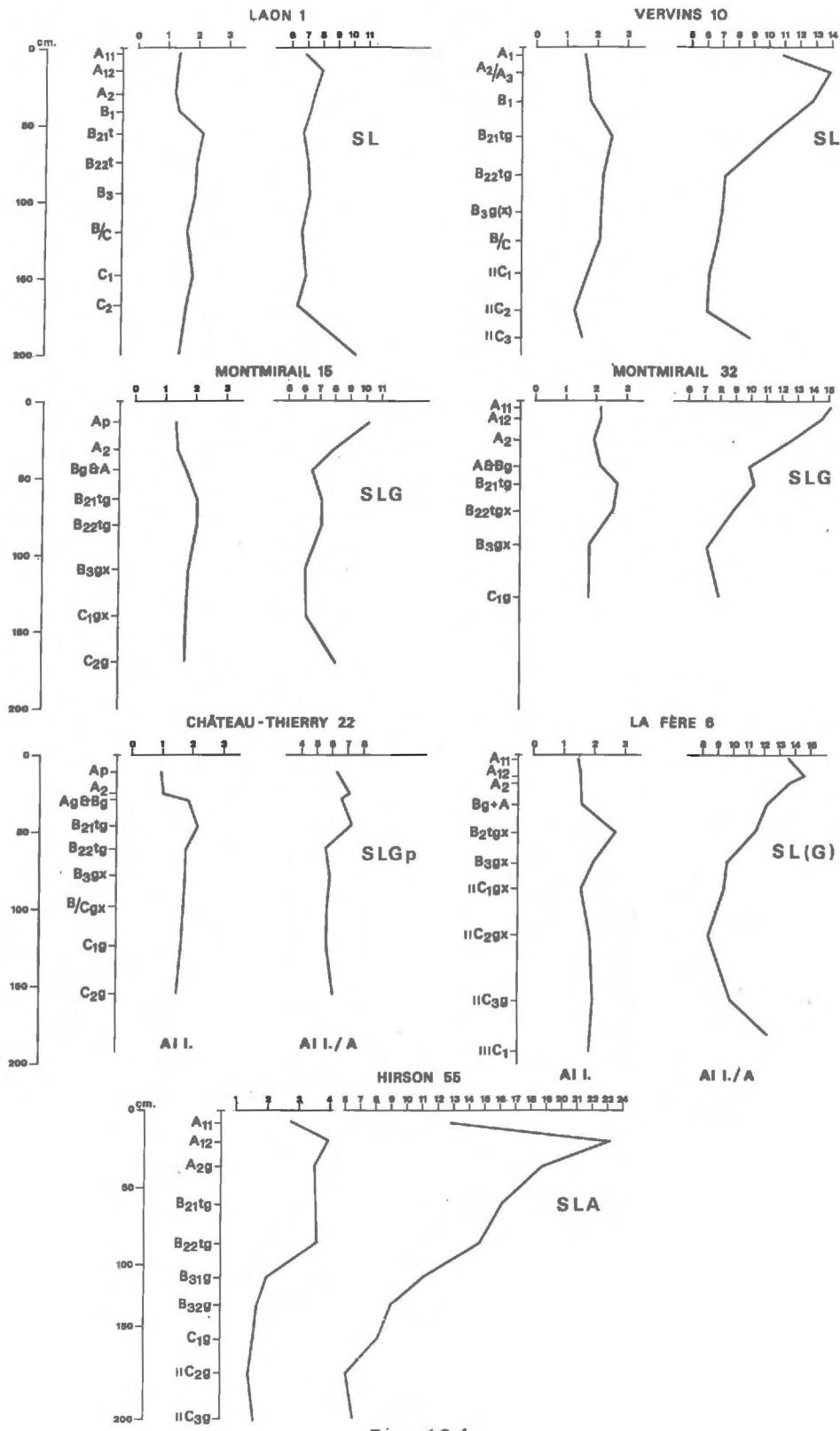


Fig. 104

- L'examen des courbes donnant la variation de la teneur en alumine libre rapportée à l'argile est plus significatif. D'une manière générale on observe un maximum dans la partie supérieure du solum, pour tous les types de sols, au niveau A₁₂ - A₂.

Le détail nous indique ensuite pour SL une diminution au niveau du Bt et une augmentation dans le bas du profil : C₂/C₃. Dans les sols glossiques cette diminution se marque au niveau du A & B, une légère inflexion caractérise ensuite le B_{2t}, suivi d'une nouvelle diminution dans le B₃.

Le sol à tendance planosolique offre une concentration dans l'espace de ce que nous venons d'évoquer pour les sols glossiques : maximum dans le A₂, diminution dans le A & Bg mince, augmentation dans le B_{2t}, diminution ensuite.

Enfin, il suffit de noter pour le SLA le maximum très important dans l'horizon hémorganique A₁₂.

5.23.3. Quelques échantillons de revêtements argileux et de plages dégradées de sols évolués ont pu être analysés, et les résultats obtenus comparés à ceux d'horizons caractéristiques.

Les revêtements argileux d'illuviation primaire sont pratiquement totalement dépourvus d'Al libre, tandis que ceux d'illuviation secondaire, hydromorphe, en contiennent une certaine quantité.

La teneur en Al libre rapportée à l'argile de ces derniers, rapport de 5 en moyenne, est inférieure à celle que nous avons enregistrée pour les matrices des horizons correspondants, ce qui pourrait signifier un déplacement de formes d'alumine libre indépendamment de l'argile.

Les analyses d'échantillons provenant de zones dégradées, qui fournissent des rapports Al libre / argile compris entre 9 et 10, montrent naturellement une analogie étroite avec celles des horizons A₂ correspondants.

5.23.4. Entre le stade sol lessivé et sol dégradé, glossique, se manifeste donc une dynamique importante de l'aluminium en raison de processus d'altération physico-chimiques.

Les premiers stades d'évolution des matériaux loessiques ne peuvent pas être définis de façon précise par le comportement de l'aluminium.

Nous envisagerons l'apport que l'étude de l'aluminium libre nous a fourni à partir du développement de sol brun lessivé...

- stade du sol lessivé.

Dès ce stade on constate une distribution typique d'Al libre qui représente un enrichissement net par rapport à la quantité d'argile présente, vraisemblablement dû à une altération des minéraux secondaires en milieu acide. Les teneurs maximum par rapport à l'argile s'observent dans l'horizon A₂ où les processus d'altération apparaissent donc les plus marqués. Ces processus semblent ensuite s'intensifier dans les stades plus évolués soumis à des conditions d'hydromorphie temporaire.

Un entraînement en profondeur intervient partiellement indépendant des déplacements de colloïdes argileux ; à ce stade, les revêtements ne donnent pratiquement pas d'Al libre.

- stade du sol lessivé glossique.

Une augmentation sensible des processus d'altération caractérise ce stade, la quantité d'Al libre rapportée à l'argile étant de plus en plus importante dans les horizons éluviés, par ailleurs les plus désaturés. Au demeurant, ce niveau est celui où tous ces sols présentent une teneur en minéraux intergrades alumineux, vermiculites Al ou chlorites secondaires la plus importante, et où la C. E. C. de l'argile est la plus faible. Les plages dégradées possèdent des caractéristiques très analogues à celles de l'horizon A₂.

Les teneurs importantes en Al libre dans ces zones peuvent être expliquées par une libération progressive de certaines formes d'aluminium qui s'élimineraient par la base de ces niveaux, dès l'horizon A & B. L'action de certains composés organiques dans le maintien de quantités importantes d'Al en surface est vraisemblablement un facteur majeur.

- stade du sol "à tendance planosolique".

Comme nous l'avons signalé plus haut, nous constatons dans ce cas une "concentration" des processus au niveau de contact entre le A₂ et le Bt, qui apparaît comme typique pour la genèse de ce type de sol.

- enfin, le comportement de l'alumine libre dans les sols lessivés acides des Ardennes correspond à un processus de libération important en conditions de milieu très désaturé.

Les données que nous venons de commenter confirment donc d'une part l'importance du comportement de l'aluminium libre dans l'analyse des sols lessivés, désaturés et dégradés (Duchaufour, 1964 - Scheffer, et al., 1966), d'autre part la "surimposition" de sa dynamique sur un profil textural préalablement élaboré par les mécanismes de lessivage en milieu modérément acide (Duchaufour et Souchier, 1966). Nous avons pu localiser dans la séquence évolutive la phase où l'influence de l'aluminium devient prépondérante dans le développement des sols.

5.24. LA CAPACITE D'ECHANGE

L'interprétation de la variation de la capacité d'échange cationique (C. E. C.) nous a permis de déceler rapidement, dès le début de cette étude, une modification dans la nature des minéraux argileux de certains horizons.

Nous avons pu confirmer la valeur de ce critère par confrontation avec les déterminations minéralogiques effectuées sur des échantillons provenant de ces mêmes niveaux.

La valeur "T" est, d'une manière générale, étroitement liée à la teneur en argile et à la nature des minéraux argileux, ainsi qu'à la quantité et à la composition des constituants organiques. Au demeurant, il est très possible que des éléments de dimension supérieure à 2 microns présentent également une certaine capacité d'échange.

Pour déterminer avec précision la C. E. C. des argiles présentes nous aurions dû effectuer une séparation préalable de la fraction inférieure à 2 microns. Cela ne nous a pas été matériellement possible, et nous avons été contraints de calculer une C. E. C. de l'argile approchée, en rapportant la valeur obtenue pour la terre fine à 100 g d'argile.

Pour les échantillons où une quantité appréciable de matière organique est présente, nous avons effectué une correction approximative sur la base de 200 meq. pour 100 g de matière organique. Très certainement sujette à critiques, compte tenu de la grande variabilité de cette capacité en fonction de la nature des composés, cette manière d'opérer nous a simplement permis de mettre en évidence les tendances générales.

Nous allons présenter un certain nombre de résultats obtenus sur l'ensemble des profils étudiés, quelques exemples de sols caractéristiques et d'échantillons particuliers, et nous tenterons de préciser la valeur de la C. E. C. comme critère d'évolution pour les sols limoneux.

5.24.1. Le tableau ci-après regroupe un ensemble de valeurs moyennes pour différents types de sols. Nous avons dissocié trois types de sols bruns lessivés par région naturelle, afin de ne pas masquer certaines différences vraisemblablement dues à une variation dans la composition minéralogique du matériau original. Les sols lessivés, sols lessivés glossiques, et sols lessivés acides ardennais complètent le tableau.

Nous avons donc indiqué d'une part les valeurs de T, d'autre part les capacités d'échange rapportées à l'argile.

	A ₂	B ₂ t	C
	T : CEC/A	T : CEC/A	T : CEC/A
SBL Picardie	11.6 : 50	13.7 : 51	9.2 : 51
SBL Scissonneis	9.5 : 50	15.0 : 52	10.3 : 56
SBL Haute Thiérache	11.0 : 46	12.6 : 46	9.7 : 51
SL	6.9 : 34	14.2 : 47	12.2 : 51
SLG	5.4 : 25	12.9 : 48	10.7 : 48
SLA Ardennes	7.8 : 23	10.1 : 44	10.0 : 47

L'examen de ce tableau nous montre immédiatement que nous avons affaire à un ensemble de valeurs très voisines, proches de 50 meq. pour 100 g d'argile. Seuls les chiffres correspondant aux horizons A₂ des sols les plus évolués présentent des valeurs sensiblement inférieures.

Parmi les SBL, ceux du Soissonnais possèdent une capacité légèrement supérieure à celle des deux autres, particulièrement par rapport à ceux de Thiérache dont nous avons vu par ailleurs que les horizons supérieurs étaient fréquemment constitués de matériaux redistribués.

Dès le stade du SL intervient une diminution de la C. E. C. de l'argile en surface, au sein des horizons A₂.

Cette tendance se marque de façon encore plus importante dans le SLG. On constate d'autre part dans ce dernier, une légère diminution dans les horizons profonds, par rapport au stade SBL. Les faibles valeurs enregistrées dans les horizons A₂ de ces sols fortement évolués avaient déjà été mentionnées par Dusal en 1953.

Les sols ardennais, développés sur matériaux anciens assez altérés, présentent aux différents niveaux étudiés les C. E. C. de l'argile les plus faibles.

5.24.2. Sur la figure ci-après nous avons reporté la variation de la C. E. C. de l'argile pour quelques profils caractéristiques, de manière à préciser les données précédentes (fig. 105).

Le profil de SBL (Essigny 3) montre une légère variation avec un maximum au niveau des horizons B ; on notera la légère diminution dans le haut du profil.

Au stade SL (Vervins 10) cette diminution de la capacité d'échange dans les horizons supérieurs est manifeste, tandis que les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de la partie inférieure de l'horizon B, avec maximum dans le B_{3g}, où, rappelons-le, nous avons noté une grande quantité d'épais revêtements très riches en argile fine.

Les sols lessivés glossiques, SLG, (Montmirail 15 et 32) confirment la faible valeur de la capacité d'échange dans la zone dégradée du profil.

Un maximum est relevé dans le premier au niveau du B_{2t}, dans le second au niveau du B_{3g}. Ceci signifierait un stade d'évolution plus avancé pour Montmirail 32, ces niveaux constituant comme nous l'avons vu des zones d'enrichissement très important en argile fine.

On constate dans le profil Château 22, à tendance planosolique, une uniformisation pour l'ensemble du profil à partir de l'horizon B_{21tg}, ce qui confirme l'analyse faite au chapitre traitant de la granulométrie.

Le profil complexe de la Fère 6 montre nettement la superposition de niveaux caractéristiques d'un sol lessivé glossique et d'un paléosol à capacité d'échange de l'argile élevée.

Ce dernier caractère confirme nos résultats sur l'étude des paléosols exposés dans la troisième partie de ce travail (cf. 3.4.).

L'examen de ces quelques profils montre donc d'une part la diminution de la C. E. C. de l'argile en surface, et ce particulièrement nettement dès le stade de sol lessivé, d'autre part une augmentation relative dans les niveaux d'accumulation d'argile.

CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE L'ARGILE

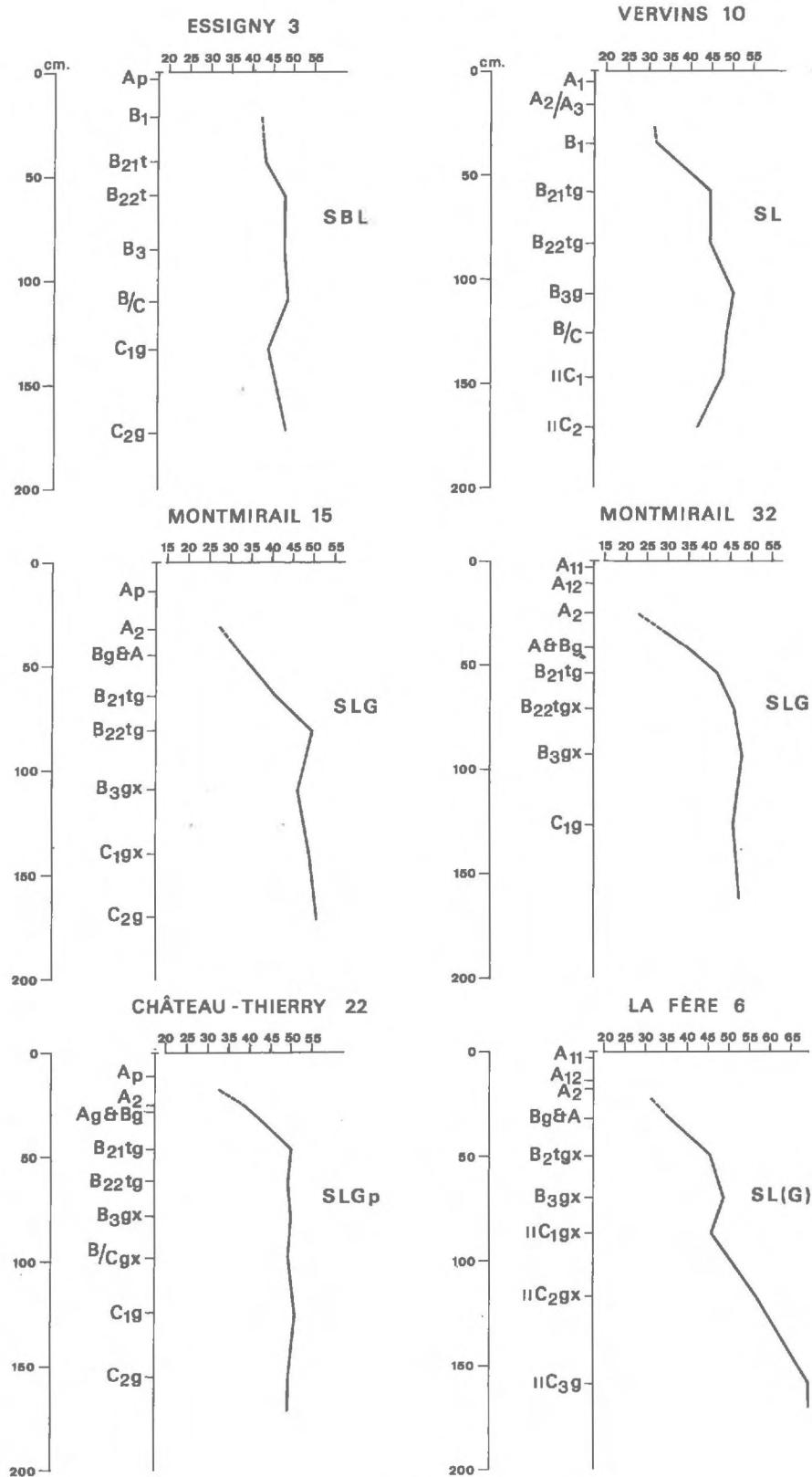


Fig. 105

5.24.3. Les quelques échantillons particuliers issus de prélèvements sélectifs nous ont permis de faire les observations suivantes :

- Les revêtements d'illuviation " primaire " ont une capacité d'échange voisine ou légèrement supérieure à celle des horizons correspondants, elle est de l'ordre de 50 à 55 meq. / argile.
- Les plages dégradées des sols lessivés glossiques montrent, pour l'argile, une capacité d'échange de 38/40 meq., donc supérieure à celle des horizons A₂.
- Les revêtements d'illuviation "secondaire", hydromorphe, de ces mêmes sols ont une capacité d'échange comprise entre 40 et 44 meq., c'est-à-dire sensiblement inférieure à celle des matrices d'agrégats des niveaux de prélèvement.

5.24.4. Disons immédiatement que la synthèse concernant la variation de la capacité d'échange cationique de l'argile entre les différents types de développement confirme à la fois l'évolution enregistrée dans la minéralogie des argiles et les variations de la granulométrie.

L'étude de l'altération des matériaux loessiques nous a montré tout d'abord qu'une valeur moyenne de 50 meq. caractérisait d'une manière générale les niveaux d'altération primaire de ces sédiments, avec cependant une certaine variation due à des héritages légèrement différents entre couvertures limoneuses.

Les sols bruns lessivés montrent une très légère diminution de la C. E. C. dans l'horizon A₂, due probablement à une augmentation relative de la teneur en argile grossière contenant de la kaolinite et du quartz en quantité notable. Par contre les horizons Bt offrent des valeurs un peu plus élevées, cette augmentation provenant de l'accumulation d'argile fine contenant une dominance de minéraux gonflants. Les revêtements argileux, très riches en argile fine, ont une capacité d'échange légèrement supérieure à celle des horizons correspondants.

Les sols lessivés sont caractérisés par une diminution assez nette de la C. E. C. de l'horizon A₂, dont la cause apparaît analogue à celle du stade précédent. Les valeurs les plus élevées s'observent dans les niveaux enrichis en argile gonflante, c'est-à-dire les horizons Bt. Les revêtements argileux présentent une capacité d'échange très analogue à celle du stade précédent.

Les sols lessivés glossiques sont très caractéristiques pour la variation de la C. E. C. de l'argile.

Un minimum très net s'observe dans les horizons supérieurs dégradés ; elle est due essentiellement à l'apparition de minéraux argileux du type vermiculite alumineuse et chlorite secondaire.

Une augmentation intervient ensuite dans les horizons d'accumulation caractérisés par une quantité importante d'argile fine contenant essentiellement des minéraux gonflants.

On observe dans le sol à tendance planosolique une valeur pratiquement constante de la capacité d'échange en profondeur.

Les plages dégradées des horizons A & B de ces sols possèdent une capacité d'échange intermédiaire entre le A₂ et le Bt qui traduit naturellement le processus d'altération en cours. Les revêtements, quant à eux, contiennent des minéraux relativement altérés, et leur C. E. C. reflète la teneur moins importante en argile fine par rapport à la "matrice" des horizons Bt, elle est donc légèrement inférieure à celle des niveaux correspondants de prélèvement.

Les données concernant la capacité d'échange cationique de l'argile que nous venons de présenter sont en très bonne concordance avec les résultats de la détermination des surfaces spécifiques que nous avons exposés en quatrième partie, et nous allons voir maintenant comment elles sont justifiées par l'évolution des minéraux argileux.

5.25. EVOLUTION MINERALOGIQUE

A partir des données présentées dans les différents chapitres des deux parties précédentes de ce travail nous allons tenter d'effectuer une synthèse sur l'évolution des minéraux argileux en fonction du degré de développement des sols.

Les résultats des déterminations minéralogiques ont été fournis et commentés dans le chapitre 3.32. : caractérisation générale des matériaux limoneux, dans le chapitre traitant des paléosols : 3.4., dans le chapitre 3.5. qui traite de l'altération des loess et de la "lehmification", dans le chapitre 4.3. qui donne la caractérisation détaillée des profils types, et enfin dans le chapitre 4.43. qui concerne les échantillons particuliers liés aux processus d'illuviation.

Les matériaux loessiques originels comportent tous comme nous l'avons vu des minéraux du type kaolinite et illite en proportions variables.

La présence de chlorite a été décelée d'une manière assez générale dans les limons picards ainsi que dans ceux du centre du Scissionnais.

La vermiculite caractérise d'autre part une grande partie des loess récents de couverture, tandis que des minéraux gonflants sont pratiquement présents partout en plus ou moins grande quantité.

Une certaine proportion de quartz se retrouve naturellement dans la fraction inférieure à 2 microns de tous ces matériaux, ainsi que parfois quelques traces de feldspaths.

Nous avons pu mettre en évidence la répartition de certaines dominances régionales (3.32.).

L'étude de l'altération en place de loess typiques (3.5.) nous a montré que seule une certaine modification des minéraux illitiques par "ouverture" des feuillets semblait intervenir, ainsi qu'éventuellement l'apparition de minéraux gonflants assez mal différenciés au niveau du front de décarbonatation.

Les sols bruns, les sols bruns lessivés et les sols lessivés, ces deux derniers soumis aux processus d'illuviation primaire, présentent une composition minéralogique en relation d'une part avec la nature des matériaux originels : héritages, l'autre part avec le degré d'évolution : transformations.

Nous trouvons systématiquement du quartz, de la kaolinite, de l'illite, des illites "ouvertes" et des minéraux du type gonflants, montmorillonitiques.

Certains d'entre eux, développés dans une couverture typiquement récente font apparaître également de la vermiculite (4.3. : CR47).

D'autres contiennent de la chlorite héritée, essentiellement en Picardie (4.3. : EN3), parfois en association avec de la vermiculite.

Des traces de feldspaths peuvent s'observer dans la fraction argileuse de certains de ces sols.

L'observation horizon par horizon nous a permis de faire un certain nombre d'interprétations.

- Dans les sols bruns, la teneur en minéraux 2/1 ouverts est plus élevée dans le solum que dans l'horizon C, ce qui confirme nos résultats des séquences d'altération (3.5.) et caractérise vraisemblablement le développement de l'horizon (B).

Ce phénomène se présente également dans les sols bruns lessivés et les sols lessivés où nous l'observons de la façon la plus nette dans l'horizon B_{2t}. Au demeurant, le processus typique de ces sols est le "lessivage de l'argile".

Au chapitre 4.+3, nous avons exposé les résultats des déterminations effectuées sur des revêtements argileux : minéraux relativement peu organisés dans les premiers stades d'évolution, ensuite différence assez sensible entre les fractions d'argile fine (0-0,2 microns) et d'argile grossière (0,2-2 microns).

La fraction fine contient essentiellement des minéraux plus ou moins gonflants, associés à des illites ouvertes et à de très faibles quantités d'illite, de kaolinite et parfois de quartz.

La fraction grossière comporte en revanche des quantités nettement plus importantes de minéraux assez bien différenciés : illite - kaolinite - et quartz, accompagnés d'intergrades particulièrement gonflants.

La quantité d'argile fine particulièrement élevée dans ce type de revêtement pourrait donc expliquer la variation observée entre les horizons du solum.

En effet, l'horizon A₂ contient plus de kaolinite et d'illite que les horizons sous-jacents, tandis que les horizons Bt paraissent nettement plus riches en minéraux gonflants du type montmorillonite.

Il faut cependant remarquer que dans les sols lessivés à Bt "tacheté" où des processus d'altération affectent localement les faces des agrégats de cet horizon, on note une plus grande abundance de minéraux intergrades gonflants mal différenciés (4.3. : LAON 1).

- Dans un stade plus avancé, en milieu désaturé mais encore relativement bien aéré, les taches de dégradation ainsi que l'horizon A₂ reflètent déjà sur le plan minéralogique une tendance à l'évolution typique des sols dégradés ou glossiques. Il s'agit donc de sols légèrement dégradés, ou en voie de dégradation.

Quartz, kaolinite, illite et intergrades gonflants sont présents dans pratiquement tous les horizons, avec les dominances que nous venons de citer pour les stades précédents de l'illuviation. Un peu de chlorite héritée peut être décelée dans certains sols (4.3. : V.10).

Les horizons Bt présentent donc des teneurs en minéraux gonflants plus importantes, tandis que la kaolinite et l'illite sont mieux représentées dans la partie supérieure du solum.

Dans l'horizon A₂ et dans les plages blanchies de la partie supérieure du Bt apparaissent des minéraux du type intergrades alumineux (4.3. : V. 10 - Ep. 3).

La fraction argileuse fine des plages dégradées contient essentiellement des minéraux gonflants, tandis que la fraction grossière contient du quartz, de la kaolinite, de l'illite, des minéraux intergrades gonflants et de la vermiculite Al.

A ce stade, la composition des revêtements argileux localisés au niveau de la base du Bt reste très voisine de celle des stades précédents, la teneur en minéraux gonflants étant toujours supérieure dans la fraction fine.

- Les sols modérément à fortement dégradés, "glossiques", et à pseudogley, ainsi que les sols "planosoliques", présentent une évolution minéralogique particulière, liée à la libération de quantités plus ou moins importantes de certaines formes de composés alumineux en milieu acide et réducteur.

Tous contiennent dans la fraction fine du quartz, de la kaolinite, des minéraux illitiques et des minéraux gonflants, en proportions variables selon les niveaux considérés du sol.

Nous avons pu montrer que le processus de "dégradation" engendre la formation de minéraux argileux du type "intergrades alumineux" (4.3.), il s'agit d'une évolution des minéraux illitiques par ouverture des feuillets et intercalation de composés alumineux dans les espaces interfoliaires.

Plusieurs degrés dans l'intensité des phénomènes ont d'ailleurs pu être mis en évidence au cours de l'évolution : -fermeture difficile des minéraux après traitement K - apparition, ensuite, d'intergrades alumineux du type vermiculite Al - formation, enfin, d'une véritable chlorite secondaire.

Naturellement, ces formes minérales apparaissent plus spécialement dans la partie supérieure du solum, ainsi que dans certains produits d'illuviation.

Un caractère quasi-général est tout d'abord l'accumulation relative et progressive de quartz et de kaolinite de bas en haut du profil, ce qui découle en premier lieu de la résistance de ces deux types de minéraux, et correspond d'autre part à l'altération plus ou moins importante et au déplacement préférentiel des autres types d'argiles.

Les sols modérément dégradés (4.3. : C. T. 11 - M1. 15) présentent plus de quartz, de kaolinite et d'illite dans le A₂ que dans les horizons Bt, où par contre les minéraux gonflants sont mieux représentés.

De la vermiculite alumineuse apparaît essentiellement dans l'horizon A₂, de manière plus ou moins nette.

Les sols fortement dégradés (4.3 : Ml. 32 - Ml. 31), ou à tendance "planosolique" (4.3. : C. T. 22), présentent une intensification des phénomènes avec évolution vers la chloritisation secondaire.

L'horizon A₂ contient de la vermiculite Al de manière importante, qui peut être considérée franchement comme de la chlorite secondaire dans certains cas.

L'horizon Bt contient de la vermiculite Al en quantité notable, ce qui correspond à une dégradation plus avancée.

Les zones dégradées de l'horizon A & B, ainsi que la partie supérieure des langues montrent dans l'argile fine une dominance de minéraux gonflants ; la fraction grossière contient une quantité moindre de ces minéraux, de l'illite, de la kaolinite, beaucoup de quartz, ainsi que des intergrades alumineux du type vermiculite Al ou même chlorite secondaire dans les cas les plus évolués (4.43.).

Les revêtements typiques de ces sols, issus d'une illuviation secondaire, en milieu hydromorphe sont particuliers. La fraction argileuse fine contient essentiellement des minéraux gonflants, associés à des quantités très faibles d'illite, de kaolinite et de quartz. Les minéraux gonflants sont nettement moins représentés dans la fraction grossière, où l'illite et la kaolinite sont présents, avec le quartz en quantité importante et la vermiculite alumineuse en quantité variable selon le degré d'évolution du sol.

Indépendamment des sols de la séquence que nous venons de décrire, d'autres sols, du type polygéniques, sont développés dans la superposition de deux matériaux, ou dans des formations ayant subi une altération ou une évolution pédogénétique importante antérieurement à leur mise en place actuelle.

Les premiers (4.3. : H. 16) présentent assez peu de différences dans la partie supérieure du solum par rapport aux sols développés sur les formations récentes, tandis que les niveaux enfouis sont généralement plus riches en minéraux gonflants.

Les autres (4.3. : L.F. 6 - H. 55) présentent relativement rapidement des phénomènes de dégradation analogues à ceux observés dans les sols "glossiques" hydromorphes que nous avons décrits : apparition de minéraux intergrades du type vermiculite alumineuse dans le haut du profil, au niveau de la partie supérieure de l'horizon Bt et dans les plages de dégradation, accumulation relative de kaolinite et de minéraux illitiques dans la partie supérieure du solum.

En ce qui concerne les paléosols typiques, enfouis sous des couvertures plus récentes, nous avons vu (3.4.) que les paléosols du cycle du loess récent contiennent, à côté du quartz, de la kaolinite et de l'illite, une certaine quantité de vermiculite, alors que la teneur en argile gonflante est de plus en plus importante avec l'ancienneté du sol.

Les interprétations que nous venons de faire des résultats des déterminations minéralogiques effectuées sur les fractions argileuses des sols limoneux étudiés rejoignent donc certaines conceptions de Jackson et al. (1948-1952-1963), Millot et al. (1962-1966), De Coninck et al. (1968), Bullock (1968), Pedro (1969).

En conclusion, et d'une manière générale, nous pouvons dire que des transformations relativement nettes affectent ou ont affecté les minéraux argileux des matériaux limoneux loessiques au cours de leur évolution sous les conditions climatiques des différentes époques du quaternaire, ainsi qu'actuellement sous notre climat tempéré humide, sans cependant avoir provoqué une attaque des feuillets constitutifs.

Nous reprendrons dans le chapitre suivant les principaux points que nous venons de souligner pour les mettre en relation avec les autres caractères observés, ceci afin de tenter une définition des différents processus de la pédogenèse qui sont intervenus dans la séquence évolutive étudiée.

X

X

X

5.3. LES PROCESSUS D'EVOLUTION DANS LA SEQUENCE

Chacun des stades d'évolution que nous avons eu la possibilité de mettre en évidence possède des caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques bien particulières, et ces données en permettent donc une définition pédologique assez précise.

Les différents processus d'altération et d'évolution qui paraissent intervenir dans une séquence évolutive sur matériaux limoneux loessiques sont les phénomènes d'*altération des minéraux primaires, d'éluviation / illuviation, et de dégradation des minéraux secondaires*.

- L'altération minéralogique primaire caractérise essentiellement la phase de "lehmification" ainsi que l'évolution pédologique jusqu'au stade sol brun, mais se poursuit cependant vraisemblablement dans les stades ultérieurs.

- On constate tout d'abord une phase de *décarbonatation* du matériau qui s'individualise nettement par suite de la dissolution rapide des carbonates par rapport à l'évolution géochimique des silicates.

- Ensuite, une augmentation de la teneur en argile granulométrique intervient, sans que des phénomènes de déplacement importants soient observables. Il s'agit donc là d'une véritable "*argilification*" vraisemblablement issue de phénomènes d'altération en place. Il n'y a d'ailleurs que très peu de répartition préférentielle des colloïdes argileux dans la masse, et ce caractère est particulièrement bien observable sur le plan micromorphologique. Il est bien évident que si le matériau n'est pas calcaire à l'origine, cette phase peut constituer le stade initial de la séquence.

- Le matériau se structure progressivement avec différenciation tout d'abord de micro-agrégats dans la masse, caractéristiques à l'échelon microscopique, ensuite de macro-agrégats particulièrement bien développés à un certain niveau du solum ; un horizon (B) d'altération ou de structure s'exprime de plus en plus nettement.

- Le lessivage, processus d'*éluviation / illuviation* intervient ensuite. Par désaturation du complexe absorbant apparaissent progressivement des conditions favorables au déplacement de constituants sous forme colloïdales avec concentration et dépôts dans des couches sous-jacentes, essentiellement sous forme d'enrobements autour des agrégats structuraux.

L'ensemble des processus d'*argilification* jusqu'à l'*illuviation* incluse représente vraisemblablement ce qui a généralement été repris sous l'appellation de "*Lehmification*".

- Les processus de *dégradation* s'appliquent aux stades les plus avancés d'évolution des matériaux limoneux récents, et paraissent caractériser d'autre part le type de développement pédogénétique de matériaux plus anciens observés actuellement en surface.

Cette dégradation des sols lessivés est indiquée tout d'abord par la "dissolution" de la partie supérieure de l'horizon Bt, liés d'une part à l'existence d'une faible capacité d'échange, d'autre part à la libération de quantités appréciables d'aluminium, phénomènes qui impliquent une altération des argiles. On assiste à une remobilisation des colloïdes argileux qui subissent une nouvelle illuviation en profondeur. Ce stade serait celui d'une véritable "délehmification" (Manil, 1956 - De Coninck, 1968).

De l'étude de cette séquence d'évolution, et de l'observation de nombreux sols anciens développés dans des limons pléistocènes profonds, il ressort que dans la majorité des cas les caractères d'*hydromorphie* parfois très marqués que l'on y observe résultent d'un processus *secondaire* par rapport aux phénomènes d'évolution par illuviation proprement dits.

L'action de cet excès d'eau, à caractère alternatif, semble cependant favoriser très nettement une dégradation encore plus rapide des sols.

Nous allons tenter de préciser comment s'organisent les actions de ces grandes tendances, de manière à introduire quelques hypothèses concernant la nature des différents processus ou mécanismes de la pédogenèse intervenant dans l'élaboration de la séquence étudiée.

L'évolution des principaux paramètres ayant été exposés aux chapitres précédents, nous ne reprendrons ici que les points essentiels, en schématisant les interactions les plus marquées pour les différents critères d'évolution pédogénétique.

LES CRITERES D'EVOLUTION.

Nous présentons dans les tableaux ci-dessous, sous forme *schématique*, d'une part la succession des types de développement, d'autre part la variation des éléments fondamentaux de la pédogenèse.

Les types de sols suivants sont représentés :

- Sol brun calcaire ou calcique : SBC
- Sol brun : SB
- Sol brun faiblement lessivé : SBFL
- Sol brun lessivé : SBL

- Sol lessivé : SL
- Sol lessivé en voie de dégradation : SL(D)
- Sol lessivé classique hydromorphe : SLGH
- Sol lessivé à tendance planosolique : SLGP

Les sols lessivés acides des Ardennes, qui se différencient assez nettement de la séquence théorique, seront traités en fin de chapitre.

Les éléments d'interprétation suivants seront discutés :

- Complexe absorbant
- Distribution des argiles
- Importance de l'hydromorphie
- Comportement de l'Aluminium
- Comportement du Fer
- Evolution des minéraux argileux.

L'importance de certaines variations au sein du solum nous a amené à représenter séparément le comportement de quelques éléments dans les horizons de surface et dans les horizons profonds (tableau Horizons superficiels - Horizons profonds).

Nous analyserons successivement ces schémas en fonction de l'évolution des paramètres, ensuite de leurs interactions.

Complexe absorbant.

Après une décarbonatation affectant tout d'abord les couches superficielles, ensuite les niveaux profonds, jusqu'au stade SB, on constate une désaturation progressive du complexe absorbant. L'Aluminium échangeable apparaît sur le complexe dès le stade SL, particulièrement dans l'horizon A₂, où il est accompagné d'H échangeable. Au demeurant, ceci correspond à la variation la plus importante enregistrée pour les valeurs du pH.

La désaturation se marque aux dépens de Ca et Mg, tandis qu'on observe une augmentation relative de K, peut-être due à des phénomènes d'altération.

Une aluminisation de plus en plus marquée du complexe intervient ensuite dans les stades ultérieurs, particulièrement au niveau des horizons en voie de dégradation.

Distribution des argiles.

Après l'"argilification" des tous premiers stades d'évolution, où on assiste à un enrichissement en argile fine, les mécanismes de lessivage provoquent le déplacement de complexes argileux riches en fer. Il s'agit de l'illuviation " primaire ". En un premier temps ce sont essentiellement les argiles fines qui migrent, et ce jusqu'au stade que nous avons défini *SL*, où une certaine proportion d'argiles plus grossières se déplace également.

Dès le stade *SL(D)*, une migration de produits déferrisés intervient, constituée des deux types d'argiles. Nous avons affaire là à l'illuviation dite "secondaire" en milieu acide et hydromorphe.

Hydromorphie.

Les caractères d'engorgement, d'oxydo-réduction et d'hydromorphic proprement dite apparaissent, en relation comme nous l'avons vu avec l'évolution des caractéristiques physiques, essentiellement au cours du stade *SL(D)* pour prendre de plus en plus d'ampleur par la suite.

Ces phénomènes sont donc "remontants" dans le solum comme le second schéma nous le montre.

Comportement de l'Aluminium.

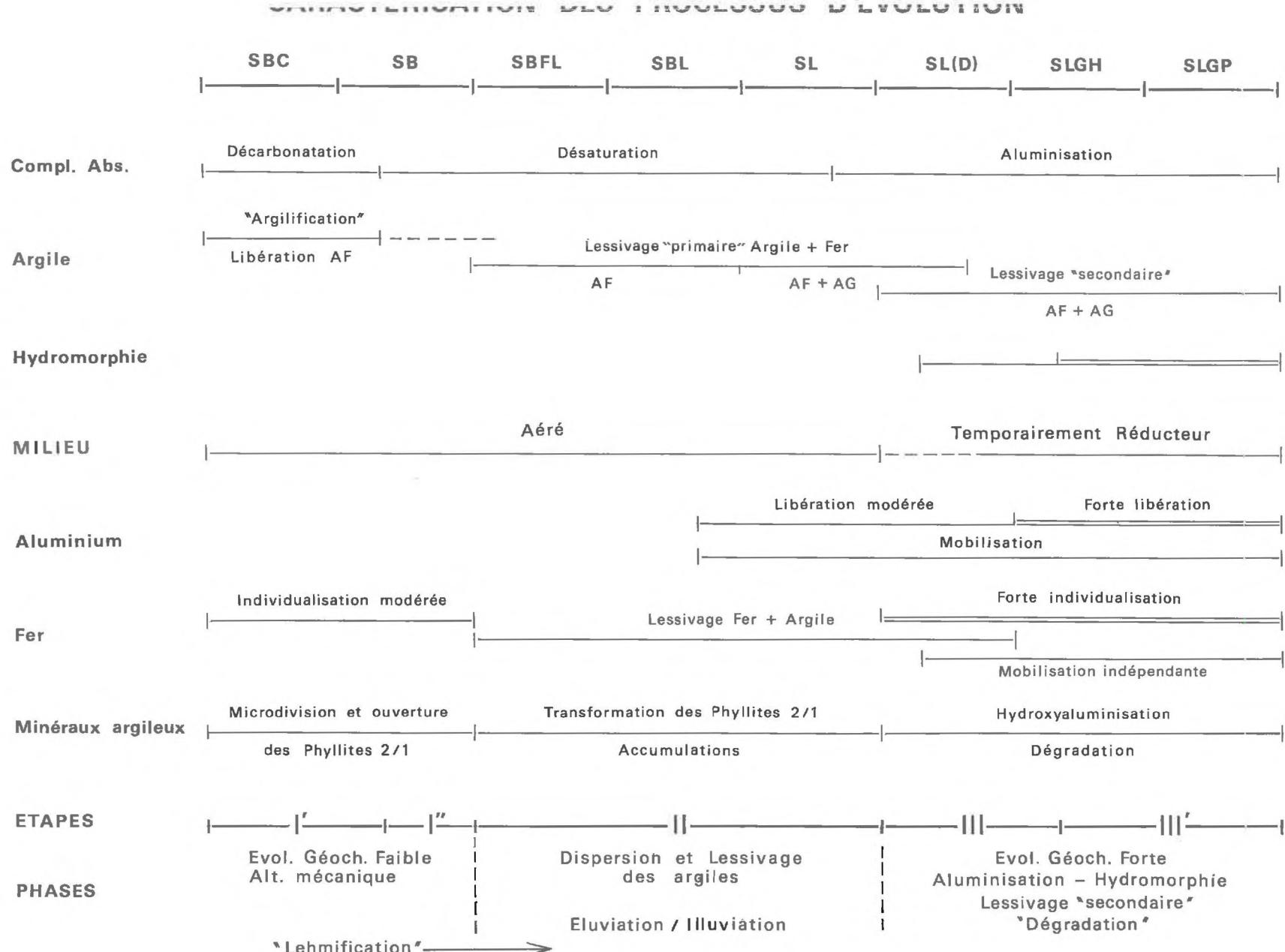
Une libération modérée de Al sous forme libre intervient dès la transition *S_EL/SL*, qui s'intensifie progressivement dans les stades ultérieurs. La mobilisation de cette forme est pratiquement immédiate, et sa migration se surimpose à la différenciation texturale du profil.

On constate qu'une libération importante d'Al dans la partie supérieure du solum apparaît avant la recrudescence de l'individualisation et de la mobilisation de Fe. Le comportement de Al semble donc relativement autonome par rapport aux phénomènes de lessivage proprement dits.

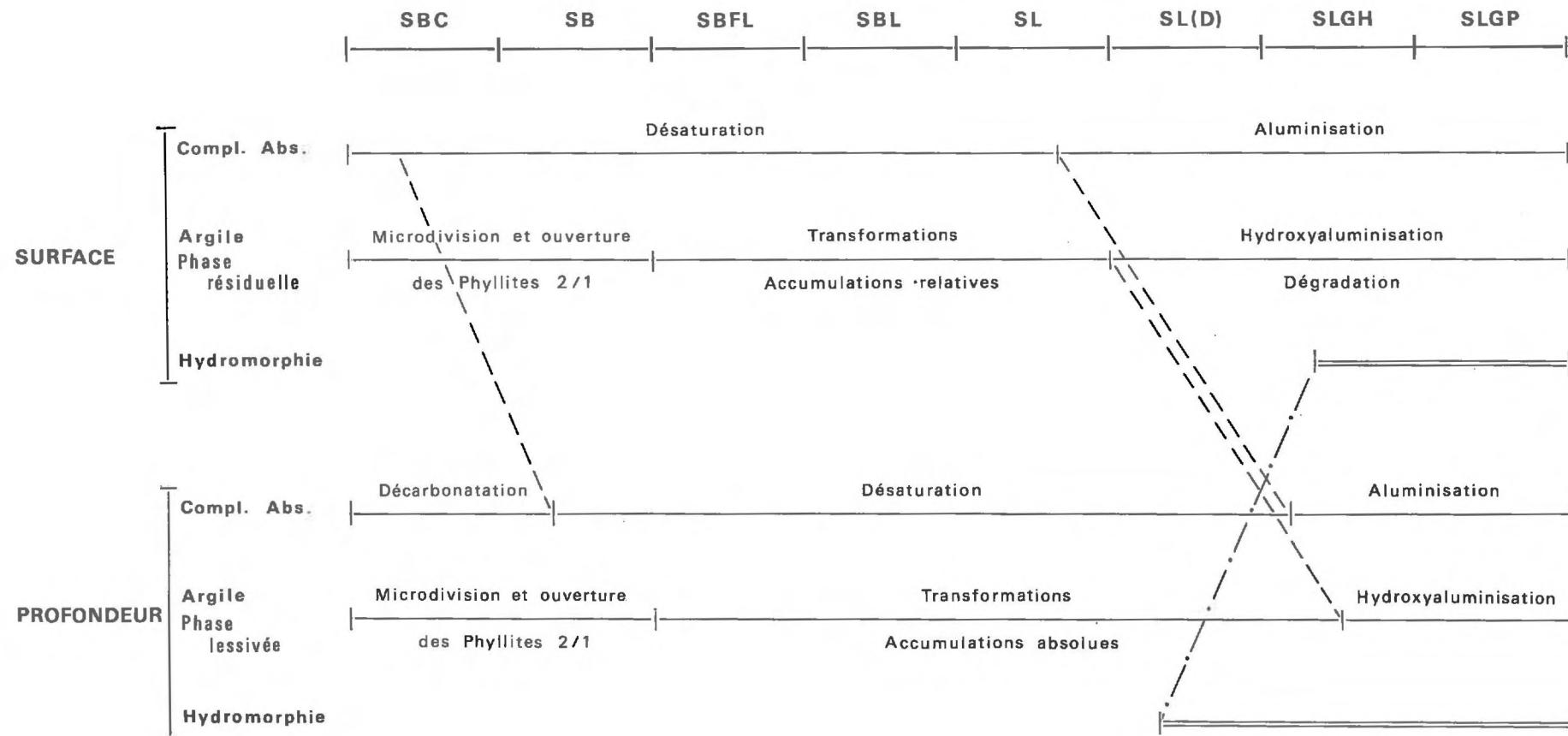
Comportement du fer.

Après une individualisation modérée dans les premiers stades d'évolution, l'illuviation de complexes argilo-ferriques caractérise une phase de développement en milieu aéré, avec accumulation au niveau de l'horizon argillique. La variation du rapport Fer libre / Fer HCl permet d'entrevoir certaines transformations par altération et réorganisation au sein de cet horizon au cours de cette phase. Une évolution plus agressive intervient à partir de *SL(D)*, avec individualisation importante de fer dans les horizons supérieurs. Une dissociation entre le fer et l'argile apparaît au cours de ce stade pour s'intensifier ensuite dans les stades suivants, sous l'influence de conditions réductrices.

Les produits de déplacements en milieu aéré présentent une teneur en fer libre rapportée à l'argile moyenne de 4 à 5, tandis que ceux liés à un milieu réducteur, déferrisés, sont caractérisés par une valeur de 1 environ.



HORIZONS SUPERFICIELS – HORIZONS PROFONDS



Evolution des minéraux argileux.

L'évolution dominante qui se manifeste en début de séquence est celle d'une ouverture des minéraux 2/1.

Des transformations interviennent ensuite ; apparition de minéraux intermédiaires et variations dans les proportions relatives par des phénomènes de déplacements préférentiels. On constate une accumulation relative des argiles kaolinitiques et du quartz dans le haut des profils, et une accumulation absolue de minéraux gonflants au niveau des horizons argiliques. Ce mécanisme justifie une première variation enregistrée dans la capacité d'échange cationique de la fraction argileuse.

A partir de la transition $SL / SL(D)$ interviennent les processus d'aluminisation des minéraux intergrades. Cet effet "antigibbsite" affecte essentiellement et tout d'abord les horizons de "dégradation", avec possibilité de genèse de chlorites secondaires, pour atteindre les horizons plus profonds dans les stades les plus développés. Cette évolution est par ailleurs confirmée par la variation importante de la capacité d'échange de l'argile.

Enfin, nous avons vu qu'au travers de notre séquence, une évolution biodynamique importante se dégageait : remontée de la frange d'activité biologique dominante et passage progressif d'humus du type mull à des humus du type moder, ce qui implique une variation importante dans la nature de la matière organique.

INTERPRETATION GÉNÉRALE.

De l'analyse que nous venons de faire nous pouvons déduire, dans un premier temps, l'importance d'une distinction fondamentale sur la nature de l'évolution en fonction des conditions de *milieu* :

- évolution en milieu *aéré*,
- évolution en milieu *temporairement réducteur*.

La variation de la saturation du complexe absorbant, reflet des conditions d'acidité, permet de dissocier au sein du premier ensemble une évolution d'une part en milieu calcique ou saturé, d'autre part en milieu à désaturation progressive ; la désaturation étant par ailleurs toujours assez marquée dans le second.

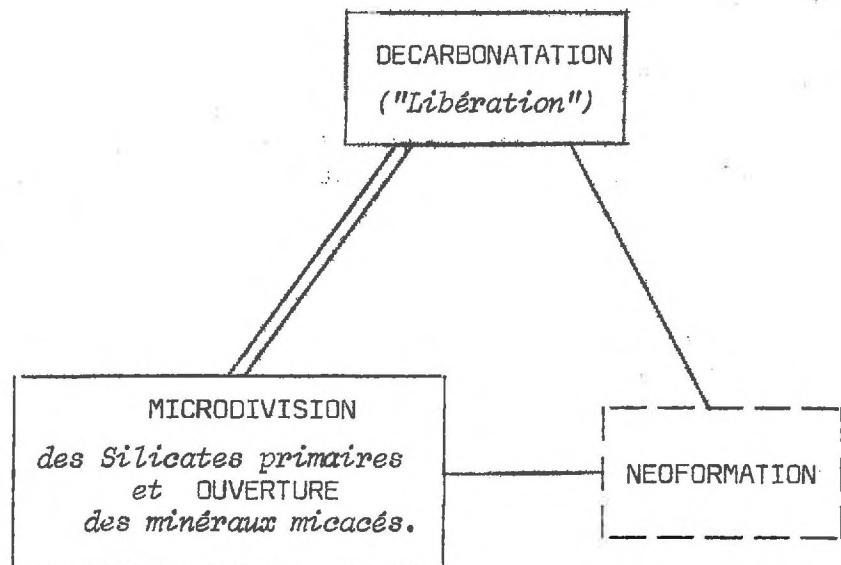
Dans un deuxième temps, il est possible de distinguer plusieurs étapes, compte tenu de l'influence de facteurs intrinsèques dominants, se regroupant en phases d'évolution essentielles.

Nous distinguerons trois *phases* principales qui peuvent se caractériser de la façon suivante.

I. - Altération mécanique associée à une évolution géochimique faible, en milieu saturé.

Une subdivision en deux étapes apparaît indispensable, dissociant le Décarbonatation (I') de ce que l'on pourrait appeler "*Brunification*" normale (I").

Cette première phase peut se schématiser comme suit :



Nous avons vu que la décarbonatation permettait la libération d'une certaine quantité d'argile fine, tandis qu'une altération mécanique par fractionnement aménait, associée à de faibles néoformations, une augmentation du taux d'argile granulométrique.

Les deux grands aspects de l'altération (Pédro, 1968) sont donc représentés ici : - désagrégation physique - décomposition chimique. Cette dernière serait naturellement du type hydrolytique et correspondrait à une bisiallitisation faible du point de vue cristallochimique.

En ce qui concerne les minéraux secondaires, on assiste à une évolution limitée, par ouverture des phyllites 2/1.

Rappelons que ces notions correspondent sensiblement à celles avancées par Scheffer et al. (1960-1966).

Enfin, une individualisation in situ du fer intervient, ce phénomène apparaissant d'importance modérée.

II. - Differentiation du profil par les mécanismes de lessivage, associée à une évolution géochimique faible.

Les phénomènes d'*Eluviation / Illuviation* caractérisent cette phase, par dispersion et lessivage des argiles en milieu progressivement désaturé.

Ces déplacements affectent pratiquement exclusivement des constituants argilo-ferriques, et correspondent au lessivage "primaire". Il s'agit

du premier type de lessivage selon *Manil* (1962), caractérisant pour *Duchaufour* (1966) les sols lessivés mésotropes lorsqu'il n'y a pas d'Al libre, et oligotropes lorsque ce dernier est présent.

Une certaine libération d'Aluminium intervient donc, cet élément se présentant tout d'abord sous une forme libre et, avec l'augmentation de l'acidité, sous forme échangeable.

L'évolution des minéraux argileux se traduit d'une part par une transformation des phyllites 2/1 par ouverture des feuillets et tendance à la vermiculisation (*Jackson*, 1948-1963 - *Millot*, 1964-1968 - *Pédro*, 1964-1968 - *Robert*, 1970), d'autre part par une modification progressive dans les proportions des différents types de minéraux du fait des migrations préférentielles.

La "*lehmification*", comme nous l'avons vu, pourrait correspondre à la phase I ou aux phases I et II.

III. - Evolution géochimique forte en milieu désaturé et réducteur, associée à un lessivage secondaire.

Cette phase, correspondant à la dégradation des sols lessivés, est dominée par la dynamique de l'Aluminium : libération par altération, participation au complexe absorbant, répartition dans le solum compte tenu de la différenciation préalable induite par le lessivage (*Duchaufour*, 1964), intervention dans la transformation des minéraux argileux.

Celle du fer est également très importante : forte individualisation, dissociation par rapport à l'argile (*Gebhardt*, 1964 - *Zonn*, 1966), mobilisation indépendante et redistribution sous l'influence du milieu temporairement réducteur.

Une remobilisation des argiles déferrisées intervient, provoquant une "dégradation" de l'horizon argillique, et permettant une nouvelle illumination dite "secondaire" ou hydromorphe (*De Coninck*, 1968).

Il n'est pas impossible qu'une partie des argiles ainsi déplacées, ou des produits d'altération éventuellement libérés, soit partiellement expulsée hors du solum (*Duchaufour* et al., 1967 - *Bullock*, 1968).

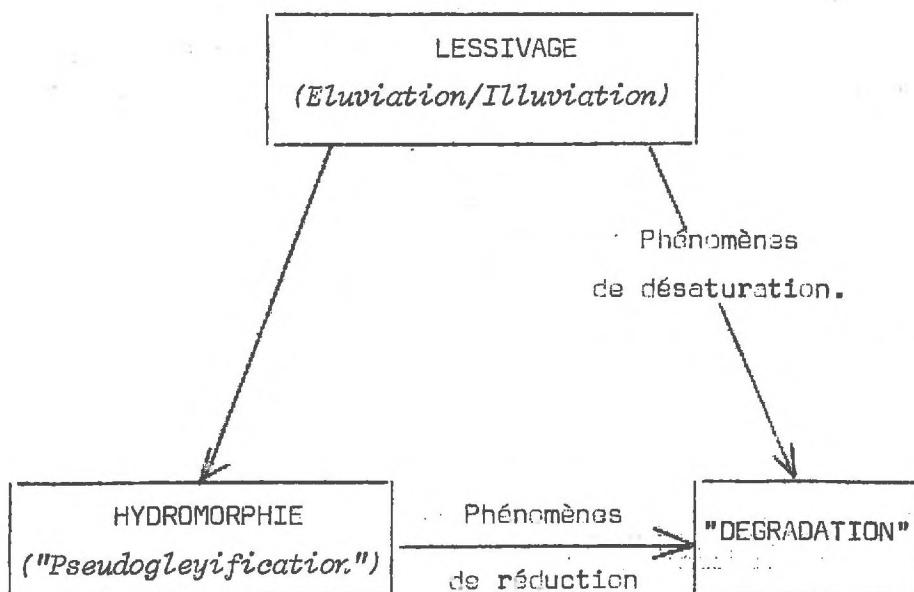
Nous sommes donc en présence d'un deuxième type de lessivage (*Manil*, 1962), qui pourrait partiellement correspondre aux sols lessivés podzoliques à pseudogley de *Duchaufour* (1966).

Au sein de cette phase, l'étape III' correspond à une hydromorphie importante affectant les horizons supérieurs du solum.

L'évolution des minéraux argileux est très caractéristique. En conditions d'acidolyse moyenne (*Pédro*, 1968 - *Robert*, 1970), une redistribution de l'aluminium provoque l'"hydroxyaluminisation" des couches interfoliaires avec apparition de minéraux de transformation du type intergrades Al et chlorite secondaires. Il s'agit, comme nous l'avons vu plus haut, de l'effet "antigibbsite" de *Jackson* (1963).

Ces résultats confirmont et complètent ceux de *De Coninck* (1968) et *Bullock* (1968).

Les faits principaux des phases II et III peuvent se schématiser comme suit, compte tenu de leurs interactions.



Les relations entre les trois mécanismes représentés soulignent clairement les interférences qui interviennent dans les sols les plus évolués, et qui posent un problème important pour une systématique génétique des sols (Manil, Van den Stock et al., 1969).

Les grands processus pédogénétiques affectant les sols sous climat tempéré humide sont généralement considérés comme les suivants : "Brunification" - "Lessivage" - "Podzolisation" (Duchaufour, 1968).

L'action de ces processus peut naturellement présenter d'assez grandes variations en fonction de la nature des matériaux originels auxquels ils s'appliquent.

Dans la séquence que nous avons étudiée, nous avons pu mettre en évidence les interventions successives ou simultanées de mécanismes qui se rattachent à un ou plusieurs des processus cités, et nous venons par ailleurs de voir que des interactions importantes peuvent se présenter.

Ces mécanismes qui interviennent dans une *séquence d'évolution progressive théorique sur matériaux limoneux loessiques*, sont donc les suivants :

- Décarbonatation - Argilification
- Désaturation
- Lessivage " primaire "
- Hydromorphie
- Lessivage " secondaire " - Fluorisation
- "Dégradation".

Nous pensons qu'au fur et à mesure de l'augmentation de nos connaissances il deviendra difficile de ne pas dissocier les grands processus classiques en un nombre plus important de "tendances" permettant de mieux cerner les possibilités d'évolution des différents sols compte tenu des conditions de milieu qui régissent leur développement.

Les sols lessivés acides des Ardennes, plus ou moins dégradés et à pseudogley, nous ont paru difficiles à inclure dans notre séquence théorique. Leur évolution n'a en effet vraisemblablement pas débuté à partir d'un matériau original analogue aux autres que nous avons traités, mais dans des dépôts relativement altérés et probablement passablement acides.

Cette faible saturation, ou acidité, initiale, pourrait avoir provoqué une aluminisation pratiquement immédiate, qui, par l'intermédiaire ensuite d'une végétation forestière continue, n'aurait permis qu'un lessivage relativement faible dans certaines conditions (Duchaufour et Souchier, 1969).

Quoiqu'il en soit, leur comportement actuel correspond grossièrement à l'étape évolutive III de notre séquence : dégradation de la fraction minérale et hydromorphie.

De cette analyse des processus ont peut déduire que la pédogenèse quaternaire sous notre climat ne semble pas avoir permis, sur matériaux limoneux luessiques, une évolution géochimique importante au cours de la phase primaire de l'altération, mais que, par contre, celle correspondant à la dégradation des minéraux secondaires est très nette.

Au demeurant, en ce qui concerne l'évolution minéralogique, il faut enregistrer la stabilité des édifices 2/1 sous les conditions climatiques du quaternaire dans la région étudiée, seules des transformations étant intervenues.

Les deux phases d'évolution géochimique que nous venons d'évoquer encadrent des processus d'éluviation / illuviation très importants et fondamentaux pour la différenciation des profils de sols.

Ce que nous venons d'exposer a déjà été appréhendé par d'autres auteurs antérieurement, mais nous pensons que notre travail apporte d'une part la confirmation tangible de certaines hypothèses, d'autre part, des éléments nouveaux dans la connaissance de la dynamique de l'évolution, enfin la possibilité d'intégrer l'ensemble des processus dans un système cohérent ; il constitue une base d'interprétation solide, compte tenu d'un fond d'observation très vaste ayant fait l'objet d'une analyse relativement fouillée.

- CONCLUSIONS GENERALES -

Nous avons donc essayé dans ce travail d'étudier de manière détaillée les sols développés sur *limon loessique* dans le nord du Bassin de Paris, afin d'en déduire un maximum de données concernant les processus de leur pédogenèse.

Sans trop nous répéter, nous allons rappeler les quelques éléments essentiels qui ont été à l'origine de la recherche, avant d'en mettre en évidence la portée et les possibilités de généralisation des résultats.

La base de notre travail a été l'étude des sols dans leur contexte paysagique, et nous avons mis l'accent sur les unités écologiques constituées par les différentes régions naturelles. L'option retenue a donc été, dans un premier temps, celle d'une étude de géographic pédologique au sens large, dans un domaine naturel bien déterminé. Une cartographie détaillée nous a montré l'importance des facteurs de répartition des sols par rapport au modèle, ainsi que celle des liaisons entre unités voisines.

Il était donc nécessaire de présenter les résultats de la prospection d'un grand territoire ; c'est ce que nous avons fait dans les deux premières parties du travail. Cet inventaire nous a fait prendre conscience de différents problèmes à résoudre, liés au matériau loess, aux relations possibles entre les divers stades d'évolution observés, aux processus de la pédogenèse.

Une étude détaillée de la couverture loessique de la région, traitée en troisième partie, nous a permis de définir avec une précision suffisante les principales caractéristiques du matériau originel limoneux.

Les deux dernières parties présentent l'essentiel de notre recherche sur la pédogenèse des sols sur loess.

Nous avons désiré utiliser une démarche de recherche faisant appel à la dynamique des processus évolutifs, et pour ce faire nous avons travaillé dans le cadre d'une *séquence évolutive théorique*, compte tenu naturellement de certaines restrictions dans les possibilités d'interprétation, du fait de différences dans la nature, le mode de mise en place ou l'ancienneté des matériaux originaux.

Nous avons pu définir les caractères distinctifs dominants des principaux *stades d'évolution* successifs d'une séquence progressive théorique sur matériaux limoneux, allant du *sol brun calcique*, ou du *sol brun* au *sol lessivé glossique hydromorphe*.

L'analyse des variations montrées par de nombreux critères génétiques nous a permis de préciser l'intervention de différents *processus* de la pédogenèse et d'améliorer ainsi nos connaissances sur les mécanismes mis en cause.

Ces processus sont les suivants, dans l'ordre de leur apparition dans la séquence : *Décarbonatation - Argilification - Décalcification - Désaturation - Lessivage* : éluviation/illuviation, tout d'abord en milieu séré et modérément acide, ensuite en milieu plus acide et réducteur - *Hydro-morphie - "Dégradation"*.

Les mécanismes liés à ces processus s'organisent en trois phases d'intervention essentielles :

- Alteration mécanique, associée à une évolution géochimique faible.
- Différenciation du profil par le lessivage, associée à une évolution géochimique faible.
- Evolution géochimique forte, associée à un lessivage secondaire.

Les actions peuvent donc être soit successives, caractérisées par des enchaînements, soit partiellement simultanées.

La séquence que nous avons mise en évidence est une suite évolutive *chronologique idéale*, faisant essentiellement appel au facteur temps, régionale, et essentiellement valable sous climat tempéré humide.

Il est évident que des variations très importantes peuvent être apportées dans la nature et la succession des stades selon le type de climat.

Les modifications peuvent porter sur plusieurs mécanismes : facilité de décarbonatation, rapidité et intensité de l'altération, du lessivage, apparition de phénomènes de rubéfaction, variations dans l'évolution de la matière organique.

Les matériaux subissant l'action d'agents génétiques participant à un climat du type méditerranéen présentent généralement des phénomènes de rubéfaction plus ou moins intenses selon les conditions locales : les fluctuations saisonnières assez accentuées permettent l'entraînement en profondeur de particules limoneuses fines et provoquent des phénomènes alternatifs de retrait assez marqués. Une structuration particulièrement développée des matériaux limoneux y est souvent assez caractéristique, avec des horizons Bt très différenciés.

Sous climat continental assez sec, à contrastes marqués, apparaissant des sols du type chernozem caractérisés par une évolution particulière de la matière organique, ainsi que par l'influence d'une très intense activité biologique.

Une séquence *climatique* est celle mise en évidence en Autriche par Fink (1956), où dans la zone d'extension du loess, trois secteurs climatiques sont caractérisés par trois types de sols paraissant en équilibre avec les conditions du milieu : le chernozem, le sol brun et le sol brun lessivé apparaissant respectivement d'est en ouest.

D'autre part, des études ont montré que dans la zone d'extension d'un manteau de loess, une certaine variation dans la composition de ce matériau était enregistrée lorsque l'on effectuait une série continue d'observations suivant la direction du dépôt à partir de son origine probable (Smith, 1942 - Springer, 1952 - Simonson 1952). Ces travaux ont prouvé que l'épaisseur

du manteau diminuait, que la teneur en calcaire s'amenuisait tandis que celle en argile augmentait. Un dépôt plus lent des matériaux en fin de transport semble avoir permis une altération contemporaine de la sédimentation assez importante, ce qui a permis une évolution plus rapide des sols qui s'y sont développés.

Une séquence de ce type, au lieu d'être d'ordre *chronologique* est *géographique*, et due à une variation *lithologique* progressive du matériau.

Nous avons constaté, notamment lors de la description du cadre pédologique général, que des études de toposéquences comme celles préconisées par G. Bocquier (1971) s'avéraient difficiles à réaliser sur limon loessique, pour diverses raisons que nous avons évoquées : manteau de couverture reposant sur des substrats très divers, nécessité de l'étude d'une vaste région.

Au demeurant, il est certain que des problèmes particuliers, liés à des variations continues de certains caractères en fonction du relief, pourraient être étudiés dans le cadre d'analyses encore plus détaillées que celles que nous avons réalisées. Ils devraient l'être au sein de régimes pédologiques régionaux. Nous pensons par exemple aux passages latéraux entre sols glossiques et sols planosoliques.

Les résultats du travail que nous venons de présenter, la somme de nos observations personnelles dans de nombreuses régions possédant des sols développés sur matériaux de granulométrie limoneuse, ainsi que les données antérieures mentionnées dans la littérature nous permettent d'introduire des possibilités de généralisation de nos interprétations.

Nous avons en effet été amené d'une part à effectuer de nombreuses *comparaisons*, d'autre part à mettre en évidence les principaux *facteurs de variations* entre notre séquence et les unités observées par ailleurs. Des corrélations réalisées sur des bases logiques et raisonnables ont pu en être déduites.

Tout d'abord, en comparant les différentes observations effectuées sur le territoire français, on constate que cette chronoséquence semble intéresser la grande majorité des formations superficielles de nature limoneuse : couverture loessique, niveaux de limons anciens, produits de redistribution locale limoneux, terres du type "boulbène", matériaux d'altération de roches éruptives ou sédimentaires riches en limon.

Des stades parmi les plus évolués se retrouvent à l'est du Bassin de Paris : Plaisance (1964), Le Tacon (1967), Duchaufour (1971), Baize (1971), Chrétien et Mériaux, Dutil et al. (travaux en cours), développés essentiellement dans des sédiments de mise en place relativement ancienne.

Dans la partie centrale du territoire, les études de Fedoroff (1971), Moremans, Favrot et al. (travaux en cours), mentionnent des degrés d'évolution très analogues.

Le sud-ouest fait actuellement l'objet de recherches très avancées sur les matériaux limoneux des terrasses alluviales, citons celles de Bégon et Favrot qui traitent des sols de boulbène.

En Belgique, il faut naturellement citer le travail fondamental de Dusal (1953), sur les limons récents, ainsi que ceux de Manil, Louis (1954), Pérot (1956), Tavernier et Maréchal (1957-1958).

Des stades très hydromorphes se retrouvent également aux Pays-Bas, développés dans des loess typiques ou au niveau de terrasses : Van den Broek et al. (1964-1969), Bouma et al. (1968).

De nombreuses corrélations sont également possibles avec les sols développés dans les couvertures loessiques d'Allemagne : Altemüller (1957), Lieberoth (1963-1964), Meyer et al. (1960-1966), et des Etats-Unis : Smith (1942), Simonson (1952)...

Nous avons pu observer nous-mêmes, avec des variations relativement importantes cependant, des développements analogues dans des couvertures limoneuses du Portugal.

Un problème intéressant à résoudre apparaît à l'analyse de la répartition des sols limoneux sur le territoire français : dominance des sols glossiques dans la partie septentrionale, dominance des sols à tendance planosolique dans le sud-ouest. Nous avons déjà introduit quelques hypothèses à ce sujet récemment (Bégon et Jamagne, 1971), et des études sont actuellement en cours dans le sud du Bassin de Paris, qui paraît être une zone de transition pédoclimatique.

Nous voyons donc que de nombreuses possibilités de généralisation, de vérification et de confirmation des conceptions avancées se présentent à nous, que nous comptons largement utiliser dans nos futurs travaux.

La démarche de recherche que nous avons adoptée nous a paru la plus rationnelle compte tenu du but que nous nous étions fixé.

Partant d'un grand nombre d'observations morphologiques et de caractérisations classiques, nous avons progressivement entrevu la possibilité d'avancer dans la connaissance des grands types de sols et des principaux processus pédogénétiques par l'utilisation de techniques permettant d'atteindre des niveaux de perception de plus en plus détaillés. Nous avons en fait essayé d'analyser le matériau sol à des niveaux d'organisation successifs de plus en plus fins.

La synthèse des données macromorphologiques, micromorphologiques et analytiques nous a amené jusqu'à une ouverture vers l'analyse microspatiale, nous montrant la réelle hétérogénéité du matériau sol que les déterminations classiques tendaient à considérer jusqu'à présent comme homogène par rapport aux possibilités techniques de caractérisation.

Cette façon de concevoir le travail nous a permis, partant d'observations essentiellement écologiques, de descendre jusqu'à un niveau de recherche fondamentale, pour revenir ensuite à des possibilités de synthèse et d'extrapolation au niveau des unités-sols dans le paysage.

Nous concluerons en espérant que notre travail apporte un certain nombre d'éléments intégrés sur le problème de la connaissance des sols développés sur matériaux limoneux, et contribue ainsi à l'amélioration des données concernant les processus de la pédogenèse sous climat tempéré humide.

- B I B L I O G R A P H I E -

- ABRARD R. - 1950 - "Géologie régionale du Bassin de Paris" - Payot, Paris. 297 p.
- AGAFONOFF V., MALYCHEFF V. - 1929 - Le loess et les autres limons du plateau de Villejuif - Bull. Soc. Géol. France (4), t. XXIX, pp. 109-145 - Paris.
- AGAFONOFF V. et BRIOUX Ch. - 1931 - Etude sur le sol de limon de la Seine-Inférieure en particulier sur le limon des plateaux de Blosseville-Bonsecours - Ann. Agro.
- AGAFONOFF V. - 1936 - "Les sols de France au point de vue pédologique". - Dunod. 154 p.
- ALLEN V. T. - 1930 - Minerals formed in the weathered zones of glacial deposits - Amer. Soil Survey Assoc., Bull. XI : 116.
- ALTEMULLER H.J. - 1956 - Mikroskopische untersuchung einiger Loss-Bodentypen mit hilfe von dunnschliffen. - Z. Pflanzenerähr, Düng, Bodenkunde 72 : 152-167.
- ALTEMULLER H.J. - 1957 - Bodentypen aus Löss in Raume Braunschweig und ihre Veränderungen unter dem Einfluss der Ackerbaues - Thèse de Doctorat, Institut für Bodenkunde, Université de Bonn, 250 p.
- ALTEMULLER H.J. - 1962 - Verbesserungen der Einbettungs - und Schleiftechnik bei der Herstellung von Bodendünnschliffen mit Vestopal - Z. Pflanzern., Düng. Bodenk., 99, 164-177.
- AMERYCKX J. - 1960 - "La pédogénèse en Flandre sablonneuse". - Pédologie X. n° 1. pp. 124-190.
- AMERYCKX J. - Soil Classification - International Training Ceter for Post - Graduate Soil Scientists - University of Ghent - Gand 1965.
- APPELMAN Fr. - 1956 - "Variation de la composition granulométrique de sédiments éoliens en rapport avec leur latitude et leur altitude". - Pédologie, VI, p. 26-37.
- ARNOLD R. W. - 1963 - Silans in some Brunizem soils - Ph.D. thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
- AUBERT G. - 1949 - Les sols des plateaux normands - Pédologie - Commission du Bassin de la Seine - pp. 1-16.
- AUBERT G. et DUCHAUFOUR Ph. - 1956 - Projet de classification des sols - VIe Congrès Intern. Sc. du Sol, vol. E, pp. 597-604 Paris.
- AUBERT G. - 1963 - La classification des sols : la classification pédologique française. Cah. Pédologie O.R.S.T.O.M., n° 3, p. 1-7. Paris
- AUBERT G., BOULAIN J. - 1967 - La Pédologie - "Que sais-je ?" n° 352, P.U.F., Paris , 126 p.
- AVRIL P. - 1957 - Les sols podzoliques bruns en Ardenne belge - Ibid. 7, p. 97-101.
- BAIZE D. - 1971 - Contribution à l'étude des sols des plateaux jurassiques de Bourgogne - Thèse 3e cycle - Faculté des Sciences, Paris - 156 p.

- BAIZE D. - 1972 - Micromorphologie des "Terres d'Aubues" des plateaux de Bourgogne - Bull. Assoc. Franc. Etude du sol - n° 1-2 - pp. 63-72.
- BALDWIN M. - 1928 - The Gray Brown Podzolic soils of eastern United States - Trans. Intern. Conf. of Soil Sci. Ist Cong. Washington. IV : 276-282.
- BARTELLI L. J. and ODELL R. T. - 1960 - Laboratory studies and genesis of a clay-enriched horizon in the lowest part of the solum of some Brunizem and Gray Brown Podzolic soils in Illinois - Soil Sci. Soc. Amér. Proc. 24 : 390-395.
- BEGON J.C. et JAMAGNE M. - 1971 - Sur la genèse de sols limoneux hydromorphes en France - C.R. du Congrès de la S.I.S.S. de Stuttgart 1971. sous presse.
- BEGON J.C. - 1972 - Aspects micromorphologiques de la génèse des sols de boulbène - Bull. Assoc. Franc. Etude du sol - pp. 33-48 n° 1-2.
- BEGON J.C. - 1972 - Etude morphologique et pédologique des terrasses alluviales de l'Ariège - Thèse - Paris. (en préparation).
- BERG L.S. - 1960 - Loess as a product of weathering and soil formation - Israël Progr. Scient. Transl. Oldbourne Press London, 207 p.
- BETREMIEUX R. - 1951 - "Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols". - Ann. Agric. n° 3. pp. 193-295.
- BLANCHET R., PERIGAUD S., CHAUMONT G. et NADEAU J.C. - 1960 - "Acidité d'échange et alumine libre ou échangeable des sols". - Ann. Agric. n° 6. pp. 621-649.
- BLOOMFIELD C. - "Some Observations on gleying". - Journal of Soil Science - 1950 - 1 p. 205.
- BOCQUIER G. - 1971 - Génèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad - Interprétation biogéodynamique - Thèse - ORSTOM - Paris - 364 p.
- BOCQUIER G., PAQUET H., MILLOT G. - 1970 - Un nouveau type d'accumulation éolique dans les paysages géochimiques : l'invasion remontante de la montmorillonite - C.R. Acad. Sci. Fr., t. 270, pp. 460-463.
- BONNEAU M., LE TACON F., DUCHAUFOUR Ph. - 1967 - Réflexions sur l'importance du facteur temps dans l'évolution des sols - Science du Sol - n° 2. pp. 13-24.
- BONNET A. et BORNAND M. - 1970 - Pédologie et Quaternaire dans la vallée du Rhône moyen - Bull. A.F.E.Q. n° 2-3. pp. 105-116.
- BORDES F. - 1947 - Les limons quaternaires du bassin de Paris et du Nord de la France - Bruxelles, M. Hayez, Impr. Acad. Royale de Belgique - pp. 362-371.
- BORDES F. - 1949 - Loess et cailloutis : le complexe Icessique, phénomène cyclique. Sédimentologie et Quaternaire - Bordeaux, Led-Sam, pp. 173-181.
- BORDES F. - 1952 - Stratigraphie du loess et évolution des industries paléolithiques dans l'Ouest du Bassin de Paris - l'Antropologie, T. 56, n° 1-2.
- BORDES F. - 1954 - Les limons quaternaires du Bassin de la Seine - Arch. Inst. Pal. hum., Mém. n° 26, 472 p., 34 tabl. Paris.
- BLIET L., HEBERT J., JAMAGNE M., MAUCORPS J. - 1967 - Mémoire des cartes des sols : Château - Thierry 5-6 - Meaux 7-8 - Carte des sols de l'Aisne 1/25.000 - Publ. Ch. Agr. Laon 217 p.

- BORDES F. - 1969 - Le loess en France - Etudes françaises sur le Quaternaire - Suppl. Bull. Ass. Fr. Et. Quat. (A.F.E.Q.). I.N.Q.U.A. pp. 69-76. Paris.
- BORNAND M. - 1969 - Les sols rouges du confluent Rhône-Isère - Science du Sol - 2. pp. 3-37.
- BOULAIN J. - 1964 - La notion de série dans les cartes de sols - Texte ronéo - E.N.S.A. Grignon.
- BOULAIN J. - 1969 - Sol, pedon et genon. Concepts et définitions - Bull. Ass. fr. Et. Sol, n° 2, pp. 31-40.
- BOULAIN J. - 1970 - Les sols de France - Coll. "Que sais-je ?".
- BOUMA J., PONS L.J. et VAN SCHUYLENBORGH J. - 1968 - The formation of a glossudalf in loess - Neth. J. Agri. Sc. 16 - pp 58-70.
- BOUMA J. et VAN SCHUYLENBORGH J. - 1969 - The formation of a glossaqualf in a silt-loam terrace deposit - Neth. J. Agri. Sc. 17 - pp. 261-271.
- BOURDIER F. - 1947 - Les caractères distinctifs de chaque glaciation alpine d'après les couvertures de loess et les sols d'altération - In Géologie des terrains récents dans l'Ouest de l'Europe, pp. 332-346. Sess. extr. Soc. belges de Géologie. Bruxelles.
- BOURDIER F., GRAINDOR J.M. - 1950 - Les limons quaternaires de la région de Rouen et leurs corrélations possibles avec ceux du bassin du Rhône - C. R. Somm. Soc. Géol. France, pp. 107-109. Paris.
- BOURDIER F. - 1969 - Aperçu sur la stratigraphie des limons quaternaires du bassin de Paris - Mém. h. sér. Soc. géol. de France, n° 5. pp. 53-56.
- BOURGUIGNON P. - 1955 - Minéraux volcaniques de l'Eifel dans les limons gaumais - Ann. Soc. Géol. Belgique - T. LXXVIII, pp. 173-178.
- BOURGUIGNON P. et DELECOUR F. - 1955 - Identification de loess en Gaume - Ann. Soc. Géol. Belgique - T. LXXVIII, pp. B 317-334.
- BOURGUIGNON P. et DELECOUR F. - 1961 - Superposition de loess dans l'Entre-Sambre et Meuse - Ann. Soc. Géol. Belgique, T. LXXXIV, pp. 377-400.
- BOURNERIAS M. - 1968 - "Guide des groupements végétaux de la région parisienne". - SEDES. Paris. 290 p.
- BOUTTEMY R., HEBERT J., JAMAGNE M., MAUCORPS J. - 1966 - Mémoire des cartes de sols : Craonne 3-4/7-8- Asfeld 142/5-6 - Carte des sols de l'Aisne 1/25.000 - Publ. Ch. Agr. - St. Agro. Laon. 289 p.
- BOUTTEMY R., HEBERT J., MAUCORPS J., MATHIEU C. - 1970 - Mémoire des cartes des sols : Rozoy sur Serre - Id. 157 p.
- BRAJNICKOV R. - Recherches sur les formations dites "argiles à silex" dans le Bassin Parisien - Thèse, 112 p. Paris 1938.
- BRAJNICKOV R. - 1942 - Quelques considérations sur l'évolution des limons - C.R. somm. Soc. géol. France, p. 91. Paris.

- BREWER R. and HAIDANE A.D. - 1957 - Preliminary experiments in the developpement of clay orientation in soils - Soil Sci. 84 : 301-309.
- BREWER R. - The petrographic approach to the study of soils - Trans. Intern. Congr. Soil Sc., 7 th, Madison, 1 : 1-3. - 1960 -.
- BREWER R. - 1960 - Cutans - their definition, recognition, and interpretation - J. Soil Sci. 11 : 28C-292.
- BREWER R. - 1964 - Fabric and Mineral analysis of soils - John Wiley. London.
- BRINKMAN R. - 1969 - Ferrolysis, a hydromorphic soil forming process - Geoderma, 3, pp. 199-206.
- BRONGER A. et HAEDRICH F. - 1969 - Le loess du Sud-Ouest de l'Allemagne - Bull. Assoc. Franç. Etude du Quaternaire - INQUA - pp. 23-28.
- BULLOCK P. - 1968 - The zone of degradation at the eluvial - illuvial interface of some New-York soils - PH.D. Thesis, Cornell University.
- BULLOCK P. MACKNEY D. - 1969 - Clay translocation in Soils - Welsh Soils Discussion Group Report n° 10. pp. 13-18.
- BUOL S.W. and HOLE F.D. - 1959 - Some characteristics of clay skins in peds in the B horizon of a Gray-Brown Podzolic soil - Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23 : 239-241.
- BUOL S.W. and HOLE F.D. - 1961 - Clay skin genesis in Wisconsin soils - Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25 : 377-379.
- CAILLERE S. et HENIN S. - 1963 - "Minéralogie des argiles". - Masson, Paris. 355 p.
- CAILLEUX A. - 1942 - Les actions éoliennes périglaciaires en Europe - Mém. Soc. Géol. Fr., t. 2, n° 46.
- CAILLEUX A. - 1953 - Les oess et limons éoliens de France - Bull. Serv. Carte géol. de France, n° 240, Tome LI.
- CALLOT G. - 1970 - Etude pédologique du Bassin de la Charente non domaniale - S.E.S. 131 - Montpellier.
- CAMEZ T. et ROTH C. - 1957 - Evolution des minéraux argileux des lehms des environs de Strasbourg - Bull. Serv. Carte Géol. Als-Lorraine - Strasbourg - 10, 2 : 23.
- CAMEZ T., FRANC DE FERRIERES P.J., LUCAS J. et MILLOT G. - 1960 - Sur l'importance de la vermiculite dans certains sols tempérés et dans les dépôts du Quaternaire ancien - C.R.A.S. - Paris - 250 p. 3038-3040.
- CAMEZ T. - 1962 - Etudes sur l'évolution des minéraux argileux dans les sols des régions tempérées. Thèse, 90 p. Strasbourg.
- CARLISLE F.J., KNOX E.G., GROSSMAN R.B. - 1957 - Fragipan horizons in New-York soils. I. General characteristics and distribution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 21, pp. 320-321.
- CAYEUX L. - 1925 - Origine éolienne de l'ergeron des environs de Paris. XIIIème Congrès International de Géologie p. 1231 - 1234.
- CERNESCU N. - 1952 - Studiul cristalochimie al argilei din loess, Dari de seama - Inst. Geol. vol. XXXIV 1945 - 1946.
- CLINE M.G. - 1949 - Profile studies of normal soils of New-York. I. Soil Science, vol. 68 (3).
- COMMONT V. - 1912 - Note sur le Quaternaire du Nord de la France de la Vallée du Rhin et de la Belgique. Ann. Soc. Geol. Nord, t. 41, p. 12 - 52.

- CONEA, GHITULESCU, VASILESCU P. - 1963 - Consideratii asupra depozitelor de suprafata din Cimpia Romana de est - St. techn. econ. seria C., Pedologie, nr 11, Inst. geol., p. 61-85.
- CONEA A. - 1969 - Profils de loess en Roumanie - Bull. Assoc. Franc. Etude du Quaternaire - INQUA - pp. 127-134.
- CONEA A. - 1970 - Les formations quaternaires de la Dobrogea - Ed. Acad. Républ. Soc. Roumanie - Bucarest.
- CORTE A.E. - 1961 - The frost behaviour of soils, laboratory and field data for a new concept. Part 1. Vertical sorting. Research Report No. 85, Part I. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.
- CRAMPTON C.B. - 1965 - An indurated horizon in soils of South Wales Jl of Soil Sci., 16, 2, pp. 230-241.
- DECKERS J., BAEYENS L. - 1963 - Polysequum profielen van de Hoge Kempen - Pedologie, XIII, 1, pp. 120-154.
- DE CONINCK F. et LARUELLE J. - 1964 - Soil development in sandy materials of the belgian Campine - In : Soil Micromorphology, 169-88 - Elsevier Publishing Cy. Amsterdam.
- DE CONINCK F. - 1967 - Aspects physico-chimiques de la pédogénèse en Campine anversoise - Thèse de Doct., Fac. Sc. Agron. Louvain, 153 p.
- DE CONINCK F., HERBILLON A.J., TAVERNIER R., FRIPIAT J.J. - 1968 - Weathering of clay minerals and formation of amorphous material during the degradation of a Bt horizon and podzolisation in Belgium - Int. Congr. Soil Sci. 9. 1968, Adelafde, vcl. IV, pp. 353-365.
- DE CONINCK F. et HERBILLON A. - 1969 - Evolution minéralogique et chimique des fractions argileuses dans les alfisols et des spodosols de la Campine (Belgique) - Pedologie, Gand, XIX, 2, pp. 159-272.
- DELECOUR F. et MANIL G. - 1958 - Contribution micromorphologique à l'étude de l'humification dans les sols bruns acides des Ardennes belges - Pedologie, Gand, VIII, pp. 127-133.
- DEMOLON A. - 1926 - Recherches physico-chimiques sur la terre à briques, considérée comme un milieu naturel - Thèse, Paris, 94 p., 4 fig.
- DEMOLON A. - 1960 - "Dynamique du sol" - Dunod, Paris.
- DEWOLF Y. - 1965 - "Intérêts et principes d'une cartographie des formations superficielles" - Publications de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université de Caen.
- DEWOLF Y. - 1970 - Premières observations sur deux coupes de la vallée de l'Eure (C.R. d'excursion) - Bull. A.F.E.Q. n° 23-23, pp. 191-198.
- DIJKERMAN J.C., CLINE M.C., OLSEN G.W. - 1967 - Properties and genesis of textural subsoil lamellae - Soil Sci. 104, pp. 7-16.
- DOEGLAS D.J. - 1949 - Loess, an eolian product. - J Sediment. Petrol. 19, pp. 112-117.
- DUCHAUFOUR Ph. - 1948 - "Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française". - Extrait des Annales de l'Ecole Nat. des Eaux et Forêts, 352 p.

- DUCHAUFOUR Ph., BONNEAU M., DEBAZAC E. et PARDE J. - 1961 - "Types de forêt et aménagement : la forêt de la contrôlerie en Argonne". - Annales de l'E.N.E.F. XVIII, 1.
- DUCHAUFOUR Ph. - 1961 - "La cartographie des sols et des stations à but agronomique et à but forestier". - Pédologie XI.
- DUCHAUFOUR Ph. - 1961 - Données nouvelles sur la classification des sols - Ann. Ec. Nation. Eaux et Forêts, 18, 4, pp. 1-68.
- DUCHAUFOUR Ph. - 1964 - "Evolution de l'aluminium et du fer compliqués par la matière organique dans certains sols". - Science du sol. n° 2, pp. 3-18.
- DUCHAUFOUR Ph. - 1964 - "Sur la dynamique de l'aluminium dans les sols podzoliques". - C.R. Ac. Sci. T 259, pp. 3307-09.
- DUCHAUFOUR Ph. et SOUCHIER B. - 1965 - "Note sur un problème de classification. Podzolisation chimique et différenciation du profil". - Pédologie, XV, 2, pp. 143-158.
- DUCHAUFOUR Ph. et SOUCHIER B. - 1966 - "Note sur une méthode d'extraction combinée de l'alumine et du fer libres dans les sols". - Science du sol n° 1, pp. 17-31.
- DUCHAUFOUR Ph. et SOUCHIER B. - 1966 - "Note sur les critères de classification des sols lessivés". - Compte-rendus des conférences sur les sols méditerranéens. Madrid, pp. 401-406.
- DUCHAUFOUR Ph., LELONG Fr. - 1967 - Entraînement ou destruction d'argile dans les horizons éluviaux des sols lessivés - C.R. Acad. Sci., Fr., sér. D, t. 264, pp. 2884-2887.
- DUCHAUFOUR Ph. - 1968 - L'évolution des sols - Masson et Cie. Paris.
- DUCHAUFOUR Ph. - 1970 - Précis de Pédologie - Masson et Cie. Édit. Paris.
- DUDAL R. - 1953 - Etude morphologique et génétique d'une séquence de sols sur limon loessique - Agricultura, t. 1, 2ème sér., n° 2, pp. 119-163. Louvain.
- DUDAL R. - 1967 - Definition of soil units proposed to be used for the Soil Map of the World - World Soil Resources Reports F.A.O., 32, 53 p.
- DUDAL R. - 1970 - 90 Years of "Podzolic" Soils - Pedology n° 18, séries C, pp. 573-593.
- DUPLAIX S. et MALTERRE H. - 1946 - Les Associations de minéraux lourds dans les limons quaternaires du Bassin de Paris - Bull. Soc. Géol. France, 5e série, tome XVI, pp. 173-176.
- DUPLAIX S. - 1946 - Contribution pétrologique à la classification des limons d'Oissel - Bull. Soc. Géol. France, 5e série, tome XVI.
- DUPUIS J. - 1952 - Contribution à l'étude des sols du Gâtinais - Thèse, Paris, Ann. Inst. Nat. Agro., t. 34.
- DYLIK J. - 1954 - The problem of the origin of loess. Biul. Perygl., n° 1, pp. 125-131.
- EDELMAN C.H. - 1946 - Les limons et sables de couverture des Pays-Bas - Geol. Ter. Rec. O. Eur., Bruxelles, pp. 303-309, 4 fig.
- EDELMAN C.H. - 1947 - La pétrologie des terrains tertiaires et quaternaires aux Pays-Bas - Bruxelles, M. Hayez, Impr. Acad. Royale de Belgique, pp. 45-61.

- ERHART H. - 1955 - "Biostasie" et "Rhexistasie". Esquisse d'une théorie sur le rôle de la pédogenèse en tant que phénomène géologique - C.R. Acad. Sci., Fr., 241, pp. 1218-1220.
- ERHART H. - 1956 - La genèse des sols en tant que phénomène géologique - Masson, Paris, 83 p.
- FAVROT J.C. - 1969 - Les sols de terrasses de l'Isle dans la région de Mussidan (Dordogne). - Bull. AFES. 3, pp. 21-36.
- FEDOROFF N et M. - 1960 - Le Loess en Amérique du Nord - Revue de Géo. Physique et Géologie Dynamique, vol. III, fasc. 3, pp. 167-174.
- FEDOROFF N. - 1965 - Sur les paléosols quaternaires des climats tempérés - Rev. Géog. phys. et Géol. dyn., (2), vol. VII (1), pp. 79-88, Paris.
- FEDOROFF N. - 1966 - Contribution à la connaissance de la pédogenèse quaternaire dans le Sud-Ouest du Bassin parisien - Bull. Ass. fr. Et. Quat. (A.F.E.Q.), n° 2, pp. 94-105, Paris.
- FEDOROFF N. - 1967 - Un exemple d'application de la micromorphologie à l'étude des paléosols - Bull. A.F.E.Q. n° 12, 1967-3, pp. 193-209.
- FEDOROFF N. - 1968 - Genèse et morphologie de sols à horizon B textural en France Atlantique - Science du sol, pp. 29-63.
- FEDOROFF N. - 1969 - Caractères micromorphologiques des pédogénèses quaternaires en France - Etude du Quaternaire dans le monde. VIIIe Congrès INQUA. Vol. 1, Section paléologie, pp. 341-349.
- FEDOROFF N. et ROSSIGNOL J.P. - 1969 - Les boulbènes sur limons des terrasses de la Garonne - Bull. A.F.E.S. 5, pp. 37-52.
- FIES J.C. - 1971 - Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols - Ann. agron. 22 (6), pp. 655-685.
- FIETTE A. - 1960 - Le département de l'Aisne, Étude géographique et économique - Ed. Bordas p. 305.
- FITZPATRICK E.A. - 1956 - An indurated soil horizon formed by permafrost - The Jl of Soil Sci., 7, pp. 248-254.
- FINK J. - 1956 - Zur Systematik Fossiler und rezenter Lössböden in Österreich - C.R. VIe Congr. Soc. intern. Sci. Sol, Paris, vol. V, pp. 585-592.
- FINK J. - 1964 - Die Gliederung des Wurmeiszeit in Österreich - VIth Internat. Congr. Quatern. Warsaw, vol. IV.
- FINK J. - 1965 - The Pleistocene in Eastern Austria - Geol. Soc. Amer. Spec. Pap., n° 84, pp. 179 - 199. New York.
- FINK F. - 1969 - Les progrès de l'étude des loess en Europe - Bull. Assoc. Franç. Etude du Quaternaire. Inqua, pp. 3-12.
- FINK F. - 1969 - Le loess en Autriche - Bull. Assoc. Franç. Et. Quaternaire. Inqua, pp. 17-22.
- FRANC DE FERRIERE J. "Géologie et Pédologie. Contribution à l'étude des formations quaternaires de la plaine d'Alsace." - Imprimerie alsacienne, Strasbourg, 1937.

- FREI E. and M.G. CLINE - 1949 - Profile studies of the normal soils of New York. II.
Micromorphological studies of the Gray-Brown
Podzolic soil sequence. Soil Sci. 68 : 333-344.
- FRIDLAND V.M. - 1958 - Podzolization and illimerization (clay migration).
Soviet Soil Sci. 1 : 24-32.
- GALOUX A. - 1953 - Le hêtre et la dégradation des sols forestiers lessiques. Bull. Soc. forest.
Belgique, t. 5 p. 225-235. Bruxelles.
- GEBHARDT H., MEYER B., SCHEFFER F. - 1966 - Zwischenschichtbelgegung und Expansionsverhalten
von Dreischicht-Tommineralen im CaCO_3 -gepufferten Hydrogencarbonatmilieu
kalkreicher Lockersedimentböden - L. Pfl. Ernährung - Dungung -
- GUERASSIMOV I.P. - 1962 - "La formation du loess et la pédogenèse".
Bull. Ac. Sc. de l'U.R.S.S., Série Géographique n° 2
- GERASIMOV I.P. - 1964 - Loess genesis and Soil Formation -
Rep. of the VI - th Intern. congr. on Quat., 1961, INQUA, Lodz, vol. IV, p. 463-468.
- GERASIMOV I.P. - 1968 - Development of the concepts of weathering and soil formation in
Soviet Soil Science, geography and geology.
Int. Congr. Soil Sci. 9. 1968. Adelafde, vol. IV.
- GERASIMOV I.P. - 1969 - Le loess, le périglaciaire de l'Europe Centrale et leurs rapports réciproques.
- VIIe Congrès I.N.Q.U.I. - Discours inaugural.
- GERASIMOV I.P., ZONN V. - 1971 - Podzol and Gley : lessivé, pseudogley, and pseudopodzol
(priority of genetic concepts) - Pochvovedeniye, n° 8, 118-129.
- GERASIMOV I.P. - 1971 - Nature and Originality of Paleosols - International Society of Soil
Science and Israel Univ. Press - pp. 15-27.
- GEZE B. - 1959 - La notion d'âge du sol. Ann. agron., t. 3, p. 237-255. Paris.
- GILES, L.H. - 1958 - Fragipan and water-table relationships of some brown podzolic and low
humic-gley soils
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 22, pp. 560-565.
- GLINKA K.D. - 1924 - Degradation and the podzolic process. Pochvovedenie, Nos. 3-4. Moscou.
- GORBUNOV N.I. - 1961 - Movement of colloidal and clay particles in soils (Problem of leaching and
podzolization). Soviet. Soil Sci. 7 : 712-724.
- GRAINDOR M.J. - 1948 - Les limons quaternaires aux environs de Rouen. Ann. Agr. n° 6, p. 2 - 28, 4 pl.
- GRAS R. & MONNIER G. - 1963 - Contribution de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation
en eau des végétaux. Sc. du Sol I, p. 13-20.
- GROSSMANN R.B., FEHRENBACHER J.B., BEAVERS A.H., STEPHEN L., PARKER J.M. - 1959 -
Fragipan soils of Illinois : I, II, III. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 23, pp. 65-75.
- GROSSMAN R.B. - 1959 - Characterization of ped surfaces in contrast to ped interiors. Unpublished
Ph.D., University of Illinois, Urbana, Illinois. (In Bullock 1968).
- GROSSMANN R.B., ODELL R.T., BEAVERS A.H. - 1964 - Surfaces of peds from B horizons of Illinois soils.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28 pp. 792-798.
- GROSSMANN R.B., CARLISLE F.J., - 1969 - Fragipan soils of the Eastern United States. Adv. in Agron.,
vol. 21, pp. 237-279.

- GULLENTOPS F. - 1954 - Contributions à la chronologie du Pléistocène et des formes du relief en Belgique. Thèse, Inst. Géol. Univ. Louvain, t. XVIII, P. 123-252.
- HAASE G. - 1963 - Stand und Probleme der Lözforschung in Europa. Mitt. der geographischen Gesellschaft der D. D. R., 63, S. 97-129.
- HAASE G. et RUSK B. - 1969 - Les loess sur le territoire de la République démocratique allemande Bull. Assoc. Franc. Etude Quaternaire - INQUA - pp. III-II8.
- HALLSWORTH E. G. - 1963 - An examination of some factors affecting the movement of clay in an artificial soil. J. Soil Sci., 14, pp. 360-371.
- HANOTIAUX G. - 1959 - Quelques problèmes d'échantillonnage des sols en vue de l'analyse chimique - Pédologie - IX - 54-66.
- HEBERT J., JAMAGNE M. - 1962 - Mémoire de la carte des sols : Laon 5-6 - Carte des sols de l'Aisne 1/25.000 - Publi. Chambre d'Agriculture - St. Agro. Laon - 105 p.
- HEBERT J., JAMAGNE M. - 1963 - Mémoire de la carte des sols : Craonne 1-2 - Id. 161 p.
- HEBERT J., JAMAGNE M., BLIET L. - 1964 - Mémoire des cartes des sols : Montmirail - Id. 168 p.
- HEBERT J., JAMAGNE M., BOUTTEMY R. - 1964 - Mémoire de la carte des sols : Craonne 5-6 Id. 198 p.
- HEBERT J., JAMAGNE M., BLIET L. - 1965 - Mémoire des cartes des sols : Chateau-Thierry 7-8 - Epernay 5-6 - Id. 207 p.
- HENIN S., GRAS R. & MONNIER G. - 1969 - Le profil cultural - Principes de physique du sol - Masson et Cie Paris.
- HENIN S., PEDRO G., ROBERT M. - 1968 - Considérations sur les notions de stabilité et d'instabilité de minéraux en fonction des conditions du milieu ; essai de classification des "systèmes d'agression". Int. Congr. Soil Sci., 9. 1968, vol. III, pp. 79-80.
- HETIER J. M., RODRIGUEZ-LAPA M., LE TACON F. - 1972 - Etude micromorphologique de quelques sols de l'Est de la France - Bull. Assoc. Franc. Etude du sol - n° 1-2 - pp. 49-62.
- HOREMANS P. - 1973 - Notice explicative de la carte pédologique de Paris 1/250.000 - S.E.S.C.P.F. - I. N.R.A. - (en préparation).
- HUTCHINSON T. B. Jr. & BAILEY H. H. - 1964 - Fragipan soils : certain genetic implications Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28:pp. 684-685.
- IVANOVA I. K. - 1969 - Les loess de la partie sud-ouest du territoire européen de l'U.R.S.S. et leur stratigraphie. - Bull. A.F.E.Q. - Etude du quaternaire I. N.Q.U.A. - pp. 145-150 pp. 151-159.
- JACKSON M. J., TYLER S. A., WILLES A. L., BOURBEAU C. A., PENNINGTON R. P. - 1948 - Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments : I. Fundamental generalizations. J. Phys. Coll. Chem. 52 : 1237-1260.
- JACKSON M. L., HSEUNG Y., COREY R. B., EVANS E. J., VANDEN HEUVEL R. C. - 1952 - Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments : II Chemical weathering of layer silicates. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16 : 3-6.
- JACKSON M. L. - 1963 - Interlayering of expandable layer silicates in soils by chemical weathering, pp. 29-46. In Clays and Clay Minerals, IIth Conf., Pergamon Press, New York.
- HEBERT J. et JAMAGNE M. - 1964 - Sols à fragipan en Haute-Brie - C. R. VIIIème Congr. Soc. intern. Sci. Sol, Budapest, vol. V, pp. 359-372.

- JACKSON M. L. - 1963 - Aluminium bonding in soil : a unifying principle in soil science (Liaison de l'aluminium dans les sols : un principe d'unification dans la science du sol) - Soils Sci. Soc. Amer. Proc., 17, n° 1, pp. 1-10.
- JACKSON M. L. - 1965 - Clay transformations in soil genesis during the quaternary - Soil Sci., 99, pp. 15-22.
- JACKSON M. L. - 1968 - Weathering of primary and secondary minerals in soils - Int. Congr. Soil Sci. 9. 1968. Adelaïde, vol IV, pp. 281-292.
- JAMAGNE M. - 1963 - Contribution à l'étude des sols au Congo Oriental - Pédologie XII, 2, pp. 271-414.
- JAMAGNE M. - 1964 - Introduction à une étude pédologique dans la partie nord du Bassin de Paris - Pédologie, t. XIV (2), pp. 228-342 - Gand.
- JAMAGNE M. - 1966 - Contribution à la connaissance de quelques sols sur limon loessique du nord de la France - Etude micromorphologique - Mém. Licence. Univ. Gand, 149 p.
- JAMAGNE M. - 1966 - Principes de classification régionale des sols - Science du sol - n° 2, pp. 41-64.
- JAMAGNE M. - 1969 - Sols et paléosols sur loess dans le nord de la France - Etude du Quaternaire dans le monde - VIIIème Congrès INQUA - Vol. 1 - Section paléopédologie - pp. 359-372.
- JAMAGNE M. et coll. - 1969 - Interprétation pédologique de quelques coupes et profils limoneux dans le nord du Bassin de Paris - Mém. h. sér. Soc. géol. de France, n° 5, pp. 8-30.
- JAMAGNE M. et FEDOROFF N. - 1969 - Comparaison micromorphologique de quelques sols sur limon du Bassin parisien - Mém. h. sér. géol. de France, n° 5, pp. 73-79.
- JAMAGNE M. - 1969 - Données sur l'évolution pédogénétique des formations limoneuses en Europe occidentale - Mém. h. sér. Soc. géol. de France, n° 5, pp. 37-52.
- JAMAGNE M. - 1969 - Some micromorphological aspects of soils developed in loess deposits of Northern France - C. R. 3ème Réunion Intern. de Micromorphologie - Wroclaw, (sous presse).
- JAMAGNE M. - 1970 - Sur la mise en évidence d'une séquence d'évolution pédogénétique développée dans les formations limoneuses sous climat tempéré humide - C. R. Acad. Sc. Paris t. 270, pp. 1773-1775.
- JAMAGNE M. et MATHIEU C. - 1971 - Contribution à l'étude de la stratigraphie des loess dans le nord-est du Bassin de Paris - Quelques observations dans le Marlois - Bull. A. F. E. Q. 4, pp. 209-233.
- JAMAGNE M. - 1972 - Caractères micromorphologiques des sols développés sur formations limoneuses - Bull. Assoc. Fr. Etude du Sol - n° 1-2, pp. 9-32.
- JAMAGNE M. - 1972 - Quelques données fondamentales sur les paléosols sur loess du nord de la France - Pédologie - Gand - (sous presse).
- JENNY H. and SMITH G. D. - 1935 - Colloid chemical aspects of clay pan formation in soil profiles - Soil Sci. 39 : 377-389.
- JENNY H. - 1941 - Factors of soil formation - Mc Graw-Hill, New-York, XII, 281 p.

JHA P.P., CLINE M.G. - 1963 - Morphology and genesis of a Brun Acide with Fragipan in uniform silty material. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27, pp. 339-344.

JONGERIUS A. (Editor) - 1964 - "Soil Micromorphology". Elsevier. 540 p.

JONGERIUS A. - 1970 - Some morphological aspects of regrouping phenomena in Dutch soils. Geoderma, vol. 4, n° 3, pp. 311-331.

JORET R. - 1932 - Recherches sur les sols de limons de la Picardie - Annales Agronomiques.

JORET R. & MALTERRE - 1948 - Les sols du Vimeux - Annales Agro.

JUSTE C. - 1966 - "Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique. Application à leur mise en valeur". Ann. Agr. Vol. 17, n° 2, pp. 144-157 ; Vol. 17, n° 3, pp. 220-251.

KARPACHEVSKIY L.O. and SHLEYNIS R.I. - 1966 - Micromorphology and chemical properties of soils in stands of spruce and oak in the central part of Lithuania. Soviet Soil Sci. 7 : 759-771.

KHALIFA E.M. and BUOL S.W. - 1967 - Properties of clay skins in a Cecil (Typic hapludult) soil in North Carolina. American Soc. of Agronomy p. 120.

KNOX E.G. - 1957 - Fragipan horizon in New York soils. III. The basis of rigidity Soil Sci. Soc. Am. Proc., 21, pp. 326-330.

KOVDA V.A., LOBOVA Ye. V., ROZANOV B.G. - 1967 - Classification of the world's soils. Soviet Soil Sci., n° 4, pp. 427-442 ; n° 7, pp. 851-864.

KOWALINSKI S., PONS L.J., SLAGER S. - 1971 - Micromorphological comparison of three soils derived from Loess in different climatic regions - Amsterdam - Geoderma.

KUBIENA W.L. - 1938 - Micropedology. Collegiate Press, Ames, Iowa.

KUBIENA W.L. - 1953 - Soils of Europe. Thomas Murby and Cy. London.

KUBIENA W.L. - 1964 - Zur Mikromorphologie und Mikrogenese der Lössböden Neuseelands. In : Soil Micromorphology, 219-235, Elsevier Pub. Comp. Amsterdam.

KUNDLER P. - 1961 - Lessivés (Parabraunerden, Fahlerden) aus Geschiebemergel der Würm-Eiszeit im norddeutschen Tiefland. Zeitsch. f. Pflanz. Düng. Bodenk., 95, 2, pp. 98-110.

KUNDLER P. - 1965 - Waldbodentypen der Deutschen Demokratischen Republik - Neumann Verlag - Radebeul.

KUYL O.S. et BISSCHOPS J.H. - 1969 - Le loess aux Pays Bas - Bull. Assoc. Franc. Etude Quaternaire INQUA - pp. 101-104.

KUNZE G.W. and OAKES H. - 1957 - Field and laboratory studies of the Lufkin soil, a Plancosol. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21 : 330-335.

LAATSCH W. - 1944 - Dynamik der Deutschen Acker - und Waldböden - Steinkopf - Dresden.

LADRIERE J. - 1890 - Etude stratigraphique du terrain quaternaire du Nord de la France - Ann. Soc. Geol. Nord, t. 18, p. 93 - 149 et pp. 205-276, - 22 fig.

- LARUELLE J. - 1958 - Micromorphologie des sols de la Belgique - Pédologie VIII, pp. 79-102 - Gand.
- LARUELLE J. - 1965 - Notes on Soil Micromorphology. International Training Center for Post-Graduate Soil Scientists. University of Ghent.
- LAUTRIDOU J. P. - 1967 - Les loess du Pays de Caux : origine et signification paléoclimatique - C. R. som. S. G. F., fas. 6, pp. 248-249.
- LAUTRIDOU J. P. - 1968 - Les formations superficielles de Saint-Romain (Pays de Caux) - Thèse 3e cycle Caen - 200 p.
- LAUTRIDOU J. P. - 1968 - Les loess de Saint-Romain et de Mesnil-Esnard (Pays de Caux) - Bull. Centre Géomorphologie, n° 2, 56 p.
- LAUTRIDOU J. P. - 1969 - Le loess dans l'Ouest de la France - Bull. Assoc. Franc. Etude du Quaternaire - INQUA - pp. 79-80.
- LAUTRIDOU J. P., FAGES M. - 1970 - Les minéraux lourds des loess du Pays de Caux : un nouveau critère stratigraphique - Acad. Sc. Paris t. 270 - Série D - 1879.
- LAUTRIDOU J. P. et VERRON G. - 1970 - Paléosols et loess de Saint-Pierre lès-Elbeuf (Seine-Maritime) - Bull. A. F. E. Q. - n° 23-24, pp. 145-166.
- LEFEBVRE-DROUET E. et MERIAUX S. - 1963 - Bilan des cations échangeables en sols lessivés - Ann. Agron., 14, 3, pp. 239-260.
- LEGER M. - 1970 - Paléosols quaternaires de l'avant-pays au nord des Alpes - Bull. A. F. E. Q. - n° 2-3 - pp. 107-178.
- LE TACON F. - 1967 - Les sols d'un massif forestier des Basses-Vosges - Les stades d'évolution - Ann. Sci. Forest. 24(3) - pp. 177-203.
- LIEDEROTH I. - 1962 - Die Jungpleistozänen Lüsse Sachsen im Vergleich zu denenander Gebiete - Petersmanns Geogr. Mitteilungen - 106 - Jahrgang 1962, Heft 3, Tafel 29.
- LIEBEROTH I. - 1963 - Lösssedimentation und Bodenbildung während des Pleistozäns in Sachsen, - Géologie, Bd 12 (2), pp. 149-187 - Berlin.
- LIEBEROTH I. - 1964 - Zur Unterscheidung von Parabraunerden und Fahlerden aus Weichsellöss in Sachsen, Albrecht - Thaer, Bd 8, H 6/7 - Berlin.
- LIEBEROTH I. - 1964 - Einige Bemerkungen zu Paläopedologischen Problemen bei der Gliederung der Lüsse - Ber. Geol. Ges. DDr - Band 9 - H 6 - pp. 689-695.
- LOUIS A. - 1954 - Waarnemingen betreffende de degradatie der bosprofielen in het Zoniënbos - Nat. Tij. 37, pp. 113-118 - Gent.
- LOZET J. - 1969 - Les sols à fragipan du Condroz - Thèse - Univ. Cath. Louvain - Louvain.
- Mac CALEB S. B. and CLINE M. G. - 1950 - Profile studies of the normal soils of New-York. III. Physical and chemical properties of Brown Forest and Gray-Brown Podzolic soils. Soil Sci. 70 : 318-328.

- MAIGNANT D., DUTIL P. et JAMAGNE M. - 1972 - Etude d'un sol lessivé dégradé, glossique, développé sur limon éolien en forêt de Trois-Fontaines (Marne) - Ann. Agro. (sous presse).
- MALTERRE H. - 1946 - Contribution à l'étude des limons quaternaires du Bassin de Paris - Thèse Paris, 108 p.
- MALTERRE H. - 1948 - Constitution et vocation culturales des sols de la Brie française et de la Haute-Brie - Annales Agron.
- MALYCHEFF V. - 1929-1933 - "Le loess". - Rev. geogr. phys. Geol. Dyn., Paris.
- MALYCHEFF V. - 1933 - "Sur l'origine du loess de Villejuif et en général de celui du Bassin parisien" - C. R. Som. S. G. F., pp. 156-
- MANIL G. - 1952 - Quelques considérations générales sur la stratigraphie quaternaire et la pédogenèse à propos de la description de trois coupes de loess - Ann. Soc. geol. Belgique, t; LXXV, pp. 153-167.
- MANIL G. et PECROT A. - 1954 - Les sols forestiers oligotrophes du climax des Ardennes belges - C. R. Cong. Int. Sci. Sol Léopoldville, IV, pp. 441-446.
- MANIL G. - 1956 - Aspects pédologiques de la classification des sols forestiers - Pédologie - Gand - t. IX. pp. 214-226.
- MANIL G. - 1956 - L'humus forestier - Propriétés générales - Bull. Soc. Roy. Forest. Belgique.
- MANIL G. et HANOTIAUX G. - 1957 - Données descriptives sur les Sols Bruns Acides et les Sols Bruns Ocreux (Brown-Podzolic Soils) des Ardennes belges - Pédologie, 7, pp. 239-245. Gand.
- MANIL G. - 1958 - Contribution à l'étude des loess ardennais - Bull. Soc. Belge Géol., 67, pp. 128-140. Bruxelles,
- MANIL G. - 1958 - La classification des sols forestiers - Centre Et. sols forest. Ardenne et Gaume - Gembloux 28 p.
- MANIL G. - 1959 - General considerations on the problem of soil classification - Soil Sc. vol. 10, n° 1 - pp. 5-13.
- MANIL G. - 1959 - Climax et Pédoclimax - Discussion de notions de base - Bull. Soc. Royale Bot. Belgique - T. 91, pp. 217-238.
- MANIL G. - 1960 - Le Périglaciaire Préwurmien - Observations sur le remplissage des fentes de gel - Univ. Liège - vol. 17.
- MANIL G. - 1960 - Quelques observations sur les loess anciens de Belgique - Le périglaciaire pré-wurmien. Liège, Publ. Université.
- MANIL G. et DELECOUR F. - Identification en Belgique de loess typiques anté-tissiens, probablement d'âge Mindel - Soc. Géol. Belgique.
- MARECHAL R. et MAARLEVeld G. C. - 1955 - L'extension des phénomènes périglaciaires en Belgique et aux Pays-Bas - Med. Geol. Stichting, Nwe serie, 8, pp. 77-86.

- MARECHAL R. - 1956 - L'étude des phénomènes périglaciaires en Belgique - Rapport de la Commission de Morphologie Périglaciaire de l'U.G.I. 9e Assemblée Gle - 18e Congrès Intern.
- MARECHAL R. - 1958 - Contribution à l'étude des terrains superficiels de la région condrusienne - Pédologie, Mémoire 1, 320 p. Gand.
- MARTY J. R. - 1969 - Les boulbènes. Caractères et propriétés physiques - Conséquences agro-nomiques - Thèse I. N. R. A. Toulouse, 135 p.
- MAUCORPS J. et al. - 1967 - Observations sur les formations à silex dans le département de l'Aisne - Mém. Soc. Géol. de France - 4 - pp. 51-59.
- MATHIEU C. - 1971 - Contribution à l'étude des formations argileuses à silex de Thiérache - Pédologie, XXI, 1^o, - Gand.
- MERIAUX S. - 1954 - "Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique" - I. N. R. A. ann. Agronomiques n° 1 et 2.
- MAUCORPS J., HEBERT J., JAMAGNE M., LORDEREAU B. - 1965 - Mémoire des cartes de sols : Hirson - Carte des sols de l'Aisne 1/25.000 - Publ. Ch. Agr. - St. Agro. Laon - 205 p.
- MATHIEU C., MAUCORPS J., HEBERT J. - 1971 - Mémoire des cartes de sols : Vervins 3-4/7-8 - Carte des sols de l'Aisne 1/25.000 - Publ. Ch. Agr. - St. Agro. Laon - 277 p.
- MEYER B., KALK E., FOLSTER H. - 1962 - Parabraunerden aus primär carbonathaltigem Würm - Löss in Niedersachsen - Z. Pflanzenernähr. Düng. - Bk - 99 - 37 - 54.
- MILLOT G. et CAMEZ T. - 1956 - Evolution des minéraux argileux dans les loess et lehms d'Achenheim (Alsace) - Vie Cong. Intern. Sci. Sol, Paris. Vol A.
- MILLOT G., CAMEZ T. et WERNERT P., 1957 - Evolution des minéraux argileux dans les loess et les lehms d'Achenheim (Alsace) - Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorraine - Strasbourg, 10, 17-19.
- MILLOT G. - 1964 - "Géologie des Argiles". - Masson, Paris. 499 p.
- MUCKE NHAUSEN E. - 1962 - The Soil Classification System of the Federal Republic of Germany - Transaction. Meeting S. I. S. S., New-Zealand, pp. 376-397.
- MUCKENHAUSEN E. - 1962 - Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. - OLG Verlag-GMBH, 148 p. Frankfurt-Main.
- MUCKENHAUSEN E. - 1963 - "Der Pseudogley" - Science du sol n° 1.
- MUCKENHAUSEN E. - 1963 - Makromorphologische Kennzeichen verdichteter und verfestigter Böden - Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft, 17, pp. 26-31.
- NIKIFOROFF C. C., HUMBERT R. P. and CADY J. G. - 1948 - The hardpan in certain soils of the Coastal Plain Soil Sci., 65, pp. 135-153.
- NOIRFALISE A. - 1956 - La hêtraie ardennaise - Bull. Inst. Agro. Stat. Rech. de Gembloux, 14-2.

- PAEPE R. - 1967 - Comparative stratigraphy of Würm loess déposits in Belgium and Austria. Bull. Soc. belge Géol., t. LXXV (2), pp. 203-216. Bruxelles.
- PAEPE R. et VAN HOORNE R. - 1967 - The stratigraphy and paléobotany of the Late Pleistocene in Belgium. Mem. Expl. C. Geol. Belg., n° 8, 96 p., 29 fig.
- PAEPE R. - 1969 - Les unités litho-stratigraphiques du Pléistocène supérieur de la Belgique - Bull. Assoc. Franc. Etude Quaternaire - INQUA - pp. 45-52.
- PARFENOVA Ye.I. and YARILOVA Ye.A. - 1960 - The problem of lessivage and podzolization. Soviet Soil Sci. 9 : 913-925.
- PECROT A. & AVRIL P. - Les sols ardennais - Etude morphologique et génétique des sols bruns acides et des sols podzoliques de Saint-Hubert. Bull. Inst. Agr. de Gembloux, XXII, 1-2, 1954.
- PECROT R. - 1956 - Etude des sols de la Hesbaye occidentale - Thèse de doct. carte des sols de la Belgique.
- PEDRO G. - 1966 - Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles. C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D, t. 262, pp. 1828-1831.
- PEDRO G. - 1964 - "Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines". Ann. Agr. Vol. 15, n° 2, pp. 85-192 ; n° 3 pp. 243-333 ; n° 4, pp. 339-456.
- PEDRO G. - 1968 - Note sur le microanalyseur à sonde électronique de Castaing - INRA. - Texte ronéoté.
- PEDRO G. - 1968 - Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., 10, pp. 457-470.
- PEDRO G. JAMAGNE M., BEGON J.C. - 1969 - Mineral interactions and transformations in relation to pedogenesis during the Quaternary - Soil Science - Vol. 107, n° 6 - pp. 462-469.
- PERIGAUD S. - 1963 - "Contribution agronomique à la mise en valeur de la Bresne - Thèse Clermont-Ferrand.
- PLAISANCE G. et VANDER MAREL H.W. - 1960 - Contribution à l'étude des limons des plateaux de la forêt de Chaux (Jura) - Ann. Agro. 11, 601-620 et 661-711.
- PLAISANCE G. - 1955 - "Les sols à similigley" Bulletin A.F.E.S.
- POMEROL Ch. et FEUGUEUR L. - L'Eocène du Bassin de Paris - Bull. de la Soc. Belge de Géologie, pp. 385-446. 1963.
- RANNEY R.W., BEATTY M.T. - 1969 - Clay translocation and albic tongue formation in two Glossoberalfs of West-Central Wisconsin - Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33, pp. 768-775.
- REMY J.C. - 1964 - Détermination de la densité apparente des mottes de terre - Bull. Ass. fr. Et. Sol, 7, pp. 278-281.
- RIEDEL C.E. et FRANC DE FERRIERE J. - 1951 - Les sols et les climats de la Brie, 232 p. Chez les auteurs.
- RIVIERE J.M., CRUCIANI P.M., HEBERT J., JAMAGNE M., MAUCORPS J. - 1970 - Mémoire des cartes de sols : Laon 3-4/7-8 - Chateau-Porcien 1-2/5-6 - Carte des sols de l'Aisne 1/25.000 - Publ. Ch. Agr. - St. Agro. Laon - 217 p.
- ROBERT M. - 1970 - Etude expérimentale de la désagrégation du granite et de l'évolution des micas - Thèse - 194 p. - Paris.

- RODE A.A., FE OFAROVA I.I. - 1955 - Data on the mineralogical composition of siliceous sprinkling in Forest Steppe Soils - Pochvovedenie, n° 9, pp. 58-60.
- RODE A.A. - 1965 - Podzolisation and lessivage. Pochvedenie, 1964 - Trad : Soviet Soil Science, avr. 1965, PP. 660-671.
- ROHDENBURG H. et MEYER B. - 1969 - Le Sud de la Basse Saxe et la Hesse du Nord - Bull. Assoc. Franc. Etude du Quaternaire - pp. 33-36 - INQUA.
- ROISIN P. - 1962 - Contribution à l'étude de la végétation forestière des confins occidentaux du Massif Ardennais - Bull. Inst. Agro. Stat. Rech. de Gembloux, XXX, 3/4.
- RUELLAN A. - 1970 - Quelques réflexions sur la paléopédologie - Bull. A. F. E. Q. n° 23-24 - pp. 179-180.
- RUELLAN A. - 1971 - The History of Soils : Some Problems of Definition and Interpretation - International Society of Soil Science and Israel Univ. Press - pp. 3-15.
- RUHE R.V. - 1954 - Relations of the Properties of Wisconsin loess to topography in Western IOWA - America Journal of Science, vol. 252, pp. 663-672.
- RUHE V. - 1969 - Paleosols and soil stratigraphy - Etude du Quaternaire dans le monde - VIIIe Congrès INQUA - vol. 1, Section paléopédologie, pp. 335-340.
- RUHE R.V., MILLER G.A., VREEKEN W.J. - 1971 - Paleosols, Loess, Sedimentation and Soil Stratigraphy - International Society of Soil Science and Israel Univ. Press - pp. 41-60.
- RUSSEL R.J. - 1944 - Lower Mississippi Valley Loess - Bull. Géol. Soc. Am. 55, pp. 1-40.
- RUSSEL R.J. - 1944 - Origin of Loess - A reply - Am. J. Sci. 242, pp. 447-450.
- RUSSEL E.W. - 1961 - Soil conditions and plant growth, Longmans, London, 688 p.
- SCHAEFFER F., MEYER F., GEBHARDT G. - 1966 - Pedochemische und kryoklastische Verlehmung (Tonbildung) in Böden aus kalkreichen Lockersedimenten (Beispiel Löss) - L. Pfl. Ernährung - Dungung - Bodenkunde (Weinkein) - 114, 2, pp. 77-89 -
- SCHEFFER F. - 1962 - Holocene weathering intensities and weathering sequences of mineral species and clay formation in soils developing from loose sedimentary parent material in the temperate humid zone of Middle Europe - Transactions Int. Soil Conf. Wellington (N-2), pp. 55-59.
- SCHWERTMANN U. - 1965 - Austanschbare Kationen und Dispersität von Tonen - Mitt. Deutsch. Bodenk. - Gesellsch. 4, pp. 129-130.
- SEDDOH F., ROBERT M. - 1972 - Intérêt de l'utilisation du microscope électronique à balayage pour l'étude des micas et de leur évolution - Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr., 95, pp. 75-83.
- SERVAT E. - 1966 - Sur quelques problèmes de cartographie pédologique en région méditerranéenne - C.R. Conf. SISS - Madrid.
- SCHULTE-KARRING H. - 1962 - Verbesserung verdichteter Böden durch Untergrundlockierung und Tiefdüngung, Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 17, pp. 40-80.
- SEGALEN P. - 1965 - "Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide, 1ère partie : les produits alumineux". - Cahiers ORSTOM Pédologie, Vol. III, fasc. 2, pp. 149-176.
- SEGALEN P. - 1964 - Le fer dans les sols - Publication de l'Office de la Recherche Scientifique Outre-Mer - Paris.