

# Caractérisation physico-chimique des sols à l'échelle d'une région naturelle à partir d'une compilation de données

## Exemple des sols du massif forestier landais

L. Augusto<sup>(1)</sup>, V. Badeau<sup>(2)</sup>, D. Arrouays<sup>(3)</sup>, P. Trichet<sup>(4)</sup>, J.L. Flot<sup>(5)</sup>, C. Jolivet<sup>(3)</sup> et D. Merzeau<sup>(6)</sup>

- (1) I. N. R.A., UMR Transfert sol-plante et Cycle des éléments minéraux dans les Écosystèmes cultivés. BP 81, 33883 Villenave d'Ornon Cedex, France.
- (2) I. N. R.A., UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières. 54280 Champenoux Cedex, France
- (3) I. N. R.A., US InfoSol. Centre de Recherches d'Orléans, BP 20619, 45166 Olivet Cedex, France.
- (4) I. N. R.A., UR Ecologie fonctionnelle et physique de l'environnement. 69, route d'Arcachon, 33612 Cestas Cedex, France.
- (5) Département Santé des Forêts, Ministère Agriculture, DGFAR. 19 avenue du Maine, 75732 Paris Cedex 15, France.
- (6) Institut pour le Développement Forestier - CPFA. Maison de la Forêt, 6 parvis des Chartrons, 33075 Bordeaux Cedex, France

### RÉSUMÉ

Une compilation des données non publiées dans des revues à comité de lecture et concernant la physico-chimie des sols du massif forestier landais a été réalisée. Au total, ce sont des analyses provenant de 229 profils de sol qui ont été mises en base de données. Le traitement statistique de cette base a permis de mettre en évidence le rôle central de la teneur en carbone de ces sols sur leurs propriétés physico-chimiques (pH; CEC; stocks en nutriments). Ce comportement est principalement lié à la quasi absence de phase minérale réactive, ce qui confère alors aux matières organiques du sol l'essentiel des rôles d'échanges ioniques et de stockage de certains nutriments.

La composition des sols distingue assez nettement les régions forestières du massif (Dunes littorales; Plateau Landais; Bazadais). Au sein du plateau landais, il existe des différences dans la physico-chimie des sols en fonction de la typologie des stations, mais elles sont relativement peu marquées pour la majorité des variables (comme le C/N) par rapport aux résultats des études antérieures, géographiquement plus ponctuelles.

Ce travail met en évidence i) la contribution potentiellement intéressante des données non publiées dans des revues à comité de lecture, ii) la nécessité de vérifier et d'homogénéiser les données selon les différentes méthodologies employées.

### Mots clés

PODZOSOL, sable, forêt, meta-Analyse, carbone

**SUMMARY****USING A META-ANALYSIS APPROACH TO CHARACTERIZE THE PHYSICO-CHEMISTRY OF SOILS AT THE REGIONAL SCALE.**

A dataset of unpublished data on soils of the « Landes de Gascogne » region was built. The analytical results of 229 sample points were recorded. Statistical data analysis showed that the carbon content was the main variable explaining the physical and chemical properties of the studied sandy forest soils. It was the case for pH, CEC and for some of the nutrient stocks. This result was due the extremely low content of reactive minerals in these soils.

The three natural areas (coastal dunes; 'plateau landais'; Bazadais) of the studied region showed quite different soil compositions. Among the various classes of the local site classification of the plateau landais, some differences were observed. However, these differences were small compared to those found by previous works which focused on limited areas of the study region.

The present contribution showed that using heterogeneous data from unpublished data is useful but requires to verify and homogenise it first according to the various methods used.

**Key-words**

Podzol, sand, forest, meta-analysis, carbon

**RESUMEN****CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SUELOS A ESCALA DE UNA REGIÓN NATURAL A PARTIR DE UNA COMPILACIÓN DE DATOS - Ejemplo de los suelos del macizo forestal de las Landas**

Se realizó una compilación de datos no publicados en revistas con comités de lectura y que concierne la físico-química de los suelos del macizo forestal de las Landas. En total, son los análisis que provienen de 229 perfiles de suelo que fueron puestos en banco de datos. El tratamiento estadístico de este banco permitió poner en evidencia el papel central del contenido en carbono de estos suelos sobre sus propiedades físico-químicas (pH, CIC, provisiones en nutrientes). Este comportamiento es principalmente ligado a la casi ausencia de fase mineral reactiva, lo que da así a las materias orgánicas del suelo el esencial de los papeles de intercambios iónicos y de almacenamiento de ciertos nutrientes.

La composición de los suelos distingue bastante netamente las regiones forestales del macizo (dunas litorales, mesa de las Landas, Bazadais). En el seno de la mesa de las Landas, existe diferencias en la físico-química de los suelos en función de la topología de las estaciones, pero están relativamente poco marcadas para la mejoría de las variables (como el C/N) en relación con los resultados de los estudios anteriores, geográficamente más puntuales.

Este trabajo pone en evidencia i) la contribución potencialmente interesante de los datos no publicados en las revistas con comités de lectura, ii) la necesidad de averiguar y de homogenizar los datos según las diferentes metodologías usadas.

**Palabras clave**

Arena, bosque, meta-análisis, carbono

La caractérisation pédologique d'une région naturelle nécessite un effort d'investigation important. Il s'agit à la fois d'un investissement humain, logistique, financier et scientifique. Celui-ci est d'autant plus important que la région étudiée est étendue et hétérogène. Il s'avère donc souvent difficile de mettre en œuvre une campagne d'étude pédologique à l'échelle régionale et les sols de certaines parties du territoire restent encore à ce jour partiellement caractérisés (e.g. Trichet *et al.*, 1999). Toutefois, il existe également souvent un nombre important d'études plus ou moins ponctuelles. Ces travaux, locaux et généralement de diffusion restreinte servent utilement de base à la connaissance régionale des sols. Une alternative aux études d'envergure consiste à compiler toutes les données existantes, notamment celles qui n'ont pas été publiées dans des revues, et à chercher à en tirer une vision synthétique du contexte étudié.

Cette approche a été tentée avec succès à l'échelle continentale pour quantifier les évolutions de croissance de la forêt européenne (Spiecker *et al.*, 1996; Mellert *et al.*, 2004). La principale difficulté de cette méthode réside dans le fait que les variables, le mode de prélèvement et la méthodologie analytique peuvent varier de manière importante entre les diverses études. Il en résulte alors un risque important de biaiser l'interprétation des données, les différences entre les populations étudiées pouvant être le fait de décalages analytiques couplés à des tableaux d'effectifs déséquilibrés.

Dans le présent travail, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation de travaux de comparaisons de méthodes (e.g. Ciesielski et Sterckeman, 1997) permet de s'affranchir, au moins en partie, de ce biais et autorise l'étude d'un objet naturel à l'échelle régionale via la compilation de données d'origine disparate. L'objectif est donc ici de tester cette approche en vue d'une caractérisation physico-chimique des sols d'une région naturelle.

## METHODOLOGIE

La région choisie pour tester la méthode de la compilation de données est le massif forestier landais. Constitué essentiellement de peuplements équiens et monospécifiques de pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton), le massif forestier landais couvre une superficie de plus de 900 000 hectares dans le sud ouest de la France (Inventaire Forestier National; www.ifn.fr). Si la géologie de cette région naturelle est relativement bien connue (Legigan, 1979), il subsiste de nombreuses interrogations sur les caractéristiques physico-chimiques de la couverture pédologique (Trichet *et al.*, 1999).

Les sols sont majoritairement des PODZOSOLS (pouvant être MEUBLES, DURIQUES et / ou HUMIQUES selon la terminologie du référentiel pédologique (RP); AFES, 1995). Des ARENOSOLS et des REDOXISOLS sont également fréquents, respectivement sur la frange littorale et dans les parties mal drainées du massif forestier. La faible altitude du sable des Landes et la subordination de son hydrogéologie à l'océan font qu'il existe une nappe permanente à

faible distance de la surface des sols. L'amplitude des oscillations saisonnières du toit de la nappe ainsi que sa profondeur (souvent liée à la microtopographie du site) définissent classiquement trois grands types de stations :

- Dans les parties hautes du massif, ainsi qu'à proximité des cours d'eau, la nappe est toujours à plus de 2 m de profondeur et la végétation est dominée par des éricacées (*Erica cinerea*, *Calluna Vulgaris*). C'est la lande sèche.
- Dans les parties basses, ou dans les vastes interfluves du massif, la nappe est à proximité de la surface des sols en hiver (0,0-0,5 m de profondeur) et reste généralement proche de celle-ci, même en été (1,0-1,5 m). La végétation est dominée par *Molinia caerulea*. C'est la lande humide. Dans les stations particulièrement hydromorphes, *Erica tetralix* et *Erica ciliaris* sont présentes.
- Dans les secteurs intermédiaires à ces deux stations, la nappe oscille de manière saisonnière autour des horizons illuviaux de sol. *Pteridium aquilinum* est l'espèce qui domine la lande mésophile.

Bien que non stricte, il existe une relation entre le type de sol et la typologie forestière : les PODZOSOLS MEUBLE ou DURIQUE avec un horizon éluvial visible (E) sont fréquents dans la lande sèche alors que les PODZOSOLS HUMIQUES ou OCHRIQUES sans horizon éluvial visible (et les REDOXISOLS) sont abondants dans la lande humide (voire très humide). Dans les zones de lande mésophile, il est fréquent d'observer des profils intermédiaires à ces deux sols caractéristiques des extrêmes des microtoposéquences landaises. Il s'agit assez fréquemment de PODZOSOLS HUMODURIQUES.

Le massif forestier landais reçoit en moyenne environ 900 mm de précipitations annuelles réparties de manière inégale le long d'un gradient nord (env. 800 mm.an<sup>-1</sup>) - sud (env. 1 200 m.an<sup>-1</sup>). La température moyenne annuelle est de 12,7 °C.

## Délimitation de la zone d'étude

Le massif forestier landais est géographiquement défini comme étant un vaste triangle délimité par l'océan, la Garonne et l'Adour. D'un point de vue plus pédologique, les sols du massif forestier landais ont pour point commun d'avoir pour matériau parental un sable grossier d'origine éolienne et d'âge d'épandage quaternaire (le « sable landais »).

Dans la présente étude, ces deux critères ont servi à la délimitation de la zone d'étude : pour être retenue dans la compilation, une donnée devait concerner un relevé de sol à la fois situé dans le massif forestier landais tel que défini par l'IFN en termes de régions forestières (tableau 1; PL = 'Plateau Landais' ; D = 'Dunes' ; B = 'Bazadais' ; M = 'Marensin') et ayant le sable des Landes comme matériau parental. Par ailleurs, l'occupation des sols étant un facteur influençant de manière importante leur composition (Jolivet *et al.*, 2003), un troisième critère de sélection des données a été de se limiter au contexte forestier, étendu aux formations de friches et de landes.

**Tableau 1** - Régions forestières du massif forestier landais**Table 1** - Forested areas of the studied region

Région forestière (code IFN)	Surface totale (ha)	Importance relative (%)	Taux de boisement* par <i>Pinus pinaster**</i>
'PL' : Plateau Landais (404)	1 143 020	86 %	76 %
'D' : Dunes littorales (330)	96 110	7 %	88 %
'B' : Bazadais (334)	53 390	4 %	27 %
'M' : Marensin (401)	36 840	3 %	67 %
Total	1 329 360	100 %	75 %

\* : taux calculé à partir des classes « futaies de conifères » et « futaies de conifères et taillis ».

\*\* : les surfaces occupées par d'autres espèces de conifères ont été considérées comme négligeables.

source : www.ifn.fr

## Variables étudiées

Tout profil de sol répondant aux critères ci-dessus et ayant au moins un volume de sol analysé a servi à alimenter la base de données. Les variables que nous avons cherchées à renseigner sur les profils sont les suivantes : coordonnées géographiques (Lambert II étendu), altitude (m), pente (%), région forestière IFN, occupation du sol, station forestière (Comps *et al.*, 1979), niveaux maximal et minimal de la nappe (m), profondeur maximale d'enracinement (m), type de sol (selon le RP).

Pour chaque volume de sol, les variables étudiées sont : dénomination du volume (si possible, transcrit selon le RP), niveaux supérieur et inférieur du volume pédologique (cm), niveau d'induration (selon le codage suivant : 0 = pas d'induration ; 1 = induration ou compaction modérée ; 2 = induration marquée ; 3 = induration très importante), structure, granulométrie (en 5 classes (argiles ; limons fins ; limons grossiers ; sables fins ; sables grossiers) telles que définies par Guillet et Rouiller (1994), charge en cailloux (% du volume), densité apparente ( $\text{kg.L}^{-1}$ ), pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ; KCl;  $\text{CaCl}_2$ ), éléments totaux (C; N; P; K; Ca; Mg; Na; Mn; Fe;  $\text{g.kg}^{-1}$ ), CEC ( $\text{cmol}^+.\text{kg}^{-1}$ ) et cations échangeables ( $\text{NH}_4^+$ ;  $\text{K}^+$ ;  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{Na}^+$ ;  $\text{Al}_{\text{ech}}^{(3+)}$ ;  $\text{H}^+$ ;  $\text{cmol}^+.\text{kg}^{-1}$ ), P biodisponible ou « assimilable » (Pass;  $\text{g P}_2\text{O}_5.\text{kg}^{-1}$ ), Fe et Al libres ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) sous forme amorphe (extraction au tampon oxalate :  $\text{Fe}_{\text{OXA}}$  et  $\text{Al}_{\text{OXA}}$ ) ou cristallisée (extraction au citrate-bicarbonate-dithionite de Na :  $\text{Fe}_{\text{CBD}}$  et  $\text{Al}_{\text{CBD}}$ ). Dans tous les cas, la méthode analytique qui a été utilisée a également été renseignée quand l'information était disponible.

## Homogénéisation et analyse des données

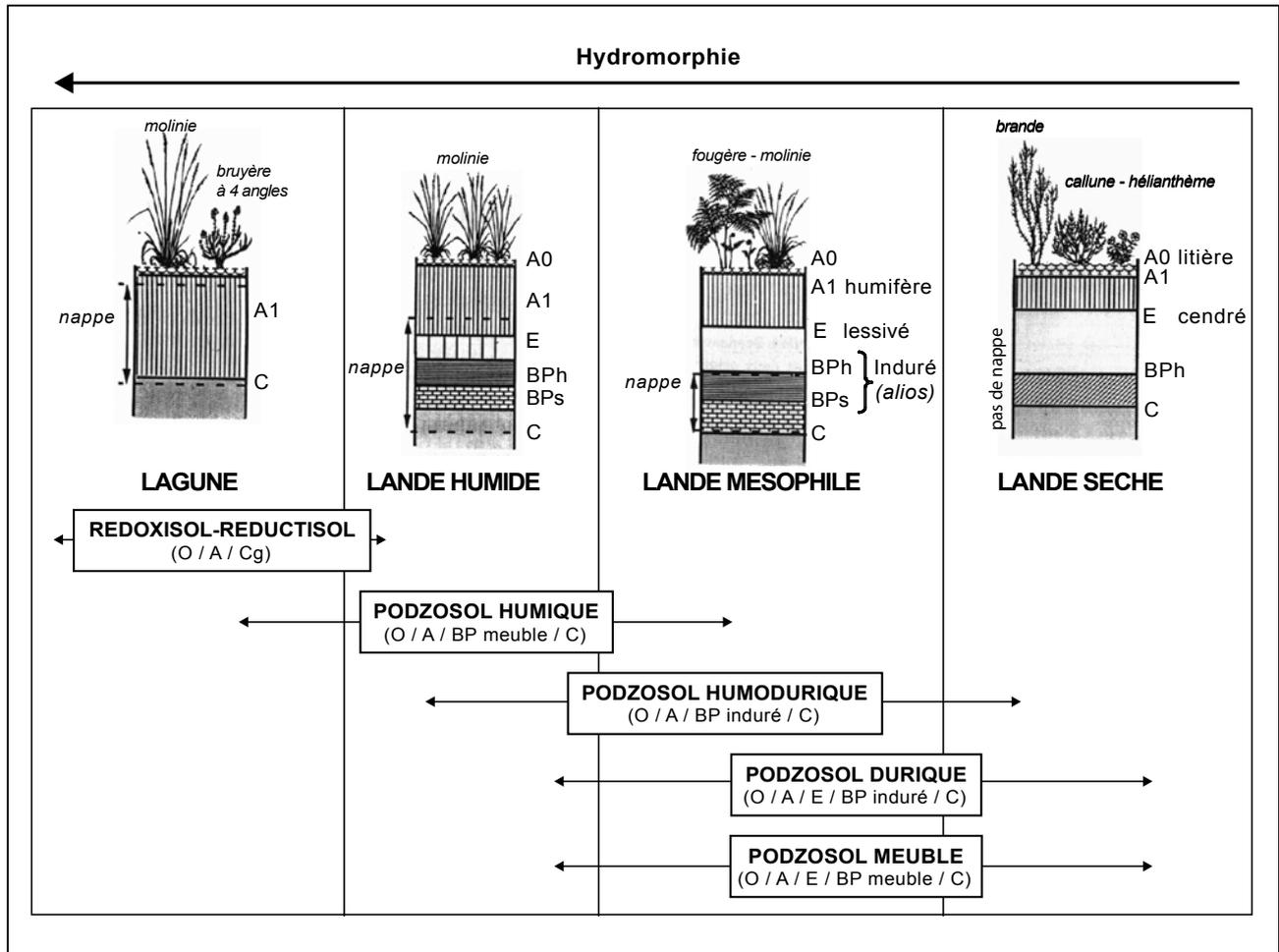
Avant de procéder à l'analyse statistique proprement dite, nous avons cherché à rendre compatibles les résultats issus de diverses méthodes analytiques. L'étude de la base de données a montré que certaines variables ne présentaient pas de problème à cet égard dans la mesure où la méthode était relativement standardisée (granulométrie ; densité apparente ; pH ; C et N totaux). Par exemple, toutes les mesures granulométriques et de densité

apparente répertoriées ont été respectivement réalisées selon les méthodes Robinson et du cylindre de sol (voir Rouiller *et al.*, 1994 pour le détail des méthodes). En ce qui concerne les autres variables, les différentes méthodes répertoriées sont : les attaques HF,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Trollet, 1976), métaborate de Sr (Righi, 1977) et la spectrométrie de fluorescence X (Dumon, 1986) pour les analyses chimiques totales ; les extractions à l'acétate de  $\text{NH}_4^+$  à pH = 7 ou au chlorure de cobalthexamine à pH du sol pour la CEC ; les extractions Dyer, Joret-Hébert, Duchaufour-Bonneau et Olsen pour le P « assimilable » (voir Rouiller *et al.*, 1994 pour le détail de la plupart des méthodes ci-dessus).

Les facteurs de répartition des résultats étudiés ici sont : le type de sol, le type de station (figure 1 ; tableau 2) et la profondeur. Concernant cette dernière, 4 classes ont été définies (volume holorganique ; 0 - 15 cm ; 16 - 45 cm ;  $\geq 45$  cm de profondeur) et les volumes de sol analysés répartis en fonction de la moyenne entre leurs limites supérieure et inférieure de profondeur. Lorsque l'effectif des données le permettait, les classes de profondeurs ont été détaillées (*i.e.* 0 - 5 cm ; 6 - 15 cm ; 16 - 25 cm ; 26 - 45 cm ; 46 - 65 cm ; 66 - 90 cm ;  $\geq 90$  cm de profondeur). Dans certains cas, les données ont également été traitées par type d'horizons (regroupés en 4 classes : A ; E ; BP ; C).

Les données ont été traitées sous SAS (1999). L'analyse de la variance (PROC GLM) a été utilisée pour mettre en évidence un effet significatif d'un facteur. Des test-t de Bonferroni ont permis de montrer des différences significatives entre classes d'un même facteur. Lorsqu'un écart est présenté après une moyenne (*e.g.* 5,6  $\pm$  0,9), il s'agit systématiquement de l'erreur-type ( $\alpha/\sqrt{n}$ ; Wonnacott et Wonnacott, 1991). Des intervalles de confiance (*e.g.* 40 - 80) sont également présentés dans la présente étude. Dans ce cas, la probabilité qu'une valeur prise au hasard se trouve dans l'intervalle est systématiquement fournie (*e.g.* 0,90). Dans les tableaux de résultats aucune moyenne n'est présentée lorsque l'effectif est très faible ( $n < 5$ ). Le coefficient de variation ( $\text{CV} = \alpha/\bar{x}$ ) pourra également être présenté afin d'indiquer le degré de dispersion des valeurs autour de la moyenne.

**Figure 1** - Caractérisation de la typologie stationnelle des Landes de Gascogne  
**Figure 1** - Main characteristics of the site classes of the 'Landes de Gascogne'



Adaptée de Dulong et Delarche, 1990)

## RÉSULTATS

### Homogénéisation des données selon les méthodes analytiques

Dans les quelques cas où la perte au feu était connue et la teneur en carbone non renseignée, cette dernière a été estimée selon l'équation proposée par Belkacem *et al.* (1998). Selon l'origine des données, la granulométrie ne tenait pas toujours compte de la perte au feu. C'est pourquoi la somme des classes texturales a été systématiquement ramenée à 100 % et la valeur de chaque classe pondérée en conséquence.

Selon les auteurs, les analyses chimiques totales ont été faites sur tout l'échantillon tamisé à 2 mm (*e.g.* Dumon, 1986) ou sur des

fractions granulométriques plus fines (Righi, 1977; Semlali, 2000). Cette dernière catégorie de résultats étant très minoritaire dans la base de données, elle a été écartée. En ce qui concerne la première catégorie, une analyse de la variance montre un effet significatif ( $P < 0,001$ ) de la méthode sur les valeurs pour les éléments suivants : P, Mg, Na. Dans ce cas, seules les données obtenues avec la méthode analytique la plus récente ont été conservées (*i.e.* attaque HF). Pour Mn et Fe, seules des données issues de la méthode par spectrométrie de fluorescence X (Dumon, 1986) ont pu être collectées en nombre important (les moyennes qui seront fournies par la suite pour Mn et Fe le seront donc à titre indicatif).

Une analyse de l'ensemble du jeu de données a montré que 95 % des charges de la CEC concernaient 4 éléments :  $H^+$  ;  $Al_{ech}^{3+}$  ;  $Ca^{2+}$  ;  $Mg^{2+}$  (respectivement : 33 % ; 30 % ; 22 % et 10 %). Aussi, lorsque la valeur de la CEC n'était pas disponible mais que celles

de  $H^+$ ,  $Al_{ech}^{(x+)}$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  l'étaient, une valeur correspondant à la CEC effective était calculée comme étant la somme des charges de tous les éléments échangeables.

La comparaison des méthodes de mesure de la CEC met en évidence des différences significatives ( $P = 0,03$ ) des résultats ( $CEC_{-acétate} > CEC_{-cobaltihexamine}$ ). Les valeurs de CEC de la population la moins importante (*i.e.* la méthode à la cobaltihexamine) ont alors été corrigées à partir des relations de passage proposées par Ciesielski et Sterckeman (1997). Après correction, il n'existe plus de différence significative ( $P = 0,48$ ) entre les deux méthodes ( $CEC_{-acétate} = 4,8 \pm 0,7$ ;  $CEC_{-cobaltihexamine} = 4,1 \pm 0,2$   $cmol^+ \cdot kg^{-1}$ ). Notons que les CEC présentées dans la présente étude sont à utiliser avec précaution, puisque obtenues à un pH éloigné de celui du sol. Les valeurs « réelles » de CEC (*i.e.* au pH du sol) étant, dans ce contexte, nettement inférieures à celles mesurées à pH 7.

En ce qui concerne les diverses méthodes d'estimation du P assimilable, c'est la méthode Duchaufour et Bonneau (1959) qui a été choisie comme référence car elle représentait de loin la population la plus abondante (67 % de l'effectif total) et qu'elle a été développée spécialement pour des sols forestiers acides. Les facteurs de proportionnalité ainsi que les relations utilisées entre les méthodes sont issus des travaux de Boniface et Trocmé (1988) et de Bonneau *et al.* (2003). Après correction, il subsiste toutefois une différence significative ( $P < 0,001$ ) entre les valeurs de la méthode de référence et celles des méthodes corrigées. L'examen détaillé des données indique que cette différence a pour origine une unique référence bibliographique dont les valeurs sont jusqu'à 3 ordres de grandeur supérieures au reste de la population. Il a été décidé de considérer cette référence comme non fiable et de l'écartier du jeu de données. Après cela, il n'existe plus de différence significative ( $P = 0,29$ ) entre la méthode de référence ( $0,036 \pm 0,003$ ) et les méthodes corrigées ( $0,030 \pm 0,003$   $g P_2O_5 \cdot kg^{-1}$ ).

Le rapport C/N et le taux de saturation de la CEC en cations échangeables non acides ( $V$  en %;  $(K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+) / CEC$ ) ont été calculés lorsqu'ils n'étaient pas fournis par la référence bibliographique et que toutes les variables de l'équation étaient renseignées. Toutefois, et afin d'éviter les valeurs aberrantes consécutives à des dénominateurs peu précis, ces rapports n'ont pas été calculés lorsque N ou CEC étaient  $< 1,0$  ( $g \cdot kg^{-1}$  ou  $cmol^+ \cdot kg^{-1}$ ).

## Effectifs des données

Au total ce sont 229 profils de sol répondant aux critères de sélection et ayant au moins un volume de sol analysé qui ont été répertoriés. L'origine des données peut être classée en quatre grandes catégories : 1) les données non publiées (Augusto; Merzeau; Morel; Trichet); 2) les données des réseaux DSF ( $n = 32$ ; Badeau et Flot) et RENECOFOR ( $n = 3$ ; Brethes et Ulrich, 1997; Ponette *et al.*, 1997) ainsi que celles de la base de données DONESOL ( $n = 10$ ; Arrouays et Jolivet); 3) les données publiées dans des revues nationales ou internationales (Illy, 1964; Juste, 1965; Juste et Dutil, 1965; Saur, 1989); 4) les données issues de rapports,

de mémoires ou de revues régionales (Casenave, 1970; Trolliet, 1976; Righi, 1977; Dumon, 1978; Wilbert, 1978; Bergeret, 1980; Courcoux, 1982; Brossard, 1986; Dumon, 1986; Nys *et al.*, 1995; Jolivet, 2000; Semlali, 2000; Gérard, 2002). Les contributions de ces quatre classes à la base de données finale sont respectivement de 35 %, 20 %, 7 % et 38 %.

Dans 97,5 % des cas, l'occupation du sol était forestière et résineuse (*Pinus pinaster*).

Les profils de sol se répartissent dans les différentes régions forestières de manière relativement proportionnelle à la surface de celles-ci (*tableau 1*): PL = 90 % des profils; D = 7 %; B = 3 %; M = 0 %. Notons tout de même qu'aucun profil de sol n'a été répertorié dans le Marensin. De même, le plateau landais (PL; subdivisé ici de manière arbitraire) voit ses profils de sol disposés de manière très inégale et notamment avec un fort écart en effectif entre la zone la plus méridionale et celle la plus proche de Bordeaux (*figure 2*).

En ce qui concerne la répartition selon la typologie du massif forestier landais (*tableau 2*), elle est la suivante : dunes (DN) = 9 %; lande sèche (LS) = 14 %; lande mésophile (LM) = 33 %; lande humide (LH) = 44 %. Cette répartition est globalement représentative du massif forestier landais (IFN, 1991 (*in* Trichet *et al.*, 1999)). Au sein du plateau landais (PL), on constate une ségrégation entre les landes LM et LH d'une part et la lande LS d'autre part : les LS sont significativement plus méridionales que les LM et LH ( $P < 0,001$ ; test effectué sur les coordonnées latitudinales). Ici encore, ce gradient est représentatif du massif forestier landais (cartes de végétation de France n° 56 et 63, CNRS). Les profils appartenant au type de station 'Dune' (DN) sont, et c'est logique, très majoritairement localisés dans la région forestière des dunes littorales (D). En ce qui concerne les sols localisés dans le Bazadais (une région IFN située entre le plateau landais et la Garonne; [www.ifn.fr](http://www.ifn.fr)), ils ont été classés dans un type artificiel de station (BZ).

## Description générale des stations

Dans ces sols issus du sable landais, la charge en éléments grossiers ( $> 2$  mm) est nulle ou extrême faible ( $< 5\%$  du volume) dans 98,3 % des cas. Les quelques grains grossiers présents sont de nature siliceuse et de forme arrondie.

La profondeur maximale d'enracinement diffère selon le type de station. Elle est en moyenne de 1,3 m en dunes et en lande sèche alors qu'elle avoisine 0,7 m en landes mésophile et humide. Ce résultat est probablement à mettre en parallèle avec les profondeurs hivernales de nappe qui sont respectivement  $> 2$  m en LS et en moyenne de 0,3 m en LM et LH. Pour LM et LH, la présence ou l'absence de l'ailios ne modifie pas la profondeur d'enracinement. Pour LS, les données disponibles ne sont pas suffisamment nombreuses pour procéder à une comparaison ( $n = 6$  profils). La répartition du type de sol par station est la suivante : 100 % des sols de DN et de LS étaient respectivement des ARENOSOLS (A) et des PODZOSOLS (P). Dans les parties plus ou moins humides du plateau landais (LM + LH), quelques REDOXISOLS (R) côtoyaient

**Tableau 2** - Typologie simplifiée des stations du massif forestier landais (d'après Barry *et al.*, 1952, Comps *et al.*, 1979, Dobremez *et al.*, 1997)**Table 2** - Simplified site classification of the studied region (from Barry *et al.*, 1952, Comps *et al.*, 1979, Dobremez *et al.*, 1997)

Station***	Espèces majoritaires ou indicatrices <sup>(1)</sup>	Types de sol majoritaires
Dune (DN)	<i>Scleropodium purum</i> <i>Hypericum cupressiforme</i> <i>Cytisus scoparius</i> <i>Arbutus unedo</i>	ARENOSOLS
Lande Sèche (LS)	<i>Calluna vulgaris</i> * <i>Erica cinerea</i> *	
Lande Mésophile (LM)	<i>Halimium allysoides</i> <sup>i</sup> <i>Pteridium aquilinum</i> **	PODZOSOLS (DURIQUES ou MEUBLES)
Lande Humide (LH)	<i>Molinia caerulea</i> <i>Erica tetralix</i>	PODZOSOLS (HUMIQUES ou HUMODURIQUES) ou REDOXISOLS

\* : d'après Comps *et al.* (1979), *Calluna vulgaris* et *Erica cinerea* ne sont pas indicateurs de la lande sèche mais y sont plus abondants que dans les autres stations.

\*\* : *Pteridium aquilinum* peut être codominant avec *Molinia caerulea*.

\*\*\* : les sols localisés dans la région forestière du Bazadais (B) ont été classés dans un type de station artificiel noté BZ.

une majorité de PODZOSOLS (respectivement 6 et 94 %). Parmi les PODZOSOLS du plateau landais, 72 % présentaient au moins un volume de sol (BP) plus ou moins induré (la propriété « DURIQUE » pouvant être décrite comme localement très discontinue). Par ailleurs, 67 % des PODZOSOLS présentaient la propriété « HUMIQUE » [cf. AFES (1995) pour une description des qualificatifs pédologiques]. La présence d'un volume de sol ayant un caractère rédoxique ou réductique n'est pas totalement incompatible avec un PODZOSOL DURIQUE. Toutefois, ils sont en proportion trois fois moins abondants dans les PODZOSOLS DURIQUES par rapport aux PODZOSOLS non DURIQUES (respectivement 7 et 21 %). Ceci est cohérent avec ce que l'on sait de la répartition géographique des sols en fonction de leur régime hydrique (Righi, 1977, Trichet *et al.*, 1999). Aucune relation entre les propriétés HUMIQUE ou DURIQUE des PODZOSOLS d'une part et le caractère rédoxique d'autre part n'a pu être mise en évidence.

L'humus des PODZOSOLS est le plus souvent classé dans les moder ou les mor (n = 24 sur 25). La masse de la couche holorganique est très variable selon le site (40 - 80 Mg.ha<sup>-1</sup>; intervalle de confiance avec une probabilité de 0,90).

## Description physico-chimique des stations

Quelle que soit la station, il n'existe pas de différence significative de granulométrie entre les différentes profondeurs du volume de sol considéré. A l'inverse, on remarque des différences significatives (P < 0,001) en fractions fines entre les sols du plateau landais et ceux des dunes ou du Bazadais : BZ ≥ PL ≥ DN (*tableau 3*; *figure 3*). Au sein de PL, aucune influence significative des stations (LS; LM;

LH), du type de sol (P; R) ou de la présence de l'alias n'a été mise en évidence.

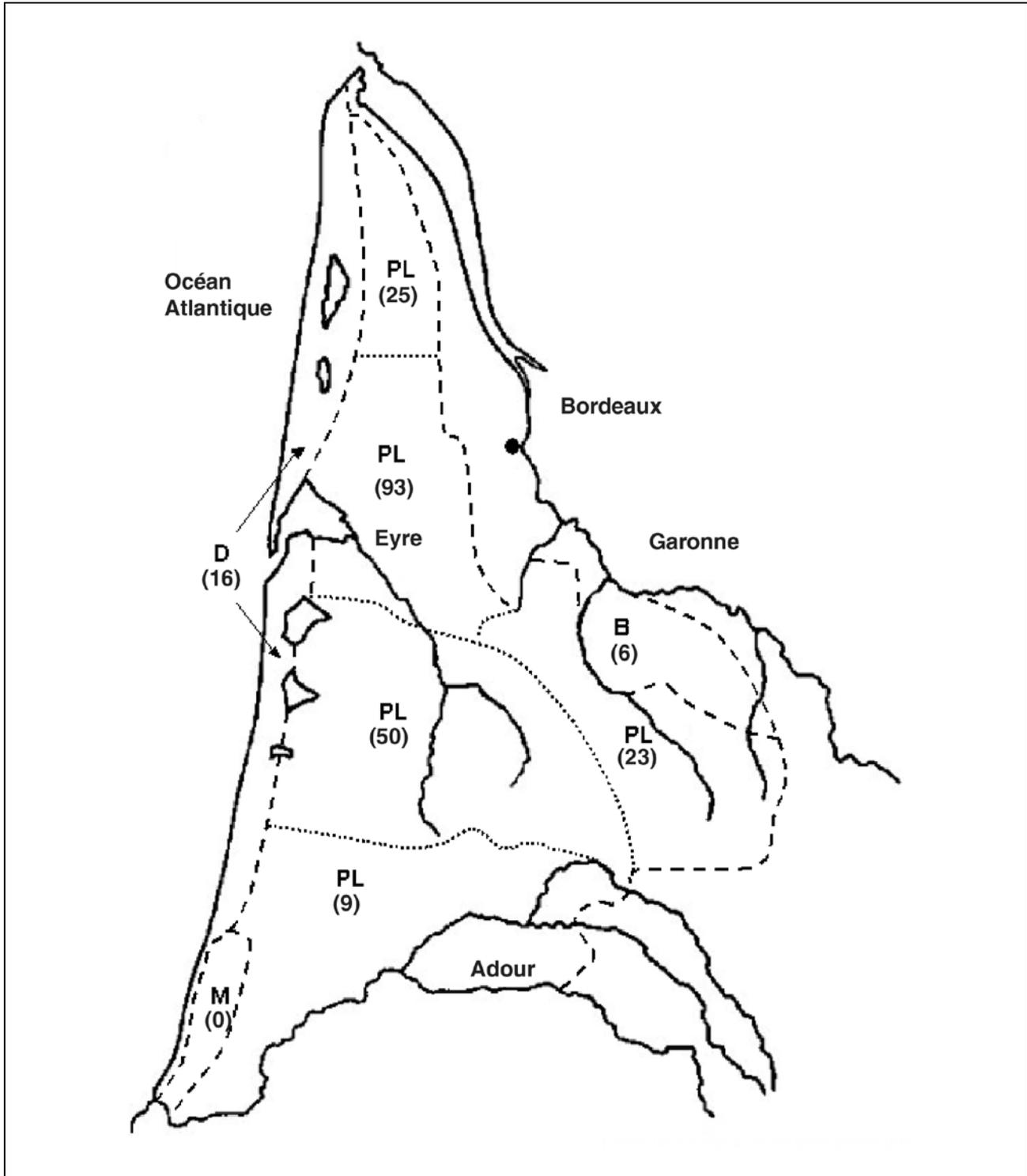
La densité apparente des sols dépend essentiellement des teneurs en carbone et en sables (cf. ci-dessous). Elle décroît avec la profondeur du sol et diffère nettement entre les sols de dunes et ceux du plateau landais (DN > PL; P < 0,001; *tableau 3*).

Le pH du sol augmente avec la profondeur. La gamme de valeur est relativement large y compris pour un même niveau de profondeur (e.g. 4,0-5,5 pour les percentiles 10 et 90 % de la classe de profondeur 16-45 cm). Le pH distingue clairement les grands groupes de stations : DN ≥ BZ ≥ PL (*tableau 3*). Au sein de PL, aucune différence des stations n'a été mise en évidence. A l'inverse, les sols DURIQUES de PL sont significativement plus acides que les non-DURIQUES (différence de 0,31, 0,37 et 0,16 pour les profondeurs suivantes : 0-15 cm, 15-45 cm et > 45 cm).

Les teneurs en matières organiques (C et N) décroissent logiquement avec la profondeur (*tableau 3*). Les stations diffèrent significativement selon ces deux variables : DN ≤ (BZ; LS) ≤ (LM; LH). C'est notamment le cas de DN qui présente des valeurs particulièrement faibles. En ce qui concerne le rapport C/N, le plateau landais se distingue nettement des dunes littorales et du Bazadais : PL > (DN; BZ). Au sein de PL, il ne semble pas y avoir de différence significative entre les stations par niveau de profondeur. Toutefois, lorsque les comparaisons sont effectuées par type d'horizon, il apparaît que les horizons A des PODZOSOLS ont des C/N supérieurs à ceux des REDOXISOLS (P = 0,0016; pas de différence significative pour les horizons E, BP et C). L'écart entre les horizons A des PODZOSOLS de LS (33,2 ± 3,5) et ceux de LM et LH (28,0

**Figure 2** - Répartition géographique des régions forestières du massif forestier landais [D = Dunes littorales ; B = Bazadais ; M = Marensin ; PL = Plateau Landais] et des effectifs des profils de sol (profils non localisés avec précision : n=7)

**Figure 2** - Geographic repartition of the forested areas of the studied region [D = coastal dunes; B = bazadais; M = marensin; PL = plateau landais] and number of soil profiles (Soil profiles which were not located with precision: n=7)



**Tableau 3** - Caractéristiques physico-chimiques des stations**Table 3** - *Physic and chemical properties of the site classes*

Volume de sol	Région IFN	Station	Sol	Da	A	L	S	C <sub>TOT</sub>	N <sub>TOT</sub>	C/N	P <sub>ass</sub>	pH-H <sub>2</sub> O
0-15 cm	D	DN	A	1,43±0,05	10±3	7±1	983±3	11,9±4,1	0,39±0,09	22,2±2,8	0,037±0,005	5,02±0,09
	B	BZ	.	.	47±23	70±29	883±51	11,1±2,4	0,64±0,16	18,0±1,3	.	4,61±0,16
	PL	LS	P	1,19±0,12	16±16	25±3	959±18	22,3±6,1	0,66±0,18	29,9±2,6	.	4,50±0,10
	PL	LM	P	1,14±0,05	35±8	34±6	931±9	29,8±3,7	0,96±0,07	29,8±1,7	0,042±0,003	4,47±0,05
	PL	LH	P	1,10±0,06	41±7	33±4	926±10	36,0±7,3	1,39±0,18	28,7±1,6	0,039±0,004	4,44±0,07
16-45 cm	PL	LM-LH	R	1,11±0,03	31±7	59±11	910±18	28,6±3,5	1,40±0,20	21,2±1,9	.	4,49±0,13
	D	DN	A	1,59±0,01	8±2	3±2	989±4	0,8±0,1	0,09±0,01	13,6±2,8	.	5,39±0,15
	B	BZ	.	.	24±8	41±17	936±25	11,2±6,9	0,32±0,06	16,5±1,4	.	5,03±0,12
	PL	LS	P	1,45±0,08	.	.	.	7,4±1,3	0,25±0,04	29,4±3,0	.	4,97±0,16
	PL	LM	P	1,34±0,07	21±4	19±2	960±4	25,0±10,0	0,91±0,41	28,4±1,6	.	4,55±0,10
> 45 cm	PL	LH	P	1,35±0,05	25±3	28±5	947±6	19,5±3,2	1,02±0,20	26,8±1,2	0,025±0,002	4,68±0,09
	PL	LM-LH	R	1,12±0,04	23±3	35±4	942±6	15,1±1,8	0,72±0,07	20,7±1,1	.	5,01±0,15
	D	DN	A	1,61±0,03	8±1	3±1	989±2	1,5±0,7	0,02±0,01	.	.	5,40±0,25
	B	BZ	.	.	23±3	35±4	852±79	4,8±1,4	.	.	.	5,70±0,34
	PL	LS	P	1,47±0,08	.	.	.	4,8±1,2	0,20±0,04	22,2±2,4	.	4,90±0,08
	PL	LM	P	1,55±0,05	19±3	18±4	963±6	8,5±1,1	0,36±0,05	23,7±1,2	.	4,91±0,06
	PL	LH	P	1,50±0,02	17±4	16±6	967±10	12,1±2,7	0,46±0,11	26,8±1,8	0,030±0,003	5,08±0,06
	PL	LM-LH	R	1,24±0,02	10±1	13±2	977±2	3,4±1,1	0,45±0,05	18,5±4,3	.	5,30±0,11

Région IFN : D = Dunes littorales ; B = Bazadais ; PL = Plateau Landais

Station : DN = dune ; BZ = bazadais ; LS = lande sèche ; LM = lande mésophile ; LH = lande humide

Sol : A = ARENOSOL ; P = PODZOSOL ; R = REDOXISOL

Da : densité apparente (kg.L<sup>-1</sup>)

Granulométrie (g.kg<sup>-1</sup>) : A = argiles (< 2 µm) ; L = limons fins (2 - 20 µm) + limons grossiers (20 - 50 µm) ; S = sables fins (50 - 200 µm) + sables grossiers (200 - 2000 µm)

CTOT et NTOT : C et N totaux (g.kg<sup>-1</sup>)

Pass : P assimilable (g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.kg<sup>-1</sup>)

± 1,2 et 28,5 ± 1,2) n'est pas significatif (P = 0,20). La différence de C/N devient significative (P < 0,001) si le test est fait en prenant également en compte les REDOXISOLS de LM et LH. Les valeurs moyennes sont alors de 27,2 ± 1,0 pour LM et 26,1 ± 1,0 pour LH.

Les données sur les teneurs en P assimilable sont très fragmentaires (tableau 3) mais relativement homogènes (quelques dizaines de mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.kg<sup>-1</sup>). La station LH est relativement bien renseignée et semble mettre en évidence un profil avec un minimum significatif aux alentours de 20-70 cm de profondeur (figure 4). Il n'a pas été possible de mettre ce minimum en relation avec la présence systématique d'un horizon en raison d'effectifs trop faibles. Il existe

une corrélation positive significative entre la teneur en C et en P<sub>ass</sub> (r = 0,45; P < 0,001).

Les données concernant les teneurs en Al et Fe sous forme amorphe sont également très fragmentaires. Quelques tendances non statistiquement significatives semblent toutefois se dessiner : dans les sols soumis à une hydromorphie plus ou moins temporaire (LM; LH), Al<sub>OXa</sub> augmente avec la profondeur alors que la tendance est inverse en zone très filtrante (DN; pas de données pour LS). Par ailleurs, le degré d'hydromorphie semble favoriser l'accumulation de d'Al<sub>OXa</sub> (LH ≥ LM ≥ DN; P = 0,02) alors qu'il défavoriserait l'accumulation de Fe<sub>OXa</sub> (DN ≥ LM ≥ LH; P = 0,16).

**Tableau 4** - Caractéristiques d'échanges cationiques des stations**Table 4** - Exchange cationic properties of the site classes

Volume de sol	Région IFN	Station	Sol	CEC	V	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sub>ech</sub>	H <sup>+</sup>
0-15 cm	D	DN	A	3,1±1,3	61±11	0,045±0,012	0,70±0,15	0,29±0,07	0,106±0,036	0,12±0,02	1,88±1,08
	B	BZ	.	8,5±3,6	26±4	0,116±0,053	1,26±0,45	0,37±0,14	0,144±0,069	0,38±0,09	0,22±0,05
	PL	LS	P	.	.	0,032±0,006	0,63±0,20	0,25±0,07	0,097±0,021	0,51±0,10	0,37±0,05
	PL	LM	P	5,0±0,9	32±3	0,051±0,004	0,61±0,08	0,26±0,03	0,079±0,008	0,93±0,09	0,73±0,19
	PL	LH	P	5,0±0,5	36±3	0,058±0,006	0,84±0,11	0,36±0,05	0,100±0,012	1,08±0,10	1,20±0,44
	PL	LM-LH	R	8,2±0,8	13±2	0,041±0,003	0,71±0,16	0,33±0,04	0,100±0,013	1,27±0,19	.
16-45 cm	D	DN	A	1,9±1,4	83±11	0,018±0,004	0,23±0,04	0,05±0,01	0,045±0,025	0,07±0,02	0,11±0,04
	B	BZ	.	2,0±0,4	12±2	0,023±0,004	0,30±0,10	0,07±0,03	0,023±0,005	0,77±0,20	0,14±0,04
	PL	LS	P	.	.	0,015±0,003	0,19±0,06	0,06±0,02	0,038±0,017	0,69±0,17	0,13±0,04
	PL	LM	P	6,2±1,6	10±1	0,034±0,019	0,49±0,28	0,21±0,12	0,110±0,069	0,91±0,14	0,75±0,35
	PL	LH	P	5,8±0,9	13±2	0,030±0,004	0,32±0,05	0,12±0,02	0,075±0,019	1,18±0,16	1,72±0,63
	PL	LM-LH	R	6,7±0,8	13±2	0,019±0,003	0,45±0,06	0,18±0,02	0,067±0,007	1,02±0,15	.
> 45 cm	D	DN	A	0,4±0,1	86±14	0,024±0,003	0,26±0,01	0,07±0,01	0,045±0,005	.	.
	B	BZ	.	2,5±1,3	43±9	0,026±0,016	0,68±0,28	0,38±0,34	0,080±0,058	.	.
	PL	LS	P	.	.	0,017±0,003	0,15±0,05	0,05±0,01	0,046±0,009	.	.
	PL	LM	P	3,4±0,5	20±4	0,018±0,003	0,21±0,05	0,11±0,04	0,040±0,005	1,10±0,21	0,50±0,15
	PL	LH	P	2,7±0,3	12±4	0,021±0,003	0,10±0,01	0,06±0,02	0,039±0,012	0,52±0,07	0,73±0,28
	PL	LM-LH	R	3,2±0,5	8±2	0,007±0,003	0,17±0,06	0,07±0,02	0,028±0,004	0,44±0,11	.

Région IFN : D = Dunes littorales ; B = Bazadais ; PL = Plateau Landais

Station : DN = dune ; BZ = bazadais ; LS = lande sèche ; LM = lande mésophile ; LH = lande humide

Sol : A = ARENOSOL ; P = PODZOSOL ; R = REDOXISOL

CEC, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Al<sub>ech</sub>, H<sup>+</sup> : capacité d'échange cationique et cations échangeables (cmol<sup>+</sup>.kg<sup>-1</sup>)

V : taux de saturation de la CEC (%)

## Description des propriétés d'échanges cationiques des stations (tableau 4)

Dans l'ensemble, les sols du massif forestier landais ont en moyenne des CEC (mesurées à pH 7) et des taux de saturation (V) relativement faibles (respectivement inférieurs à 8 cmol<sup>+</sup>.kg<sup>-1</sup> et 60 %). Ces deux variables tendent à diminuer avec la profondeur, même si cette évolution n'est pas statistiquement significative pour toutes les stations. L'essentiel du taux de saturation est assuré par Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> (K<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup> étant très minoritaires dans la CEC).

Les sols des dunes littorales (D) se distinguent très nettement des sols du plateau landais (PL) par des CEC très faibles mais relativement bien saturées (tableau 4).

## Stocks en nutriments

Faute de suffisamment de répétitions, les stocks en nutriments des humus ont été calculés pour l'ensemble du massif forestier landais, en tenant compte de la variabilité des stocks d'humus (tableau 5).

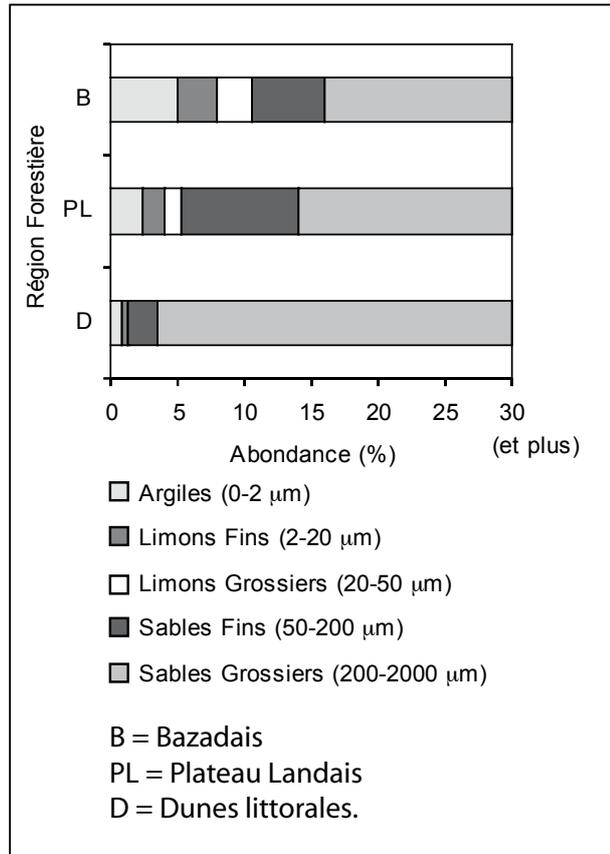
En ce qui concerne les stocks en nutriments des volumes de sols non holorganiques, ils ont été calculés en tenant compte des intervalles de confiances des Da et des teneurs (tableau 6). Il apparaît que les stocks de ces sols sont relativement faibles, notamment pour N, P, Ca et Mg. La part des stocks qui est facilement assimilable par la biocénose (ECH/TOT ou ASS/TOT ; cf. tableau 6) est très variable selon l'élément : < 0,5 % pour K ; ≈ 6-8 % pour Ca et Mg ; ≈ 15-20 % pour P (pas de données pour N).

La variabilité des stocks en nutriments au sein de PL, et plus généralement dans le massif forestier landais est réelle. Ainsi, les stocks en C et N sur un mètre de profondeur distinguent nettement les stations (tableau 7) : (LH ; LM) ≥ LS ≥ DN.

## Variabilité spatiale à l'échelle régionale

Les caractéristiques des sols ont été comparées au sein d'une même région forestière (PL). Les tests statistiques n'ont pas montré de différence significative entre les différentes subdivisions de PL telles que définies dans la figure 2 pour la plupart des variables étu-

**Figure 3 - Granulométrie des sols des grandes régions forestières**  
**Figure 3 - Soil particle size distribution of the forested areas**



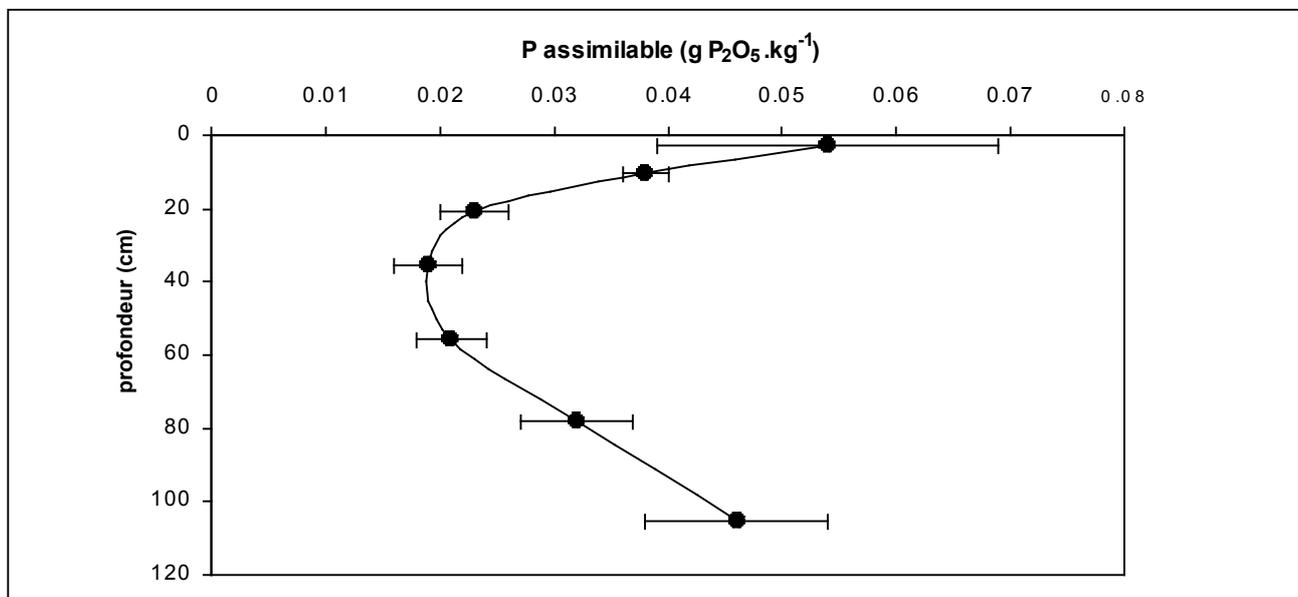
**Tableau 5 - Concentrations et stocks en nutriments des humus des sols du massif forestier landais**

**Table 5 - Nutrient stocks of soils (podzols and gleyic soils) of the 'plateau landais' (PL)**

Elément	Concentration (g.kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg.ha <sup>-1</sup> )
C	332±23	13 505-25 078
N	8,51±0,56	344-655
P	0,36±0,03	13,5-22,9
K	2,16±0,33	67-183
Ca	3,29±0,32	116-212
Mg	0,69±0,05	28-48

Les stocks ont été calculés à partir des intervalles de confiance (probabilité=0,90) de la masse d'humus (40,0 - 80,2 t.ha<sup>-1</sup> ; n=16) et des concentrations (n=24).

**Figure 4 - Teneur en P assimilable des sols de lande humide**  
**Figure 4 - Available P content in soils of wet moorlands**



**Tableau 6** - Stocks en éléments des sols (PODZOSOLS et REDOXISOLS) du plateau landais (PL)**Table 6** - Nutrient stocks of soils (Podzols and Gleysols) of the 'plateau landais' (PL)

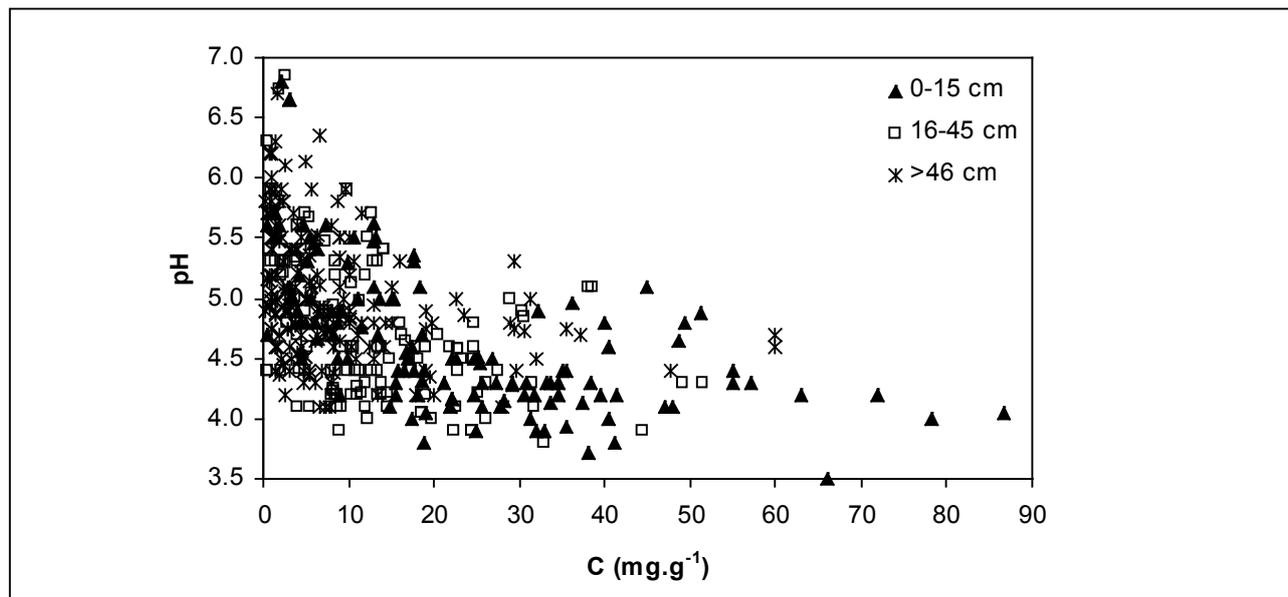
Volume de sol	C <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	N <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	P <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	K <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	Ca <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	Mg <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	Fe <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	Mn <sub>TOT</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ASS</sub> (kg P.ha <sup>-1</sup> )	K <sub>ECH</sub> (kg.ha <sup>-1</sup> )	Ca <sub>ECH</sub> (kg.ha <sup>-1</sup> )	Mg <sub>ECH</sub> (kg.ha <sup>-1</sup> )
0-15 cm	36,6-53,6	1,5-2,0	0,11-0,29	4,8-7,1	0,8-1,6	0,27-0,44	0,5-10,6	0,06-0,16	27-34	28-39	193-289	49-72
16-45 cm	47,5-85,2	2,1-3,8	0,11-0,35	11,9-16,6	1,9-5,1	0,51-0,95	4,8-8,3	0,15-0,38	27-65	29-43	197-306	46-70
46-100 cm	58,4-88,5	2,3-3,7	0,51-0,94	32,8-41,4	5,3-7,8	1,52-2,19	18,0-36,0	0,37-0,64	96-136	54-86	216-348	43-101
0-100 cm	142,5-227,3	6,0-9,5	0,73-1,58	49,5-65,1	8,0-14,5	2,30-3,59	23,3-55,0	0,58-1,18	150-236	111-168	606-944	138-244

TOT : teneur totale en élément (toutes formes chimiques confondues)

ASS : P assimilable

ECH : élément échangeable

Intervalles de confiance calculés avec une probabilité de 0,90

**Figure 5** - Relation entre le pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> et la teneur en carbone des sols**Figure 5** - Relationship between pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> and C content of soils

diées. Tout juste remarque-t-on une tendance à une granulométrie plus grossière et à des quantités en Na<sub>ech</sub> plus importantes dans la zone nord de PL (pointe du Médoc), ce qui traduirait une influence océanique plus prononcée.

Toutefois, bien souvent, les données n'étaient pas réparties de manière suffisamment homogène et il est probable que la présente étude ne soit pas en mesure de mettre en évidence les variabilités spatiales régionales, si elles existent. De même, il convient de relativiser la relation entre la zone du Médoc et Na<sub>ech</sub> dans la mesure où Na<sub>ech</sub> peut fortement varier localement selon les conditions météorologiques (Jolivet, données non publiées).

### Fonctions de pédo-transfert (FPT)

Une fonction de pédo-transfert permet l'estimation d'une variable du sol à partir d'une ou plusieurs autres (Bouma et van Lanen, 1987). Il existe déjà dans la littérature plusieurs FPT adaptées aux sols du massif forestier landais. Par exemple, Chossat (1992) et Brossard (1986) proposent respectivement des fonctions pour estimer la réserve utile en eau et la teneur en matières organiques :

$$RU = (2,7 + (0,05 \times \% \text{ Argiles}) + (0,03 \times \% \text{ Limons fins}) + (0,02 \times MO) - (0,05 \times C/N)) \times Da \times \text{Epaisseur}$$

$$MO = 0,48 + (1,65 \times C)$$

A partir du présent jeu de données, nous avons cherché à

construire ce type de fonctions. Ainsi, il existe des relations linéaires entre les différents pH du sol :

$$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = (0,86 * \text{pH}_{\text{CaCl}_2}) + 1,65 \quad (P < 0,001 ; r^2 = 0,70)$$

$$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = (0,74 * \text{pH}_{\text{KCl}}) + 1,96 \quad (P < 0,001 ; r^2 = 0,57)$$

De même, le  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  et la teneur en C sont liés :

$$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = \text{C}^{-0,3592} + 4,3$$

( $P < 0,001$  ; domaine de validité = 0-100 gC.kg<sup>-1</sup> ; figure 5)

Notons qu'ici, il n'y a pas confusion entre différents facteurs puisque la relation entre le pH et la teneur en C n'est pas le résultat d'une corrélation commune avec la profondeur dans le sol (figure non présentée).

La valeur de la densité apparente est principalement liée à la teneur en carbone et en sables :

$$\text{Da} = (0,0408 \times \text{Sables}) - (0,0016 \times \text{C}) - 2,54$$

( $P < 0,001$  ;  $r^2 = 0,56$  ; Sables en % et C en g.kg<sup>-1</sup>)

Enfin, la CEC est directement et linéairement reliée à la teneur en C (en moyenne  $\approx 0,35 \text{ cmol}^+ \cdot \text{g}^{-1} \text{C}$  ; domaine de validité = 0-100 g.C.kg<sup>-1</sup>) avec toutefois une forte variabilité (CV > 100 %). La prise en compte de la granulométrie n'améliore pas sensiblement la prédiction. Notons tout de même que, dans les échantillons particulièrement grossiers (% Sables > 95 %), la relation tend parfois à largement surestimer la CEC sans qu'aucune fonction de correction ait pu être construite à partir des autres variables du jeu de données. Le domaine de validité du facteur de conversion entre CEC et C est donc également restreint par la granulométrie.

## DISCUSSION

### Analyse critique de la méthode

D'un point de vue général, la méthode consistant à compiler des données non publiées afin de caractériser un milieu naturel à l'échelle régionale semble pertinente. Les résultats obtenus sont globalement conformes à ceux d'études antérieures et ponctuelles tout en augmentant la portée généralisatrice. Toutefois, si cette approche est économe en moyens logistiques et financiers, c'est loin d'être le cas pour ce qui est du temps nécessaire pour la mettre en œuvre. En effet, la récolte, la mise en forme et l'homogénéisation de données d'origine disparate est un travail de longue haleine qui requiert beaucoup d'attention et de temps. Enfin, et malgré tout le soin apporté à la phase d'alimentation de la base de données, des valeurs extrêmes peuvent encore s'y glisser et n'être repérées que lors des traitements statistiques. La difficulté est alors de déterminer de la manière la moins subjective possible ce qui relève de la valeur aberrante (à écarter du jeu de données) de la variabilité naturelle.

Une autre question qui se pose a trait à la validité de la méthode quant aux valeurs chiffrées obtenues. Dans la présente étude, les moyennes calculées sont relativement conformes à celles d'études antérieures (e.g. Righi et Wilbert, 1984 ; AFES, 1998 ; Trichet et

**Tableau 7** - Stocks en carbone et en azote des sols du massif forestier landais en fonction de la station (0-100 cm de profondeur ; sans prise en compte de l'humus)

**Table 7** - Carbon and nitrogen stocks of soils of the studied region according to the site classification (0-100 cm depth; without humus)

Station	C (Mg.ha <sup>-1</sup> )	N (Mg.ha <sup>-1</sup> )
DN	13-75	0,9-2,0
LS	61-175	2,2-6,2
LM	138-304	5,4-12,1
LH	150-292	6,3-12,3

Les stocks ont été calculés à partir des intervalles de confiance (probabilité=0,90).

Station : DN = dune ; LS = lande sèche ; LM = lande mésophile ; LH = lande humide.

al., 1999) ce qui paraît valider, au moins partiellement, l'approche employée. La granulométrie en est un bon exemple puisque Chossat (1992) aboutit à des résultats très proches de ceux de la présente étude (tableau 3) à partir d'un échantillon de sols du plateau landais de taille importante (n = 113 horizons de surface ; Argiles = 3,1 % ; Limons = 3,5 % ; Sables = 93,1 %). En ce qui concerne la validité des intervalles de confiance et des fonctions de pédo-transfert proposées, il est ici plus ardu de se prononcer en l'absence de travaux pouvant servir de référence ou de validation. Tout juste peut-on noter que les gammes de valeurs obtenues ici sont relativement voisines de celles proposées dans les études antérieures avec toutefois quelques exceptions. Ainsi, Belkacem et al. (1998) aboutissent à l'issue de leurs calculs à des stocks de C sensiblement inférieurs à ceux estimés ici. Une validation des FPT et des intervalles de confiance par une campagne d'échantillonnage et d'analyse s'avère donc indispensable.

### Caractérisation physico-chimique des régions forestières du massif forestier landais

Dans leur ensemble, il s'agit de sols sableux acides. Un point saillant de la présente étude concerne l'importance centrale de la teneur en matières organiques (quantifiées par C) dans la caractérisation des sols landais. En effet, le pH, la CEC, la densité apparente, le P assimilable ainsi qu'une partie importante des stocks en nutriments, comme l'azote, en dépendent plus ou moins directement. Ce lien entre toutes ces variables est somme toute très classique, mais la quasi absence de phase minérale physico-chimiquement réactive tend à exacerber le rôle des matières organiques dans le fonctionnement des sols forestiers landais. D'un point de

vue prospectif, toute intervention directe (e.g. déforestation) ou indirecte (e.g. changement climatique) sur le stockage de carbone dans les sols landais devrait conduire à des modifications de leurs propriétés physico-chimiques.

Les sols du Bazadais forment à l'évidence des sols de transition dans une zone où le matériau parental (« sable landais ») s'amincit avant de disparaître. Les sols des dunes littorales se caractérisent par une texture extrêmement grossière ainsi que par des teneurs en C particulièrement basses. Il en résulte une acidité modérée mais également une CEC et des stocks en nutriments très faibles. Ces conditions à la fois très filtrantes et oligotrophes expliquent probablement en grande partie la faible croissance des pins (Illy, 1964; Saur, 1989) ainsi que la faible abondance de la végétation accompagnatrice relativement au reste du massif forestier landais (DSF et RENECOFOR; données non présentées) de cette région.

Comparés à l'ensemble des sols forestiers français (Badeau *et al.*, 1999), on peut constater que les sols du PL ont des C/N,  $pH_{H_2O}$ , CEC (à pH du sol) et taux de saturation plus défavorables que la moyenne. On peut également noter que la teneur en C y est plus élevée que la moyenne nationale ce qui traduit une certaine difficulté à minéraliser les matières organiques. Il apparaît également que les sols étudiés ici sont pauvres en certains nutriments comme N, P, Ca et Mg. La productivité du système semble d'ailleurs être assurée par une proportion relativement importante de formes rapidement assimilables de ces nutriments.

## Variabilité des sols du plateau landais : échelles intraparcélaire, interparcélaire et régionale

Il n'a pas été possible de mettre en évidence des différences significatives entre les divers grands secteurs géographiques de PL. La variabilité à l'échelle régionale n'apparaît donc pas comme importante et peut être éventuellement reliée à une certaine homogénéité du matériau parental des sols.

L'étude ne visait pas à quantifier la variabilité intra-parcélaire à partir du jeu de données construit. Notons toutefois que la littérature fournit de nombreuses indications sur le sujet. La variabilité intraparcélaire est de niveau très différent (CV) dans ce type de sols en fonction de la variable étudiée : faible ( $CV < 10\%$ ) pour les  $pH_{H_2O}$  et  $pH_{KCl}$  (Brossard, 1986; Arrouays *et al.*, 1997), modérée ( $10\% \leq CV \leq 40\%$ ) pour la teneur en matières organiques de la majorité des parcelles (Brossard, 1986; Arrouays *et al.*, 1997) et forte ( $CV > 40\%$ ) pour  $P_{ass}$ ,  $K_{ech}$ , la quantité de litière, C/N, la composition des solutions de sol et, pour quelques cas, la teneur en matières organiques (Brossard, 1986; Arrouays *et al.*, 1997; Jolivet, 2000; Gérard, 2002). D'une manière plus générale, la variabilité intraparcélaire est souvent reliée à la microtopographie (Arrouays *et al.*, 2002) et, pour certaines variables, à la sylviculture (de Lavergne, 1988; Arrouays *et al.*, 2002).

En ce qui concerne la variabilité interparcélaire, la présente

étude a montré qu'elle pouvait être très élevée pour certaines variables. Cela a été surtout le cas des stocks d'éléments de la couche holorganique des sols avec des écarts extrêmes pouvant atteindre un facteur 10, mais aussi des concentrations des sols en éléments. Cette variabilité peut avoir plusieurs origines comme la sylviculture et les perturbations qu'elle induit (Payet, 2004), les pratiques de fertilisation, l'occupation ancienne des sols (Gelpe, 1992; Koerner *et al.*, 1997; Sargos, 1997) ou la typologie des stations.

Sur ce dernier point, la présente étude n'aboutit pas à des résultats aussi tranchés que ceux de la littérature : quasiment aucune différence n'a été mise en évidence entre les PODZOSOLS de landes humides et mésophiles (LH  $\approx$  LM). En conséquence, il est possible de s'interroger sur le caractère indicateur réel de *Pteridium aquilinum*. En effet, il est établi que les amplitudes écologiques des deux espèces emblématiques de LH (*Molinia caerulea*) et LM (*Pteridium aquilinum*) vis-à-vis de l'hydromorphie du sol se recourent (Barry *et al.*, 1952; Severac, 1952). Dans ces conditions, il est possible qu'un nombre important de stations puisse être potentiellement classé dans ces deux types et que ce sont des processus d'ordre phytoécologique qui favorisent une espèce par rapport à une autre (comme des perturbations culturales pour *Pteridium aquilinum*; Barry *et al.*, 1952). En ce qui concerne la lande sèche (LS), divers auteurs (Juste, 1965; Fustec-Mathon *et al.*, 1975; Righi, 1977; Righi et Wilbert, 1984) lui attribuent des conditions pédobiologiques plus défavorables à la végétation (C/N et teneur en acides fulviques élevés; teneurs en nutriments et minéralisation faibles) que les autres stations. Cette différence de comportement serait due au sous-bois d'éricacées de la LS dont la relative faible biomasse (Bergeret, 1980; Poser, 1983; Werno, 1984) et la composition chimique défavorable aux processus microbiologiques (Fustec-Mathon *et al.*, 1975; Bertru et Goma, 1985) conduiraient aux caractéristiques mentionnées précédemment. Si nous avons bien mis en évidence des stocks en nutriments plus faibles en LS qu'en LM et LH, ce n'est pas le cas pour le C/N (à l'exception d'une légère différence dans l'horizon A). Pour expliquer cette divergence, il est possible d'avancer l'hypothèse que les études antérieures (par définition plus ponctuelles que la présente méta-analyse) se soient focalisées sur des parcelles dont la typologie était très marquée. A l'inverse, notre étude, qui englobe dans la classe de LS des parcelles dont la typologie est moins caractéristique des stéréotypes définis par la typologie, aboutit à des différences entre les stations relativement floues.

## Prolongements de la présente étude

Comme nous l'avons vu précédemment, pour que l'approche testée ici puisse être complètement validée, il convient de mettre à l'épreuve les résultats obtenus, notamment les fonctions de pédo-transfert et le rôle central de la teneur en carbone, par une confrontation avec un jeu de données indépendant. Une étude complémentaire est donc nécessaire et se basera sur une campagne de collecte d'échantillons. A partir d'un échantillonnage couvrant

de façon plus régulière l'ensemble du massif, il serait peut-être également possible de mettre en évidence des gradients régionaux, par exemple à l'aide d'outils géostatistiques.

## CONCLUSION

Le présent travail met en évidence la contribution potentiellement intéressante des données non publiées ou publiables. Toutefois, elle met également en lumière la nécessité de vérifier et d'homogénéiser les données selon les différentes méthodologies employées. Sans cette laborieuse phase préliminaire de travail sur la base de données, il existe un risque non négligeable de biaiser significativement les résultats en aval. Enfin, l'approche testée ici, c'est-à-dire l'étude des sols d'une région naturelle via la méta-analyse, ne peut constituer une fin en soit. Il s'agit plus d'une méthode permettant de fournir des ordres de grandeurs et des pistes pour de futures validations sur le terrain.

Dans le cas présent, la méta-analyse a permis de quantifier, en première approximation, les propriétés physico-chimiques des sols ainsi que le rôle central de la concentration en carbone sur ces dernières.

## BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1995 - Le référentiel pédologique - Principaux sols d'Europe. Deuxième édition (coordinateurs: Baize D. et Girard M.C.), AFES et INRA (Eds.).
- AFES, 1998 - Les landes de Gascogne, histoire, sols et impacts des pratiques. Rapport de tournée du XVI<sup>e</sup> congrès mondial de science du sol.
- Arrouays D., Vion I., Jolivet C., Guyon D., Couturier A., Wilbert J., 1997 - Variabilité intraparcelle de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne. E.G.S., 4, pp. 5-16.
- Arrouays D., Jolivet M., Richer de Forges A., Andreux F., Lévêque J., Chaussod R., Trichet P., Bert D., 2002 - Impact des pratiques agricoles et sylvicoles sur les variabilités spatiales et temporelles des constituants organiques du sol et de la biomasse microbienne. Rapport final GESSOL, 56 p.
- Badeau V., Dambrine E., Walter Ch., 1999 - Propriétés des sols forestiers français: résultats du premier inventaire systématique. Etude et Gestion des Sols, 6, pp. 165-180.
- Barry J.P., Bernaux P., Bouchet C., Kuhnholz-Lordat G., Renaud P., 1952 - Evolution de la végétation des Landes Gasconnes d'après les amplitudes biologiques de quelques espèces à pouvoir dynamique élevé. Ann. Agron., 5, pp. 713-754.
- Belkacem S., Nys C., Dupouey J.L., 1998 - Evaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers. Rapport interne INRA, 68 p.
- Bergeret H., 1980 - Evolution floristique et productivité de Landes à Molinie (*Molinia caerulea* M.) en forêt landaise. Thèse Univ. Bordeaux III, 154 p.
- Bertru G., Goma-Tchimbakala J., 1985 - Influence des composés hydrosolubles des litières sur l'activité d'une population de *Nitrobacter* cultivée en chémostat. Rev. Ecol. Biol. Sol, 22, pp. 433-440.
- Boniface R., Tromé S., 1988 - Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. II - Essais sur la fumure phosphatée. In: L. Gachon (Ed.) « Phosphore et potassium dans les relations sol-plante: conséquence sur la fertilisation », pp. 279-402, INRA, Paris.
- Bonneau M., Lévy G., Montpied P., 2003 - Evaluation de la pertinence des deux méthodes d'analyse du phosphore dans les sols forestiers. Rev. For. Fr., 55, pp. 57-64.
- Brethes A., Ulrich E., 1997 - Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. RENECOFOR, Office National des Forêts - Département des Recherches Techniques (Ed.), 573 p.
- Brossard, M., 1986 - Effets de la sylviculture moderne sur la répartition, le niveau et l'état du stock organique des sols de la pinède des landes de Gascogne. Thèse Univ. Poitiers, 128 p.
- Bouma J., van Lanen H.A.J., 1987 - Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. Int. Inst. For Aerospace Surv. And Earth Sci., Publ. N° 6, Enschede, The Netherlands.
- Casenave A., 1970 - Contribution à l'étude de l'aliôs. Thèse Univ. Bordeaux, 196 p.
- Chossat J.C., 1992 - Assainissement, drainage et irrigation en maïsiculture dans les landes de Gascogne. Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, 51-52, pp. 57-68.
- Ciesielski H., Sterckeman T., 1997 - Comparaison entre trois méthodes de détermination de la CEC et des cations échangeables des sols. Agronomie, 17, pp. 9-16.
- Comps B., Gelpe, J., Saint-Didier J., 1979 - Nouvelle typologie des Landes de la Gascogne: modèle d'étude sur la commune de Pissos (Landes). Bull. Ecol., 10, pp. 43-54.
- Courcoux P., 1982 - Approche du cycle biologique d'un écosystème à pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en lande humide. Rapport DEA Univ Bordeaux III, 41 p.
- de Lavergne G., 1988 - Optimisation d'un réseau de mesures du bilan hydrique du sol à l'aide de la théorie des variables régionalisées dans une parcelle de pins maritimes. Rapport ENSAR, 35 p.
- Dobremez J.F., Camaret S., Bourjot L., Erwin U., Brethes A., Coquillard P., Dume G., Dupouey J.L., Forgeard F., Gauberville C., Gueugnot J., Picard J.F., Savoie J.M., Schmitt A., Timbal J., Touffet J., Tremolieres M., 1997 - Inventaire et interprétation de la composition floristique de 101 peuplements du réseau (Campagne 1994/95). Office National des Forêts-DRD (Ed.), Paris, France, 513 p.
- Duchaufour P., Bonneau M., 1959 - Une nouvelle méthode de dosage du phosphore assimilable dans les sols forestiers. Bull. Assoc. Fr. Etude Sol, 4, pp. 193-198.
- Dulong J., Delarche A., 1990 - Impacts du défrichement sur l'environnement dans le massif forestier des Landes de Gascogne. Rapport GERE, Univ. Bordeaux I., 103 p.
- Dumon J.C., 1978 - Caractéristiques de quelques profils pédologiques de la Grande Lande. Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, 24, pp. 147-178.
- Dumon J.C., 1986 - Environnement pédologique du bassin d'Arcachon et des lacs landais: éléments majeurs, mineurs et traces des podzols des landes de Gascogne et du Médoc. Données préliminaires. Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, 39, pp. 117-134.
- Fustec-Mathon E., Righi D., Jambu P., 1975 - Influence des bitumes extraits de podzols humiques hydromorphes des Landes du Médoc sur la microflore tellurique. Rev. Ecol. Biol. Sol, 12, pp. 393-404.
- Gelpe J., 1992 - Le paysage et l'eau: les types de landes et leurs aptitudes agricoles et forestières. Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, 51-52, pp. 45-55.
- Gérard C., 2002 - Etude du transfert des éléments chimiques dans un sol landais après épandages de boues de stations d'épuration en forêt. Rapport DESS, Univ. Bordeaux 1, 53 p.
- Guillet B., Rouiller J., 1994 - La granulométrie. in « Pédologie - Tome 2, Constituants et propriétés du sol », Bonneau, M. et Souchier, B. Masson (Ed.), pp. 317-323.
- Illy G., 1964 - Résultats préliminaires d'une fertilisation en azote en dunes. Rev.

- For. Fr., 16, pp. 734-43.
- Jolivet C., 2000 - Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse Univ. Bourgogne.
- Jolivet C., Arrouays D., Leveque J., Andreux F., Chenu C., 2003 - Organic carbon dynamics in soil particle-size separates of sandy Spodosols when forest is cleared for maize cropping. *Eur. J. Soil Sci.*, 54, pp. 257-268.
- Juste C., 1965 - Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du sud-ouest atlantique: application à leur mise en valeur. Thèse Univ., Nancy I, 143 p.
- Juste C., Dutil P., 1965 - Importance relative du fer et de l'aluminium dans les sols sableux des Landes de Gascogne. *Sci. Sol*, 3, pp. 33-42.
- 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. *Journal of Ecology*, 85, pp. 351-358.
- Legigan P., 1979 - L'élaboration de la formation du sable des Landes, dépôt résiduel de l'environnement sédimentaire pliocène-pléistocène centre aquitain. Thèse Univ. Bordeaux I, 429 p.
- Mellert K.H., Prietzel J., Straussberger R., Rehfuss K.E., 2004 - Long-term nutritional trends of conifer stands in Europe: results from the RECOGNITION project. *Eur. J. For. Res.*, 123, pp. 305-319.
- Nys C., Didier S., Lévy G., Lefevre Y., Trichet P., 1995 - Effet à moyen terme de la fertilisation sur le fonctionnement de l'écosystème forestier. Rapport intermédiaire GIP-ECOFOR « Fonctionnement de l'écosystème forestier landais ».
- Payet K., 2004 - Variabilités édaphiques dans les Landes de Gascogne et recherche d'indicateurs de biodiversité. Rapport Master-1, Univ. Bordeaux-I, 18 p.
- Ponette Q., Ulrich E., Brethes A., Bonneau M., Lanier M., 1997 - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau. RENECOFOR, Office National des Forêts - Département des Recherches Techniques (Ed.), 427 p.
- Poser I., 1983. Essai d'évaluation de la biomasse de la lande sèche à *Calluna vulgaris* (L.) Hull et *Erica cinerea* L. Rapport DEA Univ. Bordeaux III, 93 p.
- Righi D., 1977 - Genèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. Thèse Univ. Poitiers, 144 p.
- Righi D., de Coninck F., 1977 - Mineralogic evolution in hydromorphic sandy soils and podzols in Landes du Medoc, France. *Geoderma*, 19, pp. 339-359.
- Righi D., Wilbert J., 1984 - Les sols sableux podzolisés des Landes de Gascogne (France): Répartition et caractères principaux. *Sci. Sol*, 4, pp. 253-264.
- Rouiller J., Souchier B., Bruckert S., Feller C., Toutain F., Védry J.C., 1994 - Méthodes d'analyses des sols. in « Pédologie - Tome 2, Constituants et propriétés du sol », Bonneau, M. et Souchier, B. Masson (Ed.), pp. 619-652.
- Sargos J., 1997 - Histoire de la forêt landaise. L'horizon Chimérique (Ed.), Bordeaux, France, 559 p.
- SAS Institute Inc., 1999 - SAS/STAT user's guide, Version 8.01. North Carolina, USA: SAS Institute.
- Saur E., 1989 - Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-éléments à trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de *Pinus pinaster*. *Agronomie*, 9, pp. 931-940.
- Semlali R., 2000 - Localisation, dynamique et estimation de flux d'éléments traces métalliques dans les sols. Thèse ENGREF, 112 p.
- Severac G., 1952 - Observations sur l'écologie et le phytodynamisme des plantes de la lande, de la forêt et des prairies dans les Landes de Gascogne. Rapport ENSSAA, 63 p (réédition Timbal J., 2002).
- Spiecker H., Mielikäinen K., Köhl M., Skovsgaard J., 1996 - Growth Trends in European Forests; Studies from 12 countries. European Forest Research Institute report 5: Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg, New York). 372 pages.
- Trichet P., Jolivet C., Arrouays D., Loustau D., Bert D., Ranger J., 1999 - Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime. *E.G.S.*, 6, pp. 197-214.
- Trolliet B., 1976 - La fertilisation du pin maritime adulte dans les Landes de Gascogne: données actuelles et recherches complémentaires. Rapport interne INRA.
- Werno J., 1984 - La lande mésophile à fougère aigne (*Pteridium aquilinum* L.). Thèse Univ. Bordeaux III, 147 p.
- Wilbert J., 1978 - Notice explicative de la carte pédologique de Lesparre. CNRA, Versailles, 215 p.
- Wonnacott T.H., Wonnacott R.J., 1991 - Statistique. *Economica* (Ed.), Paris, 4<sup>e</sup> édition, 919 p.