

Évolution d'un sol forestier acide des Vosges sur une période de 10 ans

Observatoire de la Qualité des Sols du DONON

M. Bonneau, S. Belkacem, C. Nys, J. Ranger, D. Gelhaye, Y. Lefèvre, D. Humbert

INRA, Centre de Nancy, Cycle biogéochimiques - Champenoux 54280

RÉSUMÉ

Un sol très acide des Basses Vosges, sous peuplement d'épicéa de 80 ans environ, dont 25 profils avaient été soumis à des analyses détaillées en 1986, a été à nouveau prélevé en 1996 et 14 profils, formant deux blocs homogènes de 7, ont été analysés. Les masses des couches holorganiques et la masse de terre fine à l'hectare ont été déterminées. Les principales évolutions sont : une baisse de masse de OH ; une diminution notable de la somme des éléments totaux des couches holorganiques et des éléments échangeables de 0 à 35 cm, particulièrement sensible pour le magnésium mais notable aussi pour le calcium ; une augmentation de la concentration de P total en OH. Cette augmentation est vraisemblablement liée à une minéralisation active de OH au cours de certaines années chaudes, mais les teneurs en Ca, Mg et K totaux évoluent peu, ce qui tend à indiquer une mauvaise rétention de ces cations par les colloïdes organiques. Les masses totales de calcium et magnésium ont fortement diminué en OH, en liaison avec la diminution de masse du matériel organique. Le plomb total a fortement diminué en OL et le cadmium total en OL et OF, résultat probable des mesures de dépollution. La concentration en K échangeable a augmenté de 0 à 5 cm. En résumé on peut dire que la fertilité chimique des horizons minéraux, si ce n'est une diminution du pH KCl de 0 à 5 cm, n'a pas varié. Par contre, si la fertilité à court terme paraît stable, on peut concevoir des inquiétudes pour l'avenir du fait des diminutions constatées de la somme du magnésium et du calcium totaux dans l'ensemble des couches holorganiques et échangeables dans les niveaux organo-minéraux. Cette diminution paraît liée essentiellement à la fluctuation de masse des couches holorganiques et à la forte aluminisation des horizons minéraux qui, de ce fait, selon Hildebrand (1986), sont incapables de retenir les cations libérés par la minéralisation de OH, tout particulièrement le magnésium. L'acidification naturelle ou anthropique agit donc plus par son cumul au cours des précédentes décennies que par son action actuelle. Elle tend à s'opposer à la recharge du complexe adsorbant qui pourrait se produire chaque fois que la couche OH se minéralise plus activement par effet climatique annuel, ou en fin de révolution lorsque la minéralisation de OH l'emporte sur le prélèvement nécessaire à la production de bois et de nouvelles aiguilles, prélèvement qui diminue du fait du vieillissement du peuplement.

Mots clés

Acidification, évolution, fertilité, observatoire de la qualité des sols, sols forestiers

SUMMARY

EVOLUTION FOR A TEN YEARS PERIODE (1986-1996), OF AN ACID FOREST SOIL IN THE VOSGES (FRANCE)

The soil of a 80-year spruce stand in the Basses Vosges (East of France), of which 25 profiles were analysed until 35 cm depth in 1986, was analysed again in 1996, but 14 profiles only (2 homogeneous blocs of 7 profiles) were submitted to these new analyses. Among these 14 profiles, four (two in each bloc) were taken up triplicate, the three points being at 1 meter each other, in order to estimate the local variation. Weight of the upper humus layers (OL, OF, OH) and of the fine earth (< 2 mm) were determined. New analyses, in 1996, of samples which were taken up in 1986 and kept during ten years in closed bottles, showed several differences of which causes are discussed. Thus 1996-1986 differences were tested taking into account both the initial 1986 values and the corrected 1986 values after new analysis in 1996. It was considered that the most probable value was the corrected 1986 value for total elements (difference between 1986 analysis and 1996 new analysis of 1986 sample is mainly due to small changes in the operating ways), while, for exchangeable or free elements, the most probable value was the non corrected 1986 value (difference between 1986 and 1996 analyses of 1986 taken up samples is thought to be mainly due to evolution of the samples during the ten years of stocking in closed bottles). 1996-1986 differences were considered as significant only when four conditions were fulfilled: i)-difference between 1996 and 1986 corrected value for total elements, or 1996 and non corrected 1986 value for exchangeable element should be significant at the 1 % level; ii) -the difference between 1996 and non corrected value for total elements or between 1996 and 1986 corrected value for exchangeable elements should be significant at the 5 % level; iii)- the differences between 1996 and 1986 corrected or non corrected value should be in the same sens; iv- the difference between the 1996 and the most probable 1986 value should be higher than 1.96 time the mean standard deviation of the four triplets taken up for estimation of the local variability.

Not only the qualitative evolution was tested, but the quantitative one too. Thus we calculated the sum of the total Ca, Mg and K in the organic levels and of the exchangeable form of these elements in the mineral horizons, as this sum is representative of the mid-term fertility.

The most important changes were:

i)- in the organic layers: decrease of OH weight, probably caused by active mineralisation during several warm summers, increase in the total P in the OH layer, increase in the total K in OF, decrease of Cr in OL and OF, and of Pb in OL (use of unleaded fuel), decrease of the mass of total Ca and Mg in OH.

ii)- in the mineral horizons, all significant differences were in the 0-5 cm level (A1): decrease of the KCl pH, increase of organic C and N, increase in exchangeable K, increase in EDTA extractable Cu increase in exchangeable H⁺.

iii)- the sum of the total Ca in OL, OF, OH and of the exchangeable form of this element in the mineral horizons decreased from about 14 kg/ha in ten years, while the same sum for Mg decreased more strongly (40 kg/ha), that is respectively 1. and 2.2 % of the 1986 stocks of these elements. We can conclude shortly that mineral horizons fertility did not vary, except a little fall of the KCl pH in the 0-5 cm horizon. On the contrary, we might worry about the decrease of the set of Mg, and Ca, in holorganic and organo-mineral and mineral horizons together, which is the main resource for the future decades. This decrease seems to result from fluctuations in mass of organic layers and from inability of the mineral horizons to adsorb base cations, namely Mg, coming from OH mineralization, because their high content in exchangeable Al, according to Hildebrand (1986). Result of both phenomena is a loss of bioelements. Thus accumulated acidification during the past decades, either natural or anthropic, seems more detrimental than today acidic pollution.

Key-words

Acidification, forest soil, soil fertility, soil quality permanent observatory.

RESUMEN

EVOLUCIÓN DE UN SUELO FORESTAL ÁCIDO DE LOS VOSGOS (Observatorio de la Calidad de los Suelos del Donon) sobre un periodo de 10 años

Se eligió un suelo muy ácido de los Vosgos Bajos, bajo población de *épicea* de alrededor de 80 años, cuyos 25 perfiles fueron sometidos a análisis detallados en 1986, un nuevo muestreo se hizo en 1996 y 14 perfiles, en dos bloques de 7, fueron analizados. Las masas de las capas holorgánicas y la masa de tierra fina por hectárea fueron determinadas. Las principales evoluciones son: una disminución de masa de OH; una disminución notable de la suma de los elementos totales de las capas holorgánicas y de los elementos intercambiables de 0 a 35 cm, particularmente sensible por el magnesio pero notable también por el calcio; un aumento de la concentración de P total en OH. Este aumento es verosimilmente ligado a una mineralización activa de OH, ligado con la disminución de masa del material orgánico. El plomo total disminuyó fuertemente en OL y el cadmio total en OL y OF, resultado probable de la decontaminación. La concentración en K intercambiable aumentó de 0 a 5 cm. En resumen, se puede decir que la fertilidad química de los

horizontes minérales, salvo una disminución del pH KCl de 0 a 5 cm, no vario. Al contrario, si la fertilidad a corto plazo parece estable, se puede tener inquietudes por el futuro del hecho de las disminuciones constatadas de la suma del magnesio y del calcio totales en todas las capas holorgánicas e intercambiables en los niveles organo-minerales. Esta disminución parece ligada esencialmente a la fluctuación de masa de las capas holorgánicas y a la alta aluminización de los horizontes minérales que, según Hildebrand (1986), no son capaces por retener los cationes liberados por la mineralización de OH, particularmente el magnesio. La acidificación natural o antrópica actúa más por su acumulación en el curso de las precedentes decenas que por su acción actual. Tiende a oponerse a la recarga del complejo absorbente que podría producirse cada vez que la capa OH se mineraliza más activamente por efecto climático anual, o al final de ciclo cuando la mineralización de OH está más alta que la toma necesaria a la producción de madera y des nuevas agujas, toma que disminuye del hecho del envejecimiento de la población.

Palabras claves

Acidificación, evolución, fertilidad, observatorio de la calidad de los suelos, suelos forestales.

Le dépérissement des forêts, à partir de 1982-1983, a attiré l'attention sur l'effet néfaste d'une trop forte acidité des sols et d'une teneur en aluminium trop élevée sur la santé des forêts (Devêvre *et al.*, 1993,1995; Bonneau, 1989; Landmann et Bonneau, 1995). Plus récemment, l'apparition et l'approfondissement de la notion de gestion durable des forêts a conduit à des questionnements sur l'évolution des stocks d'éléments biogènes échangeables dans les sols forestiers oligotrophes. La difficulté certaine d'évaluer cette évolution sur des pas de temps raisonnables et l'incertitude des déterminations ont conduit à aborder cette question par des évaluations de bilans "apports extérieurs + libération d'éléments par les minéraux du sol - immobilisation ligneuse - pertes par drainage" (Ranger et Bonneau, 1984). Dans les sols pauvres, ces bilans se révèlent presque toujours négatifs (Marques, 1996; Dambrine, 1997; Mohammed Ahmed, 1992; Ranger *et al.*, 1994) de quelques kg/ha/an pour le calcium et le magnésium, le plus souvent positifs pour le potassium. D'autre part on sait que, sous l'effet des apports anthropiques de composés azotés, le stock d'azote des sols a au contraire tendance à augmenter (Thimonier, 1994; Dupouey *et al.*, 1998).

Cependant les évolutions tirées des bilans restent relativement incertaines et il est indispensable de vérifier ces tendances par des mesures réelles in situ (bien que la durée des observations ne puisse généralement pas couvrir la totalité d'une révolution forestière et donc l'évolution de la fertilité du sol au cours d'un cycle sylvicole complet), ce qui constitue la limite majeure des approches diachroniques. C'est dans cette intention qu'a été installé en 1986 dans les Vosges un "observatoire de la qualité des sols" (O.Q.S.). Il est l'une des onze

parcelles installées en France dans le cadre du projet "Observatoire de la Qualité des sols" (Martin *et al.*, 1999) qui s'adresse majoritairement, outre quelques sols de forêt, à des sols agricoles (ministère de l'Environnement et Institut National de la Recherche Agronomique). En dehors de ce projet, les 102 parcelles du réseau RENECOFOR (réduites malheureusement d'une trentaine après les tempêtes de décembre 1999), de l'Office National des Forêts (Ulrich, 1995) jouent un rôle partiellement identique.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Conditions stationnelles

La parcelle choisie se situe en forêt domaniale du Donon, parcelle 75, sur un affleurement de spillites dévono-dinantiennes. Cet emplacement a été choisi:

a) parce qu'on n'avait trouvé, sur les substrats plus riches qui étaient envisagés au départ, mais qui sont souvent des reconquêtes de la forêt sur des sols agricoles, que des peuplements résineux hétérogènes (la liaison de cette opération avec le programme national DEFORPA de recherche sur le dépérissement des forêts imposait de travailler sur des parcelles d'épicéa commun ou de sapin pectiné, essences le plus nettement touchées par le dépérissement et qui, par ailleurs, augmentent les risques de dégradation du sol du fait de la captation élevée d'aérosols acides par leur feuillage) (Nys, 1987; Dambrine et Nourrisson, 1990).

b) en raison de sa proximité avec la tour de mesure des polluants atmosphériques du Donon (programme DEFORPA) qui

apportait une connaissance générale de l'ambiance de pollution, y compris la composition des pluies incidentes. Un ensemble de dispositifs d'étude comprenant tour, observatoire de la qualité des sols et chambres à ciel ouvert (DEFORPA) était ainsi constitué.

Les pluies sont nettement acides, avec un pH moyen de 4,5. La pollution par SO_2 a été très faible depuis l'installation de l'observatoire (moins de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la teneur de l'air en ozone varie de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en été (moyennes mensuelles). Les aérosols et les brouillards sont parfois très acides (le pH des brouillards liés à l'abaissement de stratus peut descendre à 2,9) (Ulrich, 1991).

Le climat est de type montagnard avec une température moyenne annuelle de l'ordre de 8° et une pluviométrie de 1510 mm bien répartie dans l'année.

Le peuplement est une pessière âgée de 80 ans environ en 1986, équienne, de densité homogène et correspondant aux règles de sylviculture locale, mêlée de quelques tiges de hêtre.

Le sol est un sol brun acide, sablo-limoneux, très désaturé, à dysmoder (BRUNISOLS désaturés du Référentiel Pédologique de 1995). Le tableau 1 indique ses caractéristiques principales en 1986.

Prélèvements et analyses 1986

Prélèvements

La surface totale de l'OQS Donon est de 42 ares (rectangle de 70×60 m). Une grille de 10×10 m a été matérialisée en 1986 et, parmi ces 42 points, 25 ont été choisis de manière à ce qu'ils soient régulièrement répartis dans la parcelle et évitent les conditions anormales (pieds d'arbres, accumulation de branches liées aux dernières éclaircies, blocs affleurants).

En chacun de ces 25 points, on a prélevé :

- les couches OL, OF et OH individuellement sur un carré de $0,1 \text{ m}^2$. Leur poids sec a également été déterminé. Les analyses ont porté sur le matériel sec, après broyage pour les éléments totaux;

- les couches 0-5, 8-18, 25-35 cm, les profondeurs étant mesurées à partir de la base de OH. Les analyses ont porté sur la terre fine.

Après prélèvement, les fosses (ouvertes à la bêche sur $0,1 \text{ m}^2$ à l'aplomb des prélèvements d'humus) ont été rebouchées et l'emplacement des prélèvements, situé généralement à 80 cm en direction sud-ouest du piquet de grille, a été matérialisé par une baguette de plastique rouge.

Tableau 1 - Analyse du sol sur fosse en bordure nord de l'observatoire Le complexe d'échange est analysé à pH 7 (méthode Metson), sauf l'aluminium dont la valeur a été titrée d'analyses ultérieures à l'intérieur de l'observatoire après analyse à NH_4Cl . La capacité d'échange au pH du sol (correspondant à l'analyse de Al échangeable) serait à peu près la moitié de celle indiquée ici; P_2O_5 est déterminé par la méthode Duchaufour (double extraction à H_2SO_4 0,004 N et OHNa 0,1 N)

Table 1 - Soil analysis. Sampling was done in a pit in the north vicinity of the Observatory. CEC and exchangeable cations were determined at pH 7 (method Metson). Exchangeable Al only is given after other analyses, inside the observatory, by NH_4Cl extraction. CEC at soil pH (corresponding to Al value) should be about half of that in the above table; P_2O_5 determination is made by Duchaufour method (extraction by H_2SO_4 0,004 N, then OHNa 0,1 N)

	Granulométrie %					C org total %	N org total %	C/N	complexe d'échange cmolc/kg					P_2O_5 ‰
	A	LF	LG	SF	SG				CEC	Ca	Mg	K	Al	
OH	-	-	-	-	-	20,5	1,00	20,4	37,1	1,2	0,49	0,56		-
A1 0-5 cm	-	-	-	-	-	7,0	0,39	17,8	21,1	0,2	0,16	0,22	7,55	-
A1/S 5-15 cm	18,9	29,1	10,5	15,5	26,0	3,1	0,20	15,5	12,9	0,1	0,06	0,12	5,36	0,17
S 15-40 cm	16,3	27,6	14,6	17,3	24,2	1,8	0,11	15,8	9,2	0,1	0,02	0,07	4,07	0,36
S/C	14,9	24,9	15,2	18,3	26,7	-	-	-	6,8	<0,1	0,01	0,07		-

Analyses

Les déterminations suivantes ont été effectuées :

Sur les couches OL, OF, OH :

- éléments totaux C, N, P, S, Cu, Ca, Mg, K, Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn;

- éléments échangeables sur OH seulement : Ca, Mg, K, Mn, Fe, Al, H⁺ (en réalité ces déterminations d'éléments échangeables ont été effectuées en 1996 sur les échantillons de 1986 conservés à l'état sec à l'air dans des bocaux de plastique; une certaine évolution de 1986 à 1996 n'est donc pas totalement exclue).

Pour la détermination des éléments totaux, les échantillons ont été minéralisés par ignition et reprise par HCl, puis les métaux déterminés par spectrométrie d'absorption atomique (Ca, Mg, Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) ou d'émission (K) ou par colorimétrie (P, S). L'azote a été déterminé par la méthode Kjeldahl et le carbone par oxydation sulfo-chromique. Pour les éléments échangeables on a utilisé la méthode indiquée ci-après pour les horizons organo-minéraux.

Sur les niveaux 0-5, 8-18, 25-35 cm :

- éléments totaux : C et N (même méthode que ci-dessus), S (fluorescence X), Mn, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn (par minéralisation HF et absorption atomique);

- éléments échangeables : Ca, Mg, K, Mn, Fe, Al, H⁺; ces formes sont extraites par agitation dans NH₄Cl 0,5 N. H⁺ et Al sont déterminés par titration et les autres éléments par spectrométrie d'absorption atomique. La CEC est obtenue par sommation des éléments échangeables;

- éléments assimilables : P₂O₅ par extraction à l'acide citrique à 2 % et dosage colorimétrique, Mn réductible (acétate d'ammonium + hydroxylamine), Cu et Zn extraits à l'EDTA;

- Fe et Al libres : méthode Deb (tartrate de Na et dithionite de Na) pour Fe et Tamm modifiée (acide oxalique + oxalate d'ammonium + dithionite de Na) pour Al.

Prélèvements et analyses 1996

Prélèvements

Ils ont été effectués aux mêmes points qu'en 1986, mais à un mètre au nord du piquet de grille. En effet, en sol forestier, contrairement aux sols agricoles, le sol n'est pas réhomogénéisé par les travaux aratoires entre les deux époques de prélèvement et tout point de prélèvement est un site perdu pour l'avenir. D'où le souci de ne pas renouveler trop fréquemment les prélèvements. En outre, sur quatre de ces points, on a triplé le prélèvement (3 points en triangle à un mètre de distance) afin d'évaluer la variabilité locale. Sur 12 des points la quantité de terre fine par unité de surface a été déterminée par pesée pour les niveaux 0-5, 8-18, 25-35 cm destinés aux analyses, ainsi que pour les niveaux intermédiaires 5-8 cm et 18-25. Rappelons que cette détermination de la masse de terre fine n'avait pas été faite

en 1986, car à cette époque on envisageait surtout un suivi qualitatif des propriétés des horizons minéraux. Ce n'est qu'ultérieurement, à la faveur de l'évolution des idées sur le maintien de la fertilité chimique des sols, que la préoccupation de l'évolution quantitative des principales formes d'éléments biogènes (formes biodisponibles essentiellement) s'est faite jour.

Analyses

Les mêmes déterminations qu'en 1986 ont été réalisées, mais seulement sur 14 points parmi les 25 prélevés. En effet l'examen des résultats de 1986 (A. Leprêtre, Université de Lille, rapport non publié) a montré une légère hétérogénéité à l'intérieur de la parcelle (gradient général d'est en ouest), mais la possibilité d'individualiser, parmi les 25 points étudiés, deux groupes homogènes de sept points, l'un à l'est, l'autre à l'ouest. Quelques modifications sont intervenues dans le traitement des échantillons, tout en conservant l'essentiel des méthodes d'extraction et d'analyse. Pour les couches OL, OF et OH, la minéralisation préalable à la détermination a été effectuée par digestion dans HNO₃, et l'analyse des métaux, ainsi que du soufre, par ICP. Pour les échantillons des niveaux 0-5, 8-18 et 25-35 cm, la minéralisation HF en vue de la détermination des éléments totaux a été conservée mais l'ICP a été substituée à l'absorption atomique. On a en plus déterminé la texture de la terre fine des horizons organo-minéraux et minéraux.

Par ailleurs, pour vérifier la validité des analyses de 1996 par rapport à celles de 1986, un certain nombre d'échantillons de 1986 ont été réanalysés en 1996. Les éléments échangeables ont été à nouveau déterminés sur tous les échantillons de 1986 correspondant aux 14 points privilégiés, ainsi que C, N, Ca, Mg, K, P, S totaux des couches OL, OF, OH.

Mesure du flux d'éléments dans les eaux de percolation

De 1993 à 1996 on a recueilli les eaux de pluie sous couvert (dans deux gouttières de deux mètres de long et 20 cm de large) et les eaux de drainage sur des plaques lysimétriques sans tension à 15 et 60 cm de profondeur. On a pu ainsi calculer les flux d'éléments à ces profondeurs. Pour le flux à 60 cm, le seul qui sera pris en considération ici, on a adopté un flux de drainage égal à 480 mm, c'est-à-dire le flux sous couvert (800 mm) diminué d'une partie de l'évapotranspiration réelle, évaluée, sur la base des évaluations effectuées par Mohammed Ahmed (1992) au Col du Bonhomme, et compte tenu du climat moins frais au Donon, à 320 mm.

Analyses statistiques

On a effectué deux types d'analyse :

a) Une comparaison des moyennes pour chaque caractère et chaque niveau, entre les valeurs 1996 et 1986, en utilisant un schéma à deux facteurs, un facteur bloc (2 blocs de 7 points

avec prise en compte des résultats individuels dans chaque bloc) (Schwarz, 1977) et un facteur date (1996 et 1986).

b) Une comparaison de la différence des moyennes entre 1986 et 1996 avec la variabilité spatiale; pour cela la moyenne des écarts-types des quatre triplets a été comparée à cette différence et on a considéré comme significatives les différences 1996-1986 supérieures à 1,96 fois cet écart-type moyen.

Ces tests statistiques seront précisés plus bas quand auront été exposées les difficultés rencontrées dans la reproductibilité des analyses entre 1986 et 1996, car elles ont conduit à complexifier l'usage de ces tests.

RÉSULTATS

Reproductibilité des résultats analytiques de 1986 et conséquences pour les tests statistiques

Les valeurs obtenues sur les échantillons de 1986 lors de leur réanalyse en 1996 se sont révélées assez fortement différentes, pour certains caractères au moins, des valeurs initiales de 1986 (tableau 2). Ces différences peuvent résulter de quatre causes :

- changement de méthode : digestion HNO_3 au lieu de combustion et reprise à HCl pour les éléments totaux de OL, OF, OH;

- changement d'appareillage : ICP au lieu d'absorption atomique ;

- changement de personnel qui peut conduire à de petits changements opératoires qui, même minimes, peuvent ne pas être sans influence sur les résultats, d'autant plus que pour certains éléments, les éléments nutritifs biodisponibles en particulier (Ca, K, Mg), les teneurs sont, dans ce sol très acide, extrêmement basses.

- évolution des échantillons au cours de leur conservation de 10 ans (éléments échangeables, formes libres, éléments extractibles par l'EDTA, P_2O_5 assimilable)

- insuffisante réhomogénéisation des échantillons de 1986 avant réanalyse en 1996.

Cette imparfaite reproductibilité nous a incité à réaliser des contre-analyses non prévues à l'origine :

- les éléments échangeables des horizons minéraux (0 à 35 cm) ont été refaits sur tous les échantillons de 1986, par la même technique et avec un appareillage de même type (absorption atomique) ;

- les principaux éléments totaux de OL, OF et OH (C, N, Ca, Mg, K, P, S) ont été refaits sur les échantillons de 1986 par attaque nitrique et ICP.

- pour les déterminations qui n'ont pas été refaites sur tous les échantillons de 1986, mais sur quelques-uns seulement, un coefficient correctif (valeur réanalysée/valeur initiale 1986) a

été appliqué aux résultats des échantillons non réanalysés.

Les résultats obtenus (notés dans ce qui suit et dans les tableaux "86-96") sont ainsi plus comparables aux valeurs obtenues sur les nouveaux échantillons prélevés en 1996 (éléments totaux des couches hologaniques).

Cette procédure est relativement complexe et il en résulte des incertitudes sur les évolutions des propriétés du sol, ainsi qu'un traitement statistique plus lourd, mais cette manière de faire est certainement plus objective que si on avait comparé sans autre précaution les résultats 1996 aux résultats 1986 initiaux.

Nous donnons en définitive pour chaque élément analysé deux valeurs "initiales": celle obtenue en 1986, que nous désignerons par "86-86", et une valeur tirée de la réanalyse en 1996, que nous désignerons par "86-96".

Par ailleurs il semble que la couche OH ait été, dans le bloc 2, moins intégralement prélevée qu'en 1986 dans les deux blocs et qu'en 1996 dans le bloc 1. Ceci est important car l'évolution de la masse de OH entre les deux dates peut en être affectée, de même que les teneurs de l'horizon 0-5 cm en tous éléments, totaux ou échangeables. Notamment la diminution constatée de masse de OH de 1986 à 1996 (voir plus loin) pourrait s'en trouver exagérée. Ce défaut est dû au fait que deux équipes ont opéré en parallèle, pour gagner du temps et assurer l'achèvement des prélèvements par temps sec, et qu'il n'y a pas eu de concertation suffisante sur la manière d'apprécier les limites entre couches organiques. Si les limites entre OL et OF, ainsi qu'entre OF et OH n'ont posé aucun problème, il s'est révélé en cours d'opération que la limite entre OH et A1 n'était pas appréciée exactement de la même façon dans les deux équipes.

Pour pallier dans la mesure du possible ce défaut opératoire (non rectifiable sur le terrain car le prélèvement des horizons minéraux avait commencé sur plusieurs points), nous avons effectué une correction de masse de OH et la correction correspondante des concentrations en A1, pour le bloc 2, suivant les formules :

$$\text{Masse OH corrigée} = \text{masse initiale} \times 1,2$$

$$\text{Teneur A1 corrigée} = \text{teneur initiale} \times 1,046 - \text{teneur OH} \times 0,046$$

Ces formules expriment un manque de prélèvement pondéral dans le bloc 2 de 17 %, soit environ 4 mm en épaisseur (dans la partie inférieure de OH des limons ou sables fins se mêlent déjà à la matière organique et une faible erreur de profondeur entraîne une erreur pondérale forte). La teneur analysée de A1 (teneur initiale) est une composante de 4,6 cm de "vrai" A1 avec une densité apparente de 0,4 et de 0,4 cm de OH avec une densité de 0,2. Cette valeur de correction a été choisie parmi d'autres possibles (1/4 notamment) comme étant celle qui conduit à des teneurs corrigées de C et N de A1 dans le bloc 2 voisines de celles du bloc 1, car on peut supposer que ces teneurs en C et N sont peu variables à l'intérieur de la parcelle.

Tableau 2 - Résultats concernant les horizons holograniques. La colonne 86-86 désigne les résultats obtenus en 1986. La colonne 86-96 désigne les résultats obtenus sur échantillons 1986 réanalysés en 1996 après ajustement de l'ensemble des résultats en fonction de ceux obtenus sur les échantillons réanalysés, ou (pour les éléments totaux et les éléments échangeables) réanalyse de tous les échantillons de 1986. Les valeurs 86-86 ou 86-96 significativement différentes de celles de 1996 selon l'analyse statistique par blocs sont en gras et soulignées.

Table 2 - Results for hologranic layers. The 86-86 column concern the 1986 results. The 86-96 column concern the results obtained by calculation from new analysis of several 1986 samples in 1996, or (for the exchangeable elements) new analysis of all 1986 samples. Values 1986 or 1986-96 differing significantly from those of 1996 are in bold print and underlined.

Caractère	OL			OF			OH		
	86-86	86-96	1996	86-86	86-96	1996	86-86	86-96	1996
Masses des niveaux OL, OF, OH kg / m²									
	<u>1,44</u>		<u>1,00</u>	<u>1,77</u>		<u>2,62</u>	<u>7,26</u>		<u>4,10</u>
Éléments totaux g/kg									
C	482	476	479	434	382	399	227	253	267
N	14,4	17,3	15,4	16,9	16,6	17,5	10,4	13,0	15,0
C/N	33,6	27,7	31,6	25,7	23,0	22,9	21,8	19,4	17,9
P	0,91	0,86	0,84	0,99	0,94	0,99	<u>0,96</u>	<u>0,94</u>	<u>1,12</u>
S	1,59	1,30	1,30	1,86	1,58	1,81	1,51	1,25	1,73
Ca	2,19	2,44	2,70	0,96	1,99	1,50	0,50	0,43	0,49
Mg	<u>0,25</u>	<u>0,31</u>	<u>0,40</u>	<u>0,58</u>	<u>0,57</u>	<u>1,03</u>	1,70	1,99	1,65
K	0,82	0,77	0,83	<u>0,63</u>	<u>0,65</u>	<u>1,04</u>	<u>1,41</u>	<u>1,33</u>	<u>1,63</u>
Éléments totaux mg/kg									
Mn	739	603	782	496	483	448	<u>286</u>	<u>294</u>	<u>211</u>
Cd	0,46	0,38	0,33	<u>0,50</u>	<u>0,38</u>	<u>0,28</u>	0,12	0,15	0,17
Cr	<u>1,59</u>	<u>2,13</u>	<u>1,03</u>	<u>3,82</u>	<u>3,00</u>	<u>1,84</u>	3,82	4,53	3,53
Co	0,41		0,61	1,42		1,71	0,75		4,97
Cu	9,6	8,9	9,4	<u>14,4</u>	<u>14,4</u>	<u>19,5</u>	<u>11,4</u>	<u>13,4</u>	<u>45,2</u>
Ni	3,68	2,26	1,79	6,41	5,13	4,55	7,13	5,37	6,43
Pb	<u>63,4</u>	<u>64,7</u>	<u>35,2</u>	<u>124</u>	<u>143</u>	<u>103</u>	<u>96</u>	<u>117</u>	<u>145</u>
Zn	57	44	46	68	53	52	54	50	57
Masses d'éléments totaux kg/ha									
Ca	31,5	34,5	26,2	17,6	75,9	37,9	<u>36,9</u>	<u>29,2</u>	<u>19,8</u>
Mg	3,6	4,4	4,1	10,5	10,1	27,2	<u>126,2</u>	<u>146,9</u>	<u>82,3</u>
K	11,7	10,8	8,3	11,2	11,5	27,4	<u>103,2</u>	<u>96,4</u>	<u>75,1</u>
Éléments échangeables cmolc/kg									
Ca							<u>1,57</u>	<u>0,95</u>	
Mg							1,07	1,05	
K							<u>0,56</u>	<u>0,69</u>	
Mn							0,41	0,38	
Fe							3,48	4,46	
Al							<u>2,43</u>	<u>5,53</u>	
H ⁺							2,81	3,19	

Ce sont ces valeurs corrigées qui sont utilisées dans la suite de l'article (tableaux et calculs de masses).

Comparaison des valeurs de 1996 avec celles de 1986

Les *tableaux 2 et 4* donnent, pour tous les caractères mesurés, les valeurs 86-86, 86-96 et la valeur 1996 et indiquent celles des valeurs 86-86 ou 86-96 significativement différentes suivant le test statistique par blocs.

A priori on pouvait penser que la comparaison la plus précise entre les valeurs analytiques 1996 et 1986 serait mise en évidence par un test de comparaison sur 14 blocs. Chaque couple de points 1986 et 1996 correspondant à un même nœud de grille pouvait en effet être considéré *a priori* comme un couple indépendant des autres, et on pouvait penser qu'au sein de ce couple, les deux valeurs 1996 et 1986 de chaque élément seraient étroitement corrélées puisqu'il y a grande proximité de situation géographique (1 m de distance entre les deux points de prélèvement) et qu'on se situe, comme il a été indiqué plus haut, dans un espace général caractérisé par un gradient est-ouest. En fait les corrélations étudiées entre valeurs 1996 et 1986 se sont rarement révélées significatives et avec des degrés de signification ne dépassant pas 0,05. Le gradient général, même assez faible, d'échelle décimétrique, n'exclut donc pas une forte variation locale d'échelle métrique. C'est pourquoi nous avons retenu un modèle à deux blocs de 7 points.

Ces diverses considérations ont conduit à n'accorder une signification statistique aux différences entre les valeurs obtenues sur les échantillons de 1996 et ceux de 1986 que si ces différences satisfaisaient simultanément à quatre tests statistiques :

- les deux différences 86-86/96 et 86-96/96 doivent être toutes deux positives ou toutes deux négatives :
- différence significative entre valeur 96 et valeur 86-96 ;
- différence significative entre valeur 96 et valeur 86-86.
- si la différence entre valeur 1996 et valeur 1986 satisfait aux trois conditions ci-dessus dans le test statistique par blocs, on ne la retient définitivement que si elle est supérieure à 1,96 fois l'écart-type des triplets prélevés et analysés en 1996, c'est-à-dire si la variation interdates est supérieure à la variation locale d'échelle métrique. Sinon il y aurait une possibilité que le déplacement systématique du point de prélèvement ait coïncidé avec une variation locale des valeurs, bien que rien n'indique que cette variation locale soit orientée.

Plus précisément :

- pour les éléments totaux, dont les teneurs ne peuvent pas avoir varié entre 1986 et 1996 dans les échantillons conservés depuis 1986 et pour lesquels il est donc plus logique de donner plus de poids à la valeur 1986 corrigée, nous exigeons simultanément un test F significatif à 1 % au moins entre les valeurs

1986-1996 et 1996 et un test F significatif à 5 % pour la différence 1986-1986 et 1996 ;

- pour les formes non totales des éléments (échangeables, biodisponibles, libres, extractibles à l'EDTA) nous adopterons des exigences inverses : F à 1 % pour la différence 1986-1986/1996 (en privilégiant donc l'hypothèse d'une variation de l'échantillon au cours de sa conservation par rapport à une simple variation due aux procédures analytiques) et à 5 % pour la différence 1986-1996/1996 ;

Variations des propriétés du sol entre 1986 et 1996

Les *tableaux 2 et 4* donnent les résultats 86-86, 86-96 et 96 pour les différentes caractéristiques déterminées. Les caractéristiques qui montrent des différences répondant aux trois premiers critères de signification exposés plus haut sont indiquées en gras et soulignées. Les *tableaux 3 et 5* indiquent, parmi ces caractéristiques qui ont satisfait aux trois premiers tests, et pour elles seulement, celles qui satisfont en outre à l'exigence de variation interdates supérieure à la variation locale métrique.

Masses des couches organiques OL, OF et OH

La masse de OL montre une tendance à la diminution, celle de OF au contraire à l'augmentation entre 1986 et 1996, mais pour aucune des deux la différence n'est supérieure à la variation locale. La couche OH montre au contraire une diminution de masse de 1986 à 1996 qui satisfait aux quatre tests et qu'on peut donc tenir pour presque certaine. La diminution est de l'ordre de 40 %, ce qui est considérable. La variabilité dans le temps de cette couche essentielle de l'humus, qui contient des réserves importantes d'éléments biogènes, mérite d'être soulignée.

Teneurs et masses d'éléments des couches holorganiques (tableaux 2 et 3)

On ne constate que peu de variations qui satisfassent aux trois tests statistiques.

Éléments biogènes

■ **Formes totales.** On note seulement une augmentation de teneur du phosphore total en OH et du potassium total en OF ; l'augmentation du potassium est très forte (plus de 60 %).

Les masses d'éléments biogènes sous forme totale ont été calculées point par point à partir des masses de matériel organique et des concentrations pour chacune des trois couches. Ce n'est que dans la couche OH qu'on note des différences significatives : les masses de calcium et de magnésium diminuent nettement à ce niveau entre 1986 et 1996 et varient donc dans le même sens que la masse de OH. Aucune augmentation de concentration ne compense donc la perte de masse organique. Cela nous semble une constatation importante.

Tableau 3 - Comparaison des différences 1996 /1986 avec 1,96 fois l'écart type des triplets spatiaux pour les éléments et formes dont les différences 96 /86 ont été estimés significatifs dans les deux tests du *tableau 2*. On retient :

- pour les éléments totaux, la différence 96 / 86-96
- pour les éléments échangeables la même différence car sur la couche OH, la seule analyse d'éléments échangeables en 1986 dont on dispose, est celle effectuée en 1996 sur échantillons conservés.

Table 3 - Comparison between the differences 1996 /1986 and 1.96 time xstandard deviation in the spatial triplets, for elements and forms of which differences 96 /86 were estimated significant in the two tests of the *table 2*. The following differences are taken into account:

- for total elements, the difference 96 /86-96,
- for the exchangeable elements, the same difference , because the only analysis of eexchangeable elements in 1986 is that which was performed in 1996 in stocked 1986 samples.

Caractère	OL			OF			OH		
	96 / 86-86	96 / 86-96	éc-type *1,96	96 / 86-86	96 / 86-96	éc-type *1,96	96 / 86-86	96 / 86-96	éc-type *1,96
Masses des niveaux OL, OF,OH kg / m²	-44		56,4	85		148	-316		260
Éléments totaux g/kg									
P							+0,18		0,15
Mg		+0,09	0,31		+ 0,28	2,76			
K					+ 0,42	0,25		+ 0,30	0,41
Éléments totaux mg/kg									
Mn							- 75	- 83	89
Cd					-0,10	0,12			
Cr		- 1,10	0,71		- 1,16	0,88			
Cu					+ 5,1	8,33	+ 33,8	+ 31,8	31,9
Pb		- 29,5	16,0				+ 49,0	+ 28	55,7
Masses d'éléments totaux kg/ha									
Ca							- 13,4		8,23
Mg							- 60,7		59,2
K							- 24,5		53,2
Éléments échangeables cmolc/kg									
Ca							- 0,62		0,23
K							+ 0,13		0,10
Al							- 4,90		2,34

■ **Formes échangeables en OH.** La teneur en calcium échangeable diminue nettement (d'un tiers environ) et la teneur en potassium échangeable augmente légèrement (de un quart). Les trois éléments biogènes principaux ont donc chacun un comportement particulier, K à l'état échangeable étant mieux retenu après diminution de la masse de OH que Mg et Ca.

Métaux lourds

Deux métaux, le chrome et le plomb satisfont aux trois tests. On pourra y ajouter cependant le cadmium en OF, le

cuivre et le manganèse en OH pour lesquels les différences interdates ne sont que très peu inférieures à la variation locale (1,96 fois l'écart-type des triplets).

La teneur en chrome diminue nettement en OL et OF, la teneur en plomb diminue très nettement en OL mais augmente en OH. La diminution très spectaculaire du plomb en OL est très probablement liée à l'emploi des nouveaux carburants, sans qu'on puisse dire si la cause est la même pour Cr et Cd. L'augmentation des teneurs en OH peut provenir de la diminution de la masse de OH par minéralisation.

Tableau 4 - Résultats concernant les horizons minéraux. la colonne 86-86 désigne les résultats obtenus en 1986. la colonne 86-96 désigne les résultats obtenus sur des échantillons prélevés en 1986 et réanalysés en 1996. (les valeurs 86-86 ou 86-96 significativement différentes de celles de 1996 selon l'analyse statistique sont en caractères gras et soulignés).

Table 4 - Results for mineral horizons. The 86-86 column concern the 1986 results. The 86-96 column concern the results obtained by new analysis in 1996 of samples collected in 1986. Values 1986 etc.

Caractère	0-5 cm			8-18 cm			25-35 cm		
	86-86	86-96	1996	86-86	86-96	1996	86-86	86-96	1996
pH eau	3,9	4,3	4,1	4,3	4,7	4,5	4,5	4,9	4,5
pH KCl	<u>3,6</u>	<u>3,5</u>	<u>3,3</u>	3,9	3,9	3,9	<u>4,1</u>	<u>4,1</u>	4,2
Éléments totaux g/kg									
C	<u>62,7</u>	<u>60,7</u>	<u>112,1</u>	37,0	35,8	34,5	21,4	20,7	18,1
N	<u>3,80</u>	<u>4,06</u>	<u>6,63</u>	2,28	2,44	2,31	1,34	1,43	1,29
C/N	<u>16,5</u>	<u>14,9</u>	<u>17,0</u>	16,3	14,7	15,0	15,9	14,4	14,3
S	0,86	0,43	0,85	0,65	0,33	0,32	0,64	0,33	0,34
Éléments totaux mg/kg									
Cd	<i>non valide</i>	0,33	0,23	<i>non valide</i>	<u>0,29</u>	<u>0,24</u>	<i>non valide</i>	0,08	0,12
Co	13,1	9,0	9,3	15,3	10,6	13,0	16,7	11,5	13,2
Cr	28,5	31,8	34,1	27,3	30,5	31,6	28,5	31,8	33,4
Cu	15,5	16,2	19,6	14,1	14,8	14,9	14,1	14,7	15,7
Ni	23,0	15,7	16,6	23,6	16,1	16,1	26,3	17,9	18,4
Pb	<u>68,7</u>	<u>67,0</u>	<u>97,2</u>	37,4	36,5	34,8	26,2	25,6	23,6
Zn	67,3	73,8	87,2	73,8	81,0	84,1	78,7	85,7	90,6
Éléments échangeables cmolc /kg									
Ca	0,26	0,18	0,36	0,16	0,10	0,10	0,11	0,07	0,08
Mg	0,20	0,34	0,44	0,08	0,15	0,18	0,05	0,11	0,08
K	<u>0,18</u>	<u>0,22</u>	<u>0,39</u>	0,11	0,16	0,15	0,09	0,13	0,12
Mn	0,16	0,55	0,39	0,05	0,33	0,17	0,03	0,28	0,10
Fe	0,04	0,13	0,38	0,01	0,02	0,02	0,013	0,003	0,004
Al	7,55	6,60	7,83	5,36	4,96	5,03	4,07	3,80	3,71
H+	<u>1,19</u>	<u>0,73</u>	<u>2,03</u>	0,53	0,21	0,17	0,43	0,09	0,04
Mn réductible et P₂O₅ assimilable : mg/kg; Cu et Zn EDTA : mg/kg									
Mn	<u>0,24</u>	<u>0,22</u>	<u>0,13</u>	0,38	0,35	0,37	0,33	0,30	0,35
P ₂ O ₅	0,034	0,055	0,048	0,021	0,034	0,025	0,019	0,030	0,025
Cu EDTA	<u>1,8</u>	<u>1,7</u>	<u>3,5</u>	1,3	1,2	1,3	0,9	0,9	0,9
Zn EDTA	<u>3,0</u>	<u>3,4</u>	<u>4,6</u>	2,3	2,6	2,0	2,2	2,5	1,9
Éléments libres (%)									
Fe	3,27	3,08	3,00	3,24	3,05	3,23	3,28	2,88	3,19
Al	<u>0,62</u>	<u>0,65</u>	<u>0,51</u>	0,74	0,78	0,72	0,77	0,81	0,73

Tableau 5 - Comparaison des différences 1996 /1986 avec 1,96 fois l'écart type des triplets spatiaux pour les éléments et formes dont les différences 96 /86 ont été estimés significatifs dans les deux tests du *tableau 2*. On retient :

- pour les éléments totaux, la différence 96 / 86-96,
- pour les éléments non totaux (échangeables, libres, extractibles EDTA, réductibles) la différence 96 /86-86.

Table 5 - Comparison between the differences 1996 /1986 and 1.96 time the standard deviation in the spatial triplets, for elements and forms of which differences 96 /86 were estimated significant in the two tests of the *table 2*. The following differences are taken into account :

- for total elements, the difference 96 /86-96,
- for the non total elements (exchangeable, free, reductable, EDTA extractable), the difference 96 /86-86.

Caractères	0-5 cm			8-18 cm			25-35 cm		
	96 / 86-86	96 / 86-96	éc-type *1,96	96 / 86-86	96 / 86-96	éc-type *1,96	96 / 86-86	96 / 86-96	éc-type *1,96
pH KCl	<u>- 0,20</u>		<u>0,15</u>						
Éléments totaux g/kg									
C	<u>+51,4</u>		<u>30,8</u>						
N	<u>+ 2,57</u>		<u>2,05</u>						
Éléments totaux mg/kg									
Cd				<i>non valide</i>	- 0,05	18,5			
Pb	<u>+ 30,2</u>		<u>21,9</u>						
Zn	<u>+ 13,4</u>		<u>7,79</u>						
Éléments échangeables cmolc /kg									
K	<u>+ 0,17</u>		<u>0,11</u>						
H+	<u>+ 1,3</u>		<u>0,82</u>						
Mn réductible et P₂O₅ assimilable : mg/kg; Cu et Zn EDTA : mg/kg									
Mn	- 0,09		0,14						
Cu EDTA	<u>+ 1,8</u>		<u>1,10</u>						
Zn EDTA	+ 1,2		1,79						
Éléments libres (%)									
Al	<u>- 0,14</u>		<u>0,08</u>						

Aluminium

La teneur en aluminium échangeable diminue en OH, comme celle en calcium.

Variations dans les horizons organo-minéraux (0 à 35 cm). (tableaux 4 et 5)

Toutes les variations significatives concernent l'horizon A1 de 0 à 5 cm.

Le pH KCl diminue et, de manière parallèle, la concentration en H⁺ augmente. Il peut paraître surprenant que le pH eau n'ait pas varié mais cela s'explique par le déplacement plus complet des H⁺ par le KCl que par l'eau. Les concentrations en C et N totaux augmentent assez notablement. Ces deux évolutions

peuvent être liées à la minéralisation de OH.

Il est à noter que, à part l'augmentation du potassium échangeable de 0 à 5 cm, on n'observe aucun changement certain des concentrations en éléments biogènes échangeables.

En ce qui concerne les éléments en traces, on observe une forte augmentation de la teneur en plomb total de 0 à 5 cm qui peut être liée à la minéralisation de OH ou au transfert de matières organiques venant de litières déposées à une époque de forte pollution (par exemple entre 1960 et 1980).

Le cuivre extractible à l'EDTA augmente et l'aluminium libre diminue; ces deux évolutions sont compatibles avec la baisse du pH KCl.

Pertes du sol évaluées à partir de la comparaison des analyses de sol 1996 et 1986

La connaissance des masses de terre fine et de la masse des couches holograniques ainsi que de leur composition permet de calculer la variation, entre 1986 et 1996, de la quantité d'éléments biogènes contenus dans le sol. Dans ce qui suit nous chercherons à chiffrer l'évolution quantitative des éléments biogènes les plus limitants dans ce sol très acide: calcium et magnésium, auxquels nous ajouterons le potassium qui participe à la saturation du complexe adsorbant par des cations non acides. Nous ne nous limiterons pas au stock d'éléments échangeables de 0 à 35 cm, mais nous ajouterons les éléments totaux en OL, OF, OH car leur destinée normale est de venir progressivement recharger le complexe absorbant des horizons minéraux après minéralisation du matériel organique. Les masses des éléments des couches holograniques ont été calculées point par point puisque, à chaque emplacement de prélèvement nous disposions des concentrations et des masses. Par contre, pour les horizons minéraux, les masses sont le produit des teneurs moyennes par les masses moyennes puisque nous n'avons pas la masse de terre fine en chaque point.

Cependant une évaluation exacte se heurte à l'existence de deux valeurs possibles pour la composition du sol en 1986.

Nous avons d'une part calculé les masses de calcium, magnésium et potassium totaux en OL, OF et OH en retenant les valeurs corrigées (86-96) des concentrations en 1986, ceci parce que toutes les concentrations ont été à nouveau déterminées sur les échantillons de 1986 par les procédures analytiques de 1996 et que la comparaison entre dates en est rendue plus précise. Nous avons d'autre part évalué les quantités de calcium, magnésium et potassium échangeables de 0 à 35 cm en utilisant deux modes de calcul: l'un retient les valeurs de 1986 non corrigées (86-86) et l'autre les valeurs corrigées (86-96). Nous aurons donc en définitive deux appréciations des évolutions des sommes d'éléments totaux en OL, OF et OH et des éléments échangeables de 0 à 35 cm.

Pour ces calculs nous avons bien évidemment tenu compte, pour 1996, des valeurs ajustées de la masse de OH et des concentrations corrigées en éléments échangeables de A1. Les résultats sont donnés aux *tableaux 6 et 7*, pour une période de 10 ans. Les pertes sont le plus souvent la conséquence d'un aminuement des stocks des couches holograniques, notamment OH, tandis que, dans les horizons minéraux, les quantités d'éléments échangeables ont généralement augmenté.

Il est important de noter que les pertes de calcium et magnésium, même dans le mode de calcul qui conduit aux pertes les plus faibles, sont d'un ordre de grandeur de 5 à 20 %

Tableau 6 - Bilan quantitatif pour la période 1986-96, des sommes des éléments totaux en OL, OF et OH et échangeables pour le sols organo-minéral (0-35 cm). Bilan établi à partir des mesures réalisées en 1996 à la fois pour les échantillons prélevés en 1996 et en 1986.

Table 6 - Quantitative budget from 1986 to 1996 of sums of total elements for OL, OF and OH and exchangeable elements for mineral soil (0-35 cm). Budget was calculated from measurements made in 1996 both on 1996 and 1986 samples

OL, OF, OH 86 corrigés +0-35 cm 86 corrigé								
	Masses t/ha		Calcium kg/ha		Magnésium kg/ha		Potassium kg/ha	
	1986-96	1996	1986-96	1996	1986-96	1996	1986-96	1996
OL	14,4	10,0	34,5	26,2	4,4	4,1	10,8	8,3
OF	17,7	26,2	35,9	37,9	10,1	27,2	11,5	27,4
OH	72,6	41,0	29,2	19,8	146,9	82,3	96,4	75,1
Tot holog	104,7	77,2	99,6	83,9	161,4	113,6	118,7	110,8
0-5 cm	186	194	6,8	13,7	7,6	10,0	16,0	27,4
5-8cm	123	123	3,4	5,6	3,7	4,2	9,1	11,4
8-18 cm	385	385	7,5	7,3	7,1	8,2	23,7	22,1
18-25 cm	262	262	4,5	4,5	4,1	4,1	14,5	13,6
25-35 cm	436	436	6,4	6,7	5,7	4,3	21,4	21,1
Tot minx	1392	1400	28,6	37,8	28,2	30,8	84,7	95,8
TOTAL bilan 96-86			128,2	121,7	189,6	144,4	203,4	206,6
			- 6,5		- 45,2		+ 3,2	

Tableau 7 - Bilan quantitatif pour la période 1986-96, des sommes des éléments totaux en OL, OF et OH et échangeables pour le sol organo-minéral (0-35 cm). Bilan établi pour OL, OF et OH pour des mesures réalisées en 1996 à la fois pour les échantillons prélevés en 1986 et en 1996 et pour les horizons organo-minéraux à partir des mesures réalisées en 1986 sur les échantillons de 1986 et en 1996 pour les échantillons prélevés en 1996.

Table 7 - Quantitative budget from 1986 to 1996 of sums of total elements for OL, OF and OH and exchangeable elements for mineral soil (0-35 cm). Budget was calculated from measurements made for organic layers in 1996 (both for samples from 86 and 96) and for measurements made on 1986 and 1996 on organo-mineral layers.

OL, OF, OH: 86 corrigés +0-35 cm 86 non corrigé								
	Masses t/ha		Calcium kg/ha		Magnésium kg/ha		Potassium kg/ha	
	1986-96	1996	1986-96	1996	1986-96	1996	1986-96	1996
OL	14,4	10,0	34,5	26,2	4,4	4,1	10,8	8,3
OF	17,7	26,2	35,9	37,9	10,1	27,2	11,5	27,4
OH	72,6	41,0	29,2	19,8	146,9	82,3	96,4	75,1
Tot holog	104,7	77,2	99,6	83,9	161,4	113,6	118,7	110,8
0-5 cm	186	194	9,7	13,7	7,6	10,0	13,1	27,4
5-8 cm	123	123	5,2	5,6	3,1	4,2	7,0	11,4
8-18 cm	385	385	12,4	7,3	3,7	8,2	16,5	22,1
18-25 cm	262	262	7,1	4,5	2,0	4,1	10,2	13,8
25-35 cm	436	436	9,6	6,7	2,6	4,3	15,3	21,1
Tot minx	1392	1400	44,0	37,8	19,0	30,8	62,1	95,8
TOTAL bilan 96-86			143,6	121,7	180,4	144,4	180,8	206,6
			-21,9		-36,0		+25,8	

Tableau 8 - Récapitulation des tableaux 5 et 6 : bilan 96/86 de la somme des éléments totaux en OL, OF, OH et des éléments échangeables de 0 à 35 cm, après correction d'un défaut éventuel de prélèvement de OH dans le bloc 2 et dans deux hypothèses, en kg/ha.

Table 8 - Recapitulation of the tables 5 and 6 . Loss of the sums of total elements in OL, OF and OH , and exchangeable elements in the mineral horizons, from 1986 to 1996, according to two calculations hypotheses, kg/ha.

	éléments totaux en OL, OF, OH	éléments échangeables dans les horizons minéraux (0-35 cm)	Ca	Mg	K
Hypothèse 1	valeurs 86 corrigées (86-86)	valeurs 86 corrigées (86-86)	- 6,5	- 45,2	+ 3,2
Hypothèse 2	valeurs 86 corrigées (86-96)	valeurs 86 non corrigées (86-96)	- 21,9	- 36,0	+ 25,8
	Moyenne		- 14,2	- 40,6	+14,5

des réserves de 1986, ce qui, malgré la modicité apparente des chiffres en valeur absolue, est loin d'être négligeable.

Contrairement à ceux de calcium et magnésium, les stocks de potassium ont augmenté très notablement (15 % en moyenne).

Le *tableau 8* donne une récapitulation des variations des trois éléments étudiés dans les deux modes de calcul, toujours pour 10 ans

DISCUSSION

Variation de masse des couches holorganiques

On doit probablement voir dans la diminution de masse de OL la conséquence d'une plus faible chute de litière : dans les années 1982 à 1985, lors de la phase de dépérissement, la chute d'aiguilles a été supérieure à la moyenne et il lui a succédé une phase de rétablissement de la santé du peuplement avec reconstitution d'une masse foliaire plus importante s'accompagnant évidemment d'une plus faible chute d'aiguilles. Les aiguilles retrouvent leur âge de chute normal, 7 à 8 ans, tandis qu'en phase de dépérissement cet âge peut se réduire à 4-5 ans, voire moins dans les peuplements très dépérissants (ce n'est pas le cas de celui de l'observatoire).

L'augmentation de masse de OF peut être vue comme une simple conséquence de passage de OL à OF d'une masse de OL plus forte à l'origine, accumulée lors de la phase de dépérissement.

Par ailleurs les étés 1989 à 1992 ont été exceptionnellement chauds et ont vraisemblablement entraîné une minéralisation accélérée de OH qui se traduit par une perte de masse et une augmentation de concentration du potassium total et échangeable, ainsi que du phosphore total. Cependant les concentrations de calcium et de magnésium totaux et échangeables restent stables, tandis que la teneur en potassium augmente moins que ne diminue la masse de OH. La conséquence est une diminution des masses de Ca, Mg et K présents en OH.

Cette diminution montre que les éléments biogènes libérés par la minéralisation de OH sont mal retenus par le complexe adsorbant de OH, en dépit de son faible taux de saturation en "bases" (environ 20 %, calculable à partir du *tableau 2*). K diminue de seulement de 7 % en masse, mais Ca de 46 % et Mg de 35 %. La faible masse de Ca en OH par rapport à celle de Mg, qui est cependant en teneur moindre dans les aiguilles (7 fois moins abondant), indique une rétention particulièrement mauvaise du calcium par les colloïdes organiques. En contradiction avec les conséquences observables de perte de masse de OH sur sa concentration, le potassium est au contraire moins bien retenu, tout comme le calcium, puisque la masse présente en OH est à peu près égale à celle de Mg alors que la teneur dans les aiguilles est 4 fois plus élevée. Mais, en ce qui

concerne le potassium on doit faire remarquer qu'il est, dans les aiguilles tombées, présent presque en totalité sous forme soluble et donc susceptible d'être lixivié rapidement à partir de OL. Le matériel de OF qui alimente OH est donc déjà fort appauvri en cet élément.

La diminution du plomb en OL doit être attribuée à l'emploi croissant de l'essence sans plomb. La diminution de cadmium en OF et de chrome en OL et OF sont peut-être explicables aussi par les mesures de lutte contre la pollution.

Teneur des horizons minéraux en éléments majeurs biodisponibles

L'évolution des éléments échangeables dans les horizons minéraux ne conduit pas à première vue à penser que la fertilité chimique du sol s'est affaiblie pendant ces dix ans, d'autant plus que le potassium échangeable a augmenté de 0 à 5 cm. Cependant cela peut entraîner un déséquilibre nutritionnel au détriment de Ca et Mg, ces deux éléments étant à de faibles niveaux de 0 à 35 cm. L'alimentation minérale se fait aussi à partir de OH et on retrouve à ce niveau la même tendance au déséquilibre avec une augmentation des concentrations en phosphore et en potassium totaux, alors que Ca et Mg sont stables. Sur ce point nos résultats sont plus optimistes que ceux obtenus par Poszwa (1996) qui conclut à une diminution de la teneur en Ca et Mg échangeables dans un sol du bassin versant d'Aubure (Vosges sur granite leucocrate), que ceux de Lefèvre (1997) qui estime à 2,5 et 0,5 kg/ha/an respectivement les pertes de Ca et Mg échangeables et que ceux de Landmann (1989) qui conclut, dans un sol sur granite du Valtin, à une baisse de teneur de Mg échangeable en A1. Des modélisations effectuées dans les Vosges (Dambrine et al, 1995) aboutissent également à des pertes du même ordre. Tamm et Hallbäcken, (1988) mettent aussi en évidence dans des sols de Suède, mais sur une durée de l'ordre de 30 ans, des baisses sensibles de pH. Les horizons minéraux de l'OQS du Donon manifestent donc une stabilité meilleure que nombre d'autres sols acides.

Variation du stock des éléments totaux en OL, OF, OH et des éléments échangeables de 0 à 35 cm

Plus préoccupante est certainement la diminution de la somme des quantités totales de calcium et surtout magnésium, totaux en OL, OF et OH et échangeables de 0 à 35 cm, telles qu'elles apparaissent aux *tableaux 6 et 7*, car l'ensemble de ces éléments représente un pool disponible pour les peuplements forestiers, soit à court terme (éléments biodisponibles de 0 à 35 cm, ainsi qu'en OH), soit à moyen terme (éléments biogènes totaux de OL, OF et OH). Les pertes de calcium atteignent 4 à 15 % du stock de 1986 ; pour le magnésium elles sont plus fortes encore : 20 à 24 %. Pour ces deux éléments

c'est donc 0,5 à 2 % du stock potentiellement biodisponible à terme qui disparaît chaque année et on ne peut manquer de souligner l'ampleur de cette déperdition même si les pertes absolues (0,6 à 2,2 kg de Ca et 3,5 à 4,5 kg de Mg par hectare et par an) peuvent paraître minimes.

Nous avons cherché à comparer ces pertes à celles qu'on pourrait calculer à partir d'une évaluation des ressources du sol (apports par les pluies et les dépôts secs; altération progressive des minéraux du sol) et des prélèvements ou pertes qu'il subit par consommation du peuplement (élaboration de bois de tronc, reconstitution d'une masse supplémentaire de feuilles depuis 1988, suite au retour à un meilleur état de santé) et par drainage. Les apports par les pluies et les dépôts secs, ainsi que les pertes par drainage sont calculés à partir des résultats d'analyses d'eaux récoltées dans la station, hors couvert et sous couvert et sur une plaque lysimétrique sans tension à 60 cm de profondeur, de 1993 à 1996 (tableau 9). Les valeurs d'apport sont évaluées comme la somme de l'apport par la pluie hors couvert et du dépôt sec, ce dernier étant lui-même évalué selon Dambrine et Prevosto (1988) à 80 % de la différence entre pluie sous couvert et pluie hors couvert pour Ca, 50 % pour Mg et 10 % pour K.

Les valeurs d'altération ne sont pas directement évaluées, mais simplement estimées en reprenant les valeurs calculées dans des sols du Beaujolais développés sur une roche-mère du dévono-dinantien de même nature que celle du Donon. (Ezzaïm, 1997). Cette évaluation étant difficile et imparfaite, cet auteur donne une fourchette de valeurs; nous avons retenu les valeurs extrêmes et leur moyenne. Pour la consommation correspondant à l'élaboration de bois de tronc, nous avons adopté des valeurs proportionnelles à celles établies avec précision au col du Bonhomme par Mohammed Ahmed (1992) en adoptant pour le peuplement du Donon une production de 5 tonnes par ha et par an, contre 2,5 au col du Bonhomme (climat plus froid). Nous avons calculé les éléments nécessaires à l'édifica-

tion d'une masse foliaire supplémentaire en estimant celle-ci à 6 tonnes pour la période 1886-1996 (deux années d'aiguilles environ), avec une teneur en éléments égale à la valeur "stabilisée" (transferts internes exclus), prise comme la concentration des aiguilles fraîchement tombées, soit 3 g/kg de Ca, 0,4 g/kg de Mg et 1,5 g/kg de K.

Le tableau 10 donne les résultats de ce bilan, soit en fourchettes correspondant aux fourchettes des valeurs d'altération, soit en moyennes, correspondant aux moyennes de ces valeurs.

La correspondance entre le bilan établi à partir des analyses de sol et celui établi à partir des flux n'est évidemment pas parfaite, surtout pour le magnésium pour lequel le bilan "sol" (tableau 8) est beaucoup plus déficitaire que le bilan "flux". (tableau 10). Ceci peut provenir d'une composition de la roche-mère du Donon plus calcique et moins magnésienne que celle du Beaujolais. En ce qui concerne le magnésium, élément pour lequel les pertes des couches holorganiques sont les plus élevées, il se peut aussi que les flux les plus forts de drainage se soient produits dès 1989 à 1992, années présumées de forte minéralisation de OH, alors que les eaux de drainage n'ont été recueillies qu'à partir de 1993.

Le tableau 11 reprend les valeurs du tableau 10 et les quantités d'éléments libérés par minéralisation à partir de l'ensemble OL, OF, OH telles qu'elles apparaissent aux tableaux 6 et 7. Il permet de comparer le bilan théorique des horizons minéraux (0 à 35 cm) au bilan réel établi à partir des analyses de sol. On voit que les résultats ne sont pas très différents pour le calcium et le potassium, mais que, pour le magnésium, le bilan réel "sol" est beaucoup moins positif que le bilan théorique établi à partir des flux.

On interprète cette différence comme la conséquence d'un défaut d'adsorption par les horizons minéraux du magnésium libéré à l'état soluble par la minéralisation des couches holorganiques, défaut qui est explicable par la forte aluminisation du

Tableau 9 - Flux d'éléments dans la pluie hors couvert et sous couvert et dans les eaux de drainage à 60 cm, en kg/ha.

Table 9 - Elements fluxes in above or below canopy and in the drainage water at 60 cm depth., kg/ha.

	flux hydrique	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Ca	Mg	K
PLUIE HORS COUVERT						
concentration		0,31	0,59	0,17	0,05	0,19
flux	1510	4,68	8,91	2,57	0,75	2,87
PLUIE SOUS COUVERT						
concentration		0,84	0,47	0,80	0,23	1,45
flux	1000	8,40	4,70	8,00	2,30	14,50
DRAINAGE A - 60 CM						
concentration		0,76	0,10	0,48	0,41	0,45
flux	680	5,17	0,68	3,26	2,79	3,06

Tableau 10 - Bilan établi d'après une estimation des ressources et des pertes, en kg /ha pour 10 ans.**Table 10** - Element balance, taking into account the major gains and losses in the Donon O.Q.S, kg /ha for ten years.

Elément	Pertes ou prélèvements			Ressources		Bilan	
	drainage (1)	immobilisation ligneeuse (2)	augmenta- tion de la masse d'aiguilles (3)	apports atmos- phériques (4)	altération (5)	théorique de l'ensemble du sol 4)+(5)-(1)-(2)-(3)	
				fourchette	fourchette	fourchette	moyenne
Ca	33	30	21	69	2 à 10	-13 à -5	-6
Mg	28	6	3	15	3 à 30	-19 à +8	-5,5
K	31	28	10	40	18 à 90	-11 à +61	+25

Tableau 11 - Bilan théorique et bilan réel des horizons minéraux, en kg/ha.**Table 11** - Theoretic balance and actual balance of elements in the mineral horizon, kg/ha.

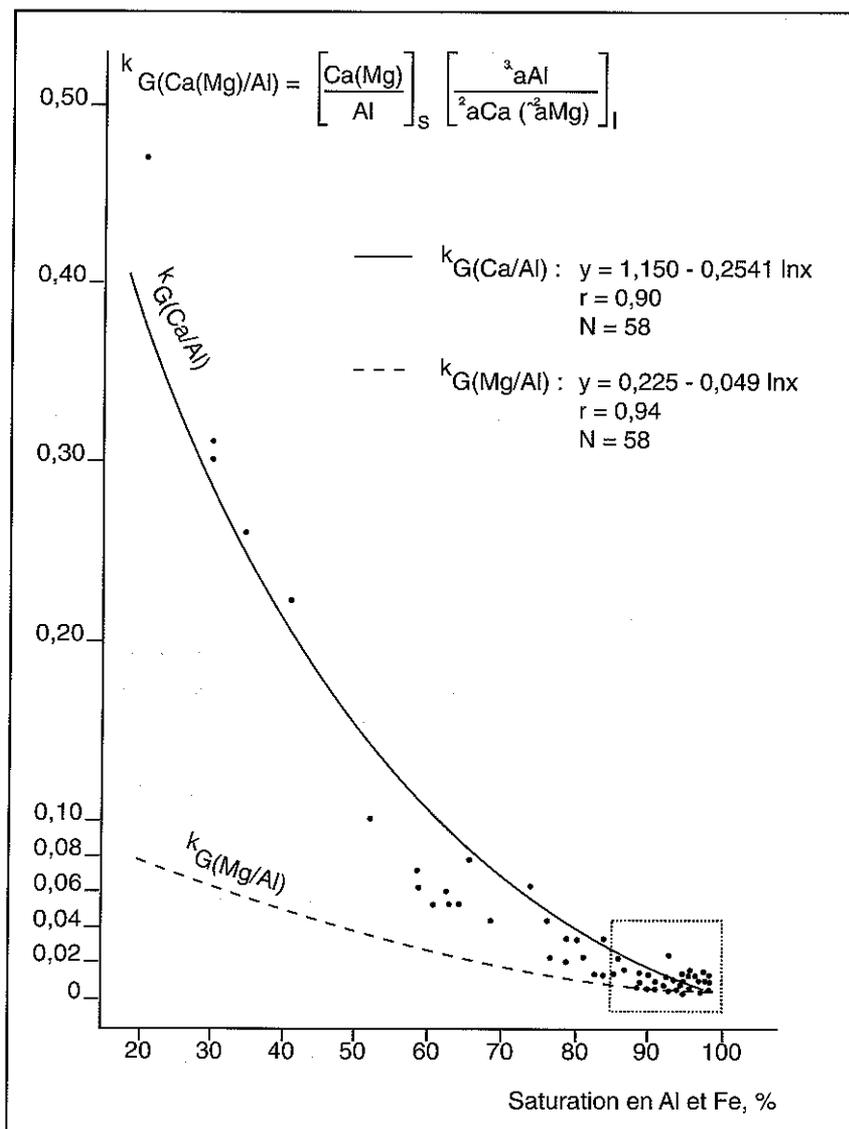
Elément	Bilan théorique de l'ensemble du sol (tableau 10)		Libération par minéra- lisation de OL, OF, OH (tableaux 6 et 7) (3)	Bilan théorique des horizons minéraux 0-35 cm		Bilan réel des horizons minéraux 0-35 cm (tableaux 6 et 7)	
	fourchette (1)	moyenne (2)		fourchette (1)+(3)	moyenne (2)+(3)	fourchette	moyenne
Ca	- 13 à - 5	- 9	15,7	+ 2,7 à + 10,7	+ 6,7	+ 9,2 à - 6,2	+ 1,5
Mg	- 19 à + 8	- 5,3	47,8	+ 28,8 à +55,8	+ 42,3	+ 2,6 à + 11,8	+ 7,2
K	--11 à + 61	+ 26,3	7,9	- 3,1 à + 68,9	+ 32,1	11,1 à + 33,7	+ 22,4

complexe adsorbant. En effet, d'après Hildebrand (1986), ainsi que Gobran et Agren (1989), la sélectivité des colloïdes minéraux pour Ca et surtout Mg diminue fortement lorsque le taux d'aluminium échangeable augmente sur le complexe adsorbant (figure 1). Ce phénomène nous semble particulièrement important car la conséquence en est que, dans ces sols extrêmement acides et aluminisés, le magnésium qui devrait revenir au sol par la chute des litières est en grande partie

perdu, ce qui génère des pertes supplémentaires pour l'écosystème et peut même éventuellement s'opposer à la remontée en fertilité du sol en fin de révolution forestière, à un moment où le retour par minéralisation de l'humus est encore fort car les litières accumulées depuis de nombreuses années se minéralisent progressivement (la quantité de magnésium accumulée dans les couches holorganiques (tableaux 6 et 7) correspond à environ 50 fois la consommation annuelle pour

Figure 1 - Variation des coefficients de sélectivité de Gapon d'un sol acide KCa/Al et KMg/Al en fonction d'une saturation croissante en aluminium échangeable (d'après Hildebrand, 1986).

Figure 1 - Evolution of the selectivity Gapon's coefficients of an acidic soil KCa/Al and KMg/Al when saturation in Al³⁺ increases (after Hildebrand, 1986).



édification des aiguilles de 1 an estimée à 2,8 kg/ha, soit 3 500 kg à 0,08 %), tandis que la productivité plus réduite de bois et de feuillage nouveau décline et consomme moins d'éléments. Le corollaire de cette observation est que les valeurs de pertes de Mg par drainage obtenues sur les plaques lysimétriques de 1993 à 1996 sont probablement inférieures à la réalité et qu'un épisode de très fort drainage de magnésium a dû intervenir dans les années antérieures, probablement au cours des hivers qui ont suivi les années chaudes de 1989 à 1992. Ce problème d'adsorption du magnésium sur les colloïdes des horizons minéraux est par ailleurs en accord avec les carences magnésiennes mises en évidence dans les Vosges pendant la phase de dépérissement (Landmann et al, 1987; Bonneau, 1993).

La correspondance entre les pertes des horizons minéraux en calcium et potassium estimées d'après les analyses du sol d'une part et le bilan des flux d'autre part est meilleure. Le calcium semble mieux retenu, ce qui s'accorde avec les résultats de Hildebrand : la sélectivité des colloïdes pour Ca lorsque le taux d'aluminium augmente diminue, mais reste nettement plus forte que pour le magnésium. Ceci n'empêche pas qu'il y ait eu des pertes par drainage assez importantes, et amène à envisager le même phénomène que pour le magnésium. Par contre on ne peut pas conclure pour le potassium dont la quantité totale dans les couches holorganiques n'a que peu diminué. Son bilan positif dans les horizons minéraux conduit à conclure que le potassium apporté par les pluies ou libéré par altération est assez bien retenu, malgré des pertes par drainage non négligeables. Les publications citées plus haut ne prennent pas le potassium en considération.

CONCLUSION

Reconnaissons qu'il est difficile de tirer des conclusions certaines car les difficultés de reproduction analytique et le prélèvement défectueux de OH introduisent un doute sur les résultats. Cependant la fonction "observatoire" oblige à essayer de dégager un pronostic sur l'évolution de la fertilité chimique du sol. La grande exigence retenue au niveau des tests statistiques, justement pour pallier dans la mesure du possible les difficultés ci-dessus, permet cependant de considérer comme quasi certaines les évolutions suivantes :

Dans les couches holorganiques

- La masse de la couche OH a diminué de 20 % au moins, vraisemblablement en raison d'une minéralisation accélérée au cours de certains étés chauds.
- Cette diminution de masse s'accom-

pagne d'une augmentation de la concentration en phosphore total qui est donc bien conservé à ce niveau tandis que les concentrations en calcium et magnésium échangeables diminuent. Au contraire la concentration en potassium échangeable augmente, tandis que l'aluminium échangeable diminue.

- Les masses de calcium et de magnésium totaux en OH diminuent: la diminution de masse de OH n'est pas compensée par une augmentation des concentrations en calcium et magnésium totaux. Ceci montre une mauvaise rétention de ces éléments par les colloïdes humiques de OH.

- Une très nette diminution de la concentration en plomb dans la couche OL, qui résulte à coup sûr de la baisse du dépôt sur les aiguilles à la suite de l'utilisation croissante de carburants sans plomb. Elle montre par ailleurs que les dépôts de plomb peuvent être sensibles assez loin des axes routiers, ici à 1,5 km environ d'une des routes Lunéville-Strasbourg, à trafic modéré.

- Le chrome total diminue également significativement en OL et OF, sans que l'explication soit aussi évidente que pour le plomb.

Dans les horizons organo-minéraux et minéraux (0-35 cm)

Seule la couche 0-5 cm a subi des changements significatifs:

- diminution du pH KCl;
- augmentation du potassium échangeable et des protons échangeables;
- augmentation des teneurs en carbone et azote organiques totaux;
- augmentation du cuivre extractible à l'EDTA;
- diminution de l'aluminium libre.

Plusieurs de ces phénomènes résultent probablement de la minéralisation de OH.

En résumé

En ce qui concerne la fertilité chimique du sol, on peut retenir les points essentiels suivants:

- la fertilité chimique des horizons organo-minéraux et minéraux (0 à 35 cm) n'a pas diminué en 10 ans;
- par contre une perte importante d'éléments, surtout magnésium, plus secondairement calcium, à partir des couches hologaniques, surtout OH, a été mise en évidence, conséquence probable d'une minéralisation particulièrement active de OH pendant des années chaudes, de 1989 à 1992. Ainsi apparaît un rôle éminent du climat qui, par l'intermédiaire des chutes de litière plus ou moins importantes qui "gonflent ou dégonflent" OL et OF et de la minéralisation plus ou moins active de OH, commande la dynamique des couches hologaniques.
- non moins important se révèle être l'effet cumulé de l'acidi-

fication, au fil des décennies passées, des horizons organo-minéraux et minéraux, dont la forte teneur en aluminium échangeable ne leur permet pas de récupérer utilement le magnésium et le calcium minéralisés en OH. Cette acidification cumulée semble jouer un rôle beaucoup plus important que l'apport annuel d'acidité par les pluies et dépôts secs.

L'image de couches hologaniques fonctionnant comme une pompe aspirante refoulant ensuite dans un tuyau percé, pour audacieuse qu'elle soit, ne semble pas inexacte et explique l'appauvrissement progressif de l'ensemble du sol mis en évidence par le bilan. C'est un aspect du fonctionnement des sols hyperacides à moder-dysmoder qui n'a, à notre connaissance, pas été signalé jusque-là dans la littérature et qui nous semble extrêmement important car cet appauvrissement ne peut, à terme, que conduire à de sérieux problèmes d'alimentation minérale en magnésium et calcium et à une inhibition de plus en plus grande de l'activité microbienne (Devèvre *et al.*, 1993, 1995).

Il faut souligner aussi l'effet évident et spectaculaire de l'emploi des carburants sans plomb sur la réduction de pollution par ce métal des couches organiques, qui, pour le moment n'apparaît encore qu'en OL.

En ce qui concerne la méthodologie, il convient d'insister sur:

- la nécessité de protocoles de prélèvements très précis et, lorsque plusieurs opérateurs interviennent, la nécessité de ménager une première phase de prélèvement en commun pour assurer une excellente homogénéité des opérations;
- le maintien à l'identique des méthodes analytiques, y compris, si possible, le recours aux mêmes types d'appareils; le recours aux mêmes opérateurs est aussi, dans la mesure du possible, souhaitable;
- le recours à des contrôles analytiques à partir d'échantillons conservés du dernier prélèvement;
- la nécessité d'une homogénéisation extrêmement soignée des échantillons avant analyse, que ce soit à l'occasion de la première opération ou d'analyses de contrôle;
- l'intérêt de suivre chaque année les pertes par drainage, car elles permettent un contrôle des évaluations faites à partir des analyses de sol.

De plus, l'éventualité d'une évolution de certaines caractéristiques des échantillons au cours de leur conservation (éléments échangeables, éléments libres) ne peut pas être exclue et nécessiterait des recherches approfondies.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été possible grâce aux financements obtenus de la Commission européenne, du ministère de l'Environnement et de la Région Alsace que nous remercions chaleureusement. La plupart des analyses ont été effectuées

aux laboratoires INRA de Pont-de-la-Maye (LERMAVE) et d'Arras (Laboratoire d'analyse des sols). Nous savons gré à leurs directeurs et aux analystes de leur coopération, notamment en ce qui concerne les discussions concernant les comparaisons analytiques interannuelles qui ont nécessité la remise en chantier de certaines analyses. Les analyses de complexe adsorbant ont été exécutées au Centre de Pédologie biologique du CNRS à Nancy par absorption atomique et nous remercions particulièrement dans ce Centre Monsieur James Rouiller qui a bien voulu permettre à Saïd Belkacem l'accès aux appareils.

BIBLIOGRAPHIE

- Bonneau M., 1989 - Que sait-on maintenant des causes du "déprissement" des forêts? *Revue forestière française*, XLI, (5): 367-385.
- Bonneau M., 1993 - Fertilisation sur résineux adultes dans les Vosges: composition foliaire en relation avec la défoliation et le jaunissement. *Annales des Sciences forestières*, 50, 159-175.
- Dambrine E., Prevosto B., 1988 - Flux des éléments minéraux dans un écosystème forestier d'altitude soumis à la pollution atmosphérique, relation avec le déprissement. Rapport scientifique DEFORPA, Nancy, p 40.
- Dambrine E., Nourrisson G., 1990 - Dépôt d'éléments minéraux sur les écosystèmes naturels terrestres (DEMENT). Rapport scientifique au ministère de l'Environnement; résultats relatifs aux années 1989-1991. INRA Nancy, 168 p.
- Dambrine E., Sverdrup H., Warfvinge P., 1995 - Atmospheric deposition, forest management and soil nutrient availability: a modelling exercise. In "Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains (G. Landmann and M. Bonneau eds), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York. 259-265.
- Dambrine E., 1997 - Bilan minéral dans les écosystèmes forestiers: rêves et réalités. *C.R. Acad. Agr. Fr.*, 1997, 83, n° 6, 141-149.
- Devèvre O., Garbaye J., Perrin R., 1993 - Experimental evidence of a deleterious soil microflora associated with spruce decline in France and Germany. *Plant and Soil*, 148, 145-153.
- 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 Verlag, 331-352.
- Dupouey J.-L., Thimonier A., Lefèvre Y., Le Tacon F., Bonneau M., Dambrine E., Poszwa A., Landmann G., 1998 - Désaturation et enrichissement en azote des sols forestiers du Nord-Est de la France au cours des dernières décennies. *Revue forestière française*, L, 5, 391-402.
- 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 l'Université Henri Poincaré, (Nancy-I) en Sciences de la Terre. 181 pages + annexes
- Falkengren-Grerup U., 1995 - Effects of longterm storage on some chemical properties of forest soils samples. *Ecological Bulletin*, 24, 129-132.
- Gobran, G.R., Ågren G.I., 1989 - Significance of changes in Kc values for Ca-Al exchange and its effect on soil and water acidification predictions. *Ecology Modelling*, 44, 165-175.
- Hildebrand E. E., 1986 - Zustand und Entwicklung der Austauschereigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 105, (1), 60-76.
- Landmann G., Bonneau M., Adrian M., 1987 - Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le massif forestier vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements? *Revue forestière française*, XXXIX, (1): 5-11.
- Landmann G., 1989 - Évolution sur 20 ans du complexe adsorbant et de l'alimentation minérale d'un peuplement adulte de sapin pectiné dans un site d'altitude du massif vosgien. In: *Journées de travail FEFORPA, Nancy-Paris, février-mars 1989*. INRA, Nancy, vol.4, 10.31-10.3.6.
- Landmann G., Bonneau M., (Eds), 1995 - *Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains*. Springer, 461 pages.
- Lefèvre Y., 1997 - Essai de mise en évidence d'une évolution récente du pH et de la teneur en cations basiques de quelques sols forestiers des Vosges (nord-est de la France). *Annales des Sciences forestières*, 54, 5, 483-492
- Marquès R., 1996 - Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation de Douglas (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco) dans les Monts du Beaujolais (France). Thèse, Université de Nancy I, 240 pages.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielsky H., Gaultier J.-P., Lavelle P., Legros J.-P., Leprêtre A., Sterckemann T., 1999 - Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des sols. *Étude et Gestion des sols*, volume vi, n° 3, 215-230.
- Mohammed Ahmed D., 1992 - Rôle du facteur édaphique dans le fonctionnement biogéochimique et l'état de santé de deux pessières vosgiennes. Effet d'un amendement calci-magnésien. Thèse, Université de Nancy I. 206 pages.
- Nys C., 1987 - Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier. Conséquences des engraisements. Thèse de Docteur d'État, Université de Nancy I, 201 pages.
- Poszwa A., 1996 - Mise en évidence de l'acidification des sols d'Aubure DEA national de Science du sol. Université Henri Poincaré, Nancy I, 44 pages + annexes.
- Ranger J., 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*, 36, 2, 93-112.
- Ranger J., Mohammed Ahmed D., Gelhaye D., 1994 - Effet d'un amendement calco-magnésien, associé ou non à une fertilisation, sur le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans une plantation d'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) dépérissant dans les Vosges. *Annales des Sciences forestières*, 51, 455-475.
- Schwarz D., 1977 - Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. Flammarion Médecine Sciences. Paris, 318 pages.
- Tamm C.O., Halibäcken L., 1988 - Changes in soil acidity in two forest areas with different acid deposition: 1920s and 1980s. *Ambio* 17, 1, 56-61.
- Thimonier A. 1994 Changements de la végétation et des sols en forêt tempérée européenne au cours de la période 1970-1990: rôle possible des apports atmosphériques. Thèse en Sciences de la vie. Univ. Paris Sud, Centre d'Orsay.
- Ulrich E., 1991 - Climat de pollution, (en particulier dans les Vosges). In: *Les recherches en France sur le dépérissement des forêts*. Programme DEFORPA, 2^e rapport. G. Landmann Ed. École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy.
- Ulrich E., 1995 - Le réseau RENECOFOR. Objectifs et réalisation. *Revue forestière française*, XLVII, 2, 107-124.

