

LES ANDOSOLS
ETAT DES CONNAISSANCES
PROBLEMATIQUE

Paul QUANTIN

LES ANDOSOLS, ETAT DES CONNAISSANCES, PROBLEMATIQUE

P. QUANTIN

I. INTRODUCTION

1. Les Andosols ont été reconnus et caractérisés tout d'abord au Japon par des pédologues américains. Le néologisme "Ando" signifie sol noir. Il caractérise des sols appelés localement Kuroboku, de couleur noire, riches en matière organique humifiée, acides, et dérivant de cendres volcaniques. Ces sols se distinguent des sols noirs de steppe, tchernozems, par leur caractère acide et leur fraction argileuse non cristalline. Le grand-groupe des Andosols a été introduit dans la Classification des Sols Américaine en 1949 par Thorp et Smith. Il est devenu le sous-ordre des Andepts dans la 7ème Approximation de la Soil Taxonomy en 1960. La classe des Andosols est apparue seulement en 1967 dans la Classification des Sols Française (CPCS). L'unité Andosols a été ensuite reconnue, en 1968, dans la Légende des Unités de Sols du Monde (FAO - UNESCO). En 1978-79, G. Smith puis le groupe ICOMAND (International Committee on the Classification of Andisols, pour la révision de la Soil Taxonomy), ont proposé de créer un ordre spécifique, les Andisols.

C'est dire l'originalité, reconnue mondialement, des Andisols. Duchaufour, en 1977, a proposé un processus d'andosolisation, pour expliquer la genèse particulière de ces sols.

2. Au cours des années 50 et 60, les nombreuses études effectuées au Japon, en Nouvelle Zélande, à Hawaï, puis en Amérique Latine et aux Antilles, etc..., ont mis en évidence le rôle majeur des produits "amorphes", c'est-à-dire non cristallins et para-cristallins, notamment : allophane, imogolite, gels d'hydroxydes, complexes organo-minéraux. Les

principales propriétés qui en dépendent sont : des charges variables, cationiques et anioniques ; une rétention d'eau ; une faible densité apparente ; une teneur élevée en acides humiques.

C'est pourquoi la Classification Américaine (Soil Taxonomy, 1975) a développé le concept de sols dont "le complexe d'échange est dominé par des matières amorphes" (et à faible densité apparente, ou riches en verres volcaniques). La Classification Française (CPCS, 1967) fait référence "aux sols dont les propriétés originales sont dues à l'abondance des produits amorphes, les allophanes, associées à des teneurs souvent élevées de matières organiques...".

ICOMAND (1979-1987) propose le concept central de sols développés sur des produits volcaniques, dont la fraction colloïdale est constituée de "short range order minerals" ou de complexes Al-humus, mais à faible translocation d'Al et Fe, les distinguant ainsi des Spodosols par l'absence d'horizon Albique. Le concept d'Andosol a donc été élargi, des sols à allophanes aux sols à Al-chélaté. Ceci rejoint le point de vue de Duchaufour (1977, 1983, 1988), selon lequel l'andosolisation serait un degré très atténué du processus de podzolisation, sous "l'action stabilisante de l'alumine-active".

Pour ICOMAND (1987), le critère de laboratoire principal est la quantité (Al + 1/2 Fe) extractible par l'oxalate (pH 3, obscurité, 4 heures de contact), qui doit être > 2 % quand les "propriétés andiques" sont bien exprimées. Il s'y ajoute deux critères majeurs : densité apparente < 0.9 et P-rétention > 85 % (méthode Blackmore 1979) ou éventuellement le caractère vitrique (> 60 % de verres volcaniques) et dans ce cas Al + 1/2 Fe oxalate = 0.40 à 2 %.

Ce sont donc les propriétés dues à des formes non cristallines ou paracristallines des oxyhydroxydes d'Al et de Fe qui servent à définir les Andosols. Cependant, l'approche d'ICOMAND est trop simplifiée et celle de Duchaufour est ambiguë. L'ensemble Andosol est en réalité très varié, aussi bien par la large extension du climat (perhumide à subaride, tropical à froid) où il existe, que par la diversité de l'âge des sols, de la morphologie et des propriétés observées. Il ne peut donc être réduit à un concept simple, à un processus unique, ni caractérisé par seulement quelques critères diagnostics. C'est pourquoi il convient de revenir à une approche plus fondamentale. C'est ce que nous avons proposé en 1987 pour le Référentiel Pédologique Français.

II. CONCEPT - DEFINITION

Les andosols sont habituellement définis, d'abord, par leurs propriétés "andiques".

1. Définition

Les andosols sont des sols riches en complexes organo-minéraux stables, souvent très hydratés et à propriété de gel,

- dont les produits minéraux d'altération sont essentiellement :
 - . à l'état amorphe : gels d'hydroxydes d'Al, Fe, Si etc... et ou de chélates d'Al et Fe,
 - . et (ou) à l'état paracristallin* : alumino-silicates de type allophane, imogolite ou hysingérite ; oxy-hydroxydes de fer de type ferrihydrite ; oxyde de silice de type opale ; (mais pas ou peu de phyllites argileuses et d'oxyhydroxydes métalliques bien cristallisés) ;
- et dont les produits humifiés sont abondants et forment des complexes organo-minéraux stables ;
- dont les propriétés de surface sont très développées (rétention d'eau, capacité d'échange anionique et cationique) et variables selon les conditions de la mesure (état humide et état sec, pH de la solution, charge ionique, etc...),
- dont la structure est micro-agrégée, permettant une très grande micro-porosité et une faible densité apparente, mais n'est pas plastique et est très friable.

Ce sont souvent des sols jeunes, qui dérivent (très souvent) de produits volcaniques pyroclastiques, et demeurent riches en minéraux altérables. Les profils sont peu différenciés : Ils ne comportent que des horizons A et C ou A, S et C, mais pas d'horizons diagnostiques d'autres classes de sols tels que E, B, BO, BP, BT, BK etc...

* Minéraux imparfaits, de très petite taille, dont l'organisation moléculaire est "à courte période", et présente de nombreux "défauts".

Les sols d'apports volcaniques sont souvent complexes et rajeunis en surface. Les andosols se caractérisent en outre par : une faible densité apparente ($< 0,9$), une quantité importante d'Al extractible par NH_4 -Oxalate à pH 3.5 ($\geq 2\%$) (ou $\text{d'Al} + \frac{1}{2}\text{Fe oxal.} \geq 2,5\%$), une forte capacité de rétention du phosphore ($> 80\%$, méthode Blackmore), et une forte réaction alcaline ($\text{pH} > 9.5$) dans une solution de Na F en moins de 2 minutes.

D'autres propriétés peuvent servir de diagnostic, dont : le taux de C.E.C.-dépendante du pH ($\geq 40\%$ de la valeur maximum, à pH 9) ; le taux de déshydratation irréversible du sol séché à l'air, à pF_3 ($\geq 40\%$ de la valeur maximum sur sol humide-non cultivé) ; le $\Delta\text{pH} (\text{H}_2\text{O} - \text{KCl}) < 1$, le ZPC (plus élevé que celui des minéraux argileux et des acides humiques), une structure micro-agrégée (nano-agrégats de diamètre $\sim 1\mu\text{m}$).

2. Processus

Le concept de "processus d'andosolisation" est variable selon l'expérience des auteurs qui l'ont émis. Mais s'agit-il vraiment d'un processus ?

En réalité, les propriétés andiques peuvent provenir d'au moins deux processus fondamentaux d'altération (bio-géochimique) : l'hydrolyse et l'acido-complexolyse. Le premier est plus fréquent en climat tropical, le second en climat tempéré et froid.

D'autre part, l'état andique n'est pas stable. Il se situe généralement au début de la pédogénèse, plus rarement en final. Sa permanence est favorisée par un pédoclimat perhumide et fortement drainé. Au contraire, un climat sec ou un mauvais drainage réduisent la durée de cette étape.

Ce sont les matériaux vitreux et très poreux (volcaniques, pyroclastiques, non cimentés) ou très finement divisés (loess périglaciaires), qui permettent le mieux l'apparition des caractères andiques, surtout dans le cas du processus d'hydrolyse. Mais l'acido-complexolyse semble aussi former des sols andiques sur des matériaux plus massifs ou d'anciennes altérites, d'origine volcanique ou non.

D'après l'effet (prédominant) de l'un ou de l'autre de ces deux processus fondamentaux, il ressort deux ensembles fondamentaux d'andosols (sols à propriétés andiques, en général) : les andosols typiques, dits "allophaniques", et les andosols "non allophaniques".

1) Les Andosols typiques, sont le produit d'un processus d'hydrolyse à partir d'un matériau pyroclastique-non cimenté. Ils peuvent être appelés "allophaniques" ; car ils sont constitués (en abondance) d'alumino-silicates para-cristallins dans l'ensemble du profil ou du moins dans la partie supérieure, y compris l'horizon humifère.

En effet, l'hydrolyse (acidolyse en général, parfois alcalinolyse sur roches basiques en début d'altération) très rapide des verres volcaniques et de certains microlites très altérables (olivine, augite, labrador, etc...), fournit des solutions très concentrées en bases et en silice, ainsi que des résidus riches en gels d'hydroxydes (Al, Fe) et de silice "amorphe", qui ne permettent pas la genèse d'argiles et d'oxyhydroxydes bien cristallisés, mais de minéraux para-cristallins. Ces produits, à forte activité de surface, adsorbent rapidement les acides humiques, avec lesquels ils forment des pseudo-complexes stables, s'aggrégeant en nano-agrégats ovoïdes ($\phi \sim 1 \mu\text{m}$) et en micro-agrégats ($\phi \sim 100 \mu\text{m}$), très micro-poreux. Les acides humiques ainsi fixés, s'accumulent et protègent à leur tour les produits minéraux, retardant leur réorganisation et cristallisation.

Cependant, en fonction du temps, ces produits minéraux évoluent par une désilicification plus ou moins poussée (selon le pédo-climat), dans la partie supérieure du sol, et une resilicification éventuelle à la base du profil ou de la toposéquence, vers des minéraux mieux cristallisés (gibbsite et goethite d'une part, halloysite et, ou, smectites d'autre part).

Selon le degré d'évolution du matériau et de différenciation du profil, en fonction du temps et du climat, il est possible de distinguer diverses étapes, caractérisées par un ensemble de propriétés bien définies, et donc divers grands groupes d'andosols. Il y a également une transition vers d'autres classes de sols, dès le moment où apparaissent de nouveaux horizons diagnostiques, tout en conservant encore dans une partie du profil certaines des propriétés atténuées des andosols. Ce sont les intergrades.

2) Les andosols "non-allophaniques", produits d'un processus (modéré) d'acido-complexolyse, sont probablement des sols cryptopodzoliques, à propriétés andiques, car sans différenciation évidente d'horizons diagnostiques des sols podzoliques. Ils ont été appelés andosols "non-allophaniques", parce que l'horizon humifère (souvent très épais) est constitué en abondance de chélates, surtout d'aluminium, stables, et relativement peu ou très peu d'alumino-silicates para-cristallins.

Mais il y a souvent formation en profondeur, dans la partie plus minérale du sol (horizons S ou B ou C), d'allophane et d'imogolite, voire de minéraux argileux (halloysite, vermiculite hydroxy-alumineuse). Cette genèse semble conditionnée par des mouvements de matière en solution ou pseudo-solution (silice et chélates d'Al, et, ou, proto-imogolite ?). Sans vouloir trancher entre les 2 hypothèses rappelées par Ugoli (1986), nos observations dans le cas d'andosols d'Italie semblent attester que l'alumine est mobilisée en profondeur par des chélates.

La différence essentielle avec les andosols typiques est donc dans l'horizon humifère, par suite de la présence prédominante de vrais complexes organo-minéraux (chélates), au lieu d'allophane ; ces complexes sont stabilisés par leur forte charge en aluminium ; ils forment aussi des gels avec les hydroxydes (Al, Fe) et éventuellement un peu d'allophane, qui s'organisent en micro-agrégats très poreux. La différence avec les podzols est que la redistribution des chélates dans ce profil n'est pas évidente morphologiquement, mais seulement d'après l'analyse chimique.

Le processus d'acido-complexolyse prédominante apparaît en climat très humide et généralement plus froid que le processus d'hydrolyse (stricto sensu). On observe un passage progressif de l'un à l'autre, à courte distance, dans des topo-climosequences altitudinales, aussi bien sous les tropiques (Equateur, Rwanda) qu'en région méditerranéenne (Italie) ; ou à plus longue distance dans des séquences latitudinales (Amérique du Sud). Cependant l'acido-complexolyse peut apparaître aussi à plus basse altitude en région tropicale, mais sur des paléosols ou des paléo-altérites ferrallitiques, extrêmement pauvres du point de vue édaphique (Rwanda, Tahiti). Il faut mentionner qu'elle ne se développe pas, comme l'autre processus, quasi-uniquement sur des matériaux pyroclastiques d'âge récent, mais aussi sur des produits volcaniques massifs ou cimentés et des matériaux non volcaniques, d'âge plus ancien.

Cela pose un problème de classification. Doit-on généraliser la dénomination Andosol à l'ensemble des sols ayant des propriétés andiques, comme c'est la tendance actuellement ? Mais, dans ce cas, il faudrait distinguer deux sous-classes fondamentales : les andosols "allophaniques" et les andosols "non-allophaniques", ou "crypto-podzoliques". Sinon il faut restreindre les andosols au seul cas des sols "allophaniques", et prévoir dans la Classe des sols podzoliques, une sous-classe des sols "andiques".

III. SOLUM - HORIZONS DIAGNOSTIQUES

Il serait possible de distinguer des horizons diagnostics plus ou moins spécifiques des Andosols et des horizons accessoires éventuellement observés dans les divers profils d'Andosols.

1. Horizons spécifiques

a) Aa Horizon humifère andique : Il a tous les caractères andiques bien exprimés (cf. la définition). En outre, il est très humifère ($\geq 10\%$ de mat. organ. bien humifiée), il a une couleur très foncée (code $\leq 3/3,5$ humide), une texture apparente de la terre fine limoneuse-humifère, une structure microagrégée, grumeleuse fine, en grappe, "farineuse", très friable, un chevelu racinaire très dense, une grande épaisseur (≥ 20 cm).

Sa Horizon minéral andique : Il a tous les caractères andiques bien exprimés (cf. définition), (sans illuviation apparente, ni taches d'oxy-réduction) ; une texture apparente limoneuse de la terre fine ; une teneur importante en matière organique bien humifiée ($\geq 1\%$), sans que cela soit toujours évident d'après la couleur ; une couleur dont la valeur s'affaiblit rapidement par dessiccation à l'air ; une structure micro-agrégée et faiblement cimentée par des films ou des ponts de gels organo-minéraux, ou fragmentaire polyédrique fine, très friable ; sol non collant, ni plastique ; bien drainé, sans engorgement apparent même à saturation.

b) Il serait possible de distinguer Aaa typique, des andosols "allophaniques", de Aap cryptopodzolique riche en chélates d'Al, des andosols "non-allophaniques". Ceux-ci peuvent être définis par le rapport Al-Tétraborate/AL-Oxalate $\geq 0,5$ (?) et par les teneurs très faibles en Si Oxalate ($< 0,5\%$?).

c) Le caractère vitrique, particulier à certains andosols jeunes, ou peu altérés, dérivant de cendres et lapilli volcaniques, pourrait être précisé également, en reprenant certaines des propositions de la Soil Taxonomy et du projet ICOMAND. Cela donnerait des horizons Aav et Sav, dont les propriétés andiques sont plus restreintes du fait de :

- leur forte teneur en matériaux vitreux inaltérés ($> 60\%$ fraction > 2 mm et $> 30\%$ de verres dans la fraction sable) ;
- et de leur faible teneur en produits organo-minéraux amorphes et para-cristallins (Al ox entre 0,5 et 2% ; Matière organique humifiée $< 10\%$, etc...) ;

CARACTÈRES principaux des ANDOSOLS

-> produits minéraux d'altération à l'état non cristallin ou paracristallin, en prédominance, rapidement solubles (oxalate pH 3.5, à l'obscurité, HCl (2N), etc...)

-> propriétés de surface très développées, variées

-> structure micro-ségrégée micro-poreuse, stable

-> autres propriétés

- état non-cristallin (amorphe) { -gels d'hydroxydes Al, Fe, Mn, etc...
ou d'oxydes Si, Ti, etc...
-chélates d'Al, Fe etc...
- état para-cristallin prédominant { -silicates : allophane, imogolite, hisingerite
-silice : opale (biologique, ou chimique)
-oxyhydroxydes et oxydes métalliques } ferrinodrite, \bar{z} substituée par Al, ou par Si, etc...
- état cristallin accessoire { -argiles : halloysite, beidellite, vermiculite
-oxyhydroxydes : gibbsite, goethite, hematite, etc
- pseudo-complexes organo-minéraux { -acides humiques co-adsorbés sur les gels de produits minéraux non cristallins ou paracristallins

- capacité de rétention d'eau (à différents pF) { élevée en % des produits organo-minéraux, forte déshydratation irréversible > 40%, après dessiccation-air. (4) taux de
- C.E.C. et A.E.C. { élevées en % des produits organo-minéraux, très variables, surtout en fonction du pH Δ CEC > 40%⁽⁴⁾ mais aussi de l'état humide ou sec, de la concentration ionique.

- capacité de rétention de P, très élevée : > 85% (méthode Blackmore)
- Z.P.C. élevé : fonction de la charge en hydroxydes d'Al et Fe
- micro-porosité très développée, (souvent de 60 à > 80% du volume)
- densité apparente faible : le plus souvent < 0.9, varie de 0.9 à 0.2
- non plastique : à cause de l'absence de phyllites argileuses
- très friable : cimentation faible, fragile après dessiccation à l'air; mais stable à l'état naturel (indice IS de Hénin très faible)

- couleur variable : s'atténue rapidement par dessiccation à l'air
- test de NaP : pH > 9.5 en moins de 2 min.
- abondance de minéraux volcaniques altérables et de verres, résiduels, très fréquente.

NB { (1) taux de déshydratation irréversible : $\frac{ApF3 \text{ (humide)} / \text{sec-2}}{pF3 \text{ (humide)}} \times 100$
 (2) taux de CEC variable : $\frac{\Delta CEC (pH9 / pH4)}{CEC (pH9)} \times 100$
 = humide = sol naturel ressuyé (à la capacité de rétention au champ).

ANDOSOLS

Soils à complexes organo-minéraux stables, très hydratés, à propriétés de gel, en prédominance dans les produits d'altération (bio-géochimique) sols le plus souvent jeunes, dérivant de produits volcaniques pyroclastiques.

- propriétés restreintes : $D_a < 1,1$ - Rétention d'eau à pF 4,2 $< 25\%$ sur sol sec air ou $< 30\%$ sur sol humide - CEC à pH 7 < 15 me/100 g de terre fine (< 2 mm).

d) Le caractère "thixotropique," particulier aux andosols de régime climatique "per-humide", peut être ajouté \rightarrow Sath. Il est défini par la propriété de thixotropie, une capacité de rétention d'eau élevée ($> 100\%$ à pF 3, sur sol humide) et un taux de déshydratation irréversible après dessiccation à l'air, très élevé ($\geq 70\%$). Ce serait l'horizon Sat.

2. Horizons accessoires

- Aam mélanique (code de couleur $\leq 2/1,5$ humide).
- Aac chromique (code de couleur $> 2/1,5$ humide).
- Oh Accumulation de matière organique humifiée, en surface.
- G Gley ou Pseudo-gley, en profondeur ($\geq 0,50$ cm), hydromorphie non permanente.
- Bp placique, illuviation indurée d'hydroxyde de fer et éventuellement d'humus et d'alumino-silicates paracrystallins.
- Sao oxique, andosol riche en oxyhydroxydes de fer et en gibbsite, proche géochimiquement des sols ferrallitiques.
- Sab argileux (ou mixte), andosol de "transition", contenant en mélange de l'alophaane et des minéraux argileux (halloysite, smectite, vermiculite) bien évidents sur les diagrammes de rayons X (à propriétés andiques atténuées).
- Sak calcique, andosol des climats sub-arides, à calcaire pulvérulent (et éventuellement gypse).
- Sf ou Bf fragique, à cimentation friable à l'état humide, dure à l'état sec, par des alumino-silicates para-cristallin (imogolite), des argiles (halloysite), ou de la silice.
- Sd ou Bd durique, à cimentation et induration permanente, par de la silice paracrystalline (calcédoine) et (ou) éventuellement des argiles, ou de la calcite.

3. Taux de saturation en bases échangeables

Bien que la Capacité d'Echange de Cations soit très dépendante du pH du sol, dans les sols à propriétés andiques, il est de tradition d'utiliser le taux de saturation en bases, de la Capacité d'Echange mesurée à pH 7, comme critère de classification des Andosols. Les Andosols saturés sont ceux où le taux de saturation est $\geq 50\%$ dans l'ensemble du sol. Les Andosols désaturés sont ceux où le taux de saturation est inférieur à 50% dans tout le profil ou au moins dans l'horizon S_A . Une transition est possible dans le cas où le taux de saturation est $\geq 50\%$ seulement dans l'horizon Aa. Ces valeurs permettent de distinguer les Andosols à caractère édaphique "eutrophe" de ceux qui sont "mésotrophe" ou "oligotrophe".

IV . GRANDS TYPES

Deux options sont possibles : soit reprendre en le précisant et le complétant le schéma proposé en 1971, par le "Groupe de Travail Andosols" (publié en 1972 dans les Cahiers de Pédologie, ORSTOM). Soit, repartant des nouveaux concepts précédents, compléter et redistribuer les grands groupes d'Andosols, pour servir de base à une nouvelle classification. Il ne paraît pas opportun de transposer en français les propositions de ICOMAND, car les principes sont trop différents de ceux de la Classification CPCS, les subdivisions et les critères un peu arbitraires et pas encore totalement testés et bien établis.

A. Schéma de classification de 1972, adapté.

La définition des andosols pourrait être légèrement élargie et précisée en fonction des connaissances récentes.

Les andosols sont subdivisés en deux sous-classes, en fonction du degré de différenciation du profil, puis en groupes en fonction des propriétés du sol en accord avec les facteurs de formation, surtout climatiques et de durée d'altération, troisièmement en sous-groupes, par des différenciations d'horizons particuliers (Aa mélanique, B placique, Sa thixotropique, B durique, etc...). Enfin des intergrades avec d'autres classes sont admis, dans la mesure où le caractère andique est subordonné à des propriétés de diagnostic (horizon diagnostique) qui les rattachent à une autre classe.

Andosols à profil peu différencié AaC, Aa-R, etc...

1. Andosols vitriques
 - à Aav
 - . Saturés (S/T \geq 50%) . à Aav { mélanique
ou chromique
 - . Désaturés (S/T < 50%) . id "

2. Andosols humiques-saturés (molliques)
 - à Aaa (S/T \geq 50%) . à Aav { mélanique
ou chromique

3. Andosols humiques-désaturés (S/T < 50%)
 - à Aaa ou Aap
 - . allophaniques; à Aaa (typique) { mélanique
ou chromique
 - . cryptopodzoliques, à Aap, (généralement) mélanique
 - . histiques, à Oh, Aaa ou Aap, éventuellement G

Andosols à profil différencié Aa-Sa-C ou R, etc...

4. Andosols saturés
 - à Aaa-Sa (S/T \geq 50%)
 - . mélaniques Aam
 - . chromiques Aac
 - . calciques Sak
 - . indurés à fragipan ou duripan
 - . placiques à horizon placique ? exceptionnel

5. Andosols désaturés - non perhydratés
 - à Aaa ou Aap-Sa (S/T < 50%)
 - . mélaniques à Aam
 - . chromiques à Aac
 - . placiques à horizon placique et Aap (ou Aaa ?)
 - . gleyiques à G
 - . argileux à Sab

6. Andosols désaturés-perhydratés
 - à Aaa ou Aap et Sat (S/T < 20%)
 - . mélaniques à Aam
 - . chromiques à Aac
 - . placiques à horizon placique et Aap (ou Aaa ?)
 - . gleyiques à G
 - . oxiques à Sao.

- NB 1) des transitions sont possibles entre les groupes, par exemple d'Andosol désaturé en Sa, à horizon Aa faiblement saturé.
- 2) des combinaisons sont possibles d'horizons accessoires, au niveau des sous-groupes.
- 3) des intergrades sont connus avec diverses autres classes et grands groupes de sols du CPCS, tels que : Sols Peu Evolués d'apport éolien, Sols Bruns, Sols Ocreux, Sols Podzoliques, Sols Isohumiques, Sols Ferrallitiques, Sols Ferrallitiques à halloysite, Sols Ferrallitiques oxiques (à gibbsite)...

En schématisant, pour un référentiel au niveau des grands groupes de sols il y aurait 6 ensembles :

- Andosols vitriques
- Andosols humiques-saturés (molliques)
- Andosols humiques-désaturés
- Andosols saturés
- Andosols désaturés-non perhydratés
- Andosols désaturés - perhydratés

B. Schéma nouveau proposé

On pourrait, à la lumière des connaissances récentes, si l'on admet une définition élargie des Andosols : sols à propriétés andiques (telles que définies précédemment et par ICOMAND, 1986), distinguer :

- deux sous classes - Andosols allophaniques (= typiques)
à Aaa (avec ou sans Sa)
- Andosols non-allophaniques (= crypto ou para-podzoliques)
à Aap (avec ou sans Sa).

Andosols "allophaniques" à Aaa = typiques ou Andosols (stricto sensu)

1. Andosols vitriques à Aav/C ou R
- . saturés , mélaniques ou chromiques
 - . désaturés , id "

2. Andosols humiques à Aaa/C ou R
 - . saturés (molliques), mélaniques ou chromiques
 - . désaturés (umbriques), mélaniques, chromiques, ou histiques, etc...

3. Andosols saturés (eutrophes) à Aaa/Sa/C ou R
 - . mélaniques ou chromiques
 - . calciques, à fragipan, à duripan (peut être à horizon placique ?)

4. Andosols désaturés (mésotrophes, en général) à Aaa/Sa/C ou R
 - . mélaniques ou chromiques
 - . à horizon placique, gleyique, argileux.

5. Andosols perhydratés (oligotrophes, en général), à Aaa/Sat/ C ou R
 - . mélaniques ou chromiques
 - . à horizon placique, gleyique, oxisque.

Andosols "non-allophaniques" à Aap : para-podzoliques ou Para-Andosols

6. Andosols para-podzoliques humiques à Aap / C ou R
 - . généralement mélaniques
 - . éventuellement avec Oh, G, horizon placique

7. Andosols para-podzoliques ^{typiques} à Aap/Sa
 - . mélaniques ou chromiques
 - . éventuellement perhydratés (à Sat), à horizon placique, gleyique.

Pour synthétiser les dénominations on pourrait distinguer

Les Andosols (stricto sensu)

Les Para-Andosols (à Aap).

Il faudrait au moins 7 grands-groupes (ou Types) de sols correspondant aux principaux ensembles naturels :

1. Andosols vitriques
2. Andosols humiques
3. Andosols eutrophes
4. Andosols mésotrophes
5. Andosols perhydratés
6. Para-andosols humiques
7. Para-Andosols. ^{typiques}

V. PEDOGENESE

La formation des Andosols, en condition de bon drainage, suit deux séquences principales : 1°) en fonction du climat = climato-séquence, 2°) en fonction du temps = chronoséquence.

1. Climato-séquences.a - latitudinales.

En condition de climat humide, des régions tropicales aux régions froides, on observe une évolution de l'horizon humifère, de plus en plus foncé, acide et profond, et le développement de caractères podzoliques discrets dans les sols sur roches basiques (cryptopodzoliques, B_s ocreux ou B_{Fe} placique), ou affirmés dans les sols sur roches acides (sols podzoliques ocreux et podzols humo-ferrugineux) ; puis des sols tourbeux à héli-gley de toundra en climat pergélitique. A l'inverse, l'allitisation, marquée par le développement de la gibbsite, se développe dans les sols tropicaux et subtropicaux (le sol s'enrichit en oxy-hydroxydes de fer et d'alumine).

La limite de température moyenne annuelle, en dessous de laquelle apparaissent les caractères podzoliques discrets (acide complexolyse prédominante dans l'horizon A ; abondance de chélates d'Al peu mobiles), semble se situer vers 12° C.

b - altitudinales, effet de l'altitude et effet de versant (orientation des Alizés) en régions tropicales et subtropicales.

- séquence d'Hawaii, en fonction de la pluviosité (USDA. Soil Survey. 1973) (→ fig. 1)

α - au vent : typic Dystrandepts → Hydric Dystrandepts →
typic Hydrandepts → Vitrandepts

β - sous le vent : Vitrandepts → typic Eutrandepts → Ustollic
Eutrandepts (avec C_{Ca} de calcaire friable)

- séquence du Nord des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu), sur roches basiques

α - au vent : andosols saturés → andosols désaturés → andosols perhydratés

β - sous le vent : andosols désaturés → andosols saturés → Sols bruns andiques
(cf. QUANTIN 1972-79, et thèse). (→ fig. 2)

- séquence des îles Canaries (FERNANDEZ-CALDAS, QUANTIN, TEJEDOR-SALGUERO, 1975, 1978-1979-1980). (→ fig. 3)

α - séquence septentrionale :

- sols récents : bruns-andiques, andosols désaturés ± perhydratés,
andosols vitriques (altitude croissante de 300 à 2000 m)

- sols plus anciens : vertisols, sols fersiallitiques, sols ferrallitiques
± rajeunis et andiques en surface

β - séquence méridionale :

sols ± rajeunis : andosols vitriques, sols bruns, sols fersiallitiques,
vertisols et sols ± calcaires, gypseux et sodiques.

(altitude décroissante de 2200 à 200 m).

En Italie (QUANTIN, LULLI, BIDINI, 1986), les effets de la podzolisation discrète (fort chélation de l'Aluminium) apparaissent vers 900 m d'altitude à une température moyenne annuelle inférieure à 12° C. Il en est de même dans les topo-climosequences andines (Equateur, Colombie) et au Mexique.

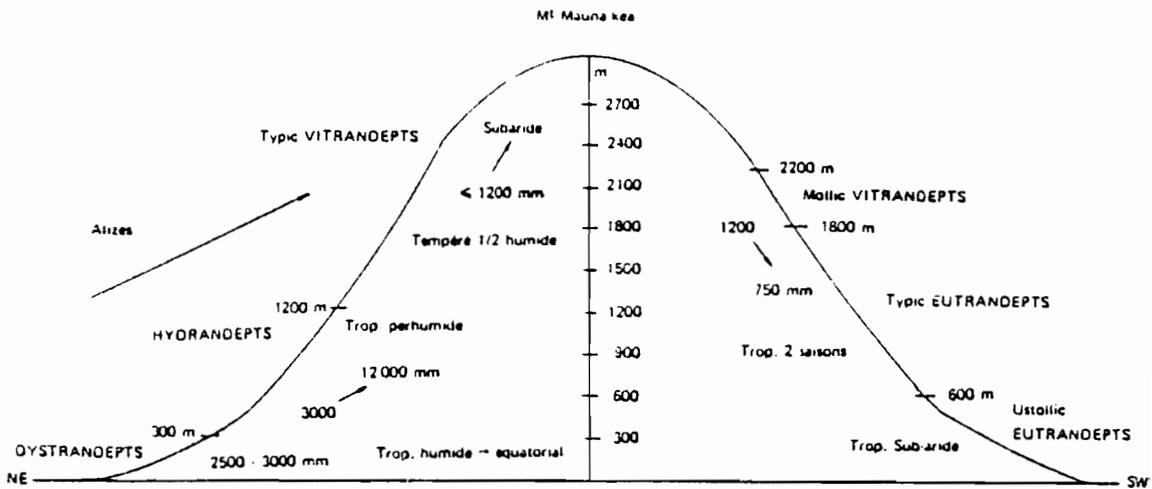


Fig. 1 Séquence topoclimatique des Andosols d'Hawaï

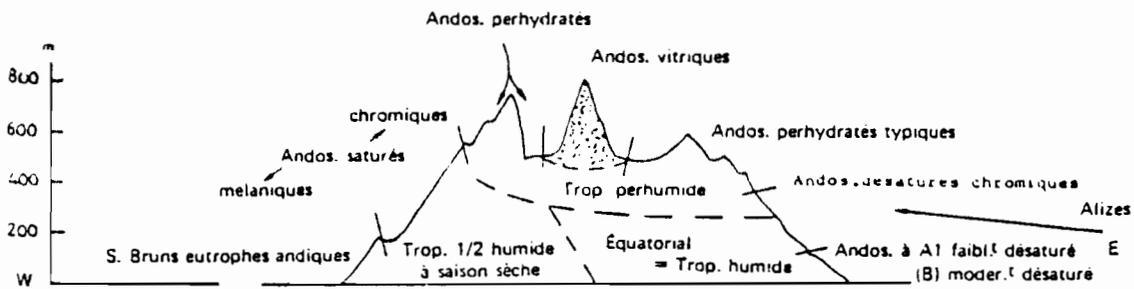
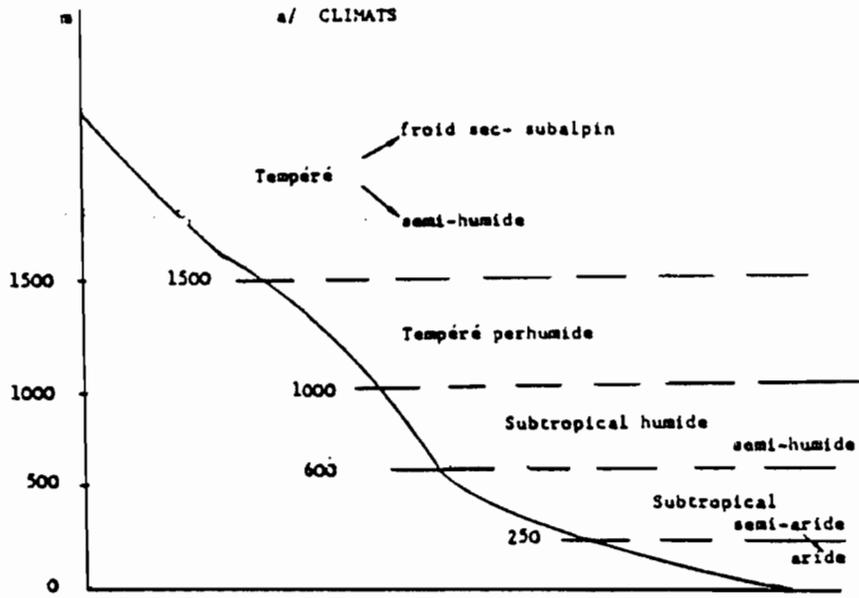


Fig. 2 Séquence topoclimatique de Santa Maria (Vanuatu) Andosols et bruns-andiques/basaites (P. QUANTIN, 1978)



b/ SOLS

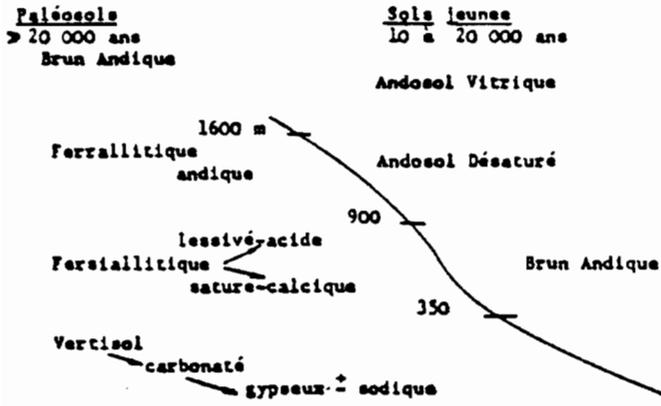


Fig. 3

I. Canaries- Séquence topo-climatique et chrono-séquence comparée des sols dérivés de roches volcaniques.

Synthèse schématique des versants nord et sud.
d'après Fernandez Caldas et al. (1981)

- séquence du Massif-Central français (BONFILS 1971, HETIER 1975, MOINEREAU 1977).

a - La présence des andosols et sols andiques est limitée à la partie supérieure, au-delà de 800 à 900 m d'altitude.

+ Sur roches basiques (basaltes, andésites) on observe les andosols les plus typiques sur les produits pyroclastiques quaternaires de la chaîne des Puys. Sur des laves plus anciennes les sols ont des caractères intergrades : bruns-andiques, ou ocreux et cryptopodzoliques.

+ Sur roches plus acides (rhyolites, domites) les sols ont des caractères plus podzoliques : rankers andiques, rankers cryptopodzoliques, podzols ocreux ou humo-ferrugineux.

3 - A basse altitude, sur basaltes, les sols sont des sols brunifiés (bruns acides et bruns eutrophes).

MOINEREAU pense que cela est dû à l'effet récent de la culture plutôt qu'à une différence climatique.

Il est probable que les deux effets, climatiques et cultureux se conjuguent le deuxième accusant le premier.

2. Chrono-séquences

a - La séquence des îles Canaries nous a montré qu'en région subtropicale :

+ en climat "perhumide" : les andosols désaturés → sols ferrallitiques,

+ en climat "ustique" : - les andosols ± désaturés → sols ferrallitiques
ou des sols bruns en haut de séquence,

- les andosols saturés → sols ferrallitiques

ou des sols vertiques en bas de séquence,

+ en climat subaride : les andosols saturés → vertisols,

et sols ± salés à différenciations calcaires, gypseuses et sodiques.

b - Aux Nouvelles-Hébrides, en climat tropical, nous avons pu établir les filiations suivantes (QUANTIN, 1972-79 et thèse) :

+ en climat perhumide les andosols perhydratés → sols ferrallitiques "oxiques" à caractères andiques permanents, gibbsitiques :

+ en climat humide de basse altitude, les andosols saturés → sols bruns eutrophes ferruginisés ou andosols désaturés, puis sols ferrallitiques ± désaturés à halloysite.

+ en climat tropical, à courte saison sèche, les andosols saturés → sols bruns-andiques → sols ferrallitiques et sols bruns vertiques.

c - A La Réunion, une gamme assez étendue de climats, en altitude (de tropical humide à tempéré perhumide sur le versant "au-vent", jusqu'au tropical à longue saison sèche sur le versant "sous le vent") et une large durée des apports volcaniques (Miocène à actuel), font ressortir une large différenciation des sols et des altérations (ZEBROWSKI, 1973 - GENSE, 1976, → fig. 4 et 5 : Les andosols ne persistent,

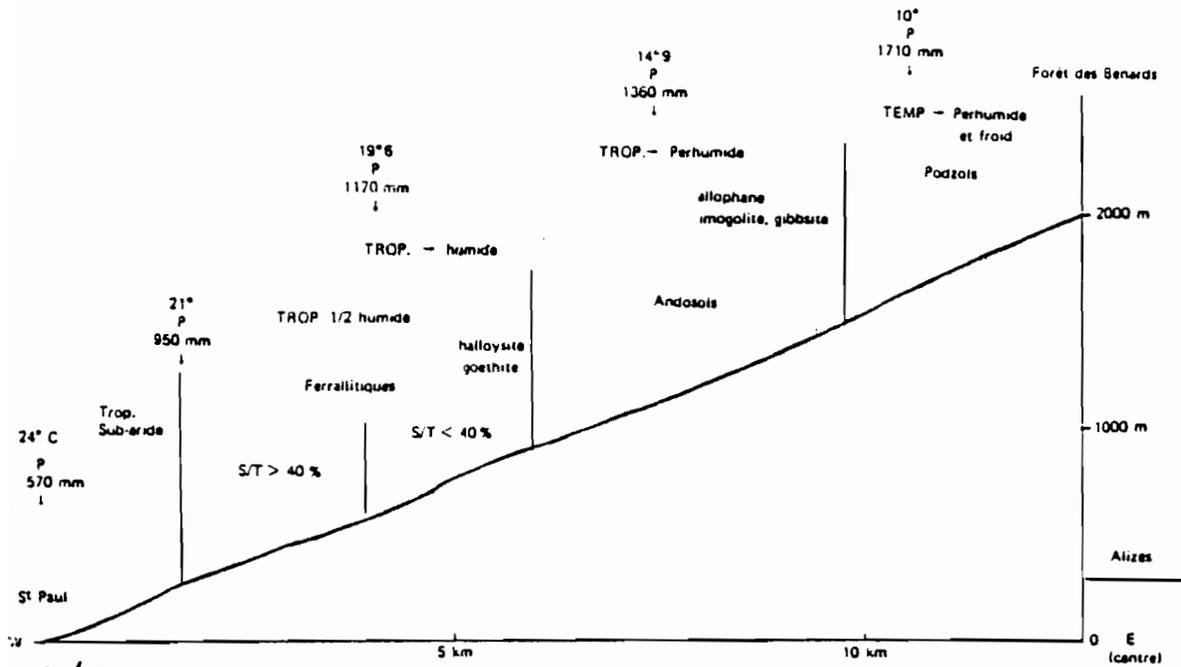


Fig. 4 Séquence topoclimatique des sols de La Réunion (versant « sous le vent ») (d'après ZEBROWSKI, 1973)

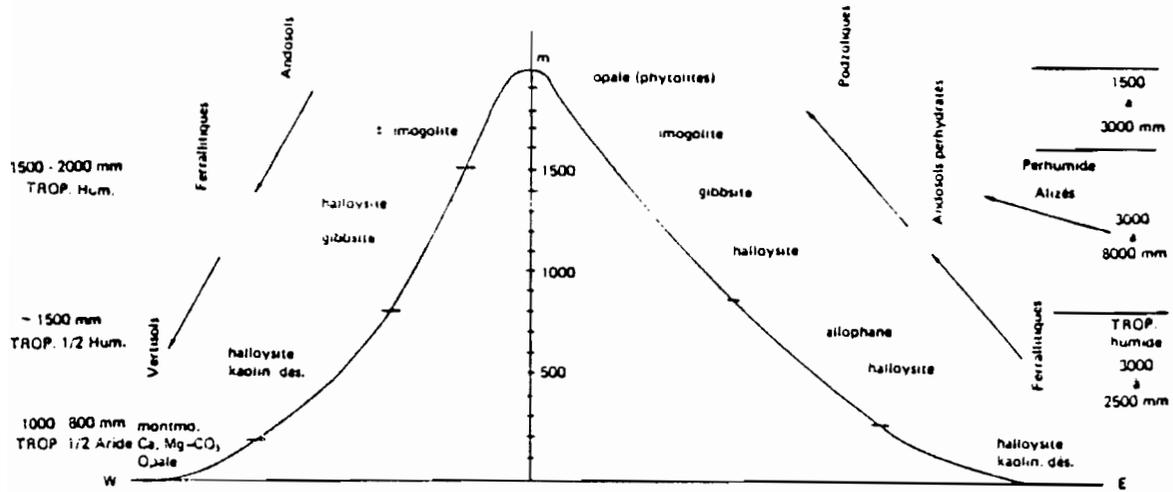


Fig. 5 Séquence topoclimatique des sols et alterations de La Réunion. Schéma d'après GENSE (1976) et ZEBROWSKI (1973)

typiquement, que dans la zone de climat tropical perhumide. Ils sont même remplacés par des podzols sur les sommets, en climat plus froid, tempéré et perhumide. En climat tropical humide et à courte saison sèche, les andosols sont relayés par des sols ferrallitiques. En climat tropical à longue saison sèche, ils ont évolué en vertisols ou sols fersiallitiques, où se différencient même des carbonates (Ca, Mg) et de l'opale. Cette observation rejoint celle des îles Canaries en climat subtropical.

Des séquences analogues ont été observées aux Antilles (COLMET-DAAGE et al. 1965), en Equateur (COLMET-DAAGE et al. 1967-69). Dans ce dernier cas, les andosols situés entre 3500 et 4500 m d'altitude, en climat froid (Cryandeps) sont des andosols peu différenciés-humiques, de couleur très noire, sols analogues à ceux du Japon en climat froid, ou en Nouvelle-Zélande en situation semblable et sur roches acides (rhyolites).

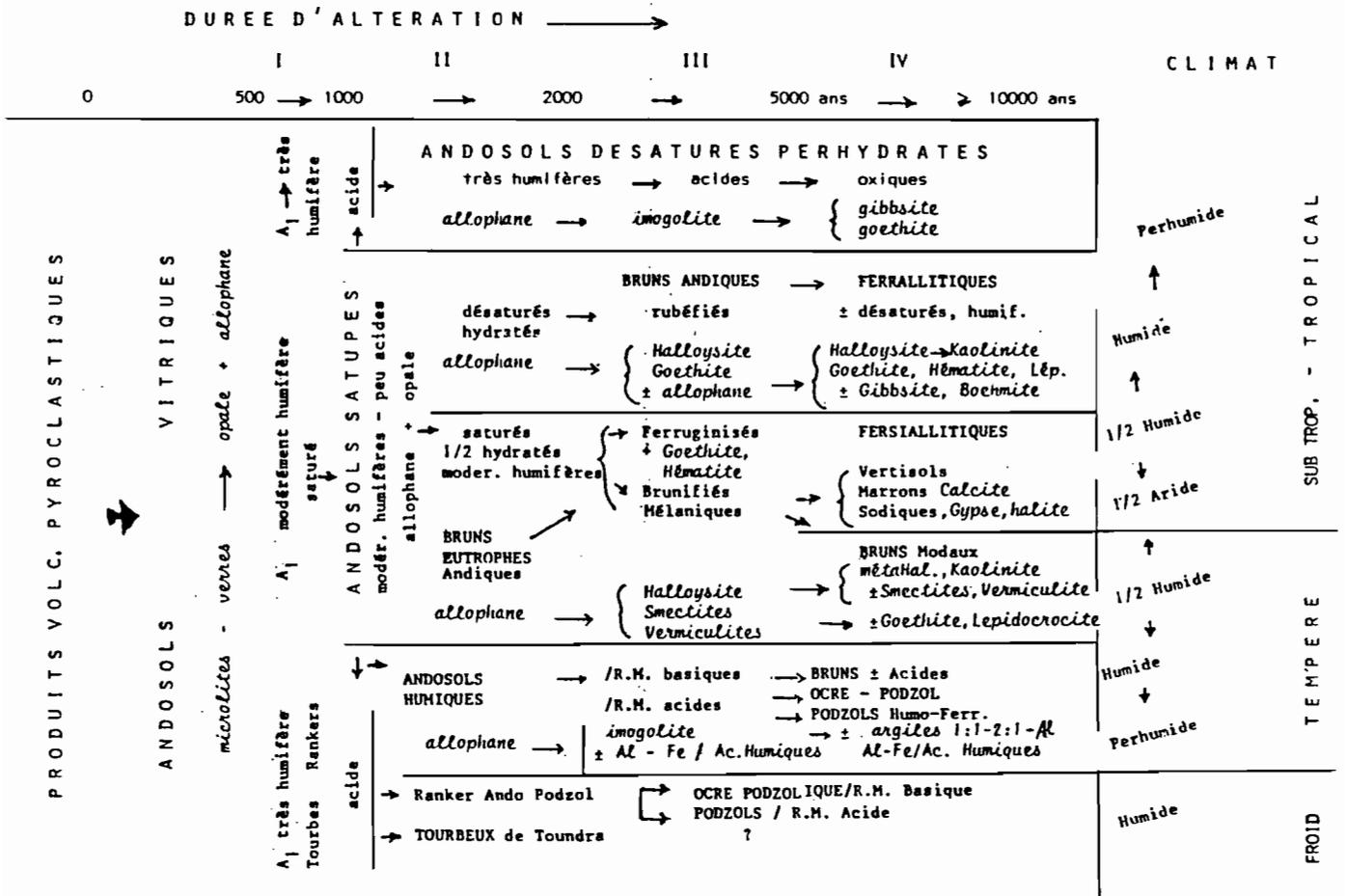
3. Schéma général d'évolution des andosols.

Un schéma (fig. 6), permet de résumer l'évolution des andosols en fonction du climat et de la durée d'altération, et éventuellement du caractère plus ou moins basique de la roche-mère.

Ce schéma montre une évolution rapide, pendant au plus 5000 à 10000 ans (probablement). En climat suffisamment humide et chaud, le stade peu évolué humifère → andosols vitriques ne dépasse pas 1000 à 2000 ans. Ensuite on assiste à une différenciation climatique. D'une manière générale, les caractères andiques perdurent d'autant plus que le climat est perhumide, permettant ainsi une évolution géochimique de l'altération plus poussée, que cela soit en climat tropical (→ sols oxiques) ou en climat tempéré (→ sols ocreux ou cryptopodzobliques). Plus le climat est sec pendant une longue période, plus rapide est la formation de minéraux argileux (→ halloysite, smectites, vermiculites) et la stabilisation géochimique du sol).

- En climat tropical et subtropical, on observe trois filières climatiques :
 - x perhumide → andosols perhydratés très humifères → sols oxiques ;
 - └ allophane → imogolite → gibbsite + goéthite cryptocristalline
 - x humide (courte saison sèche) → sols bruns-andiques ferruginisés → sols ferrallitiques, └ allophane → halloysite ± goéthite .
 - x 1/2 humide (longue saison sèche) → sols bruns-andiques mélanisés
 - sols fersiallitiques, vertisols (et sols ± carbonatés, gypseux et halomorphes) ;

Fig. 6 Evolution des Sols dérivés de roches volcaniques pyroclastiques / temps et climat



l'allophane-hisingérite } → Fe-Mg smectites
 } → smectites + carbonates, gypse et attapulgite .

x tempéré humide et perhumide d'altitude $T_m < 12^\circ\text{C}$
 para andosols à chélates d'Al prédominants dans l'horizon A

- En climat tempéré, on a observé deux filières principales :

x humide et + froid → ⁽¹⁾ $(T_m < 8^\circ\text{C})$ andosols désaturés / → sols bruns acides, bruns-
 andiques ou rankers cryptopodzoliques sur roches basiques
 → ⁽²⁾ rankers andiques → sols ocre-podzoliques ou
 podzols humo-ferrugineux sur roches acides ;

l'allophane + Ac. Fulv., ou Hum - Fe, Al complexes

+ imogolite, ± halloysite, Al-vermiculites ou smectites .

x 1/2 humide et tempéré ^(à été chaud et sec) $(T > 7^\circ\text{C})$ → bruns ± eutrophes et andiques

→ sols bruns modaux, sur roches basiques

→ sols bruns ± acides ou lessivés sur roches acides

l'allophane → halloysite, smectites, vermiculites et intergrades Al-2:1.

- En climat froid :

x humide - sur roches basiques : rankers-andiques ou cryptopodzoliques
 → sols ocreux

- sur roches acides : rankers-andiques → podzols humoferrugineux.

NB. dans les sols ocreux sur roches basiques, en profondeur, dans les paléo-
 sols, il se forme des argiles (halloysite, kaolinite, vermiculites) et
 des hydroxydes de fer, mais en petite quantité.

x pas d'études connues en climat plus aride.

x pergélisque = on ne connaît que les sols tourbeux de toundra.

4. Sur les matériaux peu perméables et cimentés (tufs, ignimbrites, coulées
 massives) , l'évolution est différente; car le drainage est ralenti et l'alté-
 ration est beaucoup moins rapide. Ainsi, sur des tufs pyroclastiques des minéraux
 argileux (halloysite, smectites) peuvent se former directement, sans transition
 par l'allophane, comme c'est la règle sur des matériaux meubles et très perméables
 (cendres, lapilli). C'est pourquoi sur les matériaux peu perméables, il se forme
 plutôt des sols argileux: Bruns , Fersiallitiques, Ferrallitiques, ou Vertiques.
 Mais leur développement est beaucoup moins rapide que celui des Andosols.

VI. PROPRIÉTÉS - FONCTIONNEMENT \Rightarrow APTITUDES EDAPHIQUES

Les propriétés andiques majeures :

- Liées à des gels, à propriétés de surface : rétention d'eau, d'anions et de cations, très développées, mais très variables selon les conditions de la mesure, ou les modifications consécutives de l'utilisation du sol.
- Liées à des complexes ou pseudo-complexes organo-minéraux stables.
- Liées à une structure micro-agrégée et à microporosité très développée permettant une forte rétention de l'eau et cependant un bon drainage du sol.
- Entraînant une accumulation d'humus plus ou moins profonde, consécutive d'un turn-over ralenti.
- Entraînant l'accumulation de certains éléments liés à l'humus, tels que NPS, ou à la forte capacité de rétention anionique de l'allophane et des hydroxydes d'alumine, d'éléments tels que P.
- Et cependant dans le cas des andosols (stricto sensu) les plus typiques, sols jeunes sur des cendres volcaniques, une abondance de minéraux primaires altérables, fournisseurs permanents de bases échangeables.

Les andosols (S.S.) se distinguent des para-andosols, par les effets prédominants de l'allophane (au sens large), et la quasi-absence de chélates (d'Al et Fe). Ils sont faiblement à modérément acides ($\text{pH} > 5,5$ en général), même quand le taux de saturation en bases échangeables (à $\text{pH} 7$) est apparemment faible. Cependant ils peuvent être riches en minéraux altérables. Malgré une forte accumulation humifère, le rapport C/N reste souvent < 15 et manifeste une bonne activité biologique.

Les andosols vitriques sont des andosols "peu-évolués" à propriété de sable volcanique-humifère. Ils sont souvent riches en bases échangeables et en phosphore assimilable. Leurs facteurs limitants sont d'ordre physique : profondeur restreinte, forte macroporosité, fort drainage et faible rétention d'eau, ou leur conséquence: un risque de lixiviation rapide de certains éléments, dont l'azote minéral.

Les andosols saturés ont des caractères de sols eutrophes. Ils sont constitués d'une allophane modérément alumineuse et ferrifère et ils ont des propriétés modérées de gels. Ils sont suffisamment évolués et peu acides pour avoir une capacité d'échange de bases élevée et une rétention modérée du phosphore. Ils ont aussi une capacité de rétention en eau suffisante. Ce sont des sols très fertiles qui supportent un usage agricole intensif. Ils ne présentent pas de problème grave de fertilisation en phosphore. Les sols situés en climat à saison sèche marquée peuvent présenter un déficit hydrique saisonnier.

Les andosols désaturés manifestent au maximum les propriétés de gels et de rétention anionique, notamment du phosphore.

- les andosols désaturés non perhydratés, ont des caractères de sols mésotrophes. Ils ont d'excellentes propriétés physiques, une richesse suffisante en bases échangeables ; mais la forte capacité de rétention du phosphore peut poser problème pour la fertilisation.

- les andosols perhydratés, marquent le stade extrême, où l'allophane est la plus alumineuse (imogolite + gels d'hydroxydes d'Al et Fe), les propriétés de gel les plus développées, la rétention du phosphore la plus énergique, la macroporosité la plus restreinte. Il n'y a cependant pas de toxicité aluminique évidente. Le taux de saturation en bases échangeables est très faible ; des déficiences en bases sont possibles. Ce sont des sols à caractère oligotrophe, qui posent des problèmes sérieux de fertilisation, notamment en phosphore.

Les Para-Andosols, non-allophaniques, se marquent par l'abondance des chélates organiques à prédominance d'aluminium. L'horizon humifère est franchement acide ($\text{pH} < 5$), fortement désaturé en bases échangeables ; il y a possibilité de toxicité aluminique. Le phosphore est fortement retenu, soit dans la molécule organique, soit sous forme de pseudo-sels complexes avec les chélates d'alumine. La fertilité est très restreinte. Ce sont des sols à caractère oligotrophe qui posent de très sérieux problèmes de fertilisation.



CIRAD-CNRS-INRA-ORSTOM-UNIVERSITÉ

LES ANDOSOLS DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

PRÉPARATION D'UN PROGRAMME
DE RECHERCHES PLURIDISCIPLINAIRES

SÉMINAIRE DE SAINT-DENIS
24 MAI – 1^{ER} JUIN 1988