

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Band: 149 (1998)

Heft: 8

Artikel: Variabilité spatio-temporelle des dépôts atmosphériques d'éléments minéraux sous hêtraie

Autor: Thimonier, Anne

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-766121>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Variabilité spatio-temporelle des dépôts atmosphériques d'éléments minéraux sous hêtraie

Par Anne Thimonier

Keywords: Atmospheric deposition; throughfall; spatial variation; temporal variation;
Fagus sylvatica L.

FDK 111.7: 116.11: 176.1 Fagus: 425: UDK 551.577.13

1. Introduction

La pluie apporte aux végétaux l'eau et une partie des éléments minéraux indispensables à leur croissance. Elle influence également les processus chimiques et biologiques dans le sol. La quantification et l'analyse chimique des précipitations sont donc essentielles à la compréhension des cycles hydrologique et biogéochimique des écosystèmes terrestres. Lorsque l'on s'intéresse aux écosystèmes forestiers, la mesure de la pluie incidente seule est cependant insuffisante. En effet, les précipitations traversant les houppiers des arbres sont en partie interceptées, et la pluviométrie est typiquement plus faible sous couvert. De plus, les précipitations traversant les houppiers voient leur composition chimique se transformer considérablement: elles s'enrichissent en éléments par la remobilisation des poussières, gaz et aérosols déposés à la surface des feuilles par temps sec («dépôts secs») ou par le brouillard («dépôts occultes»), ainsi que par le lessivage d'éléments libérés par le feuillage ou produits par les communautés vivant à la surface des feuilles (microorganismes, invertébrés...). Les éléments nutritifs peuvent également être absorbés au niveau du feuillage, mais en général cette absorption directe ne compense pas l'enrichissement en éléments dû aux autres processus. Ainsi, les précipitations sous couvert sont bien souvent beaucoup plus concentrées que la pluie incidente. On distingue généralement les pluviollessivats au sens strict, qui correspondent aux précipitations gouttant à travers le feuillage, et le ruissellement de tronc, c'est-à-dire la fraction des précipitations s'écoulant le long des branches et du tronc et s'infiltrant à la base de

l'arbre. Le ruissellement de tronc représente un plus petit volume mais est souvent plus concentré que les pluviollessivats. La *figure 1* résume les différents types de dépôts d'origine atmosphérique et les processus évoqués dans un peuplement forestier.

Ainsi enrichis après leur passage à travers le feuillage, les pluviollessivats peuvent représenter un terme important du flux total d'éléments retournant au sol via les précipitations et les chutes de litière (feuilles mortes et autres

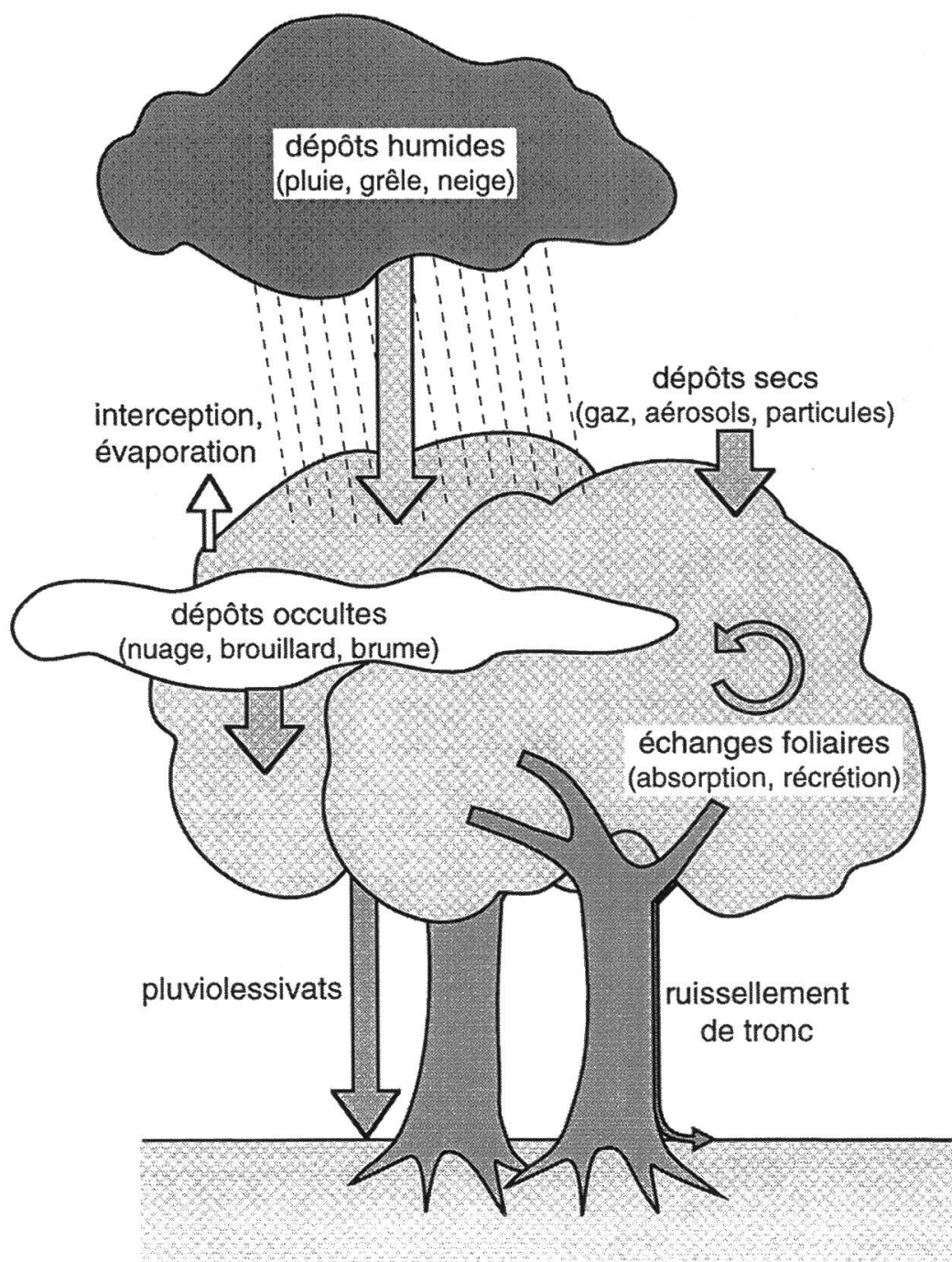


Figure 1. Les différentes formes de dépôts atmosphériques en forêt.

débris organiques). Les pluviollessivats ont l'avantage supplémentaire de (re)distribuer les éléments sous forme soluble, et donc directement assimilable. La quantification du flux de substances nutritives au sein du cycle biogéochimique n'est toutefois pas la seule information qu'apporte la mesure des pluviollessivats. Bien qu'en partie déterminée par les processus au niveau des houppiers, la composition des pluviollessivats fournit également des renseignements précieux sur le climat de pollution auquel est soumis l'écosystème; les différences de composition des pluviollessivats observées entre des sites exposés à des niveaux de pollution différents le montrent. La mesure en parallèle des pluies incidentes et des pluviollessivats permet de déterminer, au moins dans une certaine mesure, la contribution respective des dépôts atmosphériques et des échanges au niveau du feuillage, et de détecter les risques associés à la présence d'éléments en trop grande quantité. En effet, même des éléments nutritifs indispensables comme l'azote ou le soufre peuvent se comporter en polluants et avoir des effets nocifs pour les écosystèmes forestiers, lorsque, à la suite des activités humaines, ils se retrouvent présents en excès dans l'environnement.

En raison de la multiplicité des informations apportées et de la relative simplicité de l'échantillonnage, la mesure de la pluie incidente et des pluviollessivats est devenue courante dans toutes les études écosystémiques en forêt (par exemple *Ellenberg et al.*, 1986; *Flückiger et al.*, 1986; *Programmleitung NFP14/Direction du PNR 14, Schüpbach E.*, 1991). Dans le cadre du sous-programme de Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers (Langfristige Waldökosystem-Forschung, LWF), dépendant du programme «Observation des forêts suisses» (ObFS) et mis en œuvre conjointement par le FNP et l'OFEPF, nous recueillons les pluviollessivats (au sens strict) en continu depuis 1994 dans un peuplement de hêtre à structure homogène. L'objectif est d'estimer les dépôts atmosphériques sur ce site, et de déterminer l'importance de la variabilité de ces dépôts dans l'espace et dans le temps.

2. Site d'étude

La placette d'étude est située à Othmarsingen (AG), sur le Plateau, à 500 m d'altitude. Le site a été choisi comme placette pilote dans le cadre du projet de Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers. Une surface de deux hectares a été délimitée dans une futaie de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) arrivée à maturité, de structure homogène. La végétation de la strate herbacée est également homogène à l'échelle de l'association (EK 7, *Galio odorati-Fagetum typicum*, *Ellenberg et Klötzli*, 1972). La placette, subdivisée en deux demi-placettes d'un hectare chacune, présente cependant la particularité d'être située sur deux versants. L'une des demi-placettes est située sur le versant orienté au nord, l'autre sur le versant orienté au sud (*figure 2*).

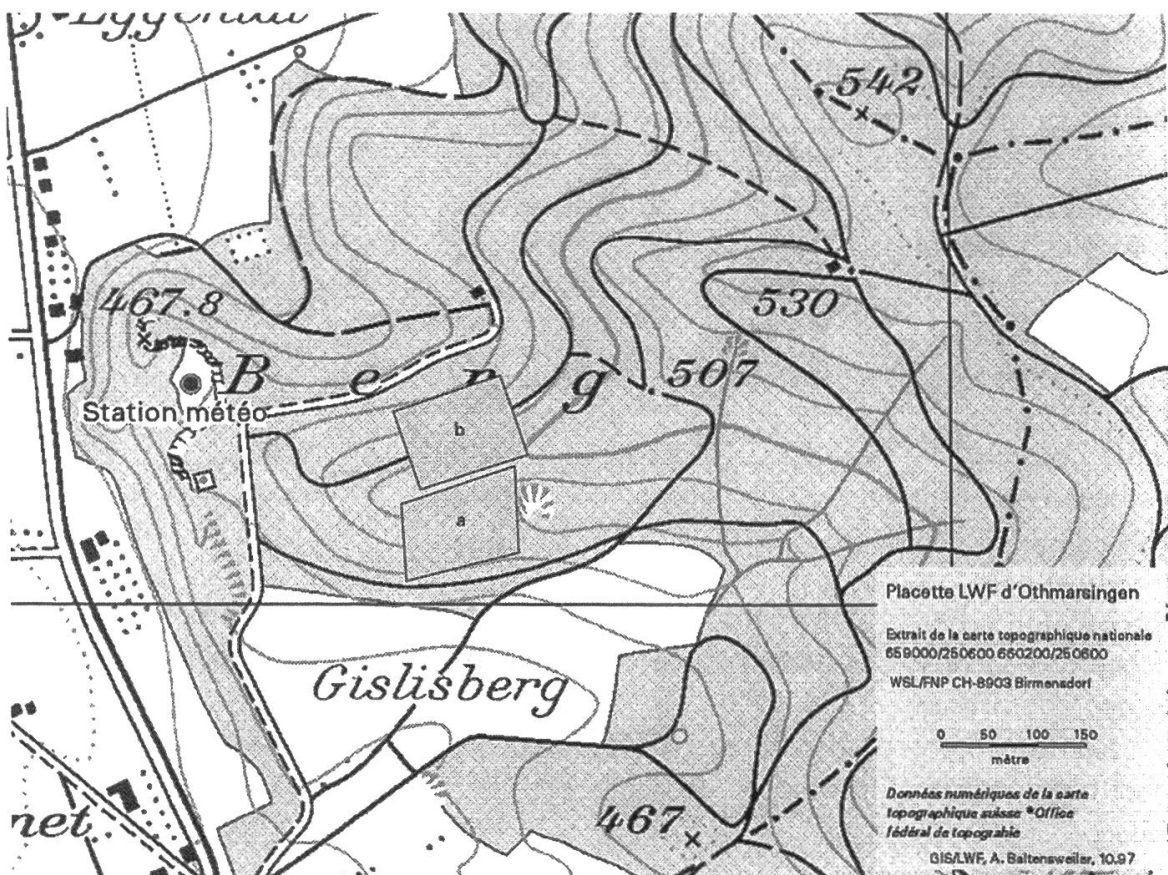


Figure 2. Situation topographique des deux demi-placettes LWF et de la clairière dans laquelle se trouvent les collecteurs hors couvert et la station météorologique. (Extrait reproduit avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 16.1.1998).

3. Echantillonnage des pluviollessivats et des précipitations incidentes

3.1 Plan d'échantillonnage

Les collecteurs sont constitués chacun d'une bouteille de deux litres de capacité, reliée à un entonnoir profond de 100 cm² de surface réceptrice. Les différentes composantes du collecteur sont en polyéthylène. L'entonnoir est muni d'un disque en polyéthylène de 55 mm de diamètre permettant de pré-filtrer les débris végétaux grossiers, et d'un filtre en polyester d'une maille de 30 µ, filtrant les éléments plus fins. Le collecteur est placé dans un tube en PVC enfoncé dans le sol de sorte que la surface réceptrice se trouve à 1 m du sol. Un anneau de protection, placé au-dessus du collecteur sur le tube en PVC, permet de limiter les risques de pollution par les oiseaux (*figures 3a* et *3b*). Le tube en PVC protège le collecteur de la lumière dans une certaine mesure, et le risque d'activité microbienne est réduit. Cependant, il est vraisemblable qu'au cours du séjour de l'échantillon sur le terrain, certains composés, notamment azotés, se transforment malgré tout sous l'effet de l'activité des microorganismes dans l'échantillon (nitrification de l'ammonium, ammonification, trans-

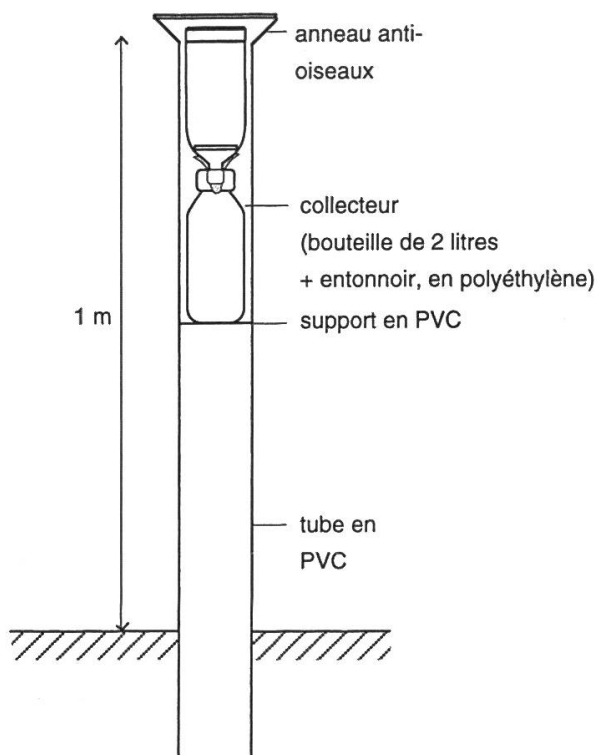


Figure 3a

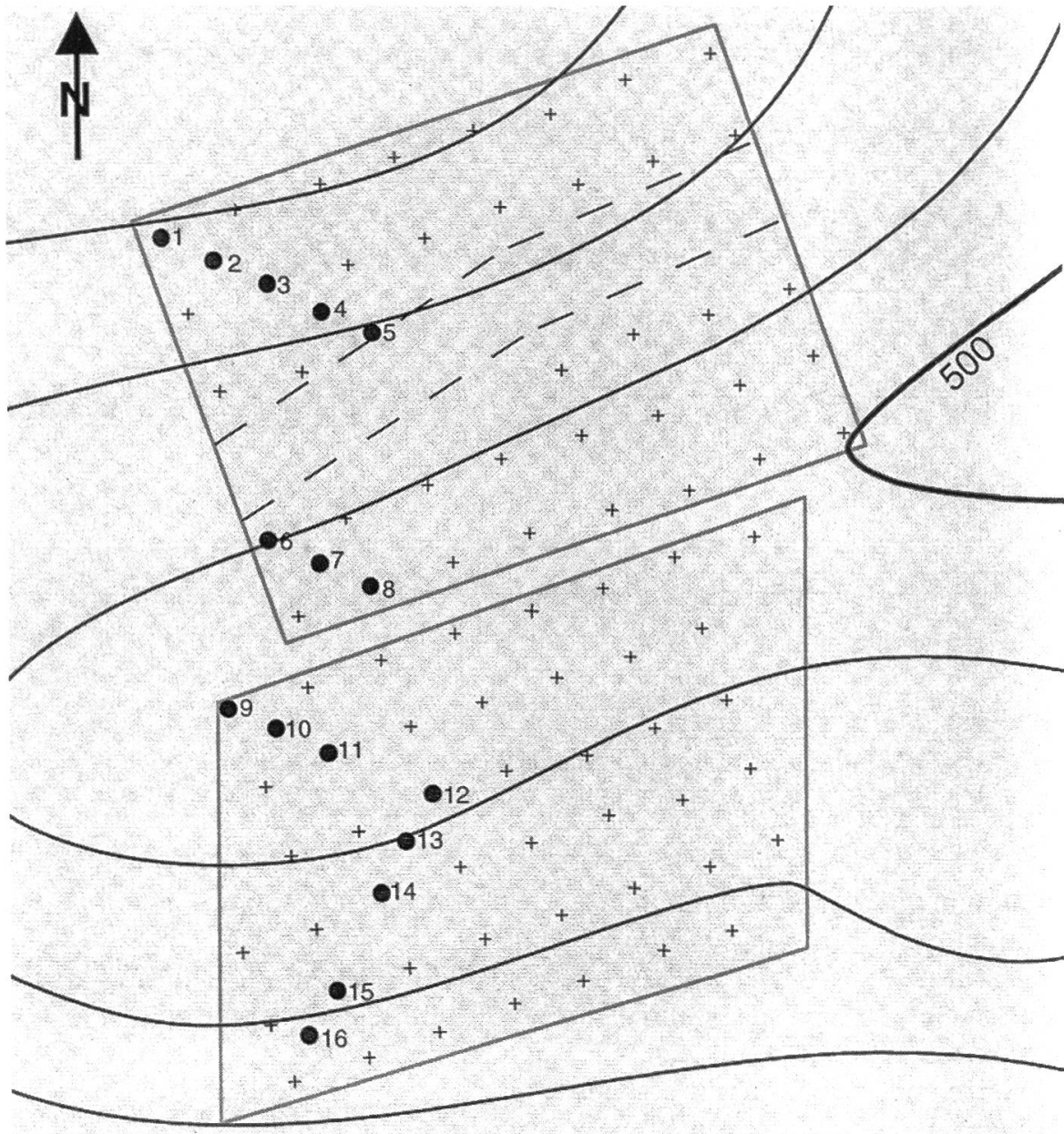


Figure 3b

Figure 3. Représentation schématique du collecteur de pluie utilisé hors et sous couvert (3a). Ce collecteur est de type «Münden 100» (Hessische Forstliche Versuchsanstalt, 1994). Disposition des collecteurs en forêt (3b).

formation en azote organique ou minéralisation de l'azote organique). Aussi indiquerons toujours par la suite les résultats concernant l'azote minéral total sans commenter en détail la proportion d'ammonium et de nitrate, tout en gardant en mémoire les incertitudes liées aux échanges entre formes minérales et organiques.

Seize collecteurs de pluviollessivat ont été installés de façon à couvrir le gradient de pente et d'exposition observé dans le peuplement. Les points du maillage 15 m x 15 m ayant servi à la cartographie du sol ont été choisis comme points de repère pour l'installation des collecteurs. L'emplacement des collecteurs devait être limité dans l'espace à une zone définie à l'intérieur de la placette, à la fois pour éviter de grands déplacements d'un point à un autre lors des prélèvements et pour ne pas empiéter sur les autres études conduites sur la placette. Quatre transects du maillage 15 m x 15 m ont donc été sélectionnés, puis un numéro de transect a été tiré au hasard pour chacune des deux demi-placettes. A partir de ces points d'origine, les collecteurs ont été placés aux nœuds du maillage et, une fois sur deux, à mi-distance entre deux nœuds, en zigzaguant d'un bord à l'autre de la zone étudiée (figures 3b et 4). Dans l'ensemble, le plan d'échantillonnage est donc à la fois de type stratifié, systématique et aléatoire. Chacun des collecteurs est numéroté et géoréférencé.



+ maillage 15 m x 15 m

10 m

● collecteurs de pluviolessivats (n=16)

équidistance des courbes de niveau : 10 m

Figure 4. Répartition des collecteurs de pluviolessivats dans les deux demi-placettes LWF.

Trois collecteurs ont été installés dans l'enclos où se trouve la station météorologique, dans une petite clairière proche de la placette, afin de recueillir parallèlement les précipitations incidentes. Les collecteurs sont de la même conception que les collecteurs sous couvert.

Ce réseau de collecte des pluviolessivats et des précipitations incidentes a été mis en place en octobre 1994. Les échantillons sont généralement prélevés toutes les deux semaines. En quelques occasions cependant, l'intervalle de col-

lecte a été rallongé à trois semaines, plus rarement quatre semaines, lorsqu'il n'avait pas plu au cours de l'intervalle ou que le volume de précipitation recueilli était très faible. Les collecteurs contenant les échantillons sont remplacés par des collecteurs propres, et sont ramenés au laboratoire. Les résultats obtenus sur une période d'un peu plus de deux ans, regroupant 52 intervalles de collecte, sont présentés ici.

3.2 Analyses chimiques

Lorsqu'ils ne peuvent pas être traités immédiatement à leur arrivée au laboratoire, les échantillons sont stockés à 4 °C. La pesée de chaque échan-

Tableau 1. Paramètres analysés sur les échantillons de précipitations et techniques utilisées.

Paramètre	Traitement	Technique-Méthode
Quantité	–	pesée
Conductivité (20 °C)	–	conductimètre
pH	–	pHmètre
N (azote) soluble total	filtration à 0,45 µ oxydation au persulfate de potassium	chromatographie ionique
NH ₄ ⁺ (ammonium)	filtration à 0,45 µ	analyse à injection de flux (FIA)
NO ₃ ⁻ (nitrate)	filtration à 0,45 µ	chromatographie ionique
SO ₄ ²⁻ (sulfate)		
Cl ⁻ (chlorure)		
PO ₄ ²⁻ (phosphate)		
P (phosphore)	filtration à 0,45 µ	spectrométrie de masse
Ca (calcium)	acidification (HNO ₃)*	sur plasma à couplage inductif (ICP-MS)
Mg (magnésium)		
K (potassium)		
Na (sodium)		
Al (aluminium)*		
As (arsenic)*		
Cd (cadmium)*		
Cr (chrome)*		
Cu (cuivre)*		
Fe (fer)*		
Mn (manganèse)*		
Ni (nickel)*		
Pb (plomb)*		
Zn (zinc)*		

*Le fer, l'aluminium, le manganèse et les métaux lourds ont été analysés sur une période de deux ans. Pour l'analyse de ces éléments, l'échantillon est acidifié directement dans le collecteur pour remettre en solution les ions adsorbés sur les parois. Les différentes composantes du collecteur sont lavées à l'acide et rincées plusieurs fois à l'eau ultra-pure avant d'être réutilisées.

tillon, la mesure du pH et de la conductivité électrique, la filtration à $0,45 \mu$ et l'acidification à l'acide nitrique ont lieu le plus tôt possible après l'arrivée des échantillons en laboratoire. Les échantillons ainsi préparés en double exemplaires sont ensuite stockés à $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à leur analyse par le laboratoire central du FNP (*tableau 1*).

En multipliant la concentration d'un élément ou substance par le volume d'eau, on peut calculer l'apport de cet élément ou substance hors couvert et sous couvert par unité de surface et unité de temps. Les apports sont rapportés à la surface réceptrice des collecteurs et extrapolés à l'hectare. Ils sont cumulés sur les intervalles de collecte pour obtenir des valeurs annuelles de dépôts.

3.3 Observations et mesures complémentaires

Toute anomalie concernant les collecteurs (traces de fientes par exemple) est consignée. Ces observations facilitent le contrôle des résultats d'analyse et justifient l'exclusion d'échantillons suspects. Le stade de développement du feuillage des strates arborescente et arbustive est évalué visuellement à chaque visite du site. Caractériser la structure de la canopée est important car les houppiers peuvent intercepter plus ou moins efficacement les précipitations et

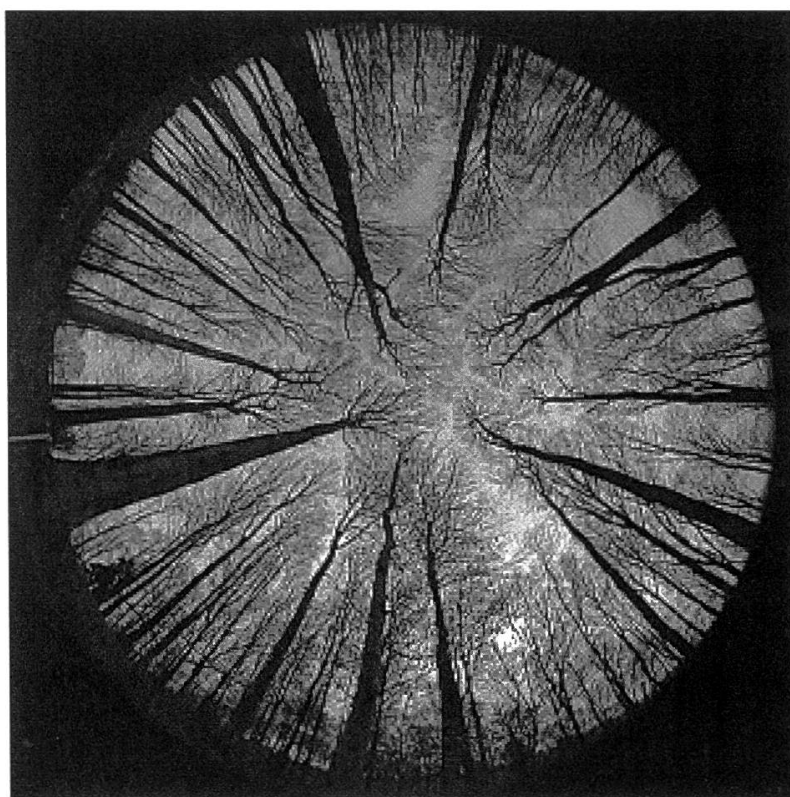


Figure 5. Exemple de photographie hémisphérique prise au-dessus d'un collecteur en l'absence de feuillage.

les dépôts secs. Des informations objectives sur la canopée devraient donc permettre de mieux appréhender la variation spatiale et temporelle des pluviollessivats. Cet aspect est particulièrement important dans les études à long terme: il faut pouvoir distinguer si une évolution à long terme des apports atmosphériques s'accompagne d'un changement de structure du peuplement.

L'appréciation de la structure de la canopée est cependant difficile. Aussi avons-nous utilisé deux méthodes. La première méthode consiste à prendre des photographies hémisphériques des houppiers des arbres (*figure 5*). Ces photographies sont prises à l'aide d'un objectif à 180° d'angle de vue, centré au-dessus du tube en PVC, en position horizontale et orienté vers le ciel. La deuxième méthode s'appuie sur des mesures simultanées de lumière sous couvert et hors couvert à l'aide d'un capteur quasi hémisphérique centré de même sur le collecteur et orienté de la même façon que l'objectif utilisé pour les photographies. La proportion de ciel et de feuillage sur les photographies et le rapport des deux valeurs de lumière mesurées par le capteur permettent indépendamment d'estimer un paramètre important de la structure de la canopée: l'indice de surface foliaire, qui correspond à une surface de feuilles (simple face) par unité de surface de sol.

4. Caractérisation de la composition chimique des précipitations

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les valeurs moyennes de volume d'eau et de concentrations par intervalle de collecte et par situation (hors couvert ou sous couvert). Cette technique statistique permet de représenter graphiquement les relations entre variables (en l'occurrence, le volume d'eau et les concentrations des différents éléments). Elle extrait des facteurs explicatifs de la variabilité des données. Ces facteurs, combinaisons des variables d'origine, sont représentés sous forme d'axes.

Une variable contribue d'autant plus à la construction d'un axe qu'elle se trouve projetée à proximité de cet axe, et elle est d'autant mieux représentée qu'elle est proche de la limite du cercle de corrélation. Deux variables qui contribuent à un même axe sont bien corrélées entre elles. La corrélation est positive si les deux variables sont projetées du même côté de l'axe; elle est négative si les variables sont projetées aux extrémités opposées. La *figure 6* peut donc s'interpréter de la façon suivante:

L'axe 1 (le plus explicatif) oppose le volume d'eau aux concentrations en éléments ou substances minérales: les précipitations les plus concentrées sont les moins importantes en volume. L'axe 2 représente l'acidité (proton H). Tous les éléments ou substances sont assez bien regroupés, à l'exception des protons. En particulier, le sodium et le chlore sont proches l'un de l'autre, témoignant de leur origine marine (sel). Les cations basiques (calcium, magnésium,

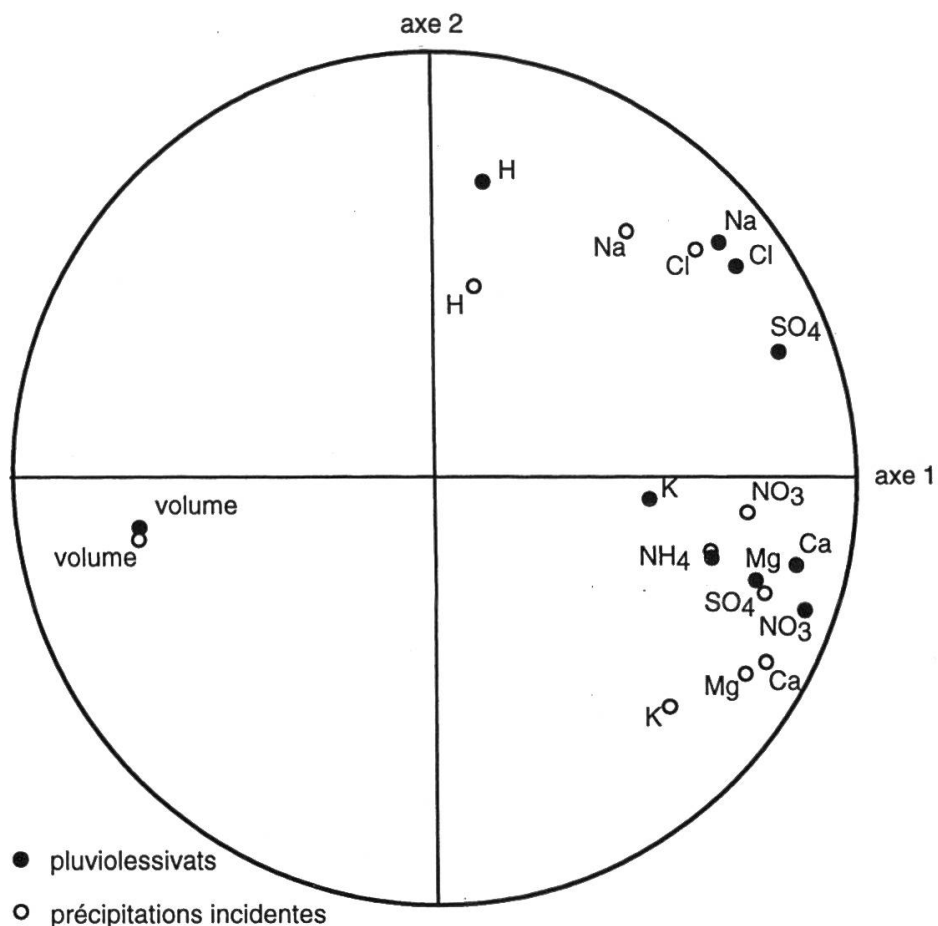


Figure 6. Résultat de l'analyse en composantes principales portant sur le volume de précipitation et les concentrations (cercle des corrélations).

potassium) ont tendance à s'opposer aux protons, c'est-à-dire à l'acidité des précipitations.

5. Estimation des dépôts atmosphériques

5.1 Comparaison entre les pluiolessivats et les précipitations hors couvert

La figure 7 montre les valeurs moyennes de dépôts hors couvert et sous couvert (macroéléments uniquement). Les apports hors couvert et sous couvert de hêtre en azote et en soufre sur le site du Solling (Allemagne) et de Lägern (Suisse) sont indiqués également, mais nous ne ferons pas de comparaison détaillée avec notre site. En effet, outre le climat de pollution (on voit par exemple que les dépôts en soufre sont nettement plus élevés au Solling), jouent de nombreux autres facteurs comme les conditions stationnelles, la structure du peuplement, les méthodes utilisées (à Lägern par exemple, les pluies hors couvert ont été recueillies dans un collecteur ne s'ouvrant qu'en

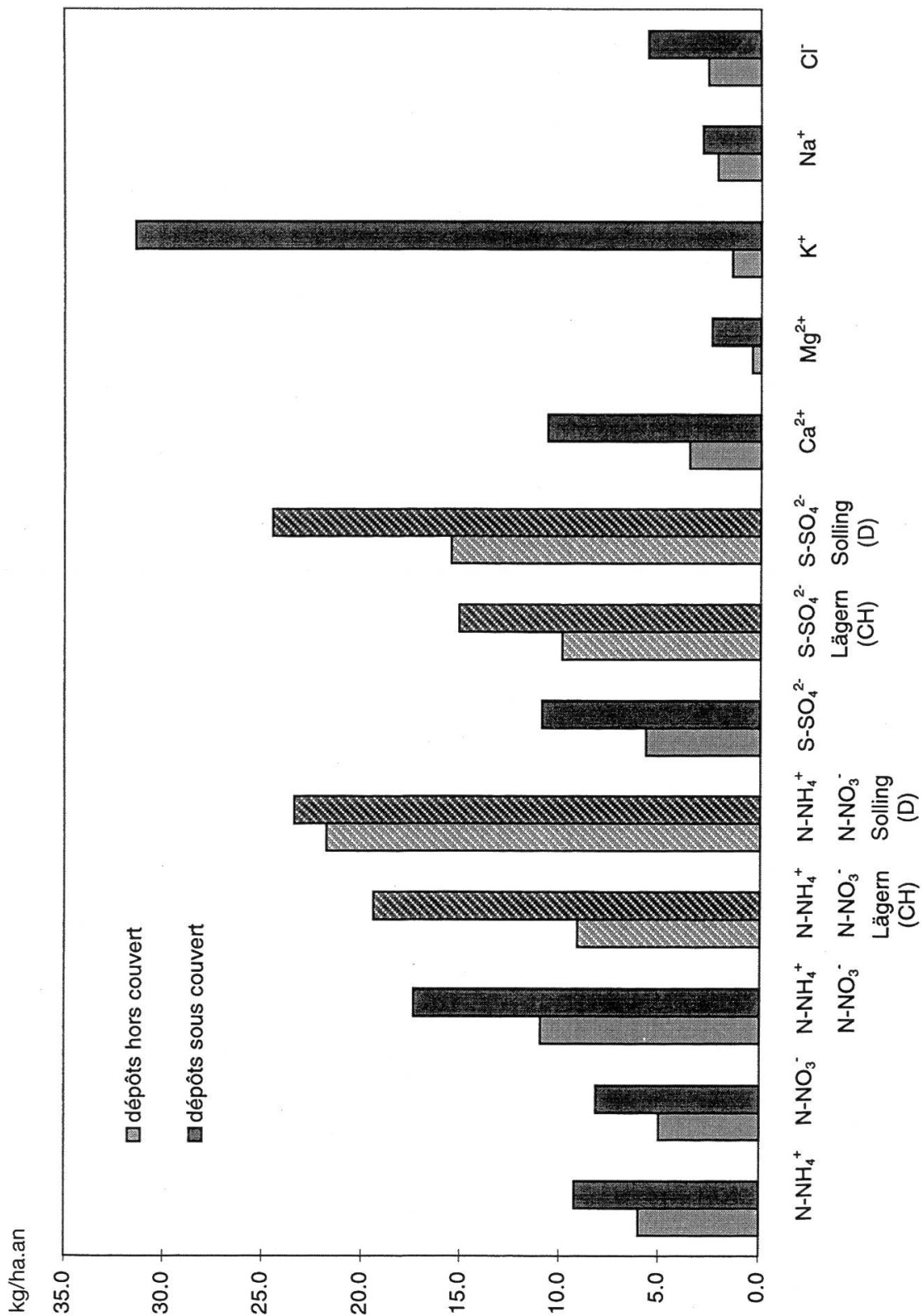


Figure 7. Dépôts hors couvert et sous couvert (moyenne des deux années de mesures) pour les éléments analysés, à l'exception des éléments traces. A titre de comparaison sont indiqués également les dépôts en azote et soufre mesurés pour des peuplements de hêtre au Solling (Allemagne, période 1986–1990, d'après Matzner et Meiwes, 1994) et le site de Lägeren (Suisse, période 1986-1987, d'après Programmleitung NFP14/Direction du PNR 14, Schüpbach E., 1991).

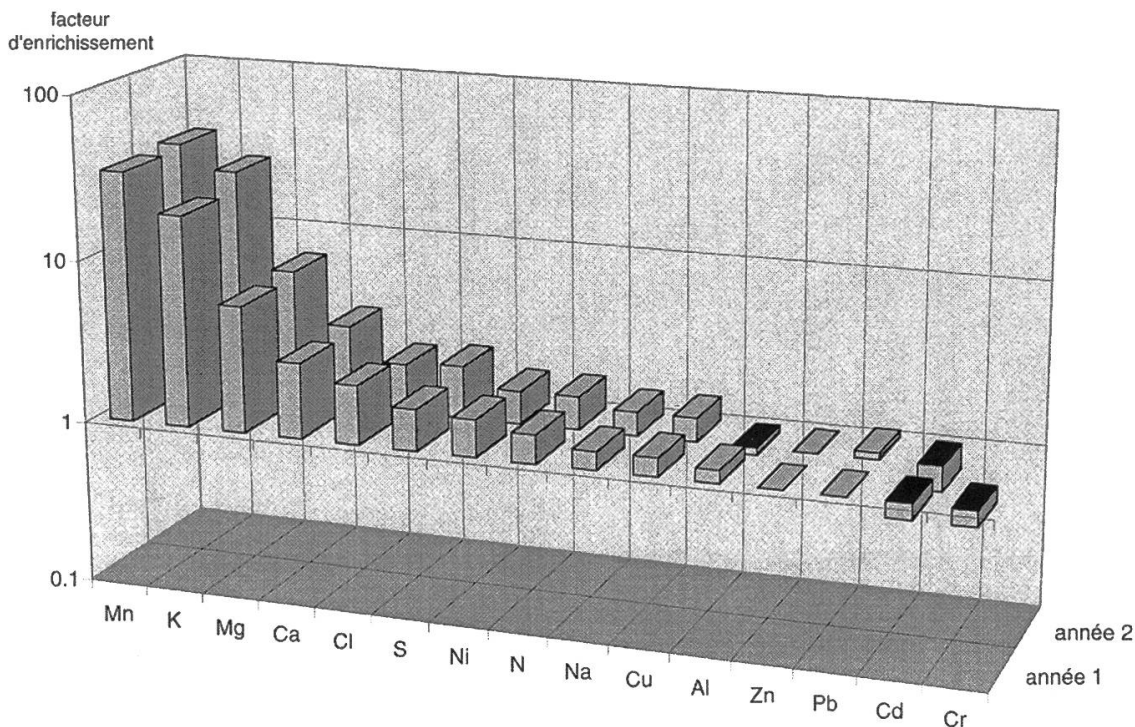


Figure 8. Facteur d'enrichissement (rapport entre les pluvioloessivats et les précipitations incidentes) pour les différents éléments analysés.

période de pluie, et donc ne collectant pas de poussières en période sèche). De plus, la période d'échantillonnage ne coïncide pas pour les trois sites, ce qui peut induire certaines différences, comme nous le suggérons au point 5.3.

Pour chaque élément ou substance, on peut calculer le rapport entre les apports sous couvert et hors couvert. La figure 8 montre ce rapport (facteur d'enrichissement) pour les différents ions analysés, classés par valeur décroissante de ce rapport.

Les apports sont plus élevés sous couvert que hors couvert pour presque tous les ions, à l'exception de l'aluminium et des métaux lourds, pour lesquels le rapport est d'environ 1. L'enrichissement après le passage des précipitations dans les couronnes est particulièrement marqué pour le manganèse et le potassium, présents en concentrations élevées dans les feuilles et très mobiles (Tukey, 1970). Le dépôt d'éléments à la surface des feuilles et branches par temps sec peut également plus ou moins contribuer à l'enrichissement des pluvioloessivats. Les contributions respectives des deux processus peuvent être estimées à partir d'un certain nombre d'hypothèses, que nous exposons ci-dessous.

5.2 Estimation de la part des dépôts atmosphériques et des échanges foliaires dans la composition des pluvioloessivats

La méthode d'estimation des dépôts atmosphériques que nous utilisons repose sur les travaux d'Ulrich (1983). Bien que cette méthode soit entachée

de nombreuses incertitudes, elle peut donner un ordre de grandeur des dépôts relativement satisfaisant (*Draaijers et Erisman, 1995*).

La composition chimique des pluiolessivats PL est déterminée par les dépôts atmosphériques totaux (DT, somme des dépôts humides DH et secs DS) ainsi que par les échanges foliaires (E, absorption (-) ou récrétion (+)).

$$PL = DT \pm E = DS + DH \pm E \quad (1)$$

On estime que les dépôts humides sont peu différents des précipitations recueillies hors couvert. On admet également les hypothèses suivantes:

- Na, Cl et SO₄ ne sont ni absorbés ni récrétés par le feuillage (E = 0). Pour ces éléments, on a alors:

$$DS = PL - DH \quad (2)$$

- les particules contenant Ca, Mg et K ont une dynamique de dépôt similaire à celle des particules contenant Na. On calcule alors un facteur de dépôt sec F_{DS} tel que:

$$F_{DS} = DS_{Na} / DH_{Na} \quad (3)$$

Pour Ca, Mg et K on a alors:

$$DS = F_{DS} \times DH \quad (4)$$

Pour l'azote, le phosphore et les métaux lourds, l'estimation des dépôts totaux est plus incertaine. Les résultats issus de la littérature nous permettent d'estimer grossièrement les dépôts totaux d'azote. *Lovett et Lindberg (1993)* ont établi une régression à partir des données provenant de 11 sites aux Etats-Unis et ont déterminé que 40% des dépôts totaux en azote sont consommés dans le feuillage, soit 1 à 12 kg N·ha⁻¹·an⁻¹. *Matzner (1989)* estime que 8 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ sont retenus en hêtraie sur le site de Solling. *Brumme et al. (1992)*, en extrapolant les résultats d'une expérience de fertilisation sur de jeunes plants de hêtre, estiment quant à eux que 3 à 10 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ sont retenus dans les couronnes d'un peuplement mature. De nombreux travaux montrent que l'azote sous forme ammoniacale est plus facilement absorbé que l'azote sous forme oxydée (*Bowden et al., 1989; Garten et Hanson, 1990; Gebauer et al., 1991; Brumme et al., 1992; Wilson, 1992; Bruckner et al., 1993; Lumme, 1994; Boyce et al., 1996*). De plus, la plupart des études démontrent que des apports élevés d'azote favorisent l'absorption au niveau du feuillage (*Gebauer et al., 1991; Wilson, 1992; Brumme et al., 1992; Bruckner et al., 1993; Lovett et Lindberg, 1993*). La placette d'Othmarsingen étant située dans un contexte agricole, il est possible que la quantité d'azote rete-

nue au niveau du feuillage soit relativement importante. Nous donnerons une fourchette de valeurs pour les dépôts totaux en considérant que la consommation d'azote au niveau du feuillage représente 20 à 50% des dépôts totaux.

5.3 Dépôts annuels en macroéléments

Les hypothèses ci-dessus ont été appliquées aux deux années de mesures complètes disponibles. Les estimations sont rassemblées dans le *tableau 2*.

Les deux années se distinguent nettement l'une de l'autre par leur pluviométrie: 1171 mm pour la première année de mesure contre seulement 912 mm pour la deuxième année. En revanche, les apports en éléments sont peu différents entre les deux années. *Duijsings et al.* (1986) et *Ulrich et al.* (1995), par exemple, ont observé la même similarité des apports ioniques pour des pluviométries différentes.

Le *tableau 3* et la *figure 9* comparent nos mesures ou estimations aux valeurs modélisées par Meteotest à partir de divers paramètres, comme les concentrations dans les eaux de pluie et les hauteurs de précipitations, les concentrations atmosphériques et les vitesses de dépôts (*FOEFL*, 1996).

Les dépôts totaux estimés en azote (21,7 – 34,7 kg N·ha⁻¹·an⁻¹) sont plutôt inférieurs aux dépôts modélisés par Meteotest (*figure 9*). Il faut admettre un taux de rétention d'azote dans le feuillage très élevé, plutôt supérieur aux valeurs rencontrées dans la littérature, pour que nos dépôts totaux estimés s'approchent des 37 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ obtenus par Meteotest. Ils excèdent cependant, légèrement ou fortement, les charges critiques en azote déterminées empiriquement ou par la méthode du bilan à l'équilibre (*steady state mass balance method*). Ces charges critiques en azote correspondent à une valeur de dépôts de cet élément en-dessous de laquelle, dans l'état actuel des connaissances scientifiques, il ne se produit pas d'effets nocifs appréciables sur les éléments sensibles de l'écosystème considéré (*Nilsson et Grennfelt*, 1988). Les charges critiques déterminées empiriquement pour les peuplements de feuillus sur sol acide s'élèvent à 10 – 20 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ (*UN/ECE*, 1996, in *FOEFL*, 1996). Les charges critiques déterminées par la méthode du bilan à l'équilibre, paramétrée pour un peuplement de feuillu, exploité, situé sur le Plateau Suisse (*FOEFL*, 1996), s'élèvent à 20,1 kg N·ha⁻¹·an⁻¹. Les dépôts totaux d'azote estimés à Othmarsingen pourraient provoquer des déséquilibres nutritifs pour le peuplement, induire des changements dans les strates herbacée et muscinale et affecter les mycorhizes (*UN/ECE*, 1996, in *FOEFL*, 1996). Les processus dans le sol pourraient également être affectés.

Les dépôts en soufre sont peu élevés (5,7 kg S·ha⁻¹·an⁻¹ hors couvert, 10,9 kg S·ha⁻¹·an⁻¹ sous couvert en moyenne sur les deux années de mesures). Les

Tableau 2. Dépôts (en kg·ha⁻¹·an⁻¹) à Othmarsingen (AG). Les dépôts secs sont estimés d'après la méthode d'Ulrich (1983) pour S, Ca, Mg, K, Na, Cl. Une fourchette pour les dépôts secs de N est estimée en considérant que l'azote retenu dans la canopée représente 20 à 50% des apports totaux de N (soit 4,3 à 17,3 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ en moyenne sur les deux années).

a. octobre 1994 - octobre 1995

	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃ ⁻	S-SO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻
dépôts hors couvert	6.1	5.3	11.4	6.0	3.9	0.4	1.7	2.5	2.5
dépôts sous couvert	9.3	8.3	17.6	10.8	11.2	2.6	33.3	3.3	5.9
dépôts secs (estimés)			10.6 - 23.8	4.8	1.2	0.1	0.5	0.8	3.4
dépôts totaux (estimés)			22.0 - 35.2	10.8	5.1	0.6	2.2	3.3	5.9

b. octobre 1995 - octobre 1996

	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃ ⁻	S-SO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻
dépôts hors couvert	5.8	4.7	10.5	5.3	3.2	0.3	1.1	1.8	2.7
dépôts sous couvert	9.1	8.0	17.1	11.1	10.2	2.2	29.5	2.5	5.3
dépôts secs (estimés)			10.9 - 23.7	5.7	1.3	0.1	0.5	0.7	2.6
dépôts totaux (estimés)			21.4 - 34.2	11.1	4.5	0.5	1.6	2.5	5.3

c. moyenne

	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃ ⁻	S-SO ₄ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻
dépôts hors couvert	6.0	5.0	11.0	5.7	3.5	0.4	1.4	2.1	2.6
dépôts sous couvert	9.2	8.1	17.4	10.9	10.7	2.4	31.4	2.9	5.6
dépôts secs (estimés)			10.8 - 23.8	5.3	1.3	0.1	0.5	0.8	3.0
dépôts totaux (estimés)			21.7 - 34.7	10.9	4.8	0.5	1.9	2.9	5.6

Tableau 3. Dépôts (en kg·ha⁻¹·an⁻¹) estimés par Meteotest (source: Beat Rihm, communication personnelle et FOEFL, 1994, 1996). Les estimations pour les composés azotés se rapportent à la période 1993–1995, celles pour le soufre à la période 1986–1990.

	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃ ⁻	S-SO ₄ ⁻
dépôts humides	5.2	3.8	9.0	6.6
dépôts secs	21.3	7.1	28.4	13.1
dépôts totaux	26.5	10.9	37.4	19.7

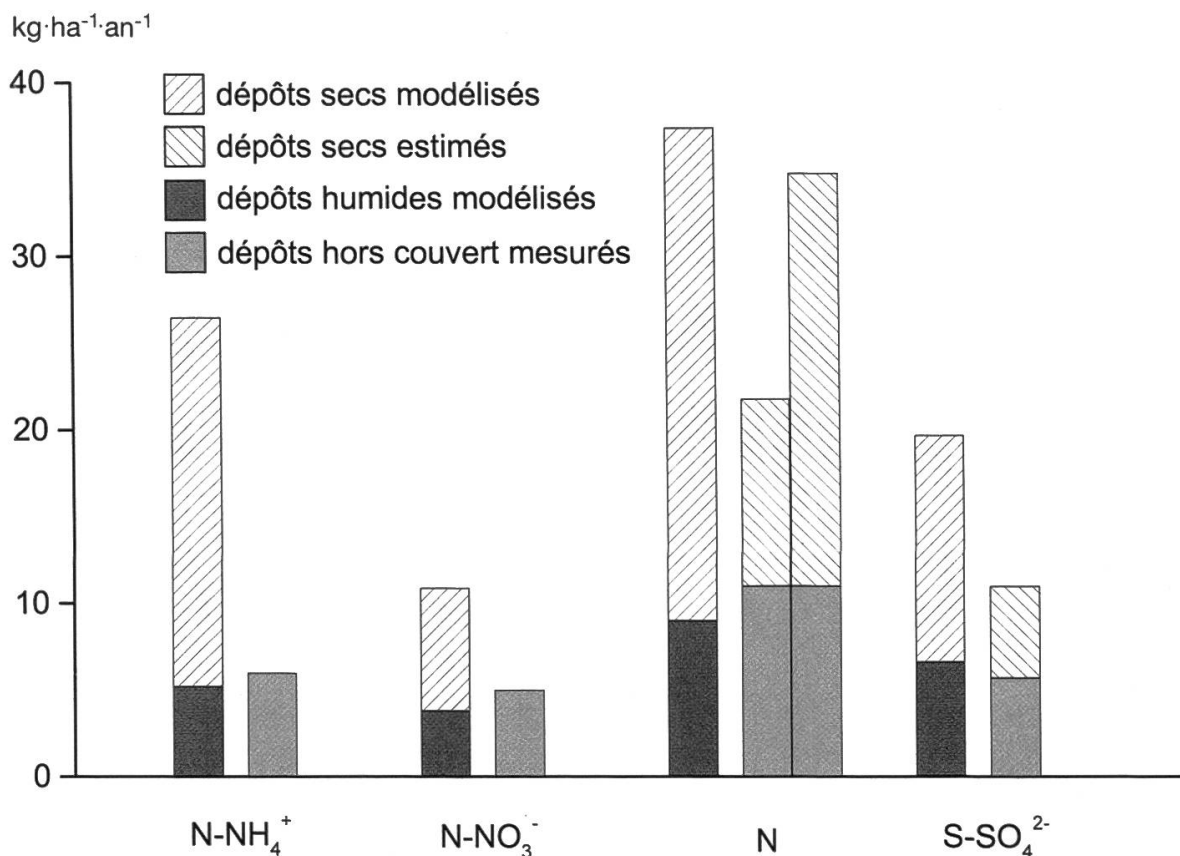


Figure 9. Dépôts hors couvert et dépôts secs estimés en azote et en soufre, comparés aux dépôts humides et secs modélisés par Meteotest. Deux valeurs sont données pour l'estimation des dépôts secs en azote à partir de nos données. Ces deux valeurs correspondent à l'hypothèse que l'azote retenu dans la canopée représente respectivement 20 et 50% des dépôts totaux d'azote.

dépôts humides estimés par modélisation par Meteotest sont proches des dépôts que nous mesurons hors couvert dans nos collecteurs ouverts en continu (tableaux 2 et 3; figure 9). Les dépôts secs en soufre, que nous estimons en calculant la différence entre les dépôts sous couvert et les dépôts hors couvert, sont en revanche nettement plus faibles que les dépôts secs modélisés à partir des concentrations en dioxyde de soufre (SO_2). Si les valeurs modélisées sont correctes, cette différence est sans doute liée au fait que les périodes auxquelles se rapportent valeurs modélisées et valeurs mesurées ne coïncident pas. Les valeurs modélisées sont calculées pour la période 1986–1990, tandis que nous avons échantillonné les précipitations à partir de fin 1994. Or, les émissions de soufre ont considérablement diminué au cours de la dernière décennie (BUWAL, 1995, 1997). A Suhr (AG), station cantonale de mesure de la qualité de l'air relativement proche d'Othmarsingen, la concentration annuelle moyenne en SO_2 est passée de $13 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en 1987 à $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en 1995 (BUWAL, 1997). En prenant une concentration en SO_2 de $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, le dépôt sec modélisé s'élève à $5,0 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, valeur très proche de celle que nous estimons ($5,3 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$).

5.4 Dépôts d'éléments traces

Le *tableau 4* présente les dépôts en éléments traces hors couvert et sous couvert à Othmarsingen. La *figure 10* permet de comparer ces dépôts à ceux mesurés dans d'autres sites. Othmarsingen ne se démarque pas des sites ruraux

Tableau 4. Dépôts en éléments traces (en $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) à Othmarsingen (AG). Du fait des risques de contamination relativement élevés, les dépôts annuels en ces éléments ont été calculés en prenant, plutôt que la concentration moyenne, la concentration minimale pour les collecteurs hors couvert et la médiane des concentrations pour les 16 collecteurs sous couvert, pour chaque intervalle de collecte.

a. octobre 1994 - octobre 1995

	Al	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
pluvioléssivats	159.9	3.7	4.1	181.7	1144.8	19.0	39.1	221.4
dépôts hors couvert	129.6	4.7	5.2	139.5	33.4	11.3	40.9	213.3

b. octobre 1995 - octobre 1996

	Al	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
pluvioléssivats	187.3	2.2	10.0	145.8	1210.6	18.9	37.0	199.2
dépôts hors couvert	197.8	3.3		104.7	33.4	12.0	34.8	205.0

européens présentés, sauf pour le cuivre. C'est l'élément pour lequel nous avons eu le plus de difficulté à éviter la contamination de nos collecteurs ou de nos tubes destinés aux analyses, mais le choix de la concentration la plus faible parmi les trois valeurs hors couvert pour chacun des intervalles de collecte (plutôt que la valeur moyenne) devrait minimiser l'influence de valeurs élevées qui seraient dues à une contamination.

6. Variation temporelle

De manière générale, les concentrations et les flux fluctuent assez fortement au cours de l'année. Quelques éléments marquent une certaine dynamique en liaison avec la saison. Les pluvioléssivats sont par exemple plus concentrés en potassium pendant la période de végétation et surtout au printemps, au moment du débourrement, ainsi qu'en automne, lors de la sénescence du feuillage (*figure 11*). Le facteur d'enrichissement en soufre montre également une variation saisonnière très nette (*figure 12*). Le flux des pluvioléssivats est nettement supérieur aux flux hors couvert en hiver. Comme les échanges foliaires sont peu importants pour le soufre, cette variation reflète

g·ha⁻¹·an⁻¹

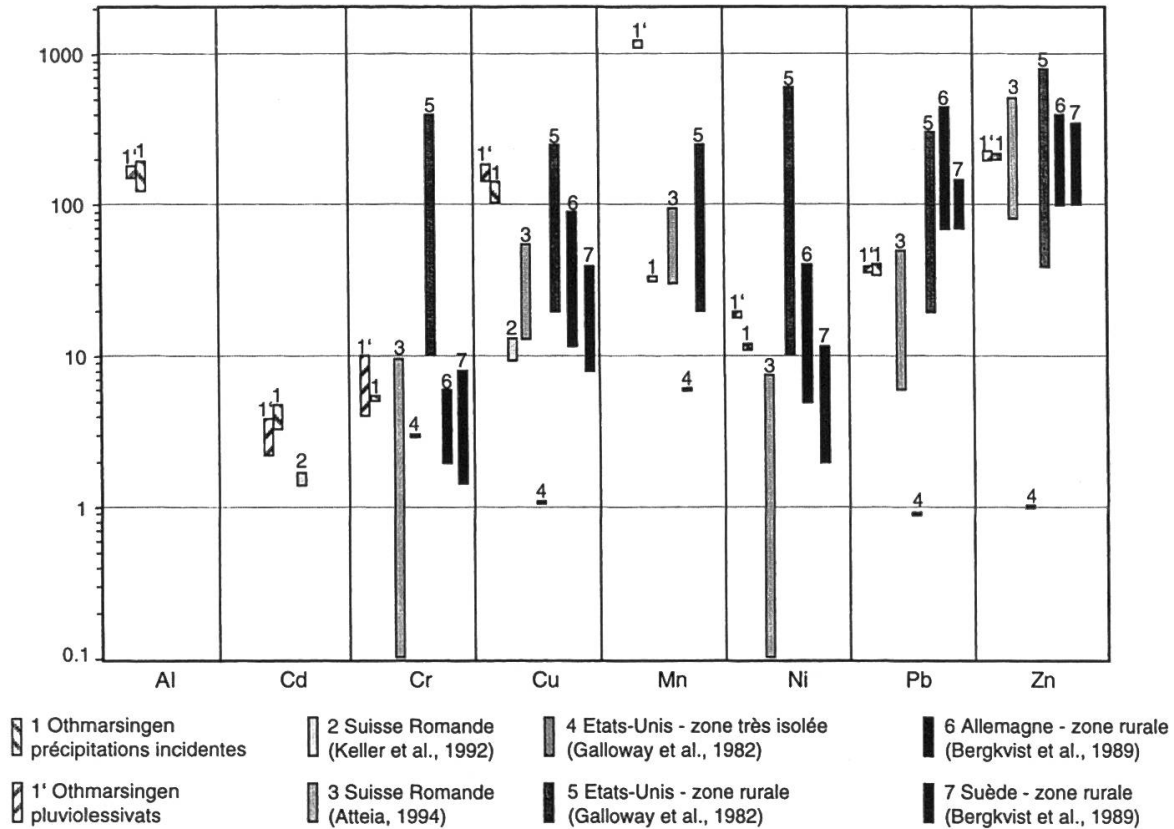


Figure 10. Dépôts en éléments traces. Comparaison entre Othmarsingen (dépôts par les précipitations incidentes et par les pluviolossivats, la fourchette de valeurs se rapportant aux deux années de mesure) et d'autres sites en Suisse, Allemagne, Suède et aux Etats-Unis (dépôts par les précipitations incidentes uniquement, la fourchette de valeurs se rapportant à des sites différents). Figure adaptée d'après Atteia, 1994.

vraisemblablement l'augmentation des émissions en hiver liées aux combustions (foyers domestiques et industriels), se traduisant par des dépôts secs plus élevés. Le pH semble également être plus bas en hiver; autrement dit, les précipitations apparaissent un peu plus acides.

7. Variation spatiale

7.1 Différences entre les collecteurs

Les pluviolossivats ne sont pas seulement variables dans le temps, ils le sont aussi dans l'espace. Les figures 13, 14 et 15 montrent les précipitations annuelles et les dépôts en soufre et en nitrate estimés pour chaque point de collecte. La variabilité des hauteurs de précipitations et des dépôts en soufre mesurés montre la nécessité d'utiliser le plus grand nombre de collecteurs possible pour obtenir une image satisfaisante des dépôts pour un peuplement.

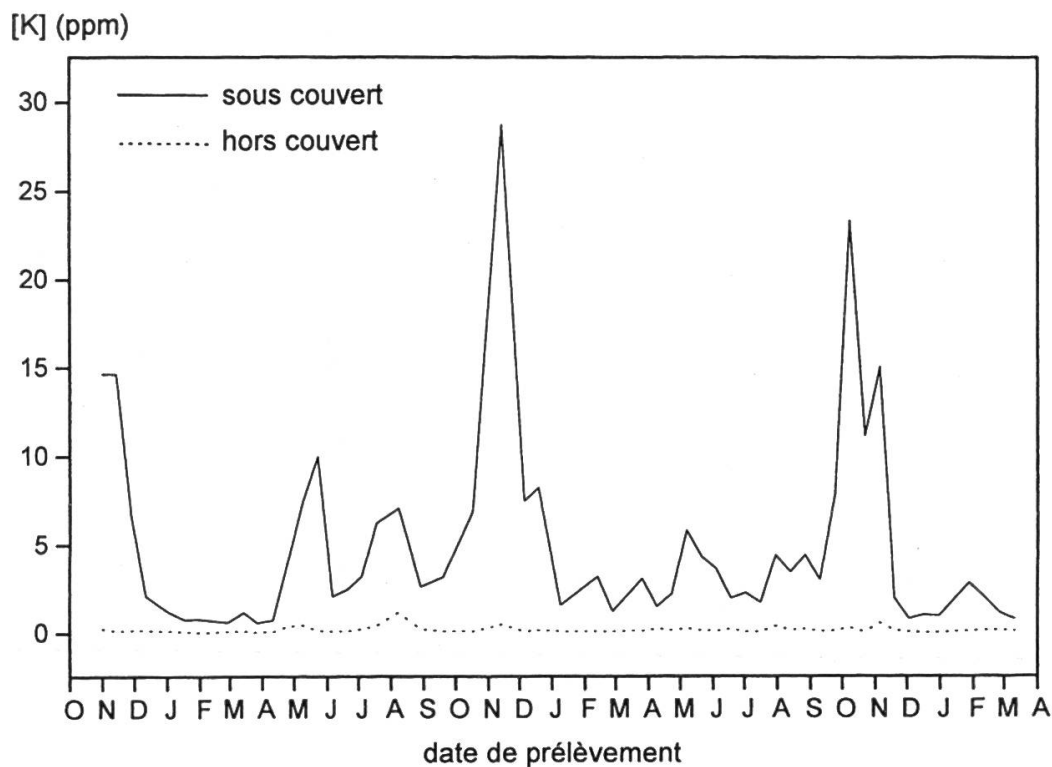


Figure 11. Variation de la concentration en potassium dans les précipitations incidentes et les pluviollessivats sur la période de mesure (octobre 1994 à mars 1997).

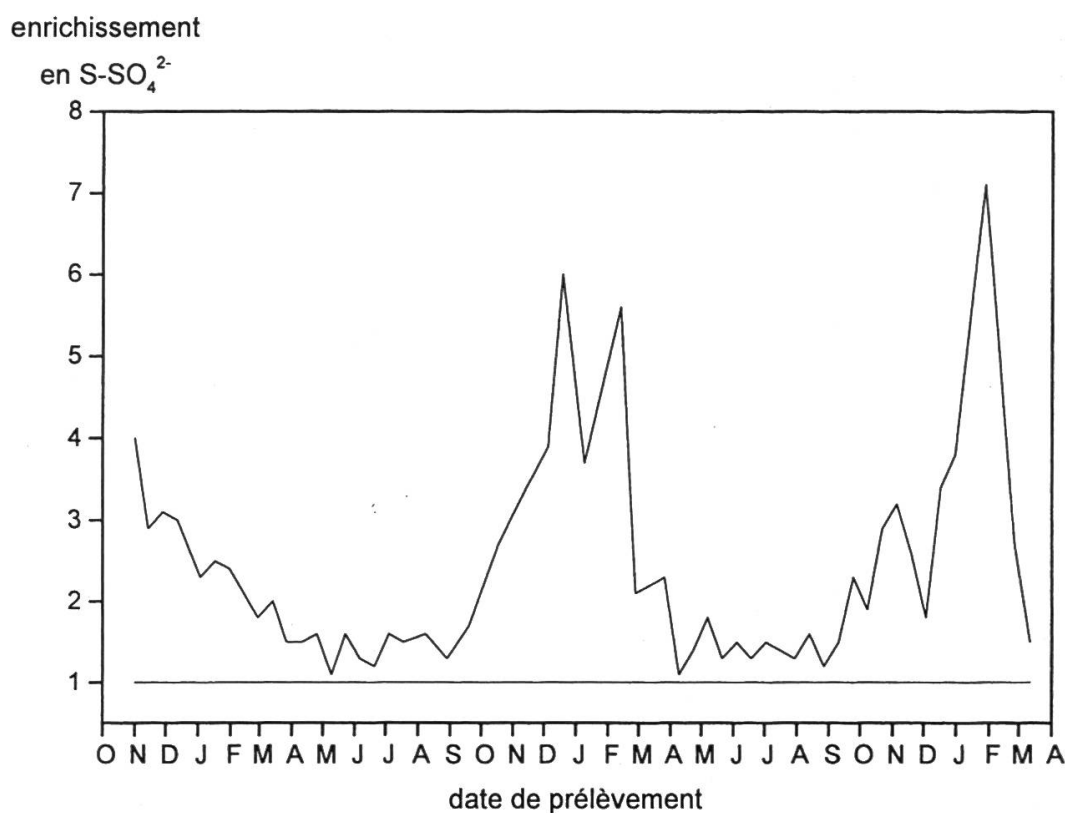


Figure 12. Variation du facteur d'enrichissement des pluviollessivats en sulfate (rapport flux sous couvert / flux hors couvert) sur la période de mesure (octobre 1994 à mars 1997).

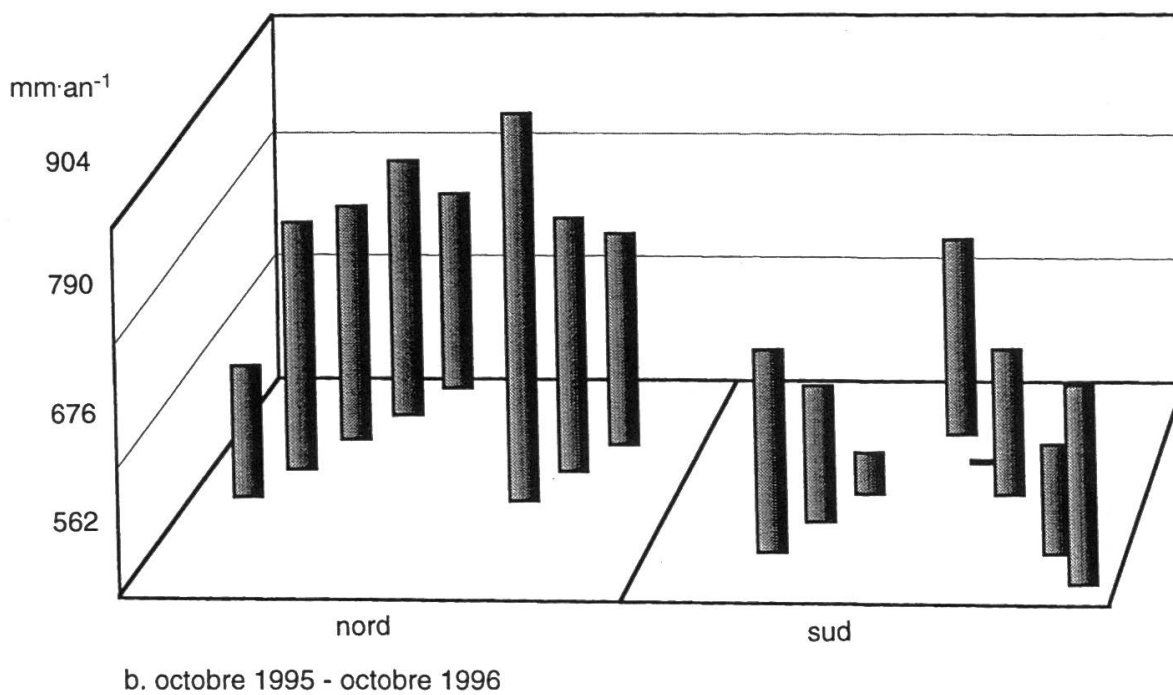
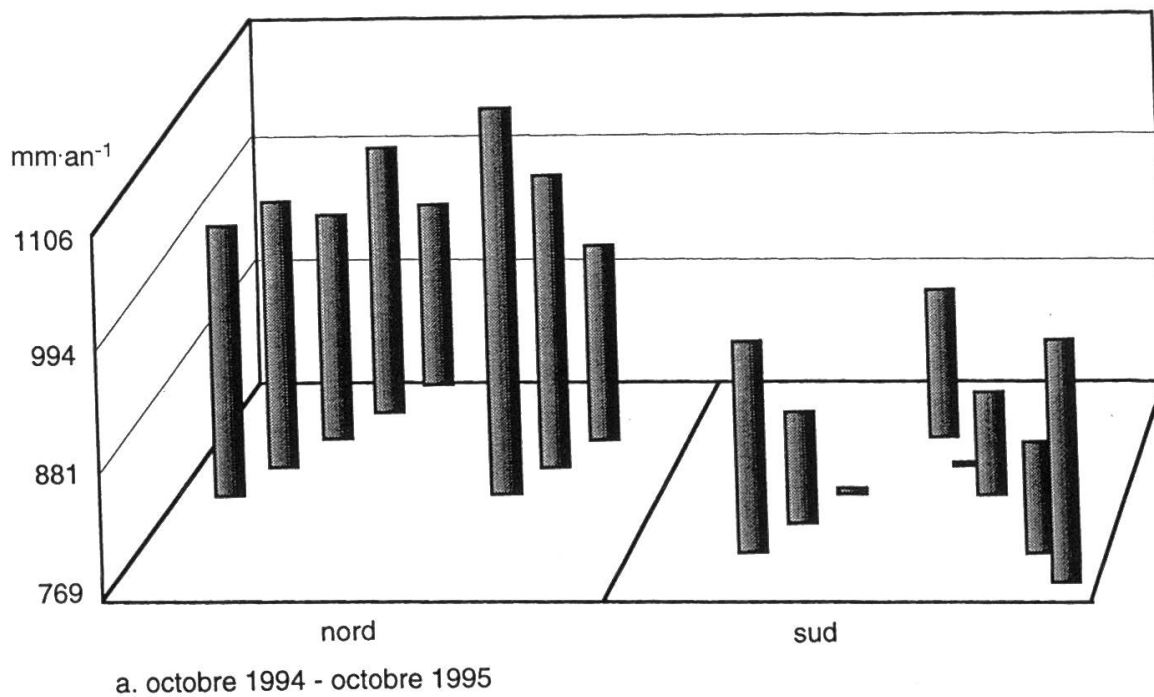
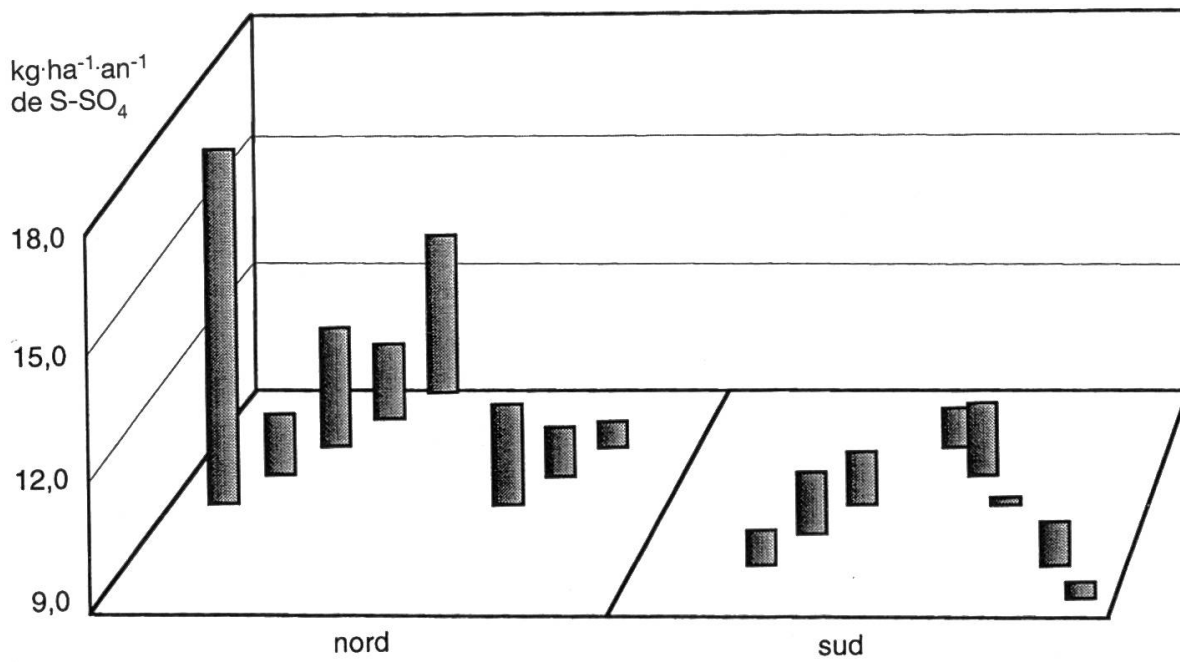
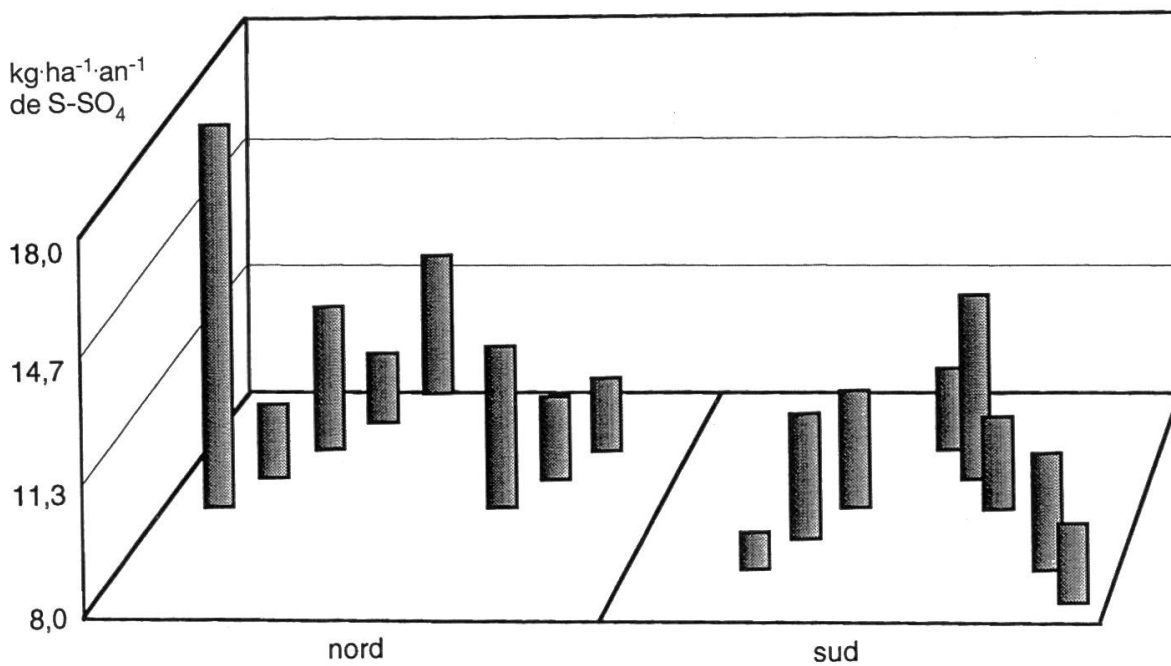


Figure 13. Variation spatiale de la pluviométrie, estimée en chaque point de collecte.
 a. octobre 1994 à octobre 1995.
 b. octobre 1995 à octobre 1996.

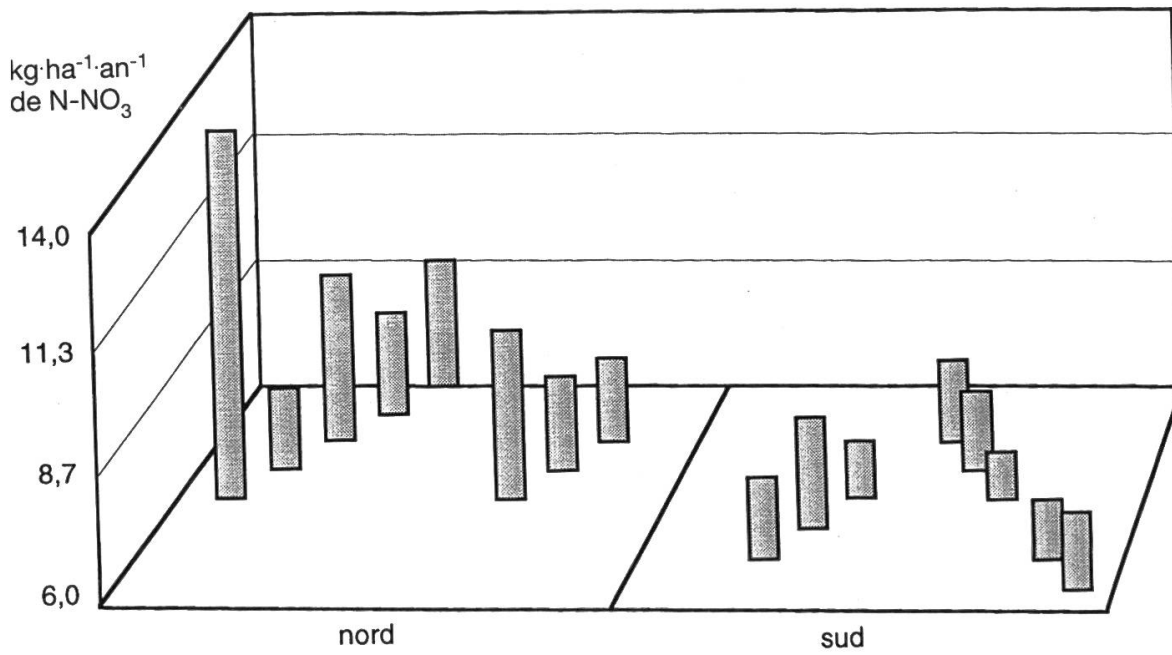


a. octobre 1994 - octobre 1995

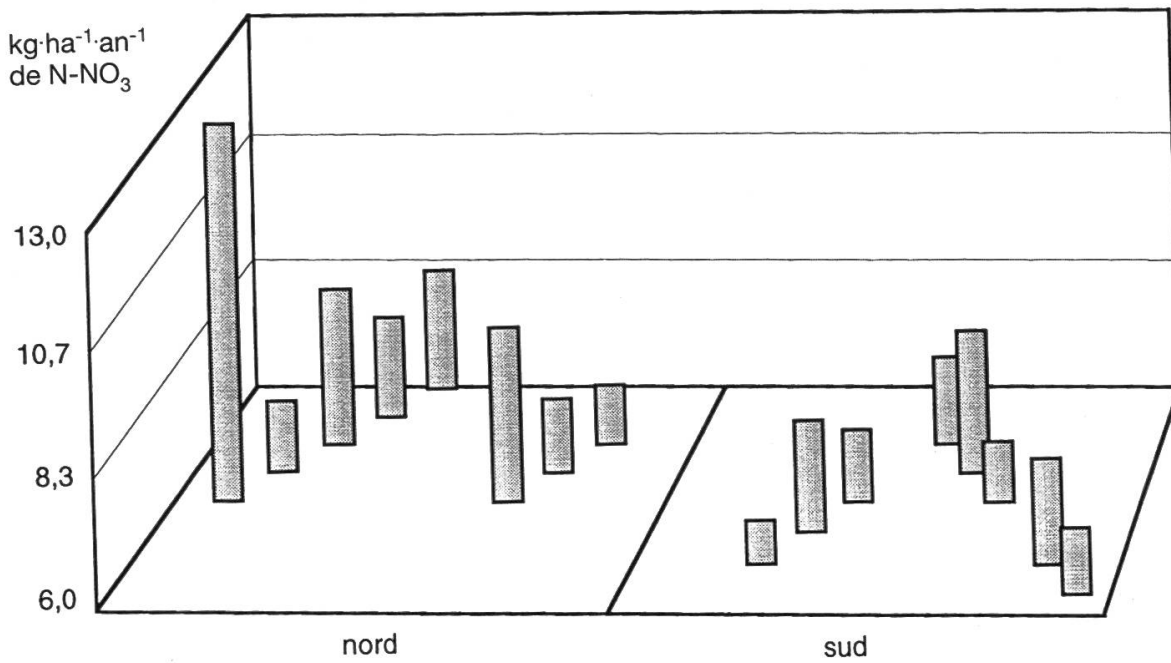


b. octobre 1995 - octobre 1996

Figure 14. Variation spatiale des dépôts de sulfate, estimés en chaque point de collecte.
a. octobre 1994 à octobre 1995.
b. octobre 1995 à octobre 1996.



a. octobre 1994 - octobre 1995



b. octobre 1995 - octobre 1996

Figure 15. Variation spatiale des dépôts de nitrate, estimés en chaque point de collecte.
a. octobre 1994 à octobre 1995.
b. octobre 1995 à octobre 1996.

Selon la position du collecteur, les dépôts de sulfate estimés pour la placette en utilisant un seul collecteur pourraient ainsi varier du simple au double (9 à 18 kg S-SO₄·ha⁻¹·an⁻¹, *figure 14*). On peut calculer le nombre de collecteurs nécessaires pour obtenir une estimation avec une précision e (erreur acceptable, en pourcentage de la moyenne) et un intervalle de confiance 1-α par l'équation suivante:

$$n = \frac{t_{\alpha, n-1}^2 C^2}{e^2} \quad (1)$$

où

n = nombre de collecteurs

t_{α,n-1} = t de Student au niveau α

C = coefficient de variation

e = erreur acceptable (intervalle de confiance souhaité), en pourcentage de la moyenne.

La *figure 16* montre le nombre des collecteurs nécessaires pour estimer les apports en azote minéral avec une précision de 10% et un intervalle de confiance de 90%, calculé pour chaque intervalle de collecte. Episodiquement, le nombre des collecteurs nécessaires est très élevé et dépasse largement le nombre des collecteurs effectivement utilisés. Le nombre maximum, minimum

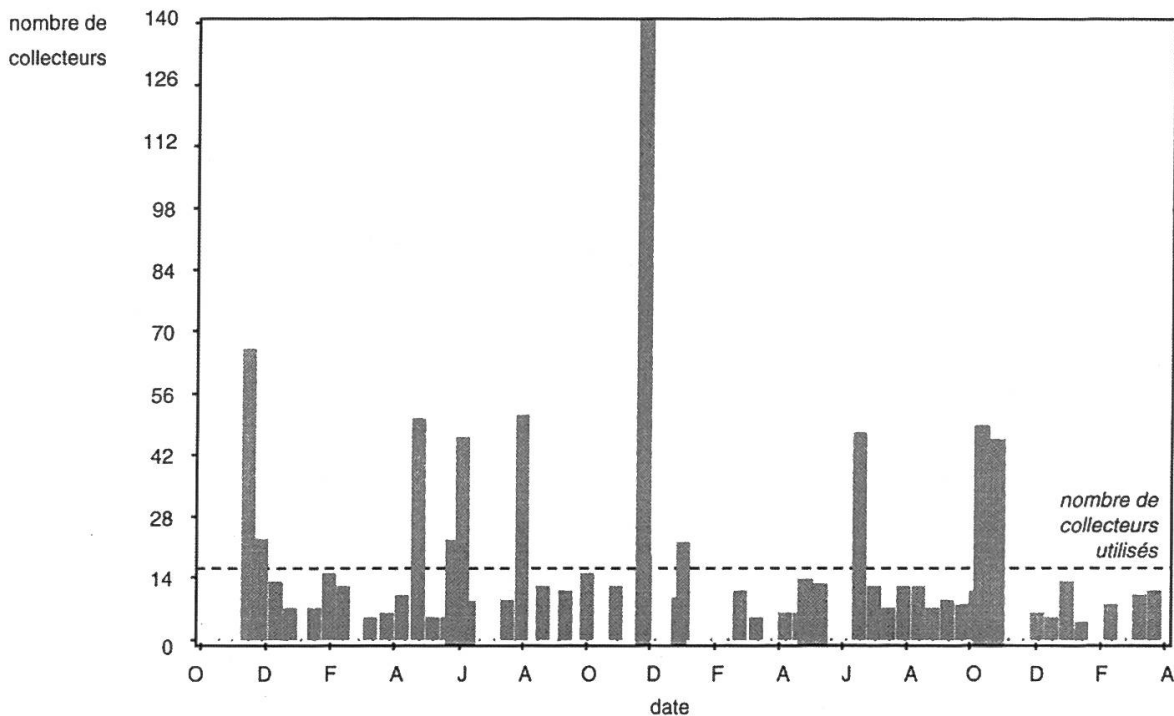


Figure 16. Nombre des collecteurs nécessaires pour estimer les dépôts d'azote minéral sous couvert avec une précision de 10% et un intervalle de confiance de 90% (estimation pour chacun des 52 intervalles de collecte).

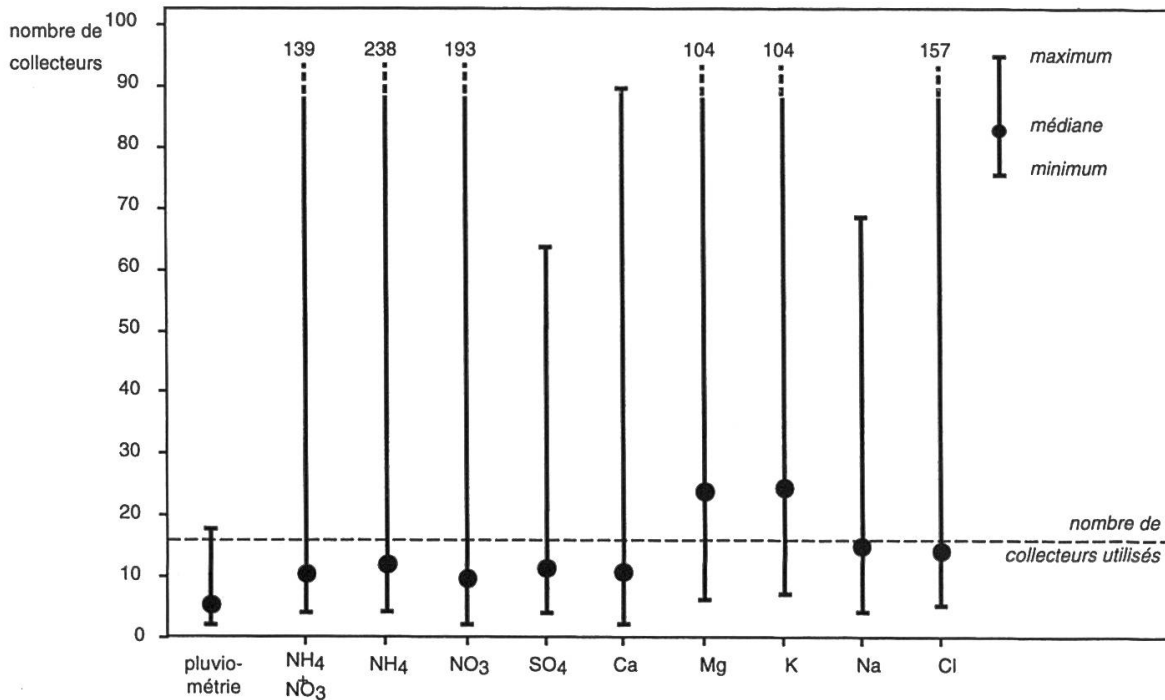
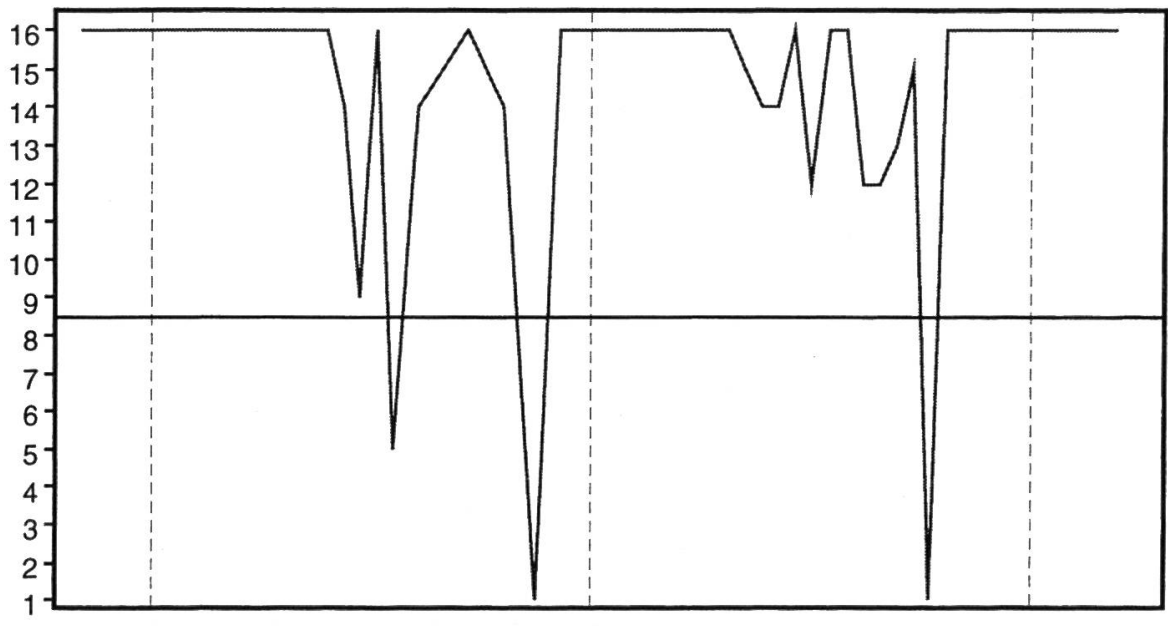


Figure 17. Nombre minimum, médian et maximum des collecteurs nécessaires pour estimer la pluviométrie et les dépôts d'éléments minéraux sous couvert avec une précision de 10% et un intervalle de confiance de 90%. Les statistiques sont calculées pour les 52 intervalles de collecte.

et la médiane pour les 52 intervalles de collecte sont représentés pour chaque élément sur la *figure 17*. La pluviométrie est le paramètre le moins variable. Les apports en magnésium et le potassium, qui trouvent leur origine dans la récréation au niveau du feuillage, sont en revanche très variables.

Si l'on regarde comment s'ordonnent les collecteurs les uns par rapport aux autres en fonction des valeurs de concentration ou de dépôt mesurées pour chacune des périodes échantillonnées, on constate que le rang relatif des collecteurs peut varier fortement. Le collecteur 1 présente pratiquement systématiquement les concentrations les plus fortes (*figure 18a*), mais le collecteur 2 (*figure 18b*), à l'exemple de la plupart des collecteurs, peut recueillir des dépôts en soufre parmi les plus élevés (rang 14) comme parmi les plus bas (rang 1). A l'échelle annuelle cependant, le rapport entre les collecteurs semble plus constant qu'à une échelle temporelle plus fine, comme l'indique la comparaison entre les deux années (*figures 13, 14 et 15*). Un échantillonnage stratifié pourrait donc être envisagé, au moins dans les études à court terme, en fonction de la nature et de la structure de la canopée; par exemple, les précipitations recueillies dans le collecteur 1 sont sans doute influencées par le houppier d'un épicéa, dont les aiguilles développent une surface importante interceptant les dépôts secs, et conduisant ainsi à des concentrations plus élevées. Inversement, là où la canopée est ouverte, les dépôts devraient être moins importants car la part des dépôts secs devrait être alors plus faible.

rang du collecteur 1



rang du collecteur 2

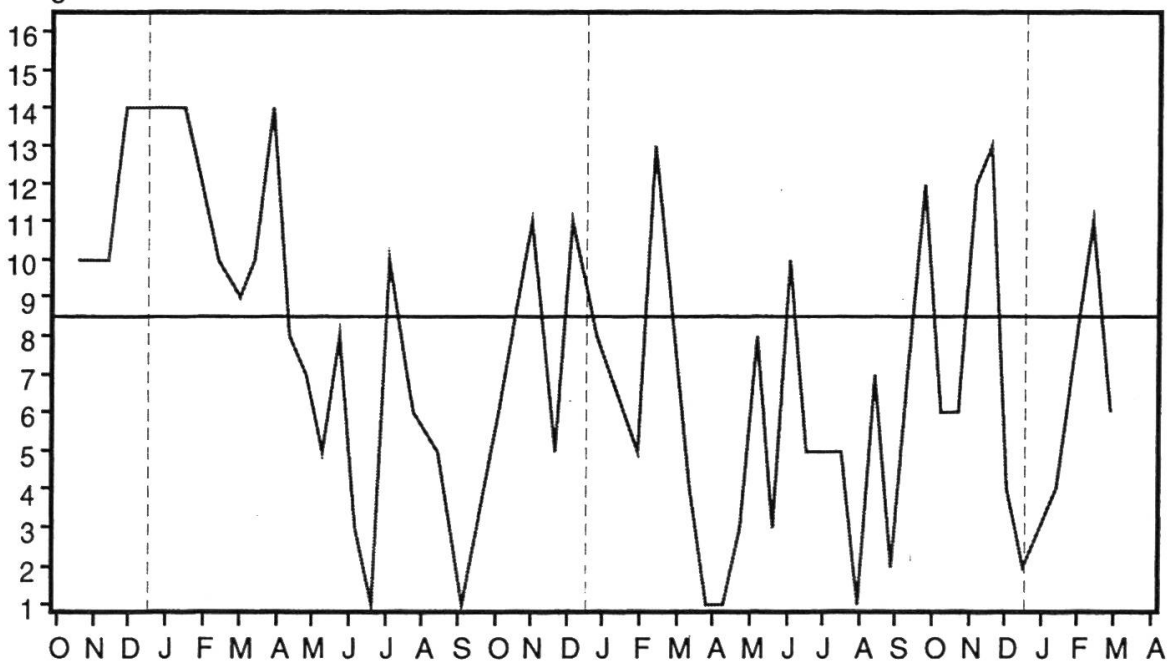


Figure 18. Classement des collecteurs les uns par rapport aux autres en fonction des valeurs de dépôts pour chacun des 52 intervalles de collecte. Exemple des dépôts de sulfate.

- a. Collecteur 1.
- b. Collecteur 2.

7.2 Différences entre les versants

Les figures 13, 14 et 15 n'illustrent pas seulement les différences entre collecteurs. Elles révèlent aussi une différence importante de pluviométrie entre le versant nord et le versant sud: le versant nord apparaît nettement plus arrosé que le versant sud. Les apports en nitrates (figure 15) et en sodium, ainsi qu'en soufre au moins pour la première année (figure 14), sont également plus importants sur le versant nord. D'après nos mesures au-dessus de chacun des 16 collecteurs, l'indice de surface foliaire n'est pas significativement différent entre les deux versants. Il est vraisemblable que les vents dominants auxquels est soumis le versant nord favorisent les précipitations et le dépôt de substances d'origine atmosphérique par temps sec sur la canopée. L'absence de différence marquée entre les deux versants pour les dépôts d'ammonium (figure non présentée) pourrait être liée à l'influence locale du champ agricole et des applications d'engrais en lisière sur le versant sud.

8. Conclusions

La variabilité spatiale et temporelle des pluviollessivats à Othmarsingen est élevée, comme cela a été déjà observé dans de nombreuses autres études pour d'autres peuplements. Il faut tenir compte de cette variabilité lors de l'élaboration d'un plan d'échantillonnage. En particulier, il faut choisir un nombre de collecteurs relativement élevé pour espérer recueillir des valeurs représentatives de dépôts. La caractérisation de la structure de la canopée peut apporter d'importants éléments d'information lors du choix du nombre et de la position des collecteurs, ou lors de l'interprétation des résultats.

Les dépôts à Othmarsingen sont surtout marqués par des dépôts d'azote relativement élevés. Ils dépassent les charges critiques en azote établies pour l'écosystème étudié, alors même que nous sous-estimons ces dépôts. En effet, il est possible qu'au cours des 14 jours pendant lesquels les échantillons de pluie sont conservés sur le terrain, une partie de l'azote présent se transforme et disparaisse par diffusion ou volatilisation hors du collecteur, ou par adsorption sur les parois. De plus, nous ne mesurons pas le ruissellement de tronc, c'est-à-dire la fraction des précipitations s'écoulant le long des branches et du tronc et s'infiltrant à la base de l'arbre. Le ruissellement de tronc est en général plus concentré en éléments et plus acide que les pluviollessivats. Sa contribution au flux d'éléments total peut être non négligeable dans les peuplements de certaines essences comme le hêtre, dont le tronc à écorce lisse et les branches obliques divergeant vers le haut constituent des zones d'écoulement privilégiées. Par exemple, les résultats obtenus sur deux placettes de hêtre du réseau français RENECOFOR, homologue du LWF, montrent que le ruissellement de tronc peut représenter 10 – 14% des précipitations totales sous cou-

vert, 11–14% des dépôts d'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-) sous couvert (*Ulrich et al.*, 1995). Les diverses mesures effectuées dans le cadre du LWF devraient permettre de mieux identifier les réactions de l'écosystème aux apports d'azote vraisemblablement en excès à Othmarsingen.

Résumé

La pluie et les pluviollessivats (précipitations sous les couronnes des arbres) ont été recueillis dans un peuplement de hêtre, à Othmarsingen (AG) depuis octobre 1994. La variabilité spatiale en forêt a été étudiée en analysant chacun des 16 collecteurs individuellement. La variabilité spatiale et temporelle est très élevée, et il faut un nombre suffisant de collecteurs, en opération sur une période de temps suffisamment longue, si l'on veut pouvoir obtenir une valeur représentative des dépôts atmosphériques sous forme de pluviollessivats. Le nombre exact des collecteurs nécessaires dépend de la précision avec laquelle on souhaite estimer les apports sous forme de pluviollessivats, des éléments auxquels on s'intéresse, ainsi que de la résolution temporelle souhaitée. Les dépôts de soufre sont assez faibles: $5,7 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ hors couvert et $10,9 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ sous couvert, en moyenne sur les deux années de mesure. Les dépôts totaux en soufre que nous estimons sont similaires aux dépôts totaux modélisés. Les dépôts d'azote sont de $11 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ hors couvert et $17,4 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ sous couvert en moyenne. Compte tenu de l'absorption d'azote directe par le feuillage, nous ne pouvons donner qu'une estimation grossière des dépôts totaux d'azote. Les valeurs correspondantes modélisées se situent légèrement au-dessus de l'intervalle de valeurs que nous proposons. Il reste qu'il est très vraisemblable que les dépôts totaux excèdent les charges critiques en cet élément établies pour le peuplement d'Othmarsingen.

Zusammenfassung

Räumliche und zeitliche Variabilität der atmosphärischen Einträge von Mineralstoffen in einem Buchenwald

In einem Buchenwald in Othmarsingen (AG) wurden seit Oktober 1994 Niederschläge im Freiland und im Bestand gesammelt und analysiert. Die räumliche Variabilität der Einträge im Bestand wurde mit 16 einzelnen Kollektoren ermittelt. Da die räumliche und zeitliche Variabilität sehr gross ist, braucht es über eine längere Zeitperiode hinweg eine genügende Anzahl Kollektoren, um repräsentative Werte der atmosphärischen Deposition in Form von Bestandesniederschlägen zu schätzen. Die genaue Anzahl hängt von der gewünschten Präzision, den interessierenden Elementen und der gewünschten zeitlichen Auflösung ab. Die Schwefeldeposition ist ziemlich niedrig: $5,7 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ im Freiland und $10,9 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ im Bestand (2-Jahres-Mittel). Die von uns ermittelte gesamte Schwefeldeposition ist mit dem modellierten Wert vergleichbar. Die mittlere Stickstoffdeposition beträgt $11 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ im Freiland und $17,4 \text{ kg}$

$\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ im Bestand. Da ein Teil des eingetragenen Stickstoffs direkt von den Blättern aufgenommen wird, können wir die gesamte Stickstoffdeposition nur sehr grob schätzen. Der entsprechende modellierte Wert liegt knapp über dem von uns vorgeschlagenen Bereich. Trotz dieser Unsicherheit überschreitet die Gesamt-Stickstoffdeposition sehr wahrscheinlich die kritischen Stickstoffbelastungen für diesen Bestand.

Summary

Spatial and Temporal Variability of Atmospheric Deposition of Mineral Elements Under a Beech Canopy

Precipitation chemistry has been monitored since 1994 in a beech stand and in an open area at Othmarsingen (AG). Spatial variability under the forest canopy was investigated using 16 throughfall collectors. In order to cover the high spatial and temporal variability, sufficient numbers of collectors, operated over a sufficiently long period, are needed to obtain representative estimates of atmospheric deposition in the form of throughfall. The exact number of collectors required depends on the desired precision of the estimates, the chemical elements of interest and the temporal resolution to be achieved. Sulphur deposition was rather low: $5.7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ in the open area and $10.9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ under forest canopy (average deposition over two years). Our estimates of total sulphur deposition are consistent with modelled deposition. Average nitrogen deposition amounted to $11 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ in the open area and $17.4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ under forest canopy. Total nitrogen deposition can be only roughly estimated because a part of the total volume of atmospheric nitrogen compounds is taken up directly by the canopy. Modelled estimates are slightly higher than the upper value of the range we estimated. Even with these uncertainties it is very likely that total nitrogen deposition exceeds the critical loads for nitrogen for the investigated stand.

Bibliographies

- Atteia, O. (1994): Major and trace elements in precipitation on western Switzerland. *Atmospheric Environment* 28 (22): 3617–3624.
- Bergkvist, B., Folkesson, L., Berggren, D. (1989): Fluxes of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, and Ni in temperate forest ecosystems. A literature review. *Water, Air and Soil Pollution* 47: 217–286.
- Bowden, R.D., Geballe, G.T., Bowden, W.B. (1989): Foliar uptake of ^{15}N from simulated cloud water by red spruce (*Picea rubens*) seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 19(3): 382–386.
- Boyce, R.L., Friedland, A.J., Chamberlain, C.P., Poulson, S.R. (1996): Direct canopy nitrogen uptake from N-15-labeled wet deposition by mature red spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 26(9): 1539–1547.
- Bruckner, G., Schulze, E.D., Gebauer, G. (1993): ^{15}N labelled NH_3 uptake experiments and their relation to natural conditions. *Air Pollution Research Report* 47: 305–311.

- Brumme, R., Leimcke, U., Matzner, E. (1992): Interception and uptake of NH₄ and NO₃ from wet deposition by above-ground parts of young beech (*Fagus sylvatica* L.) trees. *Plant and Soil* 142: 273–279.
- BUWAL (ed) (1995): Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Schriftenreihe Umwelt – Luft 256, Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- BUWAL (ed) (1997): Immissionswerte 1996 – Valeurs d'immissions mesurées en 1996. Umwelt-Materialien: Luft/Air 78, Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Draaijers, G.P.J., Erisman, J.W. (1995): A canopy budget model to assess atmospheric deposition from throughfall measurements. *Water, Air, and Soil Pollution* 85(4): 2253–2258.
- Duijsings, J.J.H.M., Verstraten, J.M., Bouten, W. (1986): Spatial variability in nutrient deposition under an oak/beech canopy. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 149(6): 718–727.
- Ellenberg, H., Klötzli, F. (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. *Mitteilungen EAFV* 48: 587–930.
- Ellenberg, H., Mayer, R., Schauerer, J. (eds) (1986): Ökosystemforschung – Ergebnisse des Solling-Projektes 1966–1986. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Flückiger, W., Braun, S., Flückiger-Keller, H., Leonardi, S., Asche, N., Bühler, U., Lier, M. (1986): Untersuchungen über Waldschäden in festen Buchenbeobachtungsflächen der Kantone Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Aargau, Solothurn, Bern, Zürich und Zug. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen (Journal Forestier Suisse)* 137(11): 917–1010.
- FOEFL (1996): Critical loads of nitrogen and their exceedances – Eutrophying atmospheric deposition. *Environmental Series Air 275*, Bern, Federal Office of Environment, Forests and Landscape (FOEFL).
- Galloway, J.N., Thornton, J.D., Norton, S.A., Volchok, A.L., McLean, R.A. (1982): Trace metals in atmospheric deposition: a review and assessment. *Atmospheric Environment* 16: 1677–1700.
- Garten, C.T. Jr., Hanson, P.J. (1990): Foliar retention of ¹⁵N-nitrate and ¹⁵N-ammonium by red maple (*Acer rubrum*) and white oak (*Quercus alba*) leaves from simulated rain. *Environmental and Experimental Botany* 30(3): 333–342.
- Gebauer, G., Katz, C., Schulze, E.D. (1991): Uptake of gaseous and liquid nitrogen depositions and influence on the nutritional status of Norway spruce. In: R. Hantschel, F. Beese (eds), *Effects of forest management on the nitrogen-cycle with respect to changing environmental conditions*. Workshop, GSF, München-Neuherberg, FRG, 1990/5/9–13, 83–92.
- Hessische Forstliche Versuchsanstalt (1994): Aufstellung und Betreuung des Niederschlagssammlers «Münden». *Messanleitung Nr 3*, 2. Auflage, Hannoversch Münden, Allemagne.
- Keller, C., Domergue, F.L., Védy, J.C. (1992): Biogeochemistry of copper and cadmium in unpolluted forests. In: J.P. Vernet (ed), *Trace metals in the environment 2: Impact of heavy metals in the environment*. Amsterdam, Elsevier, 247–271.
- Lovett, G.M., Lindberg, S. (1993): Atmospheric deposition and canopy interactions of nitrogen in forests. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1603–1616.
- Lumme, I. (1994): Nitrogen uptake of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) seedlings from simulated wet deposition. *Forest Ecology and Management* 63: 87–96.
- Matzner, E. (1989): Acidic precipitation: Case study Solling. In: D.C. Adriano, M. Havas (eds), *Acidic Precipitation. Volume 1: Case Studies*. New York, Springer, 39–83.
- Matzner, E., Meiwes, K.J. (1994): Long-term development of element fluxes with bulk precipitation and throughfall in two German forests. *Journal of Environmental Quality* 23: 162–166.
- Nilsson, J., Grennfelt, P. (eds) (1988): Critical loads for sulphur and nitrogen. Workshop, 1988/03/19–24, Skokloster, Sweden. *Miljørapport 1988/97*. Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Programmleitung NFPI4 / Direction du PNR 14, Schüpbach, E. (ed) (1991): *Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen/Météorologie et chimie de l'atmosphère dans les sites forestiers (Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz: Ergebnisse aus dem Nationalen Forschungsprogramm 14, Band 4 / Cycle, pollution de l'air et dépérissement des forêts en Suisse: Résultats du programme national de recherches 14, Tome 4)*. Zürich, Verlag der Fachvereine.

- Tukey, H.B. Jr (1970): The leaching of substances from plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 21: 305–324.
- Ulrich, B. (1983): Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO₂, alkali and earth alkali cations and chloride. In: B. Ulrich, J. Pankrath (eds), *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. Dordrecht, Reidel, 33–45.
- Ulrich, E., Lanier, M., Schneider, A. (1995): RENECOFOR – Dépôts atmosphériques et concentrations des solutions du sol. Rapport scientifique sur les années 1993 et 1994. Fontainebleau, Office National des Forêts – Département des Recherches Techniques.
- UN/ECE (1996): Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Berlin.
- Wilson, E.J. (1992): Foliar uptake and release of inorganic nitrogen compounds in *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. *New Phytologist* 120: 407–416.

Remerciements

Je remercie les nombreuses personnes qui ont contribué à cette étude:

M. Matthias Dobbertin a supervisé l'élaboration du plan d'échantillonnage et apporté son aide lors des traitements statistiques ; Mmes Agnes Ottiger, Susanne Mullis, Käthi Meier, Kathrin Wenger et M. Paul Weibel ont prélevé les échantillons sur le terrain et effectué le travail en laboratoire. Mme Kathrin Wenger et M. Paul Weibel ont contribué en outre à améliorer la méthodologie. M. Daniele Pezzotta, Mme Marlies Gloor et l'équipe du Laboratoire Central du FNP ont réalisé les analyses chimiques et contribué à mettre en place un système de contrôle de la qualité des mesures. MM. Christian Hug, Urs Zehnder, Gustav Schneider, Peter Waldspühl et Micha Plüss ont participé au prélèvement des échantillons sur le terrain. MM. Peter Jakob et Johann Wey ont créé la banque de données. M. Andri Baltensweiler a produit l'extrait de carte topographique. M. Norbert Kräuchi a mis en forme le résumé en allemand. M. Beat Rihm (Meteotest) m'a communiqué les résultats obtenus par modélisation. M. Richard Volz a bien voulu commenter cette contribution.

Les figures de l'article ont été publiées avec l'aide financière de l'Institut Fédéral de Recherche sur la Forêt, la Neige et le Paysage (FNP), CH-8903 Birmensdorf.

Auteur:

Dr Anne Thimonier, Institut Fédéral de Recherche sur la Forêt, la Neige et le Paysage (FNP), CH-8903 Birmensdorf.