# Spécificités des sols volcaniques du Massif central : bénéfices et contraintes pour la gestion forestière

**Philippe Legrand - François Bartoli - Thomas Curt**

Quantin (2004) estime que les sols volcaniques couvrent environ 6 000 km² en France continentale et sont surtout présents dans le Massif central (5 600 km² dont près de la moitié dans le Cantal). Dans cette région, on peut distinguer les formations volcaniques anciennes (de 20 à 0,25 millions d'années : Cantal, Cézallier, monts Dore, Aubrac, Devès, Velay, Vivarais, Coirons et Escandorgue) et les formations volcaniques récentes de la chaîne des Puys, mises en place il y a 95 000 à 6 000 ans d'où une bonne conservation des cônes de scories et des coulées de lave ; quelques éruptions basaltiques récentes existent aussi en Cézallier, Limagne, Vivarais et Escandorgue.

Dans les Vosges, existent aussi des formations volcaniques et volcano-sédimentaires de l'ère Primaire, donc très anciennes (400 à 250 millions d'années : Dévonien, Carbonifère et Permien). Le Morvan comporte aussi des roches volcaniques du Primaire (Dévonien et Carbonifère), de même que le Massif armoricain (Ordovicien : 480 à 435 millions d'années). Mais la surface des zones volcaniques des Vosges, du Morvan et du Massif armoricain est faible.

Les sols développés à partir d'un substrat volcanique apparaissent complexes, et leur étude a suscité un regain d'intérêt depuis quelques décennies. Différents travaux ont permis d'aboutir à une meilleure connaissance de leurs caractéristiques et de leurs propriétés (Shoji *et al.*, 1993c ; Bartoli *et al.*, 2003 ; Arnalds et Stahr, 2004 ; Quantin, 2004 ; Arnalds *et al.*, 2007).

Les caractéristiques physiques, chimiques et hydriques propres aux sols volcaniques récents induisent un certain nombre de bénéfices et de contraintes spécifiques pour la gestion forestière. Nous mettrons l'accent sur les facteurs limitants pour la production forestière ou à prendre en compte dans cette gestion, grâce à des exemples pris en moyenne montagne volcanique d'Auvergne (chaîne des Puys, monts Dore, Cézallier, monts du Cantal). Cette région couvre plus de 400 000 ha, avec un taux de boisement de 19 % ; elle dispose d'une typologie des stations forestières établie par Curt (1995) et se caractérise par une forte pluviosité, un faible déficit hydrique estival en année normale, et un fort étagement climatique.

## IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES SOLS VOLCANIQUES DU MASSIF CENTRAL

### Les types de sols volcaniques

Un climat humide, sans période de sécheresse, favorise l'altération des matériaux volcaniques et la formation de minéraux mal cristallisés d'une taille de quelques nanomètres, tout particulière-

ment les allophanes (silico-aluminates hydratés) et la ferrihydrite (hydroxyde de fer microcristallisé) (Shoji *et al.*, 1993a, 1993b). Des substances humiques provenant du cycle des matières organiques s'adsorbent fortement sur ces minéraux et forment des associations alumino-organiques, dénommées Al-humus. Ces matériaux colloïdaux donnent aux sols des propriétés spécifiques, dites propriétés andiques, qui permettent de différencier très nettement les sols volcaniques des autres types de sols : teneur élevée en carbone organique des horizons de surface, forte rétention du phosphore, faible densité apparente et forte capacité de rétention d'eau. Dans la suite du texte, nous emploierons le terme "andosol" (mot formé à partir des racines japonaises, "an" qui signifie noir et "do" sol) au sens large, pour les sols volcaniques possédant ces propriétés andiques. Un climat pluvieux et humide en permanence, avec une percolation rapide de l'eau, est un facteur clé pour l'andosolisation des formations volcaniques récentes et l'expression optimale des propriétés andiques.

Morphologiquement, les andosols présentent des horizons supérieurs de couleur sombre, souvent très humifères (Quantin, 1995). Pour exemple, l'analyse de l'horizon supérieur d'un andosol des monts Dore se caractérise par sa richesse en matière organique qui représente 59 % de la terre fine organo-minérale (Legrand *et al.*, 2000).

Spaargaren (2004) a précisé un certain nombre de caractéristiques des andosols :

— Les andosols sont caractérisés par un horizon vitrique ou andique d'une épaisseur minimale de 30 cm.

Un horizon vitrique est un stade jeune, préalable à la formation d'un andosol, qui ne présente que faiblement des propriétés andiques (Quantin, 1995). Un horizon vitrique contient 10 % ou plus de verre volcanique et autres minéraux primaires dans la terre fine (fraction inférieure à 2 mm), et a une densité apparente supérieure à 0,9 kg/dm$^3$.

Un horizon andique représente un stade d'altération plus avancé que celui d'un horizon vitrique, avec une densité apparente inférieure à 0,9 kg/dm$^3$, 10 % ou plus d'argiles, une rétention en phosphate supérieure à 70 %, et moins de 10 % de verre volcanique dans la terre fine.

— Deux sous-types d'horizons andiques sont distingués : silandique et aluandique. Les allophanes et minéraux similaires prédominent dans un horizon silandique, tandis que l'aluminium, complexé par des acides organiques, domine dans un horizon aluandique. Un horizon silandique est acide à neutre, un horizon aluandique est acide à très acide.

Les sols les plus typiques rencontrés sur les substrats volcaniques sont, selon le Référentiel pédologique de 1995, les Andosols et Vitrosols (Quantin, 1995).

Les Vitrosols (avec un horizon vitrique) se différencient sur le terrain des Andosols par l'abondance de matériaux volcaniques (sables et graviers) et par leur couleur plus claire. Les horizons de surface des Andosols sont plus foncés [brun chocolat pour les Silandosols (horizon silandique), brun noir pour les Aluandosols (horizon aluandique)], riches en éléments fins (< 50 µm) et très légers ; leur structure est grumeleuse, fine, très friable, et se liquéfie si on la comprime entre les doigts (thixotropie, voir § "Vulnérabilité physique des Andosols…", p. 104).

**Les sols volcaniques du Massif central et leur environnement**

Les matériaux volcaniques du Massif central sont des cendres volcaniques, des scories volcaniques ("pouzzolane", cônes de scories de la chaîne des Puys), ou des coulées de roches dures (coulées basaltiques par exemple), dont la surface peut être fractionnée en blocs formant de véritables chaos rocheux (les cheires). Selon le type de roche-mère, le climat et la durée de la pédogenèse, l'altération peut être très différente, conduisant à des sols très évolués ou peu évolués.

Les sols s'organisent à l'échelle régionale en fonction des zones climatiques. Ainsi, les andosols prédominent en altitude sous un climat humide en permanence ; à altitudes plus faibles, sous un climat plus chaud et plus sec, existe une transition avec des sols bruns andiques et des sols bruns issus de basalte (Quantin, 2004).

Les sols andiques se sont développés à partir de roches basiques : basalte, andésite, trachy-andésite, dacite, gabbro ou dolérite. Des sols podzolisés apparaissent localement sur des matériaux plus acides comme la rhyodacite ou la rhyolite (Quantin, 2004).

Les andosols les plus typiques sont sur scories basaltiques ou trachytiques récentes. Les sols andiques sur basaltes anciens ou sur laves trachyandésitiques sont plus acides et contiennent plus de minéraux argileux cristallins et moins d'aluminosilicates amorphes. Sous l'effet récent de la culture des sols, une brunification superficielle peut aussi être observée (Hétier, 1975).

Dans la chaîne des Puys, les andosols se développent à partir de roches pyroclastiques dont la composition varie du basaltique au trachytique, alors que dans le Cantal les andosols se trouvent sur des laves variant du basalte à la trachyandésite et à la phonolite (Quantin, 2004).

Les andosols de la partie Nord de la chaîne des Puys se sont développés à partir de cendres trachytiques ; ils ont un $pH_{eau}$ de 5,3-5,8 dans l'horizon supérieur, montrent une accumulation de complexes Al - Fe - matière organique, et sont naturellement colonisés préférentiellement par le Bouleau verruqueux dans les premiers stades de colonisation forestière, cette espèce pionnière héliophile étant particulièrement frugale au plan trophique. Les andosols de la partie Sud de la chaîne des Puys, sur cendres basaltiques, ont un $pH_{eau}$ plus élevé (5,7-6,4), contiennent moins de matière organique et davantage d'allophanes ; ils sont naturellement colonisés par le Pin sylvestre qui est favorisé à la fois par le microclimat, des sols plus favorables, et la présence de semenciers (Prévosto *et al.*, 2004).

Deux andosols de référence ont été sélectionnés dans la chaîne des Puys (EUR 16, un silandosol forestier situé à 1 000 m d'altitude au puy de la Vache, Puy-de-Dôme) et dans le Cantal (EUR 17, un aluandosol sous pelouse permanente à 1 080 m d'altitude au buron de Perle) (Arnalds *et al.*, 2007). Les principales caractéristiques de leurs horizons sont listées dans le tableau I (ci-dessous)

**TABLEAU I** **Principales caractéristiques des horizons des deux andosols européens de référence du Massif central : andosol silandique EUR 16 et andosol aluandique EUR 17**
Résultats exprimés par rapport au sol séché à l'étuve pendant 48 h à 105 °C.

| Sol | Horizon | Profondeur (cm) | Densité apparente ($g/cm^3$) | $Al_{ox} + 1/2\ Fe_{ox}$ (%) | Allophane[a] (%) | Al-humus[b] (%) | C organique (%) | pH (eau)[c] | pH (KCl)[c] | Al (KCl)[d] (cmoles+/kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EUR 16 | Ah1 | 0 - 25 | 0,53 | 5,2 | 12,7 | 4,3 | 12,0 | 6,2 | 5,2 | 0,08 |
| | Ah2 | 25 - 45 | n.d. | 8,6 | 20,2 | 5,3 | 8,3 | 6,7 | 5,6 | 0,13 |
| | Bw | 45 - 55 | 0,51 | 8,3 | 20,1 | 3,6 | 5,0 | 6,8 | 5,8 | 0 |
| EUR 17 | Ah1 | 0 - 30 | 0,49 | 3,5 | 3,2 | 12,3 | 20,0 | 4,3 | 4,1 | 6,9 |
| | Ah2 | 30 - 50 | n.d. | 5,2 | 6,4 | 12,8 | 8,9 | 4,7 | 4,5 | 2,32 |
| | Bw | 50 - 90 | 0,66 | 5,7 | 8,3 | 7,0 | 7,4 | 5,4 | 4,8 | 0,94 |

a : la teneur en allophane a été calculée selon la formule : allophane = 7,1 $Si_{ox}$ dans laquelle $Si_{ox}$ est la teneur en silicium extrait par l'oxalate d'ammonium (réactif de Tamm) (Parfitt et Wilson, 1985).

b : la teneur en Al-humus a été calculée selon la formule : Al-humus = 7,5 $Al_p$ dans laquelle $Al_p$ est la teneur en aluminium extrait par le pyrophosphate de sodium (Poulenard et Herbillon, 2000).

c : rapport sol/solution de 1/5.

d : aluminium échangeable au chlorure de potassium 1N.

qui montre que tous les critères du diagnostic sont validés : très faible densité apparente des horizons A et B, inférieure à 0,9 g/cm$^3$, richesse en allophane, Al-humus et ferrihydrite, forte rétention en phosphates (87 à 99 % : données non reportées sur le tableau). L'andosol silandique de la chaîne des Puys (EUR 16) est riche en allophanes, moyennement organique et peu acide alors que l'andosol aluandique du Cantal (EUR 17) renferme très peu d'allophanes mais beaucoup d'Al-humus et est acide (d'où la présence significative d'aluminium échangeable).

## CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES ANDOSOLS, NOTAMMENT CEUX DU MASSIF CENTRAL

### Texture, structure et propriétés hydriques des andosols

Les allophanes, les complexes Al-Fe-humus, les ferrihydrites et les matières organiques confèrent des propriétés particulières aux andosols, notamment une très faible densité apparente (inférieure à 0,9 g/cm$^3$) et donc une porosité exceptionnellement élevée (60 à 90 %), une faible cohésion à l'état sec, et une grande aptitude à se rétracter de façon irréversible lors d'un séchage (Nanzyo *et al.*, 1993b ; Bartoli et Burtin, 2007).

Les horizons supérieurs des andosols présentent une texture d'apparence limoneuse au toucher (Quantin, 1995), due à l'abondance d'agrégats très fins de la taille des limons (Bartoli *et al.*, 2007), et non pas à l'abondance de limons vrais. La véritable granulométrie ne peut donc être appréciée au toucher, mais devrait faire l'objet d'une analyse au laboratoire, réalisable pour les sols bruns andiques mais délicate pour les andosols (Bartoli et Burtin, 2007).

Les andosols sont caractérisés par une importante capacité de rétention en eau due à une porosité fine (capillaire) exceptionnellement élevée (Nanzyo *et al.*, 1993b ; Bartoli et Burtin, 2007 ; Bartoli *et al.*, 2007), qui résulte des processus d'agrégation (interactions entre les allophanes, les ferrihydrites, les matières organiques et les associations alumino-organiques). Ceci est vrai non seulement pour des andosols silandiques, riches en allophanes, mais aussi pour des andosols aluandiques, riches en Al-humus.

Bartoli et Burtin (2007) ont montré que la capacité de rétention d'eau de sols volcaniques européens était corrélée à l'importance de la fraction organo-minérale inférieure à 2 µm. La capacité de rétention d'eau est de l'ordre de 0,6 à 0,65 cm$^3$/cm$^3$ pour des teneurs de cette fraction organo-minérale de 20 à 30 % (cas notamment des vitrosols) et de 0,7 à 0,9 cm$^3$/cm$^3$ pour des teneurs de 50 à 70 % (cas notamment des andosols perhydriques des Açores), les horizons B étant toujours plus argileux et plus poreux que les horizons sus-jacents.

Le volume d'eau ainsi retenu par un sol peut être divisé en trois catégories (Nanzyo *et al.*, 1993b ; Shoji *et al.*, 1993d) :

— l'eau hygroscopique (retenue par les micropores, correspondant à des valeurs de succion supérieures à 1 500 kPa) ;

— l'eau capillaire accessible aux plantes [mésopores, correspondant à l'eau retenue entre – 1 500 kPa (point de flétrissement permanent) et – 33 kPa (capacité au champ) ] ;

— l'eau gravitationnelle (macropores, correspondant à l'eau très faiblement retenue entre – 33 kPa et 0 kPa, dite aussi eau de percolation).

Pour les horizons A et B d'un andosol silandique, l'eau hygroscopique représente respectivement 30 et 35 %, l'eau capillaire utilisable par les plantes 25 et 25 % et l'eau gravitationnelle 30 et 10 % du volume du sol. On peut donc estimer que le réservoir utilisable maximal en eau (RUM = eau retenue entre le point de flétrissement et la capacité au champ) d'un andosol silan-

dique est de l'ordre de 2,5 mm/cm de sol, ce qui est considérable par comparaison avec un sol brunifié sur socle granitique ou métamorphique. Ainsi, la réserve d'eau utilisable par les plantes (RUM) est de l'ordre de 0,5 mm/cm de sol pour un sol sableux, de 1 mm/cm de sol pour un sol argileux, et de 2 mm/cm de sol pour un sol limoneux (Duchaufour, 2001).

Les andosols silandiques de la chaîne des Puys renferment souvent de 20 à 40 % d'argiles organo-minérales alors que les andosols aluandiques du Cantal en renferment de 40 à 60 % (Bartoli *et al.*, 2007). Ces andosols de la chaîne des Puys et du Cantal sont très poreux et retiennent l'eau de façon exceptionnelle (porosité capillaire quasiment équivalente à la porosité totale et égale à 0,65 à 0,80 $cm^3/cm^3$) ; ils se rétractent de 20 à 25 % lorsque leurs horizons A et B sont soumis à un séchage contrôlé à 40 °C (Bartoli et Burtin, 2007).

Les andosols au sens large du Massif central ont un comportement particulier vis-à-vis de l'eau : leur rétention est très forte à la capacité au champ (jusqu'à deux fois le poids du sol en eau), mais leur point de flétrissement est aussi très élevé (environ la moitié de la capacité au champ). En cas de dessèchement prolongé (en été), le sol peut contenir encore beaucoup d'eau, mais ne pas la céder à la végétation (Curt, 1995).

Bonfils et Moinereau (1971) estiment qu'un andosol du Sud du Massif central de 80 cm de profondeur peut retenir entre 350 et 400 mm d'eau, mais que sa réserve utile (c'est-à-dire prélevable par la végétation) n'est que de l'ordre de 125 mm (soit environ 30 % du total). Son RUM est donc de l'ordre de 1,6 mm/cm de sol, ce qui est élevé puisque, en comparaison, des sols limoneux ont un RUM de 2 mm/cm de sol (Duchaufour, 2001). Ce résultat est aussi du même ordre de grandeur que la valeur de RUM de 2,5 mm/cm de sol d'un andosol japonais représentatif (Nanzyo *et al.*, 1993b).

Notons que l'estimation du RUM à partir de moyennes établies par classes texturales (Baize et Jabiol, 1995) n'est pas du tout adaptée aux andosols, leur granulométrie étant très difficile à déterminer.

Enfin, les horizons de surface des andosols sont souvent hydrophobes et cette hydrophobicité paraît largement varier avec la nature et la teneur en matière organique, et l'état hydrique du sol, les humus étant d'autant plus hydrophobes qu'ils sont secs (Bartoli *et al.*, 2007).

### Cas particuliers des sols volcaniques très caillouteux

Les carrières de "pouzzolane" (en fait, des scories volcaniques souvent basaltiques), abandonnées depuis 3 à 25 ans dans la chaîne des Puys, sont un cas particulier de substrats aux maigres ressources trophiques et hydriques sur lesquels se développent des régosols andiques (sols très superficiels) qui sont proches de sols sableux très filtrants. Leur colonisation végétale a été étudiée par Frain (1991). Celui-ci a mesuré la réserve utile en eau au laboratoire. Il en déduit qu'un sol de 15 cm d'épaisseur aurait au total, en tenant compte d'une contribution de 10 cm de roche-mère (éléments grossiers dont la structure vacuolaire permet le stockage de l'eau), une réserve en eau de 3,5 à 12,5 mm, soit un RUM de 0,2 à 0,8 mm/cm de sol (c'est-à-dire très proche d'un sol sableux de RUM égale à 0,5 mm/cm de sol). On comprend donc les difficultés de la colonisation végétale, en raison de la faible épaisseur du sol et de la réserve en eau très limitée, dans les anciennes carrières abandonnées de scories volcaniques.

Les cheires (surfaces des coulées de lave) sont caractérisées par la présence souvent très importante de blocs qui peuvent former de véritables chaos rocheux. En raison de la teneur élevée en blocs et de la faiblesse en terre fine, la percolation de l'eau y est particulièrement rapide. La production forestière y est souvent limitée, surtout sur les coulées les plus récentes où les sols sont les plus jeunes et les moins développés.

**Vulnérabilité et dégradation physique des andosols**

L'exceptionnelle capacité de rétention d'eau des andosols explique en partie leur fertilité, mais ils sont vulnérables lors de périodes de dessèchement, lors de mises en culture et lors d'aménagements (routes, etc.) réalisés sans adaptations spécifiques.

• *Vulnérabilité physique induite par une sécheresse longue et marquée ; conséquences pour l'alimentation en eau de la végétation*

Les andosols sont d'exceptionnels réservoirs en eau pour les plantes et les réseaux hydrographiques environnants mais ces réservoirs en eau sont vulnérables : les horizons supérieurs sont à la fois sensibles au tassement et au dessèchement, se rétractant alors et perdant de manière souvent irréversible une partie de leur capacité de rétention en eau (Nanzyo *et al.*, 1993b ; Poulenard *et al.*, 2002 ; Bartoli *et al.*, 2007).

Après dessiccation à l'air, les andosols montrent aussi une grande friabilité, une faible cohésion et donc une forte susceptibilité à l'érosion (Nanzyo *et al.*, 1993b ; Quantin, 1995). Après une mise en culture d'une prairie permanente ou d'une forêt, les humus d'andosols se dessèchent, se rétractent, deviennent friables et s'érodent facilement, soit par le vent soit par le ruissellement de surface (Quantin, 1995 ; Poulenard *et al.*, 2001).

Enfin, l'hydrophobicité des horizons de surface des andosols peut augmenter de façon spectaculaire lors de leur dessiccation (Poulenard *et al.*, 2004 ; Bartoli *et al.*, 2007). Ceci explique pourquoi il est difficile de les humecter, ce qui peut avoir des incidences négatives au niveau de l'alimentation hydrique des plantes. Clothier *et al.* (2000) ont démontré que, sur le terrain, l'infiltration continue de l'eau dans un horizon de surface d'andosol non saturé dépendait, pendant un temps vraiment long (plus de 10 heures d'infiltration continue), de son hydrophobicité.

Selon Curt (1995), la réserve en eau des sols volcaniques de la moyenne montagne auvergnate ne semble pas constituer un facteur limitant important, du fait de leur épaisseur généralement suffisante, et de la faiblesse des déficits hydriques estivaux en année normale. Deux cas font exception : les andosols secs et superficiels sur scories d'une partie de la chaîne des Puys, et certains andosols peu épais ou caillouteux (voir § "Cas particuliers des sols volcaniques très caillouteux", p. 103).

Dans le cas des plantations d'Épicéa commun situées entre 900 et 1 400 m d'altitude dans les monts Dore et la chaîne des Puys, Curt *et al.* (1996a) estiment que, en année normale, le déficit hydrique estival, compris entre 0 et 60 mm, est trop faible pour que la valeur du réservoir en eau du sol puisse jouer un rôle discriminant dans la production forestière. Les deux variables qui expliquent une part prépondérante de l'indice de fertilité de l'Épicéa sont alors le topoclimat et le niveau trophique du sol.

Par contre, en année sèche, le fonctionnement hydrique des sols volcaniques peut constituer une contrainte majeure pour les arbres. En effet, le dessèchement irréversible et la réhumectation difficile des horizons supérieurs, due au caractère hydrophobe des horizons de surface, induisent un fonctionnement hydrique très particulier. Une période de sécheresse peut en effet induire une déshydratation irréversible (au moins en partie) des horizons supérieurs du sol, et une sécheresse pédologique peut prolonger une sécheresse climatique ; on peut ainsi constater que la réhumectation des andosols est parfois lente après une sécheresse estivale : seuls les tout premiers centimètres du sol sont humides après des périodes pluvieuses de fin d'été, début d'automne (Legrand *et al.*, 2000).

• *Vulnérabilité physique des andosols saturés d'eau et soumis à des pressions*

Une des propriétés spécifiques des andosols est leur comportement thixotropique lorsqu'ils sont gorgés d'eau et soumis à une pression, leurs agrégats humides se liquéfiant notamment lors-

qu'on les compresse avec les doigts. Ce comportement thixotropique est analogue à celui du yaourt, initialement assez cohérent et se liquéfiant lorsqu'on le brasse. La thixotropie est attribuable à l'exceptionnelle porosité des andosols, généralement largement remplie d'eau (60 à 90 % d'espace poral pour 40 à 10 % d'espace solide).

Ainsi, un sol volcanique à l'état humide a une très faible portance et devient très instable et collant à l'état saturé ; il présente alors une tendance au fluage et est très sensible à l'orniérage. Le travail du sol par des engins lourds est donc déconseillé en période hivernale, de même que la mise à nu des sols (risque d'érosion et de glissement). Il est aussi important de limiter la circulation des engins forestiers aux seuls cloisonnements d'exploitation, et même prudent de l'interdire totalement dans les parcelles quand le sol est gorgé d'eau, car même les cloisonnements d'exploitation peuvent subir des dommages conséquents (orniérage profond). De même, l'érosion peut aussi se développer en bordure de chemins, ce qui a conduit Gomendy-Genevois et Morel (2005 et communication personnelle) à préconiser l'utilisation de fascines de noisetier pour stabiliser les talus, et de drainages afin d'éviter que les andosols ne se saturent en eau.

Le processus de liquéfaction peut parfois devenir catastrophique : des coulées boueuses, aussi appelées lahars, extrêmement rapides et puissantes, peuvent charrier de gros blocs de roches, tuer des personnes et détruire des habitations et des biens. Cela se produit assez régulièrement dans de nombreuses régions en Amérique du Sud, en Asie, dans les Antilles françaises, et dans certaines régions volcaniques d'Europe telles les Açores et la région du Vésuve où il y a eu 161 morts le 5 mai 1998 à Sarno.

Dans le Massif central, les coulées boueuses n'ont heureusement pas été observées, ce qui est notamment attribuable au fait que les couvertures pédologiques volcaniques n'y sont pas stratifiées.

## CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES ANDOSOLS DU MASSIF CENTRAL ET IMPACT SUR L'ÉTAT SANITAIRE ET LA CROISSANCE DES PEUPLEMENTS FORESTIERS

### Les éléments majeurs (N, P, K, Ca, Mg)

La composition en éléments chimiques des sols volcaniques est très largement dépendante de la composition minéralogique de la roche-mère. La pédogenèse, le contenu en matière organique, les conditions climatiques et l'utilisation du sol par l'homme sont aussi des facteurs qui influent sur la distribution des éléments chimiques : appauvrissement ou enrichissement en certains éléments, lessivage du calcium et du potassium. La capacité d'échange en cations (CEC) est corrélée positivement avec la teneur en carbone organique des andosols. Mais la matière organique peut aussi jouer un rôle de dilution de la concentration en calcium et potassium. D'une manière générale, le drainage important dû aux propriétés physiques des andosols favorise le lessivage des éléments minéraux (Nanzyo *et al.*, 1993b ; Madeira *et al.*, 2007).

Une forte rétention du phosphore, due aux composés réactifs de l'aluminium et du fer présents en grande quantité, est une caractéristique des andosols ; la faible disponibilité en phosphore est donc souvent un facteur limitant pour la croissance des plantes. Quantin (1995) a détaillé les propriétés agronomiques des Andosols et Vitrosols, que nous résumons ci-dessous :

— les Vitrosols sont souvent riches en cations échangeables et en phosphore assimilable, mais N, P et K risquent d'être lessivés rapidement en raison du fort drainage de ces sols ;

— les Silandosols Eutriques sont peu acides, ont une CEC élevée et une rétention modérée du phosphore ; ce sont des sols très fertiles qui supportent un usage agricole intensif ;

— les Silandosols Dystriques ont une richesse souvent suffisante en cations échangeables, mais des déséquilibres sont possibles (déficience en K) ; ils ont presque toujours une déficience en P et N facilement utilisables ;

— les Silandosols Perhydriques présentent une rétention du phosphore très forte, et une disponibilité restreinte en N et S ;

— les Aluandosols ont une teneur abondante en aluminium échangeable, mais très faible en autres cations échangeables ; P est fortement retenu, la fertilité du sol est très restreinte et de très sérieux problèmes de fertilisation se posent.

Les andosols de la chaîne des Puys sur roches-mères basiques (basaltes, basanites, ankaramites) montrent souvent une insuffisance plus ou moins marquée en potassium, parfois une carence en magnésium, et des carences en cuivre et zinc (Dejou, 1985).

### Alimentation minérale des peuplements forestiers des zones volcaniques du Massif central

Pour les régosols andiques sur scories de la chaîne des Puys, les analyses chimiques montrent une carence en éléments majeurs N, P, K, ce qui est un facteur limitant à la recolonisation végétale des anciennes exploitations abandonnées de “pouzzolane” (Frain, 1991).

En forêts de moyenne montagne auvergnate, des peuplements forestiers peuvent parfois présenter des symptômes de dépérissement, qui affectent le houppier et le feuillage : jaunissements foliaires, pertes partielles d’aiguilles, dessèchement de ramifications ou de la cime, mortalité éventuelle de l’ensemble de l’arbre. Parmi les multiples causes pouvant être à l’origine de ces symptômes, des difficultés d’alimentation minérale des arbres peuvent intervenir. Des analyses foliaires pratiquées selon les recommandations de Bonneau (1995), et comparées aux normes de composition foliaire (tableau II, ci-dessous), peuvent mettre en évidence ces difficultés d’alimentation minérale ; nous donnerons ainsi quelques exemples.

**TABLEAU II** **Normes de composition foliaire pour les résineux à petites aiguilles, dont Épicéa commun, Pin sylvestre, Sapin** (Bonneau, 1995)

| | N (g/kg) | P (g/kg) | K (g/kg) | Ca (g/kg) | Mg (g/kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| Seuil de carence | 10 à 13 | 1,0 à 1,5 | 3 à 4 | 0,5 à 1 | 0,6 |
| Niveau critique | 13 à 15 | 1,5 | 4 à 5 | | |
| Teneur optimale | 15 à 19 | 1,8 à 2,1 | 6 à 8 | 2 à 5 | 1,0 à 1,4 |

Dans cinq peuplements forestiers, des aiguilles ont été prélevées sur des arbres atteints de jaunissement, ainsi que sur des arbres sains, et analysées :

— Épicéas communs de 60 ans sur andosol aluandique profond (plus d’un mètre), sur projections volcaniques sur coulée basaltique ; forêt sectionnale d’Auzat, 1 100 mètres d’altitude, monts Dore ;

— Épicéas communs de 45 ans sur andosol silandique de 60 cm de profondeur, sur cône de scories basaltiques ; puy de la Suchère, Charbonnières-les-Varennes, chaîne des Puys ;

— Épicéas communs de 35 ans, sur andosol silandique profond (plus d’un mètre) sur scories basaltiques ; forêt sectionnale de Manson, chaîne des Puys ;

— Pins sylvestres de 2 ans, sur andosol silandique profond (70 cm) sur coulée basaltique ; forêt sectionnale de Cézerat, planèze de Saint-Flour ;

— Sapins pectinés de 30 ans, sur andosol silandique assez profond (60 cm) sur coulée basaltique ; Chavagnac, planèze de Saint-Flour.

Les résultats des analyses sont donnés dans le tableau III (p. 107).

**Tableau III** **Composition des aiguilles en éléments totaux des arbres au feuillage jaunissant ou sains, en g/kg, rapportée à la matière sèche**

| Peuplement | Arbres jaunissants | | | | | Arbres sains | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Ca | Mg | N | P | K | Ca | Mg |
| a) Épicéas communs ..... | 15,3 | 1,39 | 1,51 | 1,29 | 0,82 | 15,0 | 1,40 | 2,27 | 1,53 | 0,79 |
| b) Épicéas communs ..... | 18,0 | 1,66 | 1,77 | 4,16 | 1,48 | 18,2 | 1,55 | 3,92 | 5,90 | 1,61 |
| c) Épicéas communs..... | 12,3 | 1,76 | 2,02 | 3,70 | 1,29 | 16,1 | 1,90 | 5,51 | 4,80 | 1,38 |
| d) Pins sylvestres ..... | 17,3 | 1,45 | 2,93 | 2,88 | 1,67 | 17,7 | 1,69 | 4,46 | 4,42 | 1,71 |
| e) Sapins pectinés ..... | 14,6 | 1,64 | 1,76 | 5,82 | 2,49 | 14,4 | 1,65 | 3,89 | 4,38 | 1,81 |

a : Legrand *et al.*, 2000 ;
b : DSF Massif central, 1999a ;
c : DSF Massif central, 1999b ;
d, e : DSF Massif central, 2002.

Il ressort très clairement de ces analyses que c'est la teneur en potassium qui différencie le plus nettement les arbres carencés des arbres sains. Cette teneur est très basse dans les aiguilles des arbres jaunissants, parfois même dans les aiguilles des arbres au feuillage normal (peuplements a, b, c). Les teneurs en azote (sauf peuplement c) et en phosphore sont au contraire normales, ainsi que celles en calcium (sauf peuplement a) et en magnésium (niveau faible pour le peuplement a).

Des analyses foliaires, effectuées dans les années 1980 dans le cadre des recherches sur les dépérissements des forêts et la pollution atmosphérique, avaient déjà permis d'attribuer les jaunissements du feuillage du Sapin pectiné, et dans une moindre mesure de l'Épicéa commun, à des carences en potassium dans les sols volcaniques du Massif central (Landmann *et al.*, 1995a ; 1995b). Ces carences sont fréquentes sur les andosols de la chaîne des Puys (cf. § "Les éléments majeurs", p. 105).

La carence en potassium peut être due à un lessivage de cet élément très mobile, et à un déséquilibre entre les teneurs en potassium, calcium et magnésium dans le sol. Ainsi, Bonneau (1995) indique que le rapport Mg/K (les valeurs des éléments étant exprimées en $cmol^+/kg$) dans les horizons minéraux devrait être compris entre 1 et 2, et qu'un rapport K/Ca inférieur à 0,25 peut conduire à une carence potassique. Pour la forêt d'Auzat (Puy-de-Dôme), les valeurs de ces rapports obtenues par les analyses de sol indiquaient effectivement un déséquilibre en potassium (Legrand *et al.*, 2000). Ceci est aussi confirmé pour les deux andosols européens de référence et tout particulièrement l'andosol silandique forestier de la chaîne des Puys (EUR 16) dans les horizons duquel les valeurs du rapport K/Ca sont extrêmement faibles (0,01 à 0,03) (tableau IV, p. 108). Ceci a été confirmé de façon plus approfondie par Semlali (2000) lors de son étude sur les cycles biogéochimiques des éléments traces : il a démontré un appauvrissement tout à fait exceptionnel à la fois du potassium et du sodium, une exportation modérée du cuivre et du silicium tandis qu'à l'opposé le chrome et le nickel se concentrent.

Rappelons aussi qu'une période de sécheresse, ou un substrat très filtrant (scories volcaniques par exemple), accentue les problèmes d'alimentation minérale des arbres, et les symptômes engendrés par les carences (voir partie "Dépérissements forestiers complexes sur sols volcaniques", p. 110).

N'oublions pas enfin que la fertilité chimique de la station, et notamment la disponibilité en azote, dépend aussi, dans le cas des plantations forestières, de l'usage antérieur du sol : un sol agricole cultivé est plus favorable qu'un pâturage, lui-même plus favorable qu'une lande pâturée (Prévosto *et al.*, 2004).

**TABLEAU IV** **Cations et anions échangeables des horizons des deux andosols européens de référence du Massif central : andosol silandique EUR 16 et andosol aluandique EUR 17.**

La méthode d'échange utilisée ("*compulsive exchange method*") détermine à la fois la capacité d'échange cationique (CEC) et la capacité d'échange anionique (CEA) au pH et à la force ionique proches de celles du sol sur le terrain (Madeira *et al.*, 2007).

| Sol | Horizon | Profondeur (cm) | Cations ou anions échangeables ($cmoles^+/kg$) | | | | | | Mg/K | K/Ca |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ca | Mg | K | Na | CEC | CEA | | |
| EUR 16 | Ah1 | 0 - 25 | 20,00 | 4,76 | 0,36 | 0,27 | 25,45 | 25,5 | 13,2 | 0,02 |
| | Ah2 | 25 - 45 | 11,39 | 4,03 | 0,12 | 0,42 | 15,96 | 16,1 | 33,6 | 0,01 |
| | Bw | 45 - 55 | 9,16 | 3,42 | 0,09 | 0,34 | 13,01 | 13,0 | 38,0 | 0,01 |
| EUR 17 | Ah1 | 0 - 30 | 1,46 | 0,33 | 0,35 | 0,33 | 2,48 | 9,4 | 0,9 | 0,24 |
| | Ah2 | 30 - 50 | 0,35 | 0,14 | 0,16 | 0,25 | 0,90 | 3,4 | 0,9 | 0,46 |
| | Bw | 50 - 90 | 0,35 | 0,06 | 0,24 | 0,24 | 0,89 | 1,8 | 0,2 | 0,69 |

## L'aluminium et la toxicité aluminique

Dans le cas général des sols acides, à $pH_{eau}$ inférieur à 5 et surtout inférieur à 4,5, l'aluminium peut devenir toxique en provoquant un dysfonctionnement racinaire qui perturbe l'absorption du calcium et du magnésium ; l'abondance de l'aluminium perturberait la nutrition magnésienne pour un rapport Mg/Al (les valeurs des éléments étant exprimées en $cmol^+/kg$) inférieur à 0,033 et une carence calcique pourrait survenir pour un rapport Ca/Al inférieur à 0,066 (Bonneau *et al.*, 1994 ; Bonneau, 1995 ; Boudot *et al.*, 1995). Les phénomènes de toxicité aluminique sont donc souvent associés à des problèmes de malnutrition (N, Ca, Mg, P) du fait de l'atrophie racinaire, de l'abaissement du pH et de l'augmentation de l'acidité du sol, et des modifications des autres propriétés d'échange qui en résultent.

Dans le cas des sols volcaniques, l'accumulation d'aluminium (et aussi du fer) en phase solide confère des propriétés particulières aux andosols (Nanzyo *et al.*, 1993a ; Shoji *et al.*, 1993d).

Nous avons vu que les andosols sont divisés en deux groupes principaux :

• Les andosols allophaniques (silandosols) : ils sont modérément à légèrement acides même quand la saturation en bases est très faible, et contiennent rarement des niveaux toxiques d'aluminium extractible par KCl ; les allophanes sont formées préférentiellement à pH › 4,9 ; en conditions plus acides, les complexes Al-humus tendent à dominer.

• Les andosols non allophaniques (aluandosols) : à pH ‹ 4,9, Al est complexé par la matière organique, et n'est plus disponible pour réagir avec la silice pour former des allophanes. Ainsi, les andosols non allophaniques sont fort acides quand la saturation en bases est faible et possèdent un taux élevé d'Al extractible par KCl qui entraînerait une toxicité racinaire pour les plantes. En général, la solubilité de l'aluminium des sols est régulée par une phase minérale solide $Al(OH)_3$ (ex : gibbsite) ; cependant, la concentration d'Al soluble dans des horizons riches en matière organique, notamment ceux des andosols non allophaniques, est contrôlée par l'Al complexé avec la matière organique (Garcia-Rodeja *et al.*, 2004). Ainsi, les andosols aluandiques ont souvent un $pH_{eau}$ inférieur à 4,5 dans les horizons supérieurs humifères, et inférieur à 5 dans les horizons plus profonds peu humifères mais "aluminiques" (où $Al^{3+}$ › 2 $cmol^+/kg$) (Quantin, 1995).

Une valeur de l'aluminium extractible par KCl 1N au pH du sol supérieure à 2 $cmol^+/kg$ entraîne une toxicité au niveau racinaire, et apparaît donc critique pour la croissance des plantes.

Dans un horizon silandique, la teneur en aluminium échangeable est souvent négligeable ou nettement inférieure à 2 $cmol^+$/kg en valeur absolue ou $Al^{3+}$/CEC ‹ 20 %. C'est le cas des andosols silandiques forestiers de la chaîne des Puys (tableau I, p. 101).

Dans un horizon aluandique, la teneur en aluminium échangeable est supérieure à 2 $cmol^+$/kg ou $Al^{3+}$/CEC › 20 % (Shoji *et al.*, 1993d ; Quantin, 1995). C'est le cas des andosols aluandiques du Cantal (tableau I, p. 101) dont l'horizon de surface Ah1 est de plus caractérisé par un rapport Mg/Al de 0,05. Il y a donc à la fois risque de toxicité aluminique et perturbation de la nutrition magnésienne.

La flore peut aussi aider au diagnostic : certaines plantes sont plus résistantes que d'autres à la toxicité aluminique. Ainsi, le Sapin pectiné semble "alumino-indifférent" (c'est-à-dire présent avec des coefficients d'abondance-dominance assez constants à différentes valeurs d'aluminium échangeable), alors que d'autres espèces ou arbres y sont sensibles, voire intolérantes (elles sont inexistantes dès des niveaux bas d'aluminium échangeable) ; il est ainsi possible de dresser un tableau de la réaction de différentes espèces végétales à la présence d'aluminium libre dans le sol (tableau V, ci-dessous).

**Tableau V** **Groupes d'espèces indicatrices de la toxicité aluminique en milieu forestier volcanique** (d'après Coquillard, 1993)

| Niveau trophique / Caractères écologiques | Eutrophe | Mésotrophe | Oligotrophe | Espèces à large amplitude |
|---|---|---|---|---|
| Espèces alumino-sensibles<br>Al échangeable<br>≤ 1,3 meq/100 g | *Geranium robertianum*<br>*Melica uniflora*<br>*Euphorbia amygdaloïdes*<br>*Ribes petraeum*<br>*Cardamine heptaphylla*<br>*Epilobium durieui* | *Phyteuma spicatum*<br>*Lamium galeobdolon*<br>*Scillia lilio-hyacinthus* | *Galium saxatile*<br>*Galeopsis tetrahit*<br>*Digitalis purpurea* | |
| Espèces alumino-tolérantes<br>1,3 < Al échangeable<br>≤ 2,7 meq/100 g | *Fraxinus excelsior*<br>*Paris quadrifolia* | *Viola reichenbachiana*<br>*Galium odoratum*<br>*Solidago virgaurea* | *Hieracium murorum*<br>*Deschampsia flexuosa*<br>*Anemone nemorosa*<br>*Veronica officinalis*<br>*Poa chaixii*<br>*Ajuga reptans* | *Athyrium filix-femina*<br>*Doronicum austriacum*<br>*Sambucus racemosa*<br>*Sorbus aucuparia* |
| Espèces alumino-indifférentes<br>2,7 < Al échangeable<br>≤ 5,2 meq/100 g | | *Dryopteris dilatata*<br>*Stellaria nemorosa*<br>*Gymnocarpium dryopteris*<br>*Oxalis acetosella*<br>*Senecio cacaliaster* | *Maïanthemum convallaria*<br>*Luzula nivea*<br>*Luzula sylvatica*<br>*Vaccinium myrtillus* | *Dryopteris carthusiana*<br>*Abies alba* |

Espèce alumino-indifférente : espèce insensible à la présence d'aluminium (présente sur sols à fort taux d'aluminium libre).
Espèce alumino-tolérante : espèce tolérant la présence d'aluminium (présente sur sols à taux modéré d'aluminium libre).
Espèce alumino-sensible : espèce ne supportant pas la présence d'aluminium (absente sur sols à aluminium libre).
1 meq/100 g = 1 $cmol^+$/kg.

## AMENDEMENTS ET FERTILISATION

Les connaissances en matière d'amendements et de fertilisation sur andosols apparaissent relativement limitées : nous manquons de références forestières dans le Massif central volcanique. Bonneau (1995) cite un essai de fertilisation d'une plantation d'Épicéa commun au lac du Guéry (monts Dore) où une fertilisation NPKCa ou PKCa, en l'absence de carence, a procuré un gain d'accroissement. Mais Quantin (1995) indique que, d'une manière générale, les carences en sols volcaniques apparaissent assez difficiles à corriger. Ainsi, dans le cas des carences en potassium qui ont été mises en évidence dans le Massif central, un apport massif d'engrais potassique pourrait avoir des conséquences néfastes en provoquant un déséquilibre nutritionnel avec d'autres éléments (Montpied *in* Legrand *et al.*, 2000).

Takahashi et Nanzyo (2004) indiquent que, dans le cas des andosols, une partie des complexes Al-humus est labile et est aisément altérée par un simple traitement chimique comme un chaulage : un chaulage diminue significativement les taux d'Al complexé à la matière organique, et d'Al échangeable. Des amendements calco-magnésiens peuvent donc être envisagés sur sols volcaniques, notamment sur les sols aluandiques, où les risques de toxicité aluminique sont les plus grands et les taux en bases (notamment en Ca) les plus faibles (Shoji *et al.*, 1993d). Sur ce sujet cependant, nous manquons aussi de références forestières dans le Massif central. Sur d'autres substrats géologiques dans les Ardennes et les Vosges, des amendements calco-magnésiens ont permis à moyen terme de restaurer la fertilité des sols et d'améliorer l'état sanitaire des arbres, notamment en améliorant l'humus et en diminuant le taux d'aluminium libre dans le sol ; cependant, des déséquilibres peuvent aussi se produire pour certains éléments comme le potassium qui peut atteindre des seuils de carence suite à l'amendement (Bonneau et Nys, 1997 ; Nys *et al.*, 2000). Or nous avons vu que des carences en potassium peuvent déjà exister dans les sols volcaniques du Massif central ; l'ajout de potassium dans des amendements calco-magnésiens devrait donc être envisagé.

En raison de la forte fixation du phosphore et des carences en potassium souvent détectées dans les andosols du Massif central, on pourrait aussi envisager l'épandage de phosphates naturels (qui se solubiliseraient sans difficulté tout en limitant la rétrogradation du phosphore), avec en complément un apport de sulfate double de potassium et magnésium, ou de $K_2SO_4$.

## DÉPÉRISSEMENTS FORESTIERS COMPLEXES SUR SOLS VOLCANIQUES

Les dépérissements complexes de résineux se manifestent généralement par un jaunissement du feuillage, et par une perte foliaire : déficit d'aiguilles, mortalités de ramifications fines, qui peuvent aboutir au dépérissement du houppier et à la mort de l'arbre.

Des carences minérales, une faible fertilité du sol, un historique du peuplement défavorable aux arbres, et des stress hydriques prononcés en sont généralement responsables (Bonneau *et al.*, 1992). Si le jaunissement des aiguilles dû à des carences minérales peut d'ailleurs être réversible dans une certaine mesure, il est aussi accentué par une période de sécheresse (Dambrine *et al.*, 1995) que les caractéristiques défavorables du sol ou un enracinement sur une faible profondeur ne permettent pas toujours de compenser.

Ainsi, un horizon aluandique forme un obstacle chimique au développement racinaire tandis que l'enracinement est dense et profond sur les Silandosols Eutriques.

Des dépérissements de résineux ont été signalés en Auvergne à la suite de la tempête de 1982 et de la période de déficits hydriques de 1982 à 1986 (tout particulièrement de la sécheresse sévère de 1985). Ces dépérissements avaient concerné, par ordre de gravité décroissante, l'Épicéa commun, le Sapin pectiné et le Pin sylvestre, et avaient affecté plus spécialement des peuplements dans les zones à substrat volcanique, les régions cristallines étant généralement moins touchées (Guillaumin *et al.*, 1989). Dans les cas étudiés, l'analyse de carottes de sondage avait montré que les peuplements sur sols volcaniques avaient une meilleure croissance, mais aussi une sensibilité plus grande à la sécheresse de 1985 que les peuplements sur sols granitiques ; des analyses foliaires avaient permis d'attribuer les jaunissements du feuillage du Sapin pectiné, et dans une moindre mesure de l'Épicéa commun, à des carences en potassium en sols volcaniques (voir § "Alimentation minérale des peuplements forestiers", p. 106).

Dans l'étude d'un cas de dépérissement d'Épicéa commun dans le Massif central, Legrand *et al.* (2000) ont montré que, malgré l'absence de contrainte majeure observée sur fosses pédologiques, l'enracinement des épicéas peut être superficiel : le sol semble se comporter comme s'il existait un plancher limitant la profondeur de l'enracinement. Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer la faible profondeur d'enracinement :

— l'eau de pluie a du mal à pénétrer en profondeur dans un sol sec, du fait de son caractère hydrophobe ; elle a tendance à ruisseler en surface et non pas à s'infiltrer dans le sol, ne permettant pas au stock d'eau utile aux plantes de se renouveler ;

— au niveau des analyses de sol, le très fort déséquilibre en potassium en profondeur (bien plus marqué qu'en surface).

Dans le cas étudié, les principaux facteurs prédisposant au dépérissement sont une très faible fertilité chimique de la station liée à des carences minérales, un enracinement peu profond des épicéas, une sylviculture peu dynamique qui a entraîné une concurrence importante entre les arbres, et des facteurs climatiques accidentels (sécheresses, tempête de 1982). L'armillaire (*Armillaria ostoyae*) et le scolyte typographe (*Ips typographus*) ont ensuite colonisé les arbres affaiblis. C'est surtout la période de déficits hydriques de 1985 à 1993 (et plus particulièrement les sécheresses prononcées de 1985, 1989 et 1993) qui apparaît comme le principal facteur du déclenchement de ce dépérissement.

Une autre étude menée sur sols volcaniques en haute Ardèche, près du mont Mézenc, a montré que la croissance des plantations d'Épicéa commun d'altitude présente une inflexion dès l'âge de 35 ans, alors que celle-ci ne se produit habituellement qu'à 140-160 ans dans des forêts naturelles des Alpes en bonne santé. Les hivers froids et les étés chauds et secs semblent en effet provoquer une sénescence précoce des épicéas sur ces sols volcaniques qui, malgré une bonne réserve en eau disponible pour les plantes, exacerbent les sécheresses climatiques. Les épicéas n'arrivent jamais à se remettre des accidents climatiques, ce qui peut conduire à un dépérissement important dès l'âge de 70 ans (Rolland et Lempérière, 2004).

Benizry *et al.* (1988) ont montré qu'en Auvergne, les peuplements d'Épicéa commun particulièrement atteints d'une pourriture du bois de cœur causée par le fomès (*Heterobasidion annosum*) sont situés sur roches volcaniques, sur des andosols ou sols andiques, à pH peu acide, avec une texture riche en limons, sur des versants en exposition chaude (Sud) et à altitude élevée ; l'importance de la maladie augmente avec l'âge du peuplement et le nombre d'éclaircies. Les attaques de ce champignon pathogène semblent plus faibles sur terrains acides, riches en sables, provenant de roche-mère cristalline, installés sur des pentes non exposées au Sud.

Des carences minérales, la toxicité aluminique et le fonctionnement hydrique particulier des sols volcaniques en période de sécheresse pourraient aussi être des explications de l'affaiblissement de l'Épicéa commun et de sa sensibilité à ce champignon.

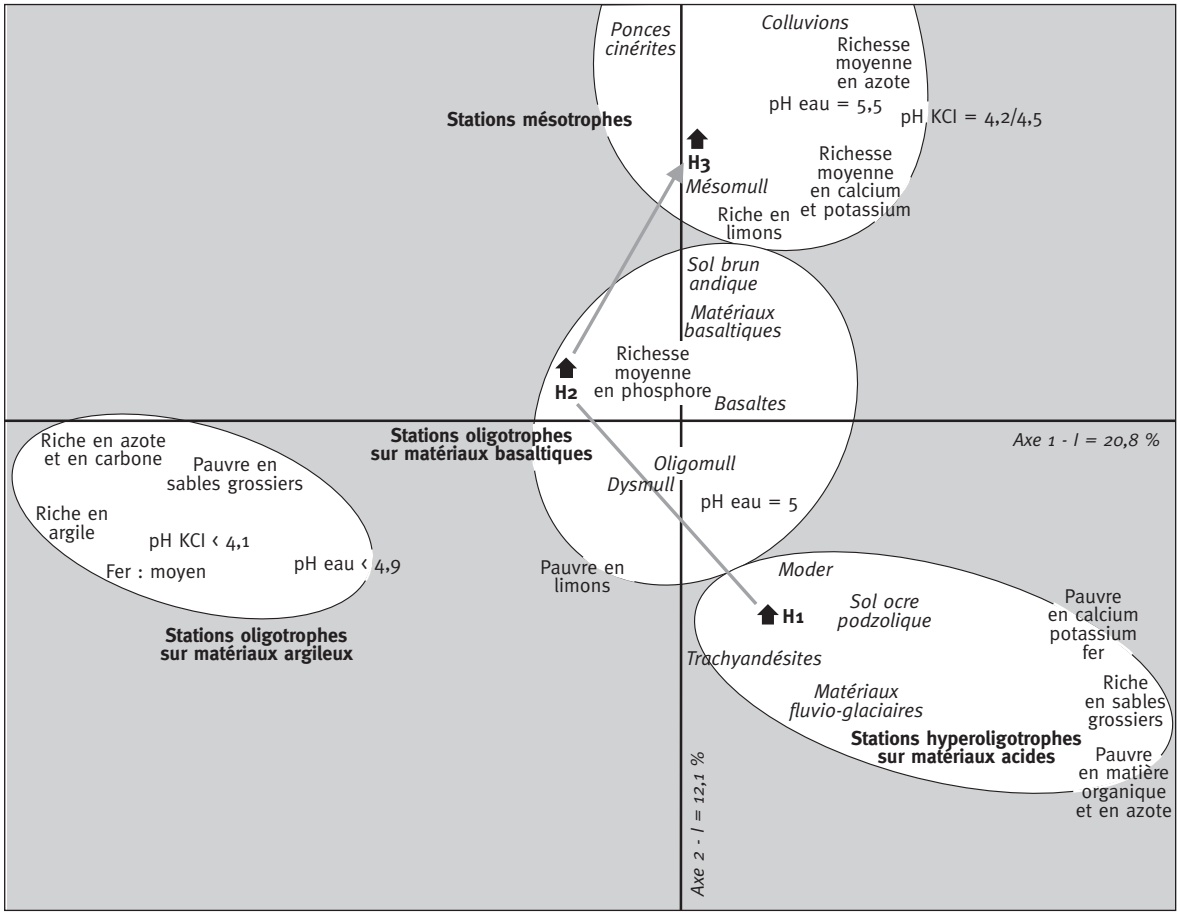
## EFFETS DES VARIABLES GÉOPÉDOLOGIQUES SUR LA PRODUCTIVITÉ DE L'ÉPICÉA COMMUN

Une étude de la productivité de l'Épicéa commun dans deux régions contrastées de moyenne montagne volcanique auvergnate (la chaîne des Puys et les monts Dore) a porté respectivement sur 104 et 124 placettes (Curt *et al.*, 1996b). Pour chaque groupe de relevés (chaîne des Puys, monts Dore) ont été effectuées une analyse factorielle des correspondances (AFC) puis une classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les analyses de sols, les caractéristiques géopédologiques intervenant comme variables supplémentaires. Les hauteurs dominantes des peuplements ont été projetées sur le plan des deux premiers axes de l'AFC comme variables supplémentaires sous la forme de classes de hauteur : H1 (20,6 à 23,4 m), H2 (23,5 à 25,9 m) et H3 (26,0 à 28,9 m).

**FIGURE 1** **ÉPICÉA COMMUN DANS LES MONTS DORE. REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DES GROUPES DE RELEVÉS GÉOPÉDOLOGIQUES ET DES RÉSULTATS D'ANALYSES DE SOLS EN FONCTION DES AXES 1-2 DE L'AFC**

Les variables géopédologiques sont indiquées en italiques
et les résultats des analyses de sols en laboratoire en caractères normaux.

⬆ Indication des hauteurs dominantes à 40 ans :
H1 = 20,6 à 23,4 m ; H2 = 23,5 à 25,9 m ; H3 = 26,0 à 28,9 m.



Les résultats, représentés sur les figures 1 et 2 (pp. 112-113), peuvent être synthétisés de la manière suivante.

La classe H3, la meilleure, coïncide avec des sols bruns andiques mésomorphes, à $pH_{eau}$ de 5,5 à 6,4, assez riches en azote, calcium et potassium, à humus de type mésomull ou oligomull, sur basaltes, ponces, cinérites, souvent sur colluvions.

La classe H2 se rencontre :

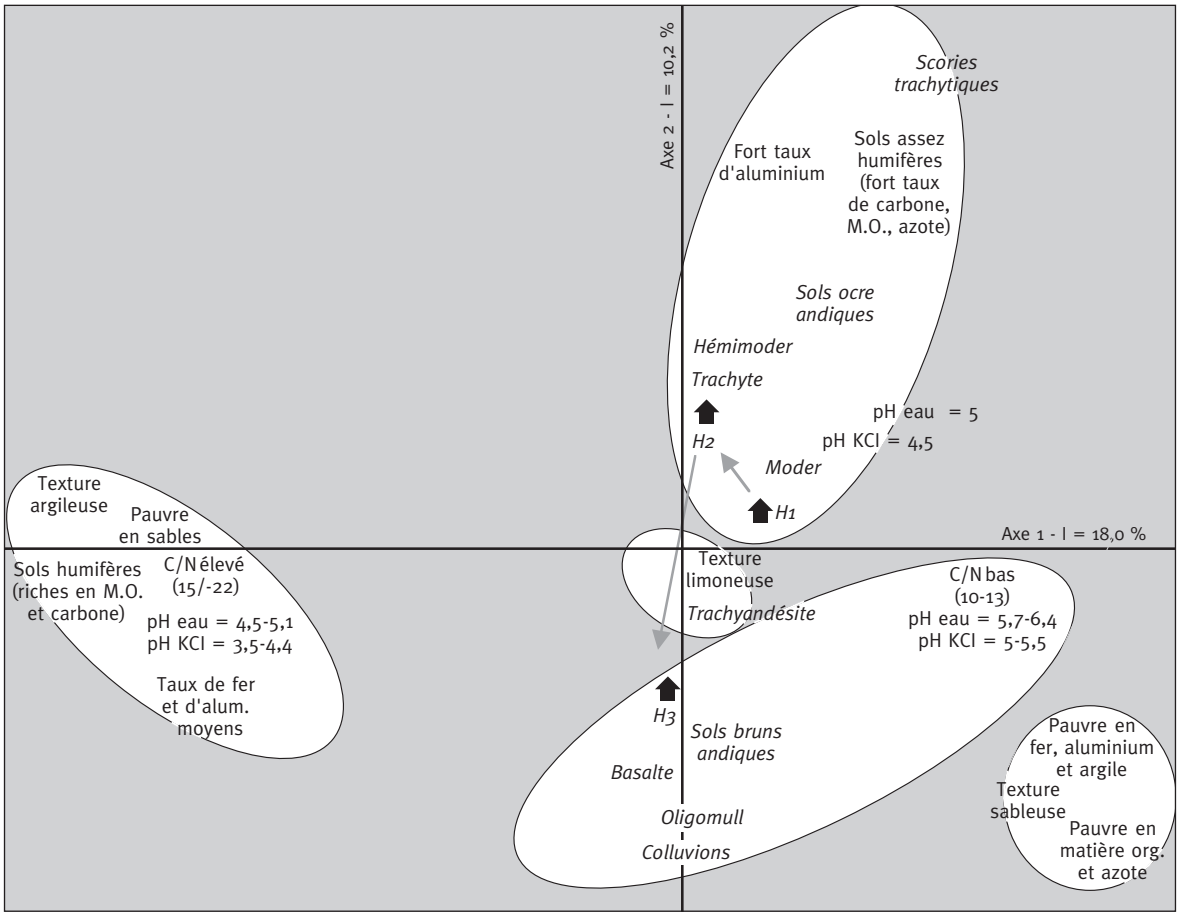
— soit sur des sols bruns andiques sur matériaux basaltiques, moyennement riches en phosphore, avec des humus de type oligomull ou dysmull, peu acides (pH 5), dans les monts Dore ;

— soit sur des sols ocre-andiques sur trachytes, à taux élevé d'aluminium mais peu acides (pH 5), avec des humus de type hémimoder, dans la chaîne des Puys.

**Figure 2** **ÉPICÉA COMMUN DANS LA CHAÎNE DES PUYS. REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DES GROUPES DE RELEVÉS GÉOPÉDOLOGIQUES ET DES RÉSULTATS D'ANALYSES DE SOLS EN FONCTION DES AXES 1-2 DE L'AFC**

Les variables géopédologiques sont indiquées en italiques et les résultats des analyses de sols en laboratoire en caractères normaux.

⬆ Indication des hauteurs dominantes à 40 ans : H1 = 16,7 à 22 m ; H2 = 22,1 à 24,8 m ; H3 = 24,9 à 28,6 m.



Dans les deux ensembles, des sols argileux riches en matière organique, à C/N élevé, acides (pH 4,5 à 5,1), à teneur moyenne en fer et en aluminium, pauvres en phosphore, et dans lesquels la matière organique se minéralise lentement, localisés sur des sommets ou des hauts de versants et donc soumis à une perte d'eau par écoulement latéral, portent des peuplements appartenant aux classes H1 ou H2.

Dans l'ensemble du territoire couvert par cette étude, les sols andiques sur basaltes sont donc les plus productifs, suivis par les sols sur trachytes, trachyandésites ou matériaux fluvio-glaciaires, brunifiés, neutres à faiblement acides, à bonne minéralisation et bien pourvus en fer, calcium et phosphore.

Les sols d'altitude, pénalisés par le manque d'eau, une mauvaise minéralisation de la matière organique et un pH bas, ne portent que des peuplements plus médiocres.

## CONCLUSIONS

Les facteurs propres aux sols volcaniques peuvent induire des bénéfices mais aussi des contraintes pour la gestion forestière, et ainsi être à l'origine d'une croissance médiocre ou d'un dépérissement des arbres. En effet, les andosols constituent d'excellents réservoirs d'eau, relativement stables dans le temps jusqu'à un seuil de dessèchement au-delà duquel les horizons supérieurs et les humus peuvent se rétracter (diminution irréversible de leurs capacités de rétention d'eau et de leurs conductivités hydrauliques) et sans doute surtout exacerber leurs caractères hydrophobes, favorisant alors le ruissellement de surface et limitant de manière durable l'infiltration, donc le renouvellement des stocks d'eau du sol utiles à la croissance des arbres. La grande diversité des sols volcaniques fait que chaque cas peut posséder des spécificités propres. Certains facteurs peuvent être appréhendés sur le terrain, tandis que d'autres nécessitent le recours à des analyses de laboratoire. Ainsi, les analyses de sol et les analyses foliaires peuvent permettre de mettre en évidence des facteurs limitants pour la production forestière, notamment des carences minérales ou une toxicité aluminique.

Les exemples cités montrent bien l'importance des facteurs édaphiques (carences minérales, fonctionnement hydrodynamique très particulier du sol) et climatiques (sécheresses exacerbées par les caractéristiques édaphiques) dans les cas de dépérissements de résineux sur sols volcaniques. Les zones forestières les moins humides du Massif central comme celles de la chaîne des Puys seraient donc particulièrement à surveiller, surtout en période de sécheresse, et d'autant plus que leurs sols sont tout particulièrement appauvris en potassium.

Des questions restent cependant à étudier. Ainsi, pour une longue période humide ou pour une longue période de sécheresse, quelles sont les partitions respectives entre ruissellement de surface et infiltration pour un écosystème forestier volcanique du Massif central et pour des écosystèmes forestiers comparables se développant sur d'autres types de sols mais soumis à des contraintes climatiques analogues ?

Enfin, l'Épicéa commun, essence pourtant assez frugale au plan trophique et relativement résistante à la sécheresse édaphique, montre une croissance fortement contrastée sur sols volcaniques en Auvergne. L'exemple d'un dépérissement de l'Épicéa commun dans les monts Dore (Legrand *et al.*, 2000) avait ainsi mis en évidence, dans ce cas particulier, une croissance très médiocre des arbres par rapport aux tables de production de l'Épicéa dans le Massif central.

Sur vitrosols et aluandosols, la croissance de l'Épicéa est fortement ralentie du fait de contraintes physiques (enracinement superficiel, faible réserve en eau, forte présence d'aluminium échan-

geable), alors qu'elle est forte — notamment par comparaison avec les sols brunifiés sur socle granitique ou métamorphique — sur silandosols eutriques ou dystriques à bonnes alimentation minérale et alimentation en eau (Curt *et al.*, 1996b).

**Philippe LEGRAND**
Département de la Santé des Forêts
Échelon du Massif central
Actuellement
LABORATOIRE NATIONAL
DE LA PROTECTION DES VÉGÉTAUX
Station de Quarantaine
Marmilhat BP 45
F-63370 LEMPDES
(ph.legrand@agriculture.gouv.fr)

**François BARTOLI**
Laboratoire Sols et Environnement
UMR 1120 ENSAIA - INPL/INRA
BP 172
F-54505 VANDŒUVRE-LES-NANCY CEDEX
(francois.bartoli@ensaia.inpl-nancy.fr)

**Thomas CURT**
UR Écosystèmes méditerranéens et Risques
CEMAGREF
3275 route Cézanne
CS 40061
F-13182 AIX-EN-PROVENCE CEDEX 5
(thomas.curt@cemagref.fr)

**Remerciements**

Nous remercions O. Baubet (DSF Massif central) pour sa participation aux prélèvements destinés aux analyses foliaires, J. Dejou et F. van Oort pour la sélection des deux profils de sols volcaniques de référence de l'Action européenne COST 622 "Soil Resources of European Volcanic Systems" (1998-2004), T. Jongmans, F. van Oort, O. Spaargaren et P. Quantin pour leur description et leur classification, les Laboratoires de Science du Sol de Lisbonne, Saint-Jacques-de-Compostelle et Nancy pour les analyses de caractérisation de ces deux sols, et M. Bartoli pour avoir favorisé cette revue pluridisciplinaire. Nous remercions enfin trois correcteurs pour leurs commentaires constructifs qui ont permis d'améliorer la version initiale de cet article.

## BIBLIOGRAPHIE

ARNALDS (O.), BARTOLI (F.), BUURMAN (P.), GARCIA-RODEJA (E.), OSKARSSON (H.), STOOPS (G.) Editors. — Soils of volcanic regions in Europe. — Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007. — 644 p.

ARNALDS (O.), STAHR (K.) Editors. — Volcanic soil resources : occurrence, development and properties. — Catena, 2004. — 56, 264 p.

BAIZE (D.), JABIOL (B.). — Guide pour la description des sols. — Paris : INRA, 1995. — 375 p.

BARTOLI (F.), BURTIN (G.). — Organo-mineral clay and physical properties in COST 622 European volcanic soils. *In* : Soils of volcanic regions in Europe / O. Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, E. Garcia-Rodeja, H. Oskarsson, G. Stoops Editors. — Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007. — pp. 469-491.

BARTOLI (F.), BUURMAN (P.), DELVAUX (B.), MADEIRA (M.) Editors. — Volcanic soils : properties and processes as a function of soil genesis and land use. — *Geoderma*, 117, 2003, pp. 183-378.

BARTOLI (F.), REGALADO (C.), BASILE (A.), BUURMAN (P.), COPPOLA (A.). — Physical properties in European volcanic soils : a synthesis and recent developments. *In* : Soils of volcanic regions in Europe / O. Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, E. Garcia-Rodeja, H. Oskarsson, G. Stoops Editors. — Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007. — pp. 515-537.

BENIZRY (E.), DURRIEU (G.), ROUANE (P.). — La Pourriture du cœur de l'Épicéa *Picea abies* (L.) Karst. en Auvergne. Étude écologique. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 45, n° 2, 1988, pp. 141-146.

BONFILS (P.), MOINEREAU (J.). — Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques du Sud du Massif central. — *Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie*, IX-3, 1971, pp. 345-363.

BONNEAU (M.). — Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. — Nancy : ENGREF, 1995. — 367 p.

BONNEAU (M.), LANDMANN (G.), ADRIAN (M.). — La Fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sol acide : essais dans les Vosges. — *Revue forestière française*, vol. XLIV, n° 3, 1992, pp. 207-223.

BONNEAU (M.), LANDMANN (G.), GARBAYE (J.), RANGER (J.), NYS (C.). — Gestion et restauration de la fertilité minérale des sols. — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5, 1994, pp. 579-585.

BONNEAU (M.), NYS (C.). — Effets des amendements calci-magnésiques en forêt. — *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 83, n° 6, 1997, pp. 161-169.

BOUDOT (J.-P.), BECQUER (T.), MERLET (D.), ROUILLER (J.), RANGER (J.), DAMBRINE (E.), MOHAMED (D.A.). — Potential role of aluminium toxicity in nutrient deficiencies as related to forest decline : an assessment of soil solution data from the Vosges mountain. *In* : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Editors. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer, 1995. — pp. 270-285.

CLOTHIER (B.E.), VOGELER (I.), MAGESAN (G.N.). — The breakdown of water repellency and solute transport through a hydrophobic soil. — *Journal of Hydrology*, 307, 2000, pp. 112-125.

COQUILLARD (P.). — Dynamique des systèmes agro-pastoraux de l'étage montagnard du massif du Sancy et de la chaîne des Puys : variations biologiques et fonctionnelles ; application au modèle à *Calluna vulgaris* (L.) Hull. — Université Aix-Marseille - Sciences, 1993. — 266 p. (Thèse).

CURT (T.). — Typologie des stations forestières des zones volcaniques d'Auvergne (chaîne des Puys, monts Dore, Cézallier, monts du Cantal). — Cemagref - Groupement de Clermont-Ferrand, 1995. — 204 p.

CURT (T.), DOLE (S.), MARMEYS (G.). — Alimentation en eau et production forestière. Application d'indicateurs simples pour les résineux dans le Massif central. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 3, n° 2, 1996a, pp. 81-96.

CURT (T.), DOLE (S.), MARMEYS (G.). — Étude des relations milieu-production pour l'Épicéa commun en moyenne montagne volcanique auvergnate (monts Dore, chaîne des Puys). — Riom : Cemagref, 1996b. — 83 p. + annexes.

DAMBRINE (E.), GRANIER (A.), LÉVY (G.). — Water regime and magnesium deficiency : manipulative experiments in young Norway spruce stands. *In* : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Editors. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer, 1995. — pp. 286-299.

DEJOU (J.). — Les sols de la région de Clermont-Ferrand. — *Revue Sciences naturelles d'Auvergne*, 51, 1985, pp. 25-42.

DUCHAUFOUR (Ph.). — Introduction à la science du sol. 6e édition de l'abrégé de pédologie. — Paris : Dunod, 2001. — 331 p.

DSF MASSIF CENTRAL. — Complément au compte rendu de la tournée du 21 octobre 1999 dans le Puy-de-Dôme : dépérissement d'Épicéa commun. — Département de la Santé des Forêts, 1999a. — 3 p. (Document interne).

DSF MASSIF CENTRAL. — Compte rendu de la tournée du 10 décembre 2002 dans le département du Cantal. Problèmes d'alimentation minérale sur la pinatelle d'Allanche. — Département de la Santé des Forêts, 2002. — 6 p. (Document interne).

DSF MASSIF CENTRAL. — Réponse échantillon 63O01/99101 et fiche 63O01E015/1999. — Département de la Santé des Forêts, 1999b. — 3 p. (Document interne).

FRAIN (M.). — Approche phytosociologique de la dynamique des végétations primaires sur roches artificiellement dénudées. — Clermont-Ferrand : Université Blaise-Pascal, 1991. — 162 p. (Thèse de Doctorat d'Université, biologie et écologie végétales).

GARCIA-RODEJA (E.), NOVOA (J.C.), PONTEVEDRA (X.), MARTINEZ-CORTIZAS (A.), BUURMAN (P.). — Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. — *Catena*, 56, 2004, pp. 155-183.

GOMENDY-GENEVOIS (V.), MOREL (J.-M.). — Étude préliminaire à la mise en évidence des relations entre la nature géologique et pédologique et le ravinement des terrains formant certains chemins dégradés de la chaîne des Puys. — Rapport de l'association EDIACARA, Chamalières, commandé par le Parc des Volcans d'Auvergne, 2005. — 42 p.

GUILLAUMIN (J.-J.), DOUARRE (B.), PIERSON (J.). — Étude de quelques aspects du dépérissement du Sapin pectiné en Auvergne. *In* : Journées de travail DEFORPA (dépérissement des forêts et pollution atmosphérique). — Nancy ; Paris : INRA, 1989. — vol. 4, pp. 9.1.1-9.1.15.

HETIER (J.-M.). — Formation et évolution des andosols en climat tempéré. — Université Nancy I, 1975. — 195 p. (Thèse).

LANDMANN (G.), BERT (G.-D.), PIERRAT (J.-C.), BECKER (M.), BONNEAU (M.), SOUCHIER (B.). — Crown damage in Norway spruce and silver fir : relation to site and stand factors in the French mountains. *In* : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Editors. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer, 1995. — pp. 82-119.

LANDMANN (G.), BONNEAU (M.), BOUHOT-DELDUC (L.), FROMARD (F.), CHÉRET (V.), DAGNAC (J.), SOUCHIER (B.). — Crown damage in Norway spruce and silver fir : relation to nutritional status and soil chemical characteristics in the French mountains. *In* : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Editors. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer, 1995. — pp. 41-81.

LEGRAND (Ph.), LACROIX (R.), FALVARD (J.-F. de). — Un dépérissement d'Épicéa commun en forêt sectionnale d'Auzat (massif des monts Dore, département du Puy-de-Dôme). — *Revue Sciences naturelles d'Auvergne*, 64, 2000, pp. 71-86.

MADEIRA (M.), AUXTERO (E.), MONTEIRO (F.), GARCIA-RODEJA (E.), NOVOA-MONOZ (J.C.). — Exchange complex properties of soils from a range of European volcanic areas. *In* : Soils of volcanic regions in Europe / O. Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, E. Garcia-Rodeja, H. Oskarsson, G. Stoops Editors. — Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007. — pp. 369-385.

NANZYO (M.), DAHLGREN (R.), SHOJI (S.). — Chemical characteristics of volcanic ash soils. *In* : Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization / S. Shoji, M. Nanzyo, R. Dahlgren. — Amsterdam, London, New-York, Tokyo : Elsevier, 1993a. — pp. 145-187.

NANZYO (M.), SHOJI (S.), DAHLGREN (R.). — Physical characteristics of volcanic ash soils. *In* : Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization / S. Shoji, M. Nanzyo, R. Dahlgren. — Amsterdam, London, New-York, Tokyo : Elsevier, 1993b. — pp. 189-201.

NYS (C.), RICHTER (C.), PICARD (J.-F.), RENAUD (J.-P.). — Restauration des sols forestiers acides par un amendement calco-magnésien dans le massif vosgien et les Ardennes. — *Les Cahiers du DSF*, n° 1-2000 (La Santé des Forêts [France] en 1999), pp. 67-73. — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche – DERF.

PARFITT (R.L.), WILSON (A.D.). — Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. *In* : Volcanic soils / E. Fernandez Caldas, D.H. Yaalon Editors. — *Catena*, Supplement 7, 1985, pp. 1-8.

POULENARD (J.), BARTOLI (F.), BURTIN (G.). — Shrinkage and drainage in volcanic soil aggregates : a structural approach combining air under vacuum drying kinetics and mercury porosimetry. — *European Journal of Soil Science*, 52, 2002, pp. 563-574.

POULENARD (J.), HERBILLON (A.J.). — Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les Andosols. — *Compte Rendus Académie des Sciences, Paris*, série IIa, n° 331, 2000, pp. 651-657.

POULENARD (J.), MICHEL (J.-C.), BARTOLI (F.), PORTAL (J.-M.), PODWOJEWSKI (P.). — Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian paramo : effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. — *European Journal of Soil Science*, 55, 2004, pp. 487-496.

POULENARD (J.), PODWOJEWSKI (P.), JANEAU (J.-L.), COLLINET (J.). — Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian paramo : effect of tillage and burning. — *Catena*, 45, 2001, pp. 185-207.

PRÉVOSTO (B.), DAMBRINE (E.), MOARES (C.), CURT (T.). — Effects of volcanic ash chemistry and former agricultural use on the soils and vegetation of naturally regenerated woodlands in the Massif Central, France. — *Catena*, 56, 2004, pp. 239-261.

QUANTIN (P.). — Andosols et Vitrosols. *In* : Référentiel pédologique / D. Baize, M.-C. Girard (coord.). — Paris : AFES, INRA, 1995. — pp. 85-93.

QUANTIN (P.). — Volcanic soils of France. — *Catena*, 56, 1995, pp. 95-109.

ROLLAND (C.), LEMPÉRIÈRE (G.). — Effects of climate on radial growth of Norway spruce and interactions with attacks by the bark beetle *Dendroctonus micans* (Kug., *Coleoptera : Scolytidae*) : a dendroecological study in the French Massif Central. — *Forest Ecology and Management*, 201, 2004, pp. 89-104.

SEMLALI (R.). — Localisation, dynamique et estimation de flux d'éléments traces métalliques dans les sols. — ENGREF, 2000. — 112 p. (Thèse).

SHOJI (S.), DAHLGREN (R.), NANZYO (M.). — Morphology of volcanic ash soils. *In* : Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization / S. Shoji, M. Nanzyo, R. Dahlgren. — Amsterdam, London, New-York, Tokyo : Elsevier, 1993a. — pp. 7-35.

SHOJI (S.), DAHLGREN (R.), NANZYO (M.). — Genesis of volcanic ash soils. *In* : Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization / S. Shoji, M. Nanzyo, R. Dahlgren. — Amsterdam, London, New-York, Tokyo : Elsevier, 1993b. — pp. 37-71.

SHOJI (S.), NANZYO (M.), DAHLGREN (R.). — Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. — Amsterdam, London, New-York, Tokyo : Elsevier, 1993c. — 288 p.

SHOJI (S.), NANZYO (M.), DAHLGREN (R.). — Productivity and utilization of volcanic ash soil. *In* : Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization / S. Shoji, M. Nanzyo, R. Dahlgren. — Amsterdam, London, New-York, Tokyo : Elsevier, 1993d. — pp. 209-251.

SPAARGAREN (O.C.). — Andosols in the world reference base for soil resources and their correlation within other classification systems. *In* : Volcanic soil resources in Europe / H. Oskarsson, O. Arnalds Eds. — Reykjavik (Iceland) : Agricultural Research Institute, 2004. — Rala Report 214, pp. 25-26.

TAKAHASHI (T.), NANZYO (M.). — Aluminium solubility in nonallophanic Andosols from northeastern Japan. *In* : Volcanic soil resources in Europe / H. Oskarsson, O. Arnalds Editors. — Reykjavik (Iceland) : Agricultural Research Institute, 2004. — Rala Report 214, pp. 113-114.

**SPÉCIFICITÉS DES SOLS VOLCANIQUES DU MASSIF CENTRAL : BÉNÉFICES ET CONTRAINTES POUR LA GESTION FORESTIÈRE (Résumé)**

Les sols volcaniques ne couvrent que 1 à 2 % de la surface de la terre mais près de 7 % de la surface du Massif central, avec une prédominance d'occupation du sol par des prairies permanentes (80 %) mais aussi le développement de forêts montagnardes (20 %). Ces sols présentent des spécificités minéralogiques, chimiques et physiques, toutes dénommées propriétés andiques, qui différencient les sols volcaniques des autres types de sols et expliquent notamment leur importante fertilité. Mais ces sols sont aussi vulnérables et fragiles, notamment après de longues périodes de sécheresse, ce qui peut provoquer ou contribuer à un dépérissement de peuplements résineux, lié à la fois à une carence en potassium et à la difficile réhumectation des humus secs, alors hydrophobes. Dans ce texte sont aussi évoqués : l'utilisation prudente et raisonnée du travail du sol et de la circulation des engins forestiers, du fait de la vulnérabilité de ces sols volcaniques lorsqu'ils sont gorgés d'eau, et les problèmes d'alimentation minérale (carences minérales détectées à l'aide d'analyses foliaires, éventuelle phytotoxicité aluminique) attribuables aux propriétés chimiques de ces sols volcaniques. Enfin, la productivité de l'Épicéa commun apparaît largement dépendante des caractéristiques propres à chaque type de sol volcanique.

**VOLCANIC SOILS IN CENTRAL FRANCE : BENEFITS AND LIMITING FACTORS FOR FOREST MANAGEMENT (Abstract)**

Volcanic soils cover only 1-2 % of the world's land surface but nearly 7 % of the Massif Central area, France, with mostly permanent grassland (80 %) but also forest (20 %). Volcanic soils are characterized by distinctive mineralogical, chemical and physical properties, collectively termed andic properties, which separate volcanic soils from other types of soils, making them particularly fertile. These andic properties may be beneficial for tree growth but also partly induce dieback in softwood stands, particularly after long periods of drought, associated with both potassium deficiency and the difficulty in rehumidifying the dried-out and hence hydrophobic topsoils. This study reviews and reports different degrees of forest decline in connection with soil properties (hydrological properties, mineral deficiency, aluminium toxicity), and their dynamics. Finally, the productivity of Norway spruce is highly dependent on the particular characteristics of each type of volcanic soil.