

Roches-mères et Andosolisation en milieu montagnard tempéré

Comparaison pyroclastes récents – roches-mères volcaniques massives anciennes

M. Gury⁽¹⁾, D. Aran⁽²⁾ et E. Jeanroy⁽¹⁾

- (1) Centre de Pédologie Biologique, UPR 6831 du CNRS associée à l'Université Henri Poincaré – Nancy 1, 17 rue N.D. des Pauvres, B.P. 5, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.
(2) Université de Metz, Unité de Recherche Ecotoxicité, Biodiversité et Santé Environnementale, Rue du Général Delestraint, 57070 Metz Borny.

RÉSUMÉ

L'existence d'Andosols dans les Vosges est aujourd'hui bien démontrée, mais ces Andosols sont à peu près totalement dépourvus d'allophanes et riches en complexes organo-métalliques stables et non mobiles. Leur extension géographique est réduite car leur développement exige la conjonction d'une part de conditions climatiques humides propices à l'altération des minéraux et froides affaiblissant l'activité biologique minéralisatrice des matières organiques, d'autre part de la présence de roches mères basiques riches en minéraux altérables. Cependant, lorsque les conditions propices à l'andosolisation sont réunies, le degré de développement du processus demeure modeste en regard de ce qui peut être rencontré dans le Massif Central.

Une comparaison minutieuse a été menée sur deux stations, représentative chacune de l'andosolisation la mieux exprimée dans les Vosges et dans la Chaîne des Puys.

La composition chimique de la roche mère apparaît comme principal responsable de l'orientation de la pédogenèse. Sa texture, son assemblage minéralogique, sa compacité, sont déterminants dans le degré de développement du processus. Dans les Vosges, l'absence de matériaux pyroclastiques vitreux, meubles, explique les particularités de l'andosolisation. Les roches volcaniques basiques massives, non ou peu vitreuses conduisent à des Andosols non allophaniques (ALUANDOSOLS, R.P., AFES, 1995).

Mots clés

Andosol, Vosges, Massif Central, sols de montagne, roche-mère, pédogenèse.

SUMMARY

PARENT MATERIAL AND ANDOSOLISATION IN TEMPERATE MOUNTAIN ENVIRONMENT

A comparison recent pyroclastic rocks - old volcanic massive rocks

In the Vosges mountains, the occurrence of Andosols is now well established, but these Andosols are almost devoid of allophane and show high amounts of stable and immobile organo-metallic complexes. They cover only a small area as their development needs the union, on the one hand, of humid climatic conditions allowing mineral weathering and cold temperatures reducing organic matter mineralisation by biological activity, and on the other hand, of basic parent rock with high amounts of weatherable minerals. However, even if

the favourable conditions are combined, this process shows a weak stage of development compared with andosolisation in the Massif Central.

A detailed comparative study has been conducted on two profiles, which both belong to the highest andosolisation degree in the Vosges and in the Chaîne des Puys.

The chemical composition of the parent rock appears to be the main factor directing pedogenesis. The development stage of the process is mainly governed by the rock's texture, mineralogy and compactness. In the Vosges mountains, the lack of loose pyroclastic materials rich in glass can explain some particularities of andosolisation. The basic volcanic rocks, massive, with little or none glass, leads to non allophanic Andosols (ALUANDOSOLS, R.P., AFES, 1995).

Key-words

Andosol, Vosges, Massif Central, mountain soils, parent rock, pedogenesis

RESUMEN

ROCAS-MADRES Y ANDOSOLIZACIÓN EN MEDIO MONTAÑOSO TEMPLADO. Comparación piroclastos recientes - rocas-madres masivas antiguas

La existencia de Andosoles en los Vosgos está hoy bien demostrado, pero estos Andosoles son casi totalmente deprovisto de alófanos y ricos en complejos organo-minerales estables y no movibles. Su extensión geográfica es reducida porque su desarrollo exigía la conjugación de una parte de condiciones climáticas húmedas propicias a la alteración de los minerales y de condiciones climáticas frías que debilitan la actividad biológica que mineralizan la materia orgánica, del otro lado de la presencia de rocas-madres básicas ricas en minerales alterables. Sin embargo, cuando las condiciones propicias a la andosolización son reunidas, el grado de desarrollo del proceso es moderado en frente de lo que se puede encontrar en el Macizo Central.

Una comparación minuciosa se investigó en dos estaciones, representativas cada una de la andosolización que se expresa mejor en los Vosgos en la Cadena de los Cerros.

La composición química de la roca madre aparece como el principal responsable de la orientación de la pedogénesis. Su textura, su composición mineralógica, su compactación, son determinantes en el grado de desarrollo del proceso. En los Vosgos, la ausencia de materiales piroclásticos vítreos, sueltos, explica las particularidades de la andosolización. Las rocas volcánicas básicas masivas, no o poco vítreos conducen a Andosoles no alofánicos (ALUANDOSOLS, RP AFES 1995).

Palabras claves

Andosol, Macizo Central, suelos de montaña, roca-madre, pedogénesis.

Les caractéristiques et les conditions de formation des Andosols sont bien connues aujourd'hui, ainsi que les processus d'andosolisation. Il est admis par tous les pédologues que deux facteurs fondamentaux conditionnent son développement : un climat humide et une roche-mère éminemment altérable, la plus favorable étant un matériel volcanique, plus ou moins vitreux, finement divisé, tel que cendres ou scories (Smith, 1978; Leamy, 1984; Shoji *et al.*, 1985; Wada *et al.*, 1986; Delvaux, 1988; Parfitt, 1990; Quantin, 1991). L'andosolisation peut s'exercer aussi sur des roches volcaniques massives plus ou moins vitreuses (basaltes, andésites) et même parfois sur d'autres roches riches en minéraux altérables, plutoniques (diorites, gabbros) ou métamorphiques (schistes) (García-Rodeja *et al.*, 1987; Baumler et Zech, 1994).

En France, les Andosols sont bien représentés sur roches volcaniques tertiaires et quaternaires, sous climat montagnard, dans le Massif Central. Tous les degrés de l'andosolisation peuvent y être rencontrés, notamment des Andosols typiques pourvus de quantités appréciables d'allophanes (Hétier, 1975; Moineau, 1977).

Dans les Vosges, où quelques sols andiques ont été signalés depuis longtemps (Duchaufour et Souchier, 1966; Hétier, 1968), un nouvel inventaire conduit systématiquement (Zida, 1994; Aran, 1998) a mis en évidence la présence de véritables Andosols, respectant les normes actuelles des classifications internationales. Toutefois ceux-ci sont relativement rares et quasiment dépourvus d'allophanes.

Dans ces deux massifs montagneux, le développement complet de l'andosolisation et l'aboutissement à un profil de type Andosol obéissent aux conditions habituelles, rappelées précédemment, c'est-à-dire :

- un climat très humide, sinon l'évolution pédologique conduit à des intergrades brunifiés voire à des Sols Bruns. C'est donc seulement dans les parties les plus fortement arrosées de ces massifs, à des altitudes passablement élevées, supérieures à 800 ou 1000 m d'altitude, au niveau des étages montagnards moyens et supérieurs, que cet environnement peut être rencontré;

- des roches éruptives de composition chimique basique, très altérables peuvent seules conduire à ces résultats. Des roches volcaniques légèrement acides (andésites, trachytes) induisent la formation d'autres profils intergrades (sols andopodzoliques) parfois même des Podzols pour les plus acides (rhyolites) (Hétier, 1975; Aran, 1998).

En somme, la présence d'Andosols dans les Vosges peut apparaître tout à fait logique, dès lors que les conditions de fonctionnement du processus d'andosolisation peuvent être réalisées. Comme les sites capables d'offrir ces conditions favorables sont peu nombreux, la fréquence et l'extension géographique de ces sols demeurent évidemment faibles. Toutefois, une interrogation subsiste à propos du degré de

développement du processus de pédogenèse : dans les Vosges, il est toujours modeste et ne produit pas d'allophanes, alors que dans le Massif Central il peut s'exercer pleinement avec formation d'allophanes. Afin d'expliquer cette différence, on a comparé deux stations soigneusement sélectionnées et tout à fait représentatives l'une et l'autre de l'andosolisation la mieux exprimée dans chacun des deux massifs montagneux.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Choix des stations

La station vosgienne de référence (*Annexe*) a été sélectionnée après une prospection menée sur tous les sites du massif offrant des conditions de roche-mère et de climat semblant propices à l'andosolisation et après échantillonnage et analyses d'une trentaine de profils (Zida, 1994; Aran, 1998). Elle est située dans les Vosges méridionales, dans le massif du Rossberg, au lieu-dit Gsang, à 1050 m d'altitude (*figure 1*).

Pour le Massif Central, on a retenu une station sur le Puy de Mercoeur (*Annexe*) à 1150 m d'altitude dans la Chaîne des Puys (*figure 1*), d'après les travaux de Hétier (1975) et de Moineau (1977) qui s'appuient sur de larges inventaires effectués par ces auteurs dans le Cantal, l'Aubrac, la Chaîne des Puys et le Velay.

Ces deux stations possèdent beaucoup de similitudes :

1 - Des durées d'activité du processus de pédogenèse relativement courtes :

L'évolution du sol vosgien se déroule depuis 10000 à 11000 ans au maximum, c'est-à-dire postérieurement à la disparition des glaciers würmiens qui ont recouvert et mis à nu la plupart des roches des Hautes Vosges.

La mise en place de l'appareil volcanique de Mercoeur a été datée de l'holocène, entre 7000 et 6000 ans BP (Hétier, 1975).

2 - Les conditions climatiques, froides et très humides, sont sensiblement équivalentes :

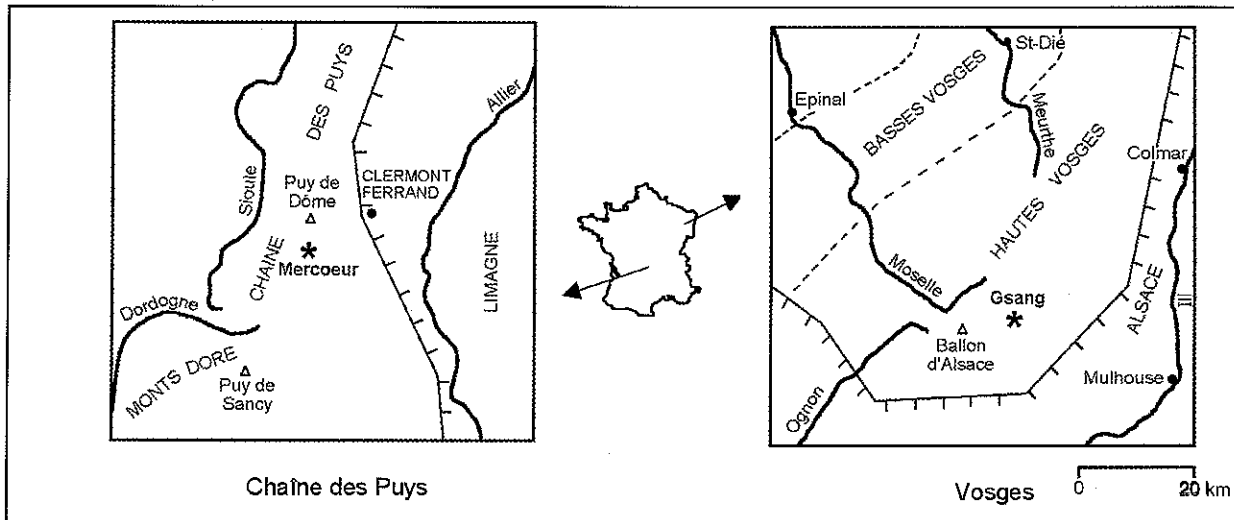
les deux stations sont situées en moyenne montagne, sous les latitudes tempérées, à des altitudes voisines, avec des climats montagnards frais. On ne possède pas de relevés météorologiques précis pour chacun des sites, mais les données fournies par les stations de mesures les plus proches peuvent être extrapolées de manière satisfaisante. Ainsi, pour la station vosgienne, la pluviométrie moyenne annuelle peut être estimée à 1800/1900 mm et la température moyenne annuelle aux environs de 5 à 6 °C, tandis que pour la station de la Chaîne des Puys, elles peuvent être évaluées respectivement à 1500/1600 mm et 6 °C environ.

3 - Dans les deux cas, la végétation naturelle est une hêtraie :

- dans les Vosges, une hêtraie claire accompagnée d'une

Figure 1 - Localisation des sites d'étude (*) dans la Chaîne des Puys (Mercoeur) et dans les Vosges (Gsang).

Figure 1 - Localisation of site study (*) in the Chaîne des Puys (Mercoeur) and in the Vosges (Gsang).



flore plutôt acidiphile (*Deschampsia flexuosa*, *Luzula maxima*, *Polytrichum commune*);

- dans la chaîne des Puys, une hêtraie mésophile où de nombreux résineux (épicéas) ont été introduits à une époque récente.

4 – Les deux profils sont implantés dans des conditions analogues, dans la partie amont d'un versant, sur des pentes modérées, orientées N-NW pour l'une et N-NE pour l'autre.

5 – Enfin, les deux sols se développent sur des roches-mères volcaniques de composition chimique basique voisine: basalte pour le sol vosgien, scories basaltiques pour le sol de la chaîne de Puys.

Cependant, ces deux roches diffèrent notablement dans leur textures, leurs compositions minéralogiques, leurs architectures:

- le basalte vosgien est une roche sombre, compacte, massive, constituée de plagioclases (labrador), de pyroxènes (augite), de périclites chloritisés et très peu de verres;

- la scorie basaltique est un matériau sablo-graveleux, noir ou rougeâtre, meuble, à texture vésiculée, contenant des plagioclases, des pyroxènes, de l'olivine et une forte proportion de verres.

Analyses de laboratoire

Les méthodes de caractérisation mises en œuvre sont toutes des méthodes largement éprouvées et couramment utilisées en pédologie.

Mise en évidence des propriétés andiques

- La somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ est déterminée par une extraction

à froid avec l'oxalate d'ammonium tamponné à pH 3 par de l'acide oxalique (Schwertmann, 1964). Après centrifugation, Al_0 , Fe_0 et Si_0 sont dosés par spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A.) dans le surnageant.

- La densité apparente est estimée par la méthode du cylindre.

$$Da = \frac{\text{Masse de l'échantillon séché à } 105^\circ\text{C}}{\text{Volume apparent}}$$

- La rétention de phosphore (Rét. P) est évaluée par la méthode de Blakemore *et al.* (1981) modifiée: le phosphore résiduel dans la suspension de sol après agitation pendant 24 heures est dosé par chromatographie ionique sur un chromatographe Dionex 2000i et non par colorimétrie comme indiqué dans la méthode originale.

Analyse des constituants minéraux

- Les analyses granulométriques ont été effectuées par la méthode de la pipette de Robinson après prétraitement par l'oxalate d'ammonium pH 3 pour détruire les ciments minéraux mal cristallisés ou organo-minéraux, destruction de la matière organique par oxydation à l'hypochlorite de sodium (Rouiller *et al.*, 1974), puis dispersion dans l'eau par agitation en présence de résines saturées Na (Bartoli *et al.*, 1991). Ces prétraitements sont indispensables pour disloquer les microagrégats de la taille des limons, très stables et très abondants.

- Les fractions fines ont été séparées par sédimentation et siphonages et recueillies pour des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X. Ces analyses portent sur des poudres pour les limons, sur des lames orientées pour les argiles (après saturation Mg). Ces dernières ont fait l'objet de

tests de gonflement à l'éthylène glycol et de chauffage à 550 °C.

- Les analyses chimiques des éléments totaux ont été obtenues par fusion alcaline (méthode Jeanroy, 1974), puis dosage de tous les éléments par I.C.P. (Induced Coupled Plasma).

- Extraction chimique sélective : une extraction par le pyrophosphate de sodium 0,1 M (pH 10) a été pratiquée pour évaluer les quantités de fer et aluminium associées aux substances humiques (Al_o et Fe_p) : extraction à froid pendant 16 heures, puis centrifugation énergique.

- On a pu estimer les teneurs en allophanes par la méthode de Parfitt et Wilson (1985), à partir du rapport atomique $Al_o - Al_p / Al_o$ et de la teneur en Si_o .

Analyse des constituants organiques

- Le carbone et l'azote total ont été dosés par analyseur automatique CHN Carlo Erba 1108.

- Pour caractériser les principaux constituants humiques, on a procédé d'abord à un fractionnement physique par tamisage à 50 μm (Bruckert *et al.*, 1978) puis à des extractions alcalines par le pyrophosphate de sodium et par la soude N/10. Après centrifugation, le culot renferme l'humine tandis que le surnageant contient les composés alcalino-solubles que l'on sépare ensuite par acidification à pH 2 : ces composés se partagent en une fraction précipitée (acides humiques) et une fraction en solution (acides fulviques).

Complexe d'échange

Les cations échangeables ont été extraits par une solution de cobalthexamine (Orsini et Remy, 1976) et dosés par S.A.A. La C.E.C. a été obtenue en effectuant la somme des cations

échangeables et des protons, ces derniers étant déterminés par titrimétrie.

Le pH a été mesuré dans une suspension sol-eau de rapport 1 / 2,5.

RÉSULTATS

Caractères communs aux deux profils (tableau 1)

1 - Les caractéristiques morphologiques sont très proches et ce sont les caractéristiques habituelles des Andosols :

Les deux sols sont profonds, d'aspect général très sombre, riches en matière organique, et leurs horizons sont peu différenciés.

L'humus est de type mull acif à structure grumeleuse élaborée par les vers de terre dans le sol de la chaîne des Puys ; il est de type mull-moder dans le sol vosgien avec une litière qui se décompose un peu plus lentement et beaucoup de microagrégats organiques ou organo-minéraux coprogènes produits par les arthropodes et quelques vers de terre.

Dans les deux cas, l'horizon andique A1B est tout à fait caractéristique : épais (50 à 60 cm), brun noir foncé (10YR2/1 à 10YR2/2 à l'état humide), microagrégé floconneux, friable, léger, très poreux, présentant un toucher onctueux ("smearly") à l'état humide, pulvérulent à l'état sec.

Les deux sols sont meubles, bien aérés, (caillouteux dans les Vosges), totalement colonisés par des chevelus racinaires abondants.

Tableau 1 - Caractéristiques fondamentales communes aux deux profils.

Table 1 - Main characteristics shared by the two profiles.

	Station VOSGES	Station CHAÎNE des PUYs
MORPHOLOGIE		
- Epaisseur A1B \geq 35 cm	60 cm (caillouteux)	50 cm (graveleux)
- Couleur A1B (humide)	Brun-noir (10YR2/2)	Noir (10YR2/1)
- Structure	Microagrégé floconneux	Microagrégé floconneux
- Type d'humus	Mull-moder (C/N : 18)	Mull (C/N : 13)
CRITÈRES ANDIQUES		
- $Al_o + 1/2Fe_o \geq 2\%$	2,4	7,5
- $Da \leq 0,9 \text{ cm}^3$	0,6	0,6
- Rét.P $\geq 85\%$	94	n.d.
MATIÈRE ORGANIQUE A1B		
- % global	20,5	19,7
- Taux d'humification (%)	90,5	98
- Taux d'extraction (%)	46	61
- C/N	19	15

2 - Les critères andiques sont satisfaits dans les deux profils : trois critères chimiques ou physiques au niveau de l'horizon A1B sont (à peu près) unanimement reconnus et exigés par plusieurs classifications pour identifier un Andosol :

$$Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2 \%$$

$$Da \leq 0,9 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\text{Rét. P} \geq 85 \%$$

3 - La matière organique est très abondante, notamment au niveau des horizons A1B (environ 20 %) et dans les deux sols il s'agit presque exclusivement de matière organique transformée, humifiée, et dont la part considérable (environ la moitié) extractible par les réactifs alcalins dénote l'abondance des acides fulviques et acides humiques.

4 - A ce stade, l'ensemble des données permet de conclure que les sols présentent, l'un et l'autre, toutes les qualités requises (notamment chimiques, mais aussi morphologiques et physiques) pour justifier l'appellation Andosol, quel que soit le système de classification utilisé (Soil Taxonomy, Soil Survey Staff, 1994; R.P. Français, AFES, 1995; WRB, FAO, 1998). Ils présentent, en outre, de réelles analogies, d'abord dans la morphologie et l'organisation générale des horizons, mais aussi dans certaines propriétés importantes telles que structure, porosité, consistance, quantité et qualité des matières organiques; enracinement.

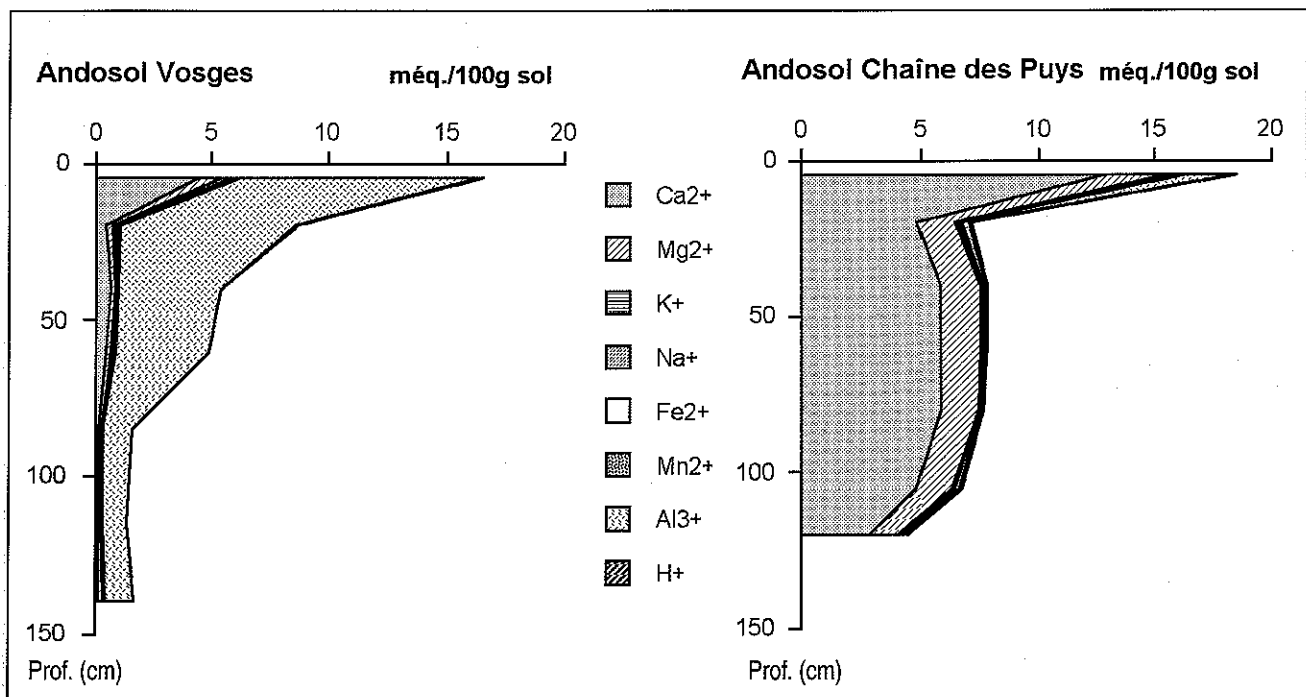
Différences entre Andosol Vosgien et Andosol de la Chaîne des Puys

pH et complexe d'échange

L'Andosol vosgien est dans l'ensemble très acide (pH_{H₂O} de 4,3 à 4,5) et très désaturé (S/T de 10 à 20 % en A1B). La garniture cationique de son complexe d'échange (figure 2) est largement dominée par le cation Al³⁺ (> 80 % de la C.E.C.). Les autres cations (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺) sont peu présents, excepté au niveau de l'horizon de surface mettant en évidence le rôle du cycle biologique. L'acidité et la faible saturation en bases du complexe d'échange traduisent un environnement fortement lixiviant où la majeure partie des ions alcalins et alcalino-terreux sont évacués hors du profil. De telles conditions sont réputées peu favorables à la formation des allophanes (Mizota et Van Reeuwijk, 1989).

L'Andosol de la chaîne des Puys est bien différent, puisque faiblement acide (pH_{H₂O} de 5,6 à 6,1), presque saturé et son complexe d'échange est occupé principalement par Ca²⁺ (à 70 %) et accessoirement par Mg²⁺ (20 % environ de la C.E.C.), tandis que l'aluminium échangeable est à peu près inexistant (figure 2). L'acidité très modérée de ce profil semble assez habituelle chez les Andosols allophaniques (Nanzoy et al., 1993).

Figure 2 - Caractéristiques du complexe d'échange des deux profils.
Figure 2 - Exchange complex characteristics in the two profiles.



Constituants secondaires amorphes ou mal cristallisés

Les principaux résultats des dissolutions sélectives effectuées à l'aide de l'oxalate d'ammonium et du pyrophosphate de sodium, ainsi que l'évaluation des allophanes sont rapportés dans le *tableau 2*. Des différences entre les deux sols apparaissent clairement.

Dans le sol vosgien, les produits amorphes ou mal cristallisés sont bien présents en quantité suffisante pour justifier l'appellation Andosol mais cependant ils apparaissent relativement peu abondants. Il y a peu de silice extractible ($Si_o < 0,6\%$) et les allophanes sont inexistantes ou presque. La majeure partie de l'aluminium est associée à la matière organique dans des complexes organo-métalliques ($Al_p/Al_o > 0,5$). L'ensemble de ces critères caractérise un "Andosol non allophanique" (Mizota et Van Reeuwijk, 1989). Plus précisément, selon les critères du R.P. (AFES, 1995) ce sol peut être rattaché aux ALUANDOSOLS et compte tenu de ses teneurs en matière organique, on peut le considérer comme un ALUANDOSOL humique. Selon les normes de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994), il fait partie des Alic Fulvudands. Il serait à rattacher aux Umbric Andosols dans la classification FAO-Unesco (Driessen et Dudal, 1991) et aux Aluandic Andosols dans le WRB (FAO, 1998).

A l'opposé, dans le sol de la chaîne des Puys, les produits solubilisés par l'oxalate, notamment Al_o et Si_o , sont beaucoup plus abondants. Les allophanes sont bien présentes tandis que la part d'aluminium associé à la matière organique semble assez faible ($Al_p/Al_o = 0,4$). Dans ce cas, on a à faire à un Andosol allophanique sensu stricto. Il est à rattacher aux SILANDOSOLS (R.P., AFES, 1995) et appartiendrait aux Eutric Pacfic Fulvudands dans la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994). Il serait à rattacher aux Mollic Andosols de la classification FAO-Unesco (Driessen et Dudal, 1991) et aux Silandic Andosols du WRB (FAO, 1998). Il convient de souligner que la présence d'allophane n'est pas le seul caractère distinctif de cet Andosol: il est aussi plus riche en éléments amorphes (Al, Fe, Si); pour cette raison les classifications de type "fuzzy"

(flou) décrivent ce type de profil comme "profil de référence"; l'Andosol vosgien serait classé comme "intergrade brunifié" (Mazaheri *et al.*, 1995).

Texture et minéralogie des fractions fines

Dans les deux sols, on observe, entre la base et le sommet des profils, un accroissement important de la part des fractions fines au détriment des fractions sableuses. Ceci peut être interprété comme le résultat d'une microdivision des particules et une argilisation. Toutefois, un examen plus approfondi fait apparaître des différences significatives (*figure 3*).

L'argilisation est plus forte dans l'Andosol vosgien: en effet, le taux d'argile atteint déjà 10 % dès la base du profil, au contact de la roche, puis s'accroît et dépasse 30 % dans les horizons supérieurs. La texture de l'horizon andique A1B peut être qualifiée de limono-argileuse.

Dans l'Andosol du Massif Central, la fragmentation mécanique des sables grossiers est importante, nourrissant la croissance des fractions sables fins, limons grossiers et surtout limons fins. L'argilisation progresse régulièrement de C vers A1B, mais le taux d'argile proche de 0 % en C, n'excède pas 12 % en A1B11. La texture est plutôt celle d'un limon sableux.

Au plan minéralogique, la composition des fractions fines de ces deux sols diverge totalement (*tableau 3*).

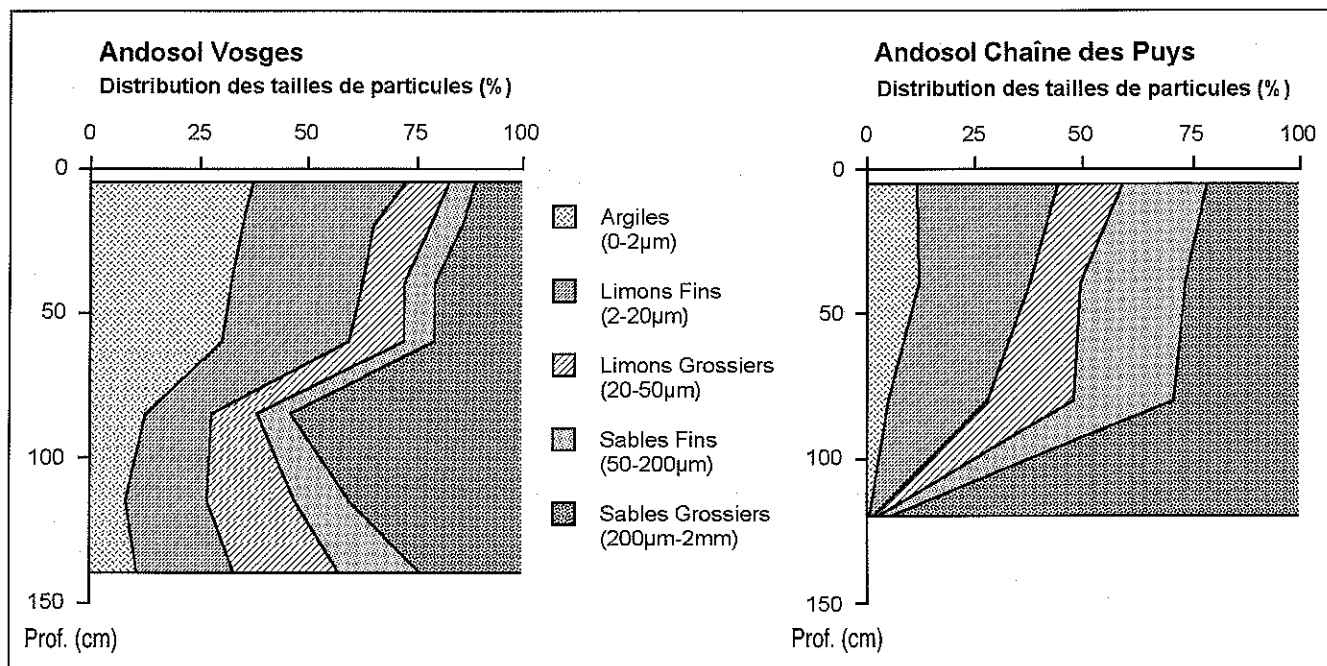
Deux minéraux prédominent dans la fraction argileuse de l'Andosol vosgien: il s'agit de la chlorite et de ses produits d'altération, les vermiculites (ainsi que les interstratifiés chlorite/vermiculite). Ces dernières se développent aux dépens de la première, surtout dans les horizons supérieurs. Une faible quantité de minéraux micacés (illites) est toujours présente. Les fractions limoneuses contiennent principalement des feldspaths, essentiellement plagioclases, des chlorites et quelques micas.

Au sein des argiles de l'Andosol de la chaîne des Puys, la kaolinite et l'halloysite sont très largement majoritaires, et accompagnées de quelques illites et vermiculites. Les fractions limons et sables renferment surtout des feldspaths (plagioclases) ainsi que des augites et des fragments vitreux souvent vésiculaires.

Tableau 2 - Résultats des extractions sélectives effectuées sur les horizons andiques A1B

Table 2 - Selective dissolution results of the andic A1B horizons

VOSGES		CHAÎNE DES PUY	
- $Al_o + 1/2Fe_o =$	2,4 %	- $Al_o + 1/2Fe_o =$	7,5 %
- $Si_o =$	0,2 %	- $Si_o =$	1,8 %
- $Al_p/Al_o =$	0,8	- $Al_p/Al_o =$	0,4
- Allophanes =	1 à 2 %	- Allophanes =	10 à 15 %
ANDOSOL NON ALLOPHANIQUE		ANDOSOL ALLOPHANIQUE	

Figure 3 - Composition granulométrique de la terre fine des deux profils.**Figure 3** - Particle-size distribution of the fine earth fraction in the two profiles.**Tableau 3** - Composition minéralogique des roches-mères et des argiles des horizons andiques.**Table 3** - Mineralogical composition of the parent rock and the clay fraction in the andic horizons.

VOSGES	CHAINE DES PUY
Roche-mère	
Basalte massif - Labrador (séricite, chlorite) - Augite (chlorite) - Péridot chloritisé - Très peu de verres	Scories basaltiques - Plagioclase - Pyroxènes - Olivine - Verre
A ₁ B : Granulométrie et minéralogie des argiles	
Argilisation - Chlorite - Vermiculite - Illite	Faible argilisation - Kaolinite - Halloysite - Illite - Vermiculite

Au total, l'argilisation plus importante dans le sol vosgien correspond principalement à la présence de minéraux argileux 2/1, hérités ou transformés. Cette argilisation est déjà largement ébauchée dans la roche-mère. On peut y observer la présence de plagioclase séricitisé et de très nombreuses chlorites issues de la transformation des périclites et aussi de pyroxènes. Tous ces minéraux argileux se retrouvent dans le sol où ils subissent microfragmentation et vermiculitisation croissant de la base vers le haut du profil.

Dans le sol de la chaîne des Puys, l'argilisation est plus faible et représentée essentiellement par des minéraux 1/1, sans doute néoformés (Hétier, 1975) à partir de produits d'altération des verres et de silicates altérables tels que des plagioclases ou des périclites.

Evolution de la composition chimique

Les deux roches-mères présentent des compositions chimiques assez voisines : ce sont des roches volcaniques basiques sous saturées, tout particulièrement celle de la chaîne des Puys.

Ces deux matériaux ne renferment que des constituants très altérables ou passablement altérables. De ce fait, aucun d'entre eux ne peut être utilisé comme invariant et servir de base à l'établissement de bilans précis de l'altération. On peut cependant envisager une étude de l'évolution de la composition chimique de la terre fine des horizons A1B par rapport à celle de la roche-mère (tableau 4). A partir des analyses chimiques des éléments majeurs, on peut relever le sens et l'importance de leurs variations relatives : on voit ainsi la plupart des éléments régresser du bas vers le haut du profil, quelques uns par contre augmentent. Ces derniers sont les moins affectés par les soustractions et on peut rapporter les taux de variations des différents éléments à celui qui augmente le plus vers le haut du profil (c'est à dire le moins mobile) et que l'on considérera comme "référence". Dans le cas présent, on a choisi l'aluminium (figure 4) mais le fer conduirait à des résultats semblables.

Dans le sol vosgien, les quantités d'éléments perdus par soustraction semblent moins importantes que dans l'autre sol (excepté pour le calcium) et l'accroissement relatif des éléments les moins mobiles semble assez modeste. Ceci traduit une altération relativement modérée. Les pertes les plus fortes s'observent pour le calcium et le magnésium, c'est à dire des éléments présents dans la roche-mère au sein de silicates ferromagnésiens (chlorites, pyroxènes) ou calciques (plagioclases) et dont la libération nécessite l'altération de ces édifices silicatés.

Dans le sol de la chaîne des Puys, les pertes d'un côté et les augmentations relatives de l'autre semblent plus importantes : ceci suggère une altération plus intense et peut-être plus rapide. Les éléments soustraits massivement, potassium et sodium, ainsi que la silice, ne peuvent être empruntés qu'à des constituants ayant une composition de feldspaths alcalins. Or, ces minéraux ne sont pas présents dans la roche-mère, mais ils peuvent être représentés virtuellement dans la phase vitreuse et celle-ci est bien présente et réputée très altérable. Les pertes de magnésium et calcium moins élevées laissent supposer une certaine altération des silicates ferromagnésiens et calciques mais proportionnellement de moindre importance.

DISCUSSION - CONCLUSION

Des Andosols existent bien dans les Vosges, avec les caractéristiques habituelles de ces sols, couleur sombre, horizons humifères très épais, structure microagrégée floconneuse, meuble, toucher onctueux à l'état humide, critères chimiques et physiques reconnus de l'horizon andique. Cependant, l'andosolisation est toujours modeste vis-à-vis des critères chimiques requis, tandis que l'extension géographique des sols reste peu importante. Ce sont des Andosols plus ou moins dépourvus d'allophanes mais riches en complexes organo-métalliques stables et non mobiles. Leur développement

Tableau 4 - Composition chimique des roches-mères et de la terre fine des horizons majeurs des deux sols.

Table 4 - Chemical composition of the parent rock and the fine earth fraction in the main horizons of the two soils

Profil	H _z	Prof. (cm)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.
Andosol Vosges	A1B12	30-50	55,39	23,54	10,53	0,13	2,04	1,04	4,26	1,28	1,43	0,35	29,54
	A1B13	50-70	54,71	24,52	9,71	0,11	2,20	1,29	4,50	1,34	1,32	0,30	17,73
	R		51,95	19,90	9,22	0,16	3,07	7,07	5,11	1,98	1,23	0,32	4,08
Andosol Chaîne des Puys	A1B11	30-50	35,25	24,80	18,36	0,30	7,53	6,89	1,66	0,30	3,78	1,13	33,33
	A1B12	60-80	35,93	24,63	18,02	0,30	7,05	7,40	1,73	0,29	3,63	1,01	30,61
	R*		47,14	16,57	11,08	0,20	7,00	10,28	3,55	1,46	2,72	n.d.	n.d.

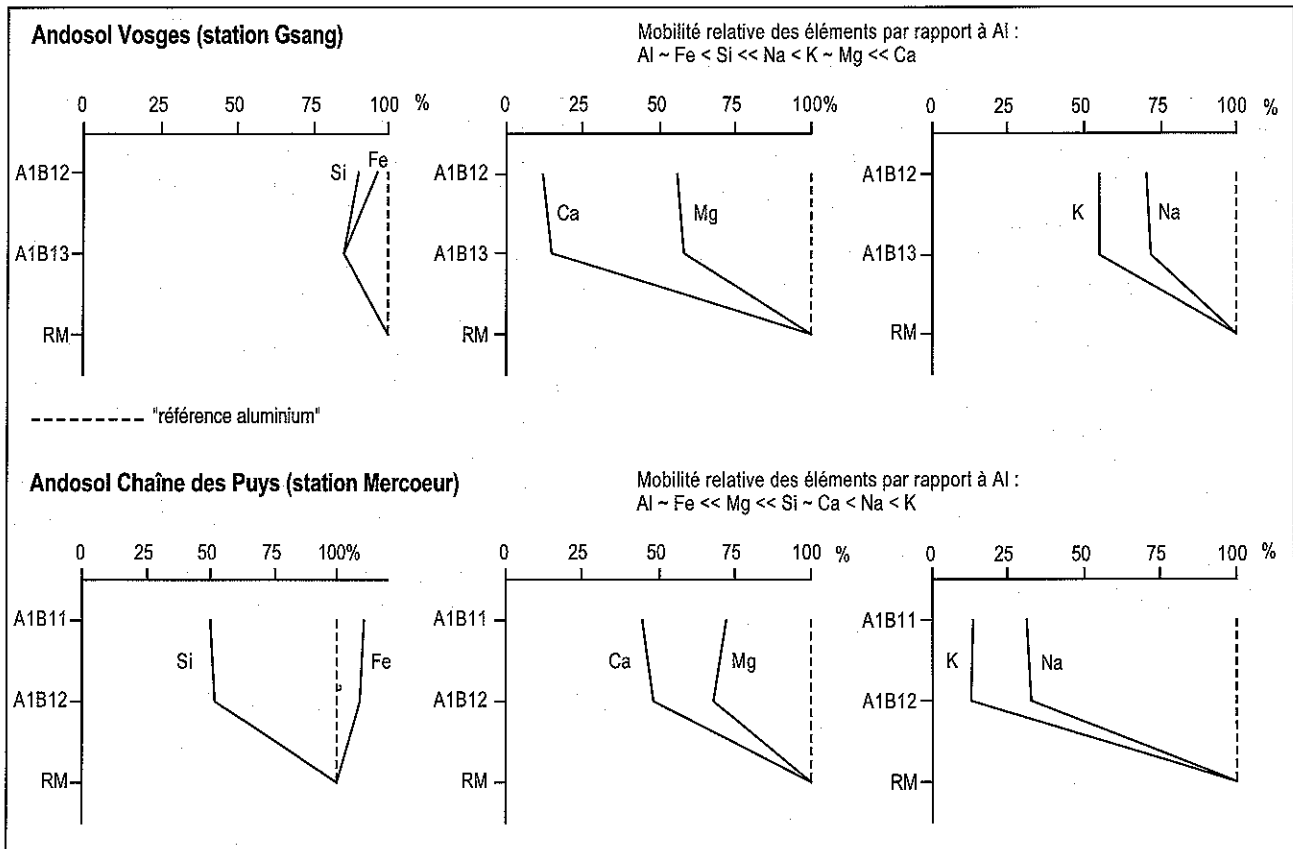
H_z : Horizon

P.F. : Perte au Feu

* Hétier (1975)

Figure 4 - Taux de variation par rapport à "l'élément de référence".

Figure 4 - Variation rate with respect to the "reference element".



exige à la fois des conditions climatiques très humides propices à l'altération et une roche-mère basique riche en minéraux altérables. Ces conditions climatiques favorables ne peuvent être rencontrées que dans les parties les plus élevées du massif, à l'étage montagnard supérieur dans les Hautes Vosges. Cette localisation réduite à la frange supérieure du massif restreint beaucoup l'extension possible des Andosols et implique par ailleurs une durée de pédogenèse relativement courte puisque postérieure à la dernière glaciation, et donc n'excédant pas 10000 à 12000 ans. Les roches-mères basiques (basaltes ou équivalents) riches en silicates altérables (plagioclases, pyroxènes, péridots plus ou moins chloritisés), mais pauvres en verre volcanique sont assez peu fréquentes. Elles libèrent en premier lieu du fer et de l'aluminium, tout en permettant une certaine argilisation (principalement héritage et transformation de minéraux). Les éléments solubles, alcalins et alcalino-terreux ainsi que la silice libérée sont en grande partie lixiviés, d'où une acidification ainsi qu'une insuffisance de silice pour permettre la formation d'allophanes. Les hydroxydes alumineux et ferriques demeurent sur place et sont disponibles pour s'as-

socier et fixer les molécules humiques, acides fulviques et acides humiques, en constituant des complexes organo-métalliques très fortement chargés en métaux et de ce fait non mobiles. L'accumulation, in situ, de ces complexes conduit à l'édification de l'horizon andique. Mais l'altération des silicates étant plus lente que celle de verres volcaniques, les quantités d'aluminium et de fer provenant de cette altération sont notables certes mais néanmoins relativement limitées. L'andosolisation apparaît donc moins rapide et moins poussée que sur des roches vitreuses et très divisées.

Dans le Massif Central (chaîne des Puys), sous des conditions climatiques sensiblement identiques et pour une durée de pédogenèse voisine, mais sur des matériaux pyroclastiques récents, meubles, microdivisés, riches en verres, avec une réserve totale en bases élevée, l'altération intense rapide s'exerce en priorité sur les constituants vitreux les plus fragiles. Celle-ci libère abondamment l'aluminium et la silice ainsi que les alcalins qui maintiennent le pH du sol à un niveau relativement élevé. Dans ces conditions, l'andosolisation s'exprime pleinement avec recombinaison partielle de la silice et de l'alu-

minium pour former des allophanes et peu d'argiles. Ceci explique que seul ce type d'Andosol soit considéré comme un "profil de référence" dans une classification de type "fuzzy" (Mazaheri *et al.*, 1995).

Dès lors que les conditions climatiques sont très humides, l'ensemble des caractères de la roche-mère se révèlent très importants dans la pédogenèse montagnarde. D'une part, sa composition chimique apparaît comme responsable principal dans l'orientation de la pédogenèse: l'andosolisation exige des compositions chimiques basiques. D'autre part, les autres caractères de cette roche-mère, sa texture, sa composition minéralogique, sa microfragmentation, deviennent déterminants dans le degré de développement du processus.

Toutes les conditions favorables à un bon développement de l'andosolisation peuvent être réunies dans la chaîne des Puys: humidité, roches-mères à composition chimique basique et sous forme de pyroclastes plus ou moins finement divisés et vitreux. Dans les Vosges, sous conditions climatiques voisines, l'andosolisation est possible mais l'obstacle majeur à la formation d'allophanes réside dans l'absence de matériaux pyroclastiques, pyroclastes et verre allant souvent de pair. Cette absence peut être attribuée à l'ancienneté du massif et de ses roches-mères. Les matériaux pyroclastiques, meubles, sont très vulnérables à l'érosion et si vraisemblablement de tels matériaux ont pu exister, aucun n'a pu être conservé depuis les temps hercyniens ou permien. Les roches volcaniques basiques, massives, microlithiques et peu vitreuses sont conservées et conduisent à une andosolisation modérée sans allophanes mais riche en complexes organo-métalliques.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1995 - Référentiel Pédologique, INRA éd., Paris, 332 p.
- Aran D., 1998 - Andosolisation dans les Hautes Vosges. Conditions de développement et comparaison avec les autres processus de pédogenèse. Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy I, 202 p.
- Bartoli F., Burlin G. et Herbillon A.J., 1991 - Disaggregation and clay dispersion of Oxisols: Na resin, a recommended methodology. *Geoderma*, 49, 301-317.
- Baumler R. et Zech W., 1994 - Characterization of Andisols developed from nonvolcanic material in eastern Nepal. *Soil Sci.*, 158, 211-217.
- Blakemore L.C., Searle P.L. et Daly B.K., 1981 - Methods for chemical analysis of soils. N.Z. Soil Bur. Sci. Rep. 80, Lower Hutt, New Zealand, 44-45.
- Brückert S., Andreux F., Correa A., Ambouta K.J.M. et Souchier B., 1978 - Fractionnement des agrégats, appliqué à l'analyse des complexes organo-minéraux des sols. In: Proc. 11^e Congrès A.I.S.S. Edmonton, Canada.
- Delvaux B., 1988 - Constituants et propriétés de surface des sols dérivés de pyroclastes basaltiques du Cameroun occidental. Approche génétique de leur fertilité. Thèse de doctorat de Sciences Agronomiques, Université Catholique de Louvain, 335 p.
- Driessen P.M. et Dudal R. (Eds.), 1991 - The Major Soils of the World. Agricultural University Wageningen & Katholieke Universiteit Leuven, 310 p.
- Duchaufour P. et Souchier B., 1966 - Sols andosoliques et roches volcaniques des Vosges. *Sci. de la Terre*, T. XI, n° 3, 345-365.
- FAO, 1998 - World Reference Base for Soil Resources. Deckers J.A., Spaargaren O.C., Nachtergaele F.O., Oldeman L.R. et Brinkman R. (Eds.), *World Soil Resources* 84, 88 p.
- García-Rodeja E., Silva B.M. et Macías F., 1987 - Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *J. Soil Sci.*, 38, 573-591.
- Hétier J.-M., 1968 - Etude de quelques sols andosoliques sur roches volcaniques primaires des Vosges. Thèse de doctorat d'université, Université de Nancy I, 54 p.
- Hétier J.-M., 1975 - Formation et évolution des Andosols en climat tempéré. Thèse de doctorat en Sciences Naturelles, Université de Nancy I, 194 p.
- Jeanroy E., 1974 - Analyse totale par spectrométrie d'absorption atomique des roches, sols, minerais, ciments, après fusion au métaborate de strontium. *Analisis*, 2, 703-712.
- Leamy M.L., 1984 - Andisols of the world. In: *Congreso Internacional de Suelos Volcanicos, Comunicaciones*, Universidad de La Laguna, Secretario de Publicaciones, serie informes 13, 368-387.
- Mazaheri S.A., Koppi A.J. et McBratney A.B., 1995 - A fuzzy allocation scheme for the Australian Great Soil Groups classification system. *European J. of Soil Sci.*, 46, 601-612.
- Mizota C. et Van Reeuwijk L.P., 1989 - Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. *Soil Monograph* 2, ISRIC, Wageningen, 185 p.
- Moinereau J., 1977 - Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay-Vivarais-Coirons). Thèse de doctorat en Sciences, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 139 p.
- Nanzyo M., Dahlgren R.A. et Shoji S., 1993 - Chemical characteristics of volcanic ash soils. In: *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*. Shoji S., Nanzyo M. et Dahlgren R.A. (Eds.), *Developments in Soil Science* 21, 145-187.
- Orsini L. et Remy J.-C., 1976 - Utilisation du chlorure de cobalthexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Sci. du Sol*, 4, 269-275.
- Parfitt R.L., 1990 - Soils formed in tephra in different climatic regions. In: *14 th International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan, Vol. VII*, 134-139.

- Parfitt R.L. et Wilson A.D., 1985 - Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In: Volcanic soils. Fernandez-Caldas E. et Yaalon D.H. (Eds.), Catena supplement 7, 1-8.
- Quantin P., 1991 - Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogenèse initiale en milieu tropical. Thèse de doctorat en Sciences Naturelles, Université de Strasbourg, 470 p.
- Rouiller J., Burtin G. et Souchier B., 1974 - Note sur l'utilisation de l'hypochlorite de sodium dans l'analyse granulométrique des sols. Bull. ENSAIA, T. XVI, Fasc. I-II, 89-98.
- Schwertmann U., 1964 - Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. Zeitsch. Pflanzenern. Bodenkunde, 105, 194-202.
- Shoji S., Ito T., Saigusa M. et Yamada I., 1985 - Properties of nonallophanic Andosols from Japan. Soil Sci., 140, 264-277.
- Smith G.D., 1978 - A preliminary proposal for the reclassification of Andepts and some Andic subgroups (ré-imprimé sous The Andisol Proposal, 1978, N.Z. Soil Bureau Record, 96, 1984).
- Soil Survey Staff, 1994 - Keys to Soil Taxonomy, 6th edition. USDA-SCS, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., 306 p.
- Wada K., Kakuto Y. et Ikawa H., 1986 - Clay minerals, humus complexes, and classification of four "andepts" of Maui, Hawaii. Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 1007-1013.
- Zida M., 1994 - Andisols et sols andiques dans le Massif Vosgien. Conditions de développement, caractéristiques et classification. D.E.A. de Pédologie, Université de Nancy I, 52 p

ANNEXE : DESCRIPTION DES DEUX PROFILS DE RÉFÉRENCE**Andosol Vosgien**

Localisation : Masevaux 1 : 25 000 - N 53,149 gr; E 5,188 gr.

Altitude : 1 050 m.

Topographie : 20 m sous arête de croupe.

Pente : Moyenne.

Exposition : N-NW.

Drainage : Bon.

Température (moyenne annuelle) : ~ 5 à 6 °C.

Pluviométrie (moyenne annuelle) : ~ 1800 - 1900 mm.

Roche-mère : Basalte.

Végétation : Hêtre, rares sapins; canche, luzules; polytrics.

Description**A0A1 (0-10 cm)**

Litière de feuilles de hêtre peu épaisse (2 cm); feuilles d'un an ou deux; transition brutale. Mull-modér; noir (humide 10YR2/1 - sec: 10YR3/2); structure fibreuse; microagrégats entre les fibres; friable; meuble; aéré; très léger; poreux; graveleux; nombreuses racines fines (canche); quelques vers de terre; transition progressive.

A1B (10-70 cm)

Brun très foncé (humide: 10YR2/2 - sec: 10YR3/3 de 10 à 30 cm et 10YR3/4 de 30 à 70 cm); limono-sableux; structure grumeleuse; sous-structure microagrégée floconneuse; meuble; friable; fragile; très poreux; consistance tixotropique; nombreux cailloux; nombreuses racines fines et moyennes.

Bw (70-100 cm)

Brun jaunâtre foncé (humide 10YR3/4 - sec: 10YR5/6); limono-sableux; structure en agrégats anguleux à tendance polyédrique; sous-structure microagrégée floconneuse; meuble; friable; nombreux cailloux; nombreuses racines.

BC (100-130 cm)

Brun jaunâtre foncé (humide 10YR3/4 - sec: 10YR5/6); limono-sableux; structure en agrégats anguleux à tendance polyédrique; toucher tixotropique; caillouteux; quelques racines moyennes.

C (130-150 cm)

Arène; brun jaunâtre foncé (humide: 10YR3/4 - sec: 10YR5/6); limoneuse; fine; massive; assez tassée; quelques cailloux; peu de racines.

R Basalte compact.

Horiz.	C (%)	C/N	pH H ₂ O	%					CEC (méq/100 g)	S/T (%)	Al _o	Fe _o (%)
				A	LF	LG	SF	SG				
A ₀ A ₁ (0-10)	19,4	18	4,3	37,2	35,5	10,2	6,1	11,0	16,6	35,6	1,16	0,96
A ₁ B ₁ (10-30)	11,7	19	4,3	34,5	30,7	13,2	7,3	14,3	8,7	11,5	1,54	1,06
A ₁ B ₂ (30-50)	10,0	19	4,5	32,1	30,2	9,9	7,0	20,8	5,4	18,1	1,84	1,14
A ₁ B ₃ (50-70)	9,1	21	4,5	30,2	29,2	12,5	7,1	21,0	4,9	16,7	2,16	1,14
Bw (70-100)	3,3	21	4,6	12,3	15,6	10,3	7,5	54,3	1,6	24,5	2,20	0,58
BC (100-130)	1,7	15	4,7	8,1	18,7	19,8	12,7	40,7	1,4	28,1	1,44	0,40
C (130-150)	0,6	15	4,7	10,3	22,2	24,4	18,8	24,3	1,7	27,4	0,60	0,26

Andosol Chaîne des Puys

Localisation: Veyre Monton 1: 50 000 - N 50,80 gr; E 0,683 gr.

Altitude: 1 150 m.

Topographie: Mi-pente.

Pente: Faible.

Exposition: N-NE.

Drainage: Bon.

Température (moyenne annuelle): ~ 6 °C.

Pluviométrie (moyenne annuelle): ~ 1500 - 1600 mm.

Roche-mère: Scories basaltiques.

Végétation: Hêtraie à flore mésophile et nitratophile.

Description

AOA1 (0-10 cm)

Mull; noir (humide: 10YR2/1 - sec: 10YR3/2); limoneux; structure grumeleuse fine.

A1B11 (10-60 cm)

Noir (humide: 10YR2/1 - sec: 10YR3/2); limoneux; structure grumeleuse très fine à microagrégée-fluffy; consistance tixotrope; très poreux; nombreuses racines fines et moyennes; transition progressive.

A1B12 (60-90 cm)

Brun très foncé (humide: 10YR2/2 - sec: 10YR3/3); plus cohérent; limoneux; structure grumeleuse à microagrégée; un peu moins riche en racines; transition brutale avec l'horizon sous-jacent.

B/C (90-120 cm)

Brun foncé (humide: 7,5YR3/2 - sec: 10YR4/6); scories altérées à taches rouilles nombreuses; graveleux.

C Brun foncé (humide: 7,5YR3/4 - sec: 10YR4/6); scories fraîches.

Horiz.	C (%)	C/N	pH H ₂ O	A	LF	LG	SF	SG	CEC (mécq/100 g)	S/T (%)	Al _o	Fe _o (%)
				%								
A ₀ A ₁ (0-10)	23,0	13	5,1	11,3	32,9	14,7	19,3	21,8	18,5	86,9	3,30	2,86
A ₁ B ₁₁ (10-60)	9,8	15	5,6	12,1	25,7	11,4	23,8	27,0	7,5	95,6	5,5	3,9
A ₁ B ₁₂ (60-90)	7,1	16	6,1	4,7	23,6	19,6	22,8	29,3	7,7	98,8	5,7	3,9
B/C (90-120)	0,9	23	6,5	nd	nd	nd	nd	nd	6,7	99,3	2,80	3,68
C (> 120)	0,9	23	6,4	0,6	1,0	0,6	3,2	94,6	4,4	97,7	2,14	2,54