
Propriétés des sols forestiers français : Résultats du premier inventaire systématique

V. Badeau ⁽¹⁾, E. Dambrine ⁽²⁾ et C. Walter ⁽³⁾

1 - INRA, UR 947, Unité Ecophysiologie Forestière, 59280 Champenoux

2 - INRA, UR 349, Unité Ecosystèmes Forestiers, 59280 Champenoux

3 - ENSAR, Unité Science du Sol, 65, Route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes CEDEX

RÉSUMÉ

Le réseau européen de suivi des dommages forestiers a été utilisé pour réaliser un premier inventaire détaillé des sols forestiers français.

Leurs caractéristiques pédogénétiques sont comparées aux données de la base géographique des sols de France et quelques propriétés chimiques sont comparées avec celles des sols agricoles, telles qu'elles sont décrites dans la synthèse nationale des analyses de terre.

Sur le plan pédogénétique, les sols forestiers français diffèrent assez peu des sols cartographiés sur l'ensemble du territoire. Quelques différences de fréquence sont cependant notées : les sols bruns, les sols hydromorphes et lessivés hydromorphes ainsi que les sols podzolisés sont plus fréquents en forêt ; à l'opposé, les sols lessivés non hydromorphes et les sols alluviaux sont moins représentés.

Des différences majeures sont par contre observées en ce qui concerne les propriétés chimiques des sols forestiers et agricoles. Les sols forestiers se distinguent très nettement par leur acidité, leur forte teneur en carbone et leur C/N élevé.

Mots clés

Sols forestiers, typologie, acidité, carbone, azote.

SUMMARY

FRENCH FOREST SOIL PROPERTIES : RESULTS OF THE FIRST SYSTEMATIC SURVEY

The forest soils of France were studied within the framework of the European forest soil condition survey of the level I plots (16 x 16 km gridnet) for the crown condition assessment. Five regional offices were appointed to complete the inventory of the observation plots under the supervision of the French Forest Health Department (Ministry of Agriculture) and the National Forest Office. For each site a detailed ecological description is available (Badeau, 1998). Litter, humus layers and mineral soil were sampled from a pit to a depth of 60 cm at four fixed intervals (0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm) and completed by a detailed soil description.

The frequency distribution of major forest soil types in this systematic network was compared to the geographic data base of french soils (Jamagne et al., 1995) and forest soil properties were compared to agricultural soil properties as described in the french national data base of soil analyses (Schvartz et al., 1997 a et b; Walter et al., 1997).

Forest soil types are rather similar to soil types covering the whole territory but some differences are shown : cambisols, stagnic and gleyic luvisols, gleysols and podzols are more frequent in forested areas but luvisols without gleyic or stagnic properties and Fluvisols are less represented (table I).

Major differences in chemical properties are shown between forest and agricultural soils. Forest soils differ by their acidity, their higher carbon content and higher C/N ratio (figures 7, 12 and 18). These differences can be explained by the nitrogen fertilization and liming and a high carbon mineralization rate due to agricultural work.

Key-words

Forest soils, classification, acidity, carbon, nitrogen.

RESUMEN

PROPIEDADES DE LOS SUELOS FORESTALES FRANCESES: RESULTADOS DEL PRIMER INVENTARIO SISTEMÁTICO

La red europea de seguimiento de los daños forestales se usó para realizar un primer inventario detallado de los suelos forestales franceses.

Las características pedogenéticas se comparan con los datos del banco geográfico de los suelos de Francia y algunas propiedades químicas se comparan con las de los suelos agrícolas, tal y como están descritas en la síntesis nacional de los análisis de tierra.

Sobre el plano pedogenético, los suelos forestales son poco diferentes de los suelos cartografiados sobre la totalidad del territorio. Algunas diferencias de frecuencia se notan: los suelos pardos, los suelos hidromórficos y lixiviados hidromórficos y los suelos podzolizados son más frecuentes en los bosques; por el contrario, los suelos lixiviados no hidromórficos y los suelos aluviales están menos representados.

Diferencias mayores se observan, por el contrario en el tocante a las propiedades químicas de los suelos forestales y agrícolas. Los suelos forestales se distinguen muy netamente por su acidez, su fuerte contenido en carbono y su C/N elevado.

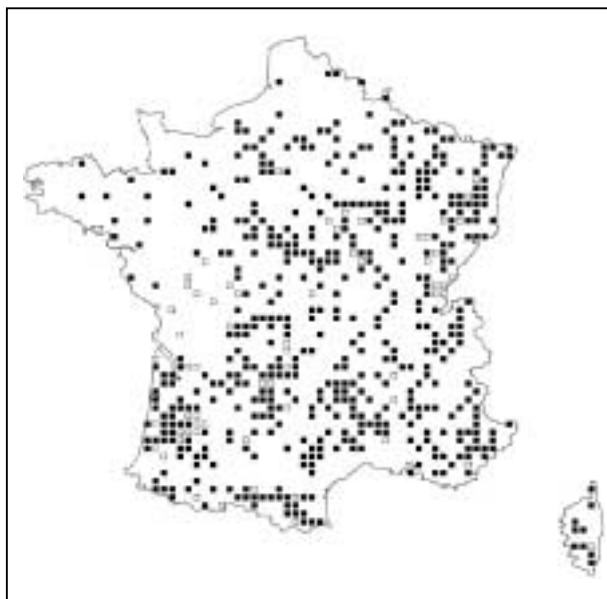
Palabras claves

Suelos forestales, tipología, acides, carbono, nitrogeno.

Depuis 1988, des observations de l'état sanitaire des forêts sont réalisées annuellement sur près de 6000 placettes (dites placettes de niveau I) réparties dans 35 pays européens sur un maillage carré systématique de 16 x 16 km. Ces placettes, au nombre de 540 en France, constituent le réseau européen de suivi des dommages forestiers (abrégé en Réseau Européen dans la suite du texte) - (DSF - ONF, 1994) - (figure 1).

A partir de 1994, l'évaluation de la qualité des sols des placettes de niveau I a été entreprise afin d'acquérir des informations de base sur la sensibilité des écosystèmes à la pollution atmosphérique (Vanmechelen et al., 1997). Profitant de cette opération, les experts français ont décidé d'engager, en complément de l'inventaire de l'état chimique des sols, la caractérisation écologique complète des 540 placettes situées en métropole (Badeau, 1998). Pour chaque placette, des informations générales ont été relevées. Des descriptions de l'environnement physique, des sols et des horizons ont été effectuées. Les horizons organiques et minéraux ont été échantillonnés et analysés jusqu'à une profondeur de 60 cm - si possible - constituant ainsi une base de près de 70 résultats analytiques par placette. Un inventaire floristique complet et des mesures dendrométriques simples ont également été réalisés. L'ensemble des résultats est publié dans le rapport

Figure 1 - Localisation géographique des placettes françaises du Réseau Européen. Les points noirs correspondent aux placettes utilisées pour la comparaison avec les sols agricoles.
Figure 1 - Spatial distribution of french plots from the European Network. The sites used in the comparison between forest and agricultural soils are plotted in black.



européen "Caractérisation écologique du Réseau Européen de suivi des dommages forestiers" (Badeau, 1998).

Après avoir présenté les procédures d'échantillonnage et d'analyse, nous exposerons les résultats sous forme de courbes de distribution de fréquence. Nous établirons des relations avec les types pédogénétiques de sols et nous discuterons ces informations à la lumière des données issues de la base de données géographique des sols à l'échelle du 1/1 000 000 (Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France - Jamagne et al., 1995) et de la base constituée à l'occasion de la synthèse nationale des analyses de terre (Schvartz et al., 1997 ; Walter et al., 1997 a et b).

MATERIEL ET MÉTHODES

Généralités

Un "Manuel des méthodes et critères applicables à une procédure harmonisée d'échantillonnage, d'évaluation, de surveillance et d'analyse des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts" décrit les méthodes de référence pour l'échantillonnage et l'analyse des sols forestiers sur les placettes d'observation de niveau I (Vanmechelen et al., 1997). En France, et pour la seule partie "sol" de l'inventaire, ces méthodes européennes ont été entérinées et complétées dans le "Manuel pour la description des sols" (Brêthes, 1993). Les opérations de terrain ont été réalisées par cinq bureaux d'études en 1993 et 1994. Les analyses chimiques des échantillons de sols ont été effectuées par le laboratoire d'analyse des sols du centre INRA d'Arras.

Description des humus et des profils de sols

Les formes d'humus ainsi que les profils de sols (solum) ont été décrits sur la base du "Référentiel pédologique" (AFES, 1992) et de la classification Duchaufour (Duchaufour, 1995) à partir d'une fosse d'observation creusée au centre de chaque placette. Un important travail d'homogénéisation et de synthèse des informations de terrain a été nécessaire pour créer un ensemble cohérent à l'échelle nationale. Les 540 solums ont été rattachés à une référence (AFES, 1992), ils ont été regroupés in fine dans 22 ensembles (Badeau, 1998) :

- les sols calcaires : Rendosols, Rendisols, Calcosols, Calcisols et Calcisols rédoxiques (lorsque des traces d'hydromorphie sont présentes à moins de 50 cm de la surface) ;
- les sols bruns distingués par : (i) le taux de saturation de l'horizon S (Brunisols saturés, mésosaturés et oligosaturés) et (ii) la présence (ou l'absence) de traces d'hydromorphie à moins de 50 cm de la surface (Brunisols rédoxiques) ;
- les sols acides : Alocrisols, Alocrisols rédoxiques et Rankosols ;

- les sols podzolisés : Podzosols et Podzosols rédoxiques;

- les sols lessivés : Luvisols, Luvisols rédoxiques et Luvisol - Rédoxisol si des traces d'hydromorphie sont présentes dès la surface;

- les sols où l'excès d'eau est considéré comme le caractère majeur ont été classés dans l'ensemble des Réductisols;

- les sols développés sur des alluvions fluviales récentes dans des positions topographiques basses, et donc inondables en période de crue, ont été classés dans l'ensemble Fluviosols.

Prélèvement des échantillons et analyses chimiques

La couche OH a été prélevée à part si son épaisseur était supérieure à 1 cm (soit 86 sols sur 540). Dans tous les autres cas, les couches OL, OF et OH ont été prélevées ensemble. Les horizons minéraux ont été prélevés, soit selon quatre profondeurs prédéterminées (0-10, 10-20, 20-40 et 40-60 cm), soit par horizon. Dans ce dernier cas, les teneurs en éléments ont été recalculées par tranche de profondeur à partir des teneurs et des densités apparentes des horizons (calcul pondéré) afin d'obtenir un lot de données homogènes. Dans tous les cas, un seul échantillon par profondeur (ou par horizon) et par fosse a été prélevé.

Le carbone organique a été mesuré par la méthode Anne pour les prélèvements 10-20, 20-40 et 40-60 cm. Pour les prélèvements 0-10 cm et les horizons organiques, le carbone organique est estimé par différence entre le carbone total (combustion sèche) et le carbone issu des carbonates. L'azote a été mesuré par la méthode Kjeldahl dans le cas des prélèvements 10-20 et 20-40 cm, et par combustion sèche dans le cas des prélèvements 0-10 cm et les horizons organiques. Les carbonates ont été déterminés par une mesure volumétrique du CO₂ dégagé après réaction acide. Le pH a été mesuré dans l'eau déminéralisée et dans le CaCl₂ centimolaire. Les cations échangeables au pH du sol ont été dosés après extraction au BaCl₂ décimolaire. Les protons n'ont été titrés que dans le cas des pHCaCl₂ < 6,5; l'acidité d'échange et

l'aluminium que dans le cas des pHCaCl₂ < 7 (Ponette et al., 1997; Badeau, 1998).

Calcul des stocks

Les stocks à l'hectare ont été calculés à partir :

i) du poids de matière sèche récoltée sur des surfaces de 30 x 30 cm de côté dans le cas des horizons hologaniques et;

ii) de la masse de terre fine calculée sur une profondeur de 40 cm à partir des densités apparentes mesurées à l'aide de cylindres d'Eijkelkamp dans le cas des horizons minéraux. Ce calcul n'est applicable qu'aux sols pour lesquels les échantillons minéraux ont pu être prélevés jusqu'à 40 cm, soit 430 sols sur les 540 placettes échantillonnées. Cette méthode exclut de l'échantillon les sols les plus superficiels, mais elle permet la comparaison des stocks à profondeur constante entre différents types de sols.

Dans le cas des horizons minéraux, les mesures de densité apparente n'ont pas toujours été réalisées. Pour compenser ce manque de valeurs (357 densités manquantes sur les 1289 nécessaires), nous avons établi un modèle simple à partir des teneurs en carbone et des densités apparentes disponibles (Alexander,

$$\begin{aligned} \ln(DA) = & 0,514 - (36.45E - 3 \leftrightarrow \ln(C)^2) \\ & - (67.30E - 6 \leftrightarrow \ln(C)^5) - (59.66E - 3 \leftrightarrow CPIER) \end{aligned}$$

1980; Manrique et Jones, 1991; Dupouey et al. 1997; Ponette et al., 1997 et Belkacem et al., 1998). Le modèle statistique retenu est le suivant :

avec : Ln (DA) le logarithme népérien de la densité apparente;

Ln (C), le logarithme népérien de la teneur en carbone;

CPIER, la pierrosité de l'horizon codée en 5 classes (0 - 0 % de cailloux; 1 - moins de 5 % de cailloux; 2 - de 5 % à 1/3 de cailloux; 3 - de 1/3 à 2/3 de cailloux; 4 - plus de 2/3 de cailloux).

Les étapes de la régression sont les suivantes :

Variables	F	prob > F	R2 partiel	R2 du modèle
Ln (C) ²	1322	0,0001	56,04%	0,560
PIERROSITE	98	0,0001	3,80 %	0,598
Ln (C) ⁵	6	0,0136	0,24%	0,600

Analyse de variance :

Source de variation ajusté	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	prob > F	R2
Régression	3	23.60	519.205	0,0001	0,600
Erreur	1038	0,045			

Base de données concernant les sols agricoles

Une base de données cantonales a été construite par traitement statistique de près de 300 000 résultats d'analyses de terre effectuées en France entre 1990 et 1994. Cette base de donnée a été constituée à la demande du Ministère de l'Agriculture sous l'égide de l'Association Française pour l'Etude des Sols, dans le cadre d'un partenariat entre l'Institut Supérieur d'Agriculture de Lille et

le Laboratoire de Sciences du Sol de l'École Nationale Agronomique et de l'INRA de Rennes. La méthodologie de construction et d'exploitation de la base a été décrite par Schwartz et al. (1997) et Walter et al. (1997a et b). Les résultats et les objectifs de ce programme sont également présentés sur le serveur "http://viviane.roazhon.inra.fr/snas/".

Les résultats utilisés dans la base de données proviennent de différents laboratoires d'analyses de terre agréés par le Ministère de l'Agriculture. Ces analyses ont, en général, été demandées par des agriculteurs et portent sur des prélèvements effectués sur une épaisseur de 20-25 cm pour les sols travaillés et de 5-10 cm dans le cas des prairies.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Proportion des grands types de sols

La figure 2B présente les proportions des grands types de sols rencontrés sur les placettes françaises du Réseau Européen. Ces sols se distribuent en majorité au sein de trois groupes de façon à peu près équilibrée. Les sols calcaires et calciques représentent près du tiers des sols observés. Les sols bruns ainsi que les sols lessivés non ou

faiblement hydromorphes représentent plus de 30 % de l'échantillon. Enfin, les sols acides (Alocrisols, Podzosols et Rankosols) représentent un peu plus de 26 % de l'échantillon. Les Fluviosols ne représentent que 1,5 % de l'échantillon total. Les sols caractérisés par une hydromorphie forte (Luvisols-redoxisols et Réductisols) représentent 9,8 % des sols des placettes du réseau. En dehors de ces derniers, 23 % des sols présentent des traces d'hydromorphie à moins de 50 cm de profondeur.

La comparaison des fréquences des types de sols observés sur le Réseau Européen avec les fréquences issues de la base géographique des sols de France au 1/1 000 000 est présentée sur le tableau 1. Elle suggère qu'en forêt, la fréquence des sols bruns, des sols hydromorphes et lessivés hydromorphes ainsi que celle des sols podzolisés est plus élevée que sur l'ensemble du territoire (tous types d'occupation des sols confondus), tandis que les sols lessivés non hydromorphes et les sols alluviaux sont moins représentés. Les sols forestiers intéressent actuellement plus de 26 % du territoire; cette comparaison ne peut donc pas être strictement interprétée comme une illustration de la différence entre sols agricoles et forestiers. Par ailleurs, les critères de regroupement des types de sols

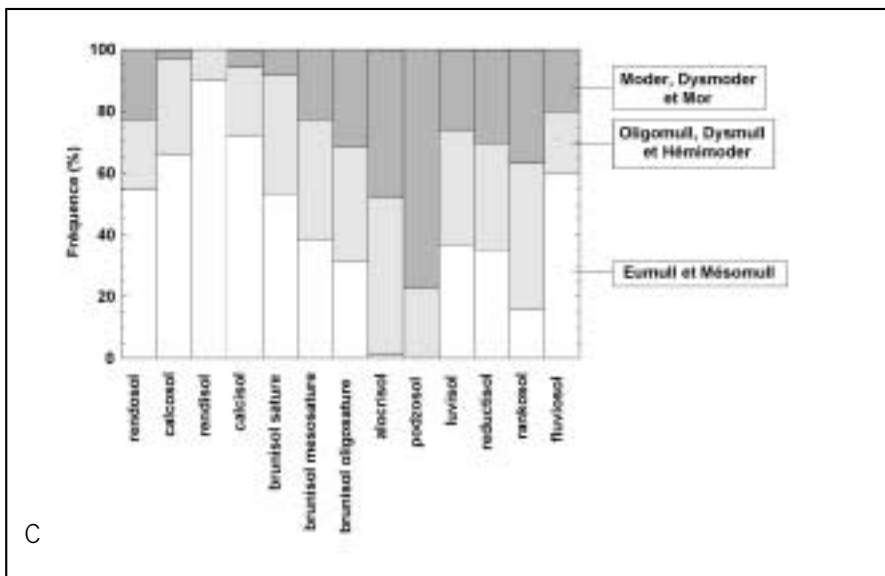
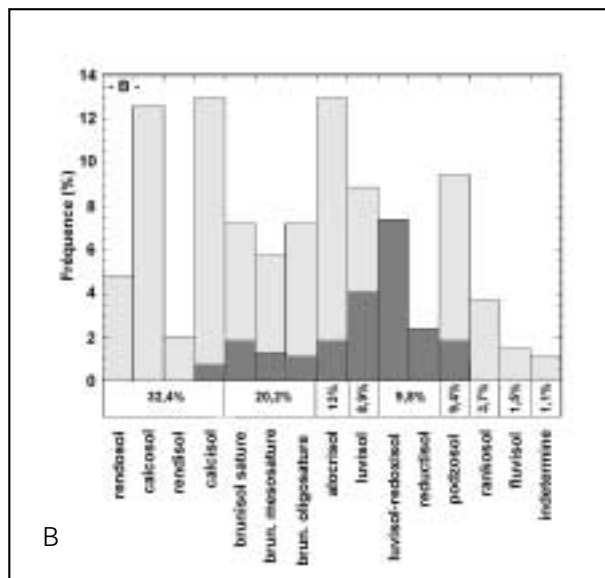
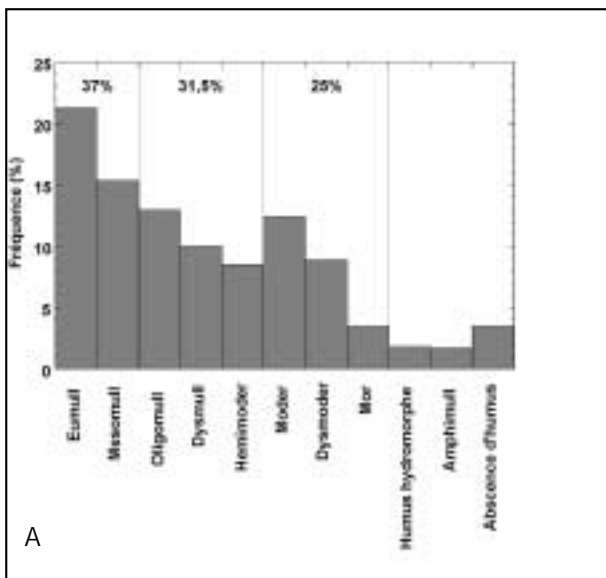
Tableau 1 - Comparaison de la fréquence des grands types de sols à l'échelle de la France (Base géographique des sols de France) et à l'échelle des 540 placettes forestières du Réseau Européen.

Table 1 - Comparison between the frequency of major soil types of the french soil map (1/1 000 000) - (geographic data base of french soils) and the frequency of the forest soil types at the 540 plots scale in the European Network

Base géographique des sols de France		Réseau Européen	
Types de sols	Fréquence (%)	Fréquence (%)	Types de sols
Rendzines	8,30	6,11	Rendosols, Rendisols et organosols calcaires
Sols bruns et bruns calcaires	48,50	<u>58,15</u>	Calcosols, Calcisols, Brunisols, Brunisols rédoxiques, Alocrisols et Alocrisols rédoxiques
Andosols	1,00	0,93	Brunisols andiques
Sols lessivés	<u>14,50</u>	8,89	Luvisols et Luvisols rédoxiques
Sols lessivés dégradés	6,40	<u>7,41</u>	Luvisols - Rédoxisols
Sols hydromorphes, sols tourbeux, vertisols et planosols	0,90	<u>2,41</u>	Réductisols
Podzols	5,60	<u>9,44</u>	Podzosols et Podzosols rédoxiques
Rankers	1,80	2,59	Rankosols
Sols alluviaux	<u>7,80</u>	1,48	Fluviosols
Lithosols	2,30	1,30	Lithosols calcaires et organosols acides
Sols sableux et sols peu évolués sur roches tendres calcaires	1,20	1,30	Arénosols acides, régoSols sableux et régosols
Sols isohumiques	0,10	-	
Sols salsodiques	0,40	-	
Non sol	1,20	-	

Figure 2 - Proportion des différentes formes d'humus (-A-) et des différents types de sols (-B-) rencontrés sur les placettes françaises du Réseau Européen : les parties grisées correspondent aux sols présentant des traces d'hydromorphie à moins de 50 cm de la surface. Fréquence des grandes formes d'humus en fonction des grands types de sols (-C-).

Figure 2 - Frequency distribution of humus types (-A-) and of major forest soil types (-B-) in the systematic network : the grey color corresponds to soils with hydromorphic characteristics (stagnic or gleyic properties). Frequency distribution of humus types clustered by major soil types (-C-).



peuvent différer dans les deux lots de données. Néanmoins, cette comparaison traduit quelques différences manifestes comme le taux plus élevé de podzols en forêt ou la faible abondance des sols alluviaux.

Proportion des types d'humus

La figure 2A présente les proportions des types d'humus rencontrés sur les placettes. Comme pour les types de sols, les humus se répartissent dans trois ensembles majoritaires. Les eumull et les mésomull représentent près de 37 % de l'échantillon; les oligomull, dymull et hémimoder en représentent 31,5 % et 25 % correspondent à des humus très acides

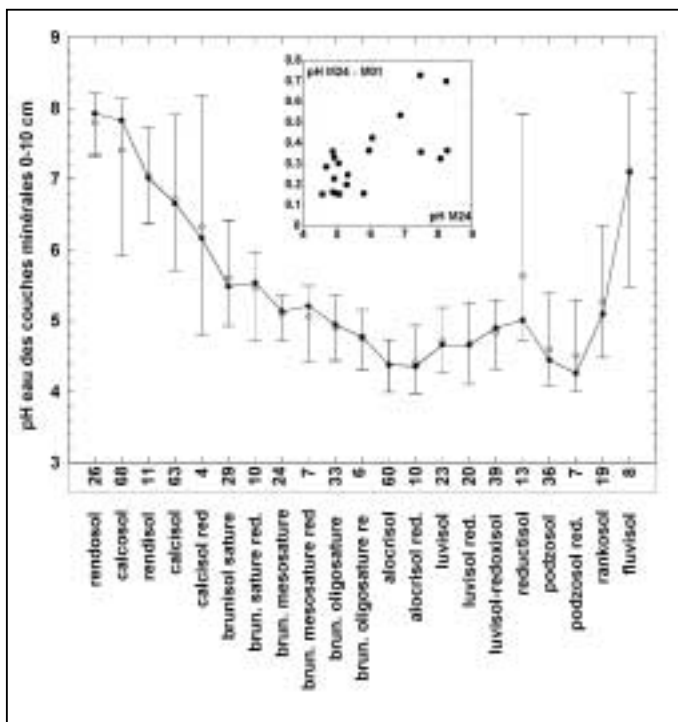
(moder, dysmoder et mor).

La figure 2C présente le croisement entre les grands types d'humus et les grands types de sols. Depuis les Rendisols jusqu'au Podzolsols, la part des humus acides augmente progressivement aux dépends de la proportion des mulls. Le groupe des eumull et mésomull est dominant sur les sols calcaires, mais il existe sur ceux-ci une proportion non négligeable d'humus peu actifs (moder et dysmoder) qui correspondent, en plaine ou en montagne, à des accumulations de matière organique dont l'évolution est bloquée par le calcium (pH égal ou supérieur à 8 entre 0 et 10 cm).

pH eau

Figure 3 - Moyenne (points blancs), médiane (points noirs), premier et neuvième déciles des pHeau par type de sol pour le prélèvement 0-10 cm. Les nombres en regard des types de sols correspondent aux effectifs. Le schéma en incrustation présente la moyenne par type de sol des différences entre le pH mesuré entre 20 et 40 cm (pH M24) et le pH mesuré entre 0 et 10 cm (pH M01) en fonction du pH mesuré dans le prélèvement 20-40 cm.

Figure 3 - Measured pH (water) in the upper mineral layer (0-10 cm) according to major soil types : mean values (open symbols), median values (closed symbols), 10% and 90% percentiles. The number of observations is plotted in front of each soil type. The inner graph presents the difference between soil pH at depths 20-40 cm (pH M24) and 0-10 cm (pH M01) plotted versus pH at the 0-10 cm depth (mean values).



Dans le cas des sols calcaires, le pH mesuré dans les couches hologaniques (si l'horizon OH a fait l'objet d'un prélèvement différencié) est toujours plus faible que celui mesuré dans le prélèvement 0-10 cm. Pour tous les autres sols, le pH est équivalent dans les deux couches.

Pour les prélèvements minéraux, les médianes des pH augmentent faiblement avec la profondeur : 5,7 dans les prélèvements 0-10 et 10-20 cm et 5,9 dans les prélèvements 20-40 cm et 40-60 cm. Cette augmentation est plus nette si l'on ne considère que les sols calcaires.

Selon un gradient d'acidité croissante, le pH diminue régulièrement de 8 à 5,2 depuis les sols calcaires superficiels jusqu'aux Brunisols saturés, puis suivant deux paliers; l'un, entre 5,2 et 4,5, correspondant à l'ensemble Brunisol – Luvisol, l'autre correspondant aux Alocrisols et Podzolsols (figure 3). La plus forte variabilité observée dans le cas des Réductisols et des Fluvisols est due à la relative indépendance entre le classement de ces sols et les ambiances chimiques. Dans le cas des sols calcaires et calcaires, la variabilité des valeurs de pH est liée à des intensités variables de décarbonatation.

La figure 8A permet de comparer la distribution en fréquence des pHeau mesurés entre 0 et 20 cm dans les sols forestiers des placettes du Réseau Européen et dans les sols agricoles. La distribution du pH en forêt présente deux maxima : à pH = 4,75-5 et à pH = 8-8,25 aux deux extrémités de l'histogramme des fréquences. Près de 62 % des sols se caractérisent par des pH acides (pH < 5,5) et 22 % sont alcalins (pH > 7). Par comparaison, la fraction de sols agricoles dont le pH est inférieur à 5,5 n'est que de 12 % et ces sols se distribuent de façon à peu près identique entre pH neutre et alcalin.

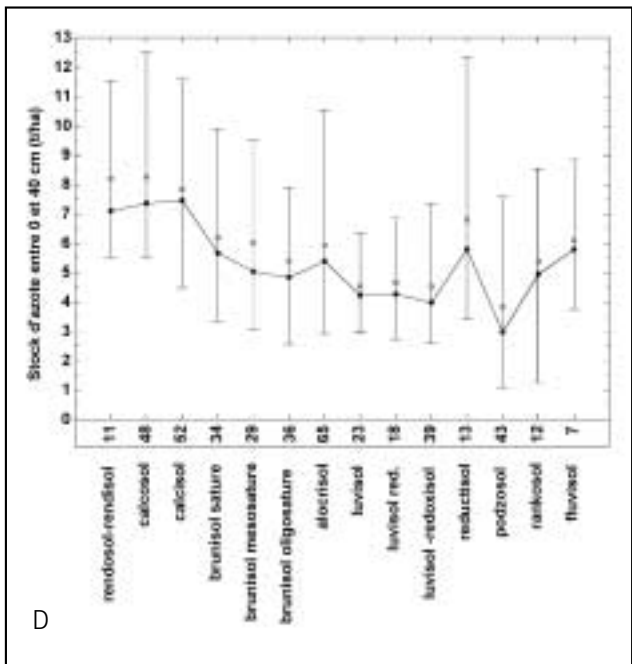
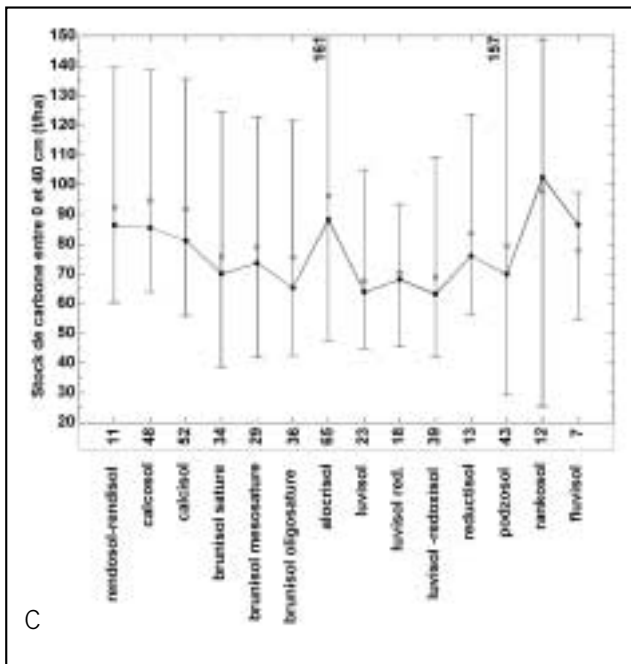
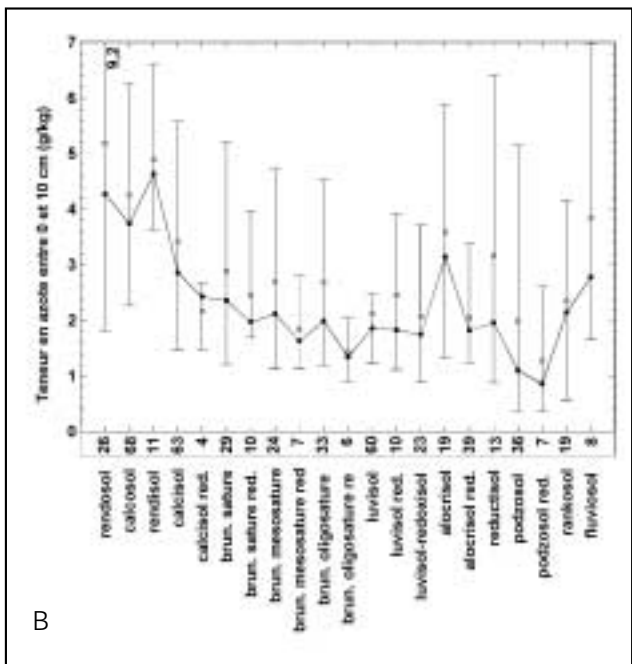
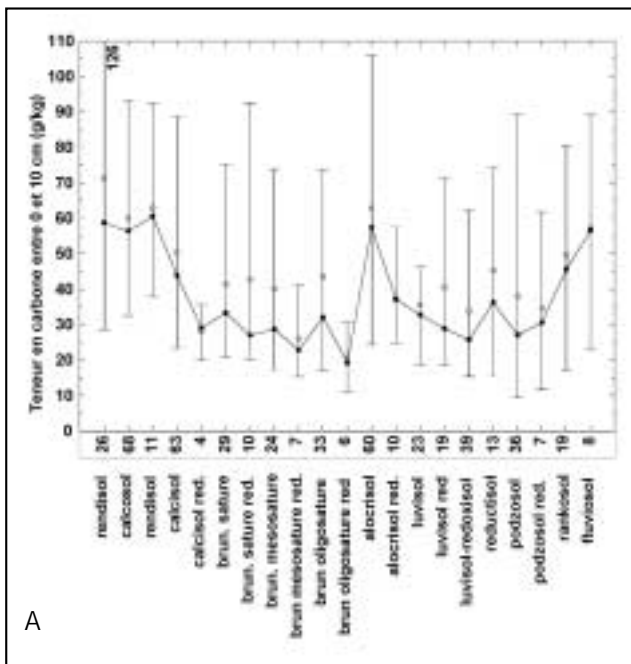
Cette différence résulte principalement de ce que l'agriculture a augmenté le pH par chaulage des sols sur roches acides et par travail mécanique des sols sur roches calcaires. Mais, à l'échelle régionale, les forêts ont pu être installées préférentiellement sur les sols et les substrats les plus acides ou les plus calcaires.

Carbone

Les médianes des teneurs en carbone des couches hologaniques et des prélèvements 0-10 cm diffèrent d'un facteur 10. Ces médianes sont respectivement égales à 383 et 38 g/kg et les percentiles sont respectivement égaux à 256 et 445 g/kg pour les couches organiques et à 17,5 et 88 g/kg pour la couche minérale 0-10 cm. Pour les prélèvements minéraux, les médianes des teneurs en carbone diminuent d'un facteur 2 à chaque profondeur : 17,7 g/kg entre 10 et 20 cm ; 9,9 g/kg entre 20 et 40 cm et 6 g/kg entre 40 et 60 cm. Les teneurs et leur variabilité, très fortes en surface,

Figure 4 - Teneurs en carbone (-A-) et en azote (-B-) mesurées entre 0 et 10 cm ; stocks de carbone (-C-) et d'azote (-D) calculés pour une profondeur de 40 cm dans les horizons minéraux en fonction des types de sols. Moyennes (points blancs), médianes (points noirs), premier et neuvième déciles

Figure 4 - Organic carbon (-A-) and nitrogen concentration (-B-) in the upper mineral layer (0-10 cm) ; amounts of organic carbon (-C-) and nitrogen (-D) in the mineral layers between 0 and 40 cm according to major soil types : mean values (open symbols), median values (closed symbols), 10% and 90% percentiles.



diminuent considérablement en profondeur.

La teneur en carbone des horizons organiques est relativement stable en fonction des types de sols. Par contre, les teneurs mesurées dans le prélèvement 0-10 cm font apparaître deux groupes (figure 4A). Les Rendosols, Rendisols et Calcosols ainsi que les Alocri sols et les Fluvisols présentent les plus fortes teneurs en carbone avec des valeurs comprises entre 50 et 60 g/kg (valeurs médianes). Pour tous les autres sols les teneurs en carbone se situent près de 30 g/kg. Ces différences illustrent l'importance des conditions chimiques et pédoclimatiques sur l'évolution du carbone.

Dans le cas des Calcisols, des Brunisols, des Alocri sols et des Luvisols, les teneurs en carbone dans les horizons de surface sont plus faibles lorsque les profils présentent des traces d'hydromorphie. Ceci peut s'interpréter comme la conséquence favorable d'une hydromorphie modérée sur l'activité minéralisatrice.

Le poids sec des horizons hologaniques a été mesuré sur 467 placettes. Pour plus de la moitié d'entre elles, les nécromasses sont inférieures à 15 t/ha et les valeurs extrêmes sont de l'ordre de 2 t/ha dans le cas des mull à plus de 200 t/ha dans le cas des mors. Les poids secs sont, d'une manière générale, très dépendants du type d'humus : la médiane des nécromasses passe de 6 à 110 t/ha depuis le type eumull jus-

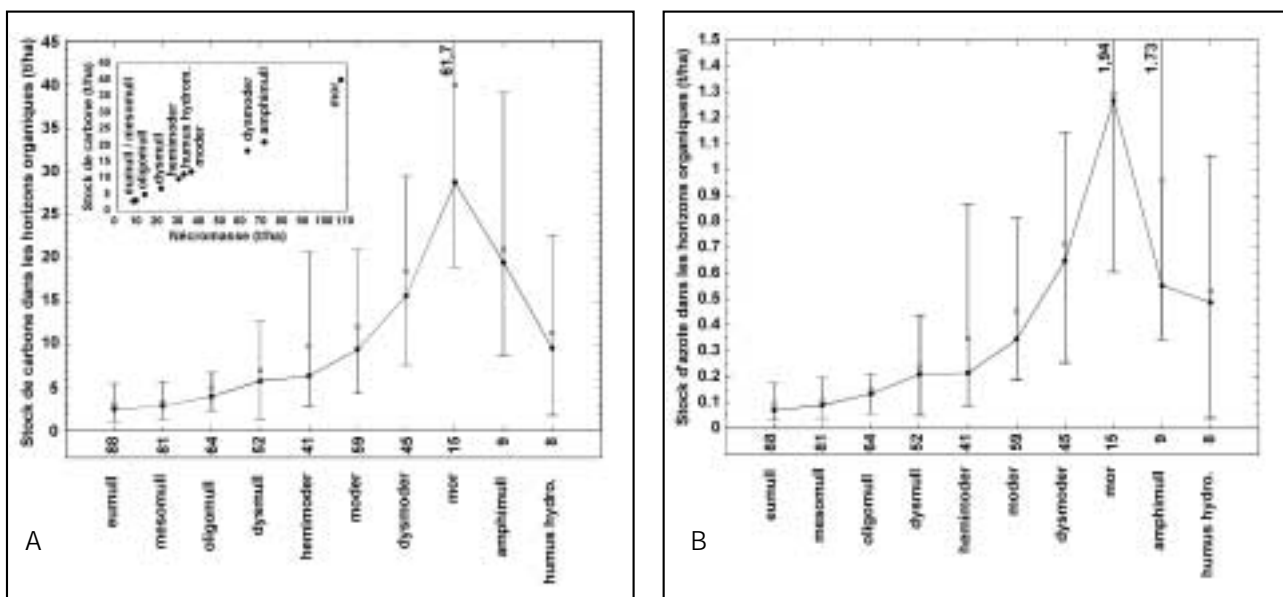
qu'au type mor. Les stocks de carbone contenus dans les litières sont directement proportionnels à la nécromasse (figure 5A). La médiane des stocks de carbone est de 5 t/ha et ceux-ci peuvent s'élever jusqu'à plus de 100 t/ha. Les premier et neuvième déciles sont respectivement égaux à 1,6 et 20,8 t/ha.

Le calcul des stocks sur la tranche de profondeur 0-40 cm conduit à des valeurs extrêmement variables (figure 4C). La médiane est égale à 76,6 t/ha et les premiers et neuvième déciles valent respectivement 42,5 et 144 t/ha. L'analyse de la variance des stocks de carbone en fonction du type de sol conduit à un modèle significatif ($F = 2,55$ et $p = 0,22 \%$) mais relativement peu explicatif puisque seulement 7,4 % de la variance des stocks peut être expliquée par le type de sol.

La figure 8B permet de comparer la distribution en fréquence des teneurs en carbone dans le cas des sols forestiers et des sols agricoles. Les teneurs les plus fréquentes diffèrent nettement : 12 à 14 g/kg en sol agricole et 18 à 20 g/kg en sol forestier. De plus, dans le cas des sols forestiers, la distribution des teneurs est plus étalée vers les valeurs élevées de sorte que 69 % des sols agricoles présentent des teneurs inférieures à 20 g/kg contre seulement 29 % des sols forestiers. Ces différences sont conservées si les teneurs des sols forestiers sont recalculées pour une épaisseur de 30 cm. Dans ce cas, les teneurs les plus fréquentes passent à 12-14 g/kg et 47 % des

Figure 5 - Moyennes (points blancs), médianes (points noirs), premier et neuvième déciles des stocks de carbone (-A-) et d'azote (-B-) en fonction des types d'humus. Les nombres en regard des types d'humus correspondent aux effectifs. Le graphique en incrustation présente la relation existant entre les nécromasses et les stocks de carbone.

Figure 5 - Amounts of organic carbon (-A-) and nitrogen (-B-) in the organic layers according to humus types : mean values (open symbols), median values (closed symbols), 10% and 90% percentiles. The number of observations is plotted in front of each humus type. The inner graph presents the relation between the amounts of organic carbon and dry matter in relation to humus types.



sols forestiers présentent des teneurs inférieures à 20 g/kg.

Azote

Comme dans le cas du carbone, les teneurs en azote diminuent lorsque la profondeur de prélèvement augmente. Les teneurs passent de 11,95 g/kg dans les couches organiques à 2,49 g/kg dans les prélèvements 0-10 cm ; 1,31 g/kg dans les prélèvements 10-20 cm et 0,83 g/kg dans les prélèvements 20-40 cm.

La figure 4B présente les médianes, moyennes, percentiles des teneurs en azote mesurées dans les prélèvements minéraux 0-10 cm en fonction de chaque type de sol. La variabilité des mesures est très forte mais deux groupes de sols se distinguent des autres : les Rendosols, Rendisols et Calcosols forment un groupe où les moyennes et les médianes des teneurs en azote sont les plus fortes ; à l'opposé, l'ensemble des Luvisols ainsi que celui des Podzosols forment un groupe très pauvre en azote.

Les figures 5B et 4D présentent les stocks d'azote calculés pour les horizons hologaniques et la couche minérale 0-40 cm. Pour les échantillons organiques, la médiane des stocks est égale à 0,16 t/ha. Comme dans le cas du carbone, les stocks sont directement proportionnels à la nécromasse et augmentent régulièrement des eumulls aux mors. La médiane des stocks pour la couche minérale 0-40 cm est de 5,6 t/ha. La variabilité des stocks en fonction des types de sol est moins forte que dans le cas du carbone : il existe un gradient décroissant des stocks d'azote depuis les Rendosols et les Rendisols jusqu'à l'ensemble des Luvisols. Malgré une forte variabilité des valeurs, les Podzosols présentent la médiane et la moyenne des stocks les plus faibles de tout l'échantillon.

Les teneurs en azote les plus fréquentes (1,2 à 1,4 g/kg) ne diffèrent pas entre les sols forestiers et les sols agricoles (figure 8C). Par contre, comme pour le carbone, la distribution des teneurs en azote est beaucoup plus étalée dans le cas des sols forestiers : 59 % d'entre eux présentent des teneurs en azote supérieures à 1,6 g/kg alors que seulement 36 % des sols agricoles sont dans ce cas.

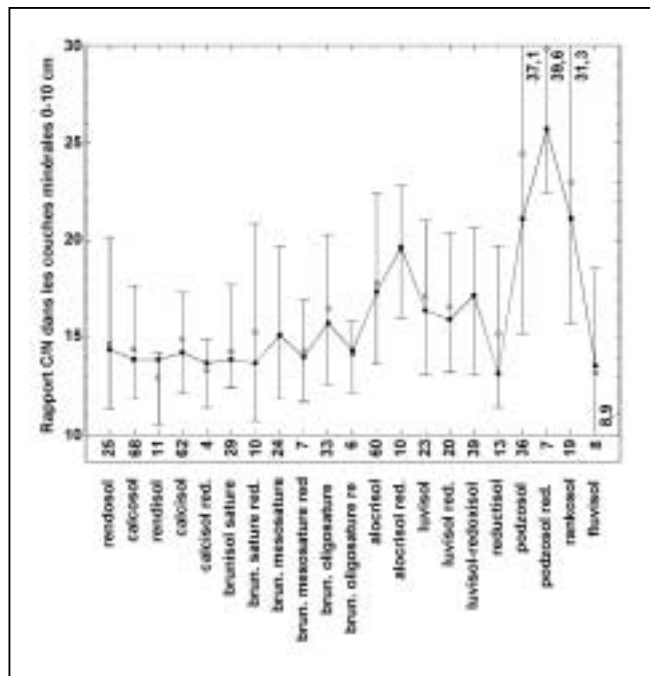
Rapport C/N

La figure 6 présente les valeurs des rapports C/N par type de sol, pour le prélèvement minéral 0-10 cm. On distingue trois groupes de sols : les Podzosols et les Rankosol avec un C/N supérieur à 20 en moyenne ; les Luvisols et les Alocriosols dont le C/N est compris entre 15 et 20 et les autres types dont le C/N est inférieur à 15.

La comparaison des C/N observés dans les sols agricoles et forestiers illustre, en l'amplifiant, les différences présentées sur le carbone et l'azote (figure 8D) : 90 % des sols agricoles contre 8 % des sols forestiers ont un C/N inférieur à 11. Près de 50 % des sols agricoles ont un C/N compris entre 9 et 10. Pour les sols forestiers, le pic de fréquence maximal des C/N,

Figure 6 - Moyennes (points blancs), médianes (points noirs), premier et neuvième déciles du rapport C/N dans les couches minérales 0-10 cm. Les nombres en regard des types de sols correspondent aux effectifs.

Figure 6 - C/N ratio in the upper mineral layer (0-10 cm) according to major soil types : mean values (open symbols), median values (closed symbols), 10% and 90% percentiles. The number of observations is plotted in front of each soil type.



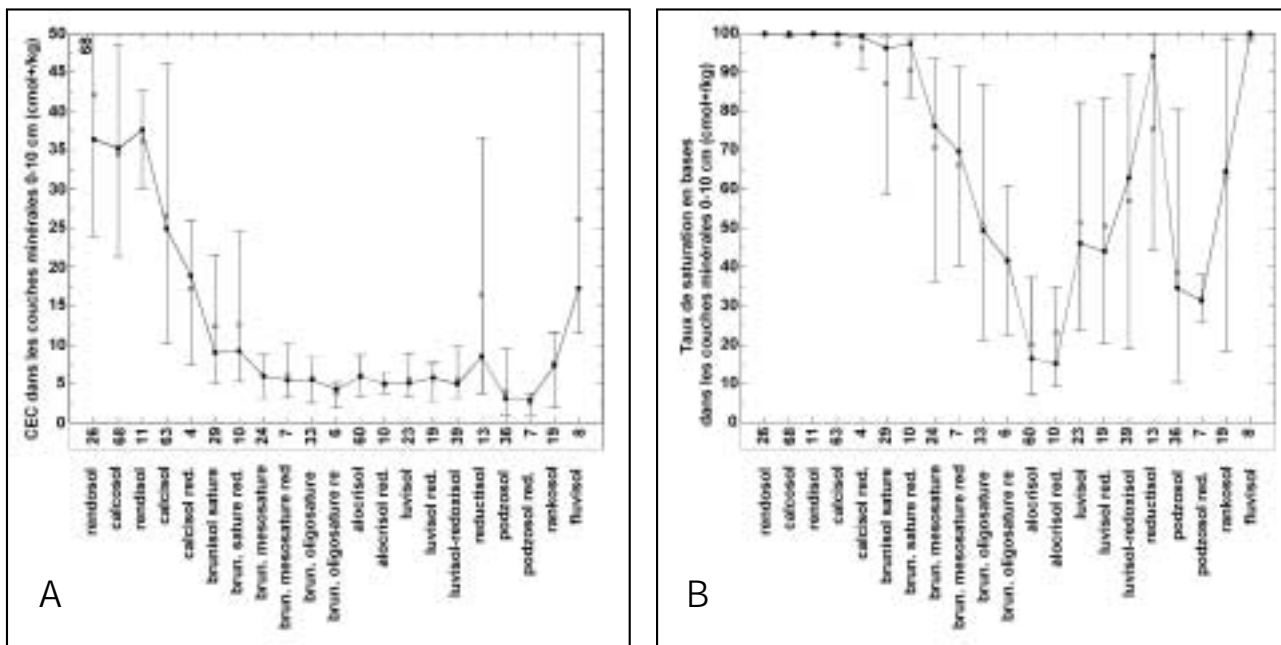
qui ne regroupe que 25 % de l'effectif, se situe entre 12 et 13. Cette différence entre sols agricoles et forestiers ne peut être attribuée à la nature des restitutions puisque les pailles de culture ont fréquemment des rapports C/N plus élevés que les litières forestières. Les apports annuels de carbone au sol étant comparables sous forêt et en sol agricole, cette différence exprime d'une part, l'enrichissement en azote par la fertilisation des terres agricoles et, d'autre part, la minéralisation rapide du carbone sous l'effet du travail du sol et de la fertilisation azotée.

Capacité d'échange cationique

La distribution des valeurs de la capacité d'échange cationique effective (CEC) montre qu'un premier groupe de sol présente des valeurs faibles (59 % des prélèvements ont une CEC < 10 cmol+/kg) et qu'un second groupe présente des valeurs de 10 à près de 113 cmol+/kg. Cette distribution particulière est conservée avec la profondeur, même si la tendance générale va dans le sens d'une diminution des valeurs de CEC avec l'augmentation de la profondeur : 7,8 cmol+/kg pour le

Figure 7 - Capacité d'échange cationique (-A-) et taux de saturation en bases (-B-) : moyennes (points blancs), médianes (points noirs), premier et neuvième déciles calculés dans les couches minérales 0-10 cm. Les nombres en regard des types de sols correspondent aux effectifs.

Figure 7 - Exchangeable cation capacity (-A-) and base saturation (-B-) in the upper mineral layer (0-10 cm) according to major soil types : mean values (open symbols), median values (closed symbols), 10% and 90% percentiles. The number of observations is plotted in front of each soil type.



prélèvement 0-10 cm ; 5,1 cmol+/kg pour le prélèvement 10-20 cm et 3,1 cmol+/kg pour le prélèvement 20-40 cm.

Les CEC les plus faibles sont observées pour les sols acides (figure 7A) : podzols (médiane inférieure à 4 cmol+/kg dans le prélèvement 0-10 cm) ; Brunisols mésosaturés et oligosaturés, Luvisols et Alocrisols (médianes comprises entre 4,3 et 6 cmol+/kg pour le prélèvement 0-10 cm) et peu variables (percentile 0,9 toujours inférieur à 10 cmol+/kg). Les capacités d'échange des sols calciques et calcaires (Rendosols, Rendosols, Calcosols et Calcisols) sont beaucoup plus fortes mais ces valeurs sont extrêmement variables.

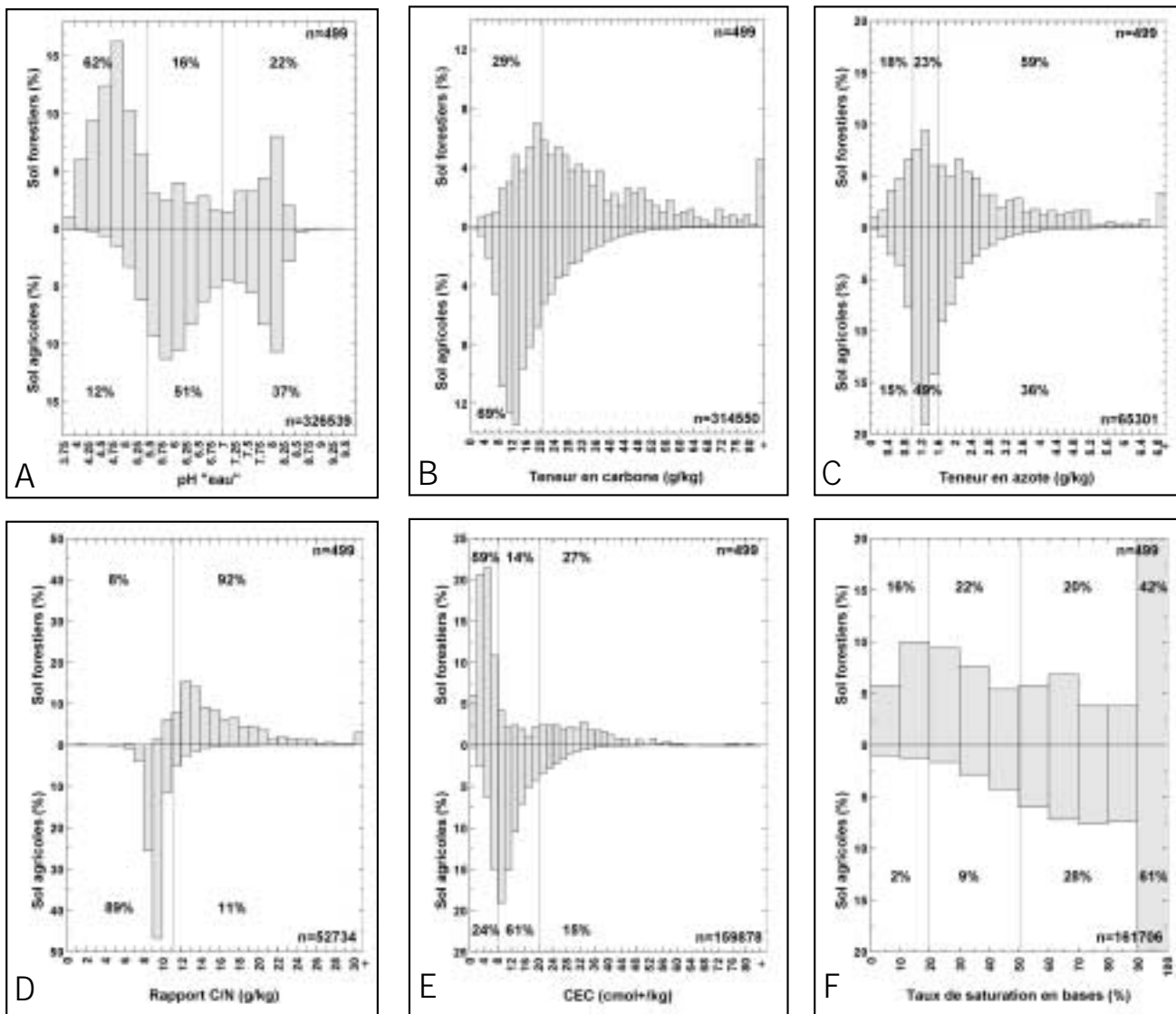
La figure 8E permet de comparer la distribution en fréquence des valeurs de CEC dans les sols agricoles et forestiers. Le maximum de fréquence est atteint en sol forestier entre 2 et 6 cmol+/kg et entre 8 et 10 cmol+/kg en terre agricole. Près de 60 % des valeurs de CEC des sols forestiers sont inférieures à 8 cmol+/kg tandis que seulement 24 % des CEC agricoles sont inférieures à cette valeur. A l'opposé, les CEC supérieures à 20 cmol+/kg représentent 27 % des sols forestiers contre 15 % des sols agricoles. La distribution bimodale des sols forestiers correspond, pour les faibles CEC, aux sols acides et, pour les CEC élevées, aux sols calcaires et calciques riches en

matières organiques. La faiblesse des CEC en sol acide résulte des valeurs basses de pH : les charges variables organiques sont en grande partie occupées par des protons et l'abondance de l'aluminium en position interfoliaire dans les argiles réduit les charges minérales. A pH neutre ou basique, la capacité d'échange augmente proportionnellement à la teneur en matière organique (Badeau, 1998). Malgré des pH plus élevés dans les sols agricoles, la proportion de sols à CEC très élevée est relativement faible du fait de leur teneur plus faible en matière organique.

Les CEC en sols forestiers ont été mesurées au pH du sol, tandis que les mesures sur les sols agricoles ont été effectuées à pH = 7 selon la méthode Metson. Cette dernière quantifie les charges totales, c'est à dire la somme des charges permanentes et des charges variables, non efficace au pH du sol. La différence entre ces deux mesures s'accroît lorsque le pH baisse. La comparaison proposée est donc, par nature, biaisée. Cependant, nous avons montré que la proportion de sols agricoles acides (pH < 5,5) pour lesquels la capacité d'échange à pH = 7 surestime fortement la CEC au pH du sol, n'est égale qu'à 12 %. Ce faible effectif joue donc de façon mineure sur les différences présentées.

Figure 8 - Comparaison de quelques propriétés des sols forestiers et des sols agricoles mesurées entre 0 et 20 cm. Distribution des pHeau (-A-), des teneurs en carbone (-B-), des teneurs en azote (-C-), des rapports C/N (-D-), des valeurs de CEC (-E-) et des taux de saturation en bases (-F-).

Figure 8 - Frequency distribution of soil properties between 0 and 20 cm depths for forest and agricultural soils : pH (water) (-A-), organic carbon concentrations (-B-), nitrogen concentration (-C-), C/N ration (-D-), exchangeable cation capacity values (-E-) and base saturation values (-F-).



Taux de saturation en bases

Les sols des placettes européennes sont majoritairement saturés quelle que soit la couche considérée (tableau 2). D'une façon générale, le taux de saturation observé pour le prélèvement 0-10 cm est significatif de l'ensemble du profil. Sur 447 sols testés (sols où les taux de saturation sont disponibles pour les profondeurs 0-10 cm et 20-40 cm), 65 % montrent des taux

de saturation stables avec la profondeur (pas de changement de classe de taux de saturation comme présenté dans le tableau 2; 27 % montrent une diminution des taux de saturation (décalage d'au moins une classe avec la profondeur) et 8 % montrent une augmentation des taux de saturation.

Le taux de saturation le plus faible est observé pour les Alocrisols; celui des Podzolsols est légèrement plus élevé. Par

Tableau 2 - Proportion d'échantillons de sol par classes de taux de saturation pour trois profondeurs de prélèvement : 0-10 cm (M01), 10-20 cm (M12) et 20-40 cm (M24).

Table 2 - Frequency of soil samples clustered by base saturation classes and depth (M01 = 0-10 cm, M12 = 10-20 cm, M24 = 20-40 cm)

Taux de saturation	Qualificatif	M01	M12	M24
[0-20 %]	désaturé	13 %	24 %	27 %
[20-50 %]	oligosaturé	21 %	22 %	18 %
[50-80 %]	mésosaturé	15 %	12 %	13 %
[80-100 %]	saturé	50 %	43 %	42 %

contre, la CEC des Podzols est plus faible, de sorte que le stock d'éléments échangeables est peu différent. Tous les sols contenant des éléments calcaires dans le profil présentent des taux de saturation très élevés (Rendosols, Rendisols, Calcosols, Calcisols et Fluvisols) - figure 7B.

D'une manière générale, le taux de saturation en base est peu conditionné par les valeurs de CEC. Quand la CEC dépasse 14 cmol+/kg, le taux de saturation en bases est toujours supérieur à 90 % (c'est le cas pour 440 analyses soit 31 % de l'échantillon). Mais pour les valeurs de CEC inférieures à 14 cmol+/kg, si on observe une corrélation positive entre le taux de saturation en bases et la CEC, on constate qu'il existe une part non négligeable d'échantillons pour lesquels le taux de saturation dépasse 50 % en dépit des faibles valeurs de CEC (18 % des échantillons avec des CEC inférieures à 2 cmol+/kg; 23 % des échantillons avec des CEC comprises entre 2 et 4 cmol+/kg); et, de façon inverse, des échantillons avec des CEC de valeurs moyennes peuvent apparaître comme désaturés ou oligosaturés (10 % des échantillons avec des CEC supérieures à 12 cmol+/kg; 16 % des échantillons avec des CEC comprises entre 10 et 12 cmol+/kg) – (tableau 3).

Tableau 3 - Proportion d'échantillons de sol par classes de taux de saturation en fonction de la CEC.

Table 3 - Frequency of soil samples clustered by base saturation classes and exchangeable cation capacity classes

CEC (cmol+/kg)	Taux de saturation en bases (%)			
	[0-20[	[20-50[	[50-80[	[80
100]				
[0-2[	39,5	42,0	16,6	1,9
[2-4[	39,4	37,8	15,4	7,4
[4-6[	30,4	23,1	24,0	22,4
[6-8[	11,1	20,4	27,8	40,7
[8-10[	9,0	19,2	24,4	47,4
[10-12[	5,3	7,9	7,9	78,9

L'évolution du taux de saturation en base augmente de manière générale en fonction du pH, mais la relation est très lâche pour les pHeau compris entre 4,5 et 5,5 ($r^2 = 38\%$) et inexistante en dehors de cet intervalle (figure 9).

Pour les pH_{CaCl2} inférieurs à 5, l'aluminium échangeable augmente très fortement. Le pourcentage d'ions aluminium par rapport à la CEC atteint un maximum entre les pH_{CaCl2} 3,75 et 4,00 (4,5 et 4,75 pour les pHeau). Pour tous les pH_{CaCl2} inférieurs à 4,25, Al³⁺ représente en moyenne plus de 50 % de la CEC. Dans 140 analyses, la part de l'aluminium échangeable dépasse 80 % et dans 354 analyses, elle représente entre 50 et 80 % de la CEC. Al³⁺ est l'ion majoritaire pour plus de 34 % des analyses de sol effectuées, toutes profondeurs confondues. L'aluminium atteint des valeurs plus fortes dans les horizons profonds que dans les horizons de surface pour des pH équivalents.

La figure 10 présente l'état moyen du complexe d'échange sur

Figure 9 - Relation entre le taux de saturation en bases et les pH_{eau} et pH_{CaCl2}

Figure 9 - Relation between base saturation and pH measured in water (left) and in CaCl₂ (right)

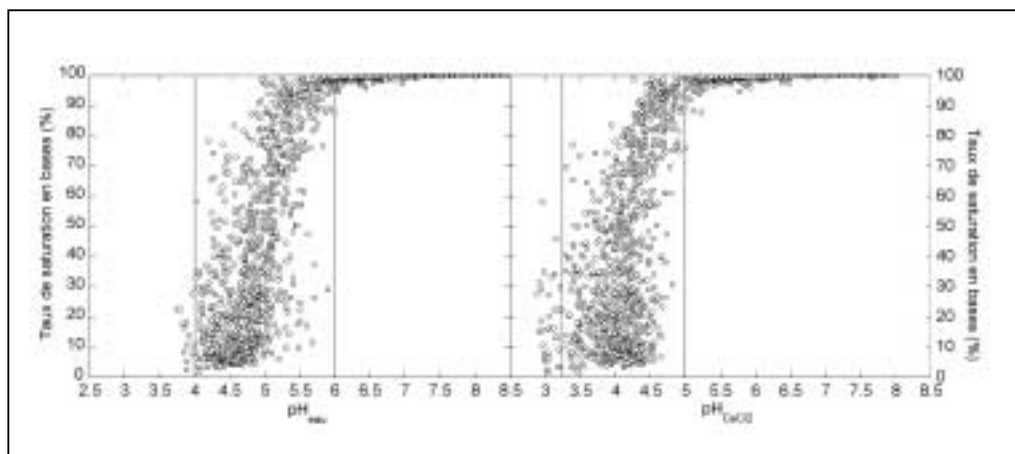
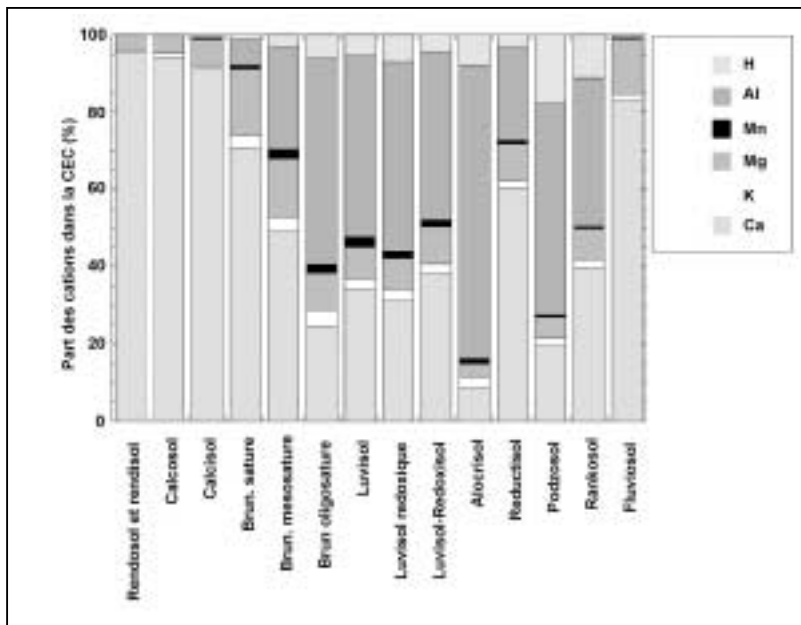


Figure 10 - Part des cations échangeables dans la CEC (calcul réalisé à partir des stocks estimés sur une profondeur de 40 cm)

Figure 10 - Exchangeable cation content in major soil types (computed from the amounts of cations between 0 and 40 cm)



une profondeur de 40 cm estimé d'après le calcul des stocks d'éléments échangeables. Les taux de saturation les plus faibles ont été observés pour les Alocriisols et les Podzosols. Dans le cas des Alocriisols, on constate que le complexe adsorbant est toujours garni en majorité par les ions Al^{3+} . Dans le cas des Podzosols, la part de l'aluminium reste importante mais la part des protons devient trois fois plus importante que dans le cas des Alocriisols. Pour les Podzosols, les textures sableuses sont par nature dominantes, ce qui explique la part prépondérante d'une acidité organique (H^+ dominants) par rapport à une acidité minérale (Al^{3+} dominants). Les Brunisols oligosaturés et les Luvisols montrent des pourcentages en Al^{3+} proches de ceux des Podzosols, mais la part des protons est bien plus faible. L'aluminium échangeable est néanmoins dominant dans le complexe d'échange pour 60 % des prélèvements 0-10 cm et 90 % des prélèvements plus profonds.

Le calcium échangeable n'est pas le cation majoritaire dans la majorité des Luvisols, Brunisols oligosaturés, Alocriisols et Podzosols. Partout ailleurs, il domine le complexe adsorbant (65 % des prélèvements 0-10 cm) et représente même plus de 50 % du complexe d'échange dans 57 % des prélèvements 0-10 cm.

Les sols les moins pourvus en magnésium échangeable sont les Alocriisols, les Podzosols, les Rankosols, les Brunisols oligosaturés, les Luvisols et les Luvisols rédoxiques, pour lesquels les médianes des stocks sont inférieures à 12 kmol+/ha. Dans le cas des Alocriisols et des Podzosols, les médianes valent respectivement 3,5 et 4 kmol+/ha.

La figure 8F permet de comparer la distribution en fréquence des taux de saturation en bases dans les sols agricoles et forestiers. Le maximum de fréquence est atteint dans les deux cas pour des taux de saturation supérieurs à 90 % mais la proportion est plus importante dans les sols agricoles. Près de 50 % des sols forestiers

ont un taux de saturation inférieur à 50 % tandis que plus de 90 % des sols agricoles ont un taux de saturation supérieur à 50 %. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus à propos du pH.

CONCLUSION

ζ Ce premier inventaire systématique des sols forestiers français permet de dresser leur carte d'identité et de la comparer à celle des sols agricoles. La comparaison est partiellement biaisée du fait des origines différentes des données et de différences dans les méthodes analytiques. Cependant les différences observées sont suffisamment prononcées pour que l'influence de ces biais puisse être relativisée.

ζ Sur le plan pédogénétique, les sols forestiers diffèrent globalement peu des sols agricoles, mais on note cependant quelques particularités : la fréquence des podzols et des sols hydromorphes est plus forte en forêt alors que celle des sols lessivés et des sols alluviaux est plus faible. D'autres investigations plus poussées devraient être réalisées en croisant notamment la couverture "sols" de la base de données cartographique des sols de France et la couverture "forêt".

Pour les autres sols, la similitude pédogénétique entre les sols forestiers et les sols agricoles, paradoxale de prime abord, n'est pas un artefact. On sait que 50 % des forêts françaises sont des forêts nouvelles, croissant sur d'anciens sols agricoles : depuis le début du XIX^{ème} la surface boisée est passée de 10 % à plus de 26 % aujourd'hui. Ensuite, du fait de contraintes externes comme le climat, l'accessibilité et les possibilités de mécanisation, les terroirs prennent localement des usages soit agricoles, soit forestiers. L'agriculture moderne a mis en valeur des types de sols auparavant délaissés aux forêts (fertilisation, drainage). Enfin, la place de la forêt et de l'agriculture résulte souvent de contingences historiques, indépendantes des propriétés physiques des sols.

Ce constat de similitude n'a de valeur qu'à

l'échelle de la France entière. A l'échelle d'une petite région, ou tout au moins de certaines comme le Perche (Tessier et al., 1996), les sols forestiers et agricoles se distinguent nettement dans le paysage.

Si l'on considère leurs caractéristiques chimiques, les sols forestiers se distinguent très nettement des sols agricoles par leur acidité, leur teneur en carbone et leur C/N élevés. Ces différences résultent pour l'essentiel du mode de gestion des sols. Faiblement exploitée par rapport à la biomasse produite, la forêt incorpore dans le sol une matière organique à caractère acide. En sol agricole, même si une part de la matière organique produite est exportée lors des récoltes, les quantités de carbone retournant au sol sont comparables à ce qui est observé sous forêt (chaumes, racines, litières, etc.). Cependant, le travail mécanique des sols favorise l'aération et la déprotection de la matière organique et engendre une minéralisation rapide de ce carbone. Enfin, dans les sols agricoles, l'exportation d'azote est compensée par la fertilisation et l'acidité est neutralisée par les amendements.

Depuis plus d'un siècle, et cette tendance devrait se poursuivre au cours des prochaines décennies, la forêt gagne sur les terroirs agricoles. La comparaison présentée confirme que cette évolution conduira à un stockage de carbone et à une acidification des sols et probablement des eaux en aval. Dans ce contexte, il est nécessaire de réfléchir à une sylviculture qui permette de conserver la fertilité des sols acquise au cours de leur histoire agricole.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1992 - Référentiel pédologique - principaux sols d'Europe. INRA (Ed.), 222 p.
- Alexander E.B., 1980 - Bulk density of California soils in relation to other soils properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 689-692.
- Badeau V., 1998 - Caractérisation écologique du Réseau européen de suivi des dommages forestiers. Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. *Les cahiers du DSF*, 5-1998, 211 p, sous presse.
- Belkacem S., Nys C. et Dupouey J.L., 1998 - Evolution des stocks de carbone dans les sols forestiers. Importance de la sylviculture et du milieu sur la variabilité. INRA Nancy, AIP AGRIGES 95/96, INRA/DPE N°6-95/329/P00006, 67p + annexes.
- Brêthes A., 1993 - Manuel pour la description simplifiée des sols. Office National des Forêts. Document interne. 39p + annexes.
- DSF-ONF, 1994 - Réseau de surveillance de l'état sanitaire des forêts : protocole pour les observations. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 71 p.
- Duchaufour, 1995 - Pédologie. Sol, végétation, environnement. Masson, Paris, 4e édition, 324 p.
- Dupouey J.L., Thimonier A. et Behr P., 1997 - Variations de la densité des sols des hêtraies du Nord-Est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. *Etude et gestion des sols*, 4-1, 43-52.
- Jamagne M., Hardy R., King D. et Bornand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 3, 153-172.
- Manrique L.A. et Jones C.A., 1991 - Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 476-481.
- Ponette Q., Ulrich E., Brêthes A., Bonneau M. et Lanier M., 1997 - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau RENECOFOR. Office National des Forêts (Ed.), Département des Recherches Techniques, ISBN 2-84207-100-X, 427 p.
- Schvartz C., Walter C., Claudot B., Bouedo T., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre. I. Constitution d'une banque de données cantonale. *Etude et gestion des Sols*, vol. 4 (3), 191-204.
- Tessier D., Bruand A., Le Bissonnais Y. et Dambrine E., 1996 - Qualité chimique et physique des sols : variabilité spatiale et évolution. *Etude et Gestion des Sols*, vol.3 (4), 229-244, numéro spécial.
- Vanmechelen L., Groenemans R. et Van Ranst E., 1997 - Forest soil condition in Europe. Results of a large-scale soil survey. Technical report. Ministry of the Flemish Community, EC and UN/ECE, Bruxelles, Genève, 198 p + annexes.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Bouedo T., Arousseau P., 1997 a - Synthèse nationale des analyses de terre. II. descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Etude et Gestion des Sols*, vol.4 (3), 205-219.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Bouedo T., Arousseau P., 1997 b - Synthèse nationale des analyses de terre. 2e édition revue et augmentée, document AFES - DERF, Ministère de l'Agriculture, 69p, 4 annexes, 25 cartes.

