
Observatoire de la qualité des sols (O.Q.S.) du Donon : contenu et flux de Ca, Mg et K après la tempête de 1999

M. Bonneau⁽¹⁾, P. Bonnaud⁽²⁾, D. Gelhaye⁽²⁾, et J. Ranger⁽⁵⁾

(1) Retraité. 4 rue de Bastogne, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

(2) INRA, Centre de Nancy, Biogéochimie des écosystèmes forestiers. 54280 Champenoux

RÉSUMÉ

La tempête de décembre 1999 a complètement jeté bas le peuplement d'Épicéa de la forêt du Donon. Cet évènement regrettable a été l'occasion d'un bilan des flux d'éléments minéraux dans le sol et de vérifier les conclusions d'une précédente étude (Bonneau, 2000 a, b, c, 2005) Comme cela avait déjà été mis en évidence en 1996, le magnésium subit des pertes considérables, tandis le potassium est approximativement conservé et que le calcium s'accumule en quantité notable. Ces pertes importantes peuvent être expliquées par la forte garniture en aluminium du complexe d'échange, une minéralisation accélérée des litières et de l'humus, une percolation importante d'eau par suite de l'inexistence, depuis la destruction du peuplement, de l'interception du couvert et de l'évapotranspiration, ainsi que par la charge en acides organiques des eaux qui diffusent au travers des horizons hologaniques. Contrairement à ce qui a été conclu en 1996, le calcium donne lieu à accumulation et non à pertes, sans doute à cause de l'apport important de cet élément par les litières au moment de la tempête.

Mots clés

Aluminium, bilan d'éléments minéraux, humus, sols forestiers, sols très acides

SUMMARY**DONON FOREST SOIL QUALITY OBSERVATORY: CA, MG AND K CONTENTS AND FLUXES AFTER THE 1999 WINDSTORM**

The windstorm in december 1999 completely destroyed the spruce stand of Soil Quality Observatory in the Donon Forest. This event gave occasion of comparing element concentrations and contents (tables 2, 3 and 4) and calculating nutrient element balance in the soil (table 5), and confirming the conclusions of a previous study (Bonneau, 2000 a, b, c, 200). Soil is very acidic with high concentration in exchangeable Al (table 1). Needle litter and humus layer mineralization was very active after the windstorm (table 3) and exceeded needle fall; thus mass of humus layers was lower in 2004 than in 1996 when the spruce stand was still present. Exchangeable calcium concentration increased, while those of magnesium and potassium decreased. As previously recorded in 1996, loss of total Mg in the soil was very important, while potassium and calcium accumulated, namely Ca. This important Mg loss might be explained by accelerated litter and humus mineralization, high water circulation through the soil, because rain interception and evaporation do not exist without forest stand, and by high concentration of organic acids in percolation water flux, together with high occupation of exchange complex by aluminium, which was preventing Mg adsorption. But, contrary to 1996 conclusions, Ca, though important loss in drainage water, accumulated, probably because of very important input of this element by needle fall during the 1999 windstorm.

Key-words

Aluminium, humus, forest soils, mineral element balance, vey acidic soils

RESUMEN**OBSERVATORIO DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS (O.Q.S.) DEL DONON:****Contenido y flujo de Ca, Mg, y K después de la tormenta de 1999**

La tormenta de diciembre de 1999 hizo caer completamente la población de píceas de la selva de Donon. Este malo hecho fue la ocasión de un balance de los flujos de elementos minerales en el suelo y de averiguar las conclusiones de un estudio precedente (Bonneau, 2000 a,b,c 2005) Como esto fue puesto en evidencia en 1996, el magnesio sufre pérdidas considerables, pero el potasio se conserva aproximadamente y el calcio se acumula en cantidad notable. Estas pérdidas importantes pueden ser explicadas por el elevado contenido en aluminio intercambiable, una mineralización acelerada de las lómitas y del humus, una percolación importante del agua en seguida de la inexistencia, desde la destrucción de la población, de la intercepción por la cubierta vegetal y de la evapotranspiración, así que por la carga en ácidos orgánicos de las aguas que difusan a través de los horizontes holorgánicos. Al contrario de lo que se concluyó en 1996, el calcio da lugar a acumulación y no a pérdidas, sin duda a causa del aporte importante de este elemento por las lómitas al momento de la tormenta.

Palabras clave

Aluminio, balance de elementos minerales, humus, suelos forestales, suelos muy ácidos

L'humus est un des facteurs essentiels de l'évolution des sols (Duchaufour 1983, 2001). Sa dégradation de la forme mull vers les formes moder et, encore davantage, dysmoder et mor provoque la libération dans les couches hologaniques de molécules acides qui mobilisent et entraînent les éléments minéraux des litières vers les horizons profonds. Ils peuvent s'y fixer ou au contraire être entraînés hors du profil par les eaux de drainage. Hildebrand (1986) a montré que les coefficients de sélectivité du magnésium et du calcium étaient faibles par rapport à celui de l'aluminium dans les sols très acides, ce qui entrave l'adsorption de ces deux éléments sur les colloïdes des horizons minéraux. Ils ont tendance à être éliminés du sol qui se désature et s'acidifie donc de plus en plus. De telles acidifications ont été observées dans divers travaux (Tamm et Hallbäcken, 1988; Raulund-Rasmussen et Larsen, 1990; Poszwa *et al.*, 1998; Lindstrom *et al.*, 1998; Raubuch *et al.*, 1998; Kreutzer *et al.*, 1998; Ranger et Augusto, 2001).

Les travaux effectués en 1996 dans les sols de l'O.Q.S. du Donon, très riches en aluminium échangeable, 10 ans après sa création en 1986, ont conduit à conclure que ce phénomène jouait un rôle extrêmement important dans l'évolution de la fertilité des sols. Le magnésium apporté par la chute des aiguilles d'Épicéa, par la pluie et les dépôts secs et occultes était en grande partie perdu par drainage. C'était vrai également, dans une moindre mesure, pour le calcium, tandis que le potassium était mieux retenu dans le sol, ce qui est conforme aux travaux d'Hildebrand (Bonneau, 2000 a, b, 2005).

Lorsque les humus se minéralisent activement, certaines années chaudes et pluvieuses, ou lors de la réhumectation du sol après une période de sécheresse et de chaleur, ces pertes sont plus importantes qu'en année moyenne. On peut aussi présumer qu'il en est de même, en fin de révolution, après une coupe à blanc puisque l'apport de litière concerne la totalité des feuilles ou aiguilles du peuplement et que le sol, mis en pleine lumière, se réchauffe fortement en été.

Il se trouve que le peuplement de l'O.Q.S. du Donon a été totalement abattu par la tempête de Décembre 1999. L'occasion se présentait ainsi de voir si les conclusions de l'étude de 1996 se confirmaient et si cette suppression du peuplement, assimilable à une coupe à blanc, avait eu les conséquences présumées.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Rappelons que l'O.Q.S. est situé dans la parcelle 75 de la forêt domaniale du Donon (Bas-Rhin) et que le peuplement d'Épicéa qui l'occupait s'était développé sur un sol brun très acide, limoneux, à la limite des sols podzolisés. Le *tableau 1* en rappelle les caractéristiques essentielles.

L'Office National des Forêts, gestionnaire de la forêt, a fait exploiter et tirer hors de la surface de l'O.Q.S. les arbres abattus (la totalité du peuplement) en prenant soin de ne perturber les lieux que le moins possible. Nous avons laissé plusieurs années s'écouler avant d'effectuer de nouveaux prélèvements de sol, de manière à laisser les nouvelles litières et l'humus se minéraliser. Nous sommes intervenus en 2004 car la parcelle était en voie de repeuplement par des semis naturels d'Épicéa commun et de Sapin pectiné et il aurait été impossible d'opérer convenablement lorsque ces semis auraient constitué des fourrés denses.

La parcelle est encore passablement encombrée de tiges sans valeur et de branchages, l'ensemble étant très irrégulièrement réparti. Le sol est tantôt nu, tantôt couvert de taches de jeunes semis d'Épicéa ou de Sapin de 20 à 30 cm de hauteur, tantôt occupé par de la Canche flexueuse (*Deschampsia flexuosa*). Il était donc impossible de situer les emplacements de prélèvement à proximité des points échantillonnés en 1996. Les piquets signalant les emplacements ont d'ailleurs souvent disparu lors du débardage. Nous avons choisi d'effectuer l'échantillonnage le plus près possible des anciens points, à des endroits accessibles et donc hors des tas de branches ou des taches de semis. Le sol des emplacements choisis est nu ou couvert de Canche.

Tableau 1 - Caractéristiques essentielles du sol (analyses 1986-Rapport d'établissement)

Table 1 - Main soil characteristics (1986, analysis setting up report)

Horizon et profondeur	Argile %	Limons %	Sables %	Matière organique %	C/N	C.E.C. cmol ⁺ kg ⁻¹	Taux de saturation (%) (Ca + Mg + K échangeables)	pH
OH				41	20,4	37,1	6,1	4,0
A 0-5 cm				14	17,8	21,1	2,7	4,1
A/S 5-20 cm	18,9	49,6	41,5	6,2	15,5	12,9	2,2	4,5
S 20-40 cm	16,3	42,2	41,5	3,6	15,8	9,2	2,1	4,5
S/C 40-75 cm	14,9	40,1	41,0			6,8	1,9	4,5

En chaque point ont été prélevés, pesés et analysés : la canche si elle existait, l'ensemble des trois couches OL, OF et OH (Jabiol *et al.*, 1995). Après le tassement dû au débardage des bois et 4 années d'évolution des litières, il était en effet impossible de distinguer avec sûreté chacun de ces trois horizons, et, si nous l'avions fait, la distinction entre les trois couches risquait d'être différente de celle de 1996. On a aussi prélevé l'horizon hémiorganique (A) de 0 à 5 cm, et deux horizons minéraux de 8 à 18 cm et de 25 à 35 cm de profondeur, donc les mêmes niveaux qu'en 1986 et 1996. Les niveaux intermédiaires, 5-8 et 18-25 cm ont été prélevés également pour en mesurer la masse mais n'ont pas été analysés.

Les analyses n'ont porté que sur les trois éléments majeurs Ca, Mg, et K dont le bilan s'était révélé particulièrement instructif dans les études menées en 1996.

Analyses effectuées sur les échantillons prélevés en 2004

- sur les échantillons de canche : Ca, Mg et K totaux par minéralisation à HClO_4 puis dosage par ICP ;
- sur l'ensemble OL+OF+OH : id ;
- sur A (0-5 cm) : id et Ca, Mg et K échangeables (extraction à NH_4Cl) ;
- sur les prélèvements des horizons minéraux 0-5, 8-18, 25-35 cm : Ca, Mg et K échangeables.
- Pour le niveau 18-25 cm, on a adopté des valeurs d'éléments échangeables égales à la moyenne de celles des horizons sus- et sous-jacents. Pour 5-8 cm, on a adopté, pour cause de tassement du sol (*voir plus loin*) les valeurs du niveau 8-18 cm.

Analyses effectuées sur les échantillons de A prélevés en 1996 : Ca, Mg et K totaux

Cette analyse sur les échantillons conservés de 1996 et l'analyse des éléments totaux sur les échantillons de A prélevés en 2004 ont été jugées opportunes pour la raison suivante. En 1996, certaines difficultés étaient venues d'un prélèvement de OH légèrement différent dans le bloc 2 et dans le bloc 1. Il avait fallu procéder à des corrections de masse et de teneur en éléments pour rétablir une comparabilité convenable entre les deux blocs. C'est pourquoi, en 2004, il a semblé préférable de déterminer les quantités totales de calcium, magnésium et potassium dans un ensemble OL+OF+OH+A (0-5 cm), en y ajoutant les éléments contenus dans la végétation si elle existait. Les éléments totaux n'ayant pas été déterminés en A en 1996, il a fallu procéder à cette analyse complémentaire. Pour être tout à fait rigoureux, on déduit des valeurs analysées des éléments dits totaux (en fait totaux + échangeables) celles des éléments échangeables. Pour les échantillons de A les analyses ont fourni les données nécessaires. Pour OL, OF et OH (en fait pour OH, seule couche

d'humus comportant une part d'éléments échangeables) on est parti de l'analyse du profil de 1986 qui donnait à la fois éléments totaux et éléments échangeables en OH pour calculer un pourcentage moyen d'échangeables, pour chaque élément, par rapport à la masse d'éléments « totaux » dans l'ensemble OL, OF, OH. Ce pourcentage a été appliqué aux éléments « totaux » des couches holorganiques de 1996 et 2004, soit 10 % pour Ca, 1 % pour Mg et 8 % pour K.

A partir de ces données ont été effectués un certain nombre de calculs :

- Tests statistiques de comparaison des teneurs en éléments totaux (ensemble OL+OF+OH + A) entre 2004 et 1996 et des teneurs en Ca, Mg et K échangeables des niveaux 8-18 et 25-35 cm ;

- calcul des quantités d'éléments échangeables dans l'ensemble des horizons 5-35 cm en 2004 et en 1996 (à partir des résultats 1996) ;

- calcul de la somme des éléments totaux et échangeables en OL+OF+OH+A (0-5 cm) (+ canche éventuellement) et des éléments échangeables de 5 à 35 cm, et interprétation statistique. En effet, pour l'ensemble OL, OF, OH, A, les éléments totaux constituent une réserve de fertilité à moyen et long terme. La matière organique de A, de simple juxtaposition (Jabiol *et al.*, 1995), est constituée de petits agrégats de OH enfouis par la mésofaune et a la même valeur en terme de fertilité que celle de OH et il n'y a pratiquement pas d'autre source d'éléments totaux. Les éléments échangeables ont une valeur nutritionnelle immédiate. Pour les horizons minéraux, de 5 à 35 cm, qui ne contiennent plus que très peu de matière organique, plus évoluée du reste, nous n'avons retenu que les éléments échangeables.

On dispose de l'ensemble de ces résultats en chacun des 14 points échantillonnés, ces 14 points étant, comme en 1996, répartis en deux blocs de 7 (bloc 1 et bloc 2).

Pour les tests statistiques, on a employé une analyse à deux facteurs : bloc et année, en prenant en compte les 7 valeurs individuelles de chaque bloc (Schwarz, 1963).

RÉSULTATS

Masses des divers horizons

Horizons holorganiques (OL, OF, OH)

Les résultats sont indiqués au *tableau 2*. La masse de ces horizons a diminué d'un peu plus de 30 % de 1996 à 2004. La minéralisation a donc été active, probablement depuis 1999, et a plus que compensé l'apport d'aiguilles consécutif à la tempête, qu'on peut estimer à 2 kg m⁻² environ (aiguilles des huit pousses

Tableau 2 - Masses (kg m^{-2}) et teneurs en éléments totaux (g kg^{-1}) de OL, OF, OH et A (0-5 cm) en 1996 et 2004. Les différences significatives sont indiquées par * (0,05), ** (0,01), *** (0,001). Les teneurs moyennes en Ca, Mg et K de l'ensemble OL, OF, OH en 1996 ont été déterminées à partir des masses totales des prélèvements des trois horizons et des masses d'éléments qu'elles contenaient (nd : caractéristique mesurée seulement sur l'ensemble (OL+OF+OH)). (1) : résultats analytiques, échangeables non déduits

Table 2 - 1996 and 2004 (kg m^{-2}) and total element concentrations (g kg^{-1}) of OL, OF, OH and A (0-5 cm). Significant differences are indicated by * (0,05), ** (0,01), *** (0,001). Mean Ca, Mg, K concentrations of OL, OF, OH (together sampled and analysed) were calculated from total mass of these three horizon samples and from their total content in these elements.

(n.d. : characteristic determined only for OL + OF + OH). (1) analysed results exchangeable elements not deducted.

Horizon	Masses kg m^{-2}		Teneurs en éléments totaux ₍₁₎ g kg^{-1}					
			Ca		Mg		K	
	1996	2004	1996	2004	1996	2004	1996	2004
OL	1,00	nd	2,70	nd	0,40	nd	0,83	nd
OF	2,62	nd	1,50	nd	1,03	nd	1,04	nd
OH	4,10	nd	0,49	nd	1,65	nd	1,44	nd
OL+OF+OH	7,72	5,22*	0,93	1,74***	1,30	1,88**	0,91	2,79***
A (0-5 cm)	18,6	31,0***	0,31	0,37	3,83	3,93	5,98	5,57
A/S (8-18 cm)	38,8	67,9***						
S (25-35 cm)	43,6	38,5						

annuelles feuillées). Si on fait l'hypothèse raisonnable que ces couches holorganiques avaient en 1999, avant la tempête, la même masse qu'en 1996, ce qui signifie aussi que la minéralisation égalait chaque année la chute d'aiguilles, on en déduit que la mise en lumière du sol a considérablement augmenté la vitesse de minéralisation : environ 1,1 kg de litière a disparu annuellement, alors que la minéralisation annuelle, avant tempête et d'après l'hypothèse avancée ci-dessus ne s'élevait qu'à 0,25 kg m^{-2} (2500 kg ha^{-1}).

Horizons minéraux

La masse de terre fine de l'horizon A (0-5 cm) a augmenté de 66 % ce qui n'est explicable que par un tassement du sol dû aux travaux de débardage des bois abattus. Ce tassement semble se faire sentir jusqu'à 20 cm de profondeur environ (masse de l'horizon 8-18 cm augmentée de 75 %). Il sera donc raisonnable, dans le calcul des éléments minéraux totaux stockés dans ces horizons, de leur attribuer une masse égale à celle de 1996, et, pour le niveau 5-8 cm, de lui attribuer la même teneur en éléments échangeables que le niveau 8-18 cm, puisque le tassement de l'horizon 0-5 cm a conduit à effectuer en réalité le prélèvement du niveau 5-8 cm dans l'ancien niveau 8-18. La prise en compte des masses mesurées en 2004 conduirait à un excédent artificiel.

De 25 à 35 cm où la masse de terre fine est comparable à celle de 1996, ce phénomène n'existe plus.

Teneurs en éléments échangeables ou totaux

Éléments échangeables (tableau 3)

Le calcium échangeable augmente de 0 à 25 cm, très nettement de 0 à 18 cm. Le magnésium échangeable varie assez peu, mais marque cependant une notable diminution de 8 à 35 cm. La teneur en potassium échangeable diminue dans presque tout le profil sauf de 8 à 18 cm. Dans l'ensemble, on ne retiendra comme variation très notable que l'augmentation du calcium dans les 20 premiers centimètres, la diminution du magnésium de 18 à 35 cm et la diminution du potassium dans l'horizon S/C, de 25 à 35 cm. La fertilité actuelle du sol est donc maintenue pour le calcium et diminuée pour le magnésium et le potassium.

Éléments totaux (tableau 2)

Les horizons holorganiques se sont nettement enrichis en calcium, magnésium et potassium, tandis que les teneurs en ces éléments ont peu varié en A (0-5 cm).

Quantités d'éléments dans les différents horizons et dans l'ensemble du sol (tableau 4).

Il s'agit de la variation pour huit ans, (juin 1996-avril 2004). Les quantités de calcium ont significativement augmenté dans l'ensemble OL, OF et OH, mais ont diminué légèrement en A (différence non significative). Le total du calcium, total et échangeable dans les couches holorganiques et en A ne varie pas de

Tableau 3 - Teneurs en éléments échangeables en 1996 et 2004, en cmol+/kg. Les différences significatives sont indiquées par *, **, *** suivant qu'elles le sont à 0,05, 0,01, 0,001. (*) : très voisin du seuil de 5 %.

Table 3 - 1996 and 2004 element concentrations in Cmol.kg⁻¹. Significant differences are indicated by *(0,05), **(0,01), *** (0,001). (*) not significant difference but very close to the 5 % level.

Horizons	Teneurs en éléments échangeables en cmol+/kg					
	Ca		Mg		K	
	1996	2004	1996	2004	1996	2004
0-5 cm	0,32	0,69*	0,40	0,41	0,33	0,26*
5-8 cm	0,21	0,43**	0,29	0,27	0,24	0,20*
8-18 cm	0,10	0,17*	0,18	0,13	0,15	0,18
18-25 cm	0,09	0,12*	0,13	0,09*	0,13	0,11*
25-35 cm	0,08	0,08	0,08	0,06(*)	0,12	0,09*

Tableau 4 - Somme des quantités d'éléments totaux et échangeables des horizons holorganiques et de A (0-5 cm) et échangeables de 5 à 35 cm, en kg ha⁻¹. Les différences significatives sont indiquées par *, **, *** suivant qu'elles le sont à 0,05, 0,01, 0,001. (*) : très voisin du seuil à 5%.

Table 4 - Sums of total exchangeable elements in the holorganic and A (0-5 cm) horizons, and of exchangeable ones in the 5-35 cm level, in kg ha⁻¹. Significant differences are indicated by *(0,05), **(0,01), *** (0,001). (*) very close to the 5 % level.

Formes des éléments et horizons	Ca (kg ha ⁻¹)		Mg (kg ha ⁻¹)		K (kg ha ⁻¹)	
	1996	2004	1996	2004	1996	2004
Totaux en OL+OF+OH + canche	76	106*	200	109***	102	150*
Totaux en A (0-5 cm)	54	44	756	749	1088	1056
Echangeables en OH	8	12	2	1	9	13
Échangeables en A	13	27*	9	10	25	19*
Total toutes formes en OL, OF, OH, A	151	189	967	869*	1224	1238
Échangeables de 5 à 35 cm	23	37**	22	16**	67	51**
TOTAL	174	226(*)	989	885*	1291	1289

manière significative. La quantité de calcium échangeable de 5 à 35 cm augmente significativement. Le total du calcium total, dans les horizons holorganiques, hémiorganiques et en A et du calcium échangeable des horizons minéraux, augmente de 50 kg environ pour l'ensemble du sol (30 %) et cette augmentation est presque significative au seuil de 5 %.

Le magnésium au contraire diminue à tous les niveaux (la diminution en A n'est pas significative) et la somme du magnésium échangeable et du magnésium total dans l'ensemble des horizons diminue significativement, au seuil de 5 %. Cette diminution est d'environ 10 % pour les 8 années écoulées de 1996 à 2004.

Le potassium total augmente significativement dans les horizons holorganiques, mais le potassium échangeable diminue dans les horizons minéraux, de sorte que la quantité totale reste constante.

En résumé on observe donc une augmentation assez nette de la réserve en calcium à court et moyen terme, une diminution légère de celle en magnésium et une stabilité du potassium.

ESSAI DE BILAN DES FLUX D'ÉLÉMENTS.

Nous tenterons un bilan des flux d'éléments depuis 1996 de manière à essayer d'appréhender l'effet de l'apport brutal de litière lors de la tempête et de la mise en lumière du sol depuis celle-ci. Nous estimerons d'une part les apports au niveau des horizons supérieurs et d'autre part les transferts vers les horizons minéraux ainsi que la rétention sous forme échangeable dans les

Tableau 5 - Bilan du calcium, du magnésium et du potassium, en kg ha⁻¹, de 1996 à 2004.**Table 5** - Calcium, magnesium and potassium balance in kg ha⁻¹ from 1966 to 2004.

	Ca	Mg	K
Flux	Ca	Mg	K
Apports par les litières (1)	104	33	137
Apports atmosphériques (2)	26	7	41
Apports totaux 3)=(1)+(2)	130	40	178
Variation des éléments totaux en OL+OF+OH +canche, échangeables exclus(4)	30	-91	48
Variation des éléments échangeables en OH (5)	4	-1	4
Variation des éléments totaux et échangeables en OL, OF, OH + canche (6)= (4)+(5)	34	-92	52
Variation des éléments totaux en A (échangeables exclus) (7)	-10	-6	-32
Variation des éléments échangeables en A (8)	14	-1	-6
Variation totaux +échangeables en A (9)=(7)+(8)	4	-7	-38
Variation totale des éléments en OL, OF, OH (et canche) et A (10) =(6)+(9)	38	-98	15
Flux vers les horizons minéraux (11)=(3)-(10)	92	138	163
Altération (12)	5	13	43
Adsorption ou désorption d'éléments échangeables de 5 à 35 cm (13)	14	-6	-16
Immobilisation ligneuse (14)	18	5	22
Flux de drainage=estimé (15)=(11)+(12)-(13)-(14)	65	152	200
Apports totaux + altération-flux de drainage estimé (16)=(3)+(12)-(15)	70	-99	21

divers horizons minéraux, l'altération des minéraux de réserve et la consommation nécessaire à la production de bois de 1996 à 1999, pour en déduire les pertes par drainage. Les éléments immobilisés par la canche pour sa croissance seront ajoutés aux totaux analysés en OL, OF, OH et A car ses racines s'alimentent dans ces horizons superficiels. Au contraire, l'immobilisation pour l'élaboration du bois de 1996 à 1999 sera déduite des flux transitant dans les horizons minéraux car les racines des épicéas prospectent tout le profil.

Nous appliquerons donc le modèle suivant :

Pertes par drainage = flux vers les horizons minéraux + libération d'éléments par altération de minéraux de réserve - rétention (ou désorption) d'éléments échangeables de 5 à 35 cm - immobilisation ligneuse ;

Flux vers les horizons minéraux = apports dans les horizons hologaniques (apports atmosphériques + litières) + variation (positive ou négative) d'éléments totaux et échangeables en (OL+OF+OH+canche) et A.

Le tableau 5 synthétise les résultats.

Apports par la chute de litières

Après la phase de dépérissement de 1983 à 1988, la persistance des aiguilles était redevenue normale et le nombre de

pousses feuillées avait repris sa valeur habituelle de huit pour un peuplement adulte. La masse totale d'aiguilles présente sur les arbres atteignait donc certainement, au moment de la tempête, $8 \times 2500 = 20000$ kg ha⁻¹. Il faut y ajouter les chutes normales d'aiguilles, 2500 kg ha⁻¹ an⁻¹ de 1996 à 1999, soit, sur 3 ans, 7 500 kg. Au total donc un apport d'aiguilles de 27 500 kg. A cette masse a été appliquée la composition de feuilles tombées retenue dans les articles qui rendent compte des résultats de 1996 (Bonneau, 2000 a, b, c, 2005), soit 3 g kg⁻¹, 0,6 g kg⁻¹ et 2 g kg⁻¹ pour Ca, Mg et K respectivement. On aboutit à des totaux de 104, 33 et 137 kg ha⁻¹ pour Ca, Mg et K respectivement.

Apports atmosphériques

Nous avons calculé les apports totaux de 1996 à 1999 (3,5 ans) sur les mêmes bases qu'en 1996, sous couvert : les apports atmosphériques annuels, dépôts secs compris avaient été établis à 5,2 kg de Ca par ha et par an, 1,5 kg de magnésium et 9,4 kg de potassium. Ce sont les valeurs que nous adopterons car il n'y a aucune raison de penser que les apports aient varié notablement de 1996 à 1999 par rapport aux quantités apportées de 1993 à 1996. La durée d'apport est de 3,5 ans, de juin 1996 à décembre 1999. Pour la période 2000-2004, nous avons adopté les valeurs de la pluie hors couvert, puisque le peuplement n'existe plus et que les dépôts secs et occultes sont donc nuls, soit

1,7 kg ha⁻¹ an⁻¹ de Ca, 0,5 kg ha⁻¹ an⁻¹ de Mg et 1,8 kg ha⁻¹ an⁻¹ de K, ceci sur 4, 3 années (de janvier 2000 à avril 2004). La quantité de pluie a été conservée car l'évaporation à la surface du sol ne diminue pas les apports. On arrive ainsi à des apports de 26 kg ha⁻¹ de Ca, 7 kg de Mg et 41 kg de K.

Variation des quantités d'éléments dans les couches holorganiques et en A

Elle se déduit directement du *tableau 4* et s'établit à + 38 kg pour Ca, -98 kg pour Mg et + 15 kg pour K.

Altération des minéraux de réserve

Elle avait été estimée en 1996, sur la base des travaux d'Ez-zaïm (1997), selon une fourchette dont nous ne retiendrons ici que la valeur moyenne: 0, 6 kg ha⁻¹ an⁻¹ de calcium, 1,6 kg de magnésium et 5,4 kg de potassium, soit, pour les 8 années sur lesquelles porte le bilan: 4,8 kg de Ca, 12,8 kg de Mg et 43,2 kg de K. Les valeurs portées au *tableau 5* ont été arrondies.

Rétention d'éléments échangeables de 5 à 35 cm

Elle se déduit directement du *tableau 4*: environ 14 kg de Ca, - 6 kg de Mg (désorption) et - 16 kg de K (désorption).

Immobilisation ligneuse

L'immobilisation ligneuse est à prendre en compte sur 4 ans, de 1996 à 1999, la tempête n'étant survenue qu'en décembre, permettant pour l'année 1999 une production normale. De 2000 à 2004, il n'y a plus d'immobilisation puisque le peuplement n'existe plus. Nous avons retenu, pour les quantités d'éléments immobilisés, les valeurs adoptées en 1996, soit 4,5 kg ha⁻¹ an⁻¹ de calcium, 1,3 kg de magnésium et 5,6 kg de potassium, soit, pour 4 ans, 18 kg de Ca, 5,2 kg de Mg et 22,4 kg de K. Les valeurs du *tableau* ont été arrondies.

Flux estimé de drainage

Il s'établit, d'après ces calculs à 65 kg de Ca, 152 kg de Mg et 200 kg de K.

Mais il est instructif de rapprocher ces flux de drainage des apports. On voit alors (dernière ligne du *tableau 5*) que le calcium est évacué hors du sol en moins grande quantité qu'il n'est apporté, et que le sol s'enrichit donc, après une phase d'appauvrissement de 1986 à 1996 (*tableau 6*). Cet enrichissement se répartit à peu près également entre les horizons holorganiques et A d'une part et les horizons minéraux d'autre part. Le bilan du potassium est légèrement excédentaire et on retrouve donc une situation identique à celle de 1986-1996. Mais à l'inverse de cette période, il y a gain important dans les horizons holorganiques et perte en A et dans les horizons minéraux. Mais l'appauvrissement en magnésium est considérable: les pertes excèdent les apports de presque 100 kg.

DISCUSSION

La tempête a mis le sol à découvert, entraîné l'apport d'une quantité importante de litières, l'augmentation de la quantité d'eau drainée puisque l'interception par les cimes est annulée et que le peuplement ne consomme plus d'eau par transpiration, une minéralisation accélérée par meilleur échauffement du sol. Ceci a évidemment modifié la vitesse des processus et changé les flux d'éléments aux différents niveaux du profil, notamment à l'interface entre horizons holorganiques et horizons minéraux et à la base du sol. Ces modifications ont entraîné un appauvrissement considérable en magnésium: la réserve de cet élément dans les couches holorganiques et l'horizon hémiorganique A a fortement diminué (perte de presque 100 kg ha⁻¹), ainsi que la forme échangeable dans les horizons minéraux (perte de 6 kg, soit plus du quart de la quantité mesurée en 1996). La quantité de magnésium perdue par drainage est bien supérieure aux apports et même (*tableau 5*) le flux de cet élément des horizons holo- et hémiorganiques est intégralement entraîné hors du sol par les eaux de drainage. Au contraire, le calcium s'accumule: les réserves dans les couches holorganiques augmentent, les quantités perdues par drainage sont nettement plus faibles que les flux émanant des horizons supérieurs, le calcium échangeable augmente dans les horizons minéraux. On constate au contraire une perte de potassium échangeable de 22 kg, compensée par un gain dans les horizons holorganiques et hémiorganiques. On est tenté de voir dans cette évolution l'effet d'un apport massif de calcium par la chute d'une grande quantité d'aiguilles lors de la tempête de 1999; cette quantité se serait minéralisée activement, provoquant la désorption, du complexe d'échange des horizons minéraux, de quantités notables de potassium et de magnésium. Par contre la perte de magnésium à partir des horizons OL, OF et OH est très forte et tous les compartiments, totaux et échangeables en A, échangeables de 5 à 35 cm, subissent aussi des pertes.

Le *tableau 6* compare les pertes de la période 1996-2004 à celles de 1986-1996 (ces dernières ramenées à 8 ans). Il y a un gain de calcium au lieu d'une perte, le potassium reste stable de 1996 à 2004, alors qu'il avait augmenté au cours de la période antérieure. Mais on a perdu quatre fois plus de magnésium, ce qui confirme la difficulté de ce sol très aluminisé à retenir cet élément. Le magnésium apparaît bien comme le « tendon d'Achille » de l'écosystème forestier dans ces types de sol. Les quantités importantes de magnésium encore présentes en A (*tableau 4*) ne permettent pas de nuancer cette constatation puisque les quantités minéralisées sont intégralement perdues par défaut d'adsorption dans les horizons minéraux. On retrouve là une situation déjà signalée par Raspe *et al.* (1998): l'essentiel de l'alimentation minérale des arbres en magnésium se fait à partir des horizons holorganiques.

Il est intéressant de comparer les pertes par drainage après tempête à celles qui avaient été mesurées de 1993 à 1996, lorsque le peuplement était encore sur pied. Après déduction des flux

Tableau 6 - Comparaison des pertes ou gains d'éléments pour les deux périodes 1986-1996 (ramenée à 8 ans) et 1996-2004, en kg ha⁻¹.
Table 6 - 1996-2004 versus 1986-1996 element loss or gain in kg ha⁻¹.

Période		Ca	Mg	K
1986-1996 (ramenée à 8 ans)	Horizons holorganiques	-11	-36	-6
	Horizons minéraux	-8	+11	+23
	Total	-19	-25	+17
1996-2004	Horizons holorganiques	+34	-92	+52
	A	+4	-7	-38
	Horizons minéraux	+14	-6	-16
	Total	+52	-105	-2

de drainage de 1996 à 2000, 8 kg ha⁻¹ de Ca (2 kg ha⁻¹ an⁻¹), 7 de Mg (1,7 kg ha⁻¹ an⁻¹) et 7,6 de K (1,9 kg ha⁻¹ an⁻¹) (Bonneau 2000 a,b, c, 2005) il reste pour la période 1999-2004, après tempête, des pertes par drainage de 13 kg ha⁻¹ an⁻¹ de Ca, 34 kg ha⁻¹ an⁻¹ de Mg et 45 kg ha⁻¹ an⁻¹ de K. Les pertes sont donc environ 6 fois plus élevées après la tempête qu'avant celle-ci pour le calcium, 20 fois pour le magnésium et 24 fois pour le potassium. Ceci s'explique d'une part par l'augmentation du flux d'eau : ce dernier, avant tempête était estimé à 400 mm an⁻¹ (pluie - interception - évapotranspiration), tandis qu'il n'est que peu inférieur à la pluie incidente après la destruction de la forêt, de l'ordre de 850 à 900 mm : en effet, il n'y a qu'une perte 10 à 15 % par évaporation directe à la surface du sol et transpiration de la canche. D'autre part l'apport massif de litières et la minéralisation activée des humus a certainement provoqué un regain de lixiviation à partir des couches d'humus.

Incidemment, il est intéressant de constater l'accumulation en A du magnésium et du potassium, beaucoup plus forte que celle du calcium, que ce soit en 1996, en fonctionnement normal et équilibré de l'écosystème, ou en 2004 (tableau 4). Il faut en déduire, logiquement, que l'horizon hémi-organique conserve davantage le magnésium et le potassium que le calcium et que, pour ce dernier élément, l'équilibre entre apports depuis les horizons holorganiques et perte vers les horizons minéraux est atteint plus vite, pour une accumulation moindre. La cause profonde resterait à élucider (les coefficients de Gapon, dans cet horizon riche en matière organique, seraient très différents de ceux des horizons purement minéraux).

CONCLUSION

L'hypothèse formulée après étude des résultats de 1996 (Bonneau, 2000 a, b, c, 2005) est pleinement confirmée. Dans les sols très acides, le magnésium, se comportant comme prévu par les travaux d'Hildebrand (1986), ne peut se fixer que faiblement

sur le complexe adsorbant des horizons minéraux, excessivement occupé par l'aluminium échangeable. Le magnésium libéré par la minéralisation des litières est donc entraîné hors du sol par les eaux de drainage. Ce phénomène survient à l'occasion de chaque épisode de forte minéralisation (par exemple été chaud et sec suivi d'une période de réhumectation par temps doux en automne, ou température élevée au printemps lorsque le sol est encore bien pourvu en eau et avant ou après la phase de forte absorption du peuplement. Il doit aussi se produire en fin de révolution, après coupe à blanc éventuelle du peuplement forestier, et même, dans ces circonstances, avec une ampleur extrême. C'est ce que les études menées en 2004, après le renversement complet du peuplement lors de la tempête de décembre 1999, ont parfaitement confirmé.

Ainsi à l'effet connu (Duchaufour, 1983, 2001) des humus de type dysmoder ou mor, la libération d'acides organiques, vient s'ajouter un second processus : la libération brutale de cations par minéralisation, cations qui, par effet antagoniste de l'aluminium échangeable, ne peuvent se fixer sur les colloïdes des horizons minéraux et sont donc éliminés par les eaux de drainage. Cet effet est particulièrement fort pour le magnésium, tandis le potassium est mieux conservé, encore que subissant des pertes importantes par drainage. Le calcium, suivant les circonstances et notamment l'abondance des chutes de litière et l'intensité de la minéralisation, enregistre des gains ou des pertes. Ce comportement du calcium de 2000 à 2004 constitue une différence importante avec les conclusions tirées des travaux de 1996. Cet élément, en cas d'apports importants, semble capable de désorber, à son profit, le potassium et le magnésium.

Les sols s'appauvrissent donc progressivement. Les analyses d'aiguilles pratiquées en 1996 ont effectivement mis en évidence une insuffisance nette de l'alimentation calcique et magnésienne. Plus d'une dizaine d'essais réalisés dans les Vosges et les Ardennes au cours des années 1980 (Bonneau *et al.*, 1992) ont confirmé le rôle très positif d'un amendement dolomitique sur la vitalité et la production des peuplements d'Épicéa ou de Sapin.

Leur effet s'explique d'ailleurs de plusieurs manières : restauration partielle du sol en calcium et magnésium (dans la dolomie employée, la proportion de magnésium par rapport au calcium était supérieure à ce qu'elle est dans les litières : un tiers au lieu d'un sixième (Bonneau, 2000 c), restauration d'une mycorrhization efficace que la forte aluminisation des sols fait régresser au profit d'une flore microfungique qui nécrose les fines racines et réduit leur rôle absorbant (Devèvre *et al.*, 1995) et diminution de l'effet acidifiant des apports d'azote par meilleure consommation des nitrates. Ces résultats sont cohérents avec l'état actuel des teneurs en Ca, Mg et K échangeables des horizons minéraux au Donon : le potassium, malgré des pertes notables à l'état échangeable est encore suffisant pour une alimentation minérale correcte ; par contre calcium et magnésium sont nettement insuffisants (Bonneau, 1995).

BIBLIOGRAPHIE

- Bonneau M., Landmann G., Adrian M., 1992. - La fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sol acide : essais dans les Vosges. *Revue forestière française*, XLVI, pp. 207-223.
- Bonneau M., 1995 - Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. E.N.G.R.E.F.-Nancy, 367 pages.
- Bonneau M., 2000 a. - Évolution d'un sol forestier acide des Vosges sur une période de 10 ans. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 2, n° 7, pp. 99-108.
- Bonneau M., 2000 b. - Évolution sur dix ans de la fertilité minérale d'un sol acide des Vosges. *Revue forestière française*, LII, 6, pp. 519-529.
- Bonneau M., 2000 c - Observatoire de la Qualité des Sols du Donon. Résultats 1996. Rapport Unité Cycles bio-géochimiques, INRA, Centre de Nancy, 115 pages + annexes.
- Bonneau M., 2005 - Evolution of the mineral fertility of an acidic soil during a period of ten years in the Vosges mountains. *Ann. For. Sci.*, 62, pp. 253-26.
- Devèvre O., Garbaye J., Le Tacon F., Perrin R., Estivalet D., 1995 - Role of the rhizosphere microfungi in the decline of Norway spruce in acidic soils. *In*: Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains. G. Landmann, M. Bonneau Eds, Springer, pp. 331-352.
- Duchaufour Ph., 1983 - Pédologie, tome 1 : Pédogénèse et classification, 2e édition, Masson, 491 pages.
- Duchaufour Ph., 2001 - Introduction à la Science du Sol - 6^e édition de l'Abrégé de Pédologie, Dunod, 331 pages.
- Ezzaïm A., 1997 - Intérêt de la mesure du flux d'éléments issu de l'altération des minéraux du sol dans le calcul des bilans minéraux d'un écosystème forestier. Le cas des plantations de Douglas dans le Beaujolais (France). Thèse de Doctorat, Sciences de la Terre, Université Henri Poincaré, Nancy.
- Hildebrand E. E., 1986 - Zustand und Entwicklung der Austauschigenschaften von Mineralböden an Standorten mit erkrankten Waldbestand. *Forstw. Cbl.*, 105, pp. 60-76.
- Jabiol B., Brêthes A., Ponge J.F., Toutain F., Brun J.J., 1995 - L'humus sous toutes ses formes. ENGREF-Nancy, 63 pages.
- Kreutzer K., Beier C., Bredenmeier M., Planck K., Cummings T., Farrell E. P., Lammersdorf N., Rasmussen L., Rothe A., Weiss T., Xu Y.J., De Wissler P.H., Wright R.F. (Eds), 1998 - Atmospheric deposition in five coniferous forest ecosystems: a comparison of the control of the EXMAN sites, *For. Ecol. Manage.*, 101, pp. 125-142.
- Poszwa A., Dambrine E., Pollier B., Fichter J., 1998 - Mise en évidence directe de l'acidification d'un sol forestier à Aubure (bassin versant du Strengbach, Haut-Rhin, France), *Écologie*, 29, pp. 407-410.
- Ranger J., Augusto L., 2001 - Impact of tree species on soil solutions in acidic conditions, *Ann. For. Sci.*, 58, pp. 47-58.
- Raspe S., Feger K.H., Zöttl H. W (Eds), 1998 - Oekosystemforschung im Schwarzwald. Ministerium für Umwelt und Verkehr, Stuttgart. 533 pages.
- Raubuch M., Beese F., Bolger T., Andersson J.M., Berg M.P., Couteaux M., Ineson P., Mc Carthy F., Splatt P., Verhoef H.A., Wilson T., 1998 - Acidifying process and acid-base reaction in forest soils reciprocally transplanted along European transect with incremental pollution. *Biogeochemistry*, 41, pp. 71-88.
- Raulung-Rasmussen K., Larsen J.B., 1990 - Causes and effects of soil acidification in forests, with particular reference to the effects of air pollution and silvicultural practices. *Dansk Skovbrugs Tidsskrift*, 75, pp. 1-41.
- Schwarz D., 1963 - Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. Flammarion - Collection « Statistique en biologie et en médecine », 318 pages.
- Tamm C.O., Hallbäck L., 1988 - Changes in soil acidity in two forest areas with different acid deposition 1920 s to 1980 s, *Ambio*, 37, pp. 599-604.