

Variabilité spatiale et risques d'erreurs dans l'analyse des horizons holorganiques forestiers

Brigit Williot

Laboratoire de Géographie Physique (Pierre Birot), U.R.A. 141, C.N.R.S., 1, Place Aristide Briand, 92195 Meudon.

RÉSUMÉ

Cette étude a porté sur les horizons holorganiques de six peuplements de pins sylvestres (*Pinus sylvestris* L.), afin de déterminer les erreurs d'estimation possibles quant à leur poids à l'hectare, leurs concentrations et leurs stocks d'éléments, dans le cas où l'on utilise un nombre d'échantillons trop faible et surtout lorsque l'échantillonnage est fait à partir d'une seule fosse pédologique. Sur chaque peuplement, nous avons délimité une surface homogène d'un demi-hectare dans laquelle nous avons prélevé 25 échantillons individuels de 900 cm² chacun, regroupés ensuite en cinq grappes de cinq échantillons. A St. Bonnet-le-Château (Loire), à titre d'exemple, nous avons analysé les 25 échantillons séparément. L'analyse a déterminé : les poids des horizons OL+OF et OH, la part de C, N, Ca, Mg et K dans ces horizons ainsi que leurs concentrations. Pour les poids, les coefficients de variation (C.V.) dans les 25 prélèvements faits à St. Bonnet sont très élevés : 77 % pour OL+OF et 54 % pour OH. Et cette variabilité reste très importante sur les quatre autres peuplements déterminés par grappe de cinq échantillons, méthode qui a dû réduire les écarts, pourtant la moitié des C.V. de l'ensemble des peuplements reste > 30 % et suivant le site la différence entre les valeurs minimales et maximales varie de 5,1 à 27,4 t/ha. Pour l'horizon OH, la moyenne des C.V. tourne autour de 93 %. Les concentrations analysées sur le mélange de cinq échantillons individuels peuvent varier de 1 à 2,5 pour un élément donné. La variabilité de la minéralomasse est encore plus élevée. Un faible échantillonnage peut engendrer des erreurs d'estimation allant de 10 kg/ha à 15 600 kg/ha, suivant l'élément et le site concernés. Deux démarches nous semblent indispensables pour éviter ces erreurs : 1) faire de nombreux sondages, avant de choisir les lieux de prélèvement, sondages accompagnés d'une description de l'épaisseur et de la morphologie des horizons, ce qui permettrait de connaître la variabilité réelle et les caractéristiques représentatives de ces horizons ou 2) d'augmenter sensiblement le nombre des prélèvements et de les analyser individuellement.

Mots clés

Sol forestier, horizon holorganique, minéralomasse, variabilité spatiale.

SUMMARY

SPATIAL VARIABILITY AND POSSIBLE ERRORS IN THE ANALYSIS OF HOLORGANIC HORIZONS OF FOREST SOILS

The study was conducted on the holorganic horizon in 6 pine forests (*Pinus sylvestris* L., table 1), in order to determine possible errors in the estimation of the mass per hectare, of the element concentrations and of the mineral mass content, using methods with a low number of samples, especially if sampling is only done on a single pedological pit (figure 1). Individual samples (n=25, tables 2 and 3)

were taken or mixed (5 mixed samples out of 5 individual samples, tables 4, 5a and 5b) on 0,5 ha of each stand, using a sampling surface of 900 cm². Mass stock and mineral mass stock of C, N, Ca, Mg and K (tables 5a and 5b), as well as their concentrations (table 4) were compared in the OF+OL and OH horizons. The comparison of the mass stocks of 25 individual samples at St. Bonnet stand shows a high variability (tables 2 and 3) : a variation coefficient (C.V.) of 77 % for OL+OF and 54 % for OH. The variability of the mass stock, using mixed samples for the calculation only, is very high, with half of the C.V.s of all the stands >30 %, which means differences in the estimation of 5,1 to 27,4 t/ha between the minimum and maximum value of each site, depending on the site. For the OH horizon the mean of the C.V.s varies around 93 %. The comparison of the concentrations (tables 2 and 3) shows, independent of the site, variations from one to 2.5, depending on the element, the concentrations having been determined on mixed samples. The mixing has though not reduced the variability. The variability of the mineral mass stock is even higher than the one of the mass stock. In absolute values, a sampling, based on too few repetitions, can cause over- or underestimation errors of 10 kg/ha up to 15 600 kg/ha, depending on the element and the site. Two recommendations are made in order to increase the quality of such estimations : 1) a preliminary intensive probe before sampling with description of the thickness of these horizons and a morphological description, in order to know the real variability and the representative characteristics of these horizons or 2) an important increase of the number of samples with individual analysis of each sample.

Key-words

Forest soil, holorganic horizon, mineral mass, spatial variability.

RÉSUMEN

VARIABILIDAD ESPACIAL Y RIESGOS DE ERRORES EN EL ANALYSIS DE HORIZONTES HOLORGÁNICOS FORESTALES

Este estudio se realizó en los horizontes holorgánicos de seis plantaciones de pinos silvestres (*Pinus sylvestris* L.), con el fin de estimar los errores de posibles apreciación en lo que se refiere a su peso por hectárea, a su almacenamiento y concentración de elementos, en el caso en el que se utiliza un número de muestras muy bajo y sobretodo cuando estas muestras se tomaron a partir de una fosa pedológica (figura 1). En cada plantaciones se delimitó una superficie homogénea de media hectárea de la que se tomaron 25 muestras de 900 cm² (cuadros 2 y 3) cada una, ordenadas después en 5 grupos de muestras (cuadros 4, 5a y 5b). En St. Bonnet-le-Chateau (Loire) por ejemplo se analizaron las 25 muestras separadamente. En el análisis se determinó : el peso de los horizontes OL+OF, y OH, la parte de C, N, Ca, Mg y K (cuadros 5a y 5b) en estos horizontes así como sus concentraciones (cuadro 4). Para el peso el coeficiente de variación (C.V.) en las 25 muestras hechas en St. Bonnet es muy elevado (cuadro 2 y 3) : 77 % para OL+OF y 54 % para OH. Esta variabilidad es muy importante para las otras 4 plantaciones determinadas por grupos de 5 muestras método que ha debido reducir las variaciones, sin embargo la mitad de los C.V. es superior a 30 % y según el sitio la diferencia entre los valores mínimo y máximo varía de 5,1 al 27,4 toneladas por hectárea. Para el horizonte OH la media de los C.V. oscila alrededor de 93%. Las concentraciones analizadas sobre la mezcla de 5 muestras individuales (cuadros 2 y 3) pueden variar entre 1 y 2,5 para un elemento dado. La variabilidad de la masa mineral es aún más elevada. Un muestreo reducido puede conducir a errores de apreciación yendo desde 10 kg por ha hasta 15,6 toneladas según el elemento y el sitio considerado. Dos recomendaciones nos parecen indispensables para evitar estos errores : 1) hacer numerosos sondeos antes de escoger el sitio donde se harán las muestras, sondeos que se acompañarán de una descripción del espesor y de la morfología de los horizontes, los que permitiría conocer la variabilidad real y las características representativas de ellos o bien aumentar sensiblemente el número de muestras y analizarlas individualmente.

Palabras llave :

Suelo forestal, horizonte holorgánico, mineralomasa, variabilidad espacial

Pour l'étude du fonctionnement biogéochimique des écosystèmes forestiers, l'importance relative de chaque composant est estimée à partir de prélèvements sur le terrain. Sont inclus dans l'analyse massique et chimique (micro- et macroéléments) :

ζ la biomasse aérienne :

- la totalité de la biomasse des strates arborées, arbustives et herbacées (Duvigneaud, 1984),

ζ la biomasse souterraine : - les racines (Ranger, 1981),

ζ la microfaune parfois (Roth-Holzapfel *et al.*, 1991),

ζ la partie abiotique :

- les entrées via les dépôts atmosphériques (Bonneau et Nys, 1993),

- le contenu minéral des sols (van Miegroet *et al.*, 1992),

- les pertes par le drainage (Dambrine *et al.*, 1993).

L'objectif final est la compréhension du mode de fonctionnement de l'écosystème et la mise en évidence éventuelle d'un déséquilibre nutritif (Schulze *et al.*, 1989). Par la modélisation on peut prévoir l'évolution à moyen et long terme de ces écosystèmes forestiers. De telles études peuvent aider les gestionnaires des forêts :

ζ quant à la fertilisation et aux quantités apportées pour rétablir un équilibre nutritionnel satisfaisant (Popovic, 1992) ;

ζ quant aux choix des essences et aux modes d'intervention sylvicole afin d'optimiser le recyclage des éléments et minimiser les conséquences des exportations de bois (Nys, 1987).

En ce qui concerne les sols forestiers, leur hétérogénéité,

même dans une seule station, est connue, mais les mesures sont le plus souvent le résultat d'échantillons pris sur quelques fosses pédologiques, en général entre une et trois (*figure 1*), et dont les interprétations sont extrapolées sur plusieurs hectares, voire des dizaines d'hectares (Ulrich et Bredemeier, 1993; Vannier *et al.*, 1993).

Les estimations peuvent générer des erreurs plus ou moins importantes et, si l'on est près des seuils critiques de certains éléments nutritifs, conduire à de fausses interprétations.

OBJECTIF

Le travail présenté ci-dessous essaie de donner quelques références sur les erreurs possibles quant à l'estimation des masses et minéralomasses dans le seul horizon hologanique.

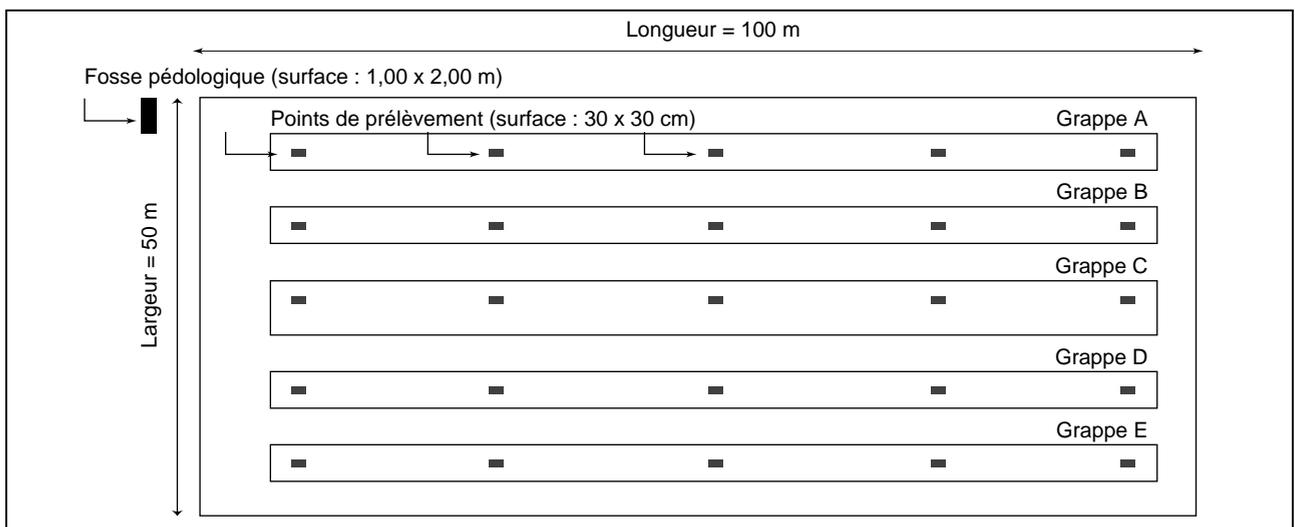
Cet horizon contient le plus souvent une grande part des éléments en rotation dans le cycle nutritif interne et est en quelque sorte «le bas de laine» à long terme des peuplements forestiers, surtout dans les sols moyennement pauvres à pauvres.

DESCRIPTION DES SITES ÉTUDIÉS

Cette étude a été faite sur six peuplements de pins sylvestres (*Pinus sylvestris* Linné) purs ou mélangés, situés dans les massifs montagneux du Sud de la France. Ces peuplements avaient été sélectionnés par l'AFOCEL (Association

Figure 1 - La méthode par grappe sur un demi-hectare comparée à la méthode traditionnelle de la fosse pédologique unique.

Figure 1 - Comparison of the cluster method, applied on half a hectare, with the traditional method of a single pedological pit.



Forêt-Cellulose) il y a une vingtaine d'années, pour faire des études de production sur cette essence.

La description de ces peuplements dans le *tableau 1* fait apparaître des différences importantes quant aux paramètres déterminant la qualité de ces peuplements, ce qui rend cette étude particulièrement intéressante.

MÉTHODES

Pour l'échantillonnage nous avons adapté la méthode définie dans le manuel de référence n°4 (Brêthes *et al.*, 1992) du Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers, géré par l'Office National des Forêts. Il s'agit de prélèvements par cinq grappes utilisés par ce réseau lors d'échantillonnages intensifs faits dans une centaine de peuplements. Une méthode similaire, mais avec un prélèvement sur une seule grappe a été utilisée par Huber (1993), lors d'une étude de l'état nutritionnel de 27 peuplements de chênes plus ou moins dépérissants, situés dans le nord-est de l'Autriche.

Nous avons prélevé les horizons hologaniques à l'aide d'un cadre en acier inox de 30 x 30 cm soit 900 cm². Les horizons OL et OF ont été prélevés ensemble et distingués de l'horizon OH. Pour ceci nous avons déterminé sur chaque peuplement une surface d'un demi-hectare (*figure 1*), aussi homogène et représentative que possible du site. Sur cette surface, nous avons effectué 25 prélèvements de 900 cm² pour OL+OF et pour OH que nous avons regroupés par cinq pour former cinq grappes pour chaque horizon (de A à E). Pour les points de prélèvement nous avons veillé à ne pas les faire dans des creux, ni sur des buttes, ni sur un lieu de passage anthropique ou animal. A Montgenèvre nous n'avons pas pu réaliser les 25 prélèvements prévus, car la construction récente d'une route forestière à travers le peuplement en avait bouleversé les sols. Seuls, 15 échantillonnages donnant trois grappes ont été réalisés.

Ci-dessous, la définition de ces différents horizons, extraite de Baize et Girard (Eds., 1992) :

«OL : horizon constitué de débris foliaires pas ou peu évolués et de débris ligneux. La forme originelle des débris est aisément reconnaissable à l'œil nu. Cet horizon ne contient pas de matière organique fine.

OF : horizon formé de résidus végétaux, surtout d'origine foliaire, plus ou moins fragmentés, reconnaissables à l'œil nu, en mélange avec des proportions plus ou moins grandes (moins de 70 % en recouvrement visuel) de matière organique fine. Cette dernière se trouve sous la forme de boulettes fécales constituées essentiellement de matière organique sans débris figurés, visibles à l'œil nu.

OH : horizon contenant plus de 70 % en volume de matière organique fine. Celle-ci se trouve sous forme de boulettes fécales et/ou de microdébris végétaux et mycéliens sans struc-

ture reconnaissable à l'œil nu».

A St. Bonnet-le-Château, pour avoir une idée de la variabilité spatiale des quantités d'humus, nous avons réalisé, à titre d'exemple, un échantillonnage de 25 prélèvements individuels pour chaque horizon.

Dans un premier temps, les sols ont été pré-séchés à l'air, puis séchés à l'étuve pendant 48 heures à 105°C, afin d'établir des poids secs. Pour des raisons pécuniaires, nous n'avons fait faire l'analyse chimique que sur l'horizon OL+OF.

A proximité de chaque prélèvement fait avec le cadre, un échantillon de OL+OF était mélangé par grappe et 5 échantillons par site furent envoyés au Laboratoire d'Analyses des Sols de l'INRA-Arras. Afin d'éviter les pertes d'azote et de carbone, le séchage ne s'est fait qu'à 30-40°C pendant 48 heures. Les éléments suivants ont été déterminés :

- carbone et azote par combustion sèche ;
- calcium, magnésium et potassium par absorption atomique, après mise en solution avec de l'acide fluorhydrique.

Cette analyse chimique et les poids secs, grappe par grappe, pour chaque site nous a permis de déterminer le stock d'éléments par hectare (*tableau 5*).

RÉSULTATS

Variabilité spatiale de la masse

Les pesées des 25 prélèvements individuels faits à St. Bonnet, à titre d'exemple, sont mises en relation avec la moyenne des poids pour les 25 points. Le *tableau 2* présente les résultats pour l'horizon OL+OF et le *tableau 3* pour l'horizon OH.

Sur ce site, l'horizon OL+OF est parfois inexistant car le peuplement est très ouvert et un tapis de mousse (*Scleropodium purum*, mousse des jardiniers) recouvre près de la moitié de sa surface. Mais cet horizon peut atteindre un poids sec de 492 g/900 cm², poids 256 % supérieur à la moyenne des poids des 25 prélèvements, moyenne dont le coefficient de variation (C.V.) est très élevé : 77 % (*tableau 2*).

Pour l'horizon OH (*tableau 3*), l'écart entre les poids minimum et maximum est encore plus important que pour OL+OF : on va de 0 à 1 039 g/900 cm² ! Le maximum par rapport à la moyenne est de 226 % supérieur et le coefficient de variation reste encore élevé : 54 %.

Variabilité des concentrations entre les grappes de chaque site

Les résultats des analyses chimiques des six sites sont présentés grappe par grappe dans le *tableau 4*.

A l'intérieur de chaque site les concentrations maximales peuvent être deux fois et demi supérieures aux concentrations

Tableau 1 - Description détaillée des six peuplements de pins sylvestres.**Table 1** - Detailed description of the six *pinus sylvestris* stands.

Commune / Paramètre	St. Bonnet-le-Château	Montgenèvre	Meyrueis	St. Martin-de-Vesubie	La Matte Formiguières	Rioumajou
SITUATION DE LA FORÊT						
Département	Loire	Hautes-Alpes	Lozère	Alpes Maritimes	Pyrénées Orientales	Hautes Pyrénées
Forêt	Gournier -Le Garay	Bois des Bans	Roquedols	communale de St. Martin-de-V.	La Matte	Sapinière de Hitte Lougue et Lapiarre
Surface	4 ha	32 ha	26 ha	120 ha	170 ha	45 ha
Altitude	850 m	1540 m	850-870 m	1450 m	1530-1570 m	1480-1750 m
Exposition	Est	Sud-Ouest	Nord-Nord-Est	Ouestsensibl.	planEst à Ouest	
Pente	10 %	25 %	15 %	20 %	0 %	35-50 %
CLIMAT (indicatif)						
Station de référence	St. Etienne	Briançon	Meyrueis	Beuil	Montlouis	Gavarnie
Température moy. annuelle	10,7°C	6°C	9,6°C	7,6°C	6°C	7,7°C
Temp. avril-sept.	15,9°C	10,5°C	14,3°C	7,6°C	9,2°C	11,9°C
Précipitation annuelle	835 mm	700 mm	1 000 mm	1117 mm	874 mm	1244 mm
Précip. avril-sept.	490 mm	300 mm	500 mm	512 mm	428 mm	674 mm
PEUPLEMENT						
Hauteur dominante (n=50)	25 m	21 m	27 m	23 m	24 m	30 m
Diamètre des arbres dominants (n=50)	38,8 cm	45,3 cm	52,5 cm	44,1 cm	38,1 cm	60,2 cm
Pins : N/ha	440	323	224	1 112	370	162
Essences secondaires (ES)	Hêtre, sapin pectiné	Pin cembro	Hêtre, châtaignier, chêne, sapin, frênes	Epicéa, sapin pectiné	aucune	Sapin pectiné
ES : N/ha	32	12	522	44	0	110
SOL						
Roche-mère	Granite à deux micas	Grès du trias	Schiste gréseux	Gneiss	Alluvions sur granite	Schiste primaires
Type de sol	Sol brun acide	Sol brun acide	Sol brun acide	Sol brun acide	Sol brun acide	Sol brun acide
Profondeur → roche-mère	125 cm	15-185 cm	75 cm	45-75 cm	110 cm	60 cm
Type d'humus	Moder-Mor	Mull-Moder	Moder	Moder	Mull (Moder)	Mull-Moder

Tableau 2 - St.Bonnet-le-Château : poids secs des 25 échantillons de l'horizon OL+OF (en g/900 cm²) ; comparaison relative avec la moyenne des pesées.

Table 2 - St.Bonnet-le-Château : dry weight of the 25 samples from the OL+OF horizon (values are given in g/900 cm²) ; relative comparison with the mean of all the dry weights.

Grappe (horizon OL+OF)	A	B	C	D	E
Point 1	141	0	124	328	0,00
% par rapport à M	73%	0%	65%	170%	0%
Point 2	0	100	0	224	78
% par rapport à M	0%	52%	0%	117%	41%
Point 3	457	297	254	329	192
% par rapport à M	237%	154%	132%	171%	100%
Point 4	79	161	426	492	231
% par rapport à M	41%	84%	221%	256%	120%
Point 5	228	141	168	363	0
% par rapport à M	118%	73%	87%	189%	0%
Total (g/4500 cm ²)	905	699	972	1 736	501
Moyenne de l'ensemble des points (M=100%)					192
Ecart-type					148
Coefficient de variation (en %)					77

Tableau 3 - St. Bonnet-le-Château : poids secs de 25 échantillons de l'horizon OH (en g/900 cm²) ; comparaison relative avec la moyenne de pesées.

Table 3 - St. Bonnet-le-Château : dry weight of the 25 samples from the OH horizon (values are given in g/900 cm²) ; relative comparison with the mean of all the dry weights.

Grappe (horizon OH)	A	B	C	D	E
Point 1	437	344	513	317	717
% par rapport à M	95%	75%	111%	69%	156%
Point 2	450	215	481	459	520
% par rapport à M	98%	47%	105%	100%	113%
Point 3	0	381	206	731	358
% par rapport à M	0%	83%	45%	159%	78%
Point 4	0	750	1 039	304	846
% par rapport à M	0%	163%	226%	66%	184%
Point 5	288	308	603	573	663
% par rapport à M	63%	67%	131%	124%	144%
Total (g/4500 cm ²)	1 175	1 998	2 842	2 384	3 104
Moyenne de l'ensemble des points (M=100%)					460
Ecart-type					247
Coefficient de variation (en %)					53

Tableau 4 - Concentrations de carbone, azote, calcium, magnésium et potassium d'un échantillon moyen par grappe de l'horizon OL+OF sur les six sites.**Table 4** - Carbon, nitrogen, calcium, magnesium and potassium concentrations for each mean sample per cluster in the OL+OF horizon of the six stands.

ST-BONNET-LE-CHÂTEAU (Loire)						MONTGENÈVRE (Hautes Alpes)				
Grappe	C g/kg	N g/kg	Ca g/100 g	Mg g/100 g	K g/100 g	C g/kg	N g/kg	Ca g/100 g	Mg g/100 g	K g/100 g
A	369,18	14,11	0,53	0,23	0,98	394,83	9,91	1,66	0,59	0,41
B	308,67	13,36	0,47	0,45	1,28	339,25	7,95	3,77	1,52	0,41
C	271,08	10,96	0,43	,45	1,45	413,83	11,12	2,76	1,05	0,36
D	148,41	6,55	0,47	0,79	2,16	---	---	---	---	---
E	206,58	9,55	0,54	0,59	1,84	---	---	---	---	---
Moyenne	260,78	10,91	0,49	0,50	1,54	382,64	9,66	2,73	1,05	0,39
Ecart-type	86,19	3,05	0,05	0,21	0,46	38,76	1,60	1,06	0,47	0,03
Cœf. var. (%)	33	28	9	41	30	10	17	39	44	7
MEYRUEIS (Lozère)						ST-MARTIN-DE-VÉSUBIE (Alpes Maritimes)				
A	447,05	12,21	1,14	0,17	0,46	399,32	7,99	0,96	0,34	0,72
B	463,10	9,38	1,14	0,14	0,34	394,72	10,65	1,02	0,33	0,66
C	458,33	11,67	1,39	0,15	0,37	421,04	10,16	0,99	0,25	0,48
D	470,48	10,19	1,10	0,13	0,25	441,05	8,98	1,09	0,24	0,41
E	469,51	11,21	1,01	0,10	0,31	448,16	10,57	0,92	0,22	0,44
Moyenne	461,69	10,93	1,16	0,14	0,35	420,86	9,67	1,00	0,28	0,54
Ecart-type	9,57	1,14	0,14	0,03	0,08	23,98	1,15	0,06	0,06	0,14
Cœf. var. (%)	2	10	12	19	22	6	12	6	20	26
LA MATTE (Pyrénées Orientales)						RIOUMAJOU (Hautes Pyrénées)				
A	382,77	12,04	0,68	0,24	0,69	293,87	8,56	0,94	0,36	1,01
B	437,19	12,97	0,63	0,18	0,47	281,38	5,49	1,02	0,42	1,08
C	319,19	10,38	0,65	0,32	0,90	284,90	7,62	0,94	0,40	1,12
D3	74,09	12,22	0,70	0,25	0,73	317,70	7,48	0,81	0,35	0,98
E	273,81	9,15	0,58	0,43	1,23	359,99	7,92	1,02	0,28	0,80
Moyenne	357,41	11,35	0,65	0,28	0,80	307,57	7,41	0,95	0,36	1,00
Ecart-type	62,72	1,55	0,05	0,10	0,28	32,55	1,15	0,09	0,05	0,12
Cœf. var. (%)	18	14	7	34	35	11	16	9	15	12

minimales pour un élément donné. Et ces écarts doivent être plus élevés dans la réalité car chaque échantillon analysé était un mélange de cinq points, ce qui a probablement contribué à minimiser les écarts.

Les différences des C.V. entre les sites pour un élément donné sont importantes ce qui est une expression de l'hétérogénéité stationnelle dans les sites où ce coefficient est élevé. St. Bonnet en moyenne a les coefficients les plus élevés et

Rioumajou les plus faibles.

Selon l'élément, la variabilité des concentrations dans chaque site est très différente. La détermination de la concentration du carbone à Meyrueis est soumise à un risque d'erreur relativement faible, car le C.V. n'est que de 2 %. Par contre, à St. Bonnet l'échantillonnage n'est pas suffisant car le risque d'erreur est 15 fois plus important (C.V. = 33 %). Dans tous les sites c'est le magnésium qui a les plus forts taux de variation

Tableau 5a - Estimation de la masse et des stocks d'éléments à l'hectare contenus dans l'horizon OL+OF, grappe par grappe, dans les six sites.

Table 5a - Mass and mineral mass content estimation for the OL+OF horizon, cluster per cluster for each stand.

ST. BONNET-LE-CHÂTEAU (Loire)							
Grappe	OL+OF kg/ha	OH kg/ha	Carbone kg/ha	Azote kg/ha	Calcium kg/ha	Magnésium kg/ha	Potassium kg/ha
A	20 094	26 119	7 418	284	107	46	197
B	15 527	26 587	4 793	207	73	70	199
C	21 593	62 706	5 853	237	93	97	313
D	38 566	52 977	5 724	252	181	305	833
E	11 153	68 980	2 304	106	60	66	205
Moyenne	21 386	47 474	5 218	217	103	117	349
Ecart-type	10 439	20 107	1 882	66	47	107	275
Cœf. var. (%)	49	42	36	31	46	91	79
MONTGENÈVRE (Hautes Alpes)							
A	18 006	0	7 109	178	299	106	74
B	32 133	0	10 901	255	1 211	488	132
C	31 878	0	13 192	354	880	335	115
Moyenne	27 339	—	10 401	263	797	310	107
Ecart-type	8 084	—	3 072	88	462	192	30
Cœf. var. (%)	30	—	30	34	58	62	28
MEYRUEIS (Lozère)							
A	12 459	14 420	5 570	152	142	21	57
B	12 026	1 249	5 569	113	137	17	41
C	11 621	24 338	5 326	136	162	17	43
D	16 736	8 306	7 874	171	184	22	42
E	14 800	7 692	6 949	166	149	15	46
Moyenne	13 528	11 201	6 258	147	155	18	46
Ecart-type	2 176	8 699	1 107	24	19	3	7
Cœf. var. (%)	16	78	18	16	12	16	15

(C.V. entre 15 et 44), ce qui rend difficile son estimation avec un échantillonnage de cinq grappes issues de 25 prélèvements. Que penser d'une estimation faite sur une seule fosse pédologique ?

Variabilité dans l'estimation des stocks

La lecture des tableaux 5a et 5b fait apparaître des C.V. élevés dans la majeure partie des sites pour la masse de OL+OF et OH à l'hectare.

La plus faible variabilité est de 13 % pour l'horizon OL+OF à La Matte-Formiguères, mais la moitié des coefficients dans

l'ensemble des peuplements est supérieure ou égale à 30 % (moyenne : 27 %). En valeur absolue, la différence entre les estimations minimale et maximale va de 5,1 t/ha pour Meyrueis, à 27,4 t/ha à St. Bonnet.

Dans le site de La Matte, l'horizon OH est inexistant sur 20 points du peuplement et n'est présent que dans une grappe, ce qui donne un C.V. de 224% et met une fois de plus l'accent sur les risques d'interprétation très importants si l'on s'en tient à un faible échantillonnage. Cette situation de la présence de l'horizon OH dans une seule grappe s'est déjà rencontrée plusieurs fois, mais sur d'autres essences, dans le réseau

Tableau 5b - Estimation de la masse et des stocks d'éléments à l'hectare contenus dans l'horizon OL+OF, grappe par grappe, dans les six sites.

Table 5b - Mass and mineral mass content estimation for the OL+OF horizon, cluster per cluster for each stand.

ST. MARTIN-DE-VÉSUBIE (Alpes Maritimes)							
Grappe	OL+OF kg/ha	OH kg/ha	Carbone kg/ha	Azote kg/ha	Calcium kg/ha	Magnésium kg/ha	Potassium kg/ha
A	14 720	17 168	5 878	118	141	50	106
B	15 270	16 989	6 027	163	156	50	101
C	5 009	7 895	2 109	51	50	13	24
D	10 943	14 891	4 826	98	119	26	45
E	12 229	19 787	5 481	129	113	27	54
Moyenne	11 634	15 346	4 864	112	116	33	66
Ecart-type	4 107	4 513	1 609	41	41	17	36
Cœf. var. (%)	35	29	33	37	35	50	55
LA MATTE - FORMIGUÈRES (Pyrénées Orientales)							
A	61 705	0	23 619	743	420	148	426
B	81 465	41 210	35 616	1 057	513	147	383
C	72 184	0	23 040	749	470	231	650
D	86 789	0	32 467	1 061	608	217	634
E	73 016	0	19 993	668	423	314	898
Moyenne	75 032	8 242	26 947	856	487	211	598
Ecart-type	9 610	18 430	6 714	188	78	69	206
Cœf. var. (%)	13	224	25	22	16	33	34
RIOUMAJOU (Hautes Pyrénées)							
A	33 780	0	9 927	289	318	122	341
B	48 829	0	13 740	268	498	205	527
C	53 615	0	15 275	409	504	214	600
D	50 839	0	16 151	380	412	178	498
E	50 930	0	18 334	403	519	143	407
Moyenne	47 598	—	14 685	350	450	172	475
Ecart-type	7 910	—	3 136	66	85	40	102
Cœf. var. (%)	17	—	21	19	19	23	21

RENECOFOR (Ulrich, 1995). A La Matte, même le regroupement par grappe, qui devrait homogénéiser les concentrations, n'aide pas à minimiser les écarts. La moyenne des C.V. de l'étude des masses de OH tourne autour de 93%. Les différences absolues maximales sont encore plus importantes que pour l'horizon OL+OF : de 11,9 t/ha à St. Martin-de-Vésubie à 42,9 t/ha à St. Bonnet. Des sondages préalables nombreux, réalisés dans tout l'horizon OH avec un maillage

fin, auraient vraisemblablement permis de connaître la variabilité réelle de cet horizon et de son épaisseur, et de savoir quel pourcentage il couvre dans l'ensemble du peuplement.

La variabilité est dans la plupart des cas plus importante pour la minéralo-masse (tableau 5) que pour les concentrations (tableau 4) : sur les 30 résultats obtenus (5 éléments dosés pour 6 sites), 25 moyennes ont des C.V. plus élevés pour la minéralo-masse, les 5 autres C.V. étant soit égal pour

le calcium à Meyrueis soient inférieurs pour le magnésium et le potassium à Meyrueis et à La Matte.

Cet exemple montre clairement l'augmentation du risque d'erreur pour l'estimation d'une moyenne lors de la multiplication de deux valeurs (masse et concentration) soumises à de fortes variations et issues d'un nombre d'échantillons trop faible.

En valeur absolue, un échantillonnage encore plus faible, c'est-à-dire sur une grappe ou un profil seulement comme l'avait fait par exemple Huber (1993) et Vannier *et al.* (1993) peut engendrer des sur- ou sous-estimations de l'ordre de :

- 2,5 t/ha à Meyrueis à 15,6 t/ha à La Matte pour le carbone ;
- 60 kg/ha à Meyrueis à 400 kg/ha à La Matte pour l'azote ;
- 50 kg/ha à Meyrueis à 900 kg/ha à Montgenèvre pour le calcium ;
- 10 kg/ha à Meyrueis à 400 kg/ha à Montgenèvre pour le magnésium ;
- 20 kg/ha à Meyrueis à 600 kg/ha à St. Bonnet pour le potassium.

DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent de grandes différences liées à la variabilité spatiale entre les sites pour tous les paramètres étudiés. Mais les observations n'ont été faites que sur 50 ares/peuplement, considérés comme représentatifs de peuplements, dont les parcelles varient de 4 à 170 ha. On peut penser avec raison que la variabilité au sein des peuplements est supérieure encore à celle mise en évidence dans ce travail.

L'horizon holorganique est connu pour avoir la plus forte hétérogénéité parmi les horizons des sols forestiers (Englisch, 1994 ; Brêthes, 1995) : accumulation dans les creux, érosion sur les microbuttes (comme les vieilles taupinières), passage de sangliers, etc. De plus, c'est l'horizon qui subit les plus fortes perturbations lors des interventions sylvicoles (Green *et al.*, 1993).

Par ailleurs, il est le récepteur de la plupart des nutriments et particulièrement du carbone qu'il accumule. Enfin, un changement à long terme des propriétés chimiques d'un sol forestier se traduira d'abord par des modifications dans l'horizon holorganique.

Des erreurs d'estimation sont donc susceptibles d'influencer considérablement la comparaison des différents compartiments de l'écosystème forêt, et cela surtout pour les éléments jouant un rôle déterminant dans la décomposition de la matière organique : le carbone et l'azote (le rapport C/N est un des paramètres classiques pour exprimer l'aptitude d'un sol pour une bonne ou mauvaise décomposition de la matière organique).

Concernant le carbone, une estimation correcte est d'autant

plus nécessaire si l'on envisage de répondre aux questions qui se posent quant aux acteurs responsables de l'effet de serre et des changements climatiques, le gaz carbonique étant considéré comme un des principaux responsables :

ζ comment savoir avec certitude si les sols forestiers auront accumulé ou libéré plus ou moins de carbone que dans le passé ?

ζ comment interpréter une évolution à long terme au sein d'un peuplement forestier, si les erreurs d'estimation peuvent être aussi importantes et parfois dépasser des changements que l'on pourrait observer sur une seule décennie ?

Pour l'azote, le calcium et le magnésium une différence de quelques centaines de kilogrammes à l'hectare peut influencer soit la décision d'utiliser des engrais pour relancer l'activité biologiques, ou compenser l'absence de nutriments dans la réserve minérale du sol, soit d'utiliser une méthode sylvicole favorable à une minéralisation rapide dans l'horizon holorganique.

Il semble qu'il n'y ait que deux moyens de prendre en compte l'importante variabilité spatiale naturelle :

ζ faire de nombreux sondages avant de choisir les lieux de prélèvement, avec mesure de l'épaisseur des horizons et une description morphologique, afin de connaître la variabilité réelle et les caractéristiques représentatives de ces horizons ;

ζ augmenter sensiblement le nombre des prélèvements et les analyser individuellement.

Comme illustration de la deuxième possibilité, le nombre d'échantillons nécessaires pour garantir une estimation dont le C.V. est égal à 10 % avec une probabilité de 95 %, a été calculé d'après Céresta (1986) pour une moyenne dont la variance réelle est inconnue.

A St. Bonnet où l'on a pourtant fait 25 prélèvements (surface totale prélevée : $2,25 \text{ m}^2 = 0,045 \%$ de 0,5 ha) pour chaque horizon OL+OF et OH (*tableaux 2 et 3*), nous avons calculé que pour abaisser le C.V. respectivement de 77 et 53 % à 10 %, il aurait fallu prélever 174 échantillons ($15,7 \text{ m}^2 = 0,31 \%$) de l'horizon OL+OF et 84 ($7,6 \text{ m}^2 = 0,15 \%$) de l'horizon OH. Pour les concentrations d'éléments (*tableau 4*) il aurait fallu prélever entre 7 ($0,63 \text{ m}^2 = 0,013 \%$) et 89 ($8,01 \text{ m}^2 = 0,16 \%$) échantillons et pour la minéralomasse, tous éléments confondus, entre 7 et 379 échantillons ($34,11 \text{ m}^2 = 0,68 \%$) !

Ces chiffres sont non seulement très variables sur un site mais également entre les sites. Il semble donc impossible de déterminer le nombre d'échantillons qui conviendrait à chaque élément. Si pour satisfaire les exigences statistiques on devait prendre le nombre d'échantillons maximum calculé pour un élément sur un site, soit 379 pour le magnésium à St. Bonnet, la réalisation sur le terrain serait très contraignante en raison du travail énorme qu'elle représenterait et du coût élevé des analyses. L'alternative semble être un sondage préalable suivant un maillage fin de 10 x 10 mètres (taille du maillage à expérimenter).

CONCLUSION

Cet article vise à sensibiliser les personnes faisant de la recherche sur les cycles biogéochimiques des écosystèmes terrestres et les invite soit à minimiser les erreurs d'estimation, soit à adapter les interprétations basées sur des estimations faites à partir d'un faible nombre d'échantillons.

Une estimation correcte des stocks en éléments contenus dans le seul horizon hologanique nécessite une taille de l'échantillon bien plus importante que celle couramment utilisée (de 1 à 25 échantillons). Pour avoir des moyennes représentatives on devrait augmenter de manière sensible le nombre des échantillons prélevés à l'hectare aussi bien pour le calcul des masses que pour déterminer les concentrations et la minéralomasse.

Au niveau des horizons hologaniques le prélèvement par la méthode de grappe ne semble être bien adapté que dans des sites où un sondage préalable permettrait de connaître la variabilité et de sélectionner des lieux de prélèvement représentatifs du peuplement. Il semble plus fiable de prélever des échantillons individuellement et de faire des moyennes, car le mélange des échantillons provenant de cinq points par grappe ne semble pas minimiser la variabilité entre les grappes.

Si un nombre d'échantillons aussi important pour l'estimation de l'horizon hologanique est à faire, ce nombre reste à déterminer pour les horizons minéraux.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D., Girard, M.-C., (Eds.) 1992. - Référentiel pédologique, principaux sols d'Europe, Editions INRA, 222 p.
- Brêthes A., 1995. - Communication personnelle.
- Brêthes A., Ulrich, E., Bonneau, M., 1992. - Manuel de référence n°4 pour l'échantillonnage des sols par grappe, Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers, Office National des Forêts, 41 p.
- Bonneau M., Nys, C., 1993. - A nitrogen cycle model for calculating the reduction of N-input necessary to reduce soil acidification and nitrate leaching and the consequences of this for wood production, *Water, Air and Soil Pollution*, 69 : 1-20.
- Ceresta 1986. - Aide-mémoire pratique des techniques statistiques, Centre d'enseignement et de recherche de statistique appliquée, *Revue de statistique appliquée*, 34, numéro spécial : 72.
- Dambrine E., Kinkor, V., Jehlicka, J., Gelhaye, D., 1993. - Fluxes of dissolved mineral elements through a forest ecosystem submitted to extremely high atmospheric pollution inputs (Czech Republic), *Annales des Sciences Forestières*, 50 : 147-157.
- Duvigneaud P., 1984. - L'écosystème forêt, ENGREF, Nancy, 160 p.
- Englisch M., 1994. - The humus form pattern in Norway spruce ecosystems at Hochwechsel (Austria), Institute for Site Research, Federal Forest Research Centre Vienna, article soumis aux *Annales des Sciences Forestières*, 12 pages, 5 tableaux, 3 figures.
- Green R.N., Trowbridge, R.L., Klinka, K., 1993. - Towards a taxonomic classification of humus forms, *Forst Science*, 39, 1 : 1-49.
- Huber S., 1993. - Bodenmineralstoffhaushalt, Ernährungszustand und Kronenverlichtung von Eichen-wäldern im nordöstlichen Österreich, *Forschungsgesellschaft gegen das Waldsterben, Österreichische Gesellschaft für Waldökosystemforschung und experimentelle Baumfor-schung*, Bericht 1993/3, 146 p.
- Nys C., 1987. - Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier, conséquence des enrésinements, Thèse, Université de Nancy, 207 p.
- Popovic B., 1992. - Changes in soil, plant nutrient content and tree growth during a 5-year period on Norway spruce plots under different liming regimes in South Sweden, in A. TELLER, P. MATHY, J.N.R. JEFFERS (Eds.) «Responses of forest ecosystems to environmental changes», Elsevier : 821-822.
- Ranger J., 1981. - Etude de la minéralomasse et du cycle biologique dans deux peuplements de Pin laricio de Corse, dont l'un a été fertilisé à la plantation, *Annales des Sciences Forestières*, 38, 1 : 127-158.
- Roth-Holzappel M., Funke, W., Rittner, P., 1991. - Multielementanalysen an Invertebraten im Ökosystem «Fichtenforst», *Proceedings du 7^e colloque du Projekt Europäisches Forschungszentrum*, 5-7 mars 1991, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Allemagne, KfK-PEF 80, 1 : 171-183.
- Schulze E.-D., Oren, R., Lange, O.L., 1989. - Nutrient relations of trees in healthy and declining Norway spruce stands, in E.-D. SCHULZE, O.L. LANGE, R. OREN (Eds.) «Forest Decline and Air Pollution», *Ecological Studies* 77, Springer Verlag : 392-417.
- Ulrich B., Bredemeier, M., 1993. - The coupling of carbon and ion cycles including N, P, S, in soils of terrestrial ecosystems, in R. WOLLAST, F.T. MACKENZIE, L. CHOU (Eds.) «Interactions of C, N, P and S biogeochemical cycles and global changes», Springer Verlag : 63-78.
- Ulrich E., 1995. - communication personnelle.
- Van Migroët H., Cole, D.W., Foster, N.W., 1992. - Nitrogen distribution and cycling, in D.W. JOHNSON, S.E. LINDBERG (Eds.), «Atmospheric deposition and forest nutrient cycling», *Ecological Studies* 91, Springer Verlag : 178-213.
- Vannier C., Didon-Lescot, J.-F., Lelong, F., Guillet, B., 1993. - Distribution of sulphur forms in soils from beech and spruce forest of Mont Lozère (France), *Plant and Soil*, 154 : 197-209.

