

Dans les trois premiers stades évolutifs, nous observons un mélange d'argile composé d'un ensemble de minéraux 2/1 comprenant illite-vermiculite et smectite associés à de faibles proportions de kaolinite. Alors que la kaolinite évolue peu, du stade 1 au stade 3, nous assistons essentiellement à une diminution des proportions d'argiles micacées et corrélativement à une augmentation des argiles gonflantes, qui prennent un caractère de plus en plus ferrifère.

A partir du stade n° 4 et surtout dans le stade n° 5, dans la partie médiane des horizons B, la composition des assemblages argileux s'oriente vers un mélange simple comprenant une kaolinite qui devient progressivement dominante et des argiles micacées plus ou moins ouvertes. En partie sommitale de ces horizons, nous voyons apparaître de faibles proportions de smectite en association avec les 2 argiles précédentes.

b) - Horizons de surface A_1 et A_2 .

Au sein des horizons de surface, l'évolution des minéraux argileux paraît relativement continue pour l'ensemble des différents stades évolutifs. Nous assistons ainsi à une vermiculitisation plus ou moins complète des illites. A peine amorcée mais déjà perceptible dans le stade n° 1, elle devient nette et bien marquée dans les stades 2 et 3, où elle s'accompagne d'une fixation de cations Al^{3+} , plus ou moins hydroxylés qui s'accroît corrélativement à l'état de désaturation du complexe absorbant. Enfin, cette ouverture des illites devient pratiquement totale dans les derniers stades évolutifs avec apparition puis développement de chlorites secondaires alumineuses (stade n° 5).

Cette évolution est comparable à celle qu'on observe dans les sols acides développés sur limons ou sur arène granitique sous climat tempéré. Ce qui nous amène à penser que l'évolution présentée correspond à des évolutions plus récentes se surimposant aux solutions anciennes et intervenant sur des matériaux acidifiés.

3 - GENESE DES ARGILES ET EVOLUTION DES MINERAUX PRIMAIRES DANS LES SOLS DE TERRASSES RHODANIENNES.

Les résultats de l'évolution minéralogique des argiles que nous venons de résumer de façon schématique sont en réalité sous la dépendance de leurs modes de genèses (héritage, transformations et néoformations). Nous pouvons essayer de préciser le rôle et le poids respectif de ces phénomènes au fur et à mesure du développement des sols. Rappelons néanmoins que dans les matériaux fluvio-glaciaires rhodaniens, il n'existe pratiquement pas de galets à cortex (ICOLE, 1974); d'autre part, il est difficile de suivre de manière continue l'évolution des minéraux primaires constitutifs, du fait que les phénomènes de désagrégation mis en évidence plus haut, provoquent une intégration assez rapide à la matrice de ces différents minéraux et de leurs produits d'altération. Les études minéralogiques (RX, ATD, poudre) mais aussi microscopiques nous permettent cependant de parvenir à des données moyennes qui aident à reconstituer les phases essentielles des mécanismes évolutifs.

31. HERITAGE.

Deux types principaux d'héritage sont possibles dans les sols étudiés.

- a) - Héritage direct en liaison avec l'argile présente dans les matériaux originels.

Une partie de l'argile présente dans les sols de terrasses provient de celle existant à l'origine dans les matériaux-mères. On a vu (chap.2) que cette fraction "argile" représente entre 0,5 et 2 % de la masse totale des dépôts fluvio-glaciaires rhodaniens. Cette argile originelle ne peut donc jouer qu'un rôle minime dans la constitution des cortèges argileux à partir du moment où les sols renferment un taux d'argile important (dès le stade n° 2). Par contre, dans les stades initiaux, où la masse d'argile présente est beaucoup plus faible, la part de l'héritage direct paraît plus nette, d'autant que les phénomènes de dissolution des éléments calcaires entraînent un effet de concentration naturel important d'argile. Dans ce stade n° 1, compte-tenu des pertes calculées, l'argile héritée représente un peu plus de 40 % de l'argile présente dans les sols. Dans les autres stades évolutifs, la part provenant de cette origine se dilue et tombe à moins de 10 %. Sur le plan minéralogique, cet héritage se manifeste au profit des illites et aussi des smectites. La kaolinite est représentée à un degré bien moindre. Notons enfin que, dans les stades initiaux, ces phénomènes d'héritage semblent bien être la source essentielle de la présence de montmorillonite.

- b) - Héritage par dissolution des galets calcaires.

Les argiles résiduelles héritées de la dissolution des éléments calcaires contribuent également à alimenter la fraction argileuse des sols des terrasses rhodaniennes, avec des lois de variations identiques à celles que nous venons d'explicitier. C'est encore dans le stade n° 1 que la part de l'héritage argileux provenant des calcaires est encore le plus important : nous pouvons estimer qu'il correspond grossièrement à 40 % des argiles présentes dans ces sols et que sur le plan minéralogique il porte essentiellement sur les argiles micacées (illite).

32. TRANSFORMATIONS ET NEOFORMATIONS.

Dans les sols des terrasses rhodaniennes, nous pouvons dire à ce sujet que :

- les transformations interviennent essentiellement aux dépens des micas primaires ferro-magnésiens et des minéraux argileux mêmes, entraînant un certain nombre de modifications limitées de leur structure,
- les néoformations, en revanche, sont liées aux autres types de minéraux primaires avec genèse possible de minéraux secondaires et modifications importantes des structures.

De fait, ces deux voies sont étroitement imbriquées et, dans les sols étudiés, elles représentent la source la plus importante de la masse d'argile produite, notamment lors de la phase de rubéfaction maximum. Nous essayerons d'en préciser les origines en passant en revue l'évolution des principaux minéraux primaires.

321. Evolution des amphiboles et des plagioclases.

- Les éléments cristallins présents dans les matériaux alluviaux rhodaniens* renferment des quantités assez faibles de hornblende qui subissent des phénomènes assez rapides de transformations intervenant dans les 2 premiers stades évolutifs, corrélativement à la dissolution des galets calcaires et aux transformations des plagioclases. Elles aboutissent à un reliquat d'oxyde de fer qui reste sur place; les autres éléments constitutifs sont l'objet d'une élimination quasi-complète en solution sans qu'il soit possible d'établir une relation nette avec un minéral secondaire bien cristallisé. Il y aurait donc dissolution du minéral sans phénomène de transformation ou de néoformation avec maintien d'un résidu ferrugineux.
- Les plagioclases existent en quantités beaucoup plus appréciables (10 %) Compte-tenu du type de granite présent, ce sont les feldspaths sodiques qui dominent par rapport aux feldspaths calciques. Leur évolution est également très rapide avec de véritables phénomènes de dissolution et de microdivision qui aboutissent à la création de macro-vides d'abord à l'intérieur des cristaux puis au sein même de la masse des galets; ceci conduisant progressivement à une décomposition complète. Sur le plan strictement minéralogique, nous n'avons pas réalisé des investigations systématiques et nous nous sommes limités à un petit nombre de tests sur les plagioclases blanchis. La formation de gibbsite à partir de ce type de feldspaths n'a jamais pu être mise en évidence dans les conditions de milieu étudiées. Au sein des galets prélevés dans les deux premiers stades évolutifs, on discerne le plus souvent une illite-séricite; mais, dans les stades n° 3, les plagioclases étudiés renferment presque toujours de la kaolinite.

322. Evolution des minéraux phylliteux ferro-magnésiens et des argiles micacées.

Deux grandes orientations sont possibles :

- a) - Premier type d'évolution : Vermiculisation des micas et formation de smectite dite de dégradation.

Ce type d'évolution concerne les horizons B des trois premiers termes évolutifs, qui correspondent aux phases de déclenchement, puis de développement maximum des processus d'évolution rubéfiante. Dans ces situations, le milieu conserve de bonnes qualités de drainage externe et on observe des phénomènes croissants de transformations des biotites et des illites, dont les résultats essentiels ont déjà été signalés plus haut (hor.2)

* Par contre, les alluvions d'apports iserans contiennent des proportions plus importantes d'amphibolites.

. Les mécanismes qui président à ces processus ont été étudiés par de nombreux auteurs (JACKSON, 1952, 1962 - LUCAS, 1962 - MILLOT, 1964 - ROBERT 1970) et les étapes essentielles qui sont schématisées ci-après sont les suivantes :

Biotite → Hydrobiotite → Vermiculite → Smectite de transformation

b) - Deuxième type d'évolution : Agradation des minéraux micacés en chlorites alumineuses.

Ce type d'évolution intervient essentiellement dans les horizons de surface et voit son intensité croître assez régulièrement depuis le stade n° 1 jusqu'au stade n° 5. Il se déroule selon le schéma classique suivant :

Illite → Vermiculite Al → Chlorite secondaire

La phase d'agradation proprement dite avec apparition de vermiculite alumineuse progresse dans ces sols de terrasses du haut des profils jusqu'au sommet des horizons B. Cette phase s'exprime très bien à partir du stade d'évolution n° 2 et se développe particulièrement aux stades n° 3 et n° 4.

Les chlorites secondaires ne sont vraiment nettes que dans le stade ultime d'évolution quand la désaturation du complexe absorbant est la mieux marquée.

323. Evolution des feldspaths potassiques.

Dans les sols des terrasses rhodaniennes, on constate que l'altération des feldspaths potassiques (orthose, microcline) ne se manifeste de manière importante qu'après la destruction quasi-complète des plagioclases. Les galets de granite sont alors fortement arénisés et désagrégés, si bien que l'évolution des cristaux feldspathiques résistants se fait au sein de la matrice. Il devient alors très délicat d'établir avec une certitude absolue la filiation entre les matériaux primaires encore conservés et les minéraux secondaires rencontrés, car il y a toujours de fortes possibilités pour que ces minéraux aient simplement servi de pièges à des produits venus de la matrice elle-même.

Mais, s'il est impossible de prouver cette filiation réelle, il existe néanmoins de fortes présomptions pour que la destruction des feldspaths potassiques conduise à la kaolinite. C'est, en effet, à partir du moment où on assiste à la disparition de ces minéraux dans les profils que l'on voit augmenter de façon importante les proportions de kaolinite au sein des cortèges argileux de la matrice (stade n° 4 et horizon B des stades n° 5). On assisterait donc à un véritable phénomène de néoformation d'argile kaolinique à partir des feldspaths potassiques.

324. Evolution des micas blancs (muscovite).

On n'observe pas de signe évident d'une évolution caractéristique des muscovites dans l'ensemble de la séquence étudiée. C'est seulement dans

les derniers stades évolutifs que nous pouvons parler d'un début d'ouverture des micas. Et les minéraux secondaires de type kaolinite qui leur sont alors associés, sont vraisemblablement la conséquence de simples piégeages au sein des clivages des micas.

4 - CONCLUSIONS.

L'interprétation des données précédentes met nettement en évidence deux types d'évolutions au sein de la séquence étudiée.

a) - Une évolution minéralogique des argiles qui est caractéristique de la zone superficielle des profils. Nous l'appellerons évolution "épidermique" : elle est progressive, continue et se résume en une évolution des minéraux micacés d'abord vers une vermiculite alumineuse, puis vers une chlorite secondaire.

b) - Une évolution minéralogique qui affecte les couches profondes des profils. Cette évolution "hypodermique", qui est beaucoup plus complexe comporte plusieurs phases successives :

- Au départ, lors de la phase de déclenchement des processus d'évolution, nous notons l'importance, voire la dominance des phénomènes d'héritage.
- Au cours de la phase de développement maximum des processus d'évolution rubéfiante, d'autres processus s'ajoutent aux phénomènes d'héritage qui se poursuivent à partir des éléments cristallins. Il s'agit :
 - d'importants phénomènes de transformations aux dépens des argiles micacées, c'est la phase d'argilisation la plus importante, qui est génératrice de minéraux gonflants (interstratifiés gonflants plus ou moins hydroxylés et aussi smectite de transformation),
 - des phénomènes limités de néoformations de kaolinite à partir des feldspaths de type plagioclases.
- Enfin, dans la phase de dégradation et de dérubéfaction, nous assistons à la destruction progressivement croissante des minéraux gonflants et au développement d'importants phénomènes de néoformation d'argiles kaoliniques à partir de l'ensemble des minéraux feldspathiques.

B - COMPORTEMENT DU FER AU COURS DE L'EVOLUTION.

1 - ORIGINES ET SOURCES DU FER, SENS DES TRANSFERTS.

11. ORIGINE.

Pour les sols des terrasses rhodaniennes, le fer présent au sein de la matrice fine résiduelle a 2 sources essentielles :

a) - Il provient pour une part minime du fer combiné présent initialement au sein des minéraux primaires existants dans la fraction terre fine originelle.

b) - Mais il provient pour une part beaucoup plus importante du fer qui existait au sein des éléments grossiers du type galets et graviers. Dans les stades initiaux (stade n° 1), les galets calcaires peuvent contribuer à cette fourniture de fer grâce aux propres teneurs en fer des résidus provenant de leur dissolution; dans les stades ultérieurs, ce sont les éléments cristallins qui, pour l'essentiel, jouent ce rôle de "donneurs". Leur participation à l'alimentation en fer de la matrice fine, augmente d'ailleurs au fur et à mesure que progresse l'intensité des phénomènes d'arénisation et de désagrégation, qui tendent véritablement à extraire de ces éléments grossiers de nouveaux éléments ferro-magnésiens jusqu'alors inaccessibles aux processus de pédogénèses.

Au cours de la phase de développement maximum des processus d'altération rubéfiante, ces minéraux sont susceptibles de fournir de nouvelles formes de fer ou "formes de fer fraîches" qui s'accumulent en partie dans la matrice fine. Ainsi, tout se passe comme si, en vieillissant les sols des terrasses rhodaniennes se comportaient comme des matériaux jeunes. Sur le plan minéralogique, nous avons vu plus haut que ce sont les phénomènes de dissolution des amphiboles et ceux de transformation des micas de type biotite qui constituent les sources principales de fer.

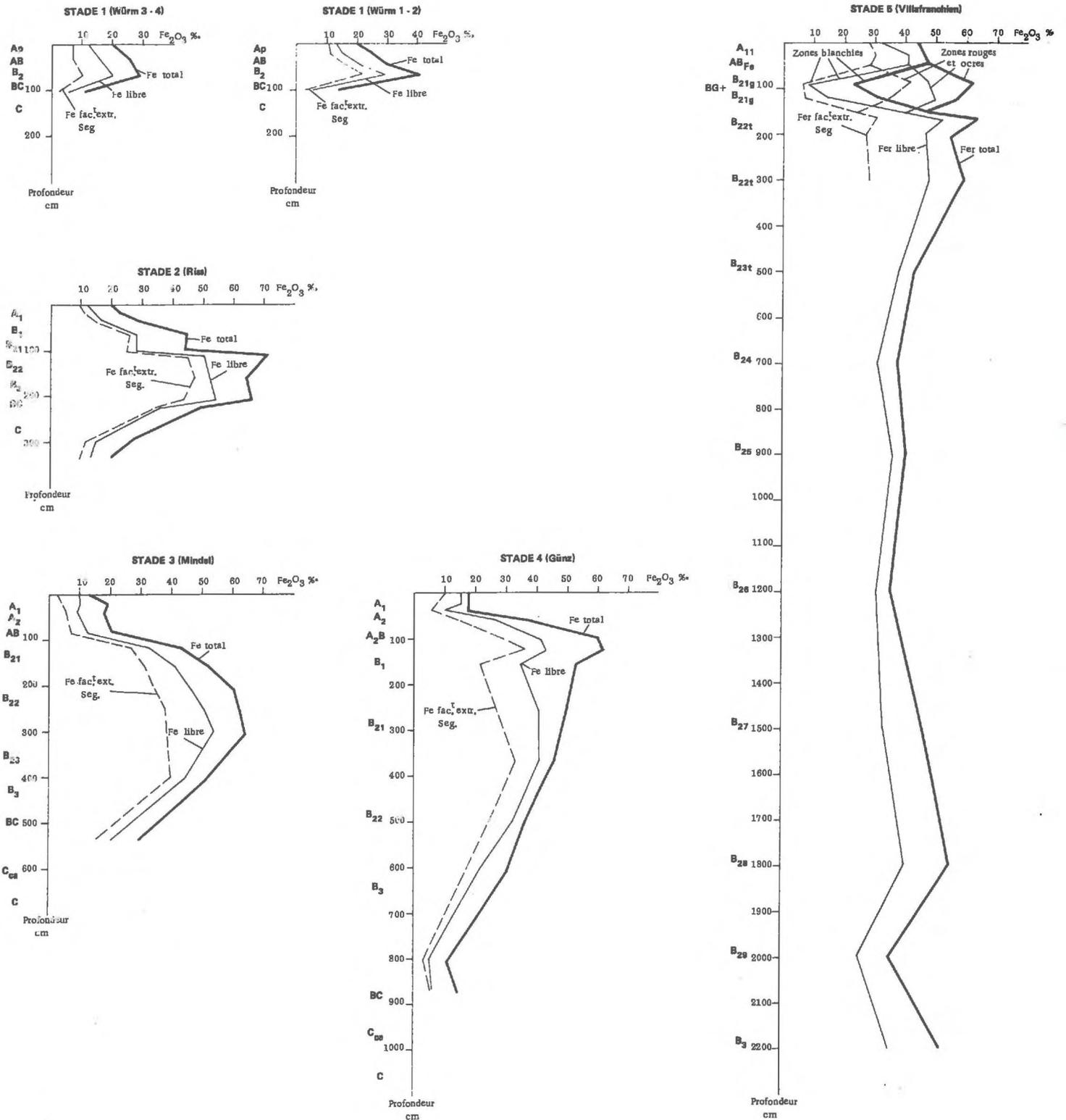
12. TRANSFERTS.

- Au cours de cette phase d'altération rubéfiante croissante, les transferts de fer s'effectuent pratiquement dans un seul sens et nous assistons surtout au passage du fer des éléments grossiers vers la fraction fine.

- En revanche, dans les derniers stades évolutifs (stade 4 et en particulier stade 5), où il y a disparition quasi-complète des structures primaires, les sources de fer sont en voie de tarissement complet sur des épaisseurs de profil de plus en plus grandes. La dynamique de redistribution du fer s'oriente différemment et ce sont les minéraux secondaires phylliteux qui peuvent

Fig. 10 - 3

VARIATIONS VERTICALES DES TENEURS EN «FER TOTAL» (FUSION), EN «FER LIBRE» (DE ENDREDY) ET EN «FER FACILEMENT EXTRACTIBLE» (SÉGALEN) DANS LES PRINCIPAUX STADES ÉVOLUTIFS DE LA SÉQUENCE RHODANIE



subir des phénomènes de dégradation (transformation des illites ferrifères, dégradation des montmorillonites). Les transferts changent alors de sens et ne se font plus vers la fraction fine, mais aux dépens de cette fraction fine, avec élimination du fer le long de fissures (lignes de dégradation) et accumulation au sein des éléments graveleux pour former des nodules ferrugineux.

2 - EVOLUTION ET DYNAMIQUE COMPAREE DES DIFFERENTES FORMES DE FER.

Une image indirecte de la résultante de ces transferts peut être obtenue en suivant l'évolution du fer à l'intérieur de la matrice fine résiduelle. Les résultats des divers types d'extraction du fer ont déjà été détaillés dans la deuxième partie du mémoire. Les courbes de la figure 10.3 en donnent une image d'ensemble qui permet :

- de suivre l'évolution du fer à l'intérieur de chaque profil au fur et à mesure de la différenciation;
- de comparer la dynamique évolutive du fer au sein des différents stades au fur et à mesure de la progression des processus.

21. DYNAMIQUE DU FER ET DIFFERENCIATION VERTICALE DES PROFILS.

Au sein de chaque profil, les différentes formes d'extraction du fer évoluent de façon tout à fait parallèle. Au plan de la dynamique du fer, la différenciation des profils se traduit pour les premiers stades évolutifs en voie de rubéfaction par un appauvrissement assez net en fer des horizons de surface et par une accumulation au niveau des horizons B, laquelle est à la fois la conséquence des phénomènes d'entraînement mécanique et surtout la manifestation de l'importance croissante des phénomènes de transferts entre éléments grossiers et terre fine.

La tendance à l'homogénéisation de la distribution du fer qui apparaît au dernier stade évolutif traduit en grande partie la fin de ces transferts par tarissement des sources ("épuisement" des minéraux ferro-magnésiens) et nous constatons qu'à la différenciation par horizons se substitue alors une différenciation au sein même des horizons de surface entre zones encore rubéfiées ou jaunes et zones blanchies fortement déferrifiées.

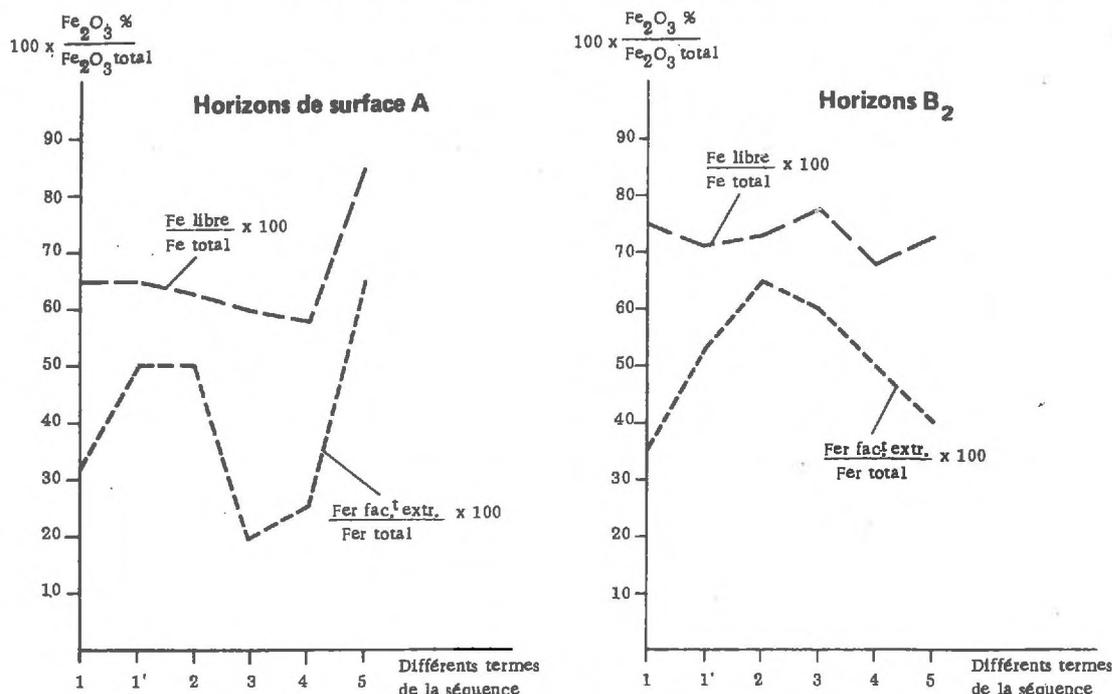
22. DYNAMIQUE DU FER ET PROGRESSION DES PHENOMENES EVOLUTIFS.

La phase de développement croissant des phénomènes d'altération rubéfiante dans les matériaux fluvio-glaciaires rhodaniens se traduit au sein des horizons B (stade 1 au stade 4) par l'accumulation de quantités de plus en plus importantes de fer sous formes mobiles, cristallisées ou amorphes, fixées ou non sur les surfaces argileuses.

Les variations des proportions relatives de "fer libre" et de "fer facilement extractible" par rapport au "fer total" au sein de la séquence étudiée sont représentées dans la figure 10.4 .

Fig. 10 - 4

VARIATIONS DES PROPORTIONS RELATIVES DE «FER LIBRE»
ET DE «FER FACILEMENT EXTRACTIBLE» PAR RAPPORT AU «FER TOTAL»
DANS LES DIFFÉRENTS TERMES DE LA SÉQUENCE RHODANIENNE



- Les formes de fer dites "libres" se situent à un taux important dès le premier stade évolutif, c'est à dire dès que commence à se déclencher le processus de rubéfaction, puisqu'on aboutit rapidement (dès le stade n° 2) à l'acquisition de teneurs en fer libre voisines de 5 à 6 % ; ces valeurs variant ensuite assez peu dans les termes plus évolués de la séquence. Ce taux élevé de libération du fer semble bien être une des caractéristiques du processus pédogénétique fersiallitique, si ce n'est du processus rubéfiant lui-même. Ici, dans les sols des terrasses rhodaniennes, il se situe statistiquement autour de 80 %, ce qui est nettement plus élevé que dans les sols de type brunifié (60-65%), lui-même plus fort que dans les sols peu évolués (30-40 %)

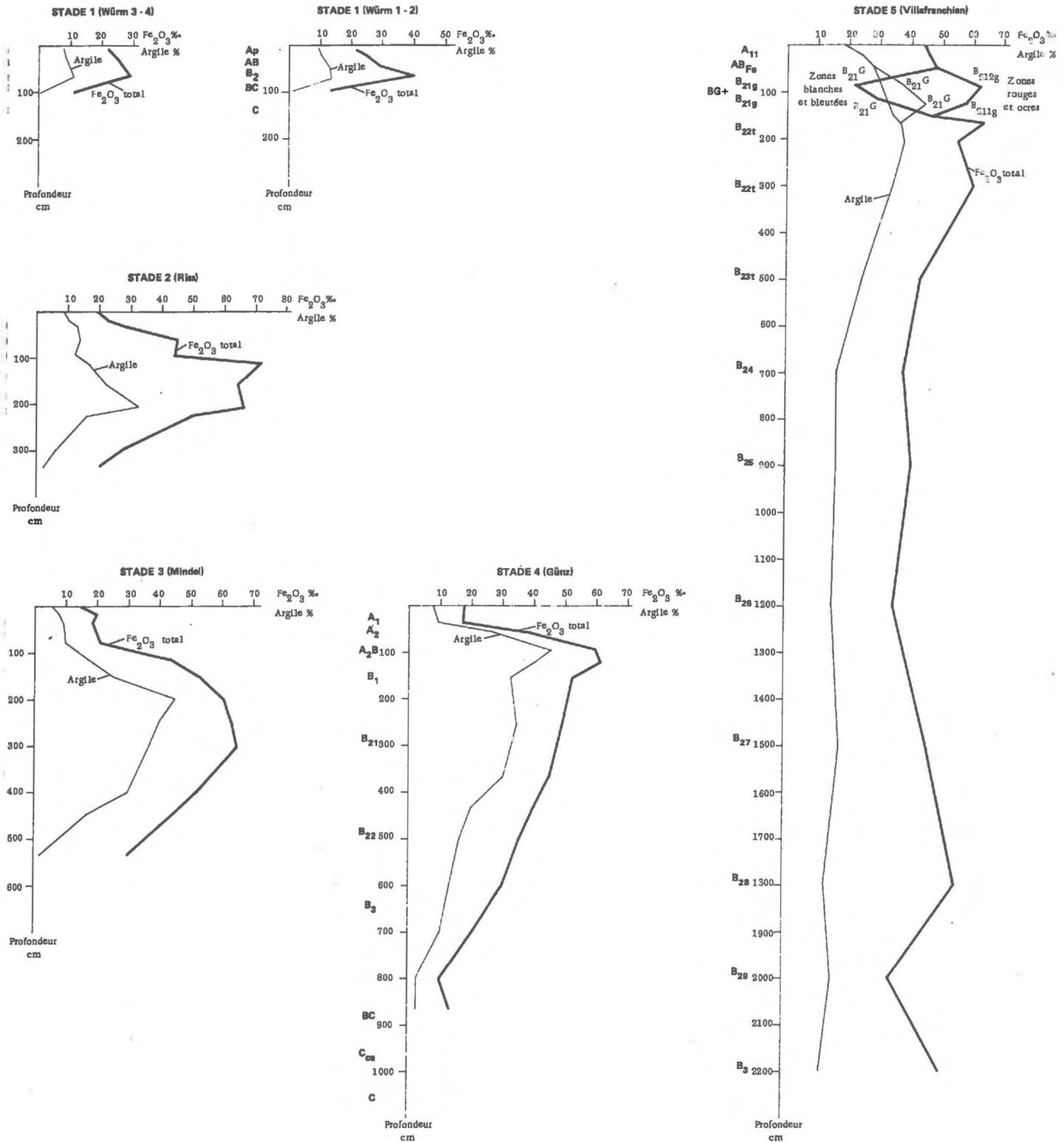
Ceci traduit assez bien le fait qu'au sein de la fraction fine résiduelle, le fer n'est déjà plus à l'état combiné lié aux minéraux primaires originels, mais qu'il se présente sous des formes plus mobiles, plus ou moins bien cristallisées ou amorphes.

- Les variations des teneurs en "fer facilement extractible" nous apportent un certain nombre de nuances sur l'évolution des transferts "fer combiné fer mobile" au sein de cette fraction fine et notamment sur le rôle qu'ils peuvent jouer sur la gradation et la progression des processus rubéfiant eux-mêmes. Le développement de ces formes de fer, facilement extractibles précèdent toujours l'apparition et les manifestations du caractère rubéfiant, nous pouvons donc penser qu'elles en sont directement responsables.

Soulignons d'ailleurs qu'au cours des phases croissantes de rubéfaction, ces formes de "fer facilement extractible" évoluent de façon assez similaire au sein des horizons B et des horizons de surface. En revanche, lorsque débute le phénomène de dégradation et de dérubéfaction, apparaît une disjonction très nette dans la dynamique des formes de fer au sein de ces 2

Fig. 10 - 5

VARIATIONS VERTICALES DES TENEURS EN « FER TOTAL » (en Fe_2O_3 ‰) ET EN « ARGILE » (en pour cent) DANS LES PRINCIPAUX STADES ÉVOLUTIFS DE LA SÉQUENCE RHODANIENNE



types d'horizons. Les horizons de surface conservent des taux élevés de fer libre et de fer facilement extractible en liaison avec la dégradation des minéraux argileux; au contraire, dans les horizons B, si les formes libres restent à un niveau élevé, les teneurs en Fer Fac.Extract. diminuent, ce qui peut être l'indice d'un développement des formes mieux cristallisées au sein de ces niveaux.

3 - ETAT DES RELATIONS FER-ARGILE.

Il s'agit essentiellement de comparer la dynamique des phénomènes d'argilisation et des phénomènes de libération de fer.

31. COMPARAISON DE LA DYNAMIQUE VERTICALE DU FER ET DE L'ARGILE. Elle est présentée dans la figure 10.5 qui met en évidence deux phénomènes d'allure opposée.

a) - Dans les 4 premiers stades évolutifs qui correspondent à des sols de plus en plus rubéfiés, les distributions verticales du fer et de l'argile restent tout à fait comparables, au fur et à mesure du développement des profils. Nous retrouvons ici un résultat communément admis dans ce type de sol : les oxydes de fer accompagnent l'argile et sont distribués de façon similaire dans les profils. En réalité, nous avons vu dans les paragraphes qui précèdent que seule la convergence de plusieurs phénomènes complexes permet de parvenir à ce résultat : phénomènes de redistribution d'argile et de fer au sein de la fraction fine elle-même, mais aussi phénomènes de transferts qui conduisent ces deux éléments à passer des galets jusqu'à la fraction fine.

b) - Dans la phase de dégradation et de dérubéfaction (stade n° 5), la disjonction fer-argile transparait clairement au sein des horizons de surface et traduit assez bien la différenciation morphologique existant entre zones rubéfiées ou lutéfiées et zones fortement décolorées et déferriées.

32. DYNAMIQUE COMPAREE DU FER ET DE L'ARGILE EN RAPPORT AVEC LES PROCESSUS D'EVOLUTION.

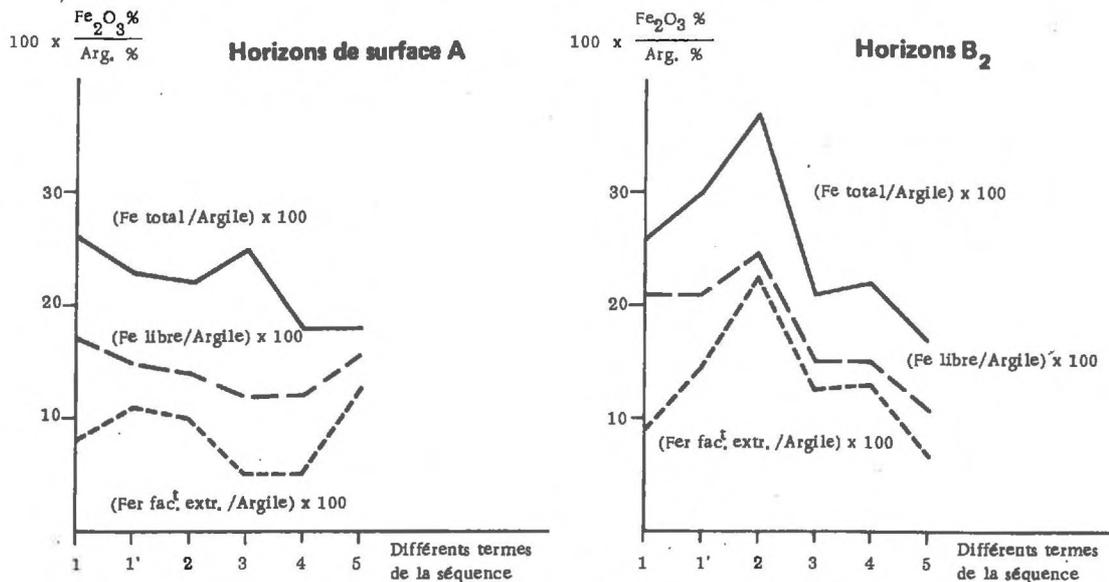
Pour procéder à cette comparaison, il faut étudier les variations des rapports fer/argile établis dans les principaux stades évolutifs de la séquence étudiée, respectivement pour le fer total, le fer libre et le fer facilement extractible (cf. figures 10.6).

- Au sein des horizons de surface, le fer et l'argile obéissent à une dynamique à peu près comparable qui traduit un appauvrissement progressif en ces 2 éléments avec une cinétique plus rapide pour le fer que pour l'argile.

- Mais, le phénomène capital se situe au niveau des horizons B où l'on peut constater que les rapports fer-argile augmentent fortement dans les premiers termes évolutifs jusqu'au stade n° 2, pour diminuer ensuite jusqu'au stade n° 5.

Fig. 10 - 6

VARIATIONS DES RAPPORTS FER/ARGILE POUR 3 TYPES D'EXTRACTION DU FER DANS LES PRINCIPAUX TERMES DE LA SÉQUENCE RHODANIENNE



Ceci revient à dire que c'est lors de la phase du déclenchement des processus d'évolution que nous assistons proportionnellement à une plus forte production de fer relativement à l'argile. Dans les termes ultérieurs, c'est au contraire les processus d'argilification qui prennent le pas sur ceux de production et de libération du fer.

Ainsi, lorsqu'on raisonne en termes de dynamique, nous pouvons constater au vu de ces données, que lors de la progression des phénomènes d'altération rubéfiante en fonction du temps, le fer n'accompagne pas l'argile, comme on le dit dans C.P.C.S. (1971). Mais, au contraire, il existe un décalage dans l'autre sens entre les mécanismes qui tendent à libérer le fer et ceux qui tendent à fabriquer l'argile.

Ce résultat présente un intérêt fondamental pour le déclenchement et l'orientation même des phénomènes d'évolution dans les sols de terrasses. Ce déphasage assure, en effet, la présence constante d'un excès de fer au moment de la formation d'argile; il peut avoir une influence directe sur les possibilités de micro-cristallisation du fer et aussi sur la création des liaisons fer-argile.

- PROBLEME DE LA CARACTERISATION DES FORMES DU FER.

Les courbes d'extraction cumulées du fer, obtenues par la méthode SEGALIN, ont été utilisées sous l'aspect quantitatif pour déterminer les proportions de "fer facilement extractible" présentes dans les sols étudiés. Ce sont ces résultats que nous venons de présenter et de discuter.

Tabl. 10 - 2

ÉVOLUTION POSSIBLE DES FORMES DU FER DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES

Type d'horizons	Stade 1		Stade 2	Stade 3	Stade 4	Stade 5
	(Würm récent)	(Würm ancien)	(Riss)	(Mündel)	(Günz)	(Villafranchien)
Horizons de surface	Une seule forme de fer facilement extractible ; goethite mal cristallisée ou en voie de cristallisation,	Une seule forme de fer facilement extractible mal cristallisée ou en voie de cristallisation	Une seule forme de fer facilement extractible Goethite micro-cristalline	Une seule forme de fer micro-cristalline assez peu abondante	Très peu de fer facilement extractible ; fer finement cristallisé sur les sables	Une seule forme de fer assez abondante. Goethite microcristalline
Horizons B		Deux formes de fer facilement extractible : a - une fraction peu importante qui serait non ou très finement cristallisée et non liée aux argiles b - une fraction importante mal cristallisée ; goethite adsorbée sur les argiles de type smectites	Deux formes de Fe F, E. a - une fraction micro-cristalline ; Hématite plus importante b - une forme mal cristallisée.	Deux formes de Fe F, E. a - idem stade 3 b - une forme en voie de cristallisation ou de vieillissement	Pratiquement pas de fer amorphe mais deux formes de Fe F, E. a - une forme finement cristallisée liée aux illites : goethite + illite b - une autre forme mieux cristallisée ; goethite (s. jaunes)	

A partir de ces courbes (cf. fig. 3.3, 4.2, 4.3, 4.4, 5.2, 6.2, 6.3), nous avons également pu construire des courbes dérivées dites de "dissolution" qui possèdent des caractéristiques de formes qui leurs sont propres. A la suite des travaux réalisés avec ce type d'extraction sur des espèces ou des mélanges d'espèces minéralogiques simples par QUANTIN et LAMOUROUX (1973-1974) et par NALOVIC et HUMBEL (1971), nous disposons d'un certain nombre de références expérimentales qui peuvent servir de bases à des interprétations ayant valeur qualitative. Ces données confrontées avec les résultats des analyses par diffraction X ainsi qu'avec ceux des analyses thermo-pondérales permettent de déduire un certain nombre de données concernant l'évolution des formes de fer dans les sols de la séquence étudiée. Ces résultats sont rassemblés de façon schématique dans le tableau 10.2. Soulignons qu'au stade actuel de nos investigations, nous n'avons pas réussi à les confirmer ou à les infirmer, malgré les essais effectués au microscope électronique (par transmission sur des suspensions d'argiles).

L'analyse du tableau 10.2 concernant l'évolution des différentes formes de fer dans la séquence de sols des terrasses rhodaniennes peut se résumer comme suit :

a) - Au début du déclenchement des processus d'altération rubéfiante, on assiste au maintien voire à un léger développement, des formes de fer finement cristallisées initialement présentes dans la roche-mère ou dans le sol jeune déjà décalcarisé mais encore peu rubéfié et pratiquement non argilifié.

b) - Dans les stades où les processus rubéfiants sont nettement mieux exprimés, mais qui sont encore peu argilifiés (stade n° 2), nous notons une forte production d'oxydes de fer qui semble exister sous des formes très mal à très finement cristallisées. Cette tendance se maintient dans les stades n° 3 (les plus rubéfiés) où les formes de fer finement cristallisées restent dominantes.

Au cours de ces 2 stades, les formes du fer restent très nettement liées ou fixées sur les réseaux d'argiles de type 2/1.

c) - Enfin, dans les stades plus évolués (stade 4 et stade 5) où se produit une nette acidification et une désaturation en bases, il semble y avoir individualisation de formes mieux cristallisées par vieillissement (l'Hématite apparaît en A.T.D. dans les sols encore rubéfiés), mais surtout la goethite est plus fréquente dans les sols jaunes.

5 - CONCLUSIONS SUR LA DYNAMIQUE GLOBALE ET LE COMPORTEMENT DU FER DANS LA SEQUENCE ETUDIEE.

L'ensemble des considérations qui précèdent est résumé sous forme schématique dans le tableau 10.3 qui suggère les conclusions suivantes :

a) - Le phénomène de rubéfaction dans les sols des terrasses rhodaniennes est déclenché par la libération massive de formes de fer libres, mal ou finement cristallisées, préalablement à la production même d'argile.

**INFLUENCE DES RELATIONS SQUELETTE - PLASMA ET FER - ARGILE
SUR LA DYNAMIQUE DU FER DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES**

	SOL PEU RUBÉFIÉ	SOL FORTEMENT RUBÉFIÉ	SOL ROUGE EN VOIE DE DÉGRADATION	SOL JAUNE OU SOL DÉGRADÉ
SQUELETTE	DISSOLUTION des galets calcaires et début de désagrégation des galets cristallins	ALTERATION CHIMIQUE importante des structures primaires (surtout, galets cristallins)	DISPARITION COMPLETE DES STRUCTURES PRIMAIRES jusqu'à des profondeurs croissantes et passage à un squelette uniquement siliceux	Affinement progressif du squelette siliceux (quartz + silex)
PLASMA	Plasma peu abondant et peu coloré	Plasma abondant (dominant) fortement coloré par le fer	Plasma argileux <u>incomplètement</u> déferriqué et localement remobilisé	Plasma limoneux + Plasma argileux souvent déferriqué
RELATIONS SQUELETTE PLASMA	GALETS CRISTALLINS = "DONNEURS" ou fournisseurs d'argile	REMPLEISSAGE DES STRUCTURES PIEGES (galets siliceux : silex + quartzites)	VIDANGE PROGRESSIVE DES STRUCTURES-PIEGES Sortie de l'argile ferrique	Disjonction squelette-plasma dans les horizons de surface, mais liaisons conservées dans les niveaux d'altération fonctionnels (milieu et base B)
ARGILE ↑ FER			Dissociation partielle des liaisons fer-argile Argile - Fer → Redistribution importante de l'argile → Redistribution et ségrégation du fer (nodules et concrétions ferrugineuses)	
	ASSOCIATION STABLE FER-ARGILE FIXATION ET CONCENTRATION DU FER AU SEIN DE LA PHASE RESIDUELLE ARGILEUSE		DÉBUT DE DISSOCIATION "LOCALISÉE" FER - ARGILE → DISSOCIATION MARQUÉE des LIAISONS FER-ARGILE	

b) - La couleur rouge ne se manifeste et ne paraît pouvoir s'extérioriser au sein de la matrice qu'à partir du moment où le fer produit peut se fixer ou se combiner avec les argiles, donnant des organisations minéralogiques à structure particulièrement stables qui contribuent à conférer au sol lui-même une grande stabilité.

c) - Il y a bien passage continu du sol rouge au sol jaune par l'intermédiaire d'un stade dégradé.

d) - Ce passage est le résultat de la disjonction des liaisons "fer - argile", apparaissant au bout d'un temps de "vieillissement" suffisamment long, à la suite d'un ensemble de processus physico-chimiques : acidification et désaturation très marquée, hydromorphie consécutive au colmatage du milieu devenant localement réducteur.

Chapitre 11

BILAN DE L'EVOLUTION PEDOLOGIQUE
DANS LES TERRASSES RHODANIENNES

Grandes phases d'évolution

Mécanismes mis en jeu

Modalités de leur propagation

Après avoir procédé à un essai de reconstitution de l'histoire des sols de terrasses, nous dégagerons les traits géochimiques caractéristiques de la pédogénèse dans les formations fluvio-glaciaires. Puis, nous rassemblerons les principales idées concernant les modalités d'intervention et de propagation des mécanismes responsables de l'évolution dans ces matériaux.

1 - GRANDES PHASES DE L'EVOLUTION PEDOLOGIQUE DANS LES TERRASSES RHODANIENNES.

La formation des sols des terrasses rhodaniennes comprend 4 grandes étapes que nous pouvons maintenant reconstituer, en insistant sur l'aspect géochimique des phénomènes et en nous efforçant notamment de voir comment nous pouvons relier les phases essentielles d'altération des minéraux primaires et secondaires avec la dynamique des pertes chimiques.

11. DECLENCHEMENT DES PROCESSUS RUBEFIANTS : Premiers stades d'évolution.

Dès le premier stade d'évolution, le carbonate de calcium est éliminé du profil à 95 % par dissolution, qu'il s'agisse des carbonates contenus dans la fraction terre fine ou des éléments grossiers du type cailloux et graviers calcaires. Seuls subsistent quelques galets en voie de dissolution, disséminés sur toute l'épaisseur du profil, mais qui restent plus abondants dans la zone de transition A'₂-BC existant entre sol et matériau-mère.

Du stade 1 au stade 2, les pertes calculées en fer et en aluminium ne subissent pratiquement que de faibles variations, alors qu'au contraire celles en silice totale, silice non quartz et potassium augmentent de façon assez sensible.

Or, pour le fer, le niveau de pertes observé est très bas puisqu'il reste inférieur ou égal à 20 % de la masse de fer originel. Ceci s'accorde assez bien avec les observations faites en micromorphologie, qui montrent que seuls les amphiboles et les pyroxènes, d'ailleurs présents en quantité relativement faible sur l'ensemble des matériaux-mères, sont dans une phase d'altération active. Au contraire, les micas "biotites" sont encore dans une phase préparatoire à l'altération (pertes de pléochroïsme, exsudation partielle ou localisée du fer sur certains gros cristaux).

D'un autre côté, les pertes en aluminium, silice et potassium se situent à un niveau bien plus élevé soit dès le premier stade (pertes en Al_2O_3 , voisines de 50 %), soit à partir du stade 2 (pertes de silice atteignant alors 50 %, les pertes en K_2O dépassent 75 %). Ces faits convergent également assez bien avec les observations qui ont été réalisées sur les lames minces de sols, où nous avons pu constater que dès les premiers stades d'évolution, nous assistons à de fortes possibilités d'altération de certains feldspaths présents au sein des galets cristallins.

Nous pouvons donc raisonnablement penser qu'une grosse partie des pertes calculées pour les divers éléments cités plus haut sont à mettre sous le compte de l'altération de ces minéraux. Il s'agit essentiellement des plagioclases (albite, oligoclase et andésine) qui, dans ces deux premiers stades d'évolution, semblent à leur phase maximale d'altération; la contribution des autres feldspaths et celle des micas de type biotite restant encore très limitée.

12. PHASE DE DEVELOPPEMENT MAXIMUM DES PROCESSUS D'ALTERATION RUBEFIANTE : Stade d'évolution n° 3.

Au stade n° 3, il y a augmentation assez sensible de toutes les pertes calculées en cations. Néanmoins, relativement aux 2 stades précédents, la plus forte augmentation enregistrée intéresse nettement le fer, dont les pertes sont grossièrement multipliées par 2 (elles passent de 16 % à 34 %). Pour Al_2O_3 , SiO_2 et K_2O , l'augmentation du niveau des pertes se situe dans des proportions bien inférieures (+ 10 % pour Al_2O_3 + 15 % pour SiO_2 + 5 % pour K_2O).

L'évolution de ces pertes en éléments chimiques peut être mise en relation avec les observations qualitatives réalisées sur lames minces, ce qui éclaire quelques points caractéristiques de l'altération des minéraux primaires se produisant au cours de ce stade évolutif. Parmi les plus importants, on peut signaler :

- la poursuite de l'altération des feldspaths allant jusqu'à leur disparition progressive. Ce sont maintenant les feldspaths potassiques qui commencent à prendre le relais des feldspaths calco-sodiques, de sorte que les phénomènes d'altération intéressent la totalité des éléments feldspathiques,
- par suite de la dissolution de cette trame feldspathique, nous assistons à une diminution brutale de la cohésion des galets cristallins et à une destruction progressive de leur architecture. Ceci entraîne leur désagrégation quasi-complète et leur intégration à la matrice d'altération (cf. chap.7 et chap.8 par.63).

Du fait de cette altération, les micas noirs, de type biotite qui ne sont plus protégés par la masse des galets rentrent eux aussi dans leur phase maximale d'altération. Elle se traduit entre autre par une exsudation très importante du fer hors des réseaux (les grosses paillettes de micas s'entourent d'une auréole de fer hydratée, bien visible en lames minces).

13. PHASE DE TRANSITION : AMORCE DES PHENOMENES DE DEGRADATION.

C'est dans le stade n° 4 que se produit la plus forte disjonction entre les horizons A et les horizons B. En effet, alors que les pertes continuent à croître dans les horizons de surface, par le calcul nous enregistrons au sein des horizons B une diminution apparente, brutale et spectaculaire, de la presque totalité des pertes en cations (à l'exception du magnésium), quelle que soit la façon de conduire les calculs (horizon B considéré comme fonctionnant indépendamment, ou bien horizon B fonctionnant en intégrant les pertes de A).

Problèmes et discussions

Ce comportement apparaît bien comme une coupure évolutive majeure qui peut donner lieu à plusieurs interprétations possibles.

1ère interprétation

Il est possible d'envisager à priori que ce stade n'appartienne pas réellement sur le plan de la gradation des processus évolutifs au même phyllum que les autres termes décrits précédemment. Néanmoins, cette hypothèse paraît contraire à la plupart des données de terrain : compte-tenu notamment de la composition de la roche-mère originelle qui reste très comparable, de la bonne représentativité du niveau morphologique choisi et de la certitude que nous avons quant à l'appréciation de sa position chronologique. Un seul point peut prêter à discussion, du fait de la situation du profil de référence dans l'axe du courant rhodanien, c'est l'impossibilité d'avoir l'assurance absolue d'une conservation intégrale de l'ensemble de la masse d'altération originale. Nous y reviendrons plus loin.

2ème interprétation

Pour expliquer la moindre importance des pertes par rapport au stade précédent, il est également possible d'évoquer des apports extérieurs comme des recouvrements éoliens interglaciaires Günz-Mindel. Cela supposerait que la quasi-totalité de ces dépôts ait maintenant disparu par altération et que ce sont uniquement les produits de dissolution de ces matériaux qui seraient venus enrichir les horizons B des profils günziens, de sorte que le bilan global actuel pour ces horizons profonds pourrait apparaître positif (et se traduire par une diminution des pertes) par rapport au B des sols mindéliens (stade 3).

3ème interprétation

Une troisième hypothèse d'ailleurs voisine de la précédente peut aussi être proposée. Elle ne met pas en jeu d'apport ou de recouvrement pré-

sentant une composition différente de celle du matériau caillouteux original, mais fait simplement intervenir la possibilité d'un décapage partiel des horizons de surface qui avait déjà été envisagée dans la première interprétation. De ce fait, les pertes calculées à partir d'un horizon A actuel trop mince sont automatiquement sous-évaluées et du même coup les pertes globales des horizons B qui intègrent nécessairement les pertes précédentes sont elles aussi sous-estimées.

Les preuves absolues manquent pour départager les 3 interprétations en présence et faire un choix raisonné entre l'une ou l'autre d'entre elles. Cependant, avec les éléments dont nous disposons, c'est la 3ème interprétation qui paraît à la fois la plus simple et la plus logique sur le plan de la dynamique et de la gradation évolutive des processus d'altération.

Néanmoins, soulignons que cette hypothèse ne permet pas de rendre compte à elle seule de la diminution des pertes calculées pour l'horizon B fonctionnant de façon indépendante. Pour cela, il est nécessaire de faire appel à une autre interprétation, qui se réfère au mode de calcul même des pertes chimiques.

4ème interprétation

Si nous reprenons la relation (IV) (cf. chap. 9, p. 221) qui a servi au calcul de ces pertes chimiques élémentaires, il faut rappeler que son principe de base était avant une tentative d'évaluation des pertes chimiques possibles au cours des transformations des "éléments grossiers en terre fine" ou matrice d'altération. Cette relation ne garde un véritable sens que si l'on prend bien en compte tous les éléments grossiers qui participent effectivement à la production de terre fine. Ceci se vérifie bien pour les 3 premiers stades évolutifs. Par contre, dans le stade 4, la majorité voire la totalité des éléments grossiers caillouteux ou graveleux a déjà été intégrée à la matrice d'altération fine, puisque l'ensemble des éléments calcaires et granitiques est pratiquement transformé en élément fin dès le stade précédent.

Dans ces conditions, la relation IV peut-elle encore s'appliquer à partir de ce stade d'évolution n° 4 ? On pourrait pratiquement répondre négativement s'il ne se produisait plus aucune transformation, soit au sein des éléments grossiers eux-mêmes, soit des éléments grossiers vers la terre fine. Mais les paragraphes précédents relatifs aux phénomènes de transformations mécaniques ont mis en évidence que c'est justement à partir de ces stades qu'une partie des éléments grossiers siliceux (silex et cailloutis quartzitiques) pouvait se fragmenter en éléments plus petits de la taille des graviers.

Deux questions se posent alors. Ces phénomènes de fragmentation des éléments siliceux peuvent-ils avoir une influence sur le calcul des pertes au niveau chimique ? Si oui, ont-ils été ou non pris en compte dans les calculs déjà effectués ? Il est bien clair que si la production de graviers à partir des cailloux siliceux intéressait des éléments à composante uniquement siliceuse, seules les pertes en SiO_2 pourraient éventuellement être influencées. Mais, les observations micromorphologiques ont pu montrer (cf. lames minces de sols - planche XII) qu'une grosse partie des éléments siliceux jouait un rôle de piège à argile et à oxydes de fer et qu'ils subissaient des remplissages plus ou moins importants, au cours des stades d'évo-

lution 1, 2 et 3. Au contraire, des phénomènes de vidange partielle de ces volumes poreux pouvaient intervenir à partie du stade n° 4.

Par suite, que les phénomènes de fragmentation interviennent ou non, il est évident que la masse des produits piégés au sein des éléments siliceux a un rôle direct sur les pertes chimiques. Mais, dans les calculs effectués, ces produits argilo-ferriques n'ont pas été pris en compte pour l'évaluation des pertes chimiques, pour la raison bien simple que l'appréciation de leur poids réel était très difficile à pratiquer. Cela a donc une double conséquence :

1ère conséquence

Au cours de la phase de mise en réserves des produits pièges dans les silex et les grès siliceux (c'est à dire au cours des stades 1, 2 et 3), les pertes qui ont été calculées ont nécessairement été surévaluées pour tous les éléments puisque tous ces produits qui sont pourtant restés à l'intérieur des horizons n'ont pas été comptabilisés.

2ème conséquence

Inversement, au cours de la phase de vidange de ces éléments piégés (phase qui se déclenche précisément au stade n° 4), ces produits sont restitués progressivement à la matrice fine d'altération. Ils se comportent en quelque sorte comme des "éléments étrangers" ou véritables apports extérieurs qu'on réinjecte dans le système d'altération aussi bien au niveau de l'horizon A que de l'horizon B contribuant ainsi directement à diminuer les pertes par rapport aux stades précédents (stade 3 par exemple), où ces produits, bien que présents, n'avaient pas été pris en compte.

En combinant cette interprétation avec celle qui avait été retenue plus haut (3ème interprétation), nous pouvons nous rendre compte que la diminution observée à ce stade 4, pour la majorité des pertes en cations, n'est en réalité qu'une diminution apparente due au mode de calcul de ces pertes, qui a négligé :

- d'un côté, la possibilité de présence d'un horizon d'épaisseur supérieure à celle observée actuellement;
- d'un autre côté, la présence de produits argilo-ferriques enfermés en plus ou moins grande quantité dans la porosité interne de certains galets siliceux.

Malgré ces approximations et ces imperfections, le mode de calcul des pertes chimiques utilisé permet toutefois de mettre en évidence quelques aspects fondamentaux de la dynamique d'altération des matériaux rhodaniens et fournit d'utiles indications ou possibilités de recoupements concernant l'altération des minéraux. Parmi les faits essentiels nous retiendrons les éléments suivants relatifs au stade d'évolution n° 4 :

- a) - La diminution des pertes en cations, même si elle est considérablement exagérée du fait du mode de calcul employé est néanmoins révélatrice d'une certaine tendance évolutive. Elle traduit d'une certaine façon, le tarissement d'une des principales sources de cations, c'est à dire l'épuisement par disparition de la grosse majorité des minéraux primaires facile-

ment altérables, notamment tous les minéraux ferro-magnésiens communs dans le matériau étudié (pyroxènes, amphiboles et micas biotites), ainsi que les feldspaths du type plagioclase.

La faible baisse enregistrée pour les pertes en K_2O relativement à la forte chute constatée pour les autres cations (Fe, Si, Al) est à mettre en parallèle avec les observations minéralogiques, qui révèlent une phase d'altération très poussée des feldspaths potassiques, particulièrement dans le sommet des horizons B.

b) - Cette évolution qui correspond grossièrement à une stabilisation des pertes à un niveau voisin de celui atteint au stade précédent (stade 3) indique également un changement profond dans la dynamique de progression des phénomènes d'altération. C'est le passage d'un système ouvert et drainant où dominaient les phénomènes de transformation rapide des minéraux primaires facilement altérables à un système semi-confiné (horizon B colmaté) où les argiles sont abondantes et où les possibilités d'évolution ne se situent plus tellement sur le plan physique et mécanique, mais bien davantage au plan de la structure intime de ces minéraux. Il s'agit de phénomènes de transformation beaucoup plus lents qui exigent des conditions physico-chimiques strictes et des temps de "maturation" plus longs.

14. PHASE MAJEURE DE DEGRADATION ET DE DERUBEFACON : stade d'évolution n° 5

Au cours de ce dernier stade d'évolution, les calculs effectués sur les mêmes bases que précédemment révèlent une augmentation générale du niveau des pertes pour tous les cations, y compris pour le fer. Les pertes sont de 20 à 30 % supérieures aux niveaux les plus élevés atteints au stade 3.

Par rapport au stade 4 précédent qui reflétait une relative stabilisation ou une diminution apparente de ces pertes, deux points essentiels sont à souligner :

a) - entre le dernier et l'avant dernier stade d'évolution, le temps qui a pu s'écouler (1 million d'années minimum) est supérieur à la durée d'ensemble des 4 premiers stades (800 000 ans). Cette durée exceptionnelle peut suffire à expliquer l'ampleur des pertes constatées.

b) - l'ensemble des minéraux primaires originels a déjà été largement affecté par des phénomènes de dissolution ou par des phénomènes de transformation, aboutissant à un ensemble complexe de minéraux argileux secondaires. Pour que des pertes puissent survenir dans ces minéraux, cela exige des modifications profondes et complètes des structures minéralogiques des phyllites. Ceci explique, dans une certaine mesure, la lenteur de déclenchement des processus.

Compte-tenu de la complexité de ces mélanges d'argiles, la connaissance des pertes chimiques ne peut d'ailleurs fournir que des renseignements minimes sur les évolutions respectives de chacun des constituants argileux. Par contre, la comparaison de la dynamique relative de ces pertes amène à constater que les pertes en fer subissent au cours de ce stade d'évolution une très forte augmentation (doublement par rapport au stade n° 3).

Ce phénomène est à mettre en relation avec une dégradation plus poussée des minéraux argileux. Et, de ce fait, nous constatons que les argiles conservent une relative résistance et une bonne stabilité tant qu'elles restent suffisamment riches en fer. Mais, dès l'établissement de conditions acides et réductrices (milieu confiné et hydromorphie de la fin du stade 4 et début du stade 5), le départ et la mise en solution du fer fixé sur les réseaux argileux sont possibles, créant des conditions de déstabilisation des argiles qui favorisent leur destruction. Ainsi, la diminution des proportions de fer fixées sur les couches externes des réseaux argileux paraît bien être une des conditions qui favorise directement la dégradation ultérieure de ces minéraux.

15. CONCLUSIONS : PRÉSENTATION D'UN MODÈLE DE FORMATION DES SOLS DE TERRASSES.

Le tableau 11.1 représente de façon schématique les différentes phases de l'évolution des sols étudiés. Il propose un modèle de formation des sols des terrasses rhodaniennes, qui s'efforce de faire la synthèse des transformations physiques et des transformations chimiques mises en évidence progressivement au cours de cette étude.

2 - TRAITÉS GÉOCHIMIQUES CARACTÉRISTIQUES DE LA PÉDOGENÈSE SUR FORMATIONS FLUVIO-GLACIAIRES.

A partir de l'histoire de la formation des sols que nous venons de retracer et en nous référant aux données rassemblées dans les chapitres précédents, il est maintenant possible de proposer une caractérisation des processus d'évolution des sols sur les formations fluvioglaciales rhodaniennes. Cette caractérisation est présentée dans le tableau 11.2 .

Pour les 4 grandes phases évolutives définies plus haut, nous explicitons les conditions de milieu qui nous paraissent déterminantes pour l'orientation de l'évolution; en même temps nous mettons l'accent sur les aspects essentiels des processus étudiés : dynamique d'évolution, mécanismes mis en jeu et comportements géochimiques des argiles et du fer.

Cette caractérisation globale des processus d'évolution doit nécessairement être complétée, car sur le plan géochimique que nous venons d'évoquer, il y a lieu de dissocier bien nettement le comportement des horizons de surface et celui des horizons B.

21. HORIZONS DE SURFACE : ÉVOLUTION "ÉPIDERMIQUE".

Les horizons de surface sont avant tout caractérisés sur le plan chimique par une dynamique soustractive, c'est à dire qu'ils se présentent comme des horizons lessivés ou appauvris typiques, intégrant les pédogénèses quaternaires anciennes et les pédogénèses subactuelles.

L'étude des pertes montre que l'élimination des cations augmente progressivement, en relation avec l'ancienneté des divers stades évolutifs. La dynamique relative de ces pertes révèle un comportement différentiel assez peu accentué pour les divers cations pris comme références. Nous remarquons néanmoins que le magnésium, le potassium et l'aluminium sont éliminés beaucoup plus vite que le fer et la silice, surtout dans les 3 premiers termes

Tabl. 11 - 1

**SUCCESSION DES DIFFÉRENTS PROCESSUS MIS EN JEU
AU COURS DE L'ÉVOLUTION SUPERFICIELLE DES TERRASSES RHODANIENNES**

1er temps : PHASE DE DECLENCHEMENT DES PROCESSUS RUBEFIANT

- | | |
|--|--|
| - Dissolution progressive des calcaires entraînant une fabrication de terre fine résiduelle (surtout limon et argile) | - Élimination des carbonates |
| - Concentration relative des fractions résiduelles résistantes à ces processus d'altération ménagés (silex et cristallins) au sein : | - Effet physique de concentration des éléments siliceux résistants |
| . des éléments grossiers et graveleux | |
| . de la terre fine elle-même | |
| - Début de fragilisation des cristallins | - Altération chimique des silicates faible ou nulle |

2ème temps : PHASE DE DEVELOPPEMENT MAXIMUM DES PROCESSUS D'ALTERATION RUBEFIANTE

- | | |
|---|--|
| - Fragilisation et désagrégation des granites : fabrication de fractions graveleuses et limoneuses | - Phase majeure de fragmentation mécanique et de désagrégation physique des cristallins |
| - Argilisation importante : | - Altération chimique croissante : argilisation avec transformation dominante des micas ou des argiles 2/1 |
| . débutant par l'altération des fractions ferromagnésiennes des granites déjà fragmentés ; | |
| . se poursuivant par l'ensemble des éléments ferromagnésiens et par la plus grosse partie des éléments feldspathiques | |

3ème temps : PHASE DE DEGRADATION ET DE DERUBÉFACTION

- | | |
|--|--|
| - Épuisement complet des altérables issus des granites depuis les horizons de surface jusqu'au sommet des horizons B : disparition quasi-complète des éléments feldspathiques et micacés au sein de toutes les fractions | ALTERATION CHIMIQUE MAJEURE |
| - Poursuite des phénomènes d'argilisation au sein des horizons B avec apparition d'un maximum d'argile au sommet de cet horizon B | - Kaolinisation des feldspaths |
| - Production importante de fractions graveleuses dans les horizons de surface des stades évolutifs ultimes. | - Néof ormation possible de smectite |
| - Acidification et développement de conditions réductrices liées à l'hydromorphie et au colmatage | - Pertes possibles de quartz |
| | - Fragmentation et désagrégation mécanique des éléments siliceux (silex et quartz) dans les horizons de surface. |
| | - Déferrification et destabilisation des argiles |
| | - Individualisations et ségrégations du fer (nodules et concrétions). |

Tabl. 11 - 2

**CARACTÉRISATION SIMPLIFIÉE DES PROCESSUS D'ÉVOLUTION
DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES**

	STADE 1 Sol faiblement ferriallitique	STADES 2 et 3 Sol ferriallitique lessivé rubéfié, peu ou moyennement désaturé	STADE 4 Sol ferriallitique lessivé désaturé, en voie de dégradation (sol en voie de dérubiéfaction)	STADE 5 Sol lessivé, acide dégradé et hydromorphe apparenté aux «ultisoils» Sol dérubiéfié et sol jaune
CONDITIONS	Température	12° < T° moy. annuelle < 14°		
	Pluviométrie	650 mm < Pluv. moy. annuelle < 850 mm Très contrastée et mal répartie avec 2 saisons sèches, 2 saisons de pluies (printemps, automne)		
DE MILIEU	Drainance	Importance des phénomènes de SOUTIRAGE (position morphologique favorisant l'écoulement, grande épaisseur des matériaux alluviaux, présence d'un substratum lui-même filtrant), d'où conservation continue d'une FORTE PERMEABILITE du matériau originel à la base des sols.		
	Drainage interne	Milieu perméable et filtrant AERE	Tendance nette au colmatage ASPHYXIE TEMPORAIRE	Milieu confiné et asphyxiant Localement REDUCTEUR
DYNAMIQUE DOMINANTE D'ÉVOLUTION	<p>DYNAMIQUE à dominance VERTICALE → DYNAMIQUE LATÉRALE →</p> <p>Hydrolyse neutre ou peu acide → Hydrolyse acide</p> <p>Altitération physique + Altitération chimique des minéraux primaires → Evolution des minéraux secondaires phylliteux</p>			
PROCESSUS	LESSIVAGE MECANIQUE LOINTAIN débutant en même temps que l'altération : TRANSIT CONTINU d'argile procédant par autoalimentation successive et autoprogression en profondeur		Appauvrissement des horizons de surface + LESSIVAGE SECONDAIRE : DEGRADATION ACIDE et HYDROMORPHIE	
RÉACTION	ph ≈ 7	5,5 < ph < 6	5 < ph < 5,5	ph < 4,5 à 5
COMPLEXE ABSORBANT	Décalcification et décarbonatation	Faible désaturation	Forte désaturation	Désaturation très marquée en A A l'aluminisation
ARGILE ↑ FER ↓	<p>Libération de fer à partir des minéraux primaires ferro-magnésiens</p> <p>Argilisation croissante à partir de l'ensemble des minéraux primaires altérables.</p> <p>Deferrification des argiles</p> <p>avec déstabilisation et remobilisation localisée</p> <p>avec remobilisation généralisée</p> <p>importante Mais localisée (hor. A)</p>			
	ASSOCIATION STABLE FER-ARGILE		DÉBUT DISSOCIATION FER-ARGILE	NETTE DISSOCIATION FER-ARGILE
MINÉRAUX ARGILEUX	Ouverture des phyllites 2/1 →	Transformation croissante des phyllites 2/1 avec fixation de fer corrélative	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation des phyllites 2/1 avec Début d'hydroxylation Chloritisation secondaire Kaolinisation des feldspaths en B₂ Néoforrations possibles au sommet du B 	
HYDROXYDES DE FER	20% de Fer fac ⁺ Ext. /argile 80% de Fer fac ⁺ Ext. /Fe total Hydroxydes de fer mal ou finement cristallisés : Hématite microcristalline		Mélange de hématite + goéthite → Ségrégations de fer hydraté (nodules) en A Fer ferreux partiellement remobilisé en B ₁ et B ₂	

évolutifs, pour parvenir dans les termes ultimes à un niveau d'appauvrissement commun voisin de 90 % des teneurs originelles.

Ces horizons sont les seuls niveaux des profils, où la matière organique a persisté en quantité suffisante pour jouer un rôle actif. C'est très probablement cette présence de matière organique qui explique l'homogénéisation du comportement géochimique des différents cations. Les résultats sont beaucoup plus nuancés, dans les horizons plus profonds.

22. HORIZONS B : EVOLUTION "HYPODERMIQUE"

Dans ces matériaux très perméables et très filtrants, et sous les climats considérés, la matière organique subit une biodégradation rapide; de plus, les zones d'altération active s'écartent rapidement de l'influence des composés organiques provenant de la surface. Aussi, l'évolution propre des horizons B est bien caractéristique d'une altération non ou peu influencée par la matière organique. Nous avons pu distinguer plusieurs phases qui se reflètent dans les différenciations déjà évoquées aux plans morphologiques et physico-chimiques et qui au plan géochimique peuvent se regrouper comme suit :

a) - Première phase ou phase de rubéfaction croissante (stades 1, 2 et 3) : elle est caractérisée avant tout par une dynamique des pertes bien différenciée qui traduit une élimination beaucoup plus rapide des cations comme le magnésium, le potassium et le silicium que celle de l'aluminium et surtout du fer. Pour être schématique, nous dirons que dans ces 3 premiers stades : Mg, K et Si s'éliminent environ 1,5 fois plus vite que Al et 2 fois plus vite que le fer.

Ce qui veut dire qu'au fur et à mesure que progressent les phénomènes d'altération rubéfiante, les produits résiduels issus de ces processus s'enrichissent en fer par rapport à tous les autres cations. Ceci étant entendu en terme global; de plus, des individualisations particulières de formes du fer peuvent accompagner cette évolution. Nous retrouvons ici des résultats homologues de ceux obtenus expérimentalement par PEDRO (1964) et ROBERT (1970) reproduisant les conditions de l'hydrolyse en milieu neutre ou peu acide, en présence d'eau circulante et en l'absence d'anions organiques.

Sur le plan géochimique proprement dit, les niveaux atteints par les pertes au cours de cette première phase évolutive sont voisins de 80 à 90 % pour Mg^{2+} et K^+ , de 60 à 70 % pour Al^{3+} et Si^{3+} et dépassent 30 % pour Fe^{3+} . Les valeurs citées sont bien supérieures (même pour le fer) à celles qu'on peut trouver dans la littérature pour une altération de ce type. Il est vrai que les seules références en la matière sont relatives à une altération fersiallitique sur roches-mères calcaires (LAMOUROUX - 1971), BOTTNER 1971).

Cette phase coïncide avec la phase d'altération active des minéraux primaires présents au sein du matériau originel et correspond, soit à des phénomènes de dissolution simple, soit à des phénomènes de transformation aboutissant à un ensemble de minéraux secondaires argileux, où dominent nettement les structures de type 2/1. La dynamique particulière de production du fer par rapport à l'argile et la dominance de minéraux argileux de type 2/1 contribuent simultanément à conférer son originalité à l'altération étudiée : l'enrichissement en oxydes de fer est favorisé par la possibilité de rétention sur les feuillets externes de ces argiles au fur et à mesure de sa libération à partir des minéraux primaires et, inversement,

cette fixation de fer entraîne un effet protecteur et stabilisant pour les réseaux argileux; il se crée ainsi une association fer-argile qui s'autostabilise et qui peut se maintenir tant que le milieu conserve des qualités et des possibilités suffisantes de drainage vertical.

Dans les conditions de milieu, ces argiles ferrifères de type 2/1 conservent de bonnes possibilités de mise en suspension; par suite, elles participent de manière indirecte à la dynamique d'entretien du processus. Les phénomènes d'entraînement mécanique ou de lessivage dont elles sont l'objet contribuent à retarder les phénomènes de remplissage complet des porosités propres du matériau et favorisant les phénomènes d'approfondissement progressif.

b) - Deuxième phase ou phase de transition correspond à un régime stationnaire de l'altération, pour ce qui concerne l'intensité et l'agressivité des processus en cause.

Ceci ne veut pas dire que l'altération est figée, mais que sa progression continue à un rythme constant, en s'attaquant à des couches nouvelles de matériau originel : ce qui se traduit par un approfondissement considérable des horizons B dont l'épaisseur passe de 3-4 m à 8-10 m.

Dans cette phase où se produit une sorte d'équilibre entre les pertes et les gains éventuels, le moindre phénomène intéressant les processus d'altération qui n'est pas pris en compte dans les calculs de bilans se répercute de manière spectaculaire dans les résultats; ce qui peut aboutir comme dans nos propres calculs, à des diminutions apparentes des pertes.

Cette phase préparatoire à la phase de dégradation qui va suivre coïncide :

- avec la disparition quasi-complète des minéraux primaires altérables,
- avec le colmatage progressif des horizons B, se traduisant par le passage d'un milieu drainant et ouvert à un milieu semi confiné et réducteur,
- avec une période d'acidification progressive, qui correspond à une période de "maturation" lente précédant une dégradation plus intense des minéraux argileux eux-mêmes.

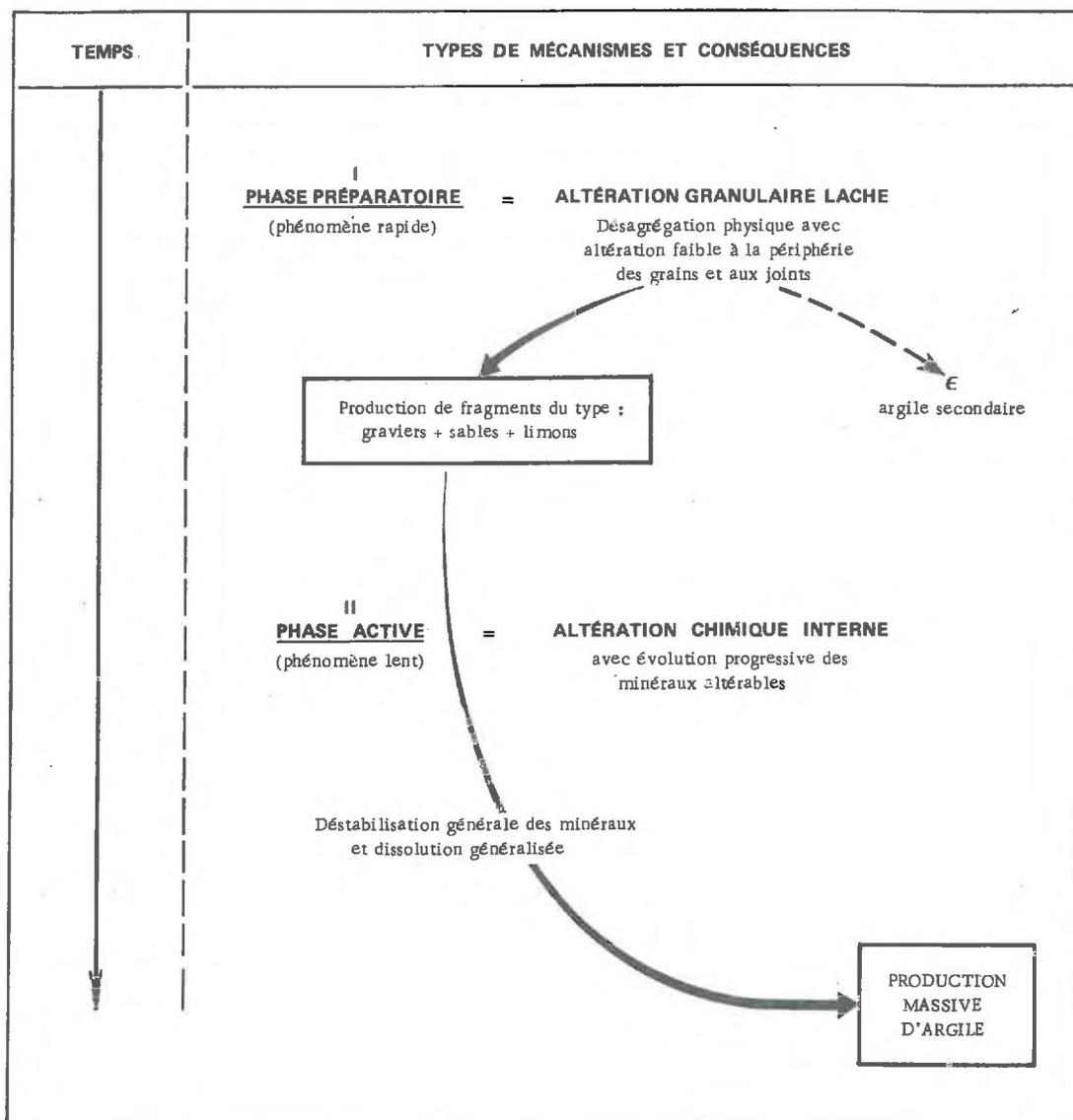
c) - Troisième phase ou phase de dérubi-faction est à associer avec le redémarrage d'une altération active, présentant néanmoins des caractéristiques bien différentes de celles que nous venons de décrire, puisque nous aboutissons finalement à des niveaux d'exportations de cations très élevés et assez voisins les uns des autres.

Il faut cependant souligner que le fer qui démarre d'un niveau de réserves beaucoup plus élevé que celui des autres cations doit nécessairement passer par des vitesses d'exportations supérieures au moins dans la période de départ.

Cette phase d'exportation active du fer constitue un des traits géochimiques caractéristiques de ce dernier stade d'altération des sols rhodaniens, puisqu'elle semble directement liée aux possibilités ultérieures de dégradation des minéraux argileux, qui sont elles-mêmes beaucoup plus profondes et qui ont été évoquées plus haut.

Fig. 11 - 1

**REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DES ROLES RESPECTIFS
DES PHÉNOMÈNES DE DÉSAGRÉGATION ET D'ALTÉRATION CHIMIQUE
DANS L'ÉVOLUTION DES GALETS CRISTALLINS**



3 - MECANISMES RESPONSABLES DES TRANSFORMATIONS DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES. LEURS INTERVENTIONS AU COURS DES PROCESSUS D'ÉVOLUTION.

En dehors des phénomènes de dissolution des éléments calcaires, qui marquent le déclenchement des processus d'évolution dans les matériaux alluviaux rhodaniens, trois grands types de mécanismes participent directement à l'évolution des sols ; ce sont respectivement dans leur ordre d'intervention chronologique : les phénomènes de désagrégation et d'altération, les phénomènes d'illuviation et enfin ceux de fragmentation mécanique.

31. LES PHENOMENES DE DESAGREGATION PHYSIQUE ET D'ALTERATION CHIMIQUE DES ELEMENTS CRISTALLINS.

Nous avons pu mettre en évidence le rôle actif joué par les éléments cristallins dans la constitution de la fraction fine résiduelle (cf. chap.7 et chap.8).

Au plan des mécanismes, la figure 11.1 donne une idée synthétique des aspects essentiels qui président à ces phénomènes et de leur enchaînement. Nous pouvons distinguer deux grandes phases :

a) - La première est une phase préparatoire relativement rapide. Nous pouvons la qualifier de phase d'altération granulaire lâche, parce qu'elle se cantonne à la périphérie des structures élémentaires cristallines et aux joints des cristaux. Elle correspond à la désagrégation des éléments cristallins, qui avaient été sensibilisés à l'altération au sein des alluvions rhodaniennes elles-mêmes. Cette phase est grandement favorisée par la dissolution des éléments calcaires, qui provoque le développement d'importantes contractions de volume des matériaux, avec effets de tassement et perturbations possibles. Phase transitoire, elle aboutit finalement à la production de fragments assez grossiers du type "graviers, sables et limons", alors que nous assistons dans le même temps à la génése d'une quantité très faible d'argile.

b) - La seconde phase est à la fois une phase plus active et beaucoup plus lente d'altération chimique. Elle correspond à une dissolution et à une destabilisation générale des minéraux : ensemble de processus qui sensibilise les matériaux et les prépare aux phénomènes d'altération plus intenses, elle aboutit à l'évolution progressive de la plus grosse partie des minéraux primaires altérables, sur laquelle nous avons longuement insisté plus haut. Globalement, c'est la phase génératrice de la plus forte production d'argile au sein des sols de terrasses (cf. chap. 10.A).

32. PHENOMENES D'ILLUVIATION DANS LA GENESE DES SOLS DE TERRASSES. LEUR PLACE VIS A VIS DES PROCESSUS D'ALTERATION.

Au travers de l'évolution des éléments grossiers et des principaux constituants minéraux primaires, nous avons pu suivre les grandes lignes de la progression des phénomènes d'altération, leurs variations d'intensité, voire de nature. De même, l'apparition de l'organisation plasmique, son développement et ses transformations ont permis de se faire une idée de l'importance relative des phénomènes d'altération et des phénomènes d'illuviation et d'auto-transformation dans la génése des sols des terrasses rhodaniennes.

Ce sont ces conclusions que nous avons schématisées et résumées dans le tabl. n° 11.3 .

Tabl. 11 - 3

**IMPORTANCE RELATIVE DES PRINCIPAUX PHÉNOMÈNES D'ÉVOLUTION
AU SEIN DE LA SÉQUENCE RHODANIENNE**

STADES ÉVOLUTIFS	SENS ESSENTIEL DES PHÉNOMÈNES D'ÉVOLUTION	MÉCANISME	CONSÉQUENCES
Sol en cours de rubéfaction	Premier type de lessivage par simple entraînement mécanique des particules d'argile (en suspension)) Altération	Dynamique	PERTES IMPORTANTES de matière sous forme solide
Sol fortement rubéfié	Altération chimique) Lessivage	verticale dominante	DIMINUTION des PERTES ACCUMULATION d'ARGILE en B ⇒ COLMATAGE progressif du B
Sol rouge en voie de dégradation et sol rouge dégradé	Deuxième type de lessivage par désorganisation des masses plasmiques et déstabilisation des argiles) Altération	Dynamique verticale et latérale	REPRISE des PERTES (argile déferrifiée et limons) Descente des horizons de surface par pénétration au sein des hor. B Départs latéraux possibles

Il existe ainsi deux types de lessivage qui se succèdent dans le temps et se superposent dans les profils.

a) - Le premier type de lessivage correspond à un simple transfert d'argile par voie mécanique qui débute en même temps que les premières phases d'altération; au départ, ce processus joue un rôle essentiel dans l'organisation des structures plasmiques. Ce transfert s'effectue de la manière suivante : tous les horizons où se produit une formation d'argile sont affectés, et il est évident que l'argile transférée à un niveau donné est la somme de celle provenant des niveaux supérieurs et de celle produite dans la couche traversée par le flux.

Ce lessivage synchrone de l'altération se maintient jusque dans les termes ultimes d'évolution; mais sa localisation est alors privilégiée aux portions basales des horizons.

De toute façon, ces processus d'entraînements verticaux de l'argile aboutissent à des pertes considérables de matière, du fait de la grande perméabilité des masses alluviales sous-jacentes. C'est ce mécanisme des pertes qui contribue fondamentalement à entretenir la progression des phénomènes (dynamique de soutirage).

b) - Le deuxième type de lessivage ne succède pas immédiatement au précédent dans le temps. Une phase d'altération s'intercale entre les deux, conduisant à un remplissage progressif des porosités et aboutissant à un colmatage quasi-complet : d'où un blocage des possibilités de drainage vertical, qui se traduit par un changement assez radical dans l'orientation de la dynamique des processus évolutifs et par l'apparition d'une circulation dans le sens latéral. Ce "lessivage secondaire" (JAMAGNE, 1974 - DE CONINCK, 1967) se localise ainsi à la partie basale des horizons de surfaces et à la partie supérieure des horizons B : il correspond à une remise en mouvement de l'argile consécutive à sa déferrification.

33. PHENOMENES DE FRAGMENTATION MECANIQUE.

Pour les processus que nous venons de rappeler, c'est tantôt l'aspect chimique, tantôt l'aspect physique qui prédomine. Dans une phase ultérieure, après que les processus précédents se soient assez largement manifestés, des phénomènes à caractère plus strictement mécanique peuvent entrer en jeu. Ainsi, à partir du stade n° 3 et encore plus nettement dans le stade n° 4 interviennent des phénomènes croissants de fragmentation (cf. figure n° 7.2) qui se localisent à la partie supérieure des profils dans une frange comprise entre 0 et 80 cm. Cette localisation stricte ainsi que la morphologie des éléments intéressés amènent à penser que les alternances de gel et de dégel ont pu provoquer cette fragmentation de plus en plus poussée des matériaux.

Ces phénomènes qui interviennent exclusivement aux dépens des éléments siliceux (essentiellement quartz et quartzites) jouent d'ailleurs un rôle beaucoup plus important qu'on aurait pu l'imaginer, au plan de la différenciation même des profils et au plan génétique, compte-tenu de leur nature.

En effet, ils entraînent indirectement une série de conséquences qui retentissent sur la dynamique globale des sols de terrasses :

a) - d'une part, cet affinement progressivement croissant du squelette (pouvant aboutir à l'apparition de fraction limoneuse) a pu permettre le décapage partiel des horizons superficiels ou en tout cas favoriser les processus d'entraînement latéral, dans les phases ultimes d'évolution.

b) - d'autre part, si l'on considère les matériaux pris globalement, cet affinement des fractions siliceuses augmente les possibilités de migrations particulières dans les fissures verticales. Il est donc globalement équivalent à une véritable dissolution de silice, qui bien sûr, reste limitée aux zones supérieures des profils mais qui se manifeste aux dépens des fractions réputées stables. Il vient donc s'ajouter au jeu des actions chimiques habituelles.

4 - MODALITES DE PROPAGATION DE L'EVOLUTION PEDOLOGIQUE DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES.

Nous pouvons maintenant essayer de suivre comment progresse les 2 grands types d'évolution pédologique mis en évidence au cours de cette étude, à savoir le développement du processus rubéfiant et le passage du sol rouge au sol jaune.

41. DEVELOPPEMENT ET PROPAGATION DU PROCESSUS RUBEFIANT DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES.

Nous avons vu plus haut que le déclenchement même du processus rubéfiant était bien lié à la différence existant entre les vitesses de production relative du fer et de l'argile (cf. chap. 10 B par.32) au cours des processus d'altération proprement dits. Cette première disjonction favorise les possibilités ultérieures de transformations, d'individualisation et de cristallisations des oxydes de fer. Mais s'y ajoute une autre disjonction qui ne se situe plus dans le temps mais bien dans l'espace, puisque au sein des profils existe un décalage très net entre le front maximum d'altération et le front maximum d'entraînement mécanique.

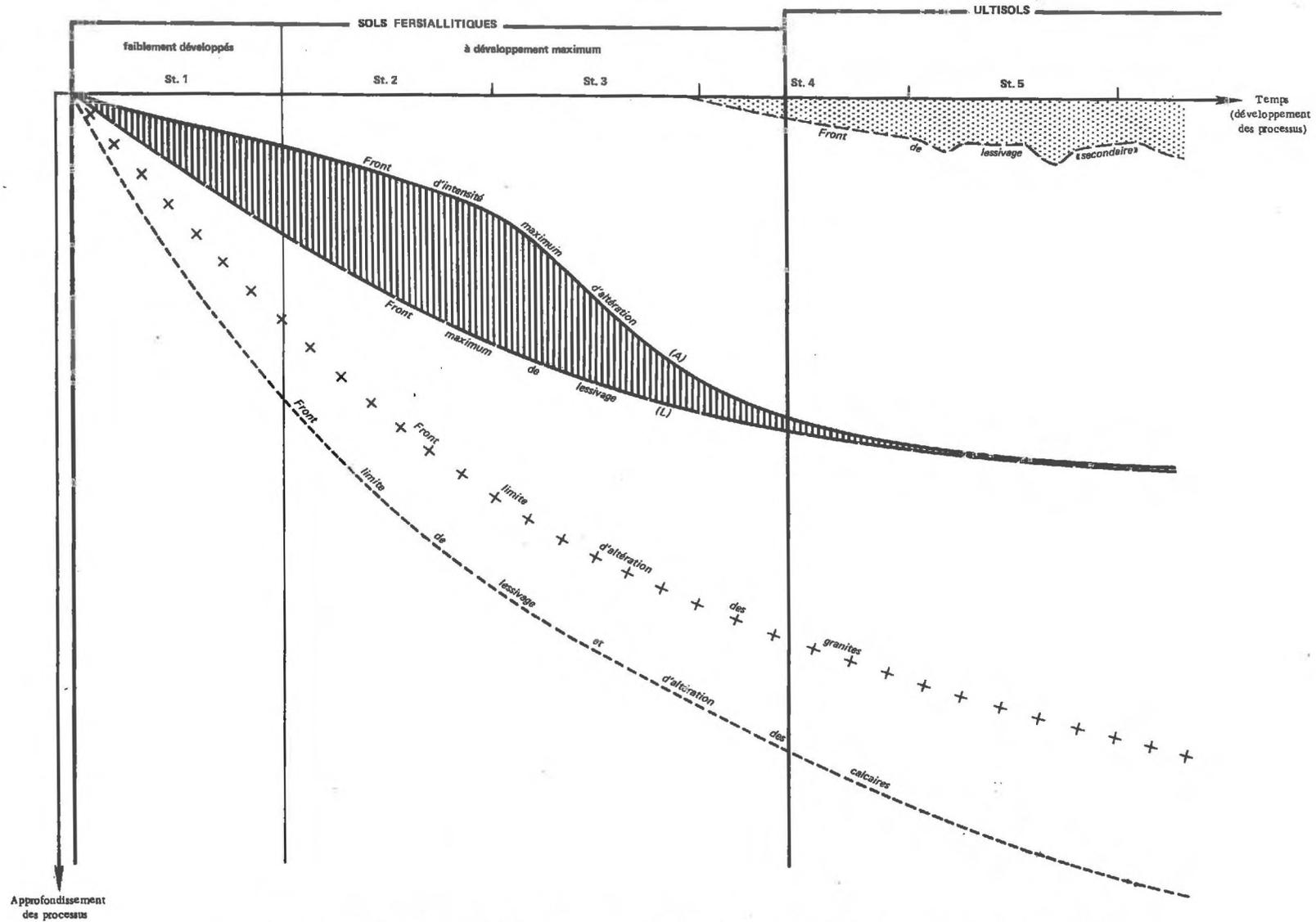
Alors que la succession dans le temps des productions de fer et d'argile est responsable de la progression en intensité du phénomène rubéfiant, cette discontinuité spatiale des 2 fronts d'altération et d'illuviation en assure indirectement la propagation, à l'intérieur même des sols où le processus se développe. C'est cet ensemble de phénomènes que nous avons voulu schématiser dans la figure 11.2 .

Compte-tenu de ses caractéristiques de composition et de granulométrie, le matériau conserve une très bonne perméabilité dans la phase de rubéfaction croissante. Par suite, le front d'illuviation progresse toujours plus vite que le front d'altération; et les processus d'altération eux-mêmes restent bien la source et l'origine essentielles des produits argileux rubéfiés. En revanche, dès qu'on atteint un certain degré d'évolution, les phénomènes d'entraînement en suspension sous forme solide viennent en quelque sorte prendre le relais. Leur ampleur et leur vitesse sont tels qu'à un niveau donné du profil, ils provoquent une arrivée de matériaux argileux déjà rubéfiés qui précède la libération par altération in situ à partir des minéraux primaires existants. C'est ce qui explique la dynamique naturelle d'approfondissement des sols étudiés que nous pouvons résumer comme suit : dans les sols des terrasses rhodaniennes, la propagation du processus rubéfiant se fait verticalement de haut en bas, commandée par la cinétique de l'illuviation.

Ce schéma volontairement dépouillé se complique quelque peu dans la réalité, mais se trouve confirmé par un certain nombre de constatations de terrain qui viennent à l'appui de ces diverses interprétations. Ainsi :

a) - ce sont bien les sols les plus jeunes et les moins évolués (stade n° 1) qui, paradoxalement présentent l'aspect de surface le plus rubéfié (couleur). Dans ces sols, les phénomènes d'illuviation sont encore peu intenses, de sorte que la disjonction entre phénomènes d'entraînement et phénomènes d'altération est peu marquée, si bien que les argiles même peu rubéfiées sont encore incomplètement entraînées à la base des sols;

PROGRESSION DES PROCESSUS RUBÉFIANTS DANS LES MATÉRIAUX RHODANIENS :
INTERACTIONS DES PRINCIPAUX FACTEURS



Déclenchement du processus rubéfiant : différence entre les vitesses de libération du fer et de production d'argile.

Progression des processus et approfondissement des sols : différence entre les fronts " maximum " d'altération et de lessivage

b) - dans les sols plus évolués (stades n° 2 et n° 3) et globalement beaucoup plus rubéfiés, les horizons superficiels sont fortement lessivés en argile et en fer, de sorte qu'il ne subsiste pratiquement aucune trace de cette rubéfaction passée (sauf dans les galets qui jouent le rôle de structures-pièges). La zone la plus rubéfiée se situe en partie sommitale d'horizon B, secteur où s'ajoutent les flux provenant des apports éluviaux et ceux issus des processus d'altération in situ. Enfin, dans les parties basales de ces horizons, le gradient de rubéfaction est moindre, car les argiles ferrifères présentes résultent de stades d'altération antérieurs de moindre intensité.

Origines profondes de cette dynamique.

Deux causes paraissent à l'origine de cette dynamique de propagation des processus rubéfiants.

a) - La cause essentielle paraît bien être la porosité propre du matériau alluvial qui résulte directement de sa composition. De plus, cette porosité originelle à caractère exceptionnel se maintient longtemps à la suite de la dissolution de la composante calcaire et grâce à la présence d'un squelette grossier siliceux qui joue le rôle de charpente et d'armature rigide. Cette porosité augmente même localement à la base des profils (effets de soutirage) avant qu'interviennent les phénomènes de tassement des matériaux.

b) - Des causes annexes viennent s'ajouter et renforcer cette forte perméabilité. Leur importance n'en est pas moins très grande. Elles sont liées aux types de paysages et à la géologie régionale : ce sont les bonnes possibilités de drainage externe conséquence de la configuration géomorphologique (épaisseur même des matériaux alluviaux, emboitements des terrasses), mais c'est aussi la présence d'un substrat lui aussi très filtrant (sables et grès mollassiques) qui participe indirectement aux possibilités de drainage en grand des matériaux superposés.

En résumé, la propagation verticale des processus rubéfiants dans les sols des terrasses rhodaniennes est assurée par la convergence d'un ensemble de facteurs favorables liés à la fois aux caractéristiques propres du matériau et à l'environnement extérieur, qui permet une évaluation exceptionnelle des produits dissous ou non dissous, favorisant directement l'application et le développement des processus d'hydrolyse.

La question se pose maintenant de savoir quelles peuvent être les limites de développement de ces phénomènes. Ceci nous amène alors à envisager le mode de propagation possible des processus de dérubéfaction.

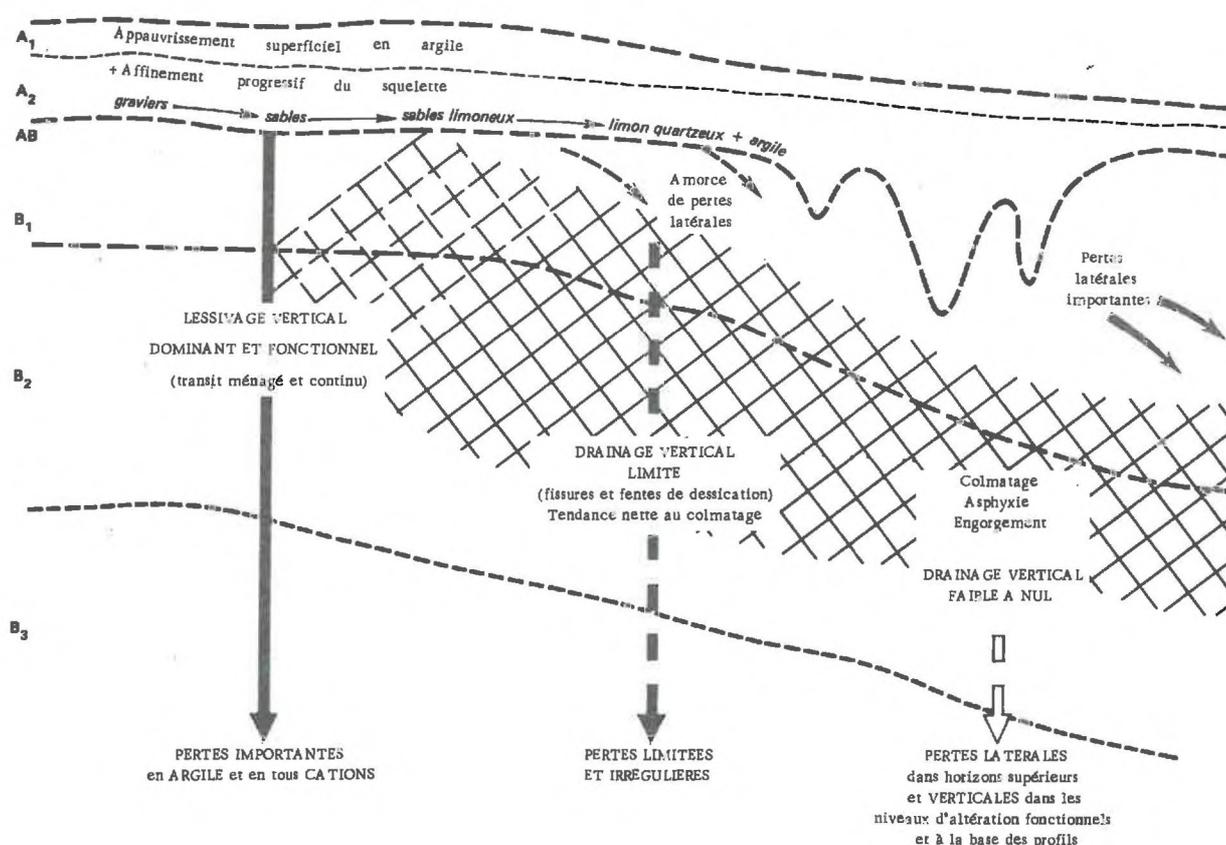
42. PASSAGE DU SOL ROUGE AU SOL JAUNE.

Le passage du sol rouge au sol jaune s'effectue de manière très progressive; il marque la fin d'une dynamique à dominance verticale et la possibilité d'intervention d'une dynamique latérale. Cette nouvelle orientation constitue une rupture nette qui s'inscrit néanmoins assez bien dans la logique évolutive de la séquence étudiée et nous en avons

retracé quelques-uns des aspects essentiels dans la figure 11.3 . Alors que dans les niveaux profonds des profils, il y a continuation des processus amorcés depuis le début de l'évolution des matériaux, en revanche dans les horizons superficiels et le sommet des horizons B s'amorce une tendance à la dégradation. Celle-ci nécessite l'intervention de deux groupes de phénomènes : les premiers sont encore à caractère plutôt mécanique, les seconds sont de nature beaucoup plus physico-chimique.

Fig. 11 - 3

PASSAGE DU SOL ROUGE FERSIALLITIQUE AU SOL ROUGE DÉGRADÉ, PUIS AU SOL JAUNE



a) - Fin du sol rouge : passage d'un milieu drainant et aéré à un milieu confiné et réducteur. La dynamique de progression verticale du processus rubéfiant était déterminée par la disjonction des 2 fronts d'altération et d'illuviation. Il est bien évident que cette disjonction qui s'est peu à peu accentuée après le début des processus rubéfiants ne peut se poursuivre de façon illimitée. Ainsi, au bout d'un temps suffisamment long, l'intensité de production d'argile par les processus d'altération va être susceptible d'égaliser, voire même de dépasser les possibilités d'évacuation du matériau par les processus d'entraînement mécanique. Ces conditions ne peuvent survenir à n'importe quel niveau des profils. Le phénomène n'a de chances de se produire que dans les secteurs où les deux fronts en question ont la probabilité de pouvoir se rencontrer, c'est à dire dans les horizons B.

b) - Début de la dégradation: imperméabilisation des horizons B. C'est justement la coïncidence dans le temps et dans l'espace du front d'altération maximum et du front d'enrichissement maximum en argile illuviale qui provoque le phénomène d'imperméabilisation et qui entraîne le colmatage progressivement croissant des horizons B.

Ceci se traduit par un remplissage de plus en plus complet par l'argile des espaces poreux existants entre les éléments caillouteux. Dans un premier temps (stade n° 4), cette imperméabilisation est souvent discontinue dans l'espace (hétérogénéité granulométrique possible) et il existe alors des possibilités locales de drainage vertical soit par fissures, soit dans des zones d'écoulements préférentiels : la dynamique d'approfondissement vertical n'est pas totalement rompue. Par la suite, l'imperméabilisation des horizons B progresse aussi bien en intensité qu'en répartition dans l'espace et les possibilités de drainage vertical se limitent à l'existence de fissures, qui fonctionnent d'ailleurs de manière intermittente (dessiccation suffisamment prolongée). Le drainage vertical devient faible à nul et au sein des horizons de surface une dynamique à caractère latéral s'installe progressivement.

c) - Phase de dégradation proprement dite : changement des conditions physico-chimiques. Parallèlement à l'installation des phénomènes d'imperméabilisation, se produit un changement assez profond des autres conditions, notamment au plan physico-chimique qui se traduit par :

- une lixiviation croissante des bases avec acidification et désaturation de plus en plus poussée progressant des horizons de surface vers la base des profils;
- l'installation et le développement de conditions réductrices liées aux processus d'engorgement et d'hydromorphie.

Ces conditions entraînent une différence de comportement de plus en plus nette entre horizons de surface et horizons B, qui permettent le déclenchement puis la propagation des processus de dégradation.

- Pour les horizons de surface, nous assistons ainsi :

- aux ruptures des liaisons fer-argile avec remobilisation du fer à l'état ferreux et départ latéral possible : d'où une déferrification importante, la phase fine résiduelle argileuse s'appauvrit fortement en fer;
- à des ségrégations et des individualisations du fer sur place sous formes de nodules et concrétions, petites mais nombreuses;
- à un affinement généralisé du squelette quartzeux avec migrations verticales dans les fissures et entraînement latéral possible;
- enfin, au plan de la minéralogie des argiles, nous observons l'apparition, puis le développement de chlorite secondaire alumineuse.

- Pour les horizons B, deux cas sont à distinguer :
- Dans les parties déjà fortement altérées et précédemment rubéfiées, se produisent des processus lents et incomplets de recristallisation du fer lié aux argiles avec formation progressive de goethite, sans modifications importantes des teneurs absolues en fer (cp. A. CHAUVEL, 1977).
- Dans les niveaux d'altération encore fonctionnels, c'est à dire plus bas dans les profils où les minéraux primaires ferro-magnésiens sont en cours de transformation, nous sommes en conditions très acides et il semble bien y avoir production directe de goethite, en général bien cristallisée (L. NALOVIC, 1974).
- Dans le même temps et dans chacun des 2 niveaux respectifs, nous assistons à des néogénèses de smectite et à une kaolinisation des feldspaths potassiques.

En résumé, le passage du sol rouge au sol jaune correspond de fait dans les terrasses rhodaniennes, à la superposition de 2 types de phénomènes bien distincts :

- Dans les horizons de surface, il s'agit en réalité d'une dégradation acide et hydromorphe, qui aboutit à un appauvrissement absolu en fer, essentiellement par départ latéral.
- C'est seulement au sein des horizons B que se manifestent les véritables phénomènes de dérubéfaction qui progressent eux aussi du haut vers le bas des profils. Les teneurs absolues en fer ne subissent que de faibles modifications, si bien que ces phénomènes paraissent essentiellement liés à une recristallisation du fer qui apparaît alors sous la forme d'oxyhydroxydes (goethite).

Chapitre 12

ENSEIGNEMENTS DE L'ETUDE DES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES

Dans ce dernier chapitre, notre but est de rassembler quelques-unes des idées principales émises au cours de cette étude pour en tirer les enseignements :

- d'une part intéressant les processus d'évolution pédogénétique,
- et d'autre part susceptibles de contribuer à une meilleure connaissance des phénomènes quaternaires.

A - ENSEIGNEMENTS POUR LA GENESE DES SOLS .

1 - COMPARAISON DES SOLS ETUDIES AVEC D'AUTRES SOLS FERSIALITQUES.

Dans l'évolution que nous venons de caractériser, nous avons mis en évidence l'importance de certains facteurs du milieu pour l'orientation générale de la première phase évolutive à caractère fersialitique. Pour préciser le rôle de ces facteurs, deux types de comparaisons sont nécessaires :

- l'une portant sur d'autres matériaux alluviaux des régions méditerranéennes,
- la seconde concernant des roches en place.

11. COMPARAISON AVEC D'AUTRES SEQUENCES SUR MATERIAUX ALLUVIAUX.

Dans des publications antérieures auxquelles on peut se reporter (M. BORNAND 1972, 1973, H. ARNAL, J. BARRIERE, M. BORNAND 1973, M. BORNAND et al. 1977), nous avons pu comparer la séquence étudiée à celles observées en régions méditerranéennes sur des matériaux alluviaux présentant une composition pétrographique différente.

a) - Ainsi, sur les alluvions à dominante calcaire, nous observons que :

- l'évolution est beaucoup plus lente, les teneurs en fer restant toujours inférieures à celles rencontrées sur cailloutis rhodaniens dans des situations homologues, mais les taux de libération du fer sont toujours du même ordre de grandeur,

- le phénomène rubéfiant apparaît avant que la décalcarisation soit complète avec persistance de réserves calcaires sous forme de galets,

- à âge égal, les vieux sols développés sur ce type d'alluvions calcaires présentent une différenciation des profils moins affirmée (hor. A₂ moins nets et moins fréquents, hor. B moins épais et généralement moins rubéfié).

b) - A l'opposé, sur les alluvions à composante plus acide et à dominante schisto-siliceuse des terrasses de l'Orb (J. BARRIÈRE - 1971 a et b), la genèse des sols est accélérée et son orientation d'ensemble subit des fluctuations évolutives importantes. Ainsi :

- le passage des "sols fersiallitiques à réserves calciques" aux sols "fersiallitiques lessivés" s'effectue dès les niveaux rissiens, alors qu'on l'observe seulement sur les niveaux mindéliens dans la séquence sur cailloutis à composante rhodanienne;

- le degré de colmatage des horizons B peut être déjà important dans les sols des surfaces mindéliennes, induisant par place un pseudo-gley;

- la phase de "dérubéfaction" et le début de la dégradation est déjà largement amorcée dès les niveaux gúnziens;

- Enfin, il faut souligner que les sols des plus hauts niveaux assimilables au "Villafranchien" présentent certaines formes de nodulations ferrugineuses, comme on les retrouve par exemple dans certains sols "ferrugineux tropicaux".

c) - Enfin, d'un autre côté, si l'on passe dans des matériaux à composante franchement cristalline comme les alluvions anciennes de l'Ardèche (J.C. FAVROT et R. BOUZIGUES - 1968) qui sont peu épaisses et reposent sur un substrat marneux, nous observons encore un autre type de séquence qui possède une importance indéniable malgré le nombre réduit de termes évolutifs existants. En effet, dans ces cas, il n'y a jamais de tendance à la rubéfaction; ce sont au contraire, les processus de brunification, puis de lessivage et d'hydromorphie qui sont pratiquement les seuls à s'exprimer.

12. COMPARAISON AVEC LES SOLS FERSIALLITIQUES OBSERVÉS SUR ROCHES EN PLACE.

Nous examinerons successivement les cas des sols fersiallitiques développés sur 2 types de roches aux propriétés et aux caractéristiques très différentes : d'abord sur calcaires, ensuite sur schistes.

a) - Cas des calcaires.

- Signalons tout de suite que si nous restons en climat de type méditerranéen, les résultats des évolutions pédologiques observés sur les roches-mères calcaires en place sont peu différents de ceux observés sur les matériaux calcaires remaniés. Les possibilités actuelles d'évolution rubéfiante paraissent exister comme dans le Jura (BRESSON, 1976) ou dans les montagnes du Liban (LAMOUREUX, 1971); mais elles correspondent toujours à la phase initiale du déclenchement du processus. Entre matériaux en place et matériaux remaniés, ce sont seulement les vitesses d'évolution et d'approfondissement des sols qui varient. Si nous faisons exception des mollasses sablo-gréseuses, ce sont toujours les matériaux remaniés qui sont les plus favorables à la rubéfaction.

Dans les matériaux calcaires, le déclenchement des processus rubéfiants est assez rapide; par contre, l'intensité des phénomènes est beaucoup plus lente à se développer pour deux raisons essentielles : faible importance de la phase résiduelle, fortes capacités d'évacuation de ces produits par dynamique verticale de soutirage. Ce n'est que dans les cas où existent des possibilités d'autopiégeages de ces produits résiduels à l'intérieur de "structures-pièges" comme les fissures ou les matériaux siliceux inclus dans la roche elle-même (cf. G. CALLOT, 1976) qu'on peut enregistrer un développement assez continu des sols ou des accumulations en poches (karst).

Dans cette première phase rubéfiante, il ne se produit d'ailleurs pas de véritables phénomènes de transformations des argiles ni de libération du fer comme dans les sols de terrasses, et à la limite, nous dirons alors qu'il n'y a pas vraiment de processus fersiallitique. Il s'agit plutôt d'un héritage avec simple concentration sur place des produits, après dissolution complète des fractions carbonatées. Dans ces conditions, l'orientation rubéfiante et l'importance même de la rubéfaction dépendent directement de la quantité et surtout de la qualité des oxydes de fer présents dans les calcaires originels (J.C. REVEL, 1972).

Ce n'est que dans une 2ème phase que ces résidus de concentration peuvent eux-mêmes évoluer sur place et se transformer. Et, dans ces cas, ce ne sont plus les calcaires qui fonctionnent comme matériaux-mères mais bien leurs produits résiduels.

b) - Cas des schistes.

- A l'opposé, sur roches-mères schisteuses, le déclenchement d'une pédogenèse fersiallitique est beaucoup plus lent et ne se manifeste que dans certaines situations privilégiées liées soit à la géomorphologie (colluvium schisteux drainant : E. SERVAT et G. CALLOT 1967, J. SERVANT 1970), soit à la composition pétrographique même de la roche (teneur élevée en minéraux altérables : DUCHAUFOR - 1969, MC. DACHARY - 1975). Dans le premier cas, les conditions topographiques locales favorisant la drainance rendent possibles les phénomènes de concentration en fer et de cristallisation des oxydes; dans le second cas, compte-tenu de la richesse initiale en minéraux ferro-magnésiens, la dynamique évolutive est quelque peu différente et, comme dans le cas des calcaires évoqués plus haut, il s'agit en quelque sorte d'un phénomène d'héritage direct en oxydes de fer. Pour que les phénomènes rubéfiants s'extériorisent, en plus de l'absence de matière organique, il est nécessaire

que les conditions de milieu soient favorables aux transformations et à l'évolution in situ des formes de fer préexistantes.

Or, dans ces matériaux schisteux, où existent des taux importants d'argile, les conditions de drainage sont assez mauvaises et les excès d'eau sont fréquents. Ces conditions sont contraires au développement du processus fersiallitique. De fait, on constate qu'une évolution à caractère fersiallitique n'apparaît sur schistes que dans 2 types de situations.

- pendages verticaux ou subverticaux des schistes favorisant au départ le drainage et entretenant une dynamique de progression de l'altération tout en facilitant l'autopiégeage des altérites;
- température moyenne élevée, permettant une hydrolyse plus rapide et plus complète des minéraux et une minéralisation aisée de la matière organique, tout en favorisant l'évaporation des eaux.

Entre ces deux types de comportements des roches, qui représentent des cas extrêmes, existent tous les intermédiaires possibles qui permettent de mieux jauger du rôle "seuil" joué par certains facteurs comme la teneur en résidu silicaté (cas des calcaires), la teneur en résidu argileux (cas des schistes) ou même l'acidité naturelle du matériau qui commandent directement les possibilités d'une évolution réelle à caractère fersiallitique (GUERRA - 1972).

2 - FERSIALLITISATION ET SOLS FERSIALLITIQUES.

21. CONDITIONS DE DEVELOPPEMENT DU PROCESSUS FERSIALLITIQUE.

Les comparaisons qui précèdent mettent bien en évidence le rôle primordial de la roche-mère dans le déclenchement et le développement du processus fersiallitique.

Ce sont bien les matériaux perméables en grand comme les alluvions des terrasses, les mollasses gréseuses ou les calcaires durs qui sont les plus favorables à ce type d'évolution, même si à l'origine les teneurs en fer sont quelquefois très faibles; car, les phénomènes de concentration relative en fer y sont possibles. Dans ces cas, les conditions favorables au déclenchement et à l'entretien du processus sont présentes au sein même de la roche et sont inhérentes à ses caractéristiques propres, même si l'intensité des phénomènes ne peut progresser que très lentement.

Au contraire, dans les matériaux plus riches en minéraux altérables qui paraissent à priori plus favorisés, d'un point de vue géochimique, cette évolution fersiallitique ne se produit que très rarement, parce que les caractéristiques propres des roches-mères sont peu propices au déclenchement même du processus. Pour que le processus puisse s'amorcer et s'extérioriser, il faut donc qu'un ensemble de facteurs extérieurs viennent compenser ces mauvaises conditions intrinsèques à la roche. Ceci ne se rencontre que dans des conditions exceptionnelles liées à la géomorphologie (pente permettant un bon drainage externe) ou au climat lui-même (E.T.P. très forte avec températures moyennes élevées qui favorisent l'évaporation des eaux en excès et évite au sol de rester trop longtemps dans des conditions de sursaturation en eau).

Sous les climats de type méditerranéen humide, ce sont les propriétés physiques de la roche-mère qui confèrent à la pédogenèse des possibilités d'orientation à caractère fersiallitique. Les conditions pédo-climatiques qui sont déterminantes pour cette évolution sont :

a) - Les fortes capacités de percolation du matériau original avec bonnes possibilités d'entretien de cette perméabilité au cours même de la progression de l'altération.

b) - Les fortes capacités d'évacuation des solutions qui sont réglées directement par la drainance générale du milieu naturel considéré. Globalement, ceci revient à dire en ce qui concerne la dynamique de l'eau, que le milieu évolutif ne se situe jamais longtemps (pas plus de 4-5 jours consécutifs d'après nos propres observations) au-dessus de la capacité de rétention au champ (voisin de la capacité de rétention) : le milieu reste presque toujours en conditions non saturées.

c) - Enfin, il est nécessaire qu'existent des possibilités de piégeage et de conservation des altérites au sein du milieu évolutif.

22. CONCEPT DE SOLS FERSIALLITIQUES.

Les idées qui se sont progressivement dégagées au cours de cette étude permettent de préciser les notions que nous considérons comme essentielles, concernant le concept de sols fersiallitiques.

221. Essai de définition de la fersiallitisisation.

Aspect statique

Sur le plan statique, le trait fondamental de la pédogenèse fersiallitique est la création de liaisons stables "oxydes de fer - argile 2/1". Mais il s'agit là d'un résultat global. Pour essayer de mieux saisir les mécanismes intimes de ces processus, il est nécessaire de se placer au plan dynamique.

Dynamique fersiallitique

a) - Le déclenchement et le développement du processus fersiallitique sont liés à la différence existant entre la vitesse de libération des oxydes de fer et la vitesse de production d'argile à partir des minéraux primaires. Ce décalage facilite l'individualisation de formes de fer d'abord mal, puis finement cristallisées; mais, il favorise aussi indirectement la création des liaisons fer-argile. Car, les oxydes de fer sont ainsi présents dans le milieu même où se produisent les transformations qui conduisent progressivement des illites aux argiles gonflantes de type smectites; cette présence constante de formes de fer mal ou finement cristallisées, véritables germes précristallins, rend possible leur fixation sur les réseaux externes de ces minéraux, au fur et à mesure de leurs transformations.

Pour nous, il n'y a donc de "véritable" processus fersiallitique que dans les cas où interviennent des phénomènes de transformations aux dépens des minéraux primaires altérables, aboutissant "in fine" à un taux de

libération d'oxydes de fer supérieur à 60 % .

La stabilité des liaisons "fer-argile" qui résultent de ces transformations lentes et ménagées peut se maintenir tant que le processus peut progresser.

b) - La progression normale du processus fersiallitique en intensité est liée à la possibilité d'approfondissement des sols au sein même du matériau originel.

- Cet approfondissement graduel met en oeuvre un mode d'entraînement mécanique de l'argile SYNCHRONE de l'altération. Il n'y a pas simple enrichissement des horizons B aux dépens d'argiles provenant d'horizons superficiels qui s'appauvrissent. Il s'agit d'un véritable "transit continu" d'argile affectant la totalité des profils. Ceci correspond évidemment à une extension assez sensible de la notion de lessivage, par rapport au sens habituel que l'on a pu donner à ce terme.

- Ainsi, c'est la différence de position au sein même des profils, entre les fronts maximum d'altération et les fronts maximum de lessivage qui constitue le "moteur" de la dynamique fersiallitique.

c) - Au niveau géochimique, l'altération à caractère fersiallitique correspond à une énorme perte de substances, aboutissant à une concentration différentielle du fer au sein de la phase résiduelle, parce que ce dernier s'élimine moins vite que tous les autres cations, en particulier Al et Si; ceci implique indirectement que le facteur roche-mère joue un rôle très important, puisque c'est lui qui commande en grande partie les possibilités d'évacuation des produits dissous et non dissous.

b) - L'altération fersiallitique ne peut se développer pleinement qu'en l'absence de matière organique. Sous les climats où nous avons pu étudier cette altération, une certaine durée d'évolution est donc nécessaire pour que le processus puisse s'exprimer. Le front d'altération qui progresse en s'enfonçant à l'intérieur du matériau originel peut alors s'affranchir de l'influence des substances humiques venant des horizons de surface : en conséquence, les sols "fersiallitiques vrais" ne peuvent qu'être des sols suffisamment "agés" et se développent préférentiellement dans des matériaux favorables à une dynamique naturelle d'approfondissement.

222. Interfaces des sols fersiallitiques.

Les processus ayant été ainsi définis, les sols fersiallitiques se situent à l'interface entre plusieurs catégories de sols.

a) - Sols fersiallitiques - Sols bruns.

Dans la phase initiale du phénomène, les caractères fersiallitiques ne sont encore que mal ou insuffisamment exprimés, par suite du faible développement du sol et de la présence de matière organique : il s'agit d'une phase intergrade, que nous qualifierons de "faiblement fersiallitique", par opposition à la phase ultérieure aux caractères mieux typés. Néanmoins, si l'on considère que le "sol brun" est un sol dans lequel la matière organique

est présente et se maintient dans les profils en quantité suffisante pour qu'il y ait formation et conservation d'un complexe stable "fer-argile-humus", les caractéristiques de ces sols "faiblement fersiallitiques" apparaissent déjà sensiblement différentes de celles des sols bruns :

- sur le plan morphologique, les différenciations des profils paraissent similaires, mais elles procèdent d'une dynamique bien différente, puisque la genèse des horizons B ne résulte pas d'un simple enrichissement aux dépens des horizons de surface, mais correspond à un entraînement progressif et continu d'argile commençant dès les premiers symptômes et s'étendant à la masse totale du profil.
- sur le plan géochimique, la distinction est encore plus nette, puisque dès ces stades initiaux, les taux de libération du fer sont nettement supérieurs à ceux que l'on peut rencontrer dans les sols bruns et que la dynamique différentielle des pertes y est déjà largement amorcée (orientation évolutive différente).

Ces sols "faiblement fersiallitiques" doivent donc déjà se ranger dans la classe des sols fersiallitiques. Et, en particulier, il y a lieu de les démarquer nettement des sols qu'on a pu qualifier de sols "bruns fersiallitiques" (C.P.C.S. - 1967), dont la genèse est, à notre avis, totalement différente. Ces derniers correspondent, en effet, le plus souvent à des sols bruns développés secondairement sur un ancien matériau fersiallitique, où l'altération a été interrompue ou figée, soit pour des raisons climatiques, soit pour des raisons de mise en place (transports ou remaniements).

b) - Sols fersiallitiques - Sols "rouges".

Dans une phase plus poussée du phénomène précité, il apparaît que l'intensité des caractères rubéfiants progresse en même temps que l'altération et correspond, de fait, à l'extériorisation normale du processus fersiallitique en milieu drainé et aéré. Ce caractère rubéfiant se propage ainsi en profondeur dans les profils, tant que les capacités d'évacuation des matériaux restent supérieures à la production d'argile par altération.

Ceci aboutit à l'individualisation de sols que l'on qualifiera de sols rouges fersiallitiques "vrais", qui s'identifient aux stades 2 et 3 de la séquence : ce sont des sols peu désaturés, riches en fer mal ou finement cristallisés, très argilifiés où les argiles de type 2/1, très riches en fer, sont dominantes.

Il convient de bien distinguer ces sols, des "sols rouges" dont la genèse procède davantage d'un simple héritage par dissolution que de transformations, même ménagées, aux dépens des matériaux primaires.

3 - DEGRADATION DES SOLS ROUGES FERSIALLITQUES - PROBLEME DES "ULTISOLS".

Néanmoins, les sols rouges fersiallitiques ne correspondent pas à des stades d'équilibre définitif sur le plan de l'évolution. Au bout d'un temps assez long (voisin d'un million d'années), à la suite des phénomènes d'imperméabilisation des horizons B, de l'acidification et de la désaturation progressivement croissante par lixiviation des bases, on aboutit aux sols jaunes par l'intermédiaire de sols dérubiés.

Ces sols jaunes apparaissent bien comme les termes ultimes de l'évolution des matériaux fluvio-glaciaires étudiés : ce sont des sols fortement appauvris en surface, acides et qui présentent des taux de saturation très bas (S/T voisin de 20 à 30 %). Leur caractère fersiallitique n'est plus évident. Ces sols se rapprochent d'ailleurs des "ultisols" de la classification américaine ou des "acrisols" de la nomenclature F.A.O. Outre les caractères déjà mentionnés, ils se différencient des sols rouges fersiallitiques définis plus haut :

- par un changement d'hydratation des formes du fer (goethite hydratée),
- par des teneurs en argile moins importantes à tous les niveaux des profils,
- par une minéralogie des argiles caractérisée par une forte proportion d'argile kaolinique associée à un stock renouvelé et toujours important d'argile micacée.

Pédogenèse fersiallitique et sols jaunes.

Tels que nous venons de les schématiser, les sols jaunes correspondent évidemment à un changement profond d'orientation de la pédogenèse par rapport à la première phase fersiallitique rubéfiante. On est, en effet, passé d'une hydrolyse en milieu peu acide et aéré, à une hydrolyse en milieu franchement acide, à laquelle se surimposent des phénomènes de réduction par hydromorphie avec intervention d'une dynamique latérale. On assiste ainsi à un redémarrage important des pertes, consécutif à la destruction partielle des argiles 2/1 (type montmorillonite de transformation) et qui se traduit notamment au niveau du fer (remobilisation et déferrification importante des argiles) et aussi de la silice.

Sols jaunes - Sols ferrugineux tropicaux - Ultisols.

D'un autre côté, si l'on essaye de situer les "sols jaunes" par rapport aux sols ferrugineux tropicaux, leurs caractéristiques d'ensemble paraissent assez éloignées.

Leur seule homologie notable est liée à l'épaisseur de développement des profils : elle se traduit par une opposition nette entre la pédogenèse du sommet et celle de la base des profils. Mais, il s'agit là de phénomènes de convergence, qui dépendent davantage des propriétés du matériau originel et de la dynamique de formation des sols que de la nature géochimique propre des phénomènes d'altération.

Au plan des résultats et si l'on se réfère à la C.P.C.S., il n'est pas possible de classer ces sols jaunes comme des termes de transition vers les sols ferrugineux. Si l'on considère que le critère de diagnostic essentiel des sols ferrugineux est celui de la capacité d'échange des argiles, on voit que dans les sols jaunes elle est beaucoup trop élevée (30 à 40 meq/100 g d'argile). Sur le plan évolutif, il nous paraît d'ailleurs difficile, voire impossible que dans ces sols jaunes, la pédogenèse de type ferrugineux puisse un jour se déclencher, compte-tenu de leur richesse en argile, liée à leur première phase d'évolution. Dans le type de milieu et sous les climats considérés, les possibilités de désilicification sont en effet insuffisantes.

Mais c'est surtout au plan de la dynamique évolutive que ces sols paraissent très différents. Contrairement aux sols tropicaux, ces "vieux sols jaunes" ne sont pas des "sols primaires", en ce sens qu'ils ne correspon-

dent pas à l'altération très poussée d'un matériau primaire originel sous l'effet d'une pédogenèse unique.

Il apparaît clairement que ces sols sont le résultat de deux pédogenèses qui se succèdent dans le temps. Et, c'est la seconde pédogenèse intervenant aux dépens d'un matériau déjà précédemment "pédogenétisé" qui imprime aux sols observés la différenciation qu'on leur connaît aujourd'hui.

Ce point nous paraît bien être une des caractéristiques fondamentales des sols de ces vieilles surfaces. Ceci nous semble bien aussi être la caractéristique essentielle des "ultisols" de la classification américaine, que l'on doit donc considérer comme des sols cumulant plusieurs phases pédogénétiques.

Il est certain que sous ce vocable d'ultisols sont englobés des "aboutissements" pédogénétiques homologues, alors que les pédogenèses primaires pouvaient être sensiblement différentes. Toutefois, il est rare que l'on puisse bénéficier, comme ce fut le cas pour nous, d'une série aussi complète de termes de transition allant depuis la phase initiale jusqu'à la phase "ultime".

B - ENSEIGNEMENTS POUR UNE MEILLEURE COMPREHENSION DES PHENOMENES QUATERNAIRES.

Au terme de cette étude que nous avons volontairement cantonnée aux phénomènes de pédogenèse et d'altération, il nous reste à envisager maintenant comment ces données peuvent intéresser le domaine quaternaire régional.

4 - SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES ET ALTERATIONS QUATERNAIRES.

41. Originalité des dépôts fluvioglaciers quaternaires rhodaniens.

En raison des considérations géomorphologiques évoquées au cours de la première partie, les terrasses rhodaniennes constituent bien un site privilégié pour l'étude des altérations quaternaires. A ce sujet, deux points importants méritent d'être rappelés :

a) - La première particularité est constituée par l'épaisseur exceptionnelle des remblaiements alluviaux rhodaniens au dessus du substratum. Ainsi, contrairement à ce qui se produit dans les autres bassins alluviaux français, pour toutes les terrasses de la moyenne vallée du Rhône, on peut retrouver sous les sols, le matériau alluvial originel non altéré. En chaque point d'observations, on a donc disposé d'éléments précis de comparaisons et de références.

b) - La deuxième originalité de ces terrasses est liée à leur composition même, tant au plan granulométrique qu'au plan pétrographique. Tirant parti de la présence de galets de nature pétrographique différente, on a pu suivre la progressivité des phénomènes de transformations aux divers niveaux physique, chimique et minéralogique. Ces données ont servi de bases à la modélisation du fonctionnement des sols et on a ainsi réussi à met-

tre au point une méthode de calcul des bilans adaptée à l'altération de ces matériaux.

C'est donc bien la conjonction d'un ensemble particulièrement favorable de facteurs liés au milieu naturel que nous avons pu exploiter. Elle nous a permis de retrouver la progressivité et l'enchaînement logique des phénomènes d'altération.

42. Caractéristiques des altérations quaternaires régionales.

Les principaux points intéressant l'altération des formations quaternaires régionales sont les suivants :

a) - Les sols identifiés sur chacun des niveaux de terrasses correspondent à l'altération sur place des matériaux fluviatiles et fluvio-glaciaires, dont la composition reste comparable à l'intérieur des limites du bassin étudié;

b) - L'ensemble des sols de ces terrasses fluviatiles rhodaniennes présente des stades successifs d'un même continuum évolutif. Termes d'altération croissante, ils cumulent les effets de cette pédogenèse à caractère d'abord fersiallitique puis, de type "dégradante".

c) - Les vieux sols des surfaces villafranchiennes constituent bien le terme ultime de l'évolution en place de ces matériaux, contrairement à certaines idées encore développées dans des ouvrages géologiques récents, qui considèrent ces formations comme des apports.

d) - Les différences d'intensité d'évolution existant entre certains stades évolutifs ont quelquefois été considérées comme des "coupures majeures" pouvant être attribuées à des différences d'agressivité climatique au cours des interglaciaires. Les résultats présentés montrent clairement que des durées d'application plus longues d'une même pédogenèse fersiallitique conduit finalement dans une phase ultime à l'intervention de processus de dégradation qui tendent à détruire les organisations primitivement engendrées. Cette "logique évolutive" peut suffire à expliquer ces coupures de comportements pédologiques apparemment très marquées, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir des variations climatiques considérables; on rejoint par là certaines conceptions récentes (M. ICOLE-1973; J. HUBSCHMAN-1975) relative aux vieux sols du Quaternaire.

5 - RESULTATS DES ALTERATIONS : CONSEQUENCES SUR LA MORPHOLOGIE REGIONALE.

Les transformations physiques et chimiques qui se produisent au cours de l'altération des matériaux des terrasses entraînent des pertes importantes et se répercutent sur la phase résiduelle. Tous ces résultats ont été examinés en détail dans la 3ème partie et nous essayerons seulement de reprendre ici ceux d'entre eux qui peuvent avoir une influence sur le plan morphologique régional.

51. ALTERATION ET TASSEMENT DES MATERIAUX : CONSEQUENCES SUR L'ALTITUDE DES TERRASSES QUATERNAIRES.

Lors de la transformation des matériaux fluvio-glaciaires en sols, on a vu que se produisaient une dissolution des éléments calcaires et une désagrégation plus ou moins complète des éléments cristallins. Ces phénomènes ont pour corollaire un certain effet de tassement qu'il faut comprendre comme une réduction de volume et dont l'importance est évidemment en relation avec l'ancienneté des sols et leur approfondissement corrélatif.

Les comptages rassemblés dans la figure 8.1 permettent de se faire une idée de l'importance de ces tassements puisque la concentration en galets siliceux, conséquence de la disparition des autres éléments, en représente une image indirecte.

Pour chacun des principaux niveaux de terrasses quaternaires, nous avons utilisé ces chiffres pour évaluer l'épaisseur du matériau nécessaire à la genèse du sol actuellement observé. Nous les avons pondéré par horizons pour tenir compte des variations de densité et de la conservation de volume des galets cristallins, avant leur désagrégation complète. Les résultats de ces calculs sont rassemblés dans le tableau 12.1.

Tabl. 12 - 1

ESSAI D'ÉVALUATION DE L'ÉPAISSEUR DE MATÉRIAU NÉCESSAIRE A LA GENÈSE DES SOLS SUR LES PRINCIPAUX NIVEAUX DE TERRASSES RHODANIENNES

NIVEAU DE TERRASSES	WÜRM	RISS	MINDEL	GUNZ	VILLAFRANCHIEN
Épaisseur actuelle du sol en m.	1	2 - 3	3 - 5	7 - 9	15 - 20
Épaisseur de matériau originel nécessaire à sa genèse en m.	2,2 - 2,5	5 - 7	8 - 13	18 - 24	70 - 120
Différence d'altitude par rapport au niveau actuel des terrasses.	1 - 1,5	3 - 4	5 - 7	11 - 15	55 - 100

Ces résultats doivent être considérés comme des ordres de grandeur, donnés ici à titre indicatif et sont valables pour un matériau de composante rhodanienne modale. Ils appellent les commentaires suivants :

a) - Dès que la composition du matériau originel change, les épaisseurs calculées doivent être augmentées si la composante devient plus calcaire et diminuées si la composante prend un caractère plus siliceux.

b) - Les résultats montrent que les terrasses actuelles sont évidemment plus basses que leur niveau de dépôt originel. Ceci a pour effet de diminuer la différence d'altitude relative entre deux niveaux successifs. Pour les terrasses les plus anciennes où l'effet est le plus spectaculaire, si l'encaissement entre deux niveaux successifs était à l'origine peu marqué, le tassement peut avoir comme conséquence de les ramener actuellement à des altitudes voisines, d'où une confusion possible de 2 niveaux.

c) - Dans le cas où l'on observe des variations de composition de matériau originel à l'intérieur d'une même terrasse (zone de confluence de 2 bassins d'alimentation d'origine différente), l'effet tassement peut aboutir à créer des différences aberrantes d'altitude postérieures au dépôt lui-même. A titre hypothétique, nous pensons que c'est ce qui s'est produit pour la terrasse de Louze; ceci permettrait d'expliquer à la fois le contre-pente et les irrégularités d'altitude observées en surface même de la terrasse.

52. ALTERATION ET COMPOSITION DES PRODUITS RESIDUELS.

Au fur et à mesure de la progression des phénomènes d'altération dans les sols des terrasses, les éléments grossiers subissent des phénomènes de transformations physico-chimiques de plus en plus intenses. Ces transformations ont été étudiées dans la 3ème partie et on a pu ainsi mettre en évidence le rôle important de la composition pétrographique originelle sur la nature et la granulométrie des produits résiduels issus de ces altérations.

Nous présenterons simplement ici deux exemples assez spectaculaires qui illustrent cette conclusion et qui mettent clairement en évidence l'influence de la constitution pétrographique sur la morphologie elle-même.

a) - Les fractions limoneuses : phases résiduelles dominantes des altérations mindéliennes.

Dans les sols qui se développent sur les matériaux à composante rhodanienne typique (cf. chap.2), on a montré (tabl. 8.6) que les transformations des éléments grossiers en terre fine aboutissent au stade 3 (niveau mindel) à une fabrication considérable de fraction limoneuse résiduelle, même si l'on tient compte des pertes.

Ces résultats permettent de penser que, lorsqu'ils sont suffisamment avancés, les processus d'altération quaternaires peuvent participer à la formation de matériaux limoneux décalcifiés, qui sont très répandus en recouvrement sur les niveaux alluviaux anciens.

De toute façon, même si elles ne constituent pas la source d'alimentation "unique" de ces recouvrements, ces phases résiduelles limoneuses y ont largement contribué et ont pu favoriser indirectement le piégeage des formations superficielles d'origine éolienne.

b) - Les accumulations sablo-limoneuses à la surface de certaines formations gtnziennes (Ex. plateau de Louze).

On a vu au chapitre 8 que lorsque l'altération progresse (cas de stades n° 4) des possibilités de fragmentation des éléments siliceux apparaissent. Dans les cas où le matériau originel présente une forte composante siliceuse (cas du plateau de Louze en Bièvre-Valloire), on peut alors aboutir dans les horizons de surface à des phénomènes de concentration en fractions limono-sableuses. Ces dernières sont alors, pour une large part, à l'origine des accumulations de type limono-sableux existant à la surface de cette terrasse.

53. CARACTERISATION DES ALTERATIONS QUATERNAIRES : Intérêt pour la chronologie.

La valeur des arguments qu'on peut proposer pour un essai de datation des formations quaternaires dépend beaucoup de la représentativité des observations de base.

Ces dernières années, la cartographie des sols a beaucoup progressé, ce qui a permis de lever en grande partie cette hypothèse. Personnellement, nous avons mis en évidence, pour la moyenne vallée du Rhône, un certain nombre de termes évolutifs ou "vieux sols", que l'on a pu associer à des types de matériaux fluvioglaciers de composition pétrographique déterminée : l'ensemble de ces sols constitue des séquences évolutives caractéristiques qui peuvent servir de bases pour une chronologie relative.

Les grilles que nous avons pu fournir (A. BONNET et M. BORNAND, 1970; M. BORNAND - 1972; ARNAL et al. - 1973) permettent d'associer à une surface morphologique donnée un stade d'évolution bien caractérisé sur le plan pédologique. Ces grilles sont parfaitement utilisables par les pédologues; mais elles restent interprétatives, puisqu'elles utilisent les termes pédogénétiques de la classification française des sols. Pour être plus discriminantes et plus exploitables par tous, il faut substituer au diagnostic pédogénétique employé un diagnostic plus descriptif et plus analytique, basé à la fois sur le développement complet des profils et sur la définition d'horizons dits "caractéristiques".

L'étude détaillée que nous venons de présenter fournit ainsi un ensemble de critères qui permettent de répondre à cet objectif. Les figures 3.1 et le tableau 11.2 rassemblent les points de repères essentiels pour comparer la gradation des processus évolutifs et caractériser les altérations. Ils constituent autant d'arguments pour une chronologie raisonnée.

Ces critères restent assez complexes et difficiles à utiliser, non qu'ils soient très difficiles à mettre en oeuvre sur le plan technique, mais parce qu'ils ne sont pas valables pour des observations ponctuelles : ils ont une valeur statistique. A ce propos, je voudrais attirer l'attention sur les risques d'une utilisation abusive de l'argument pédologique à des fins de datation et de chronologie, lorsque ce dernier est pratiqué à partir d'observations isolées ou de coupes, dont on ne connaît ni la représentativité spatiale ni les caractéristiques analytiques.

Ces précautions étant prises, la caractérisation des altérations quaternaires rhodaniennes telle qu'elle est proposée ici, permet de "caler" chronologiquement avec une bonne précision relative une surface morphologique donnée à l'intérieur de séquences bien repérées. A ce titre, elle constitue une contribution à cette étude du quaternaire rhodanien, où un travail d'équipe multidisciplinaire associant pédologues et altérologues, mais aussi géologues et géomorphologues a déjà été largement amorcé.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette étude prend place parmi les nombreux travaux entrepris en France au cours de ces dernières années en matière d'altérations et de pédogénèses sur les formations quaternaires et qui intéressent aussi bien le domaine des terrasses alluviales (P. HOREMANS - 1961, J. HUBSCHMAN - 1975, C.P. REDONDO - 1973, ICOLE M. - 1973, O. CONCHON - 1975, J.J. TIERCELIN - 1975, J.C. BEGON - thèse en cours, A. BILLARD - thèse en cours) que celui des formations loessiques (N. FEDOROFF - 1966, M. JAMAGNE - 1973, J. DUCLOUX 1973).

L'originalité de notre étude tient à plusieurs points :

- d'abord à sa situation géographique à proximité des avancées maximum glaciaires favorisant une conservation exceptionnelle des dépôts;
- ensuite à la bonne convergence des arguments concernant la chronologie relative des différents niveaux de terrasses quaternaires;
- aussi à son implantation à l'intérieur de la zone tempérée dans une franc climatique de type méditerranéen humide;
- enfin aux caractéristiques sédimentologiques propres des matériaux fluvioglaciaires d'apports rhodaniens.

Dans ces conditions, il a été possible de procéder à une analyse complète du fonctionnement de ce vaste bassin alluvial, dont nous avons pu retrouver les principales sources d'alimentation et préciser le degré d'homogénéité.

La méthode utilisée a d'abord été basée sur une approche cartographique détaillée, qui assure aux faits d'observations une dimension statistique. Elle a abouti à mettre en évidence et à sélectionner des séquences de sols représentatives qui ont permis de suivre le développement des processus de pédogénèses quaternaires en fonction du temps. A partir de ces références les analyses morphologiques et physico-chimiques ont été réalisées aux principales échelles d'investigations. Elles ont été complétées par l'application de la méthode des bilans que nous avons pu adapter aux caractéristiques de composition de la roche-mère, permettant en particulier de prendre en compte la masse globale des matériaux alluviaux et aussi de quantifier l'impor-

tance des pertes se produisant au cours des phénomènes de transformations des matériaux en sols.

Au terme de ce travail, il convient de récapituler quelques uns des principaux résultats acquis, que nous avons regroupés autour de 4 rubriques.

CYCLE GENERAL DE L'EVOLUTION DES SOLS AU COURS DU QUATERNAIRE.

Dans la vallée du Rhône, le cycle pédologique quaternaire est caractérisé par les points suivants :

1. Importance du "soutirage" dans le développement de la pédogenèse.

Les phénomènes de transformations des éléments grossiers jouent un rôle fondamental dans la formation de ses sols. Par suite de leur composition pétrographique complexe, les cailloutis fluvioglaciers rhodaniens constituent un véritable système auto-transformant, capable d'entretenir lui-même sa propre dynamique évolutive. Les transformations spécifiques à chaque type de cailloutis interfèrent et se catalysent mutuellement. Les cailloutis calcaires en se dissolvant participent directement au maintien de la porosité du milieu avec création d'une porosité induite à la base des sols responsable d'une dynamique de soutirage, permettant ainsi l'approfondissement des sols et la progression de l'évolution. Les cailloutis cristallins, source essentielle en minéraux altérables, constituent les principaux fournisseurs de produits résiduels et d'argile. Les éléments siliceux eux-mêmes participent indirectement à l'évolution, car ils forment une armature capable de maintenir au système une certaine rigidité; ils jouent à cet égard le rôle de structures-pièges intervenant à un double niveau : en grand, au niveau de l'assemblage propre entre éléments; en petit, au niveau de la porosité interne de ces éléments.

2. Nature autochtone de la pédogenèse.

L'évolution suivie par chacun de ces 3 types de cailloutis a permis de montrer le caractère strictement autochtone des couvertures pédologiques développées sur les différents niveaux de terrasses.

3. Continuité des phénomènes pédologiques dans le temps.

Cette même évolution, ainsi que les variations progressives et corrélatives des organisations des profils (fig. 7.2), prouvent également la filiation entre les termes successifs d'évolution, identifiés sur chacune de ces surfaces morphologiques. La genèse des sols de terrasses quaternaires rhodaniennes apparaît donc bien comme un phénomène progressif et continu qui n'a fait l'objet d'aucune coupure évolutive externe : modifications importantes du climat, décapage, troncature etc...

Même les termes ultimes développés sur les plus vieux niveaux ("villafranchiens") correspondent eux-aussi à l'altération sur place des

mêmes matériaux originels, à la suite d'une évolution encore plus lente intervenant aux dépens des matériaux déjà "pédogénétiés" lors des phases précédentes.

4. Existence d'une succession de phénomènes distincts.

- Du fait que le cycle étudié représente une durée énorme, englobant tout le quaternaire, il était intéressant de montrer enfin l'existence d'une suite de processus, susceptibles d'ailleurs de se "télescoper". Ainsi, sur le plan de la dynamique évolutive, il a été possible de comparer la cinétique relative des phénomènes de dissolution des calcaires, de désagrégation des éléments cristallins et de fragmentation mécanique des galets siliceux, tout en précisant la différence de sensibilité de chacun des 3 processus aux agents climatiques extérieurs (cf. fig. 7.1).

- Schématiquement, 2 phases majeures d'évolution ont dû être mises en évidence, qui se succèdent logiquement :

- a) Une première phase rubéfiante, qui est de type fersiallitique s'étendant sur environ 500.000 ans;
- b) Une seconde phase beaucoup plus lente et plus longue (plus d'un million d'années), dégradante et dérubeifiante, qui est de nature "ultisolique".

PROCESSUS FERSIALLITIQUE ET RUBÉFACTION.

Les résultats que nous avons pu mettre en évidence en étudiant le développement des processus d'altération fersiallitique sur les cailloutis rhodaniens sont applicables à d'autres systèmes évolutifs. C'est pourquoi il est bon de faire ressortir ses caractères fondamentaux.

5. Nature du processus.

La pédogenèse fersiallitique, développée sur cailloutis, correspond à une gigantesque perte de substances : 60 à 80 % du matériau initial a été exporté. La fraction silicatée du sol lui-même apparaît bien comme un simple "résidu de résidu".

- Les bilans montrent que dans le milieu étudié en dehors du carbonate de calcium, les pertes s'effectuent essentiellement sous formes d'éléments non dissous, c'est à dire par exportation lente et lointaine d'argile au travers des matériaux originels et/ou du substratum (appauvrissement généralisée. A. CHAUVEL, 1977).
- Le déclenchement du processus fersiallitique est la conséquence d'une différence de vitesse entre les phénomènes de libération du fer et de production d'argile à partir des minéraux primaires altérables. Le développement en intensité du processus résulte d'une concentration différentielle du fer, qui s'élimine moins vite que tous les autres cations et qui, en l'absence de matière organique s'individualise séparément sous forme d'oxyhydrates; d'où extériorisation nette du processus rubéifiant.

- Sur le plan géochimique, il s'agit d'une hydrolyse neutre ou peu acide correspondant à une altération ménagée des minéraux primaires en milieu drainé, aboutissant à l'ouverture des phyllites 2/1, au développement d'argiles gonflantes et à la création de liaisons stables "fer-argile".

6. Conditions de développement.

- La dynamique fersiallitique ne se développe bien qu'en conditions de soutirage permanent, correspondant à des vitesses d'évacuation des résidus d'altération supérieure aux vitesses de production (cf. fig. 11.2).

Le mécanisme fondamental associé à cette dynamique est l'existence d'une forme de lessivage des argiles synchrone de l'altération : véritable redistribution généralisée des argiles à tous les niveaux des profils, elle met évidemment en jeu des masses de matériau beaucoup plus considérables dans les parties médianes et basales des sols que dans les parties superficielles.

- Les climats de type méditerranéen à saisons contrastées et à pluviométrie irrégulièrement répartie sont particulièrement favorables à la mise en oeuvre de ce type de lessivage; car les fortes précipitations orageuses jouent le rôle d'un "effet de chasse" et sont capables d'entraîner des grandes quantités d'argile dans les matériaux à fortes capacités percolatives.

7. Limitation des phénomènes dans le temps.

- Les conditions limitantes du processus fersiallitique ressortissent essentiellement au domaine de la physique du sol. Elles dépendent de la porosité propre du matériau originel et de la drainance générale du milieu. Ces conditions de percolation commandent directement les possibilités et les capacités d'évacuation des produits d'altération.
- Les phases résiduelles issues de l'altération fersiallitique constituent, de par leur microstructure, des matériaux en équilibre momentané. En effet, les transformations ménagées qu'elles subissent aboutissent finalement à une concentration intense d'argile conduisant à un véritable blocage du système par colmatage progressif intervenant seulement après des durées supérieures à 500.000 ans, pour peu que la drainance du milieu se maintienne (ici enfoncement progressif du Rhône), et ce sans qu'il y ait apparemment changement sensible de climat.

DERUBÉFACTION ET DÉGRADATION ULTISOLIQUE. ROLE DU FACTEUR TEMPS.

Cette seconde phase de la pédogenèse se traduit par les faits ci-après.

- 8. La dérubéfaction débute quand les capacités d'évacuation des matériaux originels tendent à diminuer du fait de "l'autoasphyxie". On passe progressivement d'un milieu ouvert et drainant avec dynamique verticale dominante à un milieu colmaté et plus confiné où s'installent des conditions asphy-

xiantes et réductrices et où s'établit une dynamique plus latérale.

Au cours du cycle étudié, nous avons pu montrer que ce passage ne s'effectue que très lentement, au bout d'un temps très long. Corrélativement se développent des processus d'acidification du milieu à la suite d'une lixiviation croissante des bases, ce qui entraîne finalement une forte désaturation du complexe absorbant.

9. Les argiles résiduelles issues de la première phase de transformation en milieu neutre ne sont plus en équilibre avec les nouvelles conditions acides du milieu. Conséquence indirecte de l'intense argilification qui a entraîné le colmatage, ce déséquilibre est surtout sensible dans la partie sommitale des horizons B des vieux sols. Il provoque le démarrage d'une seconde phase de pédogenèse à caractère beaucoup plus agressif que la phase précédente : on l'a qualifié de phase dégradante.

Sur le plan géochimique, cette phase qui est caractérisée avant tout par une dissociation du système "argile-fer", aboutit :

- à une destruction croissante des argiles gonflantes issues des transformations précédentes,
- à une remobilisation du fer avec redémarrage des pertes,
- à une concentration différentielle des argiles kaoliniques, beaucoup plus résistantes que les autres argiles aux nouvelles conditions d'évolution.

10. C'est donc véritablement une seconde pédogenèse qui se développe aux dépens des sols déjà mûrs et entièrement argilifiés résultant de la première phase fersiallitique rubéfiante. Elle aboutit finalement aux sols jaunes de type "ultisols" ou "acrisols" (F.A.O.), assez généralisés sur toutes les vieilles surfaces morphologiques quaternaires se trouvant en position de drainage favorable.

RELATIONS PEDOGENESE-MORPHOGENESE SUR LES SURFACES QUATERNAIRES.

Nous retiendrons 2 points essentiels :

11. Diminution de l'altitude des terrasses.

Les pertes de matières associées au développement des processus pédologiques conduisent à un phénomène de tassement et de contraction générale du volume des matériaux soumis à l'altération. Ceci se traduit finalement par une diminution plus ou moins importante de l'altitude des terrasses par rapport à leur niveau originel de dépôt, pouvant atteindre des proportions assez considérables pour les plus vieilles surfaces.

Ceci nous amène à penser que les critères topographiques doivent être utilisés avec une extrême prudence en matière de géomorphologie.

12. Fabrication autochtone de matériaux résiduels.

La transformation des éléments grossiers en terre fine qui se produit au cours des processus d'altération aboutit à une concentration relative

en éléments siliceux de texture limoneuse à limono-sableuse, intervenant à la suite de la lente évolution des autres minéraux plus altérables.

Il est évident que ces masses d'altérites résiduelles ont contribué à alimenter plus ou moins directement (reprises éolienne ou fluviatile) les recouvrements limoneux décalcifiés très répandus sur les niveaux de terrasses quaternaires dans de nombreux bassins alluviaux.

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

- - - - -

- ARNAL H. (1970) - Le cailloutis calcaire de Vérargues (Hérault) et son altération pédologique - Bull. AFEQ - pp. 71 - 92.
- ARNAL H. (1972) - Aspects microscopiques de deux paléosols fersiallitiques très lessivés du Bas-Languedoc AFEQ - n° 2 - pp. 81 - 90.
- ARNAL H. (1974) - Les multiples terrasses rhodaniennes de la partie Nord de la costière nîmoise; leurs prolongements vers Montpellier et leurs sols, Bull. Soc. Et. Sc. Nat. Nîmes T. 54 - pp. 35 - 50.
- ARNAL H. - BARRIERE J. - BOUTEYRE C. - RUTTEN P. et VIGNERON J. (1970) - Livret guide de l'excursion de l'AFEQ (14-16 mai 1970).
- ARNAL H. - BARRIERE J. - BORNAND M. (1973) - Les paléosols des terrasses fluviatiles du bassin rhodanien et du Languedoc, Spéc. AFEQ XIX - Cong. INQUA Nlle Zélande - pp. 203 - 206.
- AUBERT G. et BOULAIN J. (1967) - La pédologie P. U. F. Paris, 1 vol. , 128 p. , 4 fig.
- BALLESIO R. (1972) - Etude stratigraphique du pliocène rhodanien, Thèse Fac. Sc. Lyon - Doc. Géol. Fac. n° 53 - 333 p.
- BARRIERE J. - BOUTEYRE G. - MAZIER J. - RUTTEN P. - VIGNERON J. - (1969) - Les terrasses alluviales quaternaires de l'Orb et leurs paléosols dans la région de Maraussan (Hérault), VIIIème Congrès INQUA, Paris Livret-guide exc. A 6, Pyr. Orient. et centr. Roussillon - Lang. occid. p. 93 - 100.
- BARRIERE J. (1971) - Limites d'utilisation des paléosols pour la reconstitution des paléoclimats, C. R. Acad. Sc. (D) t. 272 - p. 2426 - 2429.
- BARRIERE J. (1971) - Utilisation des paléosols comme éléments de datation des formations quaternaires C. R. Acad. Sc. (D) + 273, pp. 310 - 313.
- BARRIERE J. et MAZIER J. (1971). Les formations quaternaires de la basse vallée de l'Hérault, Bull. AFEQ 3 - pp. 200 - 201.
- BARRIERE J. et MICHAUD J. (1971). Données nouvelles sur les formations d'âge plio-pleistocène inférieur du Languedoc et du Roussillon (France). V Congrès du Néogène méditerranéen, LYON.
- BARSHAD I. (1957) - Factors affecting clay formation. Clays, and clay Minerals, 6th. Conf, Pergamon Press, N. Y. - pp. 110 - 132.
- BARSHAD I. (1964) - Chemistry of soil development. In "Chemistry of the soil" - F. E. BEAR - New York - pp. 1 à 71.
- BASTISSE E. M. (1967) - Dispersion du fer sous l'action de la silice agissant comme vecteur, C. R. Acad. Sc. Paris - T. 264 - pp. 844 - 846.
- BELLAIR P. et GIGOUT M. (1969) - Livret-guide de l'excursion A 8, VIII^e Congrès INQUA, Paris, p. 11 à 24.
- BEGON J. C. - Etude morphologique et pédologique des terrasses alluviales de l'Attiège (thèse en préparation).
- BEGON J. C. (1973) - La démarche et les techniques du pédologue dans l'étude des paléosols. Spéc. AFEQ XIX^e Congrès INQUA Nlle Zélande - pp. 210 - 211.
- BILLARD A. (1973) - Paléosols quaternaires de l'Alta Pianura de Milan, interprétation stratigraphique et paléoclimatique, AFEQ n° 4.
- BILLARD A. (1973) - Le Ferretto, sol des interglaciaires villafranchiens, Enseignements tirés de l'étude des hautes et moyennes terrasses de la Stura di Lanzo (Piemont, Italie), Trav. labo. géog. Phys. Univ. Paris - PARIS VII - I. pp. 66 - 81.

- BIROT P. (1947) - Résultats de quelques expériences sur la désagrégation des roches cristallines, C.R. Acad. Sc. Paris - 225 n° 17 - p. 745 - 747.
- BIROT P. (1950) - Recherches sur le problème de la désagrégation des roches cristallines, Rev. Géomorph. Dyn. p. 271 - 276.
- BIROT P. (1954) - Désagrégation des roches cristallines sous l'action des sels, C.R. Acad. Sc. Paris, 238 n° 10 - p. 1145 - 1147.
- BLATT H. - MIDDLETON G. - MURRAY R. (1972). Origin of sedimentary rocks, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs - New-Jersey - 634 p.
- BOCQUET J. (1966) - Le delta de Voreppe : étude des faciès conglomératiques du Miocène des environs de Grenoble, Géol. Alpine Grenoble - t. 42 - p. 53 - 75.
- BOCQUIER G. - PAQUET H. et MILLOT G. (1970) - Un nouveau type d'accumulation oblique dans les paysages géochimiques : l'invasion remontante de la montmorillonite, C. R. Ac. Sc. Paris, 270 D, pp. 460 - 463.
- BOCQUIER G. (1971) - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad, Interprétation biogéodynamique, Thèse Sci, Strasbourg, Mém. ORSTOM 62, 1973 - 250 p.
- BOCQUIER G. - MILLOT G. - RUELLAN A. (1974) - Différenciation pédologique et géochimique dans les paysages africains tropicaux et méditerranéens. La pédogénèse latérale remontante, Communication, 10^e Congr. Int. Sci. Sol Moscou VI (1) - pp. 226 - 230.
- BONNEAU M. - DUCHAUFOR Ph. et LE TACON F. (1967) - Réflexion sur l'importance du facteur temps dans l'évolution des sols, Paris, Science du Sol, n° 2, pp. 13-24.
- BONIFAY E. (1960) - Recherches sur les terrains quaternaires dans le Sud-Est de la France, Thèse Sc. Nat, Paris - 332 p.
- BONIFAY M. (1969) - "Faunes quaternaires de France", dans Etudes françaises sur le Quaternaire, supplément au Bull. de l'AFEQ - Paris p. 127 à 142; 8 fig., 3 tabl.
- BONNET A. (1962) - Nouvel essai de corrélation des terrasses rhodaniennes, B. S. G. F. , t. V, n° 4, pp. 543-554, 5 fig.
- BONNET A. (1969) - Livret guide de l'excursion A 7, VII^e Congrès INQUA, Paris 2^e et 3^e journées, pp. 15 à 27, 2 pl. ht.
- BONNET A. - BORNAND M. (1970) - Pédologie et Quaternaire dans la Vallée du Rhône moyen, AFEQ 2, 3, pp. 106-116.
- BONNET A. - BORNAND M. et MONJUVENT G. (1971) - Excursion pédologique dans la moyenne vallée du Rhône, AFEQ, mai 1971. Publ. SES n° 161, Montpellier.
- BORNAND M. (1965) - Etude pédologique dans la vallée du Rhône, Région de Montélimar-Savasse (Drôme), 1500 ha, 50 p. Carte des sols et Carte Irrigation-Assainissement au 1/10.000, carton pédogénétique au 1/50.000. Publ. SES, n° 32, Montpellier.
- BORNAND M. (1965) - Etude pédologique dans la Drôme, Région de la Bégude de Mazenc, 4000 ha, 80 p. Carte des sols et carte Irrigation-Assainissement au 1/10.000, Carton pédogénétique au 1/50.000 Publication SES, n° 33, Montpellier.
- BORNAND M. (1967) - Etude pédologique du Bassin Valdainais, Vallée du Roubion-Jabron, Région de Montélimar (Drôme), 30.000 ha, 170 p. Carte des sols et carte Irrigation-Assainissement au 1/25.000. Publication SES, n° 80 - Montpellier.
- BORNAND M. coll. LEGROS J. P. (1968) - Etude pédologique dans la vallée du Rhône : Plaine de Valence - Romans (Drôme), Publ. SES n° 85, Montpellier.
- BORNAND M. et GUYON A. (1969) - Etude pédologique dans la vallée du Rhône, Région Tain - St-Rambert d'Albon (Drôme), Publ. SES n° 106, Montpellier.
- BORNAND M. et GUYON A. (1970) - Etude pédologique dans la vallée du Rhône : Région de Vienne - Péage de Roussillon (Isère), Publ. SES n° 127, Montpellier.

- BORNAND M. (1969) - Les sols rouges du confluent Rhône-Isère. Sc. du Sol n° 2, pp. 3-27.
- BORNAND M. et BOUZIGUES R. (1971) - Etude pédologique dans la vallée du Rhône ; Région de Pierrelatte-Bourg St-Andéol (Drôme-Ardèche). Publ. SES n° 139.
- BORNAND M. (1972) - Sols paysages et aménagements. Sols des vallées et des plaines alluviales. Publ. SES n° 175 - Montpellier, pp. 37-54.
- BORNAND M. (1972) - Etude pédologique de la moyenne Vallée du Rhône. 250 p. , 20 fig. , 23 tabl. , 44 photos + livret annexe 60 p. Carte pédologique à 1/100.000. Publ. SES, n° 152. Montpellier. Imprimerie Louis-Jean, Gap.
- BORNAND M. et CHAMLEY H. (1974) - Sur les minéraux argileux des terrasses pleistocènes du confluent Rhône-Isère. AFEQ n° 2, pp. 61-64.
- BORNAND M. (1974) - Apports de l'étude des paléosols aux problèmes de chronologie quaternaire dans le bassin rhodanien. Ann. Sc. de l'Université de Besançon.
- BORNAND M. et CHAMLEY H. (1975) - Observations sur la sédimentation argileuse du Miocène Supérieur au Pleistocène dans la moyenne Vallée du Rhône. Bull. Gr. Fr. Argiles, t. 27, Fasc. 2.
- BORNAND M. - BOURDIER F. - MANDIER P. et MONJUVENT G. (1976) - a) Les glaciers quaternaires dans les Alpes et le bassin du Rhône. Tome 1 : La Préhistoire Française. Impr. Louis-Jean, Gap, pp. 32-37. b) Les alluvions fluviales dans le bassin du Rhône (ibidem), pp. 89-94. c) Les limons quaternaires et les dépôts de pente dans le Bassin du Rhône (Ibidem), pp. 140-143.
- BORNAND M. - LEGROS J. P. - MOINEREAU J. (1977). Notice explicative et carte pédologique. Feuille de Privas. Publ. SESCOF n° 10 - 255 p. , 8 fig. , 13 tabl. , 24 ph. Imp. L. JEAN - GAP.
- BOTTNER P. et LOSSAINT P. (1967) - Etat de nos connaissances sur les formations rouges du Bassin Méditerranéen. Sc. du Sol, n° 1.
- BOTTNER P. (1971) - La pédogénèse sur roches-mères calcaires dans une séquence bioclimatique méditerranéo-alpine du Sud de la France. Thèse Fac. Sc. Montpellier.
- BOULAIN J. (1966) - Sur les facteurs climatiques de la genèse des sols rouges. C. R. Conf. Intern. Sols Méditerranéens, Madrid.
- BOULAIN J. (1966) - Etude des sols de la plaine du Chétif. Thèse Alger, 582 p.
- BOULAIN J. (1967) - Problèmes posés par les sols rouges méditerranéens. Bull. Ass. Géog. France n° 354, pp. 2 - 16.
- BOULET R. (1972) - Modalités d'action du lessivage dans les sols tropicaux développés sur granites (Haute-Volta). Etude microscopique. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. X . 4 - pp. 321-341.
- BOULET R. et PAQUET H. (1972). Deux voies différentes de la pédogénèse en Haute-Volta. Convergence finale vers la montmorillonite. C. R. Acad. Sc. Paris. 275, D. 12 pp. 1203-1206.
- BOULET R. (1974) . Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta : Equilibres dynamiques et bioclimats. Thèse Sc. Strasbourg. 330 p.
- BOUT P. (1969). Datations absolues de quelques formations volcaniques d'Auvergne et du Velay et chronologie du Quaternaire européen. Rev. Auvergne t. 83 , n° 4, pp. 267-280.
- BOURDIER F. (1961) - Le bassin du Rhône au Quaternaire. Géologie et Préhistoire, Ed. CNRS, Paris, 2 vol. , 363 p. , 3 tabl. , 297 fig.
- BOURDIER F. (1965) - Tableau des corrélations relatives au Pliocène et au Quaternaire ancien (France et régions voisines). C. R. somm. Soc. Géol. Fr. fasc. 4, p. 138, 1 tab.
- BOURDIER F. (1967) - Tableau sommaire du Quaternaire français, Réunion de Hanovre, mai 1967.
- BOURDIER F. (1968) - Les caractéristiques pédologiques des glaciations quaternaires dans la Bièvre - Valloire. Excursions des 9 et 10 mai 1968 de la sous-commission de l'INQUA pour la stratigraphie du Quaternaire européen, 11 p. dact. , 16 fig.
- BOURDIER F. - COMBIER I et GAUTHIER H. (1952) - Présence du Renne dans les alluvions antéwürmiennes de la basse vallée de l'Isère. C. R. A. S. , Paris, t. 235, p. 514 à 516.

- BRAVARD Y. (1963) - Quelques résultats de l'étude du Quaternaire du Bas-Dauphiné. Bull. Soc. Géol. de France, 7, V, pp. 541-542.
- BRAVARD Y. (1963) - Le Bas-Dauphiné, Recherches sur la morphologie d'un piedmont alpin, thèse, Grenoble, in 4, 504 p., 63 fig., 20 pl. h. t.
- BRAVARD Y. (1964) - Carte géologique au 1/50.000 de la France, feuille Grenoble 1ère édition.
- BRESSON L.M. (1974) - Rubéfaction récente sous climat tempéré humide. Séquence évolutive sur fluvio-glaciaire calcaire dans le Jura méridional. Etude de microscopie intégrée. Thèse 3ème cycle, Paris VI, 197 p.
- BRESSON L.M. - MATTIEU C. - FEDOROFF N. (1973). Les pédogénèses quaternaires sur roches-mères calcaires. Spec. AFEQ. XIX Cong. INQUA. Nlle Zélande, p. 206-208.
- BREWSTER R. et WALKER Ph. (1969) - Weathering and soil development on a sequence of river terraces. Austral. J. Soil Res. t. 7, n° 3, pp. 293-305.
- CAILLERE S. et HENIN S. (1963) - Minéralogie des argiles. Masson, Paris.
- CALLOT G. (1970) - Etude pédologique du Bassin de la Charente non domaniale. Publ. SES n° 131, Montpellier.
- CALLOT G. (1976) - Analyse d'un système géo-pédologique régional. Etude sédimentologique et cartographie des sols sur plate-forme calcaire peu déformée. Région Nord-Aquitaine. Thèse Fac. Sc. Montpellier.
- CALLOT G. et PEDRO G. (1977). Relations entre la présence de couvertures d'argiles à silex et la nature du substratum carbonaté. Rôle et origine des silex. C. R. Acad. Sc. Paris t. 285 pp. 1295-98.
- CALLOT G. et PEDRO G. (1977). Théorie sur la formation des argiles à silex. C. R. Acad. Sc. Paris t. 285 pp. 1415-1418.
- CAYEUX L. (1935) - Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées. Masson.
- CAYEUX L. (1929) - Les roches sédimentaires de France. Les roches siliceuses. Imp. Nationale.
- CAMEZ T. (1962) - Etude sur l'évolution des minéraux argileux dans les sols des régions tempérées. Thèse Sc. Strasbourg.
- CARLES J. (1951) - Carte de la végétation naturelle en France. Feuille du Puy au 1/200.000, C. N. R. S. Cartes géologiques de la France au 1/80.000. Feuilles Lyon, St-Etienne, Valence, Privas, Orange. Service de la Carte Géologique, B. R. G. M.
- CHALINE J. (1970) - La signification des rongeurs dans les dépôts quaternaires. AFEQ, 4, pp. 229-242.
- CHALINE J. (1970). Les rongeurs du Pleistocène moyen et supérieur. Thèse Fac. Sc. Dijon, 976 p.
- CHALINE J. (1972). Le Quaternaire. Doin Ed. 338 p.
- CHAMLEY H. (1967). Possibilité d'utilisation de la cristallinité d'un minéral argileux (illite) comme témoin climatique dans les sédiments récents. C. R. Acad. Sc. Paris. 265 pp. 184-187.
- CHAMLEY H. (1973). Sur diverses significations des argiles profondes de la méditerranée. Spéc. AFEQ XIX Cong. INQUA - Nlle Zélande, pp. 223-228.
- CHARDON M. (1972) - Les Préalpes Lombardes et leur bordure. Thèse Doctorat, Paris. H. Champion, Ed.
- CHAUVEL A. - PEDRO G. - TESSIER D. (1976) - Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. Etudes expérimentales. Science du Sol n° 2, pp. 101-113.
- CHAUVEL A. (1977). Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance (Sénégal). Thèse Fac. Sc. Strasbourg. 532 p.
- CHAUVIRE C. (1962) - Les gisements fossilifères quaternaires de Chatillon-S-Jean (Drôme), thèse Fac. Sc. Lyon.
- CHAUVIRE C. et WEISS J. (1962) - Découverte d'une nouvelle faune de mammifères dans une haute terrasse de la basse vallée de l'Isère, C. R. somm. soc. géol. fr. p. 18 et 19.

- CHAUVIRE C. - GAUTHIER M. et SAUVAGE J. (1962) - Etude palynologique des sables de la carrière Fournier à Chatillon-St-Jean (Drôme), C. R. somm. soc. Géol. Fr. n° 3, p. 84.
- CHESWORTH W. (1973) - The parent rock effect in the genesis of soil. *Geoderma*, 10 oo, 215-225.
- CHILINGAR G. U. - BISSELL H. J. - FAIRBRIDGE R. W. (1967). *Developpements in sedimentology. Carbonate Rocks*. Elsevier.
- CLEMENTE SALAS L. (1973). - Propiedades, genesis y classification de suelos de Terrazas del Guadalquivir. Thèse Séville 1973. 299 p.
- CONCHON O. (1975). - Les formations quaternaires de type continental en Corse orientale. Vol. I. Observations et interprétations. 514 p. Vol. II Annexes. Thèse Un. PARIS VI.
- C. P. C. S. (1967) - Révision de la classification française des sols.
- DACHARY M. C. (1969) - Observations sur les sols rouges et la mise en place de poches dans un calcaire tendre du Sahel algérois. AFES n° 5, pp. 29-36.
- DACHARY M. C. (1972). Une séquence de sols rouges sur schistes à Vale Formoso (Alentejo-Portugal). AFES n° 3, pp. 129-143.
- DACHARY M. C. (1975) - Genèse actuelle des sols sur schistes de la région de Beja (Alentejo-Portugal). Sc. Sol n° 4 - pp. 231-248.
- DANIELS R. B. - GAMBLE R. R. - CADY J. B. - Some relations among coastal plain soils and geomorphic surface in North Carolina. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc Madison* - Juil-Août 1970 34. 4. 648, 653.
- DAVID L. (1967) - Formations glaciaires et fluvio-glaciaires de la région lyonnaise. Doc. Lab. Géol. Fac. Sc. Lyon n° 22 - 159 p.
- DEBELMAS (1974) - Géologie de la France. Tomes 1 et 2 - Doin Ed.
- DEMARCO G. (1962). - Etude stratigraphique du Miocène rhodanien. Thèse Fac. Sc. Paris - Mém. BRGM (970 - n° 6) - 257 p.
- DEMARCO G. (1973). Lyonnais, Vallée du Rhône. Guides Géolog. régionaux. Masson, Ed. 175 p.
- DESHPANDE T. L. - GREENLAND D. J. - QUIRK J. P. (1968). - Changes in soil properties associated with the removal of iron and aluminium oxides. *J. Soil Sc.* Vol. 19 n° 1, pp. 109-122.
- DUCHAUFOR Ph. (1968) - L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils. Paris. Masson Editeur, 91 p.
- DUCHAUFOR Ph. et coll. (1970) - Précis de Pédologie. 3^e édit. Masson, Paris, 481 p.
- DUCHAUFOR Ph. (1972) - Processus de formation des sols. Biochimie et géochimie. C. R. D. P. , Nancy 183 p.
- DUCHAUFOR Ph. (1977) - Pédologie. Tome I. Pédogenèse et classification. Masson, 477 p.
- DUCLoux J. (1973) - Essai de quantification au niveau micromorphologique. Application aux sols d'une toposéquence sur substratum calcaire de la plaine vendéenne. Sc. Sol. n° 2 - pp. 81-89
- DE ENDREY A. S. (1963) - Estimation of free iron oxides in soils and clays by a photolytic method. *Clay Mineral Bull.* 29, 5, pp. 209-217.
- ERHART (1956) - La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Collection Evolution des Sciences Masson et Cie. Paris.
- ERHART H. (1968) - Sur les trois modes géochimiques d'accumulation des hydroxydes d'alumine dans la nature. C. R. Acad. Sciences - Série D. pp. 2081-83.
- ERHART H. (1973) - Géochimie du Silicium. Itinéraires géochimiques et cycle des silicium. Doin, Paris 217 p.
- ERHART H. (1973) - Géochimie de l'Aluminium. Itinéraires géochimiques et cycle géologique de l'aluminium. Doin, Paris (253 p.).
- FAUCK Roger (1971) - Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Les sols rouges sur sables et grés d'Afrique Occidentale. Thèse Fac. Sc. Strasbourg. 377 p.

- FAVROT J.C. et BOUZIGUES R. (1968) - Etude pédologique de la moyenne vallée de l'Ardèche. Carte des sols et carte irrigation-assainissement. Publ. S. E. S. n° 83, Montpellier.
- FEDOROFF N. (1965) - Sur les paléosols quaternaires des climats tempérés. Rev. Géog. Phys. et géol. dyn. 2^e voi. VII (1), p. 79.
- FEDOROFF N. (1966) - Contribution à la connaissance de la Pédogenèse quaternaire dans le Sud-Ouest du Bassin Parisien. Bull. AFEQ, n° 22, p. 94-105.
- FEDOROFF N. (1969) - Caractères micromorphologiques des pédogenèses quaternaires en France. Etudes sur le Quaternaire dans le monde. VIII Cong. INQUA, Paris 1 - pp. 341-349.
- FERRIER A. (1965) - Etude calorimétrique de la déshydratation de la goéthite (influence de l'état de division) - Thèse Doct. Ing. Paris.
- FERRIER A. (1965) - Influence de l'état de division de la goéthite sur sa chaleur de déshydratation. C. R. Acad. Sc. Paris t. 260 pp. 410-413.
- FINK J. (1956) - Zur Korrelation der Terrassen und Löss in Österreich. Eiszeitalter und Gegenwart 7. pp. 49-77.
- FINK J. (1968) - Etude des paléosols, possibilités et limites de l'étude. Zur Pflanzenernähr. Bodenkunde, Dtch, t. 261 - 1 - p. 19-33.
- FISCHER W. R. and U. SCHWERTMANN (1975) The Formation of hematite from amorphous. Iron (III) - Hydroxide. Clays and clay Minerals, Vol. 23 - pp. 33-37
- FLACH K. W. - CADY J. C. - NETTLETON W. D. - (1968) - Pedogenetic alteration of highly weathered parent materials. Int. Cong. Soil. Sci. 9. 1968. Adelaide, Vol. IV - pp. 343-351.
- FLACH K. W. - NETTLETON W. D. - GILE L. and CADY J. (1969) - Pedocementation : Induration by silica, carbonates and sesquioxides in the quaternary. Soil Science 1969 - Vol. 107 n° 6.
- GABERT P. (1961) - Un problème de l'altération quaternaire : le "ferretto de l'Italie du Nord". C. R. Soc. Géol. Fr. , pp. 22-23.
- GABERT P. (1962) - Les plaines du Pô occidentales et leurs piémonts. Etude géomorphologique. Thèse Doctorat, LOUIS-JEAN Gap, Editeur.
- GAUCHER G. (1947) - Sur l'âge des sols rouges Nord-Africains. C. R. Conf. de Pédologie méditerranéenne Montpellier - pp. 373-376.
- GAUCHER G. (1948) - Sur la notion d'optimum climatique d'une formation pédologique. C. R. Acad. Sc. Paris, T. 227 - pp. 290.
- GAUCHER G. (1960) - Les conditions géologiques de la pédogenèse Nord-Africaine. Bull. AFES n° 12, 1959 et n° 2.
- GAUCHER G. (1973) - La géochimie des processus pédologiques peut-elle devenir le principe fondamental de la classification des sols. C. R. Acad. Agric. Fr. + 59, 4 (284-294).
- GEZE B. (1959) - La notion d'âge du sol. Ann. Agron. , t. 3 , pp. 237-255.
- GIDON M. - MONJUVENT G. et STEINFATT E. (1969) - Sur la coordination des dépôts glaciaires de la Basse Isère, de la Bièvre et du Rhône (environs de Voiron, Isère). C. R. Acad. Sc. t. 268, p. 1464 à 1467.
- GIGNOUX M. et MORET (1952) - Géologie dauphinoise, 2^e édition. Edit. Masson, Paris 387 m, 91 fig. 3 pl. h. t.
- GIGOUT M. (1960) - Sur le Quaternaire fluvio-glaciaire de la Bièvre Valloire. C. R. Acad. Sc. t. 250, p. 564, 566, 1 fig.
- GIGOUT M. (1964) - Sur les glaciers de la Basse Isère. C. R. somm. soc. géol. Fr. , fasc. 9, p. 366 à 368.
- GIGOUT M. (1965) - Sur les glacis villafranchiens de Chambaran (Dauphiné). C. R. somm. soc. géol. Fr. fasc. 2, p. 41, 42, 1 fig.
- GIGOUT M. (1969) - Recherches sur le Quaternaire du Bas Dauphiné et du Rhône moyen. Mémoires du B. R. G. F. , n° 65, Paris, 1 carte h. t.

- GLANGEAUD L. (1956) - Classification des sols et hiérarchie des phénomènes en pédologie, 6ème Congrès Intern. Sci. Sol. PARIS. Vol. A - p. 178.
- GUERRA A. et al. (1973) - Los suelos rojos en España. Contribucion a su estudio y clasificacion. Publicaciones del departamento de suelos del Instituto de Edafologia y Biologia vegetal C. S. I. C. Madrid 1972. 253 p.
- HOREMANS P. (1961) - Contribution à l'étude pédologique des terrasses de la Loire moyenne. Thèse de géodynamique externe. Ronéo. Fac. Sc. Paris.
- HOREMANS P. et GUILLOBEZ S. (1970) - Etude des sols d'alluvions de la Loire. Livret-guide réunion AFES 4-5 Juin 1970.
- HUBSCHMAN J. (1975) - Morphogenèse et pédogenèse quaternaires dans le piémont des Pyrénées garonnaises et ariégeoises. Ed. Champion, Paris. 48 p. Thèse Fac. Toulouse.
- HEILMANN P. G. F. (1972) - On the formation of red soils in the lower CRATI Bassin (Sth Italy). Printed by : Krip Repro. Meppel 189 p.
- HENIN S. - PEDRO G. et ROBERT M (1968) - Considération sur les notions de stabilité et d'instabilité des minéraux en fonction des conditions de milieu, essai de classification des "systèmes d'agression". 9th Intern. Congr. Soil Sci. Adelaide Austral - Trans. 3, pp. 79-90.
- HENIN S. et ROBERT M. (1964) - Nouvelles observations sur le mécanisme de la désagrégation du granite. C. R. Acad. Sc. Paris 259, D, pp. 3577-3580.
- HENIN S. - GRAS R. - MONNIER G. (1969) - Le profil Cultural. Masson.
- ICOLE M. (1970) - Une nouvelle méthode pour la paléopédologie du Pliocène et du Villafranchien des Pyrénées Centrales. L'étude des galets de quartzite à cortex d'altération. AFEQ, n° 2, 3, pp. 135 à 143.
- ICOLE M. (1971) - Essai de paléopédologie du Quaternaire ; enseignements tirés d'une étude sur le piémont nord-pyrénéen. Sc. du Sol, n° 1, pp. 93-110.
- ICOLE M. (1971) - Accumulation d'hallyosite dans les paléosols des terrasses mindéliennes et du Quaternaire ancien des Pyrénées nord-occidentales. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 272, pp. 1216-1218.
- ICOLE M. (1973) - Géochimie des altérations des nappes d'alluvions du piémont occidental nord-pyrénéen. Essai de paléopédologie quaternaire. Thèse Fac. Sc. Paris VI.
- JACKSON M. L. (1965) - Clay transformations in soil genesis during the quaternary - Soil Sc. 99, p. 15-22.
- JACKSON M. L. (1968) - Weathering of primary and secondary minerals in soils, 9th Intern. Cong. Soil. Sci. Adelaide Austral, Trans. 4 - pp. 281-292.
- JACKSON J. L. (1969) - Soil chemical analysis advanced course. (Second Edition), Published by the author Madison, Wise, USA. 894 p.
- JAMAGNE M. (1967) - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. Agron. Vol. 18, n° hors série.
- JAMAGNE M. (1967) - Notes sur quelques sols d'Espagne et du Portugal, Bull. AFES n° 5 - pp. 13-31.
- JAMAGNE M. (1973) - L'interprétation pédologique des paléosols sur loess du Nord de la France. In ouvrage spécial AFEQ pour XIX Congrès INQUA - Nlle Zélande - pp. 201-203.
- JAMAGNE M. (1973) - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse Sci. Fac. Sci. Agron. Gembloux. Belgique. 445 p.
- KILIAN W. et GIGNOUX M. (1911) - Les formations fluvio-glaciaires du Bas-Dauphiné. Bull. Serv. Cart. géo. Fr. t. 21 - n° 129, 84 p.
- KUBIENA W. L. (1963) - Paléosols as indications of paleoclimates. Arid. Zone Research UNESCO, 20, pp. 207-209.
- KUHNE U. (1974). Zur Stratifizierung und gliederung quartärer Akkumulationen aus dem Bièvre-Valloire, einschließlich der Schotterkörper zwischen St-Rambert d'Albon und der Enge von Vienne. Im Selbstverlag des geographischen Int. Univ. Heidelberg. 94 p.

- LAMOUREUX M. (1966) - A propos de la formation des sols rouges méditerranéens, sous climat humide et subhumide du Liban. Conf. sur les Sols méditerranéens, Madrid.
- LAMOUREUX M. (1967) - Contribution à l'étude de la pédogenèse en sols rouges méditerranéens. Sc. du Sol 2. 55-86.
- LAMOUREUX M. - SEGALEN P. (1969) - Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban. Sc. du Sol 1. 1969 - pp. 63-95.
- LAMOUREUX M. (1971) - Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. Thèse Fac. Sc. Strasbourg.
- LAMOUREUX M. et QUANTIN P. (1973) - Utilisation de courbes de vitesse de dissolution dans la méthode cinétique de Ségalen. Pédol. ORSTOM - Vol. XI n° 1 - p. 3 à 14.
- LATREILLE G. (1969) - La sédimentation détritique au Tertiaire dans le Bas-Dauphiné et les régions limitrophes. Doc. Lab. Géol. Fac. Sci. Lyon - n° 33 - 254 p.
- LAPORTERIE J. M. - MERCIER J. L. (1972) - Contribution à l'étude des dépôts et des sols à l'Est de Montpellier. Thèse 3ème cycle. Fac. Lettres - Strasbourg. 3 fac. (30 p. + 76 p. + 125 p.).
- LEGER M. (1970) - Paléosols quaternaires de l'avant pays au nord des Alpes. Bull. Ass. Fr. Et. Quat. F. 7 n° 23-24 - pp. 167-178.
- LEGER M. - LOSCHER M. - PUISSEGUR J. J. (1972) - Les terrasses de la vallée de la Mindel en aval de Jettingen. Bull. AFEQ n° 2 - pp. 135-151.
- LEGROS J. P. (1971) - Etudes pédologiques des plateaux du Moyen-Vivarais. Régions Tournon - Ampuis - Annonay. Publ. SES Montpellier n° 126 - 148 p.
- LEGROS J. P. et GUYON A. - Etude pédologique dans la vallée du Rhône - Région Lyon-Vienne (Isère) Publ. SES. Montpellier n° 151 - 111 p.
- LEGROS J. P. (1973) - Précision des cartes pédologiques : la notion de finesse de caractérisation. Sc. Sol n° 2 - p. 115-128.
- LELONG F. (1967) - Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). Thèse Fac. Sci. Nancy et Sciences de la Terre 14 (1969) : 188 p.
- LELONG F. et SOUCHIER B. (1972). - Comparaison de bilans d'altération sur roches granitiques en zone tempérée et en zone équatoriale. C. R. Acad. Sc. Paris. t. 247 D pp. 1896-1899.
- LENEUF N. (1959) - L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire et les sols qui en sont dérivés. Thèse - Paris - 210 p.
- LUMLEY H. de (1969) - Les civilisations préhistoriques en France. Corrélations avec la chronologie quaternaire. In "Etudes Françaises sur le Quaternaire" - VIIIème Congrès INQUA Paris. pp. 151-169.
- MCKEAGUE J. A. and ARNAUD R. J. (1968) - Pedotranslocation ; Eluviation-illuviation in soils during the quaternary. Soil Science - Vol. 107 n° 6.
- MANDIER P. (1969) - La vallée épigénique du Rhône d'ANDANCE à TOURNON et le contact du socle avec l'avant-pays mollassique (Essai de mise au point morphologique). Rev. de géogr. de Lyon, vol. XLIV, fasc. 2, pp. 117 à 168, 13 fig.
- MANDIER P. (1973) - Quelques observations morphologiques sur les terrasses de la Basse-Isère. Rev. de géogr. de Lyon, Vol. XLVIII, fasc. 4, pp. 343 à 358, 7 fig.
- MANDIER P. (1974) - Les passages du Rhône dans la dépression de St-Peray. Rev. de Géogr. de Lyon n° 2, pp. 139-154.
- MAROCKE R. (1962) - Les sols rouges paléoclimatiques de la terrasse würmienne rhénane d'Alsace. C. R. Acad. Sc. Paris - 254 pp. 3019-3021.
- MAROCKE R. (1962) - Datation des formations pédologiques fossiles et actuelles de la terrasse würmienne rhénane au sud de l'Alsace. C. R. Acad. Sc. Paris t. 254 - pp. 3116-3118.
- MAROCKE R. (1963) - Evolution des dépôts rhénans de la Haute-Alsace au cours du Pleistocène récent. Bull. Soc. Hist. Nat. Colmar pp. 3-35.

- MARTIN A. (1963) - Les dépôts fluvio-glaciaires du Bas-Dauphiné, leurs minéraux argileux, leur radioactivité. Bull. Soc. Géol. Fr. 4 V - pp. 538-540.
- MARTIN A. (1965) - Contribution à l'étude sédimentologique des formations glaciaires quaternaires de la Plaine Bièvre-Valloire. Thèse 3ème cycle - Orsay - 95 p.
- MILLOT G. (1964) - Géologie des argiles. Paris. Masson Edit.
- MIS KOVSKY J. C. (1974) - Le Quaternaire du Midi Méditerranéen. Stratigraphie et Paléoclimatologie d'après l'étude sédimentologique du remplissage des grottes et sous roche (Ligurie, Provence, Languedoc méditerranéen, Roussillon, Catalogne). Labo de paléontologie humaine et de préhistoire - 331 p. Imp. Louis-Jean Gap.
- MOINEREAU J. (1966) - Etude des sols et des paléosols du bas-Vivarais. Thèse 3ème cycle - Paris.
- MOINEREAU J. (1971) - Etude des sols de la plaine d'Alba (Ardèche). Publ. SES Montpellier n° 142 - 57 p.
- MONACO A. (1973) - Les minéraux argileux dans le cycle sédimentaire. Applications à la bordure méditerranéenne. In ouvrage spécial AFEQ - XIXème congrès INQUA - Nlle Zélande de pp. 217 à 222.
- MONJUVENT G. - (1968) - Essais morphologiques sur le piedmont alpin : I La Basse vallée de l'Isère. Rev. géogr. alpine t. LVII - n° 2 - pp. 232-276.
- MONJUVENT G. (1969) - Essais morphologiques sur le piedmont alpin : II La vallée morte de la Bièvre-Valloire. Rev. géogr. alpine t. LVII n° 3 - pp. 487-514.
- MONJUVENT G. (1973) - La transfluence Durance-Isère - Essai de synthèse du Quaternaire du bassin du Drac (Alpes-Françaises). Géologie-Alpine t. 49 - pp. 57-118.
- MONJUVENT G. (1974) - Formations quaternaires de la Basse Isère (feuille Romans 1/50, 000e). Bull. BRGM (2) - Section I, n° 1, p. 15-35, 9 fig.
- NAHON D. et RUELLAN A. (1972) - Encroûtements calcaires et cuirasses ferrugineuses dans l'Ouest du Sénégal et de la Mauritanie. C. R. Acad. Sc. Paris t. 274 D. pp. 509-512.
- NAHON D. (1976) - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal Occidental et en Mauritanie. Systemes évolutifs : géochimie, structure, relais et coexistence. Thèse Sc. Nat. Univ. Aix Marseille III - Tr. Lab. Sci. Terre St-Jérôme - Marseille n° 10 -
- NALOVIC L. (1974) - Recherches géochimiques sur les éléments de transition dans les sols ; étude expérimentale de l'influence des éléments traces sur le comportement du fer et l'évolution des composés ferrifères au cours de la pédogenèse. Thèse Fac. Sc. Paris VI - 289 p.
- NALOVIC L. et HUMBEL F. X (1971) - Contribution à l'étude de la localisation des différentes formes de composés du fer au sein de quelques sols du Cameroun. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. IX, n° 3, pp. 271-306, 14 fig., bibliogr. (27 réf.).
- NALOVIC L. - PINTA M. (1972) - Comportement du fer en présence des éléments de transition. Etude expérimentale. a) Précipitation, déshydratation, dissolution. C. R. Acad. Sc. Paris t. 274, série D pp. 628-631.
b) Lessivage des hydroxydes hydratés par de l'eau, à l'air libre. C. R. Acad. Sc. Paris t. 275 - série D - pp. 153-156.
- NALOVIC L. - HENIN S. et TRICHET J. (1973) - Le système fer-silice et son comportement. C. R. Acad. Sc. Paris - t. 276 - D. 3005-3008.
- PAQUET H. (1970) - Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr. n° 30 212 p. Strasbourg.
- PEDRO G. (1964) - Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse Paris, 344 p., 63 fig. 153 tab.
- PEDRO G. et BITAR E. K. (1966) - Sur l'influence du type chimique de la roche-mère dans le développement des phénomènes d'altération superficielle. Recherches expérimentales sur l'évolution des roches ultra-basiques (serpentinites). C. R. Acad. Sc. Paris t. 263 n° 4, D - pp. 313-316.

- PEDRO G. (1966) - Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles, C. R. Acad. Sc. Paris, 262 D, pp. 1828-1831.
- PEDRO G. (1968) - Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe ; présentation d'une esquisse géographique. Revue Géog. Phys. Géol. Dyn. Paris.
- PEDRO G. et JAMAGNE M. - BEGON J. C. (1968) - Evolution des minéraux dans les sols durant le Quaternaire. Symposium sur la pédogenèse au Quaternaire.
- PEDRO G. et MELFI A. J. (1970) - Recherches expérimentales sur le comportement des hydrates ferriques et des constituants silico-ferriques amorphes en milieu lessivé. Pédologie n° 1, pp. 5-33.
- PEDRO G. et CHAUVEL A. (1973) - Sur la nature et l'importance relative des principaux mécanismes intervenant dans le processus de lessivage pédologique. p. 1133-1136. C. R. Acad. Sc. Paris t. 277 Série D - 1/10/73.
- PEDRO G. - JAMAGNE M. - BEGON J. C. (1974) - Les deux grandes voies de l'évolution pédologique à caractère acide en milieu tempéré, froid et humide. Cong. Int. Sc. du Sol. Moscou 1974. comm. V. 1.
- PEDRO G. - DELMAS A. B. - SEDDOH F. K. (1975) - Sur l'importance et la nécessité d'une distinction fondamentale entre type et degré d'altération. Application au problème de la définition de la ferrallitisation. C. R. Acad. Sc. Paris. D. t. 280, pp. 825-828.
- QUANTIN P. et LAMOUREUX M. (1974) - Adaptation de la méthode cinétique de Ségalen à la détermination des constituants minéraux de sols variés. ORSTOM - Pédol. Vol XII n° 1 - p. 13 à 46.
- PENCK A. et BRUNCKNER E. (1907) - Les Alpes Françaises à l'époque glaciaire (traduit Schaudel 4) Ed. Allier - Grenoble, 148 p.
- PETIT JOHN F. J. (1957) - Sedimentary rocks. Herper. Sol. Edition.
- REDONDO C. P. (1973) - Contribution à l'étude des formations quaternaires et des paléosols des vallées de la Bléone et de la Durance (de Digne à Malijai et de Mison à Vinon sur Verdon). Thèse 3ème cycle. Université de Provence - Marseille - 200 p.
- REVEL J. C. (1972) - Recherche sur l'origine de la rubéfaction des terres rouges méditerranéennes. Thèse Ing. Doct. Fac. Sc. Toulouse.
- REVEL J. C. et MARGULIS H. (1972) - Minéraux silicatés et pédogenèse des sols calcaires rouges méditerranéens - p. 539 à 541 - C. R. Acad. Sc. Paris t. 275 - Série D
- RICHMOND G. M. (1969) - Stratigraphie comparée des terrains quaternaires des Alpes et des Rocheuses. VIIIème Congrès INQUA - Paris.
- RINNE F. - BERTRAND L. - ORCEL J. (1959) - La Science des roches.
- ROBERT M. (1966) - Sur la nature des phénomènes de désagrégation, d'arénisation et d'altération chimique. Etude expérimentale. C. R. Acad. Sc. Paris 262. D. pp. 1519-1522.
- ROBERT M. (1970) - Etude expérimentale de la désagrégation du granite. Thèse Fac. Sc. Paris.
- ROBERT M. et BARSHAD I. (1972) - Sur les propriétés et la détermination des minéraux argileux 2/1 expansibles (vermiculites, smectites). C. R. Acad. Sc. Paris 275. D. pp. 1463-1465.
- ROBERT M. - TESSIER D. (1974) - Méthode de préparation des argiles des sols pour les études minéralogiques. Ann. Agron. 25(6). 859-882.
- ROBERT M. (1975) - Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des Rayons X. Problèmes particuliers posés par les minéraux argileux les plus fréquents dans les sols des régions tempérées. Ann. Agron. 26 (4) 363-399.
- RUELLAN A. (1970) - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya. Thèse Fac. Sc. Strasbourg. 482 p.
- RUELLAN A. (1971) - L'histoire des sols : Quelques problèmes de définition et d'interprétation. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. IX, n° 3, pp. 335-344, bibliogr. (16 réf.).

- RUHE R. V. (1964) - Relation of fluctuations of sea level to soil genesis in the quaternary. Soil Survey Investigations . 117 Agronomy Bldg, Ames Iowa.
- RUHE R. V. (1969) - Principes For Dating Pedogenic Events in the Quaternary. Soil Science. Vol. 107 n° 6.
- RUTTEN P. - BOUTEYRE G. - VIGNERON J. (1963) - Pédogenèse et géomorphologie dans le Bas-Rhône Languedoc; leurs conséquences agrologiques. Sc. du Sol n° 1.
- SCHEFFER - WELTE E. et LUDWIEG F. (1957) - "A propos du problème des hydroxydes de fer dans le sol". Chemie der Erde XIX pp. 51-64.
- SHELLMANN W. (1959) - "Recherches expérimentales sur la formation sédimentaire de la goethite et de l'hématite". Chemie der Erde XX pp. 104-135.
- SEGALEN P. (1968) - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. VI 1. pp. 105-126.
- SEGALEN P. (1969) - Contribution à la connaissance de la couleur des sols à hydroxydes de la zone inter-tropicale : sols jaunes et sols rouges. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. vol. VII n° 2 - 1969 pp. 225-236
- SEGALEN P. - LEAL SILVA J. N. (1969) - Le fer, le manganèse, l'aluminium et la silice facilement extractibles dans les sols tropicaux à sesquioxydes. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. VII 3. pp. 287-310.
- SEGALEN P. (1970) - Extraction du fer libre des sols à sesquioxydes par la méthode de De ENDREY par irradiation à l'ultra-violet de solutions oxaliques. Cah. ORSTOM, série Pédol. VIII, 4, (pp. 483-496).
- SEGALEN P. (1971) - Problèmes posés par la détermination du fer libre dans les sols à sesquioxydes. Cahier ORSTOM, Pédo. Vol. IX - n° 1 - pp. 3 à 27.
- SEGALEN P. (1973) - L'Aluminium dans les sols. Bull. ORSTOM - 281 p.
- SCHWERTMANN U. (1964) - Différenciation des oxydes ferriques du sol par extraction avec une solution d'oxalate d'ammonium. Zeitschr. F. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, 105 (3) p. 194-202.
- SCHWERTMANN U. (1965) - "A propos de la formation de la goethite et de l'hématite à partir de l'hydroxyde de fer (III) amorphe. Zeitschr. für Pflanzenernährung Düngung, Bodenkunde 108 (1) pp. 38-45.
- SCHWERTMANN U. et LENTZE W. (1966) - "Couleur des sols et formes des oxydes de fer". Zeitschr. F. pflanzenernährung - Bodenkunde, 115, (3), pp. 209-214.
- SCHWERTMANN U. et FISCHER W. R. (1966) - A propos de la formation de α -FeOOH et α -Fe₂O₃ à partir de l'hydroxyde de fer amorphes III". Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 346 (3-4) pp. 137-142.
- SCHWERTMANN U. (1966 a) "La formation de la goethite et de l'hématite dans les sols et les sédiments Proceed. of the intern. clay Jérusalem, I, pp. 159-165.
- SCHWERTMANN U. (1966 b) - Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallisation of amorphous ferric hydroxide. Nature. 212, pp. 645-646.
- SCHWERTMANN U. - FISCHER W. R. et PAPENDORF H. (1968). The influence of organic compounds on the formation of iron oxides 9th intern. Cong. of soil Sci. transactions, 1, 66, pp. 645-655.
- SCHWERTMANN U. (1970) - Der Einfluss einfacher organischer Anionen auf die Bildung von Goethit und Hematit aus amorphen Fe III Hydroxid- Geoderma, 3, pp. 207-214.
- SCHWERTMANN U. et FISCHER W. R. (1973) - Natural "Amorphous" ferric hydroxide. Geoderma 10 : pp. 237-247.
- SCHWERTMANN U. - FISCHER W. R. - TAYLOR R. M. (1974) - Les nouveaux aspects de la formation des oxydes de fer dans les sols. Cong. Inter. Sc. du Sol. Moscou 1974 - Comm. V.
- SEDDOH F. (1973) - Altération des roches cristallines du Morvan (granites, granophyres, rhyolites). Etude minéralogique, géochimique et micromorphologique. Thèse Fac. Sc. Dijon - 377 p.

- SERVANT J. (1970) - Notice explicative de la feuille Argelès-sur-Mer - Perpignan. Publication du Service de la Carte Pédologique de France, n° 2
- SERVAT E. et CALLOT G. (1967) - Etude pédologique du Roussillon. Publication SES n° 66, Montpellier.
- SERVAT E. et BOUZIGUES R. (1971) - Les sols de la moyenne vallée du Lot. Publ. SES n° 177, Montpellier.
- Service d'Etude des Sols (1972) - Sols, paysages et aménagements. Publication SES n° 175, Montpellier.
- S. O. G. R. E. A. H. (1962) - Etudes pédologiques des secteurs de Baix, Logis Neuf et de Beauchastel. Rapports et cartes 1/20.000. Documents S. R. A. E. - Rhône-Alpes (Lyon).
- SOUCHIER B. et LELONG F. (1970) - Détermination quantitative par voie chimique des constituants minéralogiques des sols tempérés. Bull. Serv. Géol. Als-Lor, 23, 3-4, p. 95-112 - Strasbourg 1970.
- SOUCHIER B. (1971) - Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). Thèse Fac. Sc. Nancy. 130 p. et Mém. Bull. Carte Géol. Als-Lor.
- STEPHENS C. G. (1965) - Climate as a factor of soil formation through the quaternary. Soil. Sc. USA 99 n° 1 - pp. 9-14.
- SYS C. (1967) - The concept of ferralitic and fersiallitic soils in central Africa. Their classification and their correlation with the 7th Approximation. Pédologie (Gand) 196 t, XVIII 3, pp. 284-325.
- TARDY Y. (1969) - Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Fac. Sci. Strasbourg 274 p.
- TARDY Y. - PAQUET H. et MILLOT G. - (1970) - Trois modes de genèse des montmorillonites dans les altérations et les sols. Bull. Gr. Fr. Argiles. 22 n° 1 - pp. 69-77.
- TAVERNIER R. (1957) - Sur quelques sols des régions méditerranéennes. Gand. Pédologie VII - pp. 348-364.
- TESSIER D. (1975) - Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ing. C. N. A. M. Lab. Géol. Appliquée. 231 p.
- TIERCELIN J. J. et CHAMLEY H. (1975) - Minéraux argileux du Pleistocène Glaciaire et inter-glaciaire de Laragne-Sisteron (Alpes de Haute-Provence). C. R. Acad. Sc. Paris - t. 280 - pp. 2293-2296.
- TRUMPY R. et BERSIER A. (1954) - Les éléments des conglomérats oligocènes du Mont-Pélerin. Pétrographie, statistique, origine. Ecl. Geol. Helv. Bâle - 47, n° 1 - pp. 119-166 - 6 fig, 2 tabl.
- VEYRET P. (1952) - Attribution au Mindélien d'une partie des moraines de Faramans-Pajay (confins de la Bièvre-Valloire, Bas Dauphiné). C. R. somm. Soc. Géol. Fr. n° 8, p. 132-134.
- VIRET (1964) - Le loess à bancs durcis de St-Vallier (Drôme) et sa faune de mammifères villafranchiens. Nouv. Arch. Museum hist. nat. Lyon, fasc. IV, 200 p. 43 fig. , 33 pl. h. t.

L I S T E D E S F I G U R E S

Première partie

Pages

CHAPITRE 1

Fig. 1. 1	- Secteur étudié et cartographié	2
Fig. 1. 2	- Les formations géologiques régionales	5
Fig. 1. 3	- Schéma paléogéographique du Quaternaire rhodanien	8b
Fig. 1. 4	- Profil en long des terrasses de la moyenne vallée du Rhône	10
Fig. 1. 5	- Coupe perspective des terrasses rhodaniennes au débouché de la Valloire	12
Fig. 1. 6	- Coupe perspective du confluent Rhône-Isère (Plaines de Valence)	13
Fig. 1. 6bis	- Coupe semi-synthétique nord-sud à travers les Plainnes de Valence	13
Fig. 1. 7	- Bloc diagramme des plaines de Montélimar et du Bassin Valdainais	14
Fig. 1. 8	- Bloc diagramme de la région de Pierrelatte-Bourg-St-Andéol	15
Fig. 1. 9	- Profil du versant nord de la vallée de la Drôme en aval de Crest : les glacis pliocènes et quaternaires anciens	17
Fig. 1. 10	- Les grands types d'apports alluviaux dans la moyenne vallée du Rhône	19

CHAPITRE 2

Fig. 2. 1	- Localisation schématique des principaux points de prélèvements de matériaux-mères dans la moyenne vallée du Rhône d'après schéma géologique (R. BALLELIO - 1972)	32
Fig. 2. 2	- Schéma montrant les sources essentielles d'alimentation pour les matériaux composant les nappes alluviales quaternaires rhodaniennes	36

Deuxième partie

CHAPITRE 3

Fig. 3. 1	- Caractéristiques morphologiques schématiques des principaux stades évolutifs de la séquence de sols sur cailloutis rhodaniens, Relations sols-paysages-morphologie	50b
Fig. 3. 2	- Evolution des éléments grossiers et de la terre fine dans les sols des basses terrasses (évaluation en pour cent de poids)	61
Fig. 3. 3	- Fe, Si, Al facilement extractibles (SEGALEN) des sols des basses terrasses (stade d'évolution n° 1)	69

CHAPITRE 4

Fig. 4. 1	- Evolution des éléments grossiers et de la terre fine dans les sols des moyennes et des hautes terrasses (en pour cent de poids)	89
Fig. 4. 2	- Fe, Si, Al facilement extractibles (SEGALEN) des sols des moyennes terrasses (stade d'évolution n° 2)	101
Fig. 4. 3	- Fe, Si, Al facilement extractibles (SEGALEN) des sols des hautes terrasses (stade d'évolution n° 3), Région de Valence	102
Fig. 4. 4	- Fe, Si, Al facilement extractibles (SEGALEN) des sols des hautes terrasses (stade d'évolution n° 3), Région de Bièvre-Valloire	103

CHAPITRE 5

Fig. 5. 1	- Evolution des éléments grossiers et de la terre fine dans les sols des très hautes terrasses (en pour cent de poids)	121
-----------	--	-----

CHAPITRE 6

Fig. 6. 1	- Evolution des éléments grossiers et de la terre ^{fine} dans les sols des niveaux villafranchiens (en pour cent de poids)	141
Fig. 6. 2	- Fe, Si, Al facilement extractibles (SEGALEN) des sols des très hauts niveaux de terrasses : stade d'évolution n° 4	153

Fig. 6.3	- Fe, Si, Al facilement extractibles (SEGALEN) des sols des niveaux villafranchiens ; sols en cours de dérubiéfaction	154
Fig. 6.4	- Fe, Si, Al facilement extractibles (SEGALEN) des sols des niveaux villafranchiens sols jaunes	155

CHAPITRE 7

Fig. 7.1	- Evolution du squelette ; la progression des phénomènes de dissolution des calcaires et d'arénisation des cristallins au sein de la séquence rhodanienne	160b
Fig. 7.2	- Evolution des organisations plasmiques et des rapports plasma-squelette au sein de la séquence rhodanienne ; dynamique de la matrice argileuse	166b

Troisième partie

CHAPITRE 8

Fig. 8.1	- Présentation schématique de l'évolution des fractions grossières et terre fine en liaison avec les principaux mécanismes en cause. (Résultats en vraies grandeurs et en raisonnement "isoquartzite")	174b
Fig. 8.2	- Evolution des constituants grossiers et de la fraction fine au sein de la phase résiduelle dans les différents stades évolutifs (variations des teneurs des horizons A et B par rapport au matériau originel C)	176
Fig. 8.3	- Evolution des composantes de la terre fine dans les horizons A et B par rapport au matériau originel C	183
Fig. 8.4	- Evolution schématique des principaux constituants dans les différents termes de la séquence rhodanienne. (Raisonnement isoquartzite avec référence à la roche-mère)	187
Fig. 8.5	- Modèle simplifié d'évolution utilisé pour le calcul des pertes	189
Fig. 8.6	- Présentation schématique des pertes de terre fine lors de l'évolution des sols des terrasses rhodaniennes (d'après raisonnement isoquartzite)	204
Fig. 8.7	- Evolution des pertes moyennes de terre fine totale (d'après raisonnement isoquartzite)	206
Fig. 8.8	- Evolution des pertes ou gains moyens par fractions granulométriques et par horizons	206

CHAPITRE 9

Fig. 9.1	- Evolution des pertes en silice totale lors de la formation des sols des terrasses rhodaniennes (exprimées en SiO_2 % de la masse globale du sol)	231
Fig. 9.2	- Evolution des pertes en silicates lors de la formation des sols des terrasses rhodaniennes (exprimées en SiO_2 % de la masse globale du sol)	231
Fig. 9.3	- Evolution des pertes en aluminium lors de la formation des sols des terrasses rhodaniennes (exprimées en Al_2O_3 % de la masse globale du sol)	232
Fig. 9.4	- Evolution des pertes en fer lors de la formation des sols des terrasses rhodaniennes (exprimées en Fe_2O_3 % de la masse globale du sol)	232
Fig. 9.5	- Evolution des pertes en magnésium lors de la formation des sols des terrasses rhodaniennes (exprimées en MgO % de la masse globale du sol)	233
Fig. 9.6	- Evolution des pertes en potassium lors de la formation des sols des terrasses rhodaniennes (exprimées en K_2O % de la masse globale du sol)	233

Quatrième partie

CHAPITRE 10

Fig. 10.1	- Les phénomènes d'argilisation dans les sols des terrasses rhodaniennes	240
Fig. 10.2	- Variations du stock d'argile dans les différents termes évolutifs de la séquence rhodanienne	242
Fig. 10.3	- Variations verticales des teneurs en "FER TOTAL" (fusion), en "FER LIBRE" (de Endredy) et en "FER FACILEMENT EXTRACTIBLE" (Ségalen) dans les principaux stades évolutifs de la séquence rhodanienne	250

Fig. 10.4	- Variations des proportions relatives de "fer libre" et de "fer facilement extractible" par rapport au "fer total" dans les différents termes de la séquence rhodanienne	252
Fig. 10.5	- Variations verticales des teneurs en "FER TOTAL" (en Fe_2O_3 %) et en "ARGILE" (en argile %) dans les principaux stades évolutifs de la séquence rhodanienne	253
Fig. 10.6	- Variations des rapports fer/argile pour 3 types d'extraction du fer dans les principaux termes de la séquence rhodanienne	255

CHAPITRE 11

Fig. 11.1	- Représentation schématique des rôles respectifs des phénomènes de désagrégation et d'altération chimique dans l'évolution des galets cristallins	272
Fig. 11.2	- Progression des processus rubéfiants dans les matériaux rhodaniens : interactions des principaux facteurs	277
Fig. 11.3	- Passage du sol rouge fersiallitique au sol rouge dégradé, puis au sol jaune	279

L I S T E D E S T A B L E A U X

	Pages
<u>Première partie</u>	
CHAPITRE 2	
Tabl. 21 - Distribution des éléments par classes de taille dans les alluvions rhodaniennes et les sols superposés	27-28
Tabl. 21bis - Valeurs moyennes de la granulométrie globale pour les matériaux originels des terrasses rhodaniennes regroupés par niveaux morphologiques et chronologiques	29
Tabl. 22 - Pétrographie des fractions grossières dans les formations mio-pliocènes et dans les alluvions des terrasses rhodaniennes	33-34
Tabl. 23 - Fourchettes et moyennes des compositions pétrographiques pour les matériaux fluvio-glaciaires rhodaniens (en pour cent de galets dénombrés)	36
Tabl. 24 - Granulométrie et répartition des carbonates de la fraction terre fine dans les matériaux fluvio-glaciaires rhodaniens	38
Tabl. 25 - Minéraux argileux des fractions fines dans les formations mio-pliocènes et dans les formations fluvio-glaciaires quaternaires de la moyenne vallée du Rhône	41-42
Tabl. 26 - Importance et nature des fractions résiduelles issues de la dissolution des divers types de roches calcaires pouvant alimenter les formations fluvio-glaciaires	44
Tabl. 27 - Caractéristiques schématiques de la minéralogie des résidus argileux de décarbonatation des calcaires alpins et préalpins	45
<u>Deuxième partie</u>	
CHAPITRE 3	
Tabl. 31 - Caractéristiques micromorphologiques du stade n° 1 : sols des basses terrasses	54
Tabl. 32 - Caractéristiques physico-chimiques des sols des basses terrasses : stade d'évolution n° 1	62
Tabl. 33 - Evolution de la fraction argileuse des sols des basses terrasses	65
Tabl. 34 - Evolution des formes du fer dans les sols des bas niveaux de terrasses (exprimé en Fe_2O_3 pour cent de terre fine)	66
Tabl. 35 - Evolution de l'aluminium dans les sols des bas niveaux de terrasses (exprimé en Al_2O_3 pour cent de terre fine)	67
Tabl. 36 - Evolution de la silice dans les sols des basses terrasses (exprimé en SiO_2 pour cent de terre fine)	70
CHAPITRE 4	
Tabl. 41 - Caractéristiques micromorphologiques du stade n° 2 : les sols des moyennes terrasses	79
Tabl. 42 - Caractéristiques micromorphologiques du stade n° 3 : les sols des hautes terrasses (ferretto)	83
Tabl. 43 - Caractéristiques physico-chimiques des sols des moyennes terrasses : stade d'évolution n° 2	92
Tabl. 44 - Caractéristiques physico-chimiques des sols des hautes terrasses : stade d'évolution n° 3	93
Tabl. 45 - Evolution de la fraction argileuse dans les sols des moyennes terrasses : exemples de la région de Valence et de la Bièvre-Valloire	96
Tabl. 46 - Evolution de la fraction argileuse dans les sols des hautes terrasses : exemples de la région de Valence et de la Bièvre-Valloire	97
Tabl. 47 - Evolution des formes du fer dans les sols des moyennes et des hautes terrasses rhodaniennes (exprimé en Fe_2O_3 pour cent de terre fine)	99
Tabl. 48 - Evolution de l'aluminium dans les sols des moyennes et hautes terrasses rhodaniennes (exprimé en Al_2O_3 pour cent de terre fine)	100
Tabl. 49 - Evolution de la silice dans les sols des moyennes et des hautes terrasses rhodaniennes (exprimé en SiO_2 pour cent de terre fine)	105

CHAPITRE 5

Tabl. 51	- Caractéristiques micromorphologiques du stade d'évolution n° 4 : les sols des très hautes terrasses	118
Tabl. 52	- Caractéristiques analytiques des sols des très hautes terrasses : stade d'évolution n° 4	123

CHAPITRE 6

Tabl. 61	- Caractéristiques micromorphologiques du stade d'évolution n° 5, Les sols des niveaux villafranchiens	139
Tabl. 62	- Caractéristiques physico-chimiques des sols des niveaux villafranchiens : stade n° 5	143
Tabl. 63	- Evolution de la fraction argileuse dans les sols des très hautes terrasses rhodaniennes : stade d'évolution n° 4 (rég. Donzère et Bièvre-Valloire)	146
Tabl. 64	- Evolution de la fraction argileuse dans les sols des niveaux villafranchiens : sols en cours de dérubiéfaction	147
Tabl. 65	- Evolution de la fraction argileuse dans les sols des niveaux villafranchiens : secteur amont du Chambaran	148
Tabl. 65bis	- Evolution de la fraction argileuse dans les sols des niveaux villafranchiens : secteur aval du Chambaran	149
Tabl. 66	- Evolution des formes du fer dans les sols des très hautes terrasses rhodaniennes et des niveaux villafranchiens (exprimé en Fe_2O_3 pour cent de terre fine)	151
Tabl. 67	- Evolution de l'aluminium dans les sols des très hautes terrasses rhodaniennes et des niveaux villafranchiens (exprimé en Al_2O_3 pour cent de terre fine)	152
Tabl. 68	- Evolution de la silice dans les sols des très hautes terrasses rhodaniennes et des niveaux villafranchiens (exprimé en SiO_2 pour cent de terre fine)	156

Troisième partie

CHAPITRE 8

Tabl. 81	- Variations des teneurs moyennes en éléments grossiers et en terre fine des horizons A et B par rapport au matériau originel (C)	176
Tabl. 82	- Evolution de la fraction fine et de ses composantes, Variations des teneurs des horizons A et B par rapport au matériau originel C	182
Tabl. 83	- Variations des teneurs en éléments caillouteux et graveleux résiduels (à quartzite constant) dans les horizons A et B par rapport au matériau originel (C)	186
Tabl. 84	- Présentation schématique des transferts globaux de terre fine, Cas du stade n° 1	192 et 197
Tabl. 85	- Transferts globaux de terre fine, Stade n° 2	198
Tabl. 86	- Transferts globaux de terre fine, Stade n° 3	199
Tabl. 87	- Transferts globaux de terre fine, Stade n° 4 à composante rhodanienne typique	200
Tabl. 88	- Transferts globaux de terre fine, Stade n° 4 à composante siliceuse (cas de Louze)	201
Tabl. 89	- Transferts globaux de terre fine, Stade n° 5 (secteur amont : vieilles surfaces plio-villafranchiennes)	202
Tabl. 8.10	- Transferts globaux de terre fine, Stade n° 5 (secteur aval : bordures de plateaux et sommet de pente)	203
Tabl. 8.11	- Transferts de masse au sein des sols des terrasses rhodaniennes, d'après l'évolution des éléments grossiers et de la fraction fine	211

CHAPITRE 9

Tabl. 91	- Evolution de la silice totale dans les sols des terrasses rhodaniennes (en SiO_2 % de terre fine)	216
Tabl. 92	- Evolution de la silice combinée (silicates seulement) dans les sols des terrasses rhodaniennes (en SiO_2 % de terre fine)	216
Tabl. 93	- Evolution de l'aluminium total dans les sols des terrasses rhodaniennes (en Al_2O_3 % de terre fine)	217
Tabl. 94	- Evolution du fer total dans les sols des terrasses rhodaniennes (en Fe_2O_3 % de terre fine)	218

Tabl. 95	- Evolution du magnésium total dans les sols des terrasses rhodaniennes (en MgO % de terre fine)	218
Tabl. 96	- Evolution du potassium total dans les sols des terrasses rhodaniennes (en K ₂ O % de terre fine)	219
Tabl. 97	- Teneurs moyennes en constituants chimiques élémentaires des galets calcaires et granitiques des alluvions fluvio-glaciaires rhodaniennes	224
Tabl. 98	- Bilan des pertes possibles en silice totale lors de l'évolution des sols des terrasses rhodaniennes (en SiO ₂ % de la masse globale)	225
Tabl. 99	- Bilan des pertes possibles en silicates lors de l'évolution des sols des terrasses rhodaniennes (en SiO ₂ % de la masse globale)	226
Tabl. 9.10	- Bilan des pertes possibles en aluminium total lors de l'évolution des sols des terrasses rhodaniennes (en Al ₂ O ₃ % de la masse globale)	227
Tabl. 9.11	- Bilan des pertes possibles en fer total lors de l'évolution des sols des terrasses rhodaniennes (en Fe ₂ O ₃ % de la masse globale)	228
Tabl. 9.12	- Bilan des pertes possibles en magnésium total lors de l'évolution des sols des terrasses rhodaniennes (en MgO % de la masse globale)	229
Tabl. 9.13	- Bilan des pertes possibles en potassium total lors de l'évolution des sols des terrasses rhodaniennes (en K ₂ O % de la masse globale)	230

Quatrième partie

CHAPITRE 10

Tabl. 10.1	- Variations du stock d'argile au sein des différents stades évolutifs de la séquence rhodanienne	242
Tabl. 10.2	- Evolution possible des formes du fer dans les sols des terrasses rhodaniennes	256
Tabl. 10.3	- Influence des relations squelette-plasma et fer-argile sur la dynamique du fer dans les sols des terrasses rhodaniennes	258

CHAPITRE 11

Tabl. 11.1	- Succession des différents processus mis en jeu au cours de l'évolution superficielle des terrasses rhodaniennes	268
Tabl. 11.2	- Caractérisation simplifiée des processus d'évolution dans les sols des terrasses rhodaniennes	269
Tabl. 11.3	- Importance relative des principaux phénomènes d'évolution au sein de la séquence rhodanienne	274

CHAPITRE 12

Tabl. 12.1	- Essai d'évaluation de l'épaisseur de matériau nécessaire à la genèse des sols sur les principaux niveaux de terrasses rhodaniennes	292
------------	--	-----

L I S T E D E S P L A N C H E S P H O T O S

- PLANCHE I - Aperçu des organisations micromorphologiques des horizons de surface dans les sols des terrasses rhodaniennes.
- PLANCHE II - Evolution des organisations micromorphologiques dans les horizons B : le milieu des horizons B, niveaux d'altération fonctionnels.
- PLANCHE III - Exemples d'organisations micromorphologiques caractéristiques de certains niveaux dans les sols des terrasses rhodaniennes. Le milieu des horizons B dans les termes fortement rubéfiés et argilifiés.
- PLANCHE IV - Organisations plasmiques dans la partie basale des horizons B.
- PLANCHE V - Types d'individualisation du fer dans les sols rhodaniens en cours de rubéfaction.
- PLANCHE VI - L'amorce des phénomènes de dérubiéfaction des sols rouges. La dissociation des liaisons "fer-argile".
- PLANCHE VII - Quelques formes d'individualisations du fer dans les sols jaunes villafranchiens.
- PLANCHE VIII - Autres aspects des phénomènes de dégradation des sols des terrasses rhodaniennes.
- PLANCHE IX - Genèse du plasma argileux dans les sols rhodaniens dégradés ou en voie de dégradation.
- PLANCHE X - Altération des minéraux. Les minéraux altérables en tant que fournisseurs d'argile ou "structure-donneur".
- PLANCHE XI - Altération des minéraux. Les structures-donneurs (suite) : cas des biotites.
- PLANCHE XII - Altération des minéraux. Exemples de "structures-pièges".

T A B L E D E S M A T I E R E S

Pages

AVANT - PROPOS

INTRODUCTION

Première partie : LE MILIEU RHODANIEN

<u>Chapitre 1</u> : LA MOYENNE VALLEE DU RHONE : Milieu naturel, terrasses fluvio-glaciaires et séquences de sols associées	3
1. Limites du terrain étudié	3
2. Caractéristiques géologiques principales du Bassin Rhodanien moyen et de ses bordures	4
21. Les terrains de bordures du Bassin Rhodanien : zones d'alimentation pour les dépôts alluviaux	4
22. Le Bassin Rhodanien proprement dit : substratum et matériaux de remblaiement	4
23. Présentation générale des terrasses rhodaniennes	8
3. Principaux sites d'étude des terrasses dans la Moyenne Vallée du Rhône	9
31. 1er type de site : les plaines fluvio-glaciaires et fluviatiles rhodaniennes (Bièvre-Valloire et Confluent Rhône-Isère)	11
32. 2ème type de site : les plaines fluviatiles rhodaniennes au contact avec les zones préalpines (Plaines de Crest et de Montélimar)	16
33. 3ème type de site : les zones de contact avec les bordures du Massif Central	16
4. Grands types d'apports alluviaux	17
41. Les apports alluviaux à dominante caillouteuse	17
42. Les recouvrements alluviaux de fin de cycles	18
5. Apports alluviaux caillouteux et sols associés	20
51. Les chronoséquences quaternaires sur alluvions caillouteuses	20
52. Séquence de référence : Les sols des terrasses quaternaires à composante "rhodanienne"	21
6. Conclusions	22
<u>Chapitre 2</u> : CARACTERISATION DES MATERIAUX FLUVIO-GLACIAIRES "RHODANIENS"	24
POSITION DU PROBLEME	25
IMPORTANCE RELATIVE DES FRACTIONS "GROSSIERES" ET TERRE FINE	25
1. Caractérisation des éléments grossiers	26
11. Granulométrie des fractions grossières	26
12. Caractérisation pétrographique des fractions grossières	30
2. Caractérisation de la fraction terre fine	37
21. Granulométrie et caractéristiques physico-chimiques	37
22. Caractérisation minéralogique	39
La fraction sableuse	39
La fraction argileuse	40
3. Nature des minéraux argileux inclus dans les éléments grossiers calcaires	43
4. Conséquences de ces données pour l'étude des sols ; choix des sites-tests	46

<u>Deuxième partie</u> : L'ÉVOLUTION PÉDOLOGIQUE : Présentation et caractérisation des sols des terrasses quaternaires rhodaniennes	49
<u>Chapitre 3</u> : PREMIERE PHASE D'ÉVOLUTION : Les sols des basses terrasses (stade 1)	51
1. Grands traits morphologiques de cette première phase d'évolution	51
11. Traits essentiels de la morphologie des profils pédologiques	51
12. Grands traits micromorphologiques	52
2. Etude des constituants principaux de ces organisations	53
21. Les transformations des éléments grossiers et du squelette moyen : aspects micromorphologiques	53
22. La genèse du plasma argileux et l'évolution de son organisation	58
23. Evolution relative des éléments grossiers et de la fraction "terre fine"	59
3. Caractérisation de la fraction terre fine	60
31. Caractéristiques physico-chimiques globales	60
32. Evolution de la fraction argileuse	63
33. Evolution du fer, de la silice et de l'aluminium	64
4. Conclusions : Points importants de cette première phase d'évolution	70
<u>Chapitre 4</u> : DEUXIEME PHASE D'ÉVOLUTION : Les sols des moyens et des hauts niveaux de terrasses (stades 2 et 3)	73
1. Caractères spécifiques de l'organisation des profils pédologiques	73
11. Développement des profils et individualisation d'horizons caractéristiques	73
12. Etude microscopique des organisations de cette phase évolutive	77
Stade 2	77
Stade 3	81
Conclusions	86
2. Altération des cailloutis : Aspects essentiels et essai de quantification du phénomène de désagrégation	88
21. Evolution des principaux types de cailloutis	88
22. Désagrégation physique des éléments cristallins : production de graviers et de terre fine	90
3. Caractéristiques du résidu d'altération : la fraction terre fine	91
31. Caractéristiques physico-chimiques globales	91
32. Evolution de la fraction argileuse	94
33. Evolution du fer, de l'aluminium et de la silice	98
4. Conclusions concernant cette phase évolutive	106
<u>Chapitre 5</u> : PHASE DE TRANSITION : Les sols des très hautes terrasses (stade 4)	109
1. Changements d'organisation des profils par rapport aux sols rouges des stades précédents	109
11. Morphologie des sols des très hautes terrasses	109
12. Données micromorphologiques	110
2. Traits essentiels jalonnant la progression des processus d'évolution	117
- confirmations	117
- éléments nouveaux : amorce d'une orientation évolutive nouvelle	119
3. Principales caractéristiques physico-chimiques	120
31. Fragmentation des éléments grossiers : évolution des graviers et de la terre fine	120
32. Caractérisation analytique de la fraction terre fine	122
4. Conclusions relatives à cette phase de transition	124

Chapitre 6 : PHASE ULTIME D'EVOLUTION : Les sols des niveaux villafranchiens (stade 5)	127
1. Caractères spécifiques de l'organisation des sols au cours de ces derniers stades évolutifs	127
11. Aspects morphologiques ; sols en voie de dérubiéfaction et sols jaunes	127
12. Caractéristiques micromorphologiques	131
13. Enseignements de l'étude morphologique	137
2. Caractéristiques analytiques de ces stades d'évolution	140
21. Evolution des fractions grossières et production de terre fine	140
22. Caractérisation analytique de la fraction "terre fine"	142
23. Evolution minéralogique de la fraction argileuse	144
24. Evolution du fer, de l'aluminium et de la silice	150
3. Conclusions sur cette phase ultime d'évolution	158
Chapitre 7 : SYNTHESE DES OBSERVATIONS MORPHOLOGIQUES ET ENCHAINEMENT DES PHENOMENES AU COURS DU TEMPS	161
1. Evolution du squelette ; place des phénomènes de dissolution, d'altération et de fragmentation	161
11. Evolution des éléments grossiers caillouteux	162
12. Place de l'évolution des galets dans la dynamique de formation des sols	163
13. Conséquences et conclusions	165
2. Evolution de la matrice : les diverses facettes de l'organisation plasmique	166
21. Genèse, évolution et transformation plasmique	167
22. Place de l'évolution de la matrice dans la dynamique de la formation des terrasses rhodaniennes	168
3. Conclusions	170
Troisième partie : ESSAIS DE QUANTIFICATION DES PHENOMENES D'EVOLUTION	171
Chapitre 8 : TENTATIVES DE QUANTIFICATION DE L'EVOLUTION GRANULOMETRIQUE, Transformations et redistributions.	175
A- Traits généraux des transferts de masse	175
1. Evolution des éléments grossiers caillouteux	175
2. Evolution de la fraction graveleuse	178
3. Evolution de la fraction "terre fine"	181
B- Evaluation quantitative des transferts de matière	185
Choix d'un invariant	185
4. Raisonnement isoquartzite et évolution réelle des éléments grossiers caillouteux et graveleux	186
5. Bilan de la production de terre fine	189
51. Méthode et but recherché	189
a) Principes et bases de calculs	189
b) Types de calculs effectués	190
52. Développement des calculs sur un exemple	192
53. Application générale à l'ensemble des sols de la séquence étudiée	205
6. Conclusions d'ensemble concernant les pertes et les transferts de terre fine	205
61. Evolution de la terre fine dans les sols développés sur matériau à composante rhodanienne moyenne	205
62. Evolution de la terre fine dans quelques cas particuliers, Influences de la composante originelle, de la situation morphologique, des actions anthropiques	209
63. Principaux transferts conduisant à la phase résiduelle. Sens et significations	212

<u>Chapitre 9</u> : EVALUATION QUANTITATIVE DES TRANSFERTS GEOCHIMIQUES	215
1. Evolution comparée des éléments chimiques majeurs au cours des principaux stades d'évolution (Terre fine)	215
2. Essai d'établissement d'un bilan chimique réel pour quelques éléments chimiques,	220
21. Présentation de la méthode utilisée	220
22. Présentation des résultats	224
3. Types d'évolution observées	237
<u>Quatrième partie</u> : INTERPRETATIONS GENERALES	237
<u>Chapitre 10</u> : LE SYSTEME "ARGILE-FER" ET SON EVOLUTION DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES	239
A- Evolution des argiles	239
1. Les phénomènes d'argilisation	239
2. Evolution minéralogique des argiles	243
3. Genèse des argiles et évolution des minéraux dans les sols des terrasses	244
31. Héritage	245
32. Transformations et néoformations	245
4. Conclusions	248
B- Comportement du fer au cours de l'évolution	249
1. Origines et sources du fer, Sens des transferts	249
2. Evolution et dynamique comparée des formes du fer	251
3. Etat des relations fer-argiles,	254
4. Problèmes de la caractérisation des formes du fer	255
5. Conclusions sur la dynamique globale et le comportement du fer	257
<u>Chapitre 11</u> : BILAN DE L'EVOLUTION PEDOLOGIQUE DANS LES TERRASSES RHODANIENNES, Grandes phases d'évolution, Mécanismes mis en jeu, Modalités de leur propagation,	261
1. Grandes phases de l'évolution pédologique dans les terrasses rhodaniennes	261
11. Déclenchement des processus rubéfiants	261
12. Phase de développement maximum des processus d'altération rubéfiante	262
13. Phase de transition : l'amorce des phénomènes de dégradation,	263
14. Phase majeure de dégradation et de dérubeffaction	266
15. Conclusions : Présentation d'un modèle de formation des sols de terrasses	267
2. Traits géochimiques caractéristiques de la pédogenèse sur formation fluvio-glaciaire	267
3. Mécanismes responsables des transformations dans les sols des terrasses rhodaniennes, Leurs interventions au cours des processus d'évolution	272
31. Phénomènes de désagrégation physique et d'altération chimique des éléments cristallins	273
32. Phénomènes d'illuviation au cours de la genèse des sols de terrasses et leur place vis à vis des processus d'altération	273
33. Phénomènes de fragmentation mécanique	275
4. Modalités de propagation de l'évolution pédologique dans les sols des terrasses rhodaniennes	276
<u>Chapitre 12</u> : ENSEIGNEMENTS DE L'ETUDE DES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES	283
A- Enseignements pour le genèse des sols	283
1. Comparaison des sols étudiés avec d'autres sols fersiallitiques	283
11. Comparaison avec d'autres séquences sur matériaux alluviaux	283
12. Comparaison avec les sols fersiallitiques observés sur roches en place	284

2. Feriallisation et sols feriallitiques	286
21. Conditions de développement du processus feriallitique	286
22. Concept de sols feriallitiques	287
3. Dégradation des sols feriallitiques. Problème des ultisols	289
B- Enseignements pour une meilleure compréhension des phénomènes quaternaires	290
4. Sols des terrasses rhodaniennes et altérations quaternaires	290
5. Les résultats des altérations ; conséquences sur la morphologie régionale	291
6. Altération et tassement des matériaux ; conséquences sur l'altitude des terrasses quaternaires	292

CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIE

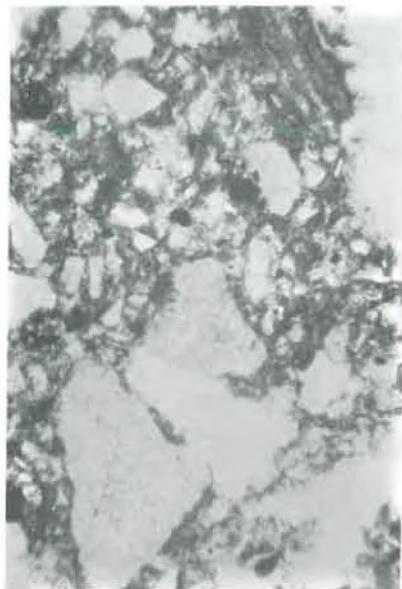
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

ANNEXES : PLANCHES PHOTOS

TABLE DES MATIERES

PLANCHES PHOTOS

APERÇU DES ORGANISATIONS MICROMORPHOLOGIQUES DES HORIZONS DE SURFACE DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES



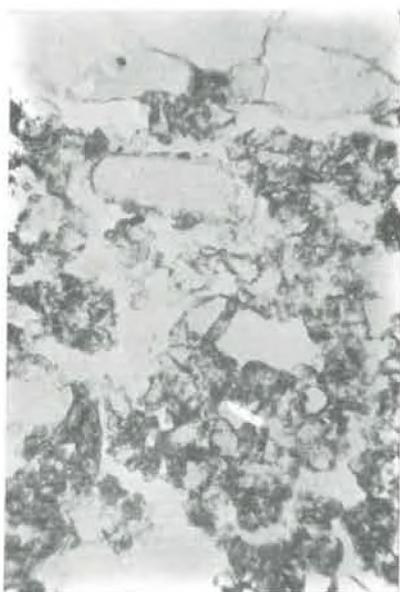
1,0 mm. 1 L.N.



1,0 mm. 2 L.P.

Photos 1 et 2

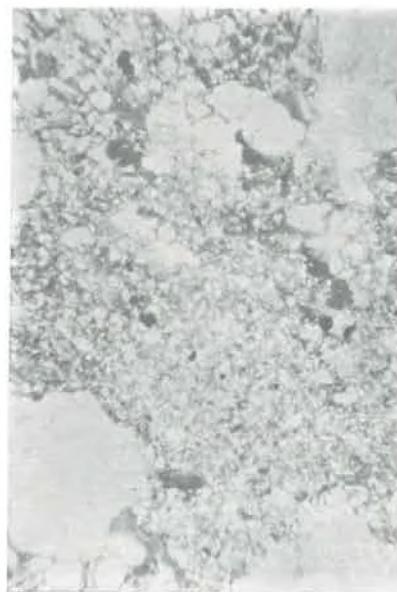
Horizon A₁ des sols des basses terrasses (stade n° 1). Nette dominance du squelette sur le plasma. Squelette sablo-limoneux grossier présentant encore de nombreux minéraux altérables. Aléuro-plasma flocculeux en voie de développement toujours associé aux minéraux altérables du squelette.



0,5 mm. L.N.

Photo 3

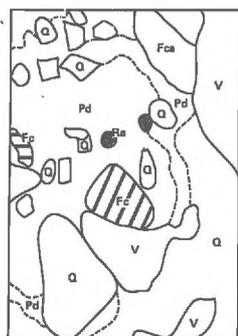
Horizon A₁ des sols des très hautes terrasses (stade n° 4). Squelette sablo-limoneux quartzéux toujours très nettement dominant associé ici à des recouvrements discontinus de matière organique. Plasma argileux pratiquement absent parce qu'entièrement entrainé en profondeur ou dans les horizons B.



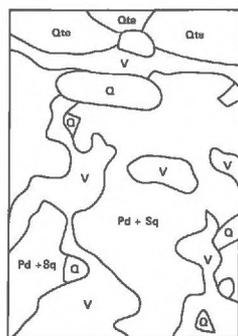
1,0 mm. L.N.

Photo 4

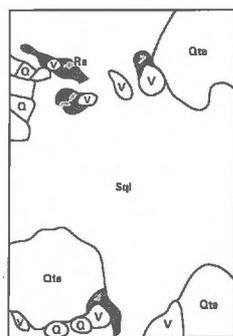
Base de l'horizon A₂ des sols des très hautes terrasses (stade n° 4). La fragmentation des éléments siliceux (quartzite, quartz et blocs) aboutit dans ces niveaux à un affinement très net du squelette par rapport au stade 1 ; il se rassemble en lamelles dans des fissures. Le plasma argileux est en voie de disparition complète (approfondissement du A₂) ; seuls subsistent encore quelques revêtements argileux bien orientés.



1 - 2



3

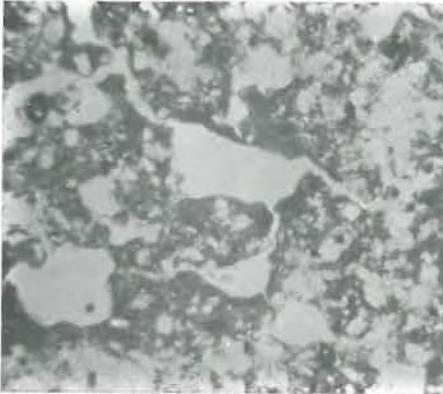


4

- Q Quartz
- Qte Quartzite
- V Vides
- Pd Plasma diffus
- Fe Feldspath calcé-rodrique
- Fca Feldspath en voie d'altération
- Pd + Sq Plasma diffus (M. org.) avec squelette quartzéux
- Sqj Squelette limoneux quartzéux
- Ra Revêtements argileux orientés

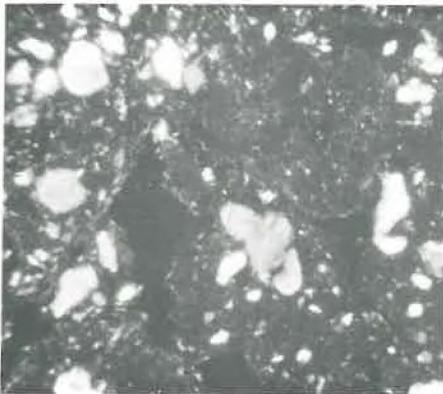
ÉVOLUTION DES DANS LES HORIZONS

Le milieu des hor



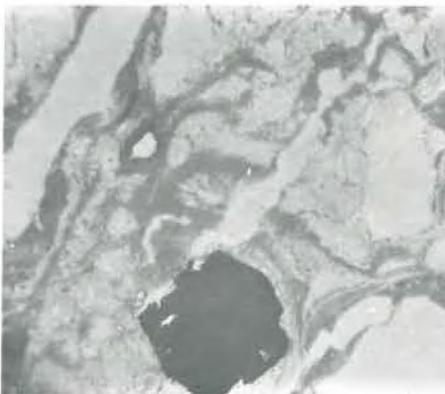
5

Stade n° 1 : Simultanéité des phénomènes d



7

Sta



2,0 mm.

Photo 9

Stade 2 : L'altération progresse et le plasma argileux tend à colmater les vides (orientation).

EXEMPLES D'ORGANISATIONS MICROMORPHOLOGIQUES
 CARACTÉRISTIQUES DE CERTAINS NIVEAUX
 DANS LES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES

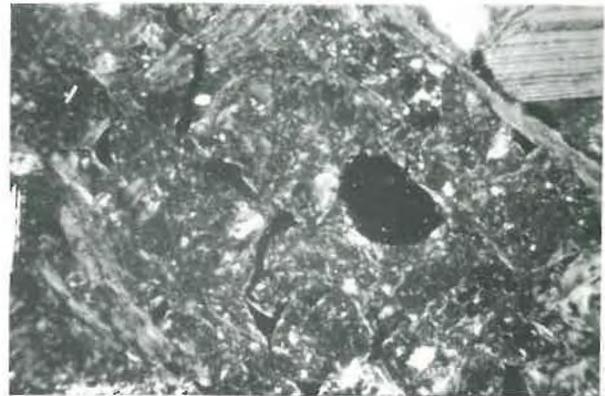
Le milieu des horizons B dans les termes fortement rubéfiés et argiliés



1,0 mm. L.P.

Photo 11

Stade 3 : Plasma d'alévation et de lessivage occupent une place équivalente et se chargent fortement en fer.



2,0 mm. L.P.

Photo 12

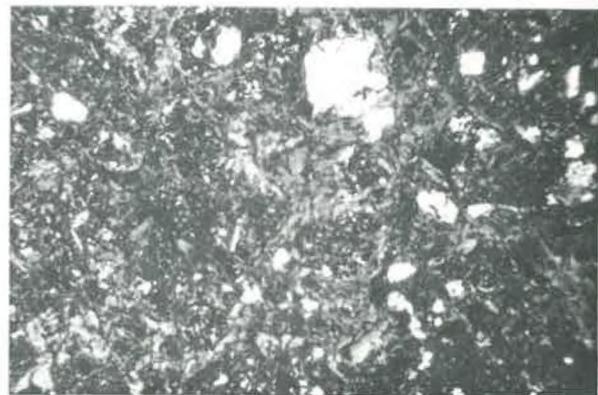
Stade 2 : Le plasma envahit les espaces entre les cailloux et prend une orientation de type bi-maséptique.



2,0 mm. L.P.

Photo 13

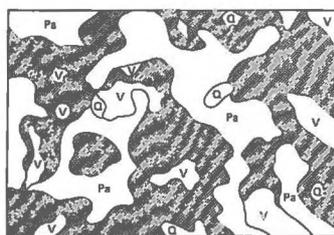
Stade 2 : Des phénomènes de contacts continus peuvent apparaître dès ces stades le long des faces des éléments grossiers (phénomènes de gonflement et de pression).



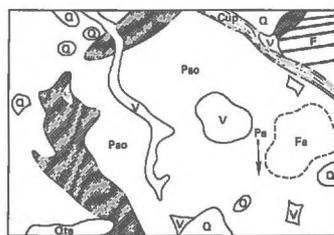
2,0 mm. L.P.

Photo 14

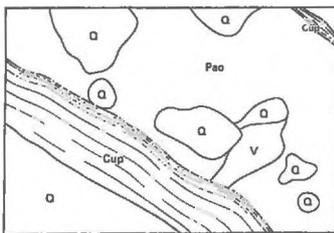
Stade 3 : Importance des phénomènes de brassage et de remaniement dans les termes fortement argiliés (argile gonflante) : cutanes recoupés, organisations plasmiques omniséptiques.



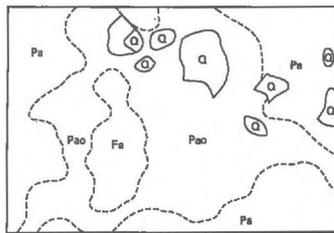
11



12



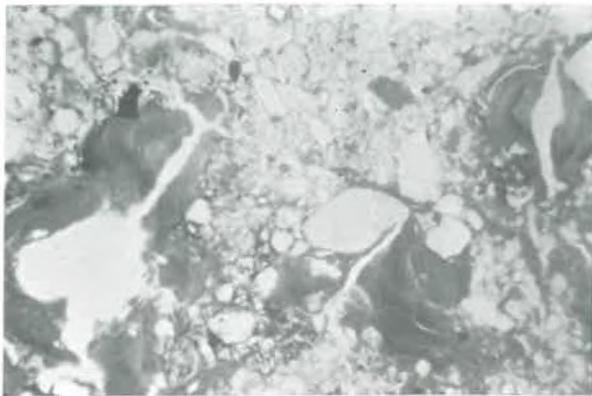
13



14

- Q Quartz
- Qte Quartzite
- V Vaseux
- Plasma illuvial fortement coloré et chargé en fer à ses cutanes souvent recoupés
- Pa Plasma d'alévation
- Cup Cutanes de pression
- F Feldspath plagioclase
- Fa Feldspath en voie d'altération
- Pao Plasma omniséptique

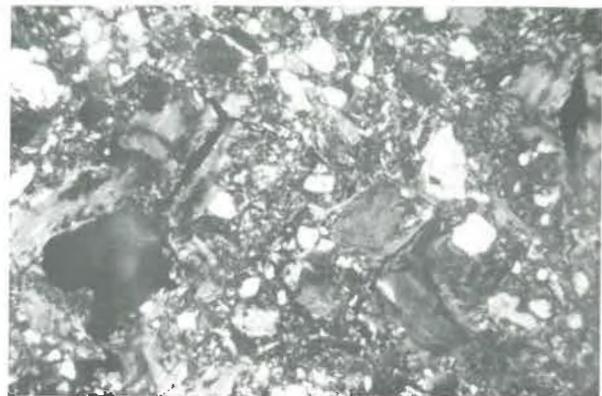
ORGANISATIONS PLASMIQUES DANS LA PARTIE BASALE
DES HORIZONS B DES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES



2,0 mm.

15

L.N.



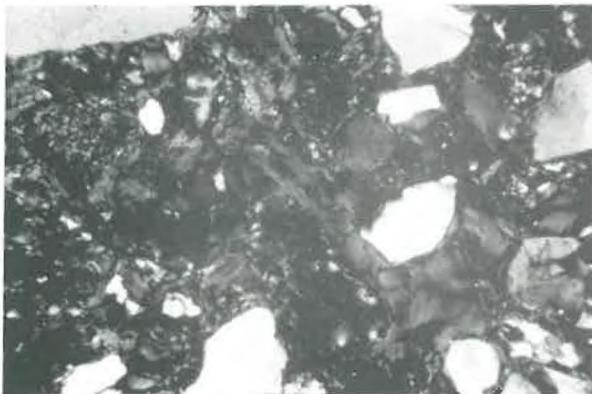
2,0 mm.

16

L.P.

Photos 15 et 16

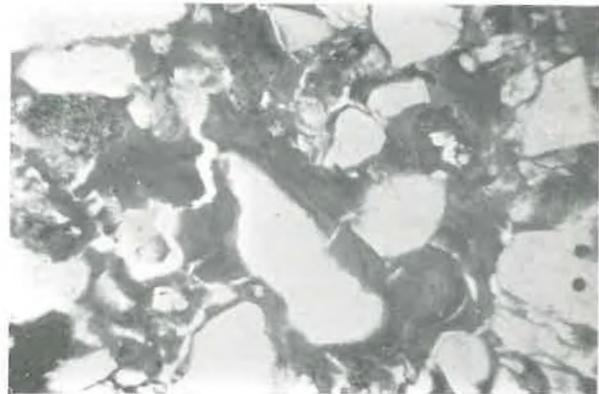
Stade 2 : Phénomènes d'altération et d'illuviation, Migrations préférentielles de l'argile dans les pores de grandes dimensions qu'elle tend à colmater progressivement (approfondissement des sols par la base des profils : dynamique de soutirage ...).



0,5 mm.

17

L.N.



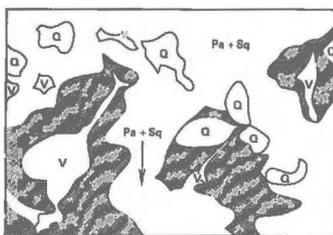
0,5 mm.

18

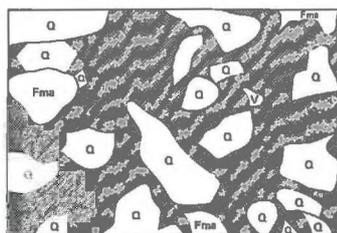
L.P.

Photos 17 et 18

Stade 3 : On retrouve ces mêmes structures de transit dans les parties basales des horizons B des sols encore plus évolués (assemblage de type Inter-texture) où l'argile d'illuviation tend alors à envahir l'ensemble des porosités existantes (colmatage progressif).



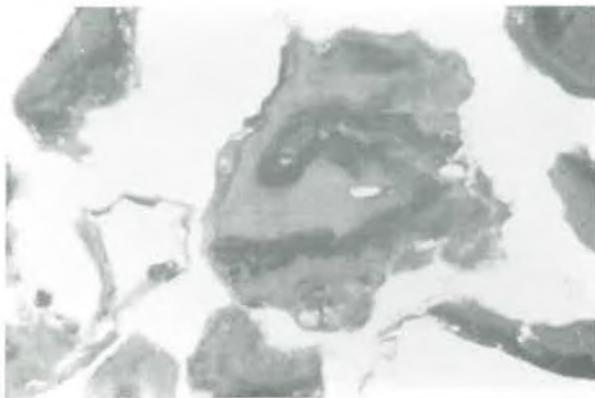
15 - 16



17 - 18

- Q Quartz
- Sq Squelette quartzéux
- V Vides
- Revetement argileux (Plasmé d'illuviation) bien orientés
- Pa Alitroplasma agglomératif
- Fma Biote et amphiboles en voie d'argillisation

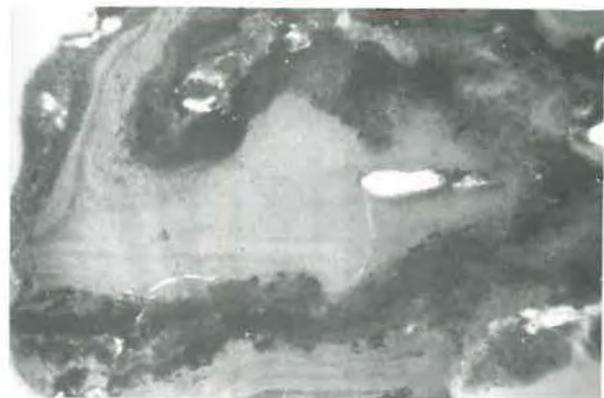
TYPES D'INDIVIDUALISATIONS DU FER DANS LES SOLS RHODANIENS EN COURS DE RUBÉFACTION



2,0 mm.

19

L.N.



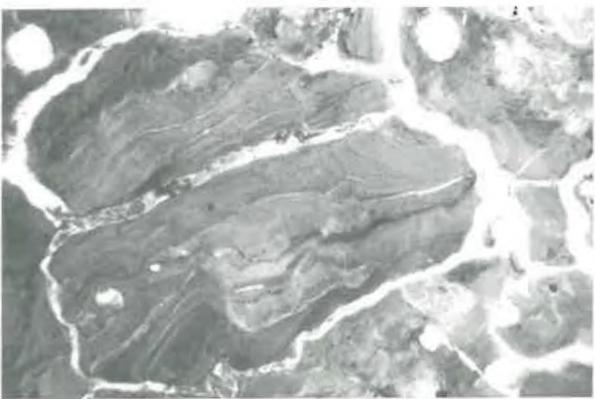
1,0 mm.

20

L.N.

Photos 19 et 20

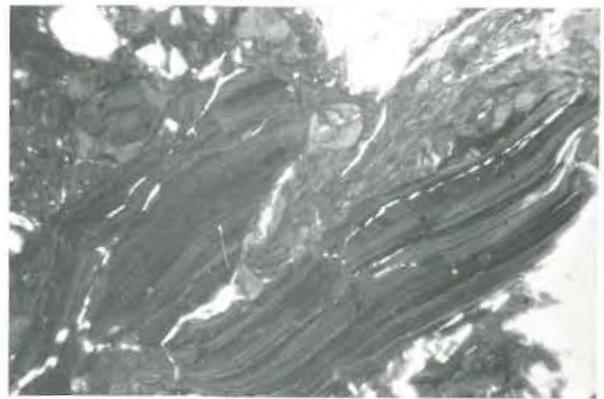
Stade 2 : Dès les stades récents apparaît au sein du plasma argileux pourtant fortement coloré des amas diffus d'hydroxyde de fer (sursaturation en fer des argiles).



0,5 mm.

21

L.N.



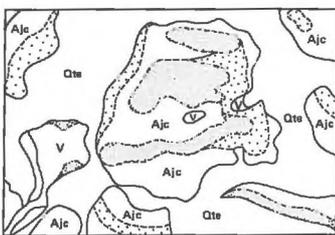
1,0 mm.

22

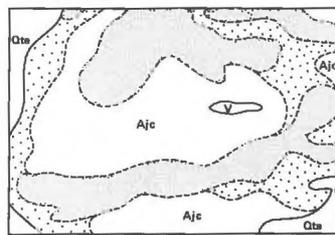
L.N.

Photos 21 et 22

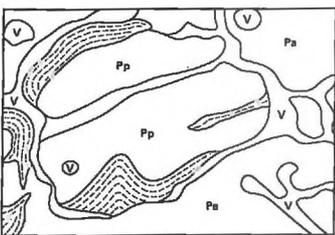
Stade 3 : Le phénomène se maintient dans les termes plus évolués où l'on observe des formes plus régulièrement orientées (avec bandes alternées d'argile jaune et brune). Mais l'individualisation du fer paraît ensuite se stabiliser et évoluer assez peu (microscopie optique).



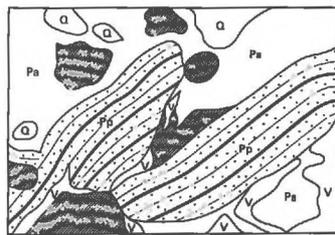
19



20



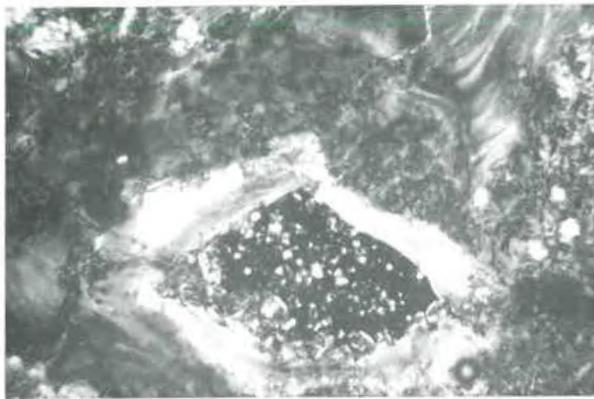
21



22

- Q Quartz
- Qte Quartzite
- V Vides
- Ajc Plasma argileux déjà coloré et chargé en fer (jaune orangé)
- a Amas d'hydroxyde de fer de milieu en milieu (à-dit isolés)
- b ■■■■■ Amas d'hydroxyde de fer orientés ou en cours d'orientation
- Argile jaune (limonite (plus récente))
- Pp Popules sombres d'argiles rouges fortement chargées en fer et souvent recoupées
- Pa Plasma argileux d'altération

L'AMORCE DES PHÉNOMÈNES DE DÉRUBÉFACATION DES SOLS ROUGES.
LA DISSOCIATION DES LIAISONS " FER - ARGILE "



1,0 mm.

L.P.

Photo 23

Amorce des phénomènes de dérubiéfaction au sein des sols très rubéfiés, fortement argiliés et colmatés (stade 4) : sommet horizon E₁.

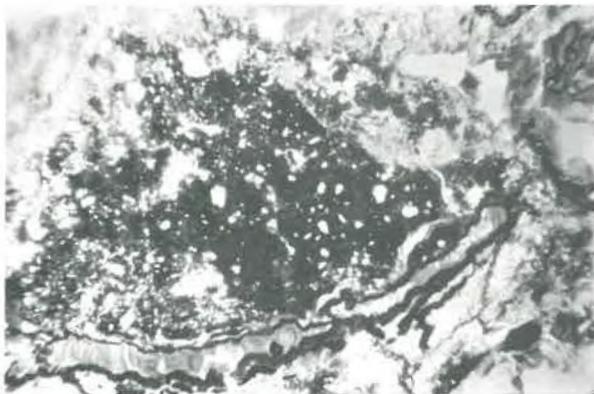


0,3 mm.

L.P.

Photo 24

Revêtements argileux en voie de dérubiéfaction partielle. Aspect transitoire avant la constitution d'argiles rubanées. (Stade 5 en voie de dérubiéfaction : horizon E_{21g}).

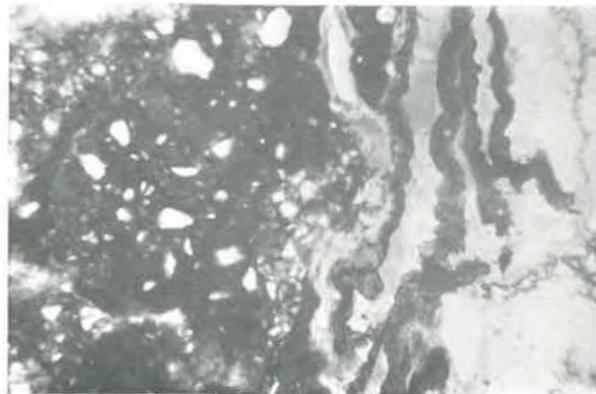


0,5 mm.

L.N.

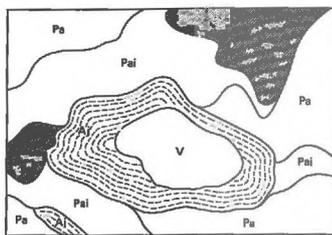
Photos 25 et 26

Dérubiéfaction complète le long de certaines fissures : dissociation partielle des liaisons fer-argile. Le fer qui exsude des minéraux argileux reste sur place. Apparition d'argiles zonées et rubanées (stade 5 en voie de dérubiéfaction : horizon E_{21g}).

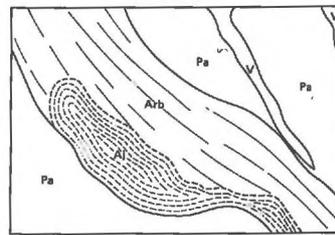


0,2 mm.

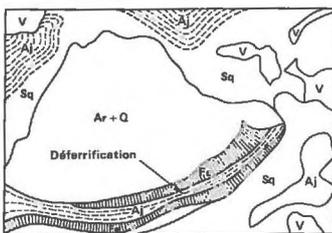
L.N.



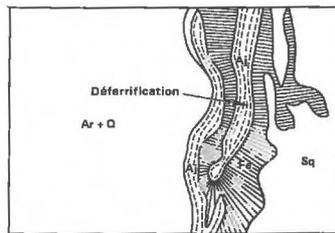
23



24



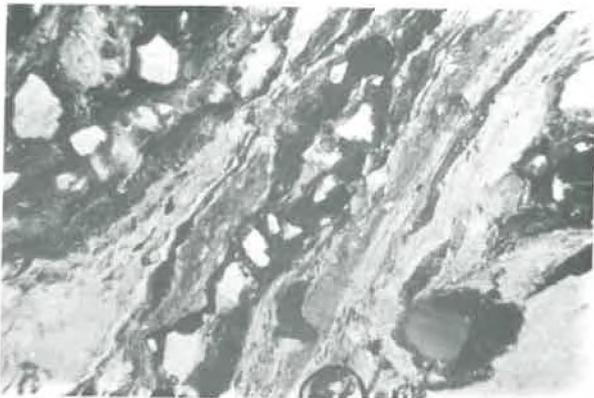
25



26

- Q Quartz
- Sq Squelette quartzeux
- V Vides
- Aj Argile jaune incomplètement déferriéfiée provenant du sommet des horizons B
- Argile d'illuviation ancienne fortement colorée (rouge violacé) et riche en fer
- Pai Plasmis intra-illuvial riche en fer
- Pa Plasmis d'altération
- Arb Argile rubanée en voie de déferriéfaction
- Argile jaune en voie de déferriéfaction avec individualisation du fer (Fe) arg. rubrés
- Ar Argile rouge en voie de déferriéfaction

QUELQUES FORMES D'INDIVIDUALISATIONS DU FER
DANS LES SOLS JAUNES VILAFRANCHIENS

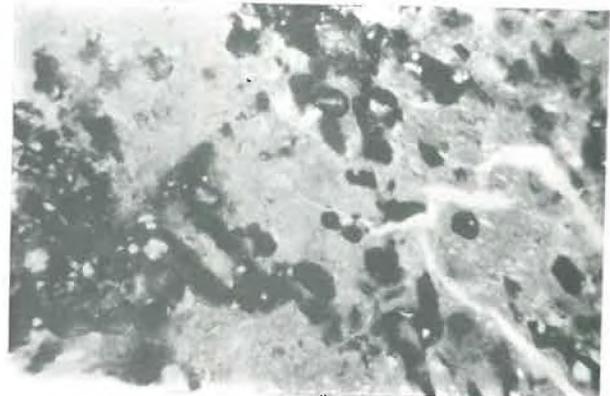


1,0 mm.

L.N.

Photo 27

Argilans déferfifiés, décolorés à côté de zones brunâtres où le fer commence à se concentrer (stade 5 : horizon B₂₂₈ des sols jaunes).

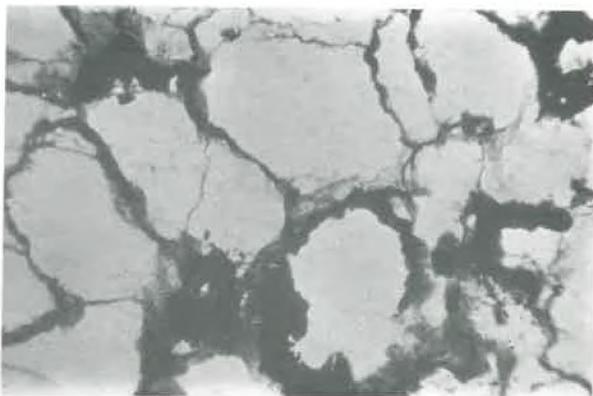


0,5 mm.

L.N.

Photo 28

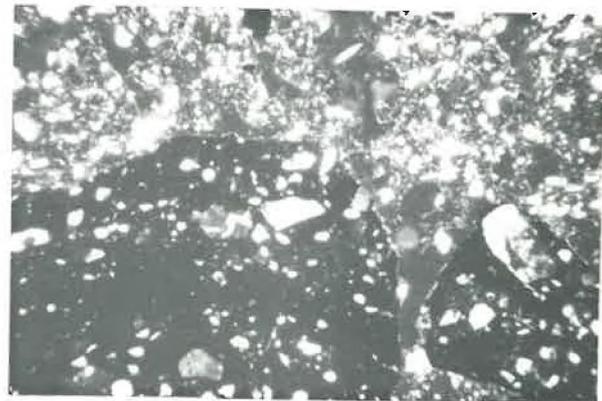
L'individualisation du fer se poursuit par la constitution d'amas diffus qui grossissent progressivement (horizon B_{1g} des sols jaunes stade 5).



0,3 mm.

29

L.N.



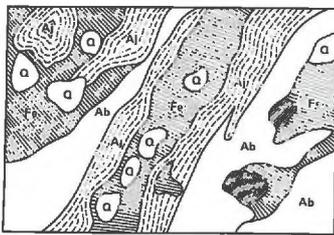
0,5 mm.

30

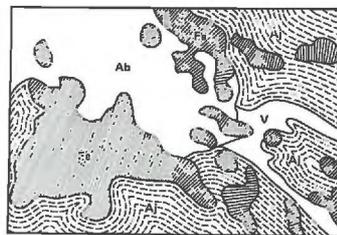
L.P.

Photos 29 et 30

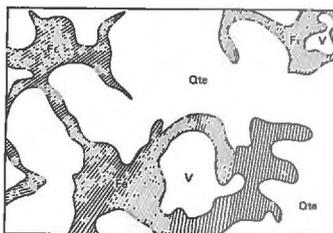
Horizon A₁ des sols jaunes. Les phénomènes de redistribution du fer sont encore plus nets dans les horizons de surface des sols jaunes : constitution de véritables concrétions ou nodules ferrugineux (29) au sein même du squelette ou mise en réserve et accumulation du fer dans les pores des éléments grossiers siliceux (30).



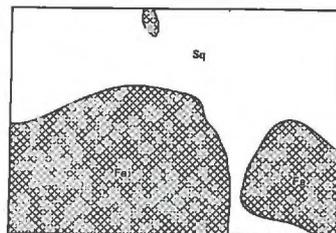
27



28



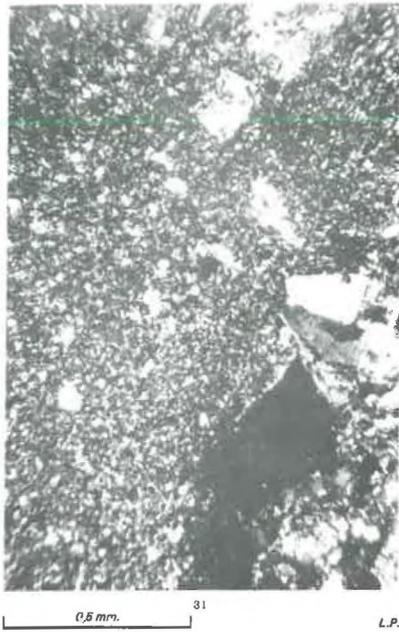
29



30

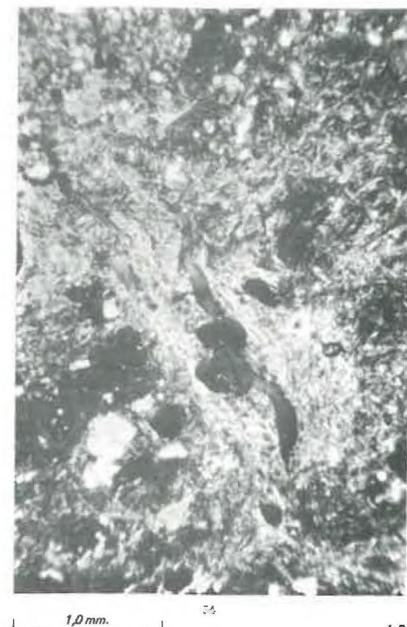
- Q Quartz
- Qte Quartzite
- Sq Squelette quartziteux
- V Vides
- Aj Argile jaune en voie de déferfification
- Ab Argile blanche complètement déferfifiée
- Amas d'hydroxydes de fer en cours d'individualisation
- Massifs argileux, papules
- Nodules et concrétions ferrugineux

AUTRES ASPECTS DES PHÉNOMÈNES DE DÉGRADATION
DES SOLS DES TERRASSES RHODANIENNES



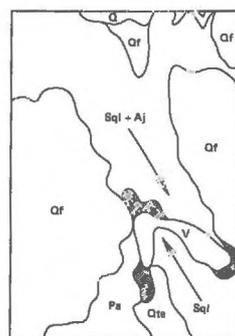
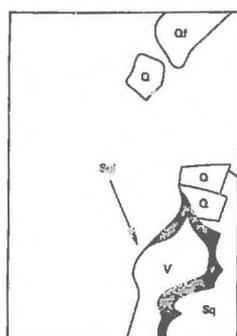
Photos 31 et 32

Langues limoneuses de dégradation, A la partie supérieure des horizons B, dans les stades d'évolution n° 4, l'altération des éléments feldspathiques résiduels et la fragmentation des éléments siliceux (grains et pavillins) aboutissent à un affinement général du squelette. Ces éléments viennent migrer dans les pores et fissures, ils constituent des langues décolorées. Le squelette quartzique y domine, le plasma argileux s'élimine progressivement par simple entraînement mécanique.



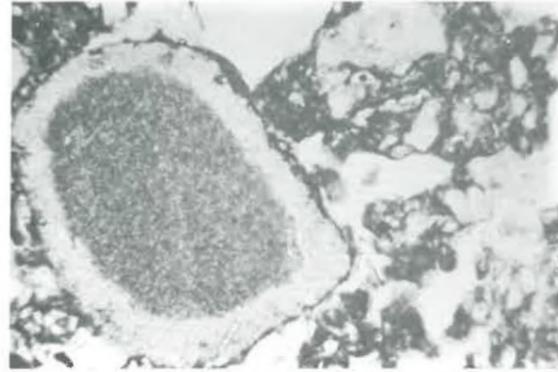
Photos 33 et 34

Argiles déferriées. Dans les horizons Bggg des sols jaunes, le plasma argileux totalement déferrié (argile blanche fortement biréfringente) migre dans les pores et les fissures : mécanisme de dégradation des horizons B et d'approfondissement des horizons de surface par pénétration en langues subverticales dans ces horizons.



- Q Quartz
- Qf Quartz en voie de fragmentation
- Sq Squelette quartzique grossier
- Sqj Squelette limoneux (squelette) dominant avec plasma jaunâtre en inclusion Aj (entraîné avec les éléments du squelette)
- V Vides
- a Revêtement argileux coloré (a)
- b Incolore et déferrié (b)
- Concrétions ferrugineuses
- Pa Plasma argileux d'altération
- Aj Argile jaune en voie de déferrié
- Ab Argile blanche complètement déferriée

ALTÉRATION DES MINÉRAUX
Les minéraux altérables en tant que fournisseurs
d'argile " structure donneur "



2,0 mm.

L.N.

Photo 41

Grès calcareux en voie de décalcification ; améiote de décarbonatation et caudation d'argile silicicelle.

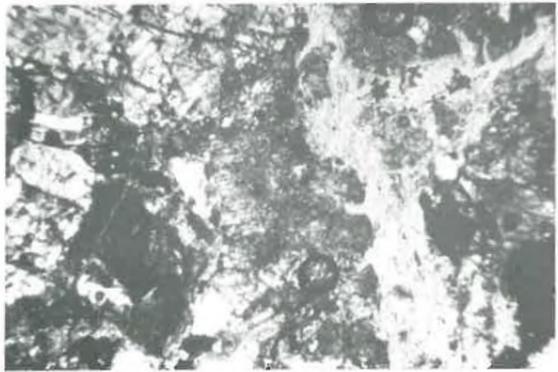


1,0 mm.

L.P.

Photo 42

Feldspath (oligoclase) en cours de micritisation.

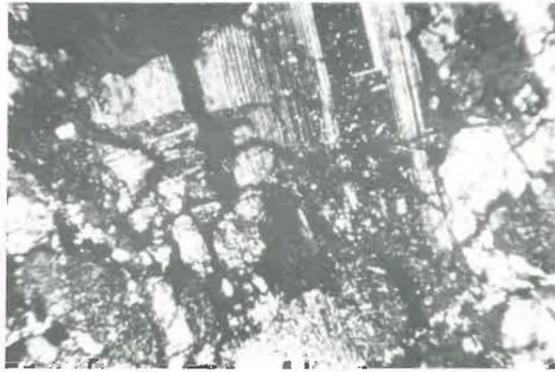


1,0 mm.

L.P.

Photo 43

Altération in situ des feldspaths avec argillification progressive (genèse d'un plasma blanchâtre).



1,0 mm.

L.P.

Photo 44

Altération d'un microcline avec tendance à la fragmentation progressive en petits éléments.

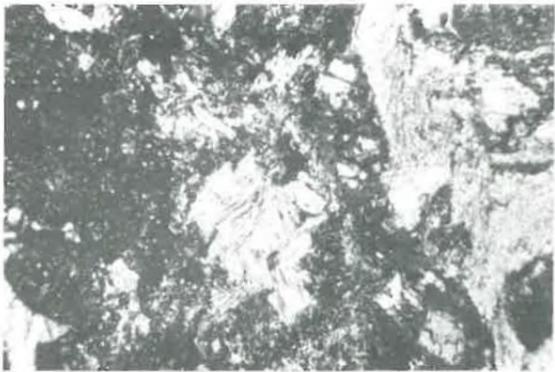


0,5 mm.

L.N.

Photo 45

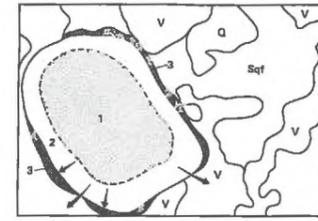
Altération-plasmation d'éléments feldspathiques et micaés donnant naissance à une argile jaunâtre qui migre dans les fissures dès sa production.



0,5 mm.

L.P.

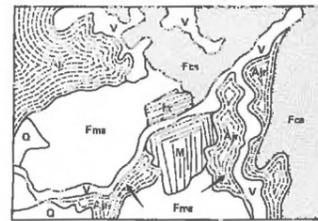
Photo 46



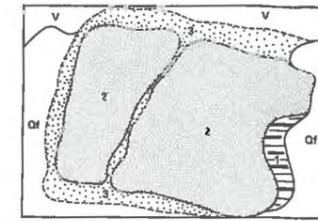
41



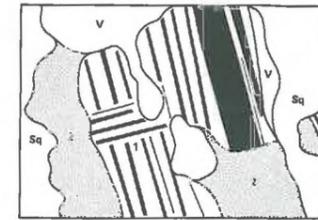
43



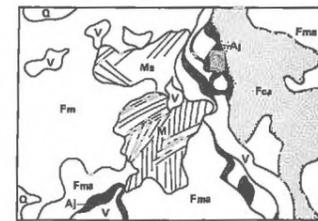
45



42



44



46

- Q Quartz
- Sqf Squelette quartzifère avec plasma d'argillification améiote à intratitrique peu abondant
- V Vides
- 1 Grès calcareux
- 2 Améiote de décalcification
- 3 Plasma réticulé argileux encroûte les calcéites (argile de dissolution des carbonates)

- V Vides
- 1 Feldspath
- 2 Fond matriciel d'altération des feldspaths
- 3 Argile jaune issue de l'altération des feldspaths
- Fma Fond matriciel d'altération issu d'un minéral ferro-magnésien (Mottis ferruginos)

- Q Quartz
- V Vides
- M Micas muscovite encore peu altérés
- Fca Feldspath en voie d'altération (incomplètement argillifié)
- Fma Fond matriciel d'altération des feldspaths (argillification plus avancée)
- Ajr Fond matriciel argileux déjà coloré par le fer

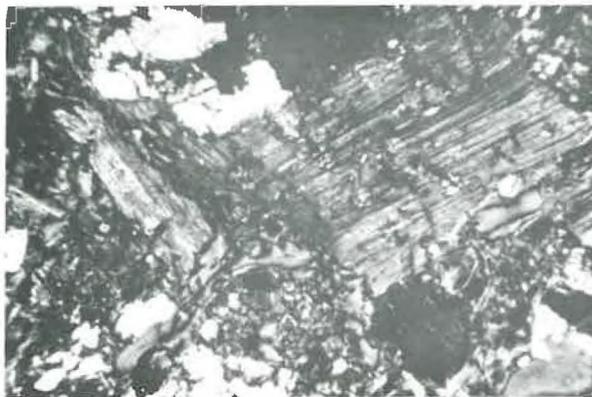
- Qf Quartz en fragmentation
- V Vides
- 1 Feldspath oligoclase en voie d'altération. Fragments intacts
- 2 Feldspath en microdivision (Oligoclase)
- 3 Fractions désagrégées

- Sq Squelette quartzifère
- V Vides
- 1 Feldspath (microcline) en voie d'altération par microdivision et fluoration
- 2 Zone très altérée (micritisation) et microdivision

- Q Quartz
- V Vides
- M Micas (muscovite) peu altérés
- Ma Micas en voie d'altération
- Fca Feldspath en voie d'altération
- Fma Fond matriciel d'altération des feldspaths
- Argile jaune en voie de mobilisation dans les fissures
- Fm Fond matriciel peu orienté mais fortement coloré par le fer

ALTÉRATION DES MINÉRAUX

Les structures donneurs (suite) : cas des biotites



0,5 mm.

47

L.P.



0,5 mm.

48

L.P.

Photo 47 et 48

Biotite en voie d'ouverture irrégulièrement altérée (47) avec production d'argile fortement colorée,



0,3 mm.

Photo 49

Phénomènes d'exsudation du fer et d'ouverture des micas. L'altération progresse : argilisation sur plans par transformation.

L.N.

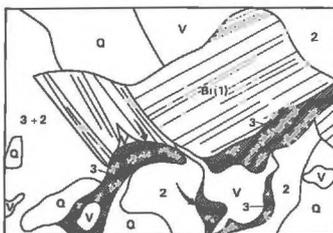


0,5 mm.

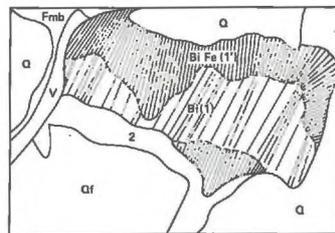
Photo 50

Ferruginisation des biotites qui s'entourent d'une pellicule protectrice (altération ne progresse plus, fer bloqué).

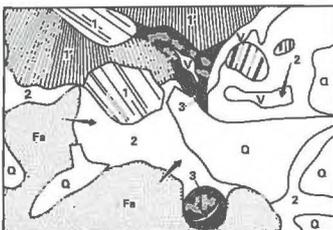
L.N.



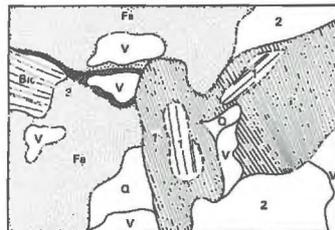
47



48



49

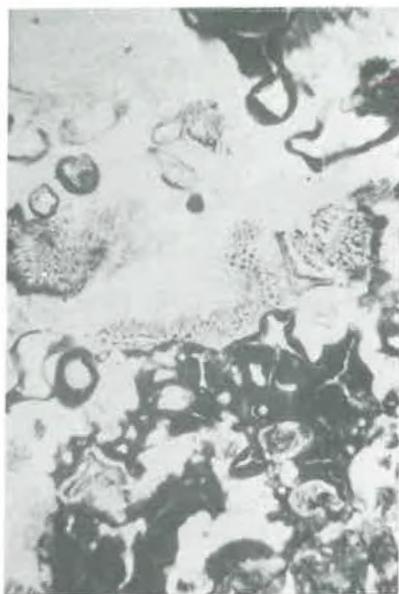


50

- Q Quartz
- Qf Quartz fragmentés
- V Végots
- Bi Biotite en voie d'ouverture (1) et ferruginisée (1')
- 2 Fond matriciel d'altération des biotites
- 3 Revêtements (argiles de) orientés ou en voie d'orientation
- Fa Feldspath altéré
- Bic Biotite chloritisée

ALTÉRATION DES MINÉRAUX

Exemples de structures pièges



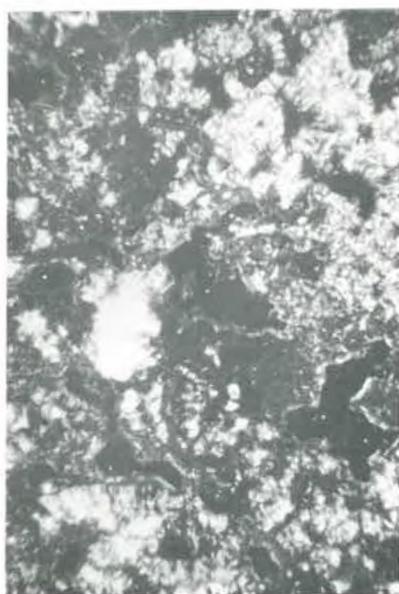
2,0 mm. 51 L.N.



2,0 mm. 52 L.P.

Photo 51 et 52

Silex piégeant des argiles fortement rubéfiées et colorées par le fer dans les horizons B₁ des sols des terrasses mindéliennes.



2,0 mm. 53 L.P.

Photo 53

Silex piège à argile peu rubéfiée (horizons B des terrasses risiennes).



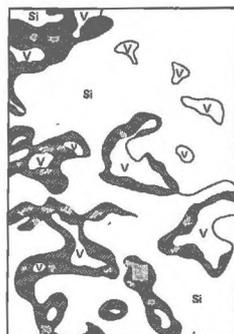
1,0 mm. 54 L.P.

Photo 54

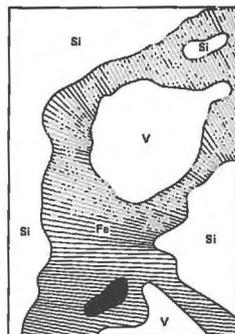
Silex piège à fer dans les horizons B des sols mindéliens.



51 - 52



53



54

- V Vides
- Si Silex
- Argile rouge plus ou moins fortement ferrugineuse piégée dans les pores des silex
- Fe Amas d'hydroxyde de fer piégé dans les pores des silex