

Les sols sous boisements spontanés de bouleau et de pin sylvestre dans la Chaîne des Puys

Influence du substratum et de l'utilisation ancienne, conséquences sur la végétation

B. Prévosto⁽¹⁾, T. Curt⁽¹⁾, C. Moares Domínguez⁽²⁾, E. Dambrine⁽²⁾, F. Poutier⁽²⁾ et B. Pollier⁽²⁾

(1) Cemagref - Clermont-Ferrand, équipe Ecologie Appliquée des Milieux Boisés, 24 av. des Landais, BP 50085, 63172 Aubière cedex

(2) INRA-CRF équipe Cycles Biogéochimiques. 54280 Seichamps

RÉSUMÉ

La Chaîne des Puys, massif volcanique de moyenne montagne du Massif Central, a connu une déprise agricole importante et rapide au cours des 5 dernières décennies. L'abandon des anciennes cultures et terrains de parcours a permis la formation de boisements spontanés monospécifiques de bouleau (*Betula pendula* Roth) au Nord de la Chaîne et de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) au Sud. Dans le cadre de l'étude de cette dynamique forestière, des sols ont été prélevés et analysés sous bouleau et sous pin en fonction d'usages passés contrastés (lande, pâture et culture) ; des relevés de végétation ont été effectués et les coefficients d'Ellenberg indicateurs des conditions environnementales ont été calculés.

Les sols des deux zones de prélèvement diffèrent par leur substratum, composé de scories basaltiques foncées au Sud, alors qu'au Nord, les scories trachytiques de couleur claire sont plus abondantes. Au Nord les sols ont un pH plus bas et montrent une forte accumulation de complexes organométalliques typiques des Andosols non allophaniques, alors qu'au Sud leur pH plus élevé, leur taux de matière organique plus faible et leur teneur en allophanes plus forte les classent parmi les Andosols à allophanes. Pour chaque zone, les sols sur anciennes cultures se distinguent des sols sur anciennes landes ou pâtures par un rapport C/N plus bas, un $\delta^{15}\text{N}$ plus élevé et par une minéralisation potentielle d'azote et une production potentielle de nitrate plus fortes. La végétation est plus nitrophile sur les anciennes cultures et les coefficients d'Ellenberg pour l'humidité, l'azote et le pH permettent de différencier très clairement les usages passés.

La composition chimique des projections volcaniques et l'intensité d'utilisation des anciennes terres agricoles apparaissent comme des facteurs clés pour comprendre la fertilité actuelle des sols et la composition de la végétation dans les boisements spontanés des zones volcaniques.

Mots clés

Usage ancien, Massif Central, sol volcanique, boisement spontané, composition végétale.

SUMMARY

SOILS IN SILVER BIRCH AND SCOTS PINE NATURAL WOODLANDS ON A MID-ELEVATION VOLCANIC MOUNTAIN (LA CHAÎNE DES PUY, FRENCH MASSIF CENTRAL). Influence of tephra chemistry and past land use, effects on vegetation composition

The Chaîne des Puys, a mid-elevation volcanic mountain range of the French Massif Central, was submitted to a sudden and large agricultural abandonment after the second world war. Field abandonment has led to natural afforestation and the establishment of monospecific birch (*Betula pendula* Roth) stands in the northern part of the study area and Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) in the South. Soils were sampled and analyzed within birch and Scots pine woodlands. Floristic surveys were also achieved and Ellenberg's values (R, N, L, H, T) computed.

Soils from the two geographical areas differed in their volcanic ash composition: basaltic dark colored tephra under Scots pine were more abundant in the South, whereas trachytic light colored tephra were more frequent in the North under birch. Soils from the northern part with a pH lower than 5.5 and a higher proportion of organo-metallic complexes were classified as non-allophanic Andosols. Soils from the southern part with a pH higher than 6, and a higher proportion of allophane were classified as allophanic Andosols. In both areas, soils of former croplands differed from soils of former pastures or heathlands by a lower C/N ratio, a higher $\delta^{15}\text{N}$, a higher nitrogen mineralization and nitrate potential production. Vegetation was more nitrophilous on former croplands and Ellenberg's values allowed to distinguish clearly former land uses.

Volcanic ash chemistry and intensity of former agricultural use were shown to be key factors in understanding present soil fertility and vegetation composition in natural woodlands of volcanic areas.

Key-words

Former land use, Massif Central, volcanic soil, natural woodland, vegetation composition

RESUMEN

LOS SUELOS BAJO FORMACIONES BOSCOSAS NATURALES DE ABEDUL Y PINO SILVESTRE EN LA «CHAÎNE DES PUY»: Influencia del sustrato y de los antiguos usos, consecuencias sobre la vegetación

En la «Chaîne des Puys» (sierra volcánica de media montaña del Macizo Central francés) se ha producido un importante y rápido abandono del uso agrícola en el curso de los últimos 5 decenios. El abandono de cultivos y tierras de pasto ha conducido a la aparición de formaciones boscosas monoespecíficas de abedul (*Betula pendula* Roth) en la parte norte de la sierra y de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) en la parte sur. En el marco del estudio de esta dinámica forestal, suelos bajo formaciones de abedul y pino silvestre fueron muestreados y analizados en función de los antiguos usos del medio (pradera, pasto, cultivo). Con el análisis florístico de ambas zonas, fueron calculados los coeficientes de Ellenberg (R, N, L, H, T).

Los suelos de las dos zonas estudiadas se diferencian en el tipo de sustrato: escorias basálticas de tono oscuro en el sur y escorias traquíticas de color claro en la parte norte.

En el norte, los suelos presentan un pH claramente inferior con una importante acumulación de complejos organometálicos característicos de andosoles con alófanos. En el sur, los suelos presentan un pH mayor, niveles de materia orgánica inferiores y un contenido en alófanos más importante por lo que los suelos pueden clasificarse como andosoles con alófanos. En cada zona, los suelos antiguamente cultivados se distinguen de los antiguos prados o pastos por presentar una relación C/N más baja, un $\delta^{15}\text{N}$ mayor así como una mineralización potencial del N y una producción potencial de nitratos más alta. La vegetación es más nitrófila bajo los antiguos cultivos y los coeficientes de humedad, nitrógeno y pH de Ellenberg permiten diferenciar muy claramente los antiguos usos.

La composición química de los restos volcánicos y el nivel de intensidad del antiguo uso agrícola, aparecen como los factores clave para la comprensión de la fertilidad de los suelos y de la composición florística actual de estas formaciones boscosas naturales sobre terrenos volcánicos.

Palabras claves

Antiguo uso, Macizo Central francés, suelo volcánico, formaciones boscosas naturales, composición vegetal

Depuis les années 1820, la surface boisée de France a doublé pour passer de 9 millions d'hectares à environ 18,5 millions d'hectares. Cette forte progression résulte de plantations artificielles mais surtout d'une dynamique naturelle de colonisation ligneuse des terres abandonnées par l'agriculture qui constitue la force motrice de l'accroissement des superficies forestières (DERF, 1995). Cette dynamique est particulièrement répandue dans les régions de moyenne montagne, comme la Chaîne des Puys au cœur du Massif Central. Dans cette région, les boisements spontanés se sont développés suite au démantèlement du système agraire traditionnel, fondé sur l'utilisation extensive de l'espace par le pastoralisme ovin. L'abandon des terres agricoles et des parcours s'est massivement produit après la seconde guerre mondiale, principalement à cause de l'intensification et de la spécialisation agricole (Bazin *et al.*, 1983) et du développement industriel et urbain.

Les espaces ouverts, landes et pelouses autrefois exploitées par le troupeau, ont été principalement colonisés par des essences comme *Corylus avellana* L., sur les pentes des édifices volcaniques et *Betula pendula* Roth et *Pinus sylvestris* L. sur les zones planes. Ces deux dernières essences colonisent rapidement les milieux perturbés grâce à leur caractère héliophile, leur forte capacité de dissémination et de régénération, leur croissance rapide et leur plasticité édaphique (Perala et Alm, 1990, Barbéro *et al.*, 1998). Elles forment actuellement des peuplements spontanés (encore appelés accrus) monospécifiques qui se répartissent principalement dans la zone centrale de la Chaîne des Puys pour le bouleau et dans la zone sud du massif pour le pin.

La colonisation forestière et l'évolution des propriétés des sols sur d'anciennes terres agricoles en déprise soulèvent des enjeux environnementaux et suscitent des interrogations sur :

- l'influence de l'ancien usage du sol sur le fonctionnement et la fertilité actuelle des sols,
- les conséquences de ces anciens usages sur la biodiversité de ces nouvelles forêts,
- enfin, la part que peuvent prendre ces accrus dans le stockage de C émis sous forme de CO₂ atmosphérique par la combustion d'énergies fossiles et la déforestation.

En France, l'évolution des propriétés des sols d'accrus au cours de la succession végétale a déjà été étudiée dans le Jura (Sciama, 1999; Moares *et al.*, 2001). Dans cette région, les accrus se composent de différents stades de boisement feuillus plurispécifiques. Au cours de la dynamique, des prairies jusqu'aux forêts, on observe une faible évolution des stocks de carbone, une diminution des stocks d'azote, et une diminution temporaire de la minéralisation nette et de la disponibilité d'azote dans les stades préforestiers.

Dans le travail qui suit, nous nous sommes intéressés aux accrus développés sur matériaux volcaniques dont les sols, qui couvrent des surfaces importantes dans le Massif Central, se caractérisent notamment par la présence d'allophanes (Hetier, 1975), et

aussi par de fortes teneurs en carbone. Ces teneurs élevées suggèrent une capacité d'accumulation particulièrement importante de carbone, tandis que la minéralisation de l'azote pourrait être limitée par la présence d'oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Boudot *et al.*, 1988).

Pour étudier ces accrus dans leur diversité, nous nous sommes concentrés sur deux zones géographiques distinctes. L'une située près du Puy de Dôme, porte des peuplements homogènes de bouleau et la roche-mère est constituée majoritairement par des scories claires de nature trachytique. L'autre, une vingtaine de km au Sud, porte des peuplements de pin sylvestre sur scories basaltiques foncées. Les peuplements des deux zones sont tous établis sur d'anciennes terres agricoles dont l'usage traditionnel était contrasté : anciens terrains de parcours ou anciennes terres de cultures.

Notre objectif est d'étudier les caractéristiques actuelles des sols en liaison d'une part avec la nature chimique des projections pyroclastiques constituant le substratum et d'autre part avec les anciennes pratiques agricoles. Nous étudierons également l'influence de ces facteurs sur la composition de la végétation des boisements spontanés et dans quelle mesure cette dernière reflète les conditions d'utilisation passée des sols.

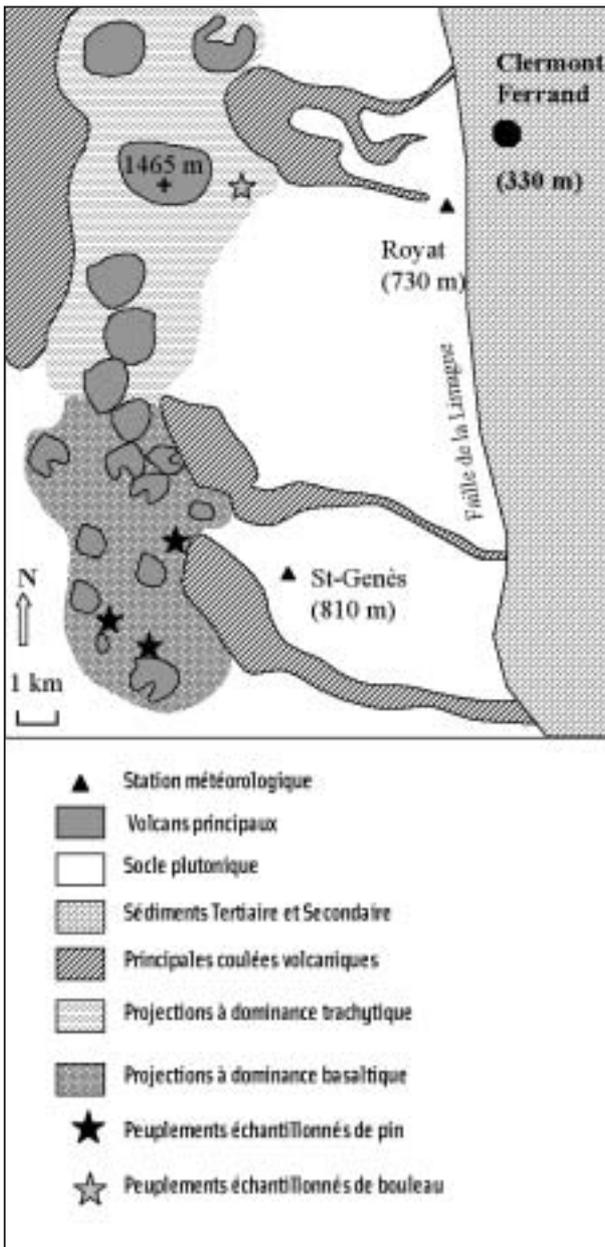
MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cadre naturel de la Chaîne des Puys

La Chaîne des Puys se situe au cœur du Massif Central. Il s'agit d'une chaîne d'origine volcanique d'âge récent (35 000 à 3 500 ans) dont les volcans s'alignent suivant une direction Nord - Sud, formant une zone axiale de 30 km de long et de 5-6 km de large d'où partent quelques coulées vers l'Ouest et vers l'Est (Camus et De Goër, 1984). Le Puy de Dôme culmine à 1 465 m et domine les autres appareils que l'on trouve entre 1 100 et 1 200 m. Les roches mères présentent une composition variable : des basaltes, mais aussi des trachyandésites et trachytes. L'examen de la carte volcanologique au 1/25 000 (Camus *et al.*, 1991) montre qu'elles sont localement recouvertes de projections volcaniques. Ces projections sont constituées par des recouvrements trachytiques et trachyandésitiques dans la zone centrale de la Chaîne des Puys et par un saupoudrage basaltique dans la partie sud du massif (*figure 1*). Les sols ont des propriétés andiques, une teneur élevée en matière organique, et se classifient traditionnellement entre Andosols vrais et Sols Bruns andiques (Dejou 1985), ce dernier type étant le plus répandu dans la Chaîne des Puys.

Le climat montagnard de la région est marqué par une influence océanique. Il est contrasté entre un versant Ouest plus humide et un versant Est asséché par un effet de foehn. A Gelles, altitude 800 m, il pleut annuellement 1 045 mm tandis qu'à Saint-Genès-Champanelle, 20 km plus à l'Est, à une altitude de 810 m, il pleut

Figure 1 - Carte géologique simplifiée de la Chaîne des Puys
Figure 1 - Schematic geological map of the Chaîne des Puys



annuellement 792 mm. Une zonation climatique Nord Sud a été décrite sur la base d'analyses floristiques (Coquillard, 1993) mais sa mise en évidence est plus délicate en raison du manque de stations météorologiques. Les précipitations sont très régulièrement distribuées au long de l'année et augmentent en fonction de l'altitude. L'ETP ne dépasse les précipitations que de quelques dizaines de mm pendant les mois d'été. La température moyenne annuelle est de 7 °C à 800 m et varie en fonction de l'altitude.

Le paysage de la Chaîne des Puys a été remodelé par l'activité anthropique. Au début du xx^e siècle, le paysage était essentiellement ouvert, mis en valeur par un système agraire très utilisateur d'espace (Bazin *et al.*, 1993). Le premier conflit mondial provoque une vague d'exode rural qui produit d'abord un abandon des cultures céréalières (seigle), notamment sur les zones les plus abruptes et les terroirs les moins productifs. Ces terres sont envahies rapidement par le pin sylvestre. Après la seconde guerre mondiale apparaît une spécialisation laitière (surtout dans le Sud), le cheptel bovin progresse alors au détriment du cheptel ovin. L'abandon du pâturage extensif des landes couplé à l'intensification entraînent une restriction de la surface agricole. Sur les terrains libérés de la pression pastorale, les formations végétales secondaires se développent.

Le territoire se partage donc entre la surface agricole (prairies, cultures, pâtures) à basse altitude, quelques landes soumises à un pâturage qui s'extensifie de plus en plus, des accrus forestiers qui peuvent être des bétulaies, des coryliaies ou des pinèdes selon leur position géographique et selon le système agraire ancien, des plantations monospécifiques d'épicéa qui peuvent être très étendues et, enfin, quelques hêtraies relictuelles d'altitude. Dans les zones Sud et Est, la reconquête des milieux ouverts s'est faite principalement par le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), tandis qu'on retrouve le bouleau (*Betula pendula* Roth) dans la zone centrale de la Chaîne des Puys, qui est aussi la plus froide et humide du massif volcanique.

Description des sites de prélèvement

31 sites choisis pour leur passé cultural et le type d'accru dominant ont été étudiés (tableau 1).

Les sites ont été choisis dans deux zones biogéoclimatiques (figure 1) mais à des altitudes comparables (900 m en moyenne). Au Nord, à proximité d'Orcine, à l'Est du Puy de Dôme, une zone couverte d'accrus dominés par le bouleau avec quelques bouquets de pins a été échantillonnée. Le substratum est principalement une trachyandésite, issue d'une lave visqueuse relativement acide, et se présente sous forme d'une coulée chaotique (cheire d'Orcine) en provenance du Puy de Pariou, âgée d'environ 8 500 ans. Il est recouvert par des matériaux pyroclastiques, scories issues du Puy Killian (8 200 BP) de même nature. Une vingtaine de kilomètres plus au Sud, trois zones entièrement colonisées par le pin sylvestre ont été échantillonnées. Le substratum de la première zone est un leucobasalte (ex-labradorite) sous la forme d'une coulée chaotique issue du Puy de la Vache, âgée d'environ 8 000 ans (cheire de Mercoeur), recouverte localement de scories basaltiques d'épaisseur variable. La seconde et la troisième zones couvrent les versants à pente modérée orientés vers le Sud-Est des Puys de la Rodde et de Combegrasse, entre 1000 et 1100 m d'altitude. La roche-mère est constituée de scories basaltiques épaisses provenant de l'explosion du Puy de la Vache (8 300 BP) sur socle de leucobasaltes (basaltes clairs âgés de 40 000 ans), généralement non affleurant dans le secteur.

Les substratum des secteurs d'Orcine et de Mercoeur, malgré

Tableau 1 - Nombre d'échantillons selon le type de peuplement et les usages anciens**Table 1** - Number of samples according to the main dominant tree species and previous land-use

Usages anciens	Bouleau (zone Nord)		Pin sylvestre (zone Sud)		
	Culture	Lande	Culture	Pâture	Lande
Nombre	5	7	5	9	5

des dénominations différentes, sont assez proches chimiquement et le faciès à l'affleurement est comparable. Celui du secteur du Puy de la Rodde est plus basique, c'est-à-dire plus riche en éléments ferromagnésiens. Mais ces placettes se distinguent principalement par la nature des scories : les scories claires, de nature trachytique sont abondantes au Nord sous bouleau alors que ce sont les scories basaltiques foncées qui dominent au Sud sous pin.

L'usage ancien des sols a été déduit du cadastre de 1831. Les informations cadastrales ont été complétées par :

- 1) l'observation des signes d'activités anthropiques sur le terrain (murets, tas de pierres),
- 2) les photographies aériennes anciennes (mission 1954 au 1/25 000 sur toute la zone d'étude, mission 1946 pour la partie Sud),
- 3) la carte écologique au 1/20 000 de Lemée (1959) pour la partie Nord de la zone d'étude. Trois usages anciens ont été distingués :
 - Les anciens terrains de parcours, il s'agit d'anciennes landes dominées par la callune (*Calluna vulgaris* L. Hull.) exploitées de façon très extensive par le troupeau avant d'être colonisées par le pin ou le bouleau.

- Les terres situées sur les zones de cheire volcanique. Ils s'agit de terrains qui apparaissent sous la dénomination « terres labourables » dans le cadastre de 1831 (cultures de céréales, seigle en règle générale), mais dont les parcelles ne sont pas délimitées par des murets. Les clichés aériens passés montrent une utilisation de ces terres par le troupeau. Ces terrains correspondent à une utilisation culturelle ancienne peu intensive puis par une reprise par le pastoralisme notamment au cours de ces 5 dernières décennies. Nous les avons désignés sous le terme de pâtures. Ce type d'antécédent n'a été échantillonné que sous pin.

- Les zones de cultures au sens strict. Sur le terrain il s'agit de parcelles aux dimensions modestes, elles sont toutes localisées sur des terrains plats et systématiquement bordées de murets.

Végétation

Des relevés floristiques ont été effectués sur une surface de 400 m² dans chacun des 31 boisements spontanés échantillonnés. Les espèces herbacées et ligneuses ont été inventoriées dans les trois strates (herbacée, strate ligneuse basse et strate ligneuse haute). Chaque espèce a été affectée d'un coefficient d'abondance-dominance selon la méthode de Braun-Blanquet (1932). A par-

tir des données floristiques, les valeurs indicatrices d'Ellenberg (Ellenberg *et al.*, 1992) ont été calculées pour chaque placette : chaque espèce végétale est affectée d'un coefficient reflétant ses préférences en terme de conditions d'humidité, de nutrition azotée du milieu, de lumière, d'acidité et de température (indices d'Ellenberg F, N, L, R, T) puis une moyenne est calculée sur l'ensemble des espèces de chaque relevé. Le système d'Ellenberg permet, sur un site donné, de quantifier les conditions environnementales en utilisant la valeur indicatrice de la flore. Ce système a été utilisé avec succès par de nombreux auteurs et dans différentes régions d'Europe pour estimer les conditions de lumière, de climats, de sols, dans des communautés végétales variées et aussi pour connaître les changements du milieu suite à une modification de la végétation ou de l'usage du sol (Van der Maarel, 1993 ; Hawkes *et al.*, 1997 ; Koerner *et al.*, 1997 ; Dzwonko, 2001).

Sols

Les sols ont été échantillonnés dans chaque placette suivant un transect de 5 points, espacés d'environ un mètre. La litière n'a pas été échantillonnée. Dans les sols d'accrus à bouleau, l'humus est un mull, seule la couche L est présente et elle représente l'équivalent d'une année de chute. Dans les accrus à pin, seules les couches L et F sont présentes (dysmull) mais elles peuvent être plus épaisses (au total 1 à 3 cm). Quatre profondeurs de sol (0-15, 15-30, 30-45, 45-60 cm) ont été prélevées à l'aide d'une tarière cylindrique à volume constant de 754 cm³ pour une épaisseur de 15 cm (*Eijkelpamp, single root auger*). Les cinq sous-échantillons de chaque profondeur ont été regroupés dans un récipient étanche et pesés, puis entièrement tamisés (4 mm) et le refus a été pesé. Les échantillons, ainsi homogénéisés, ont été conservés sur le terrain, à température ambiante et à l'obscurité, pendant une semaine.

Au laboratoire une aliquote des échantillons de sol (<4 mm) a été séchée à 105 °C pendant 24 heures pour déterminer la teneur en eau. Les sols ont été tamisés à sec à 2 mm. La densité apparente (masse totale/volume) et la densité de la terre fine ((masse totale - masse cailloux) / volume terre fine) ont été calculées.

Les analyses de sol tamisé à 2 mm ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse de Sol de l'INRA d'Arras. Les pH du sol dans l'eau et le KCl ont été déterminés pour les trois premiers horizons, la CEC par la méthode Metson pour les deux premiers et le phosphore assimilable (méthode Duchaufour (1959) NaOH N/10 puis

H₂SO₄ N/250) pour l'horizon de surface. Le carbone organique a été déterminé par la méthode Anne. L'azote total des horizons 0-15 cm et 15-30 cm a été mesuré par combustion dans un analyseur élémentaire Carlo Erba NA 1500NC. L'abondance isotopique naturelle en ¹⁵N ($\delta^{15}\text{N}$) a été mesurée dans un spectromètre de masse Finingan Delta S à l'INRA de Nancy.

Fe, Si et Al amorphes ont été extraits des trois horizons supérieurs des sols par le réactif de Tamm (Oxalate d'ammonium à pH = 3 à l'obscurité). Fe, Si et Al complexés à la matière organique ont été extraits des trois horizons supérieurs des sols par le pyrophosphate de Na. Les concentrations en solution de Si, Al, Fe ont été mesurées par spectrométrie d'émission atomique, ICP (JY 180). La différence entre les quantités de métaux extraits par ces deux procédures permet de quantifier les oxyhydroxydes non cristallisés et non associés à la matière organique, de type allophane.

Les stocks de C et N à l'hectare, additionnés jusqu'à 30 cm de profondeur, ont été calculés à partir de la concentration de chaque élément et de la densité de la terre fine dans chaque horizon.

Incubations et minéralisation de l'azote

La minéralisation de l'azote de la terre fine, tamisée sur le terrain à 4 mm, a été mesurée par une incubation aérobie des sols effectuée une semaine après le prélèvement. Pour chaque échantillon de l'horizon 0-15 cm prélevé, 3 sous-échantillons de 150 g de sol humide ont été placés dans des boîtes de 500 ml de volume. Les sols de la première et deuxième série ont été respectivement portés à des humidités de 45 % et 60 % (g eau / g sol sec). La troisième série, ajustée à 60 % d'humidité, a été enrichie avec l'équivalent de 100 mg d'N kg⁻¹ de sol sous forme d'une solution de (NH₄)₂SO₄. La teneur en eau a été contrôlée par pesée au cours de la période d'incubation et la température a été maintenue constante (15 °C).

Des extractions d'azote minéral par KCl 1N (20 g de sol humide / 100 ml) ont été effectuées sur des aliquotes juste avant et après 2, 4, et 6 semaines d'incubation. Chaque extraction a été réalisée en double (2 sous-échantillons de 20 g). La concentration de l'azote minéral (N-NH₄ et N-NO₃) a été déterminée avec un colorimètre automatique (TRAACS 2000). La minéralisation nette de l'azote a été calculée à partir de la différence entre les concentrations d'azote minéral initial et celles après 2, 4 et 6 semaines d'incubation. Les vitesses de minéralisation et de nitrification ont donc été calculées comme la pente de la droite de régression de l'azote produit en fonction du temps.

Analyse des données

Les analyses de variance ont été faites à l'aide du logiciel Statsgraphics. Les moyennes ont été comparées deux à deux par le test de Tukey. Seules les différences ayant des valeurs de P inférieures à 0,05 ont été considérées significatives. Néanmoins, le nombre de répétition par type de localisation géographique et d'ancien usage étant inférieur à dix (tableau 1), cela réduit la puissance du test.

RÉSULTATS

Propriétés des sols en relation avec leur position géographique et leur roche-mère

La teneur en éléments grossiers est très faible et la pénétration très aisée jusqu'à l'horizon C. La profondeur, définie comme celle à laquelle la tarière bloque ou pénètre dans la zone de scories non altérées varie en moyenne entre 40 et 60 cm. Les sols les plus superficiels se rencontrent au Sud (Cheire de Mercoeur) et les plus profonds au Nord (Cheire d'Orcine). Comme l'indique la carte géologique (Camus *et al.*, 1991), la fréquence de scories et de cailloux de nature trachytique, plus clairs, est plus élevée dans la zone Nord, tandis que les scories pulvérulentes foncées et basaltiques sont plus abondantes au Sud (figure 1).

La densité apparente des sols est faible, entre 0,5 et 0,7 g.cm⁻³, dans l'horizon de surface, comme dans la plupart des sols dérivés de matériaux volcaniques. En moyenne, elle est moins élevée dans les sols de la zone Nord, sous bouleau, que dans la zone Sud (tableau 2).

Les teneurs en eau sont plus élevées au Nord sous bouleau qu'au Sud sous pin, elles sont reliées principalement à la teneur en C des sols (figure 2A). Le pH varie entre 5,4 et 6,1 pour l'horizon 0-15 cm. Dans la zone Nord, sous bouleau, il est plus bas et varie peu en fonction de la profondeur. Il est nettement plus élevé sous pin dans la zone Sud et tend à s'approcher de la neutralité en profondeur.

Les teneurs en carbone sont élevées, en moyenne 9 % dans les 15 premiers cm, 6 % entre 15 et 30 cm, et fortement corrélées à la densité apparente et à la capacité d'échange cationique (figures 2B et 2C). Les sols de la zone Nord, sont beaucoup plus riches en carbone et en azote que ceux de la zone sud, sous pin. Les teneurs initiales en N-NH₄ et dans une moindre mesure en N-NO₃ sont plus élevées au Nord qu'au Sud.

Le rapport C/N est significativement plus bas sous bouleau uniquement dans l'horizon de surface alors que le $\delta^{15}\text{N}$ est toujours plus élevé au Nord sous bouleau qu'au Sud sous pin.

Les stocks de C et N du sol sont plus élevés au Nord qu'au Sud, mais les écarts sont moins marqués que pour les teneurs du fait de la variation inverse des densités qui sont plus faibles au Nord qu'au Sud.

La CEC des sols de la zone Nord est plus élevée que celle des sols de la zone Sud ce qui est principalement lié au fait des différences de teneur en C.

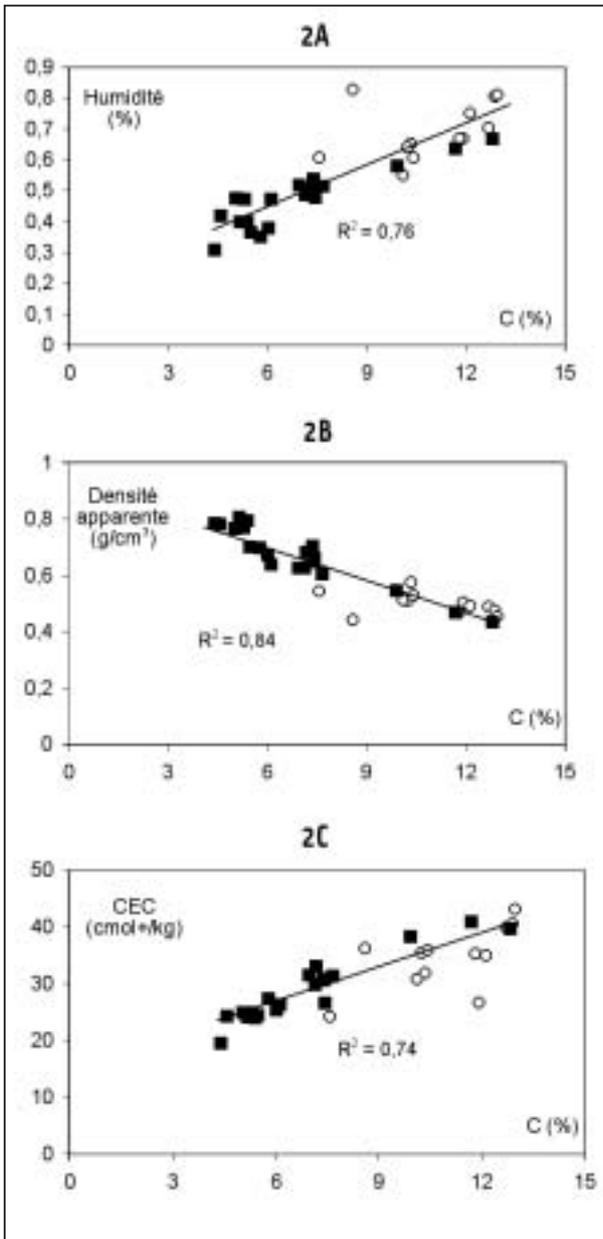
Les teneurs en Fe, Al, Si extraits par le pyrophosphate de Na sont nettement plus élevées dans les sols de la zone Nord que dans les sols de la zone Sud. Les teneurs en Fe et Si extraits par le réactif de Tamm sont par contre nettement supérieures dans la zone Sud, tandis que les teneurs en Al ne sont pas différentes, bien que plus variables dans la zone Sud. En moyenne l'Al extrait par le pyrophosphate représente 65 % de l'Al extrait par l'oxalate dans la zone Nord, et 30 % dans la zone Sud. Les allophanes seraient donc plus

Tableau 2 - Caractéristiques des sols en fonction de leur zone géographique à deux profondeurs**Table 2** - Soil properties according to the two geographical areas at two depths

Variables	Profondeur (cm)	Zone Nord (bouleau)	Zone Sud (pin)	«P-value»
Profondeur du sol (cm)		59	43	0,004
Densité apparente (g.cm ⁻³)	0-15	0,50	0,67	<0,001
Densité apparente (g.cm ⁻³)	15-30	0,65	0,86	<0,001
pH	0-15	5,48	6,07	<0,001
pH	15-30	5,42	6,42	<0,001
C/N	0-15	12,27	14,02	<0,001
C/N	15-30	11,87	11,73	ns
CEC (cmol+.kg ⁻¹)	0-15	34,52	28,76	0,009
CEC (cmol+.kg ⁻¹)	15-30	24,39	23,50	ns
δ15N (‰)	0-15	2,78	2,29	0,006
δ15N (‰)	15-30	4,60	4,09	<0,001
C (%)	0-15	10,98	6,96	<0,001
C (%)	15-30	7,23	4,03	<0,001
Stock C (t.ha ⁻¹)	0-15	71	53	<0,001
Stock C (t.ha ⁻¹)	15-30	59	40	<0,001
N (%)	0-15	0,90	0,50	<0,001
N (%)	15-30	0,61	0,35	<0,001
Stock N (t.ha ⁻¹)	0-15	5,8	3,8	<0,001
Stock N (t.ha ⁻¹)	15-30	5	3,5	<0,001
P ₂ O ₅ g.kg ⁻¹	0-15	1,98	1,73	ns
Fe oxalate (%)	0-15	1,92	3,40	<0,001
Fe oxalate (%)	15-30	2,10	3,22	<0,001
Si oxalate (%)	0-15	1,22	2,10	<0,001
Si oxalate (%)	15-30	1,52	2,11	<0,001
Al oxalate (%)	0-15	3,76	3,57	ns
Al oxalate (%)	15-30	4,08	3,37	0,008
Al pyrophosphate (%)	0-15	2,44	0,96	<0,001
Al pyrophosphate (%)	15-30	2,65	1,05	<0,001
Al pyro./Al oxal.	0-15	0,65	0,26	<0,001
Al pyro./Al oxal.	15-30	0,65	0,28	<0,001
Al oxal. + 1/2 Fe oxal. (%)	0-15	4,72	5,26	ns
Al oxal. + 1/2 Fe oxal. (%)	15-30	5,13	4,98	ns
N-NO ₃ teneur initiale (mg.kg ⁻¹)	0-15	7,58	4,12	ns
N-NH ₄ teneur initiale (mg.kg ⁻¹)	0-15	4,68	0,99	<0,001

Figure 2 - Relations entre la teneur en eau du sol, la densité apparente, la CEC et la teneur en C pour l'horizon 0-15 cm. Les relevés de la zone Nord sont indiqués par les cercles blancs et ceux de la zone Sud par les carrés noirs

Figure 2 - Relationships between soil moisture, bulk density, CEC and C content for the 0-15cm layer. Samples from the northern area (open circles) and from the southern area (black squares) are indicated



abondants dans la région Sud alors qu'au Nord ce sont les complexes organiques qui dominent.

Cependant le rapport Fe_{oxal}/Al_{oxal} et Si_{oxal}/Al_{oxal} sont identiques dans les deux zones de prélèvement et la somme $(Al_{oxal} + 1/2Fe_{oxal})$ est toujours supérieure à 2 %, ce qui est un critère de définition des Andosols.

Propriétés des sols en relation avec leur végétation actuelle et leur utilisation ancienne

Bien que le pH soit plus bas dans les sols sur anciennes landes, les différences avec les sols ayant subi d'autres usages ne sont pas significatives, que ce soit sous bouleaux ou sous pins (*figure 3A*). L'influence de l'ancien usage sur les teneurs en C et N est peu marquée (*figures 3B, 3C*), notamment dans les sols de la zone Nord, mais dans la zone Sud, sous pin, les quantités de C et N sont plus élevées dans les sols des anciennes landes, dont le pH est plus bas. Ces tendances se maintiennent en profondeur.

Dans chaque zone géographique mais surtout au Sud, et pour une végétation actuelle identique, les usages agricoles anciens les moins intenses (lande, pâture) aboutissent aux densités les plus faibles (*figure 3D*) mais les différences ne sont significatives que sous pin entre les anciens usages «lande» et les anciens usages «pâture» ou «culture». La densité variant inversement à la teneur en matière organique, les stocks de C et N des sols ne semblent pas varier en fonction de l'usage ancien des sols (*figures 3E, 3F*).

Il n'y a pas d'influence claire de l'ancien usage sur la CEC (*figure 3G*) car dans la zone Sud, la CEC est plus élevée sur anciennes landes (plus de C) que sur anciennes cultures tandis que sous bouleau au Nord la situation est inverse.

Le rapport C/N augmente des peuplements de bouleaux aux peuplements de pins. Dans chaque zone et pour chaque type de végétation actuelle, le rapport C/N augmente avec l'intensité de l'usage ancien des sols mais la différence n'est significative que dans la zone Sud (*figure 3H*).

Le $\delta^{15}N$ de l'horizon superficiel du sol est plus élevé sous bouleau que sous pin et décroît en fonction de l'intensité de l'usage agricole ancien du sol, mais les différences ne sont pas significatives dans ce dernier cas (*figure 3I*). Le $\delta^{15}N$ de l'horizon superficiel décroît quand croît le rapport C/N quelque soit l'usage actuel et ancien, mais pour une valeur de C/N donnée, le $\delta^{15}N$ peut varier selon l'antécédent (*figure 4*). L'influence de l'ancien usage des sols sur son abondance isotopique en ^{15}N disparaît dans l'horizon 15-30 cm.

Les teneurs en phosphore extrait par le réactif combiné de Duchaufour (1959, in Duchaufour, 1983) sont de l'ordre de 1,5- 2 g.kg⁻¹ dans l'horizon 0-15 cm et ne diffèrent pas entre les zones Nord et Sud (*figure 3J*). Dans chaque zone, et contrairement à ce qui était attendu (Koerner *et al.*, 1999, Moares *et al.*, 2001), elles sont plus

élevées dans les sols d'anciennes landes que dans ceux d'anciennes cultures.

Teneur et minéralisation de l'azote

Avant l'incubation, les quantités moyennes d'azote minéral total du sol, quels que soient le passé cultural et la végétation actuelle, sont en moyenne trois fois plus élevées dans la zone Nord que dans la zone Sud. Les teneurs initiales en N-NO_3 sont très nettement supérieures dans les anciennes cultures par rapport aux anciennes landes ou pâtures (figure 5A) mais les différences ne sont pas significatives pour N-NH_4 (figure 5B).

La quantité d'azote minéral produit par incubation augmente lorsque la teneur en eau s'élève à des valeurs de 45 % et 60 % d'humidité, sauf pour les accrus à bouleaux et l'essentiel de l'azote minéral produit est sous forme nitrate (figures 6A, 6B). Les flux de nitrification des sols incubés à 60 % de teneur en eau varient de 0.4 à 1,1 $\text{mg N.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$.

Les flux de minéralisation et de nitrification nets sont plus élevés sur anciennes cultures et plus faibles sur anciennes landes, que ce soit dans les accrus à bouleau ou à pin (figures 6A, 6B). Cependant, lorsque l'antécédent est identique on n'observe pas de différence significative de flux de minéralisation entre la zone Nord et Sud.

L'effet positif de l'ajout de NH_4 sur la production de nitrate se constate dès les premières semaines, mais avec une intensité différente selon les groupes de sols et les anciens usages (figure 7). Pour des pratiques agricoles anciennes identiques, la production de nitrate est la plus forte sous les pins de la zone Sud que sous les bouleaux de la zone Nord. Mais le gain de production de nitrate induit par l'ajout d' NH_4 est d'autant plus important que l'utilisation agricole des sols a été intense : il augmente des anciennes landes aux anciennes cultures, les différences n'étant cependant significatives que pour les pins sur anciennes cultures au bout de 2 semaines (figure 7). Néanmoins, à la fin des six semaines d'incubation, l' NH_4 ajouté a été complètement transformé en nitrate dans tous les sols.

Propriétés des sols évaluées à partir de la composition de la végétation

Les valeurs d'Ellenberg et les autres caractéristiques des relevés de végétation (nombre d'espèces, recouvrement des différentes strates) en fonction des antécédents sont présentées dans le tableau 3.

L'effet des antécédents apparaît clairement sur la composition de la végétation ainsi que sur sa structure. Le recouvrement de la strate arbustive est significativement plus haut dans les peuplements sur anciennes cultures que pour les autres usages à la fois pour les pins et les bouleaux. La strate herbacée montre une tendance opposée bien que les résultats soient moins tranchés. Le nombre d'espèces par contre n'apparaît jamais comme un indicateur significatif des usages anciens.

Dans chacune des deux zones, les valeurs d'Ellenberg pour l'azote, l'humidité et le pH augmentent en fonction de l'intensité ancienne d'utilisation des sols. Les valeurs pour l'azote et l'humidité sont significativement différentes entre l'antécédent «culture» et les antécédents «lande» et «pâturage» à la fois pour les bétulaies et les pinèdes.

L'ordre : pin/culture > bouleau/culture > bouleau/lande > pin/pâturage > pin/lande est le même pour les notes d'humidité et d'azote. Les valeurs pour l'azote sont corrélées aux variations de la minéralisation potentielle au laboratoire (figure 8).

A la différence des trois indicateurs précédents, la lumière ne permet pas de discriminer les antécédents pour tous les peuplements confondus, seules les pinèdes sont différenciées de manière significative selon leurs usages. Enfin il convient de souligner que les notes de température ne sont pas significativement différentes.

DISCUSSION

Caractéristiques des sols en fonction de leur zonation géographique et géologique

Suivant Hetier (1975), dans la tranche altitudinale considérée, les sols de la Chaîne de Puys sont des Sols Bruns andiques ou Andosols brunifiés. Parmi les critères «andiques» (Référentiel pédologique, 1995), ces sols présentent une structure grumeleuse, une faible densité, un taux élevé de matière organique et la somme ($\text{Al}_{\text{oxal}} + 1/2 \text{Fe}_{\text{oxal}}$) extrait par le réactif de Tamm est supérieur à 2 %. Néanmoins, le rapport Al pyrophosphate / Al oxalate n'est inférieur à 0,5 que dans les sols de la zone Sud et seulement dans quelques sols de la zone Nord. En conséquence, dans la zone Sud il s'agit bien d'Andosols allophaniques à horizons silandiques, tandis qu'ils se rapprochent des Andosols non allophaniques à horizon aluan-dique dans la zone Nord. Ceci est confirmé par la plus faible teneur en Si amorphe dans la zone Nord par rapport à la zone Sud (respectivement 1,2 et 2,1 %, $P < 0,001$).

Les conditions favorables à la formation de matériaux andiques, synthétisés par Hetier (1975) dans la chaîne des Puys sont : (1) un pédoclimat froid et humide, sans période de sécheresse, (2) un substratum volcanique et fragmenté, (3) une durée de pédogénèse optimale de 4 000 à 6 000 ans.

La teneur plus élevée en constituants amorphes, et particulièrement en Fe et Si des sols de la zone Sud, ainsi que leur pH plus élevé, suggèrent qu'ils dérivent de matériaux parentaux différents. Ces différences sont confirmées par la plus grande abondance de scories basaltiques de la zone Sud, décrites par les cartes géologiques et par l'examen des éléments grossiers.

Les hypothèses permettant d'expliquer la différence de teneur en carbone à l'avantage du Nord sont les suivantes :

- (1) La différence de végétation actuelle.
- (2) Une différence géologique.

Figure 3 - Propriétés des sols (moyenne et écart-type) en fonction des usages pour l'horizon 0-15 cm (barres blanches) et 15-30 cm (barres grises), les lettres (a, b, c, d) indiquent les valeurs qui sont statistiquement différentes au seuil choisi ($P < 0.05$) pour la profondeur 0-15 cm. Les valeurs affectées d'une lettre identique sont considérées comme non significativement différentes. BL bouleau sur ancienne lande, BC bouleau sur ancienne culture, PL pin sur ancienne lande, PP pin sur ancienne pâture, PC pin sur ancienne culture.

Figure 3 - Soil properties (mean value and standard deviation) in birch and Scots pine stands as function of former land use. White bars correspond to the 0-15 cm layer and grey bars the 15-30 cm layer, letters indicate statistical differences ($P < 0.05$) for the upper layer. Land-use categories are denoted as following: BL birch stands on previous heathlands, BC birch stands on previous croplands, PL pine stands on previous heathlands, PP pine stands on previous pastures and PC pine stands on previous croplands.

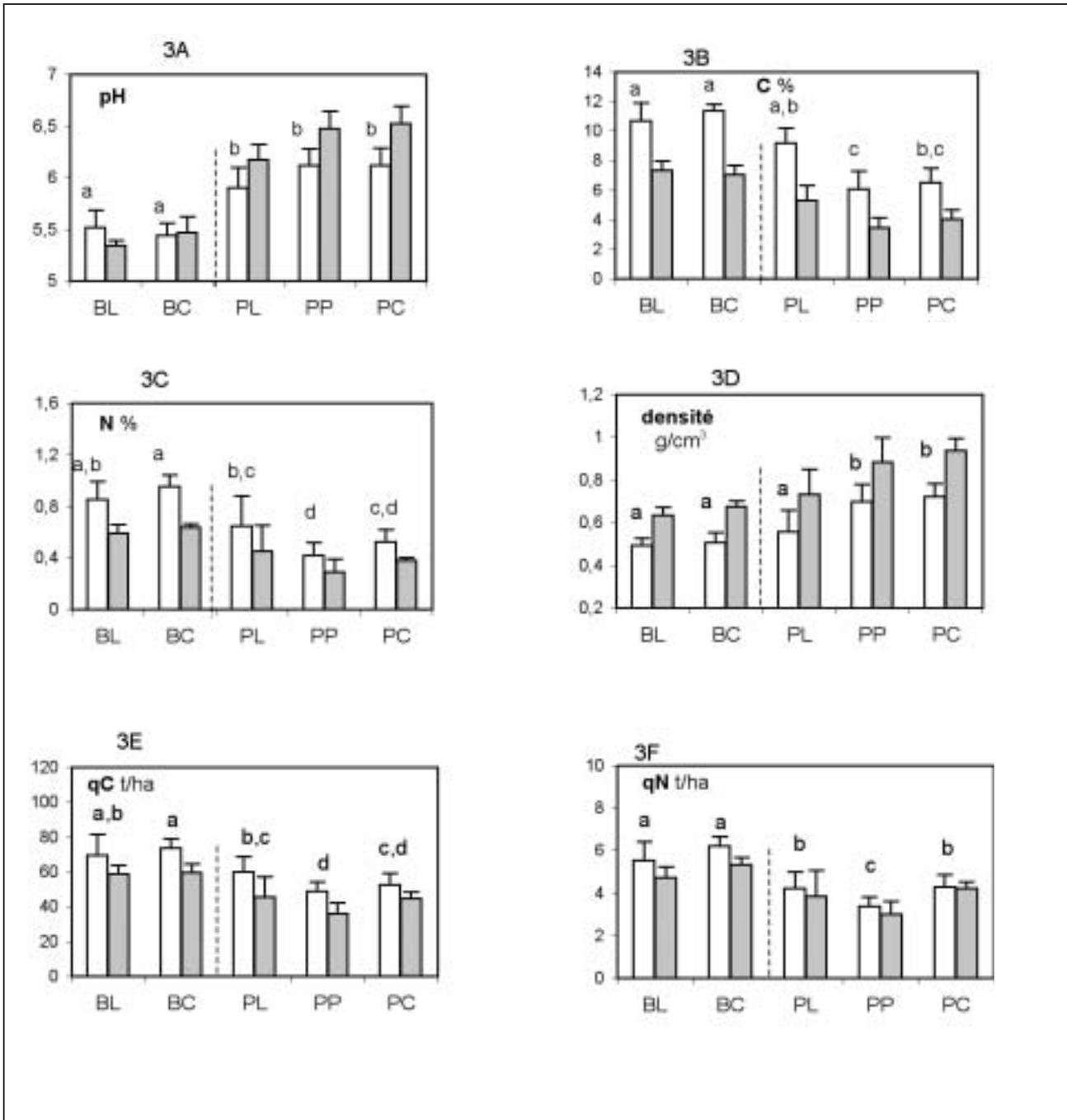


Figure 3 - (suite)

Figure 3 -

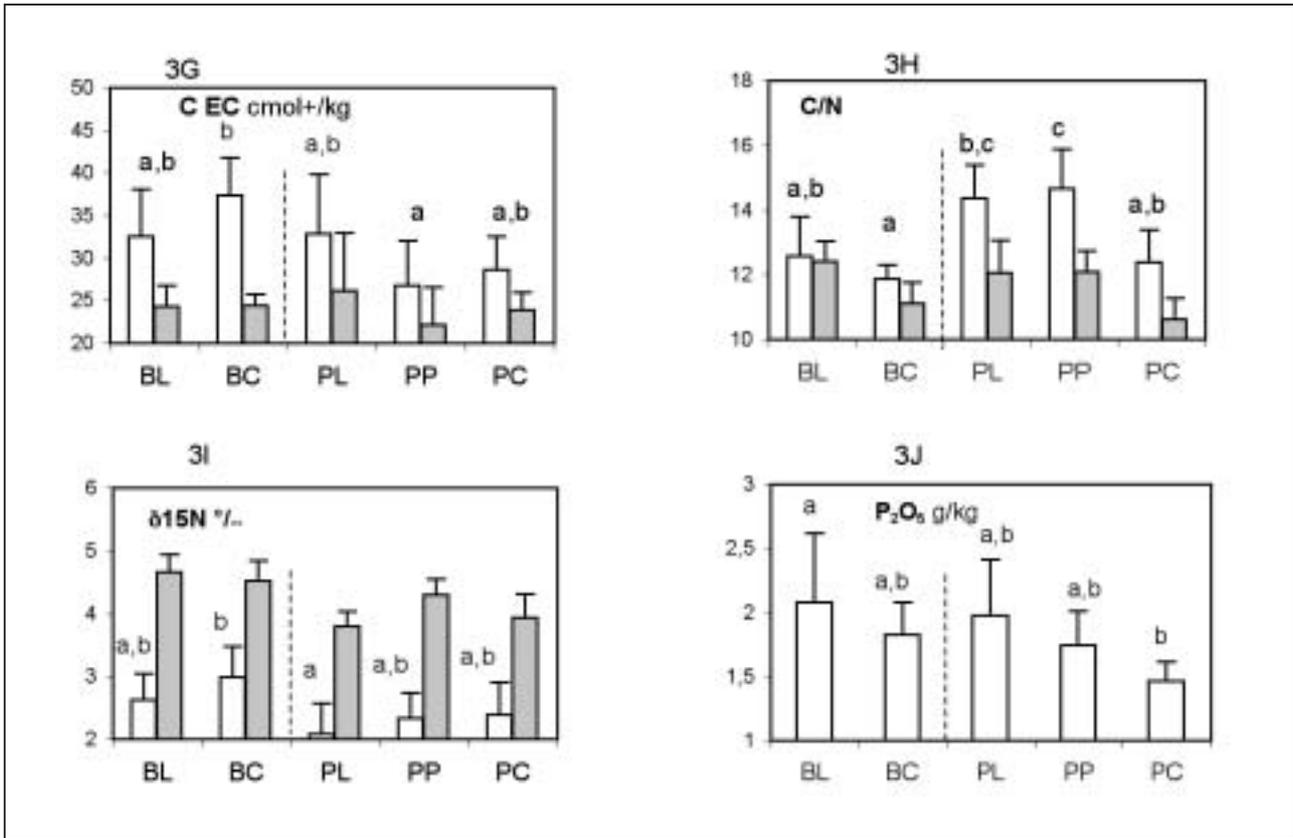


Figure 4 - Relation entre le $\delta^{15}N$ et le ratio C/N pour l'horizon 0-15 cm pour les différentes catégories d'usage.

Figure 4 - Relation between $\delta^{15}N$ and C/N ratio for the 0-15 cm layer for the different land-use categories

- Pin sur ancienne culture
- Pin sur ancienne pâture
- ▲ Pin sur ancienne lande
- Bouleau sur ancienne culture
- △ Bouleau sur ancienne lande
- Pine on former cropland
- Pine on former pasture
- ▲ Pine on former heathland
- Birch on former cropland
- △ Birch on former heathland

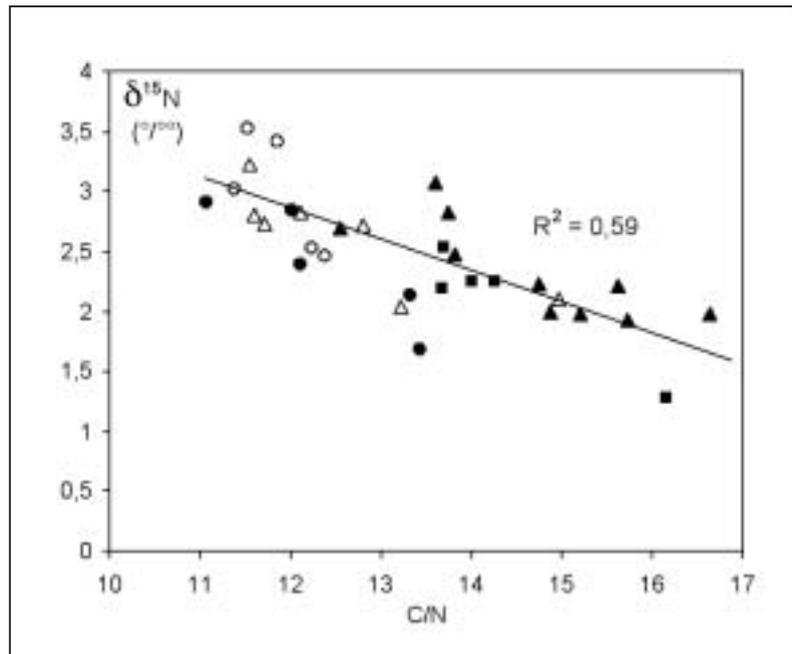


Tableau 3 - Valeurs moyennes Ellenberg et caractéristiques moyennes de la végétation. Les lettres indiquent les différences statistiques ($P < 0,05$)

Table 3 - Mean Ellenberg values and mean values of the vegetation characteristics. Letters indicate statistical differences ($P < 0.05$)

Antécédent	Humidité Ellenberg	Lumière Ellenberg	Azote Ellenberg	pH Ellenberg	Température Ellenberg	% strate. herbacée	% strate ligneux bas	% strate. ligneux haut	Nombre d'espèces
Pin/lande	4,46 (a)	6,27 (a)	4,39 (a)	5,33 (a,b)	5,26 (a)	78 (a,b)	5 (a)	82 (a,b)	52 (a)
Pin/pâture	4,60 (a,b)	5,92 (b)	4,58 (a)	5,92 (c)	5,27 (a)	83 (b)	18 (a)	44 (c)	50 (a)
Pin/culture	5,12 (b)	5,45 (c)	5,68 (b)	6,20 (c)	5,22 (a)	52 (c)	88 (b)	60 (b,c)	45 (a)
Bouleau/ lande	4,71 (c)	5,98 (a,b)	4,69 (a)	4,95 (a)	5,23 (a)	76 (a,b)	7 (a)	92 (a)	48 (a)
Bouleau/culture	4,91 (d)	6,22 (a)	5,56 (b)	5,76 (b,c)	5,22 (a)	68 (a)	56 (c)	94 (a)	48 (a)

Figure 5 - Concentrations initiales (moyennes et écart-type) en $N-NO_3$ et $N-NH_4$ en fonction des usages passés et pour l'horizon 0-15 cm. Les lettres indiquent les différences statistiques

Figure 5 - Initial $N-NO_3$ and $N-NH_4$ contents (mean value and standard deviation) at 0-15 cm according to past land-use. Letters indicate statistical differences

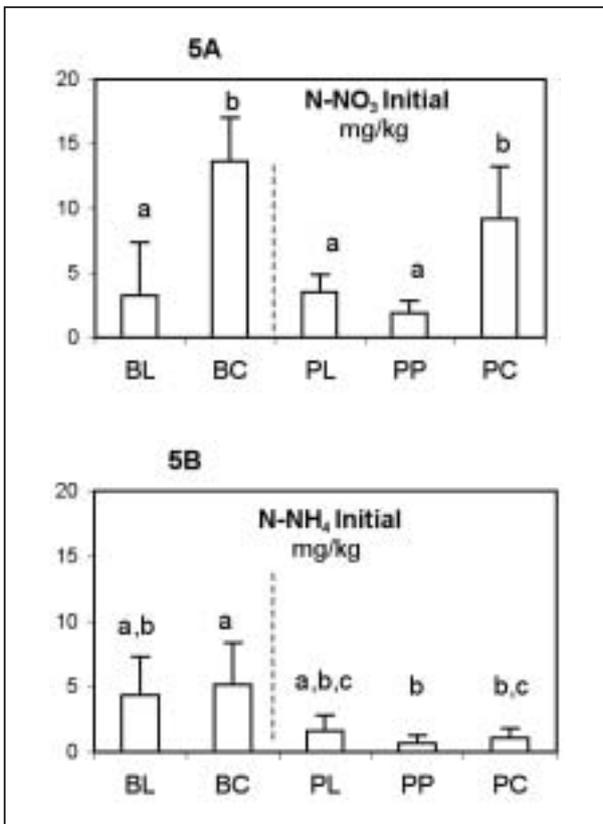


Figure 6 - Production en N minéral et $N-NO_3$ (moyenne et écart-type) après 6 semaines d'incubation pour deux teneurs en eau 45% (barres blanches) et 60% (barres grises) selon les usages passés. Les différences statistiques sont indiquées pour la teneur 60%

Figure 6 - N mineral and $N-NO_3$ gains (mean value and standard deviation) after 6 weeks of incubation at two water levels 45% (white bars) and 60% (grey bars). Statistical differences are indicated for the 60% water level

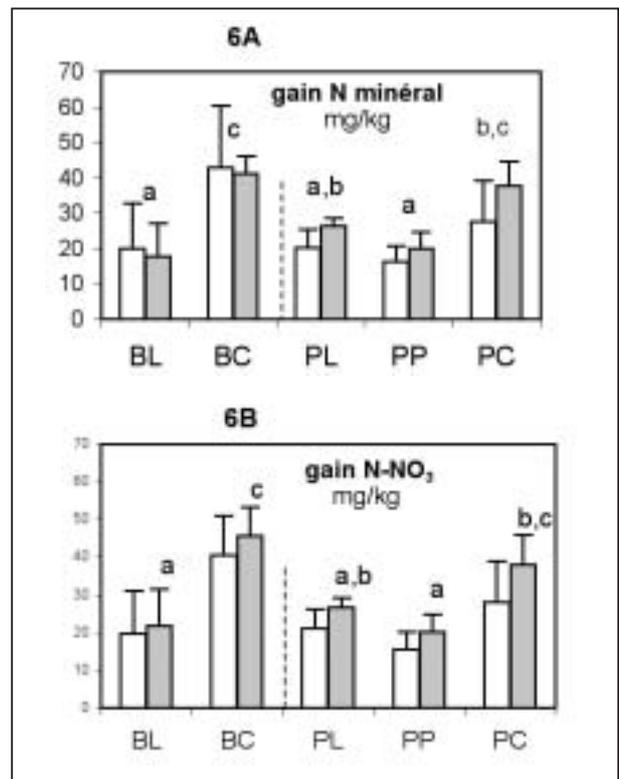
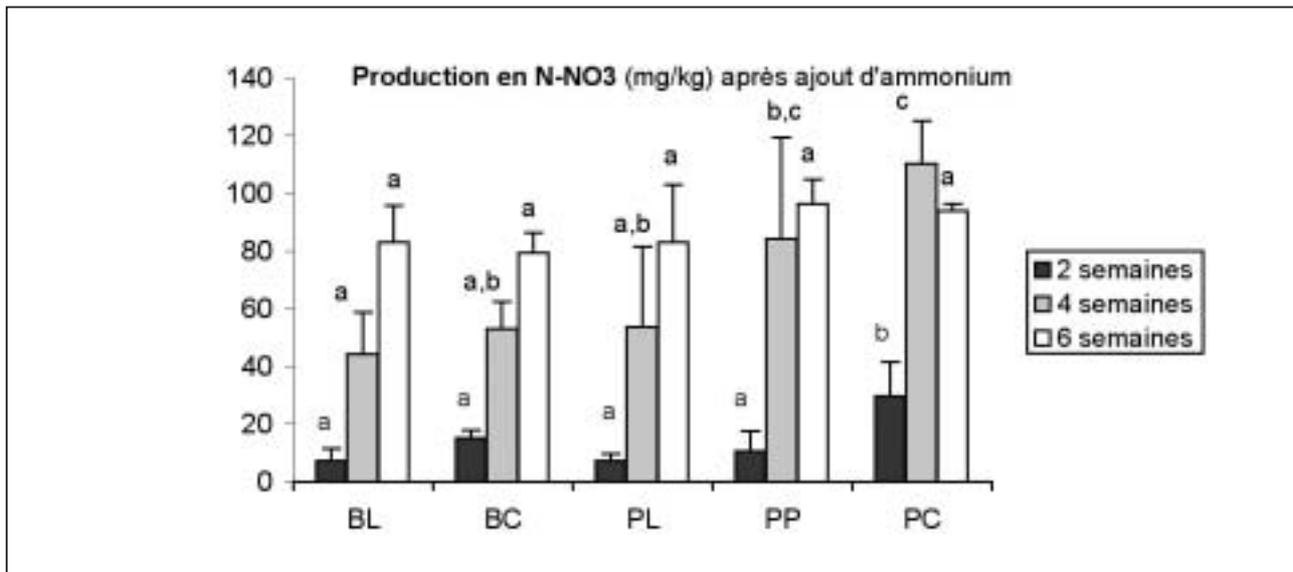


Figure 7 - Production en N-NO₃ (moyenne et écart-type) après ajout d'ammonium à 2, 4 et 6 semaines en fonction des usages passés. Les lettres indiquent les différences statistiques entre usages pour une même période

Figure 7 - N-NO₃ gain (mean value and standard deviation) after ammonium addition at 2, 4 and 6 weeks according to past land-use. Letters indicate statistical differences between previous land-use for a same period



(3) Une différence bioclimatique et écologique indépendante de l'influence humaine. Les sols de la zone Nord accumulent plus de carbone du fait d'un pédoclimat plus humide.

(4) Une différence d'usage ancien des sols, probablement liée à une différence bioclimatique.

(1) La première explication résiste peu à l'analyse. Quarante années de végétation forestière ne peuvent doubler (ou diviser par deux) les teneurs en carbone de sols humifères, en particulier dans les horizons profonds. De plus l'accumulation de carbone se ferait préférentiellement sous pin, dont la litière, riche en tanins, est moins biodégradable que celle de bouleau (Johanson, 1995, Priha et Smolander, 1999).

(2) L'influence du matériau parental est la plus probable. Nous avons déjà mentionné que les sols de la zone Sud sont plus riches en scories basaltiques, d'où leur plus forte teneur en allophanes et leur pH plus élevé. Inversement, les roches mères moins altérables de la zone Nord conduisent à des pH plus acides. Dans ces conditions de plus grande acidité, l'affinité des composés amorphes pour la matière organique est accrue, et leur liaison contribue à stabiliser la matière organique, donc à son accumulation dans les profils. Ce mécanisme, à l'origine des Andosols humifères non allophaniques a été décrit à plusieurs reprises au Japon (Shoji *et al.*, 1993) et plus récemment dans les Vosges (Aran, 1998, Gury *et al.*, 2000).

(3) Hétier (1975) suggère qu'une humidité constante et des températures basses favorisent le maintien d'un taux élevé de matières humiques, tandis que la dessiccation des Andosols entraînerait une diminution de la quantité de matière organique (Duchaufour, 1983).

Lors de nos relevés de végétation, nous avons observé une tendance à la xérophilie dans les pinèdes de la zone Sud par rapport aux bétulaies de la zone centrale de la Chaîne des Puys. Ces résultats sont par ailleurs conformes à ceux de Coquillard *et al.*, (1988) et Michalet *et al.*, (1988) fondés sur l'analyse de la composition floristique des landes.

Néanmoins l'écart des teneurs en carbone apparaît considérable en regard de la seule influence d'une différence climatique possible mais nécessairement faible.

La xéricité reflétée par la composition floristique exprime sans doute pour partie la meilleure réserve en eau des sols au Nord, liée à leur plus grande épaisseur et secondairement à leur teneur plus élevée en matière organique.

(4) La quatrième hypothèse impliquerait soit une antériorité du déboisement au Sud, qui aurait abaissé le taux de matière organique des sols, ou/et une fréquence d'incendies plus forte au Sud, bien qu'actuellement aucun élément historique ne puisse conforter cette théorie. Le déboisement aurait en effet pu abaisser la teneur en matière organique des sols ainsi que la proportion des complexes organométalliques au bénéfice des allophanes. On doit cependant remarquer que le taux de matière organique des sols semble peu

ou très secondairement influencé par les différents types d'anciens usages agricoles étudiés, puisqu'on n'observe pas de fortes différences entre landes et cultures. Pour expliquer, par des anciens usages, la différence de taux de matière organique entre zones Nord et Sud, il faudrait comparer d'anciens sols agricoles et forestiers. Pour des raisons historiques, ces sols ne se rencontrent malheureusement pas actuellement dans des positions comparables.

Ramenée au poids de sol, la minéralisation potentielle nette des sols n'est pas différente entre les deux zones géographiques. Elle paraît limitée par la sécheresse édaphique en zone Sud. Compte tenu de ce que les stocks d'azote des sols de la zone Sud sont moitié moins élevés qu'au Nord, le taux de minéralisation nette ramené au gramme d'azote du sol est plus faible au Nord. La nitrification potentielle nette est élevée au Sud, malgré un rapport C/N plus élevé, et un $\delta^{15}\text{N}$ plus faible, probablement parce qu'elle est moins inhibée par les complexes alumineux (Boudot *et al.*, 1988).

Influence des usages agricoles anciens sur les sols

Au-delà des différences majeures associées à la zonation géologique et géographique, les sols ayant subi des usages agricoles anciens différents se distinguent aussi par leurs propriétés. Par rapport aux anciens sols de lande et quelle que soit la zone géographique, les horizons de surface des sols anciennement cultivés ont des propriétés communes : densité plus élevée, stocks d'azote plus élevés, rapport C/N plus bas, $\delta^{15}\text{N}$ plus élevé et flux d'azote nitrique produit plus élevé. L'ensemble de ces propriétés est cohérent avec l'usage agricole ancien de ces sols (Badeau *et al.*, 1999 ; Koerner *et al.*, 1999 ; Moares *et al.*, 2001). Inversement, des différences pédologiques préexistantes à leur usage expliquent mal l'écart entre ces valeurs, d'autant plus qu'au sein de chaque zone géographique, les sites de prélèvement ont été choisis dans des conditions stationnelles très comparables. La densité est augmentée par les outils de travail du sol. La minéralisation accélérée de la matière organique par le labour, l'apport d'engrais organique riche en azote diminuent le rapport C/N et augmentent l'abondance isotopique en ^{15}N des sols. Dans les sols acides sur granite des Vosges (Jussy *et al.*, 2001) et de Nouvelle Angleterre (Compton et Boone, 2000), une augmentation du flux de nitrate produit dans les sols d'anciennes cultures a été également observée. Le drainage du nitrate formé pourrait contribuer à augmenter l'abondance isotopique en ^{15}N des sols.

Par contre, en sol neutre ou calcaire où la nitrification de l'azote minéralisé est totale, le flux de nitrate produit ne diffère pas entre les accrus sur anciennes cultures et les forêts anciennes (Moares *et al.*, 2001). Il semble donc que les effets des anciens usages agricoles des sols sur la minéralisation et la nitrification varient en fonction de l'acidité des sols.

Contrairement aux résultats attendus (Koerner *et al.*, 1999, Compton et Boone, 2000 ; Moares *et al.*, 2001), la teneur en phosphore assimilable extrait par double hydrolyse alcaline et acide est

plus élevée dans les sols d'anciennes landes. L'interprétation n'est pas aisée. Si on les compare avec les données comparables mesurées dans des sols de nouvelles forêts sur grès, granite (Koerner, 1999), argiles de décarbonatation et marnes (Moares *et al.*, 2001), les valeurs enregistrées dans ces sols très organiques et riches en constituants susceptibles de fixer le phosphore sous une forme peu assimilable apparaissent fortes. Elles pourraient être liées à la procédure d'extraction alcaline qui déplacerait une fraction de P peu assimilable, lié à la matière organique et aux amorphes. L'excès de P dans les anciens sols de lande par rapport aux sols de culture pourrait être lié à une surexploitation relative des anciennes terres de culture. En tout état de cause, l'abondance isotopique en ^{15}N des sols se confirme comme un meilleur traceur des anciens usages agricoles des sols que le phosphore assimilable.

Relation entre composition de la flore et propriétés des sols

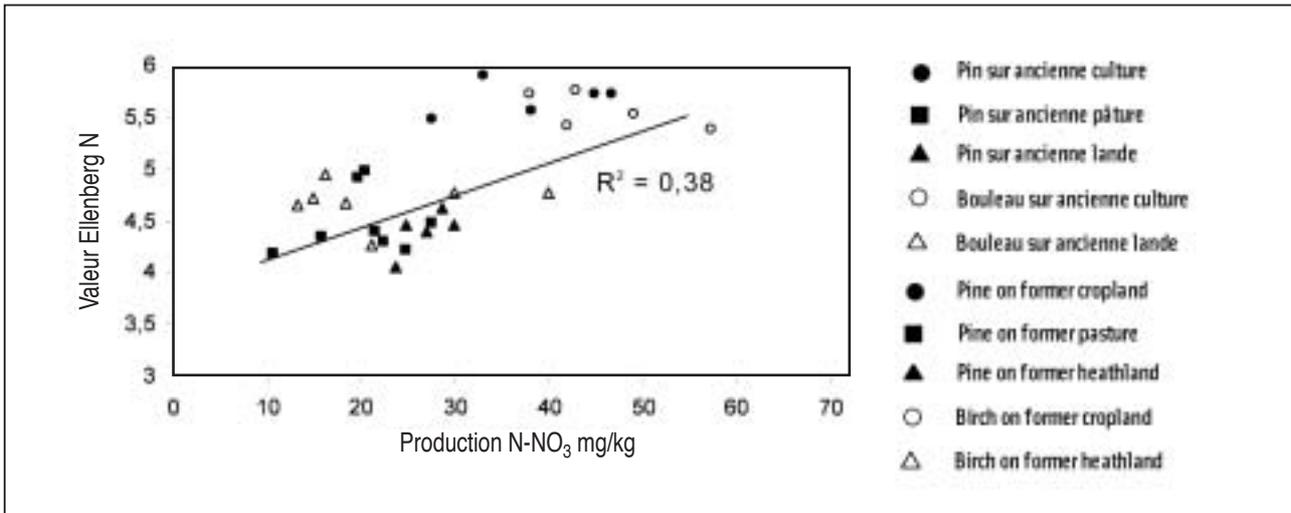
L'analyse de la végétation dans les boisements spontanés de pin et de bouleau montre que la composition floristique est largement influencée par les stades initiaux (Prévosto, 1999) : les espèces des *Calluno-Ulicetea* (*Festuca tenuifolia*, *Caluna vulgaris*, *Potentilla erecta*...) et du *Mesobromion* (*Hieracium pilosella*, *Cerastium arvense*, *Plantago lanceolata*...) sont largement représentées respectivement pour les antécédents landes et pâtures. Les pinèdes présentent cependant une tendance à la xérophilie plus marquée que les bétulaies. Pour l'antécédent culture, la végétation, malgré un nombre encore important de plantes relictuelles des milieux ouverts, se caractérise par la présence d'espèces des hêtraies mésotrophes à eutrophes du *Fagion sylvaticae* (*Paris quadrifolia*, *Galium odoratum*, *Daphne mezereum*...).

À l'intérieur de chaque zone géographique, le caractère plus nitrophile de la végétation croissant sur les sols d'anciennes cultures par rapport à celle des sols d'anciennes landes est mis en évidence par la relation positive entre les valeurs indicatrices d'Ellenberg pour l'azote et les mesures de nitrification potentielle nette (figure 8). Cette correspondance, déjà observée sur d'autres milieux (Jussy *et al.*, 2001, Moares *et al.*, 2001) suggère que ces deux types de mesures ont une signification écologique réelle.

Par contre, les valeurs Ellenberg pour l'acidité et l'humidité du sol augmentent fortement des anciennes landes aux anciennes cultures alors que les mesures physiques (pH et humidité du sol) ne montrent pas de différence significative. Cette absence de corrélation peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, il faut souligner que, hors conditions extrêmes, les valeurs Ellenberg R, N et H sont la plupart du temps corrélées entre elles, de la même façon que la minéralisation de l'azote est généralement supérieure dans les sols à pH élevé, riches en bases et à forte humidité (Standford et Epstein, 1974 ; Giesler *et al.*, 1998 ; Persson *et al.*, 2000). Par conséquent la variation de la disponibilité en azote liée aux usages passés influence probablement les valeurs indicatrices de la végétation pour l'acidité et l'humidité (Dzwonko, 2001). Deuxièmement les valeurs Ellenberg

Figure 8 - Corrélation entre les valeurs Ellenberg pour l'azote et la production en nitrates après 6 semaines d'incubation. Les différentes catégories d'usage sont indiquées

Figure 8 - Correlation between Ellenberg's values for nitrogen and nitrogen production after 6 weeks of incubation. The different land-use categories are shown



pourraient être corrélées à d'autres mesures physiques non échantillonnées ici. Ainsi Schaffers et Šykora (2000) ont trouvé que les corrélations étaient les plus fortes entre les valeurs Ellenberg pour l'humidité et la teneur en eau du sol en période estivale, soulignant ainsi que les valeurs Ellenberg traduisaient d'abord une réponse de la végétation à une sensibilité à la sécheresse estivale.

Contrairement au résultat de précédentes études dans des boisements artificiels (Koerner *et al.*, 1997), le nombre d'espèces ne varie pas selon les usages passés. Il faut rappeler, qu'à la différence des plantations résineuses, les boisements spontanés de pin et de bouleau permettent une bonne pénétration de la lumière et, par conséquent la composition floristique de ces peuplements est largement dominée par des héliophiles et les espèces relictuelles des milieux ouverts (Prévosto, 1999).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les sols d'accrus de la Chaîne des Puys possèdent des propriétés andiques dont l'expression varie en fonction de leur position géographique. Au Nord, à proximité du Puy de Dôme, les sols sont plus riches en matière organique et en complexes organométalliques qu'au Sud, où les allophanes seraient plus abondants. Parmi les facteurs susceptibles d'expliquer cette variabilité, l'abondance de scories basaltiques au Sud semble jouer un rôle dominant, en favorisant la production d'allophanes, mais aussi en maintenant un pH proche de la neutralité, plus favorable à la stabilisation des allophanes qu'à la formation de complexes avec la matière organique. De plus, une sécheresse édaphique plus marquée au Sud, pourrait contribuer ou

avoir contribué à accélérer la minéralisation de la matière organique et freiner l'acidification par drainage des bases, et corrélativement favoriser la stabilisation des allophanes. Enfin l'histoire du déboisement ou des usages anciens des sols pourrait différer entre ces deux zones et avoir induit une partie des différences observées.

Les anciens usages marquent encore fortement les propriétés des sols et la composition de la végétation herbacée. Les nouvelles forêts croissant sur des terres cultivées enrichies par fertilisation organique bénéficient d'une meilleure disponibilité d'azote nitrique, qu'elles soient issues d'un accru naturel, ou plantées (Jussy *et al.*, 2001). Cette production accrue d'azote nitrique des sols sur anciennes cultures par rapport aux sols sur anciennes landes régit une partie des différences de composition de la végétation forestière. Quels sont les mécanismes microbiologiques par lesquels ces différences peuvent perdurer ? Quelle est l'échelle de temps concernée ? Ces questions sont pour le moment sans réponse. On peut penser que le mécanisme peut s'auto-entretenir très longtemps si le flux minéralisé contribue à alimenter une masse foliaire et donc une litière plus abondante et plus riche en azote. Si tel était le cas, l'étude conjointe de la composition de la végétation et du cycle de l'azote pourrait témoigner d'usages agricoles très anciens.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier du GIP ECOFOR.

Les relevés de végétation et les prélèvements de terrain ont été effectués avec l'aide précieuse de Gilles Agrech.

BIBLIOGRAPHIE

- Aran D., 1998 - Andosolisation dans les Hautes Vosges. Conditions de développement et comparaison avec les autres processus de pédogénèse. Thèse Université Nancy I, 201 p.
- Badeau V., Dambrine E., Walter C., 1999 - Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. *Etude et Gestion des Sols*, 6, p. 165-180.
- Barbéro M., Loisel R., Quezel p., Richardson D.M., Romane F., 1998 - Pines of the Mediterranean Basin. In: Richardson, D.M. (éd.), *Ecology and Biogeography of Pinus*, Cambridge University Press, Cambridge, p 153-170.
- Bazin G., Larrère G.R., De Montard F.X., Lafarge M., Loiseau p., 1983 - Systèmes agraires et pratiques paysannes dans les Monts Dômes. INRA (éd.), Paris, 318 p.
- Boudot J. p., Bel Adj.B.A., Chone T., 1988 - Dependence of Carbon and Nitrogen Mineralization Rates upon Amorphous Metallic Constituents and Allophanes in Highland Soils. *Geoderma*, 42, p. 245-260.
- Braun-Blanquet J., 1932. - Plant Sociology. The study of Plant Communities. McGraw Hill, New-York. Reprint 1983, Koeltz, Koenigstein.
- Camus G., De Goër De Hervé A., 1984 - La Chaîne des Puys. In " le Volcanisme en Auvergne ". Ministère de l'Education Nationale, CRDP Clermont-Ferrand, p. 5-14.
- Camus G., De Goër De Hervé A., Kieffert G., Mergoil J., Vincent p.M., 1991 - Volcanologie de la Chaîne des Puys. 3ème édition mise à jour. Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, Clermont-Ferrand.
- Compton J.E., Boone R.D., 2000 - Long-term impacts of agriculture on soil carbon and nitrogen in New England forests. *Ecology*, 81, p. 2314-2330.
- Coquillard p., Gueugnot J., Michalet R., 1988 - Landes et herbages des édifices volcaniques de la Chaîne des Puys (Massif Central français). II. Ecologie et pastoralisme. XVI Colloq. Internat. Phytosociol., Paris, p. 665-681.
- Coquillard p., 1993 - Dynamique des systèmes agro-pastoraux de l'étage montagnard du Massif du Sancy et de la Chaîne des Puys : variations biologiques et fonctionnelles ; exemple d'application au modèle à *Calluna vulgaris* (L.) HULL. Thèse Doc. ès Sciences, Université Aix-Marseille, 266 p.
- Dejou J., 1985 - Les sols de la région de Clermont-Ferrand. *Rev. Sc. Nat. d'Auvergne*, Vol.51, p. 25-42.
- DERF, 1995 - Les indicateurs de gestion durable des Forêts Françaises. Min. Agr. Pêche, Direction Espace Rural et de la Forêt, 49 p.
- Duchaufour p., 1983 - Pédologie : pédogénèse et classification. Masson, Paris. 2ed., 491 p.
- Dzwonko Z., 2001 - Assessment of light and soil conditions in ancient and recent woodlands by Ellenberg indicator values. *J. Appl. Ecol.*, 5, p. 942-951.
- Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., Wirth V., Werner W., Paulissen D. 1992 - Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*, 18, p. 1-258.
- Giesler R., Hogberg M., Hogberg p., 1998 - Soil chemistry and plants in fennoscandian boreal Forest as exemplified by a local gradient. *Ecology*, 79, p. 119-137.
- Gury M., Aran D., Jeanroy E., 2000 - Roches mères et Andosolisation en milieu montagnard tempéré. Comparaison Pyroclastes récents-roches mères volcaniques massives anciennes. *Etude et Gestion des Sols*, 7, p. 119-132.
- Hawkes J.-C., Pyatt D.G., White I.M.S., 1997 - Using Ellenberg indicator values to assess soil quality in British forests from ground vegetation : a pilot study. *J. Appl. Ecol.*, 34, p. 375-387.
- Hetier J. M., 1975 - Formation et évolution des Andosols en climat tempéré. Thèse Doc. ès Sciences Naturelles, Université Nancy I, 193 p.
- Johansson M.B., 1995 - The chemical composition of needle and leaf litter from Scots pine, Norway spruce and white birch in Scandinavian forests. *Forestry*, 68, p. 49-62.
- Jussy J.H., Koerner W., Moares C., Dambrine E., Dupouey J.-L., Zeller B., Benoit M., 2001 - Influence de l'usage ancien des sols sur le cycle de l'azote dans les forêts vosgiennes. *Etude et Gestion des Sols*, 2, p. 91-102.
- Koerner W., Dupouey J.-L., Dambrine E., Benoit M., 1997 - Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *J. Ecol.*, 85, p. 351-358.
- Koerner W., Dambrine E., Dupouey J.-L., Benoit M., 1999 - $\delta^{15}\text{N}$ of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. *Oecologia*, 121, p. 421-425.
- Lemée G., 1959 - Carte des groupements végétaux de la France. Feuille de Clermont-Ferrand S-O., 1/20 000^e.
- Michalet R., Coquillard p., Gueugnot J., 1988 - Landes et herbages des édifices volcaniques de la Chaîne des Puys (Massif Central français). I. Synsystématique. XVI Colloq. Internat. Phytosociol., Paris, p. 647-663.
- Moares Domínguez C., Sciama D., Dambrine E., Dupouey J.-L., Gégout J.-C., Brechet C., 2001 - Evolution des stocks de carbone et de la disponibilité de l'azote lors de la dynamique de recolonisation des prairies abandonnées du Jura. *Etude et Gestion des Sols*, 2, p. 119-134.
- Perala D.A., Alm A.A., 1990 - Reproductive ecology of birch : A Review. *For. Ecol. Manage.*, 32, p. 1-38.
- Persson T., Rudebeck A., Jussy J.H., Colin-Belgrand M., Prieme A., Dambrine E., Karlsson P. et Sjöberg M., 2000 - Nitrogen turnover-mineralisation, nitrification and denitrification in European forest soils. In: Schulze, E.D. (Ed.) *Carbon and Nitrogen Cycling in European forest*. Ecological Studies 142, Springer Verlag, Heidelberg, Germany. 297-331.
- Prévosto B., 1999 - Analyse fonctionnelle des boisements spontanés et modélisation de leur développement. Application aux peuplements de *Betula pendula* (Roth.) et *Pinus sylvestris* (L.) en moyenne montagne volcanique (La Chaîne de Puys, Massif Central). Thèse doc., Université Aix-Marseille, 198 p.
- Priha O., Smolander A., 1999 - Nitrogen transformations in soil under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. *Soil Biol. Biochem.*, 31, p. 965-977.
- Schaffers A. P., Sýkora K.V., 2000 - Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction : a comparison with field measurements. *J. Veg. Sci.*, 11, p. 225-244.
- Sciama D., 1999 - Dynamique de la végétation forestière dans des terrains en déprise agricole en Petite Montagne Jurassienne. Thèse Doc., ENGREF Nancy, 269 p.
- Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R., 1993 - Volcanic ash soils. Elsevier (éd), Amsterdam, The Netherlands.
- Stanford G., Epstein E., 1974 - Nitrogen mineralization-water relation in soils. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, 38, p. 103-107.
- Van der Maarel E., 1993 - Relations between socioclimatic-ecological species group and Ellenberg indicator values. *Phytocoenologia*, 23, p. 343-362.

