



HAL
open science

Étude des stocks en éléments nutritifs des sols de la forêt de Fougères (35) à différentes échelles d'espace

Arnaud A. Legout

► **To cite this version:**

Arnaud A. Legout. Étude des stocks en éléments nutritifs des sols de la forêt de Fougères (35) à différentes échelles d'espace. [Stage] Université Henri Poincaré (Nancy 1), Vandoeuvre-lès-Nancy, FRA. 2004, 29 p. hal-02831583

HAL Id: hal-02831583

<https://hal.inrae.fr/hal-02831583>

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AGROCAMPUS RENNES
UNIVERSITE HENRI POINCARÉ-NANCY I
INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE (ENSAIA)
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRONOMIE DE MONTPELLIER

LEGOUT Arnaud

Inscrit à l'Institut National Polytechnique de Lorraine

Étude des stocks en éléments nutritifs des sols de la forêt de Fougères (35) à différentes échelles d'espace



Juillet 2004

Maîtres de stage :

- ❑ C. Nys, Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers, INRA Nancy, 54280 Champenoux.
- ❑ C. Walter, UMR Sol, Agronomie et Spatialisation de Rennes, INRA-ENSAR, 65 Route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex.

Rapporteur :

- ❑ E. Dambrine, Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers, INRA Nancy.

Membres du jury :

- ❑ J. Berthelin, Université Henri Poincaré-Nancy I.
- ❑ L. M. Bresson, Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- ❑ J.L. Morel, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- ❑ B. Jaillard, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- ❑ C. Walter, Agrocampus Rennes.

REMERCIEMENTS

Je remercie Claude Nys et Christian Walter pour m'avoir encadré pendant ce stage, pour le temps qu'ils m'ont consacré et pour la relecture de ce rapport. Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes de l'UMR SAS et de l'unité BEF de l'INRA de Nancy qui ont contribué au bon déroulement de ce stage.

Introduction

Le sol est en position d'interface dans l'environnement, et joue un rôle de premier plan dans les grands cycles biogéochimiques. C'est un réacteur qui stocke ou libère des éléments, et de ce fait influe sur la qualité de l'air et de l'eau, mais également sur la fertilité minérale, source de nutriments. L'évolution à moyen et long termes de ces stocks est un indicateur à prendre en compte dans l'évaluation de la pérennité des écosystèmes (Arrouays et al., 1998). En milieu forestier, des quantifications de ces stocks sont réalisées depuis quelques années, en particulier pour le carbone, afin de répondre notamment à la demande du protocole de Kyoto (1997) (Dupouey et al., 2000, Brack & Richards, 2002).

Les stocks d'éléments nutritifs dans les sols forestiers français sont très variables, entre $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ et $1000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour K, Ca, Mg et P. Ils ont principalement été quantifiés à des échelles ponctuelles, en tant que compartiments des cycles biogéochimiques. Ranger & Bonneau (1984) rappellent que le cycle biogéochimique des éléments nutritifs en forêt est ouvert vers l'extérieur avec des entrées et des sorties, le maintien temporel des stocks en éléments nutritifs des sols passant par un équilibre (entrées = sorties) du système. Les entrées sont les apports atmosphériques et l'altération des minéraux, les sorties étant les exportations par récolte et perte par drainage (Ranger & Turpault, 1999). Les entrées en France sont d'environ $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour K, $6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Ca et moins de $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Mg et P. Les pertes sont d'environ $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour K et Ca, moins de $5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Mg et moins de $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour P (Bonneau, 1995 ; Turpault et al., 1999 ; Ranger et al., 2000). Marques et al. (1997) donnent des valeurs d'apports atmosphériques en France d'environ $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour K, $6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Ca, $1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Mg et P. Ceux par altération, très dépendant du substrat géologique sont d'environ $8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour K, moins de $1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Ca et Mg. Les pertes par drainage représentent environ $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour K et Ca, moins de $5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Mg et moins de $1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour P. Les sorties par récolte sont d'environ $5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour K et Ca, moins de $1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Mg et P (Bonneau, 1995 ; Turpault et al., 1999 ; Ranger et al., 2000).

Par rapport aux grandes cultures, le recyclage des éléments nutritifs est spécifique aux écosystèmes forestiers et permet normalement de maintenir les stocks du sol constants. Bonneau & Ranger (1999) mettent néanmoins en évidence la baisse de fertilité minérale de certains écosystèmes forestiers français, cette diminution compromettant leur pérennité. Ranger et al. (2000) observent en effet sur des hêtraies du Nord-Est de la France une désaturation significative du complexe d'échange en 20 ans, les stocks 0-40cm en cations nutritifs diminuant fortement. De nombreuses études ont montré que cette diminution de fertilité minérale des sols forestiers pouvait avoir des conséquences néfastes sur les peuplements forestiers (Ranger & Bonneau, 1984 ; 1986). L'amendement raisonné se révèle être une pratique efficace de restauration de ces écosystèmes dégradés, de plus en plus utilisée par les gestionnaires forestiers (Bonneau & Nys, 1997). Renaud et al. (2000) ont mis en évidence que l'amendement rétablissait la fertilité minérale de ces sols dégradés, ceci s'accompagnant d'un accroissement de la biodiversité végétale, ainsi que d'une amélioration de l'activité des organismes du sol et d'une décomposition plus rapide de la litière. Des normes de fertilité minérale des sols forestiers, basées sur des normes empiriques décrites par Bonneau (1995), reprises par Augusto (1999) et spécifiquement adaptées aux diverses

essences (REGESOL, 2002), peuvent permettre de réaliser un diagnostic de fertilité des sols à l'échelle d'un massif forestier.

Pour Nambiar (1996), la capacité des sols à produire est actuellement un point primordial d'une bonne gestion durable des forêts. Une bonne connaissance des stocks en éléments nutritifs des sols forestiers semble indispensable aujourd'hui, en prenant en compte 2 composantes de la variabilité spatiale de ces stocks : la variabilité au sein d'un solum et la variabilité latérale (Arrouays, 2003). Les principaux facteurs de variabilité spatiale des stocks dans les sols forestiers sont : le type de sol et la pédogenèse, la nature du substrat géologique (Turpault et *al.*, 1999), l'essence en présence (Augusto et *al.*, 1998 ; 2002), la forme d'humus (Bonneau, 1995) et le mode de gestion des peuplements (Olsson et *al.*, 1996).

La variabilité verticale est caractérisée par une distribution des stocks d'éléments nutritifs avec un maximum à la surface, dans les horizons organo-minéraux. Une estimation des stocks nutritifs ponctuels peut être obtenue par des modèles prédictifs de distributions des teneurs en éléments, à condition de connaître la densité apparente indispensable au calcul de stocks (Arrouays et *al.*, 2003). Plusieurs modèles de distribution verticale des teneurs en carbone dans les sols forestiers existent, la décroissance en profondeur du carbone permettant d'ajuster des modèles de type exponentiel (Arrouays & Pellisier, 1994 ; Bernoux et *al.*, 1998). Ces modèles fiables pour la majorité des types de sols fournissent cependant de mauvaises estimations pour les sols présentant des accumulations de carbone en profondeur (Arrouays et *al.*, 2003). Ces modèles sont difficilement transposables aux teneurs en éléments nutritifs, qui présentent des distributions verticales plus complexes, avec régulièrement des accumulations en profondeur. Shrivastava (1990) propose des estimations de teneurs en azote total et phosphore total par horizon pédologique, en utilisant des équations linéaires faisant intervenir la teneur en carbone et des propriétés granulométriques de ces horizons. Ces approches nécessitent des variables d'entrées localisées aux extrêmes de la gamme de profondeur à prédire. L'INRA de Nancy a développé le logiciel REGESOL (2002), qui permet de prédire les stocks du sol en éléments nutritifs sur la tranche 0-70cm en utilisant uniquement des paramètres de la couche de surface 0-15cm.

La variabilité latérale des teneurs ou stocks en éléments nutritifs, n'a fait l'objet que de rares travaux (Dahiya et *al.*, 1984 ; Zinke & Stagenberger, 2000 ; Zharova et *al.*, 2002) abordant uniquement l'échelle métrique ou celle régionale. Le faible nombre de travaux est principalement dû à la forte variabilité potentielle de ces teneurs ou stocks en milieu forestier (Bonneau, 1995) et explique l'inexistence de travaux cartographiques de stocks en éléments nutritifs à l'échelle d'un massif forestier. Pour obtenir des estimations fiables de propriétés du sol, il est possible de travailler à une échelle locale, puis d'interpoler les résultats à l'aire considérée (Arrouays, 1998) grâce à une fonction de transfert d'échelle. L'aire considérée pour l'interpolation peut être une forêt : ce travail a déjà été réalisé pour le carbone, Recena (2003) proposant une méthode d'estimation des stocks de carbone dans les sols adaptée à l'échelle d'un massif forestier. Des mesures ponctuelles sont réalisées puis extrapolées au massif en utilisant des analyses statistiques et des cartes existantes. A partir de mesures ponctuelles, Arrouays (1998) rappelle qu'il est aussi possible d'utiliser des outils de géostatistique, notamment le krigeage ordinaire pour spatialiser les stocks d'éléments dans les sols.

Ce travail s'inscrit dans le cadre général de l'analyse de la variabilité spatiale des stocks en éléments nutritifs en milieu forestier. Ses objectifs spécifiques sont de trois ordres :

- a) Estimer et analyser la variabilité des stocks ponctuels d'éléments nutritifs des sols d'une forêt à partir de données mesurées ;
- b) Tester des modèles de prédiction des stocks en éléments nutritifs des sols forestiers à partir des seules mesures des stocks de surface ;
- c) Spatialiser ces stocks sur l'ensemble d'un massif forestier par stratification selon l'âge et le type de peuplement et par interpolation géostatistique.

Matériels et méthodes

Présentation du site d'étude

La forêt domaniale de Fougères (35) est localisée au Nord-Est de la Bretagne (France). Ce massif forestier, d'une superficie de 1660 ha, bénéficie d'un climat océanique tempéré, caractérisé par une amplitude thermique de 12,9°C et par une moyenne annuelle des précipitations de 868 mm (Lebret, 2002).

La forêt repose essentiellement sur un substrat granitique du type de Vire, seule la partie sud du massif (50 hectares) étant sur des schistes briovériens. Quelques filons de quartz sont également à dénombrer (Toutain, 1965). De la profondeur vers la surface, on trouve environ 30 mètres de granit sur les parties hautes du paysage, et moins de 10 mètres en fond de vallon. L'arène ne dépasse pas 3,5 à 5 mètres d'épaisseur sur le granite à structure conservée (Van Vliet-Lanoë et al., 1995). Un loess décarbonaté recouvre l'essentiel de la surface occupée par la forêt. Son épaisseur varie de 1 à 2 mètres au sud et à l'est du massif à quelques dizaines de centimètres à l'ouest, où les affleurements granitiques sont nombreux. La texture de ce matériau éolien est de type limono-argileuse avec une moyenne de 12 à 15% d'argile et 75% de limons (Recena, 2003).

Toutain (1965) souligne le caractère homogène des sols de cette forêt, principalement des Alocrisols et Néoluvisols à caractères fragiques en profondeur (traits cryogéniques), parfois dégradés et glossiques, développés sur limon et arène granitique (Turpault et al., 2002). Pellerin et al. (1993) ont mis en évidence dans la région de Fougères, une discordance géométrique entre le relief actuel et les altérations dont le front est recoupé par les versants actuels : la nappe d'eau évoluant dans la masse arénisée émerge alors dans les versants par résurgence. Curmi et al. (1993), s'appuyant sur ce travail, proposent une organisation locale des sols en deux systèmes : i) un système de versant généralement bien drainé, mais où les résurgences de nappe peuvent transformer les horizons limoneux par hydromorphie et dégradation ; ii) un système colluvio-alluvial localisé en aval du premier système et nourri par l'érosion de celui-ci, caractérisé par des solums marqués par l'hydromorphie dès la surface. Ces sols d'apport sont constitués d'une alternance de niveaux minéraux, organiques ou encore organo-minéraux (Chaplot, 1998) et présentent une variabilité spatiale importante (Stolt et al., 2001). Aucun travail de cartographie précise de ces sols n'a été réalisé en forêt de Fougères, exceptée la carte pédologique au 1/15000 de Toutain (1965).

Les formes d'humus rencontrées, décrites sur l'ensemble du massif par Toutain (1965) et plus précisément par Jabiol (2000) sur une chronoséquence, dépendent essentiellement de l'âge des peuplements. On trouve un mull modérément actif dans les jeunes peuplements au stade fourré, un dysmull ou très localement un héli-moder dans le gaulis et un moder avec des horizons OI à Oh continus dans les jeunes et vieilles futaies. Ce type d'évolution des formes d'humus a également été observé par Forgeard

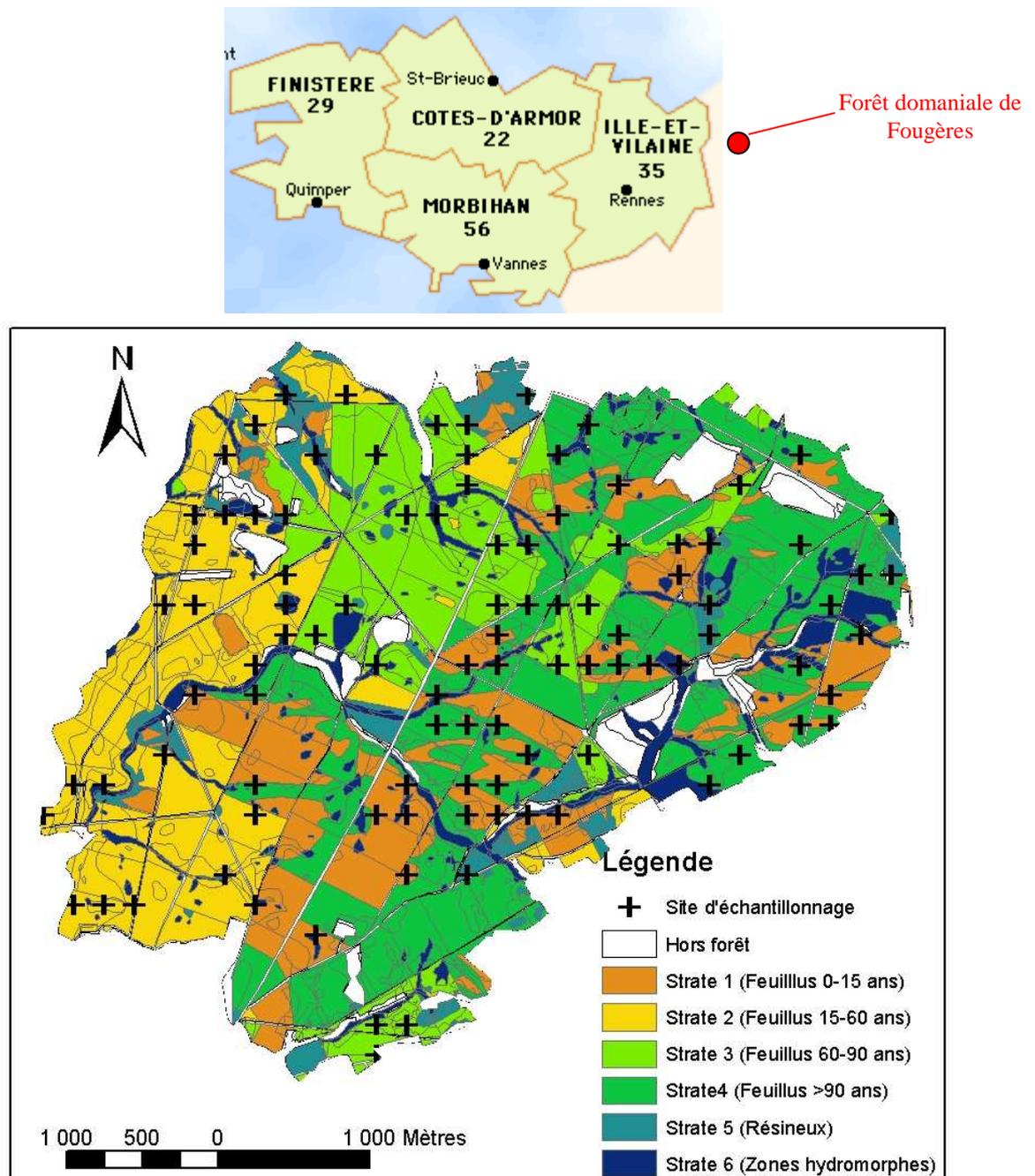


Figure 1 : Carte de localisation de la forêt de Fougères, des 6 strates et des 100 sites d'échantillonnage.

et al. (1992), en forêt de Villecartier (France, 35). Sous résineux, la dynamique d'évolution de l'humus est plus marquée pour les peuplements adultes, des mors étant présents sous les peuplements âgés. Sous l'influence de ces litières acidifiantes, des phénomènes de micro-podzolisation de surface ont été observés dans les sols de la forêt de Fougères (Jabiol, 2000).

Les peuplements sont dominés à 75% par le hêtre (*Fagus Sylvatica*), le chêne pédonculé (*Quercus robur*) occupant quant à lui environ 15% de la forêt. Les résineux, principalement le pin, le sapin pectiné et l'épicéa commun occupaient avant la tempête de 1999 8% de la forêt, formant ça et là de petits bouquets. La forêt est gérée par l'ONF en futaie régulière et se divise en peuplements équiennes (Lecointe, 2003).

Le plan d'échantillonnage

En 2003, une estimation des stocks de carbone dans les sols, les humus et la biomasse végétale a été réalisée en forêt de Fougères (Lecointe, 2003 ; Recena, 2003). Le plan d'échantillonnage (figure 1) mis en place était basé sur les informations cartographiques disponibles (carte des peuplements de l'ONF, 2002 ; carte des sols 1/15000, Toutain, 1965). Trois facteurs, classés ici par ordre d'importance, ont été retenus pour analyser les variations des stocks de carbone : l'âge des peuplements, leur nature (feuillus ou résineux) et l'hydromorphie des sols. 6 classes d'échantillonnage indépendantes, s'appuyant sur les cartes existantes, ont de ce fait été créées :

- 4 classes de feuillus d'âges différents, les classes d'âge étant celles utilisées par l'ONF (classe 1 : 0-15 ans ; classe 2 : 15-60 ans ; classe 3 : 60-90 ans ; classe 4 : 90 à 120 ans) ;
- 1 classe de résineux, tous âges confondus (classe 5) ;
- 1 classe pour les zones hydromorphes (classe 6).

100 sites au total ont été échantillonnés sur l'ensemble de la forêt, le nombre de sites par classe étant proportionnel à la superficie occupée par cette classe au sein du massif. Ainsi, 20 sites ont été retenus pour chaque classe d'âge de feuillus, 10 sites pour la classe des résineux et 10 sites pour la classe des zones hydromorphes. Pour chaque classe, les sites ont été tirés au hasard sur une grille à maille carrée de 200 m de côté et localisés sur le terrain par GPS avec une erreur de 1 à 25 m selon la densité du couvert végétal. Pour chaque site, des descriptions et prélèvements de sols et d'humus ont été réalisés.

La caractérisation des sols (0-90cm) a été réalisée pour chaque site à l'aide de sondage tarière (Recena, 2003) : sur les 100 sites d'études, 60 Alocrisols, 29 Néoluvisols et 11 Colluviosols-Fluviosols ont été identifiés (Référentiel pédologique, 1995). Les sols de Fougères ont été qualifiés de Néoluvisols pour un indice de différenciation textural (IDT, Baize, 1988) supérieur à 1,2, cet IDT ayant été évalué à partir des analyses granulométriques détaillées ci dessous. Des échantillons de sols ont été prélevés pour 7 niveaux (0-5cm, 5-15cm, 15-30cm, 30-45cm, 45-60cm et 60-75cm) ; pour les 2 niveaux de surface, 4 autres échantillons ont été prélevés dans un cercle de 5m de rayon autour du site afin de réaliser un échantillon composite. Les échantillons de sols ont été séchés à l'air libre quelques jours puis à 35°C pendant 24 heures. Ils ont ensuite été tamisés à 2mm pour analyses. Les teneurs en carbone et azote des sols et des humus ont été obtenues, après broyage fin des échantillons, grâce à un analyseur CHN par pyrolyse (Recena, 2003). Des analyses granulométriques 5 fractions (norme NF X 31-107) ont été réalisées sur les échantillons de sols, pour les niveaux 5-15cm, 30-45cm et 60-70cm. Les teneurs en cations échangeables ont été déterminées pour chaque niveau, par la méthode d'échange au chlorure de cobaltihexamine 0,05 M : K⁺,

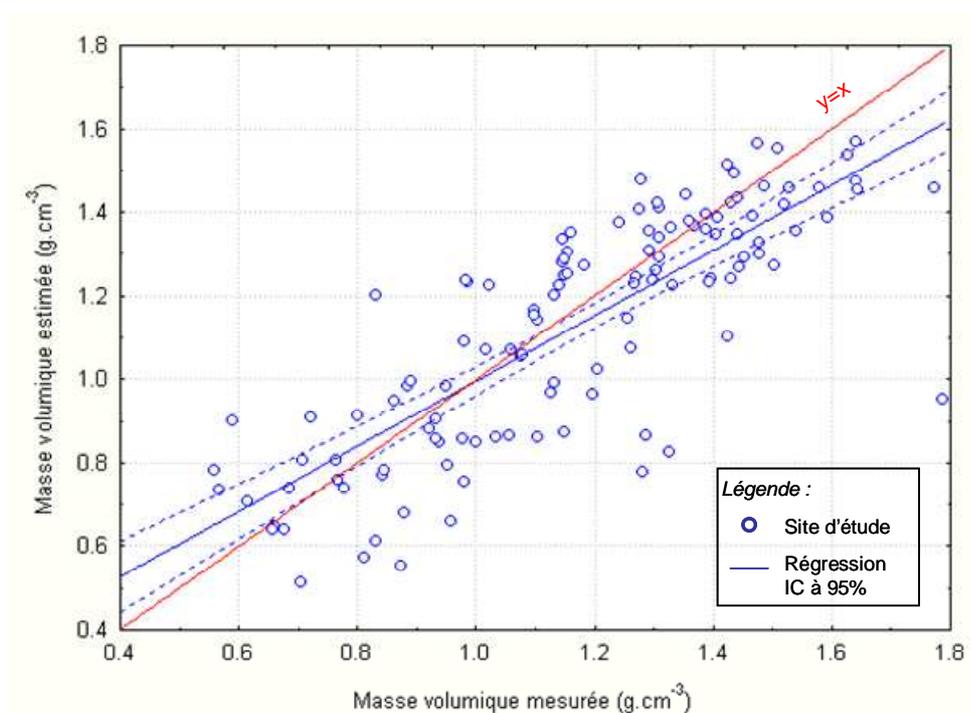


Figure 2 : Relation existante entre masses volumiques mesurées et estimées par le modèle de Belkacem *et al.* (1998) sur 102 prélèvements en forêt de Fougères.

Niveaux	Paramètre (g.cm ⁻³)	Tous types de sols (18 sites)	Sols non hydromorphes (14 sites)
Tous	Erreur* moyenne modèle	0,06	0,03
	RMEQ**	0,19	0,15
5-15 cm	Densité moyenne mesurée	0,96	
	Erreur* moyenne modèle	0,05	0,02
30-45 cm	RMEQ**	0,18	0,19
	Densité moyenne mesurée	1,29	
60-70 cm	Erreur* moyenne modèle	0,06	-0,01
	RMEQ**	0,13	0,12
	Densité moyenne mesurée	1,53	
	Erreur* moyenne modèle	0,09	0,09
	RMEQ**	0,23	0,11

* erreur = (masse volumique observée - masse volumique estimée)

** RMEQ = racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques

Tableau 1 : Statistiques de validation externe du modèle de Belkacem *et al.* (1998) sur le site de Fougères, pour toutes les mesures et par niveaux de profondeur.

Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ selon la norme NF X 31-130 et Mn⁺⁺, Fe⁺⁺, Al⁺⁺⁺ et H⁺ selon la méthode INRA. La CEC_{eff} et le taux de saturation du complexe d'échange ont ainsi pu être calculés. La teneur en phosphore assimilable a été mesurée pour chaque niveau par la méthode Duchaufour & Bonneau (1959). Le pH_{eau} a également été déterminé pour chaque niveau (norme NF ISO 10390).

Les formes d'humus ont été identifiées pour chaque site selon la clef de détermination des principales formes d'humus de plaine (Jabiol et al., 1995). 5 échantillons ont été prélevés sans distinction des horizons dans des quadrats de 0,1m² : 1 central et 4 répétitions dans un cercle de rayon 5 mètres autour du site. Les échantillons ont ensuite été séchés séparément à 65°C jusqu'à un poids constant puis les 5 échantillons d'un site ont été mélangés manuellement afin de produire un échantillon composite homogène pour les analyses. Les teneurs en éléments totaux C, N, K, Ca, Mg et P ont été déterminées selon des méthodes INRA (INRA-BEF, 2003).

Le calcul des stocks en chacun des sites

Les stocks ponctuels (kg) dans les sols ont été calculés pour les principaux éléments (C, N, K, Ca, Mg et P) et pour chaque niveau, en multipliant la teneur de l'élément (g.kg⁻¹) par la masse volumique (g.cm⁻³) et par l'épaisseur du niveau (cm) et par 100, pour évaluer un stock par ha (ha⁻¹). Le stock ponctuel d'un élément entre 2 profondeurs d'intérêt est la somme des stocks des niveaux concernés.

Les stocks ponctuels dans la litière (kg) ont été calculés pour les principaux éléments totaux (C, N, K, Ca, Mg et P) en multipliant la teneur en matière sèche (g.m⁻²) par la teneur de l'élément (g.kg⁻¹) et en divisant par 10 (pour ha⁻¹).

La masse volumique des horizons a été estimée en utilisant un modèle statistique (Belkacem et al., 1998), prédisant la masse volumique (g.cm⁻³) d'un sol forestier à partir de sa teneur en carbone (C en %), du taux de sable (S en %) et du taux d'éléments grossiers (E en %).

$$Mvol = \exp(0,7053 - 0,352 * \sqrt{C}) - 0,044 * S - 0,0449 * \ln(E)$$

Le principal facteur de variation de ce modèle est la teneur en carbone, les taux de sables et d'éléments grossiers étant dans le contexte de Fougères des facteurs secondaires de variation (Recena, 2003). Le modèle a été appliqué en chaque site pour chaque niveau en utilisant la teneur en carbone mesurée, le taux de sable mesuré lorsqu'il était disponible (niveaux 5-15cm, 30-45cm, 60-70cm), une moyenne toute profondeur confondue égale à 25% ayant été attribuée lorsque l'information manquait. Toutain (1965) considérant à Fougères une pierrosité 0-70cm nulle, le taux d'éléments grossiers a été fixé à 0%.

Une validation externe de ce modèle a été réalisée en 2004 à Fougères. 18 sites ont été choisis parmi les 100 en fonction du type de sol : 14 Alocrisols et Néoluvisols sains et 4 sols hydromorphes. Sur chaque site, 3 prélèvements distants de moins d'1 mètre ont été réalisés, pour chaque niveau d'intérêt ; à l'aide de cylindres de diamètre 8 cm et de hauteur égale à l'épaisseur du niveau considéré. Au total, 102 mesures de masse volumique ont été réalisées. La masse volumique a été calculée pour chaque échantillon après séchage à 105°C jusqu'à poids constant. Les masses volumiques ont ensuite été moyennées par niveau pour chaque site. La figure 2 montre la relation existante entre les masses volumiques mesurées et estimées pour l'ensemble des niveaux, avec un R² de 0,66.

De façon générale, le modèle de Belkacem et al. (1998) sous-estime légèrement les masses volumiques mesurées sur les 18 sites de Fougères, l'erreur moyenne étant

de $0,06 \text{ g.cm}^{-3}$ (tableau 1). La prédiction par le modèle est moins bonne pour les sols hydromorphes que pour les sols sains, la RMEQ (racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques) passant de $0,19 \text{ g.cm}^{-3}$ à $0,15 \text{ g.cm}^{-3}$ lorsque les sols hydromorphes sont écartés du calcul. Les erreurs de prédiction sont plus importantes en surface et en profondeur que dans les niveaux intermédiaires. Dans le niveau profond 60-70cm, on retrouve une moins bonne prédiction de la masse volumique par le modèle pour les sols hydromorphes, l'écartement de ces sols du calcul permettant une diminution de moitié de la RMEQ, de $0,23 \text{ g.cm}^{-3}$ à $0,11 \text{ g.cm}^{-3}$. D'autres modèles d'estimation de la masse volumique (Bernoux et al., 1998) utilisant d'autres paramètres ont été testés sur ces profils hydromorphes, sans amélioration significative.

La prédiction des stocks totaux de la tranche 0-70cm

Les valeurs des paramètres 0-15cm utilisés (pH_{eau} , S/T, H^+ , C) sont les moyennes ponctuelles pondérées par l'épaisseur de chaque niveau ; la moyenne pondérée du pH_{eau} a été calculée après passage en concentration d'ions H_3O^+ .

Des modèles statistiques de prédiction des stocks ponctuels 0-70cm en éléments nutritifs à partir des stocks et de paramètres secondaires 0-15cm (pH_{eau} , S/T, H^+) ont été utilisés (REGESOL, 2002). Selon la convention dans l'industrie des fertilisants, les valeurs des stocks sont exprimées en oxyde de l'élément. Les conversions réalisées sont les suivantes :

$$\mathbf{K_2O^* = K^* \times 1,205} \quad \mathbf{CaO^* = Ca^* \times 1,40} \quad \mathbf{MgO^* = Mg^* \times 1,66} \quad \mathbf{P_2O_5^* = P^* \times 2,29}$$

* : Élément ou oxyde de l'élément en g.kg^{-1}

Il existe un modèle d'extrapolation spécifique par élément (K_2O , CaO , MgO et P_2O_5) et par type de sol (Alocrisols et Luvisols). Ces modèles ont été obtenus par régression multiple sur une base de données de sols forestiers provenant de la France entière et comprenant 280 Alocrisols et 186 Néoluvisols (Réseau Européen, RENECOFOR, INRA-BEF). Les stocks ponctuels 0-70cm ont été estimés à Fougères par l'intermédiaire de ces modèles. L'erreur moyenne (stock mesuré à Fougères - stock estimé) ainsi que la RMEQ ont été calculés pour chaque modèle.

Les modèles de REGESOL (2002) ont ensuite été adaptés aux Alocrisols et Néoluvisols de la forêt de Fougères, en ajustant les différents coefficients des modèles par régression multiple à partir de la base de données créée : des modèles spécifiques à Fougères ont ainsi été définis. La moyenne des erreurs (stock mesuré à Fougères - stock estimé) ainsi que la RMEQ ont été re-calculés pour chaque modèle spécifique « Fougères » en utilisant une méthode de validation croisée.

Des comparaisons de modèles ont été réalisées selon les tests statistiques de coïncidence de deux régressions. Cette méthode consiste à comparer la variabilité résiduelle d'un ajustement unique pour l'ensemble des points avec celle correspondant à 2 ajustements différents pour chaque type de sol (Alocrisols et Néoluvisols) (Legout, 2004). Le programme *Unistat 5.0* a été utilisé pour ces analyses statistiques.

Cartographie des stocks à l'échelle du massif forestier

Le plan d'échantillonnage ayant été fixé selon une stratégie aléatoire stratifiée, la cartographie des différents éléments s'appuie sur des critères statistiques établis par classe d'échantillonnage. Des analyses de variance ont été réalisées, après ajustement de la distribution de la variable étudiée à une loi normale (transformation de Box Cox), suivies de comparaisons de moyennes de chaque strate deux à deux, selon la méthode de Tukey et d'un classement de ces moyennes par groupes. Le seuil de significativité a

niveaux	Alocrisols (moyenne des 60 sites)			Néoluvisols (moyenne des 29 sites)			Colluviosols-Fluvisols (moyenne des 11 sites)		
	pH _{eau}	S/T * (%)	Al ⁺⁺⁺ ** (%)	pH _{eau}	S/T * (%)	Al ⁺⁺⁺ ** (%)	pH _{eau}	S/T * (%)	Al ⁺⁺⁺ ** (%)
0-5 cm	3,8	26,2	51,0	3,7	27,4	51,5	4,4	54,1	25,2
5-15 cm	4,0	10,5	79,2	4,0	10,8	79,5	4,5	51,4	32,7
30-45 cm	4,3	8,4	85,3	4,3	8,4	86,0	4,9	64,3	21,7
60-70 cm	4,4	12,6	83,6	4,4	9,9	87,6	5,1	78,1	13,7

* S/T : Taux de saturation

** Al⁺⁺⁺ : % d'aluminium échangeable sur le complexe d'échange

Tableau 2 : Moyennes par profondeur et par type de sol des pH_{eau}, taux de saturation et pourcentage d'aluminium sur le complexe d'échange, des 100 sites d'étude de la forêt de Fougères.

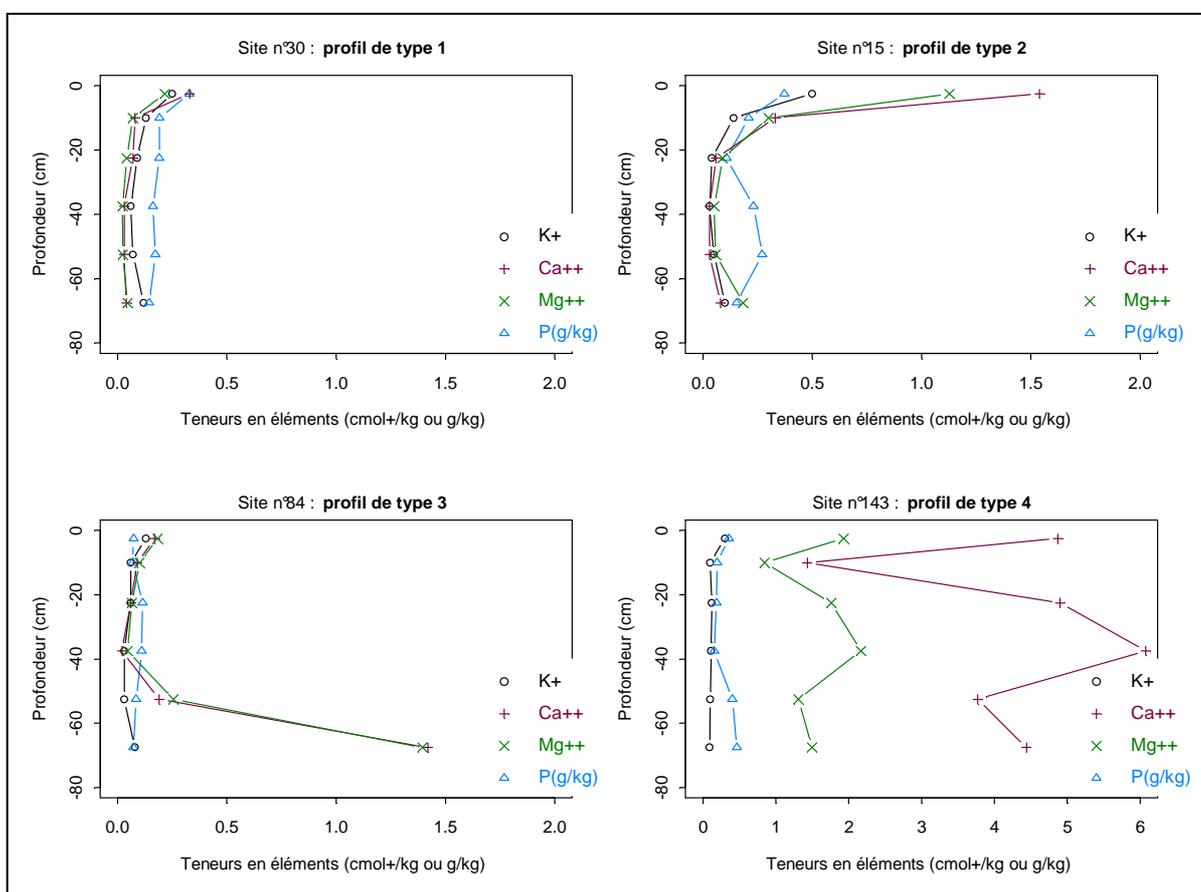


Figure 3 : 4 sites choisis parmi les 100 sites d'études, représentatifs des 4 grands types de profil des teneurs en éléments nutritifs des sols de la forêt de Fougères ; les teneurs dans les humus ne sont pas représentées.

été fixé à 5%. Les programmes *Statistica version 5* et *S-plus 6.1* ont été utilisés pour les analyses.

Pour chaque stock 0-70cm en élément nutritif, les strates significativement identiques ont été regroupées dans une même unité cartographique. La quantification des erreurs relatives à l'estimation des stocks a été réalisée en utilisant des procédures de simulation de Monte-Carlo (Burrough & McDonnell, 1998) avec le programme @Risk version 4.4 (Palisade Decision, 2003). L'estimation $S^*(x_o)$ en un point quelconque x_o du stock d'un élément s'écrit : $S^*(x_o) = \bar{\mu}_i(x_o) + \varepsilon(x)$ où $\bar{\mu}_i(x_o)$ est la moyenne de l'unité i à laquelle x_o appartient et $\varepsilon(x)$ est l'erreur relative.

A titre de comparaison, une démarche géostatistique fondée sur l'interpolation entre des mesures a également été testée. Les structures spatiales des stocks 0-70 cm de la forêt de Fougères ont été étudiées par variographie, à l'aide du logiciel Variowin 2.2 (Pannatier, 1996). Des estimations de stocks 0-70cm ont été réalisées par krigeage ordinaire. L'estimation $S^*(x_o)$ en un point x_o faite par le krigeage ordinaire s'écrit :

$S^*(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i s(x_i)$, où n est le nombre de voisins pris en compte dans l'estimation et λ_i le poids affecté au point mesuré x_i .

Résultats

Quelques propriétés des sols de la forêt de Fougères

Les Alocrisols et les Néoluvisols de la forêt de Fougères présentent de fortes similitudes pour les valeurs du pH_{eau} , du taux de saturation en base (S/T) et du pourcentage d'Al sur le complexe d'échange (tableau 2). Le pH_{eau} est très faible sur l'ensemble du profil, avec une augmentation depuis la surface vers la profondeur de 3,8 à 4,4. Les Néoluvisols et Alocrisols sont désaturés (S/T<25%) pour presque tous les niveaux, la désaturation étant plus forte dans les niveaux intermédiaires et en profondeur. Le milieu est fortement aluminique, l'aluminium occupant en surface environ 50% du complexe d'échange et en profondeur environ 85%. Les protons complètent ce complexe d'échange avec une occupation d'environ 15% en surface et 5% en profondeur. Les sols d'apport ont des pH supérieurs aux Alocrisols et Néoluvisols, avec néanmoins le même gradient de pH de la surface vers la profondeur de 4,4 à 5,1. Ces sols sont méso-saturés (50%<S/T<80%), avec une augmentation de la saturation du complexe d'échange de la surface vers la profondeur. Le pourcentage d'aluminium sur le complexe d'échange décroît avec la profondeur (25,2% en surface et 13,7% dans le niveau 60-70cm), les protons occupant les autres sites du complexe d'échange.

Les teneurs en éléments nutritifs en fonction de la profondeur

Les teneurs en éléments nutritifs des sols de la forêt de Fougères ont été classées en 4 grands types de profils (figure 3). **Le profil de type 1** présente une légère décroissance des teneurs en éléments échangeables de la surface vers la profondeur, les teneurs étant inférieures à $0,5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ quelle que soit la profondeur. La teneur en P, d'environ $0,2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, est constante sur l'ensemble du profil. Ce profil de type 1 concerne 44 sites, indifféremment Alocrisols ou Néoluvisols, avec ou sans traces d'hydromorphie faible en profondeur. **Dans le profil de type 2**, la décroissance exponentielle des teneurs en éléments échangeables de la surface vers la profondeur est plus marquée que pour le profil de type 1, notamment pour Ca et Mg : les teneurs

Elements Type de sols		K ₂ O			CaO			MgO			P ₂ O ₅		
		Alo.*	Luvi.*	Coll.*	Alo.*	Luvi.*	Coll.*	Alo.*	Luvi.*	Coll.*	Alo.*	Luvi.*	Coll.*
Stocks humus	Moyenne (kg.ha ⁻¹)	132	130	91	149	162	116	76	77	59	37	47	23
	CV** %	63	49	119	50	43	61	54	46	87	57	45	96
	% du stock sol 0-70cm	48	42	23	79	79	3	47	38	3	3	3	3
Stocks sol 0-15 cm	Moyenne (kg.ha ⁻¹)	112 ^a	114 ^a	105 ^a	117 ^a	132 ^a	878 ^b	76 ^a	77 ^a	265 ^b	183 ^a	201 ^a	199 ^a
	CV** %	13	18	45	34	37	94	24	29	81	22	38	63
	% du stock sol 0-70cm	41	37	27	62	64	19	47	38	11	13	13	25
Stocks sol 15-70 cm	Moyenne (kg.ha ⁻¹)	161 ^a	195 ^b	283 ^c	73 ^a	74 ^a	3667 ^b	85 ^a	126 ^b	2063 ^c	1239 ^a	1337 ^a	600 ^b
	CV** %	16	15	45	23	30	70	46	33	71	29	51	106
	% du stock sol 0-70cm	59	63	73	38	36	81	53	62	89	87	87	75
Stocks sol 0-70 cm	Moyenne (kg.ha ⁻¹)	273 ^a	308 ^a	387 ^b	190 ^a	206 ^a	4545 ^b	161 ^a	203 ^b	2328 ^c	1422 ^a	1538 ^a	800 ^b
	CV** %	11	13	39	26	28	71	28	24	65	27	50	92

* Alo. : Alocrisols ; * Luvi. : Neoluvisols ; * Coll. : Colluviosols-Fluviosols

**CV : Coefficient de variation

a b c : Une lettre différente par ligne et par élément indique une différence significative pour le test de Wilcoxon au seuil 0,05

Tableau 3 : Statistiques des stocks en éléments nutritifs dans les humus, dans les tranches 0-15 cm et 0-70 cm du sol, en fonction du type de sol, pour les 100 sites de la forêt de Fougères.

dans le niveau 0-5 cm pour ces 2 éléments sont supérieures à $0,5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. Le P présente des teneurs plus élevées ($>0,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) en surface et dans les niveaux intermédiaires. On dénombre 37 sites présentant ce type de profil : il s'agit des mêmes types de sol que pour le profil de type 1. **Dans le profil de type 3**, les teneurs pour K et P sont relativement constantes quelle que soit la profondeur, respectivement $<0,1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $<0,1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. En revanche, les teneurs en Ca et Mg sont constantes jusqu'à 45 cm ($<0,2 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) puis augmentent en profondeur, pour dépasser $0,5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ dans le niveau 0-70cm. On dénombre 8 sites présentant ce type de profil, des Néoluvisols ou Alocrisols, présentant ou non des traces d'hydromorphie intense en profondeur. **Dans le profil de type 4**, les teneurs en K et P sont relativement constantes sur l'ensemble des profils, avec respectivement des teneurs inférieures à $0,5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $0,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Les teneurs en Ca et Mg sont élevées (généralement $>1,5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour Mg et $>3 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour Ca) quelle que soit la profondeur, mais également très variables. On dénombre 11 sites présentant ce type de profil : il s'agit des Colluviosols-Fluviosols.

Les stocks mesurés des éléments nutritifs

De façon générale, les stocks 0-70cm des éléments nutritifs sont similaires pour les Alocrisols et les Néoluvisols de la forêt de Fougères (tableau 3) : seuls les stocks de MgO ($203 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) des Néoluvisols sont significativement supérieurs à ceux des Alocrisols ($161 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). Les sols d'apport se distinguent des Alocrisols et Néoluvisols : leurs stocks sont très nettement supérieurs pour CaO ($4545 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) et MgO ($2328 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), supérieurs pour K_2O ($387 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) et ceux en P_2O_5 ($800 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) sont inférieurs à ceux des autres sols.

La variabilité la plus faible des stocks 0-70cm est de façon générale observée pour les Alocrisols puis viennent les Néoluvisols et enfin les sols d'apport. Les stocks en K_2O apparaissent les moins variables (CV d'environ 12% pour les Alocrisols et Néoluvisols), la variabilité pour les stocks en CaO, MgO et P_2O_5 étant supérieure (CV d'environ 27% pour les Alocrisols et Néoluvisols). Les stocks des sols d'apport, hormis pour K_2O (CV=39%), ont une variabilité supérieure à 60%, la variabilité la plus forte étant observée pour CaO (CV=71%) et P_2O_5 (CV=92%).

Pour les Alocrisols et Néoluvisols, environ 40% du stock 0-70cm en K_2O et MgO se situe dans la tranche 0-15cm. Pour CaO, le pourcentage du stock 0-70cm dans la tranche 0-15cm est plus important (environ 60%), alors que pour P_2O_5 le stock est majoritairement dans la tranche 15-70cm (87% du stock 0-70cm). Pour les sols d'apports, quel que soit l'élément, plus de 70% du stock 0-70cm se situe dans la tranche 15-70cm.

Les stocks dans les humus, hormis pour le phosphore, représentent pour les Alocrisols et les Néoluvisols un pourcentage important des stocks 0-70cm du sol : de 38 à 48% pour K_2O et MgO et 79% pour le CaO. Pour les sols d'apport, les stocks des humus sont faibles en comparaison des stocks de la tranche 0-70cm : 23% pour K_2O et 3% pour CaO, MgO et P_2O_5 .

Les relations entre les stocks et les autres propriétés du sol

Les corrélations des rangs de Spearman entre les stocks 0-70cm sont significatives entre CaO et MgO (0,35) et entre MgO et P_2O_5 (-0,44) (tableau 4). Pour chaque élément nutritif, les stocks 0-70cm sont toujours corrélés positivement et de façon significative avec les stocks de la tranche 0-15cm : 0,65 pour K_2O , 0,93 pour CaO, 0,79 pour MgO et 0,75 pour P_2O_5 .

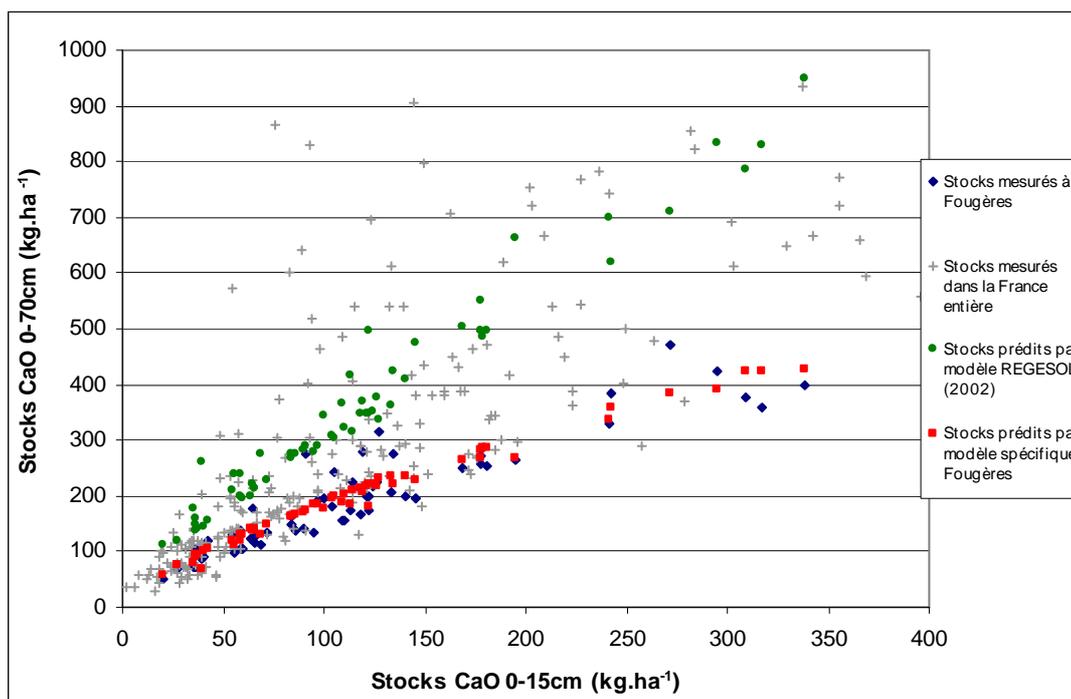


Figure 4 : Relation entre les stocks de CaO des tranches 0-15cm et 0-70cm pour des Alocrisols de diverses forêts françaises et de la forêt de Fougères ; comparaison entre stocks mesurés et prédits.

Types de sol		Modèles	
		France	Fougères
Alocrisols ^a	Modèle	$1,70 (CaO_{0-15cm} \wedge 1,01) - (0,35 \times pHeau_{0-15cm}) + (8,58 \times S/T_{0-15cm})$	$7,14 (CaO_{0-15cm} \wedge 0,73) + (3,93 \times pHeau_{0-15cm}) - (2,26 \times S/T_{0-15cm})$
	Coefficient de détermination	0,76	0,87
	Erreur* moyenne (kg.ha ⁻¹)	-165	-3
	RMEQ** (kg.ha ⁻¹)	201	34
Néoluvisols ^a	Modèle	$4,28 (CaO_{0-15cm} \wedge 1,09)$	$4,42 (CaO_{0-15cm} \wedge 0,80)$
	Coefficient de détermination	0,81	0,81
	Erreur* moyenne (kg.ha ⁻¹)	-692	2
	RMEQ** (kg.ha ⁻¹)	1136	35

* erreur = (stock 0-70cm mesuré - stock 0-70cm prédit)

** RMEQ = racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques

a : Modèles significativement non-différents (test de coïncidence de 2 régressions)

Tableau 5 : Statistiques des modèles de prédiction des stocks 0-70cm à partir de paramètres de surface pour CaO ; comparaison du modèle REGESOL (2002) et d'un modèle spécifique à la forêt de Fougères.

Types de sol	Paramètres des modèles	Eléments		
		K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅
Alocrisols	Coefficient de détermination	0,74	0,76	0,88
	Erreur* moyenne (kg.ha ⁻¹)	-4	5	25
	RMEQ** (kg.ha ⁻¹)	56	73	508
Néoluvisols	Coefficient de détermination	0,73	0,74	0,91
	Erreur* moyenne (kg.ha ⁻¹)	-1	-25	-97
	RMEQ** (kg.ha ⁻¹)	42	42	384

* erreur = (stock 0-70cm mesuré - stock 0-70cm prédit)

** RMEQ = racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques

Tableau 6 : Erreurs de prédiction des stocks 0-70 cm de K₂O, MgO et P₂O₅ pour les modèles établis spécifiquement pour la forêt de Fougères.

	Stocks K ₂ O 0-70 cm	Stocks CaO 0-70 cm	Stocks MgO 0-70 cm	Stocks P ₂ O ₅ 0-70 cm
Stocks K ₂ O 0-70 cm				
Stocks CaO 0-70 cm		0,35 *		
Stocks MgO 0-70 cm			-0,44 *	
Stocks P ₂ O ₅ 0-70 cm				
Stocks K ₂ O 0-15 cm	0,65 *	0,32 *		
Stocks CaO 0-15 cm		0,93 *	0,40 *	
Stocks MgO 0-15 cm		0,40 *	0,79 *	-0,36 *
Stocks P ₂ O ₅ 0-15 cm			-0,47 *	0,75 *
Stocks K ₂ O humus				-0,21 *
Stocks CaO humus				
Stocks MgO humus				
Stocks P ₂ O ₅ humus		-0,27 *		
H ⁺ (0-15 cm)			0,55 *	-0,46 *
C (0-15 cm)		0,36 *	0,70 *	-0,52 *
S/T (0-15 cm)		0,72 *	0,65 *	
pH _{eau} (0-15 cm)				-0,32 *

* : paramètres significativement corrélés, les cellules vides indiquent des corrélations non significatives entre paramètres

Tableau 4 : Corrélations des rangs de Spearman entre les stocks en éléments nutritifs des Alocrisols et Néoluvisols de la forêt de Fougères.

Quel que soit l'élément, les stocks 0-70cm ne sont pas corrélés significativement avec les stocks dans les humus.

Les stocks 0-70cm hormis le potassium sont significativement corrélés avec des caractéristiques analytiques de la tranche 0-15cm du sol, comme la teneur en H⁺, en C, le S/T ou le pH_{eau}. Pour CaO, la corrélation est positive et significative avec la teneur en C et le S/T de la tranche 0-15cm (respectivement 0,36 et 0,72). Pour MgO, la corrélation est positive et significative avec la teneur en H⁺, la teneur en C et le S/T de la tranche 0-15cm (respectivement 0,55 ; 0,70 et 0,65). Pour P₂O₅, la corrélation est négative et significative avec H⁺, la teneur en C et le pH_{eau} de la tranche 0-15cm (respectivement -0,46 ; -0,52 et -0,32).

La prédiction des stocks de la tranche 0-70cm à partir de la surface

Les stocks en éléments échangeables sont faibles en forêt de Fougères en comparaison des sols forestiers français. Par exemple, les stocks de CaO 0-70cm mesurés pour les Alocrisols de Fougères sont généralement inférieurs à ceux des Alocrisols de la France entière (figure 4).

Pour les Alocrisols, la prédiction des stocks 0-70cm à partir de la surface par le modèle REGESOL (2002) conduit à des erreurs importantes : pour CaO, l'erreur moyenne de prédiction est de -165 kg.ha⁻¹, le modèle sur-estimant fortement les stocks de CaO 0-70cm des Alocrisols de Fougères (tableau 5). Les erreurs d'estimation sont d'autant plus importantes que les stocks 0-15cm sont élevés (figure 4). Le modèle de prédiction spécifique aux Alocrisols de Fougères (R²=0,87) réalise des prédictions des stocks 0-70cm de CaO, avec une erreur moyenne de -3 kg.ha⁻¹ et une RMEQ de 34 kg.ha⁻¹ (tableau 5).

Pour les Néoluvisols, le modèle REGESOL (2002) surestime de façon très importante les stocks de CaO (erreur moyenne = -692 kg.ha⁻¹). Les prédictions du modèle spécifique aux Néoluvisols de Fougères sont fortement corrélées aux mesures (R²=0,81), avec une erreur moyenne de 2 kg.ha⁻¹ et une RMEQ de 35 kg.ha⁻¹ (tableau 5).

En ce qui concerne les autres éléments (tableau 6), les modèles spécifiques Fougères ont des coefficients de détermination élevés (R²>0,70 quel que soit l'élément) : pour K₂O et MgO, les erreurs moyennes (+ou- 10 kg.ha⁻¹ environ) sont faibles, tout

		Strate 1 : Feuillus 0-15 ans	Strate 2 : Feuillus 15-60 ans	Strate 3 : Feuillus 60-90 ans	strate 4 : Feuillus >90 ans	Strate 5 : Résineux	Strate 6 : Zones humides
Moyenne stocks K ₂ O humus (kg.ha ⁻¹)	0-70cm	129 ^a 291 ^a	131 ^a 294 ^a	124 ^a 274 ^a	149 ^a 274 ^a	86 ^b 279 ^a	121 ^a 328 ^b
Moyenne stocks CaO (kg.ha ⁻¹)	0-70cm	135 ^a 222 ^b	141 ^a 195 ^a	155 ^a 186 ^a	165 ^a 193 ^a	154 ^a 191 ^a	145 ^a 3749 ^c
Moyenne stocks MgO (kg.ha ⁻¹)	0-70cm	67 ^a 179 ^a	79 ^a 163 ^a	72 ^a 197 ^b	84 ^a 176 ^a	65 ^a 180 ^a	71 ^a 1356 ^c
Moyenne stocks P ₂ O ₅ (kg.ha ⁻¹)	0-70cm	31 ^a 1425 ^a	28 ^a 1375 ^a	44 ^a 1404 ^a	49 ^a 1393 ^a	41 ^a 1426 ^a	32 ^a 715 ^b

a,b,c : Pour une même ligne, une lettre différente indique une différence significative pour le test de Tukey au seuil 0,05

Tableau 7 : Comparaison des moyennes des stocks humus et 0-70cm en éléments nutritifs des différentes strates créées à Fougères, par le test de Tukey.

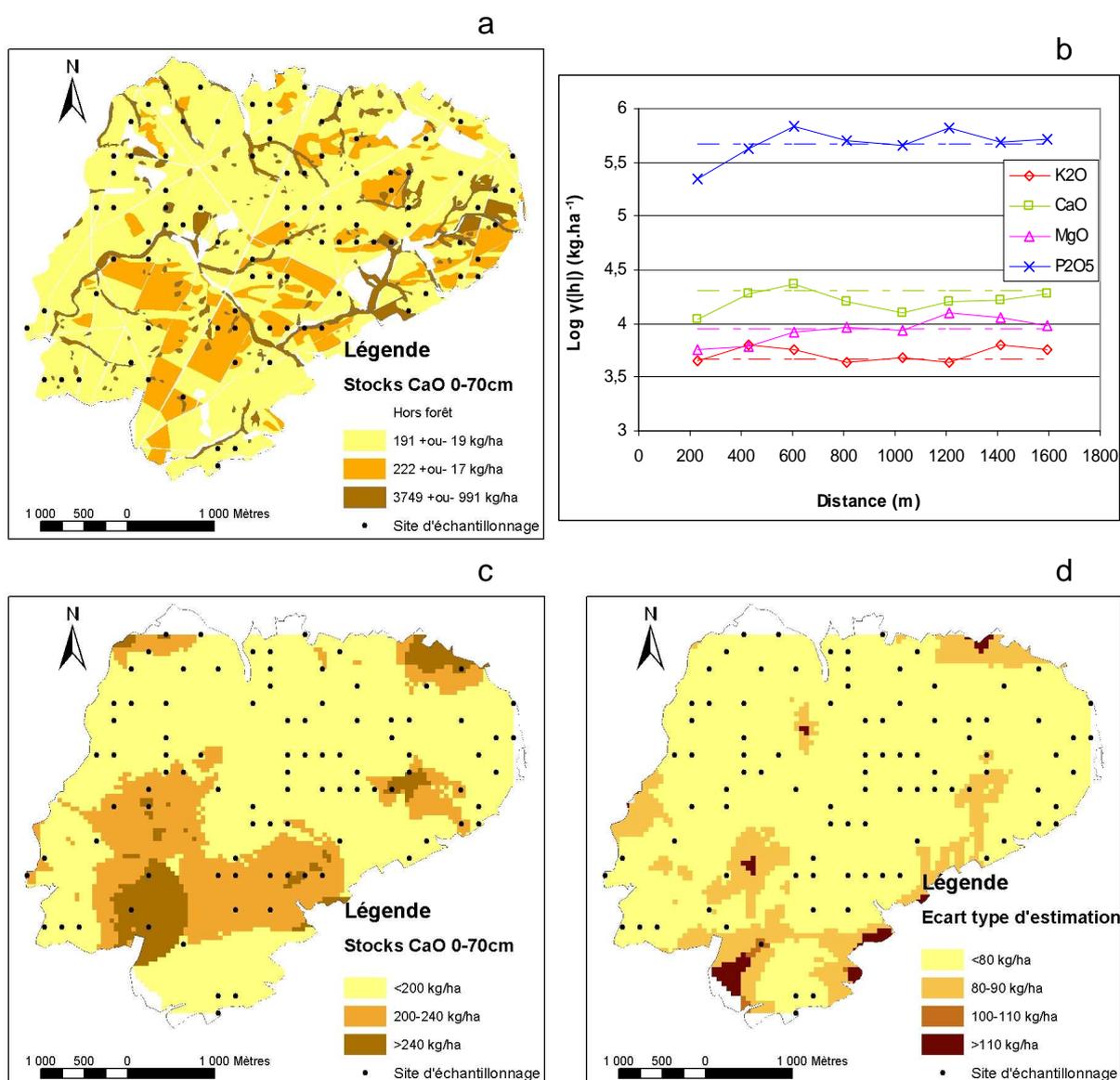


Figure 5 : Analyse spatiale des stocks 0-70cm en éléments nutritifs de la forêt de Fougères :

- a) Cartographie par stratification des stocks de CaO
- b) Variogrammes du logarithme des stocks des Alocrisols et Néoluvisols
- c) Cartographie par krigeage ordinaire des stocks de CaO, les stocks des Colluviosols-Fluvisols n'étant pas pris en compte
- d) Cartographie des écarts-types d'estimation du krigeage ordinaire des stocks de CaO

comme les RMEQ (environ $50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) ; pour P_2O_5 , les erreurs sont plus élevées que pour K_2O et MgO mais restent correctes en comparaison des stocks 0-70cm de P_2O_5 importants ($>1400 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Cartographie par stratification et interpolation géostatistique

Pour réaliser la cartographie des stocks 0-70cm à partir de stocks moyens par strate, nous avons tout d'abord testé s'il existait une différence significative entre les différentes strates. Les sols d'apport, qui sont classés principalement dans la strate n°6, sauf 3 sites, ont été écartés de cette analyse, leurs stocks 0-70cm étant significativement différents du reste de la population (tableau 3) et leurs stocks très élevés en CaO et MgO écrasant la variabilité existante dans les strates 1 à 5.

La comparaison des moyennes de strates montre que pour K_2O , il n'existe pas de différence significative pour les stocks 0-70cm entre les strates 1 à 5 (tableau 7). Les stocks 0-70cm en K_2O dans la strate 1 et 2 (respectivement $291 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $294 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) ont néanmoins tendance à être plus élevés que les autres strates. Pour CaO , les stocks 0-70cm sont significativement plus élevés dans la strate 1 ($222 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Pour MgO , les stocks 0-70cm sont significativement supérieurs pour la strate 3 ($197 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Pour les stocks 0-70cm en P_2O_5 , aucune différence significative n'existe entre les strates 1 à 5.

La comparaison des moyennes des stocks dans les humus montre qu'il n'existe pas de différences significatives entre les différentes strates pour CaO , MgO et P_2O_5 , mais pour K_2O , les stocks dans les humus sont significativement plus faibles sous résineux.

Les strates significativement non différentes ont été regroupées pour réaliser la cartographie, la moyenne ayant été utilisée pour cartographier. La cartographie par stratification est présentée pour CaO dans la figure 5 a. La strate 6, localisée en fond de vallon de part et d'autre des cours d'eau se distingue par les stocks 0-70cm très élevés ($3749 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) mis en évidence précédemment. Hormis pour la strate 6, où la variabilité est importante, les intervalles de confiance associés aux moyennes sont faibles (17 et $19 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Des simulations par une approche de Monte-Carlo (Burrough & McDonnell, 1998) ont permis de quantifier les incertitudes relatives à l'estimation locale des stocks. Les principales sources d'erreur d'estimation des stocks ont été identifiées : l'estimation de la densité apparente (écart type d'estimation de $0,06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) et les analyses (écart type de $0,03\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Les incertitudes sont présentées dans le tableau 8. Les incertitudes varient de 2 à 4 % du stock médian pour les strates 1 à 5, et sont de l'ordre 30% du stock médian pour la strate 6, hormis pour le potassium.

En ce qui concerne l'interpolation géostatistique, les variogrammes ont des effets pépites importants. Hormis pour K_2O , la portée des variogrammes est d'environ 400 mètres (figure 5 b), la semi-variance augmentant lorsque la distance entre points s'accroît. Au-delà de cette portée de 400 mètres, la semi variance dépasse la variance de la population et les stocks 0-70cm entre points peuvent alors être considérés comme non corrélés. Une structure spatiale à courte distance, peu marquée du fait d'un fort effet pépite, semble donc exister pour ces trois éléments.

Un exemple de cartographie par krigeage ordinaire est présenté dans la figure 5 c, les stocks 0-70cm des sols d'apport n'ayant pas été pris en compte pour CaO et MgO , leurs stocks étant d'un ordre de grandeur 10 fois supérieur aux stocks des Alocrisols et Néoluvisols. La comparaison des figures 5 a et 5 c met en évidence la non-prise en compte des stocks 0-70cm élevés dans les sols d'apport lors de la cartographie par krigeage ordinaire. Cependant, hormis ces zones, les estimations par krigeage ordinaire

	Strate 1 à 5	Strate 6
K ₂ O	8,47	52,48
CaO	7,89	1162,19
MgO	3,58	488,16
P ₂ O ₅	56,18	193,05

Tableau 8 : Estimation par une approche de Monte-Carlo de l'incertitude associée au calcul des stocks d'éléments nutritifs en un point; les incertitudes sont exprimées en valeur absolue (kg.ha⁻¹).

se rapprochent de la cartographie par stratification. Les écarts-types d'estimation (exemple du CaO figure 5 d) associés à l'estimation par krigeage des stocks 0-70cm de CaO sont généralement faibles ($<80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) sur l'ensemble du massif, l'écart type d'estimation augmentant lorsque la densité d'échantillonnage diminue.

Discussion

On retrouve pour les Alocrisols et Néoluvisols de la forêt de Fougères, les principales propriétés chimiques décrites pour ce massif par Turpault et *al.* (2002). Ces sols sont fortement aluminiques, désaturés, avec une augmentation du pH_{eau} de la surface vers la profondeur, caractéristique généralement observée dans les sols forestiers acides français (Ranger et *al.*, 2000).

La variabilité des teneurs en éléments et des stocks

Dans la littérature (Duchaufour, 1995), les Luvisols ont des teneurs en éléments échangeables plus élevées dans l'horizon d'accumulation B_T . Dans notre cas, les Alocrisols et Néoluvisols de la Forêt de Fougères ne se discriminent pas par leurs teneurs en éléments nutritifs. En effet, un faible nombre de Néoluvisols présente de fortes teneurs en Mg et Ca en profondeur (figure 3, profil de type 3), ces fortes teneurs s'observant également pour des Alocrisols peu profonds ou présentant des traces d'hydromorphie entre 45 et 70cm. Deux hypothèses peuvent être avancées concernant les Alocrisols avec traces d'hydromorphie : i) les teneurs en Ca et Mg étant élevées dans l'arène (Turpault et *al.*, 2002), les fluctuations de la nappe peuvent recharger le complexe d'échange mais le milieu fortement aluminique rend ce phénomène improbable ; ii) les Ca et Mg non prélevés par les peuplements peuvent également être lixiviés de la surface vers la profondeur (le nitrate étant l'anion vecteur dominant, Hossann, 1999) et une bande d'argile au sommet de l'arène (Curmi et *al.*, 1993), responsable de l'hydromorphie, empêche la lixiviation plus profonde. Bonneau (1994) rappelle que ce phénomène est observé pour Mg.

Bien que les stocks 0-70cm ont toujours tendance à être plus élevés dans les Néoluvisols que dans les Alocrisols, une différence significative entre ces types de sols s'observe uniquement pour Mg, cette différence s'expliquant par des stocks dans la tranche 15-70cm plus importants pour les Néoluvisols (horizon B_T). Le caractère peu lessivé des Néoluvisols de Fougères ($\text{IDT}_{\text{moyen}} = 1,35$), qui avait été souligné par Toutain (1965), se révèle encore ici et explique une distinction difficile avec les Alocrisols. Des observations géomorphologiques (Van Vliet-Lanoë et *al.*, 1995) montrent à Fougères des plaquages successifs de limons (Limon 1 et 2 mis en évidence par Turpault et *al.*, 2002) : la morphologie des Néoluvisols de Fougères pourrait ne pas être le seul résultat de la pédogénèse, mais s'expliquer par la superposition de matériaux.

Les stocks 0-70cm en éléments échangeables des Alocrisols et Néoluvisols de la forêt de Fougères sont faibles en comparaison des Alocrisols et Luvisols de la France entière (exemple du CaO, figure 4). Si l'on compare les stocks moyens 0-70cm en éléments échangeables des Alocrisols et Néoluvisols aux normes de fertilité de Bonneau (1995) et Augusto (1999), les stocks moyens en K_2O et CaO pour les Alocrisols et Néoluvisols sont situés en dessous de la norme « déficiente » (respectivement 290 et $415 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). En dessous de cette norme, les auteurs considèrent la pérennité de l'écosystème en danger. Ces faibles stocks en éléments échangeables s'expliquent principalement par le fait qu'à Fougères, les stocks du compartiment sol ne peuvent être réapprovisionnés par altération qu'en Mg (altération des chlorites, Turpault et *al.*, 2002). Les apports atmosphériques, de l'ordre de 3 à $8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (ORE « Hêtre de plaine »,

Fougères), fournissent le reste des entrées de ce compartiment sol, le recyclage interne étant le pilier principal de ce stock en éléments échangeables. Les stocks 0-70cm de P_2O_5 sont très importants dans les sols de Fougères, comme l'avaient mis en évidence Turpault et *al.* (2002). Le phosphore ne pouvant provenir de l'altération actuelle des minéraux (Turpault et *al.*, 2002), les stocks 0-70cm très importants de cet élément très peu mobile proviendraient donc principalement du recyclage interne par le cycle biogéochimique, ce qui pourrait expliquer la part très importante de ces stocks dans la tranche 15-70cm (Nys, 1975).

Les Colluviosols-Fluviosols se distinguent des autres types de sol de Fougères par leur caractère méso-saturé et la relative constance de leurs teneurs en éléments échangeables en fonction de la profondeur ; les stocks 0-70cm sont donc situés majoritairement dans la tranche 15-70cm (de 73 à 89%). Ceci peut s'expliquer par la superposition de niveaux organiques et minéraux (Chaplot, 1998), Recena (2003) ayant mis en évidence à Fougères des stocks de carbone 0-90cm dans les sols d'apport environ 2 fois supérieurs à ceux des autres types de sol, les teneurs étant élevées jusqu'à 60 cm de profondeur. Ceci confère à ces sols une forte capacité d'échange cationique sur l'ensemble du profil et explique les teneurs très élevées notamment en Ca et Mg (figure 3, profil de type 4). Les teneurs en K sont du même ordre de grandeur que les Alocrisols et Néoluvisols. Ceci peut s'expliquer par une rétention moindre de ce cation monovalent par rapport aux cations divalents sur le complexe d'échange principalement d'origine organique, ainsi que par sa mobilité plus faible (Ponette, 1994). Les stocks 0-70cm en éléments échangeables sont donc très élevés dans ces sols d'apport pour Ca et Mg notamment, les stocks 0-70cm en K_2O , CaO et MgO étant significativement supérieurs à ceux des Alocrisols et Néoluvisols. Pour P_2O_5 , les stocks sont significativement plus faibles dans les sols d'apport que dans les Alocrisols et Luvisols, Mitsch & Gooselink (1993) rappelant pourtant que la rétention du P est considérée comme un des principaux attributs des zones humides.

La variabilité des stocks 0-70cm en éléments nutritifs est faible pour les Alocrisols et Néoluvisols de la forêt de Fougères, avec un $CV < 15\%$ pour K_2O et un $CV < 30\%$ pour CaO, MgO et P_2O_5 . La faible variabilité existante au sein d'un type de sol et entre types de sol peut s'expliquer par le caractère homogène des sols de cette forêt (Toutain, 1965), la prédominance du hêtre ainsi que l'homogénéité du substrat géologique. L'historique de la forêt peut également être responsable de cette homogénéité (forêt ducale depuis le moyen âge), les pratiques ancestrales pouvant avoir encore de nos jours un impact sur les propriétés du sol (Dupouey et *al.*, 2002). Les stocks 0-70cm dans les sols d'apport sont beaucoup plus variables, avec un $CV > 65\%$ hormis pour K_2O . Cette forte variabilité peut être attribuée à la nature même des sols d'apport dont les propriétés sont très variables dans l'espace (Stolt et *al.*, 2001).

Les corrélations entre les stocks 0-70cm et les stocks dans les humus ont souvent été répertoriées comme inexistantes (Lebret, 2002), ce qui se vérifie à l'échelle du massif forestier de Fougères.

La prédiction des stocks 0-70cm

L'utilisation de modèles prédictifs des stocks 0-70cm à partir du stock de la tranche 0-15cm (entre autres), se justifie pour le site de Fougères, la corrélation entre ces 2 paramètres étant pour chaque élément positive et significative. La répartition des stocks dans les tranches 0-15cm et 0-70cm encourage également l'utilisation de ce type de modèle pour les éléments échangeables, les stocks 0-15cm représentant de 40 à 60% du stock 0-70cm, en fonction de l'élément considéré. Pour le phosphore assimilable, l'utilisation de ce type de modèle apparaît plus difficile, la part du stock 0-70cm dans la

tranche 0-15cm étant faible (<15%) ; la corrélation de 0,75 entre ces 2 tranches est néanmoins élevée. L'utilisation dans les modèles de prédiction d'autres paramètres de surface comme le taux de saturation ou la teneur en H^+ se justifie pour le site de Fougères ; ces paramètres et les stocks 0-70cm en éléments sont souvent corrélés significativement (tableau 4).

A Fougères, les stocks faibles en éléments échangeables entraînent cependant des surestimations importantes des stocks 0-70cm par les modèles de REGESOL (2002). Par exemple, l'erreur moyenne de prédiction des stocks 0-70cm en CaO des Alocrisols de Fougères est de $-165 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Ces modèles construits à l'échelle nationale, pour un objectif d'estimation agronomique, montrent ici leurs limites à l'échelle d'un massif forestier placé dans un contexte régional précis. L'utilisation de la même architecture de modèle avec réajustement des coefficients de chaque paramètre dans le contexte de Fougères s'est avérée positive : les erreurs de prédiction par ces modèles spécifiques à Fougères sont faibles (tableaux 5 et 6).

Pour adapter les modèles nationaux à une échelle régionale, un coefficient correctif pourrait être appliqué à chaque modèle, en fonction du contexte de l'étude. Pour Fougères par exemple, les Alocrisols se distinguent principalement des Alocrisols de France par un pH_{eau} significativement inférieur de 1 unité pH, ainsi qu'une teneur en Al échangeable plus élevée. Le granite étant un substrat géologique acide et le hêtre une essence acidifiante, des coefficients correctifs, basés sur le type de substrat géologique et le type d'essence dominante, pourraient être créés. Ces coefficients nécessiteraient cependant des validations sur plusieurs régions présentant des substrats géologiques variés et des essences aux propriétés acidifiantes contrastées. Cependant, la base de données des sols forestiers français n'est pas assez conséquente pour permettre ce type de calcul.

Les modèles spécifiques à Fougères peuvent néanmoins commettre ponctuellement des erreurs de prédictions importantes, la distribution verticale des éléments en fonction de la profondeur étant variable d'un site à l'autre et peu ou pas en relation avec le type de sol en présence. Les modèles de REGESOL (2002), qui posent l'hypothèse de répartitions verticales différentes des stocks dans les sols en fonction du type de sol, se trouvent donc mis en défaut à Fougères, cette différence de répartition étant difficilement observable entre les Alocrisols et les Néoluvisols. Par exemple, pour CaO, les modèles spécifiques aux Alocrisols et Néoluvisols de Fougères sont significativement similaires (tableau 5).

La cartographie

Rappelons qu'à Fougères, la stratification a été réalisée à l'origine pour évaluer les stocks de carbone dans l'écosystème : 4 classes d'âge de feuillus, une classe de résineux et une classe pour les zones hydromorphes ont ainsi été créées.

Dans la méthode de cartographie par stratification, les sols d'apport (strate 6 sauf 3 sites) se distinguent significativement du reste de la population. Pour les strates 1 à 5, la faible variabilité des stocks 0-70cm aux seins des Alocrisols et Néoluvisols permet difficilement de mettre en évidence des différences significatives entre strates ; une part de la faible variabilité existante est en effet associée au type de sol (Alocrisols et Néoluvisols). Pour K_2O et P_2O_5 , aucune différence significative entre strate n'existe, ceci pouvant être attribué pour K_2O à la très faible variabilité des stocks 0-70cm existante (tableau 3). Pour K_2O , les valeurs des stocks 0-70cm sont néanmoins plus élevées dans les strates 1 et 2, ceci pouvant s'expliquer par une minéralisation importante de cet élément dans la litière lors de l'ouverture du milieu (Lebret, 2002), le K passant en solution et réapprovisionnant ainsi le stock 0-70cm du sol des jeunes peuplements. Pour

CaO, les stocks 0-70cm sont significativement plus élevés dans les jeunes peuplements (strate 1), la même explication que pour K_2O pouvant être avancée (Lebret, 2002). Enfin, pour MgO, la strate 3 se distingue significativement des autres strates par un stock 0-70cm plus élevé. Ici, comme pour K_2O et CaO, l'hypothèse de la minéralisation des litières pourrait être avancée, le stock plus important dans cette strate correspondant à une minéralisation et transfert plus rapide que précédemment. Cependant, les stocks 0-70cm sont plus faibles dans la strate 4 (peuplements âgés) ; les prélèvements racinaires sont normalement plus faibles que dans les jeunes peuplements (Bonneau, 1995), mais Hossann (1999) met en évidence à Fougères des pertes par drainage en Mg plus importantes dans les vieux peuplements. L'hypothèse de la libération d'éléments minéraux de la litière lors de l'ouverture du milieu (éclaircie) pourrait également expliquer le nombre important de profils de type 2 (figure 3), aux teneurs en éléments échangeables élevées en surface. Ce nombre important de profils représenterait une part non négligeable de la variabilité des stocks 0-70cm en éléments et permettrait ainsi de déceler des différences significatives entre strates.

Pour les humus, aucune différence significative de stocks en éléments totaux n'existe entre strate (sauf pour K_2O), quel que soit l'élément. Ceci ne va pas dans le sens des travaux réalisés en forêt de Fougères sur une chronoséquence de hêtre (Jabiol, 2000 ; Lebret, 2002), où les stocks dans les humus sont supposés plus faibles dans les jeunes peuplements. Recena (2003) montre également des différences significatives de stocks en carbone entre les strates 1-2, 2-3-4 et 5-6. Cette tendance s'observe néanmoins (tableau 7) mais la forte variabilité des stocks dans les humus (tableau 3) ne permet pas a priori de discriminer les strates entre elles.

Pour les sols, la stratification utilisée révèle pour K_2O et P_2O_5 , qu'un nombre inférieur de classes (regroupement des classes 1 à 5) aurait permis de mettre en évidence la variabilité des stocks 0-70cm avec une précision du même ordre de grandeur. Pour CaO et MgO, la stratification utilisée a permis de mettre en évidence une variabilité des stocks 0-70cm (certes faible) liée à l'âge du peuplement. Pour tous les éléments nutritifs étudiés, la distinction entre les Colluviosols-Fluviosols et les autres types de sols apparaît nécessaire, cette distinction étant ici indirectement prise en compte pour la spatialisation par la classe de zones hydromorphes. Recena (2003) avait déjà mis en évidence des stocks en carbone très supérieurs dans cette strate. Cependant, le critère « zone hydromorphe » ne se révèle pas forcément pertinent : 3 sites identifiés sur le terrain comme des sols d'apport (avec des stocks très élevés) ne présentant pas de caractère hydromorphe marqué ne sont pas classés dans cette strate. Une strate regroupant les Colluviosols-Fluviosols de Fougères serait donc plus pertinente, mais la précision de la carte pédologique de Toutain (1965) ne le permet pas. La forte variabilité des stocks 0-70cm présente dans ce type de sol nécessiterait un découpage plus fin de cette strate, des critères comme le degré d'hydromorphie ou la position topographique n'étant cependant pas à Fougères responsables de la variabilité constatée. Le faible nombre de sites étudiés (11), qui ne représentent pas une population statistique suffisante, peut en être la cause ; un nouvel échantillonnage selon ces 2 critères pourrait donc être envisagé à Fougères. Les stocks plus élevés dans les Néoluvisols que dans les Alocriols (la différence étant uniquement significative pour Mg) laissent à penser qu'une classe d'échantillonnage pour chaque type de sol (même nombre d'individus) en s'appuyant sur la carte de Toutain (1965) aurait peut-être permis de mettre en évidence des différences significatives entre ces 2 types de sol.

En ce qui concerne l'interpolation géostatistique, la corrélation des stocks en éléments nutritifs nulle entre points distants de plus de 400 mètres confirme les

observations réalisées par Dahia et al. (1984) sur les teneurs en éléments nutritifs des sols de forêt. Les structures spatiales peu marquées s'expliquent principalement par les effets de pépites élevés qui peuvent être attribués à la forte variabilité spatiale des stocks présente à une distance inférieure au pas d'échantillonnage (200 mètres). Bonneau (1995) rappelle en effet la forte variabilité à l'échelle métrique des teneurs en éléments dans les sols forestiers. Les erreurs de mesures peuvent également participer à cet effet pépite mais de façon moindre.

Pour CaO et MgO, la très forte variabilité des stocks localisée dans des zones restreintes en superficie (sols d'apport) rend l'utilisation de la méthode d'interpolation par krigeage ordinaire peu efficace à Fougères. Si l'on intègre les 100 sites pour l'interpolation, des sur-estimations importantes des stocks sont en effet réalisées aux abords des sols d'apport (l'étendue cartographique des stocks élevés est importante). Le choix d'écarter les stocks des sols d'apport de l'estimation par krigeage ordinaire semble donc pertinent si l'on désire avoir une estimation des stocks en éléments nutritifs correcte à l'échelle du massif forestier. Pour K₂O et P₂O₅, la spatialisation par krigeage ordinaire en intégrant cette fois l'ensemble des sites se révèle moins mauvaise que pour CaO et MgO, les stocks entre les Alocrisols-Néoluvisols et Colluviosols-Fluviosols étant du même ordre de grandeur bien que significativement différents.

In fine, pour améliorer la cartographie par stratification des stocks en éléments nutritifs à Fougères, des classes d'échantillonnage par type de sol (Alocrisols, Néoluvisols et Colluviosols-Fluviosols) pourraient être envisagées, en créant au sein de chaque classe d'Alocrisols et de Néoluvisols deux sous classes d'âge, jeunes peuplements et vieux peuplements. Les modèles de prédiction des stocks 0-70cm à partir de la surface, spécifiques à Fougères, pourraient être utilisés pour augmenter le nombre de points échantillonnés ; un échantillonnage de surface (0-15cm) serait réalisé et les modèles de prédiction permettraient d'estimer les stocks 0-70cm.

En ce qui concerne l'utilisation d'un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié à maille de 200 mètres, on voit dans la figure 5 d qu'il serait possible pour l'utilisation de la géostatistique de réduire les écarts types d'estimations en rajoutant quelques points aux nœuds de la maille 200*200. Cependant, dans le contexte de faible variabilité des stocks des Alocrisols et Luvisols, et de forte variabilité des sols d'apport localisée très ponctuellement, un maillage systématique de 200 mètres de côté n'est pas très pertinent. Une augmentation de la densité d'échantillonnage (réduire la taille de la maille) permettrait d'améliorer les interpolations.

Les Colluviosols-Fluviosols de la forêt de Fougères se distinguent des autres types de sols par leurs stocks importants en éléments échangeables et sont souvent caractérisés par des solums marqués par l'hydromorphie dès la surface. A partir de ce constat, il semble possible de spatialiser les stocks en éléments nutritifs en s'appuyant sur un indice topographique d'estimation de l'hydromorphie. L'utilisation d'un indice topographique est en effet la méthode la plus employée pour spatialiser l'hydromorphie des sols à partir de couches d'informations géographiques. L'indice de Beven (Beven & Kirkby, 1979), dérivé d'un MNT maille de 50m pourrait par exemple être utilisé ; cet indice rend compte du potentiel de saturation des sols, la saturation étant considérée comme proportionnelle à la surface drainée et inversement proportionnelle à la pente locale. Une interpolation par co-krigeage, en s'appuyant sur cet indice, pourrait alors être utilisée pour spatialiser les stocks en éléments nutritifs de la forêt de Fougères.

Conclusion

Le premier objectif de ce travail était d'estimer les stocks ponctuels en éléments nutritifs des sols de la forêt de Fougères ainsi que leur variabilité. Le deuxième objectif était de tester des modèles de prédiction ponctuelle de ces stocks à partir des seules mesures de surface. Enfin, le dernier objectif était de spatialiser les stocks mesurés sur l'ensemble du massif forestier.

Nous avons mis en évidence à Fougères la faiblesse générale des stocks en éléments échangeables des Alocrisols et Néoluvisols de cette forêt, ainsi que leur faible variabilité à l'échelle du massif. Pour ces 2 types de sols, les stocks de P_2O_5 sont par contre élevés. Les Colluviosols-Fluviosols se différencient des Alocrisols et des Néoluvisols de Fougères par leurs stocks en éléments échangeables significativement plus élevés, alors qu'ils sont plus faibles pour P_2O_5 .

Une méthode de spatialisation par stratification, réalisée à l'origine pour évaluer les stocks de carbone dans l'écosystème (4 classes d'âge de feuillus, une classe de résineux et une classe pour les zones hydromorphes), s'est révélée relativement efficace à Fougères, les incertitudes d'estimation des stocks par strate étant faibles, sauf pour la strate des zones hydromorphes. Cette strate correspond principalement aux sols d'apport où une forte variabilité liée à la nature même de ces sols a été mise en évidence. En raison de la faible variabilité des stocks en éléments nutritifs des Alocrisols-Néoluvisols de Fougères, cette méthode devra être testée sur d'autres massifs forestiers, pour confirmer qu'une stratification basée principalement sur le type de sol est plus efficace que la stratification utilisée dans cette étude.

La méthode de spatialisation par krigeage ordinaire ne se révèle pas vraiment efficace à Fougères, avec le nombre actuel de points d'échantillonnage. La variabilité à une distance inférieure au pas d'échantillonnage (200 mètres) ainsi que les erreurs de mesures ne permettent pas de mettre en évidence des structures spatiales marquées. Cette méthode ne restitue pas correctement les stocks dans les sols d'apports, leurs stocks très différents des autres types de sol et localisés dans des zones très restreintes en superficie empêchant des estimations précises. Le co-krigeage, en s'appuyant sur un indice topographique d'estimation de l'hydromorphie pourrait permettre de pallier à ce problème ; les erreurs inhérentes à cet indice ne permettent cependant pas actuellement de spatialiser correctement les stocks en éléments nutritifs à Fougères.

En ce qui concerne la prédiction ponctuelle des stocks en éléments nutritifs par les seules mesures de surface, nous avons mis en évidence que les estimations par les modèles de REGESOL (2002) étaient accompagnées dans le contexte de Fougères d'erreurs de prédiction importantes. Ces modèles pourraient néanmoins être utilisés dans un objectif de correction de l'acidification par amendement, les erreurs de prédiction pouvant être considérées comme tolérables en raison des erreurs importantes liées à l'épandage des amendements (de 100 à 200 $kg \cdot ha^{-1}$). Cependant, si l'objectif est de réaliser des bilans de fonctionnement des écosystèmes forestiers, les erreurs de prédiction apparaissent trop importantes et les modèles de prédiction de REGESOL (2002) doivent être adaptés à une échelle locale. Nous avons mis en évidence que des modèles spécifiques à Fougères se comportaient bien, les erreurs de prédiction des stocks associées étant faibles, ce qui peut permettre un travail précis sur les stocks prédits. Les modèles spécifiques à Fougères pourraient être utilisés pour renforcer le plan d'échantillonnage actuel à moindre coût, en ne réalisant qu'un échantillonnage de surface (0-15cm) et en prédisant les stocks 0-70cm grâce aux modèles. Dans le futur, une amélioration des modèles régionaux pourrait être envisagée à l'échelle de la France entière, en enrichissant la base de données des sols forestiers français.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1995. "Référentiel pédologique". Paris. INRA. 332 pp.
- Arrouays, D. et Pellissier, P., 1994. "Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France." *Soil Science*, 157(3), 185-192.
- Arrouays, D., Bernoux, M. et Jolivet, C., 1998. "Spatialisation des stocks d'éléments dans les sols ; Outils actuels et potentialités : cas du carbone organique." *Cahiers Agricultures*, 7, 347-356.
- Arrouays, D., Feller, C., Jolivet, C., Saby, N., Andreux, F. et Bernoux, M., 2003. "Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps." *Etude et Gestion des Sols*, 10(4), 347-355.
- Augusto, L., Bonnaud, P. et Ranger, J., 1998. "Impact of tree species on forest soil acidification." *Forest Ecology and Management*, 105(1/3), 67-78.
- Augusto, L., 1999. "Etude de l'impact de quelques essences forestières sur le fonctionnement biogéochimique et la végétation des sols acides". *Thèse, Université Henry Poincaré. Nancy. 190 p.*
- Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D. et Rothe, A., 2002. "Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility." *Annals of Forest Science*, 59(3), 233-253.
- Baize, D., 1988. "Guide des analyses courantes en pédologie". Paris. INRA. 172 pp.
- Belkacem, S., Nys, C. et Dupouey, J.L., 1998. "Evaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers. Importance de la sylviculture et du milieu sur la variabilité." *INRA/DPE, Agriges*, 68 p.
- Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C.C. et Bourennane, H., 1998. "Modeling vertical distribution of carbon in oxisols of the Western Brazilian Amazon (Rondonia)." *Soil Science*, 163(12), 941-951.
- Beven, K.J. et Kirkby, M.J., 1979. "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol.Sci.Bull.*, 24, 43-69.
- Bonneau, M. et Souchier, B., 1994. "2. Constituants et propriétés du sol". Paris Milan Barcelone. Masson. 665 pp.
- Bonneau, M., 1995. "Fertilisation des forêts dans les pays tempérés." Nancy. ENGREF. 367 pp.
- Bonneau, M. et Nys, C., 1997. "Effet de la fertilisation et du drainage sur la croissance de jeunes chênes sur des sols lessivés à pseudogley de la région de Blois (Loir et Cher)." *Revue Forestière Française*, 49(3), 225-234.
- Bonneau, M. et Ranger, J., 1999. "Evolution de la fertilité chimique des sols forestiers. Recommandations pour une gestion durable." *La forêt privée*, 247, 51-64.
- Brack, C.L. et Richards, G.P., 2002. "Carbon accounting model for forests in Australia." *Environmental Pollution*, 116, 187-194.
- Burrough, P. et McDonnell, R., 1998. "Principles of Geographical Information Systems." Oxford University Press, Oxford.
- Chaplot, V., 1998. "Organisation spatiale des sols hydromorphes de fonds de vallée. Modélisation prédictive de leur distribution." *Thèse, Université ENSA. Rennes. 273 p.*
- Curmi, P., Bourrie, G., Merot, P., Widiatmaka et Maître, V., 1993. "Analyse structurale d'un versant granitique (massif de Quintin, Bretagne) ; Implications sur le fonctionnement hydrique et géochimique." *Bulletin de l'Association des Géographes Français(2)*, 88-89.
- Dahiya, I.S., Anlauf, R., Kersebaum, K.C. et Richter, J., 1984. "Spatial variability of some nutrient constituents of an Alfisol from loess. I Classical statistical analysis." *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 148, 268-277.
- Duchaufour, P. et Bonneau, M., 1959. "Une nouvelle méthode de dosage du phosphore assimilable dans les sols forestiers." *Bulletin de l'AFES*, 4, 193-198.
- Duchaufour, P., 1995. "Pédologie, 4ème édition". Paris. Masson. 324 pp.
- Dupouey, J.L., Pignard, G., Badeau, V., Thimonier, A., Dhote, J.F., Nepveu, G., Berges, L., Augusto, L., Belkacem, S. et Nys, C., 1999. "Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises." *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 85(6), 293-310.
- Dupouey, J.L., Dambrine, E., Laffite, J.D. et Moares, C., 2002. "Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity." *Ecology*, 83(11), 2978-2984.
- Forgeard, F., Clément, B., Gloaguen, J.C., Rozé, F. et Touffet, J., 1992. "Organic matter and nutrient dynamics in an atlantic beech forest (Brittany, France). In : A. Teler, P. Mathy and J.N.R. Jeffers, Responses of forest ecosystems to environmental changes. Elsevier Applied Science, London and New-York, pp 419-428."
- Hossann, C., 1999. "Vérification de la qualité du système et des solutions gravitaires dans la phase initiale. Chronoséquence du site Atelier de Fougères." *DEA*, 20 p.

- INRA-BEF, 2003. "Cahiers Protocoles Analytiques." INRA Nancy, unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers.
- Jabiol, B., Brethes, A., Ponge, J.F., Toutain, F. et Brun, J.J., 1995. "L'humus sous toutes ses formes". Nancy. ENGREF. 63 pp.
- Jabiol, B., 2000. "Evolution de la diversité et du fonctionnement des humus au cours d'une révolution forestière en futaie régulière de hêtres. Site-atelier de la forêt de Fougères." *Rapport de synthèse. Convention de recherche ECOFOR n°97.*, 43 p.
- Lebret, M., 2002. "Les humus forestiers en hêtraie de plaine : analyse des facteurs de l'évolution dans une chronoséquence". *Thèse, Université Rennes 1.* 350 p.
- Lecoite, S., 2003. "De la parcelle au massif forestier : estimation des stocks de carbone dans la biomasse végétale et dans les humus d'un massif forestier. Application à la forêt domaniale de Fougères." *Mémoire de fin d'études DAA ENSA*, 42 p.
- Legout, C., Leguédou, S. et Le Bissonnais, Y., 2004. "Aggregate breakdown dynamics analysis." *European Journal of Soil Science*, (in press).
- Marques, R., Ranger, J., Villette, S. et Garnier, A., 1997. "Nutrient dynamics in a chronoséquence of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands on the Beaulonais Mounts (France). 2. Quantitative approach." *Forest Ecology and Management*, 92(1/3), 167-197.
- Mitsch, W.J. et Gosselink, J.G., 1993. "Wetlands". New-York. Van Nostrand Reinhold. 722 pp.
- Nambiar, E.K.S., 1996. "Sustained productivity of forests is a continuing challenge to soil science." *Soil Science Society of America Journal*, 60(6), 1629-1642.
- Nys, C., 1975. "Contribution à l'étude de la migration du phosphore dans les sols acides sur granites de Millevaches." *Pédologie*, XXV(3), 171-178.
- Olsson, B.A., Bengtsson, J. et Lundkvist, H., 1996. "Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils." *Forest Ecology and Management*, 84(1/3), 135-147.
- Pannatier, Y., 1996. "VARIOWIN : Software for Spatial Data Analysis in 2D." *Springer Verlag*. 91 pp.
- Pellerin, J., Helluin, M. et Curmi, P., 1993. "Analyse structurale à différentes échelles d'un paysage granitique (massif de Fougères, Bretagne) Implications géomorphologiques et hydrologiques." *Bulletin de l'Association des Géographes Français*(2), 86-87.
- Ponette, Q., 1994. "Evolution chimique d'un sol forestier acide après apport de dolomie, de kiesiërite ou d'un mélange CaCO₃/kiesiërite. Dynamique et mécanismes physico-chimiques des transferts verticaux." *Thèse, Université Louvain-la-Neuve (Belgique)*.
- Ranger, J. et Bonneau, M., 1984. "Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt." *Revue Forestière Française*, XXXVI(2), 93-112.
- Ranger, J. et Bonneau, M., 1986. "Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Les effets de la sylviculture." *Revue Forestière Française*, XXXVIII(2), 105-123.
- Ranger, J. et Turpault, M.P., 1999. "Input-output nutrient budgets as a diagnostic-tool for the sustainability of forest management." *Forest Ecology and Management*, 122, 7-16.
- Ranger, J., Badeau, V., Dambrine, E., Dupouey, J.L., Nys, C., Party, J.P., Turpault, M.-P. et Ulrich, E., 2000. "Evolution constatée des sols forestiers au cours des dernières décennies." *Revue Forestière Française*, LII(Numéro Spécial), 49-69.
- Recena, P., 2003. "Estimations des stocks de carbone dans les sols et l'humus à l'échelle d'un massif forestier. Cas du Massif forestier de Fougères (Ille et Vilaine)." *Mémoire de fin d'études DAA ENSA*, 57 p.
- REGESOL, 2002. "Logiciel d'aide à la restauration des écosystèmes forestiers dégradés.", C. Nys Ed., BEF-Nancy, 20p.
- Renaud, J.P., Picard, J.F., Richter, C. et Nys, C., 2000. "Restauration de sols forestiers acides par un amendement calco-magnésien : cas du massif Vogien et des Ardennes." *Rapport DERF-ONF-INRA*, 47 p.
- Shrivastava, M.B., 1990. "Procedure for quantification of nutrient supply of forest soils in site evaluation studies." *Indian Journal of Forestry*, 13(3), 252-256.
- Stolt, M.H., Genthner, M.H., Daniels, W.L. et Groover, V.A., 2001. "Spatial variability in Palustrine wetlands." *Soil Science Society of America Journal*, 65, 527-535.
- Toutain, F., 1965. "Etude des sols et des eaux de la forêt de Fougères". *Thèse, Université Rennes 1. Rennes.* 192 p.
- Turpault, M.P., Ranger, J., Marques, R. et Ezzaïm, A., 1999. "Les bilan entrées-sorties, indicateurs de gestion durable des écosystèmes forestiers : cas des plantations de douglas des monts du Beaujolais." *Revue Forestière Française*, 2, 184-196.

Turpault, M.P., 2002. "Processus d'altération des minéraux des sols : quantification, à différentes échelles, des facteurs physiques, chimiques et minéralogiques. Exemple d'un sol faiblement lessivé à gloses développé sur limon dans un écosystème de hêtraie de plaine (Fougères)." *Contrat INRA/INSU, Programme PNSE, Rapport scientifique final*, 86 p.

Van Vliet-Lanoë, B., Pellerin, J. et Helluin, M., 1995. "Morphogenèse, pédogenèse : Les héritages du dernier cycle glaciaire en forêt de Fougères." *Z. Geomorph. N. F.*, 39(4), 489-510.

Zharova, E.V., Zheleznova, S.V. et Samsonova, V.P., 2002. "Spatial variation in the properties of plowed gray forest soil within a farm plot in the Vladimir Opel's Region." *Eurasian Soil Science*, 35(8), 936-944.

Zinke, P.J. et Stangenberger, A.G., 2000. "Elemental storage of forest soil from local to global scales." *Forest Ecology and Management*, 138, 159-165.

RESUME

Ce travail s'inscrit dans le cadre général de l'analyse de la variabilité spatiale des stocks en éléments nutritifs (K, Ca, Mg et P) des sols forestiers (Fougères, 35, France). Des échantillons de sol et d'humus ont été prélevés en 2003 à partir d'un plan échantillonnage aléatoire stratifié regroupant 100 sites. La stratification réalisée au départ pour évaluer les stocks de carbone dans l'écosystème comporte 6 classes d'échantillonnage : 4 classes d'âge de feuillus, 1 classe de résineux et une classe de zones hydromorphes.

La faiblesse générale des stocks en éléments échangeables ($<300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) des Alocrisols et Néoluvisols de cette forêt, ainsi que leur faible variabilité à l'échelle du massif, ont été démontrées. Les Colluviosols-Fluviosols se différencient significativement des Alocrisols et des Néoluvisols par leurs stocks en éléments échangeables élevés (CaO , $\text{MgO} >2000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) et variables, alors qu'ils sont plus faibles pour P.

Une cartographie par stratification des stocks des différents éléments s'appuyant sur des critères statistiques établis par classe d'échantillonnage se révèle efficace : l'incertitude associée à l'estimation des stocks est généralement faible. Cependant, quel que soit l'élément, un nombre inférieur de classes aurait permis de mettre en évidence la variabilité des stocks avec une même précision. La cartographie des stocks par krigeage ordinaire se révèle peu efficace avec le plan d'échantillonnage actuel.

Des modèles nationaux de prédiction des stocks 0-70cm en éléments nutritifs à partir de paramètres de surface (0-15cm) ont été testés ; ces modèles réalisent des erreurs de prédiction importantes ($>150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Des modèles spécifiques à Fougères basés sur la même architecture ont alors été créés et les erreurs de prédiction sont faibles (environ $30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Mots clés : sol forestier, stocks d'éléments nutritifs, variabilité spatiale, changement d'échelle, prédiction

ABSTRACT

This study deals with the general framework of studying the spatial variability of nutrient stocks (K, Ca, Mg, P) in forest soils (Fougères, 35, France). Samples of soils and humus were collected in 2003 based on a random stratified sampling plan gathering 100 sites. At first, the stratification achieved to estimate carbon stocks in the ecosystem and 6 sampling classes were created : 4 classes based on age of broad-leaved trees, 1 class of coniferous trees and 1 class of hydromorphic zones.

The general feebleness of exchangeable nutrient stocks ($<300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) of Alocrisols and Néoluvisols, besides their poor variability, was shown at the forest scale. Colluviosols-Fluviosols were significantly different by the high variability and high level of exchangeable nutrient stocks (CaO , $\text{MgO} >2000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), when compared to Alocrisols and Néoluvisols. Nevertheless, they were less rich of P.

A mapping of nutrient stocks by stratification, based on statistic criterious established by sampling class, seems to be adequate : the incertainly dealing with the estimation of nutrient stocks is low. While, a lower number of classes would enable us to look down nutrient stocks variability with the same level of precision. Ordinary kriging mapping of nutrient stocks seems to be inappropriate for the present sampling plan.

National prediction models of stocks 0-70cm from surface parameters (0-15cm) were tested. These models have a large prediction errors ($>150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Specific models at Fougères were then developped using the same architecture; they show lower prediction errors values (about $30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Key words : forest soils, nutrient stocks, spatial variability, scale change, prediction