

apport de pollution et de nutriments aux peuplements forestiers par l'atmosphère : intensité et variations dans le Massif vosgien

par M. Bonneau, E. Dambrine, C. Aschan
avec le concours de G. Nourrisson

INRA, département des Recherches forestières, Champenoux, 54280 Seichamps

Les pluies et les dépôts secs (gaz, poussières, aérosols) ou occultes (brouillard, rosée) apportent aux sols divers éléments. Les uns, éléments indispensables aux plantes, sont utiles si l'apport est modéré (le soufre S, l'azote N, le phosphore P, le calcium Ca, le magnésium Mg, le potassium K). D'autres sont considérés comme polluants, qu'ils soient sans utilité pour les plantes et nuisibles au sol, ou nuisibles directement aux plantes s'ils sont apportés en fortes quantités (protons H⁺, sodium Na, chlore Cl). Les éléments utiles, déposés trop abondamment, peuvent provoquer des déséquilibres nutritifs (ion ammonium NH₄⁺, ion nitrate NO₃⁻) ou être sources d'acidification excessive (NH₄⁺ qui, en se nitrifiant, libère des protons).

La connaissance de ces apports n'est pas très intéressante en milieu agricole où les sols sont généralement bien tamponnés contre l'acidité et où les exportations par les récoltes et les fertilisations pratiquées sont très importantes en regard des dépôts atmosphériques. Au contraire, pour les forêts qui constituent dans la plupart des cas une spéculation très économe n'occasionnant que de faibles exportations d'éléments minéraux, les apports par l'atmosphère représentent un poste positif non négligeable du bilan de fertilité. Les peuplements forestiers, surtout ceux de résineux, grâce à la grande surface de contact de leurs feuillages avec l'atmosphère, grâce aussi à la rugosité de leur couvert qui freine le vent, sont des capteurs extrêmement efficaces des gaz, poussières, gouttelettes de brouillard et aérosols : les dépôts secs et occultes y sont très élevés, souvent d'importance équivalente aux dépôts humides apportés par les pluies. Ce sont donc les apports totaux (humides, secs, occultes) qui intéressent les forestiers, que ce soit par le souci d'établir un bilan des gains et des pertes de l'écosystème ou pour mettre éventuellement en relation les apports d'éléments nuisibles avec des symptômes d'altération de la santé des peuplements.

Si la détermination des apports humides par les pluies est relativement aisée, celle des apports secs ou occultes est beaucoup plus difficile. A première vue, on pourrait penser que la collecte de la pluie, après qu'elle ait traversé les feuillages (pluiolessivats) et donc lessivé les éléments déposés sur les feuilles et rameaux, peut fournir la somme des apports. En fait il existe, au niveau des feuilles, des échanges actifs entre l'eau de pluie qui ruisselle à leur surface et les cellules de l'épiderme et du mésophylle à travers la cuticule et les stomates. Lors de ces échanges, les feuilles absorbent de l'ammonium et des protons et libèrent des cations K, Ca, Mg. Cette libération constitue la récréation. La différence des flux d'un cation entre les pluiolessivats et les pluies représente donc la somme algébrique de la récréation et des dépôts lessivés. Pour estimer ces derniers, il faut, le plus souvent sur des bases très indirectes et très incertaines, répartir la différence de flux entre les deux processus.

Le dépérissement des forêts, très net dans les Vosges, nous a incités à connaître le mieux possible les apports sur ce massif. Grâce à l'aide de la Commission des communautés européennes (direction de l'Agriculture) et du ministère de l'Environnement, et avec le concours de l'APPÀ (Association pour la prévention de la pollution atmosphérique, comité de Lorraine) et de l'Office national des forêts (ONF), nous avons, pendant l'hiver 1988, équipé de collecteurs de pluie, à découvert et sous le couvert d'un peuplement de sapin ou d'épicéa, 10 postes forestiers du Massif vosgien en nous efforçant de couvrir les différentes situations possibles (Nord et Sud, versant alsacien et versant lorrain, altitudes variées). Les collecteurs à découvert sont des dispositifs « *wet-only* », c'est-à-dire fermés entre les événements pluvieux et s'ouvrant automatiquement lorsque la pluie survient, de sorte qu'ils ne recueillent aucun dépôt sec ou occulte. Les collecteurs sous le couvert sont de simples auges en matière plastique (PVC) raccordées à un bidon de recueil. Les collecteurs sont relevés chaque semaine par les agents de l'ONF qui stockent les eaux en congélateur ; un technicien ramasse les eaux mensuellement. L'analyse d'un échantillon moyen mensuel des collectes hebdomadaires de chaque poste est effectuée au laboratoire INRA d'Arras.

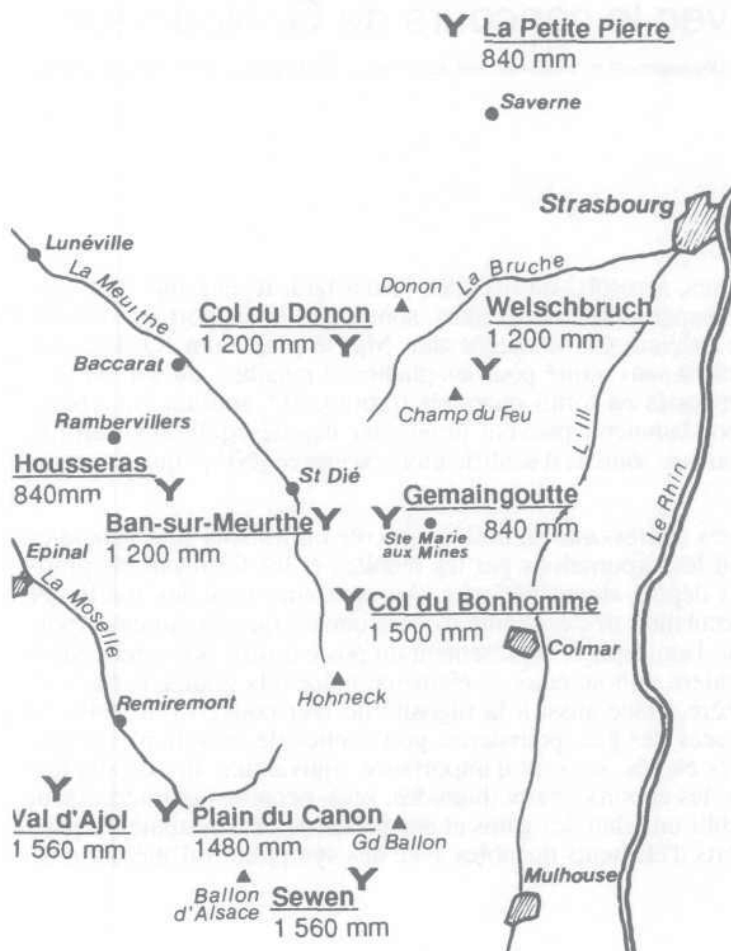


Figure 1. Situation des 10 postes d'étude (Y) dans les Vosges avec l'indication de la pluviométrie annuelle

Les principaux résultats

Les tableaux I, II, III et IV indiquent respectivement :

- les concentrations moyennes dans les pluies hors couvert en SO_4^{2-} , NO_3-N , Cl^- , NH_4^+-N , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ en $mg.l^{-1}$ et le pH ;
- les flux moyens en $kg / ha / an$ hors couvert ;
- les concentrations moyennes sous couvert et le pH,
- les flux moyens sous couvert.

Les chiffres indiqués, concentrations ou flux, sont tous exprimés en élément (N, S, Cl, Ca, Mg, K, Na).

Le Massif vosgien apparaît comme une région où les apports, de nutriments ou de polluants, sont plutôt modestes.

Tableau I. Concentrations moyennes des précipitations hors couvert ($mg.l^{-1}$)

| stations | SO_4^{2-} | S | NO_3-N | NH_4^+-N | N total | |
|------------------|-------------|---|----------|------------|---------|--|
| Ban-sur-Meurthe | 1,14 | | 0,47 | 0,39 | 0,86 | |
| Col du Bonhomme | 0,67 | | 0,32 | 0,4 | 0,72 | |
| Gemamgoutte | 0,92 | | 0,72 | 1,7 | 2,42 | |
| Housseras | 0,86 | | 0,49 | 0,43 | 0,92 | |
| Le Donon | 0,82 | | 0,37 | 0,34 | 0,71 | |
| La Petite Pierre | 1,2 | | 0,55 | 0,65 | 1,20 | |
| Plain de Canon | 0,72 | | 0,34 | 0,36 | 0,70 | |
| Sewen | 0,7 | | 0,33 | 0,41 | 0,74 | |
| Val d'Ajol | 0,81 | | 0,44 | 0,4 | 0,84 | |
| Welschbruch | 0,86 | | 0,46 | 0,56 | 1,02 | |
| moyenne | 0,87 | | 0,45 | 0,56 | 1,01 | |

| stations | Cl^- | Na^+ | K^+ | Ca^{++} | Mg^{++} | PH |
|------------------|--------|--------|-------|-----------|-----------|-----|
| Ban-sur-Meurthe | 2,04 | 0,61 | 0,75 | 0,43 | 0,07 | 4,5 |
| Col du Bonhomme | 0,98 | 0,36 | 0,21 | 0,22 | 0,07 | 4,7 |
| Gemamgoutte | 1,2 | 0,52 | 0,68 | 0,34 | 0,1 | 5,8 |
| Housseras | 1,43 | 0,45 | 0,53 | 0,33 | 0,07 | 4,6 |
| Le Donon | 1,7 | 0,56 | 0,52 | 0,23 | 0,05 | 4,7 |
| La Petite Pierre | 1,57 | 0,36 | 1,02 | 0,43 | 0,08 | 4,4 |
| Plain de Canon | 1,35 | 0,41 | 0,52 | 0,23 | 0,05 | 4,7 |
| Sewen | 1,35 | 0,43 | 0,41 | 0,2 | 0,04 | 4,8 |
| Val d'Ajol | 1,41 | 0,44 | 0,49 | 0,27 | 0,06 | 4,5 |
| Welschbruch | 1,36 | 0,38 | 0,46 | 0,25 | 0,04 | 4,7 |
| moyenne | 1,44 | 0,45 | 0,56 | 0,29 | 0,06 | 4,7 |

Apports hors couvert :

L'élément apporté en plus grande quantité est le chlore. La confrontation avec les apports de sodium ou de protons amène à conclure que ce chlore n'est pas exclusivement d'origine marine. Le rapport Cl/Na est nettement plus élevé que dans l'eau de mer : 2 à 5 suivant les stations contre 1,5 environ si l'origine était entièrement marine. Le sodium, en excédent également par rapport au magnésium par exemple, montre que l'excès de chlore vient davantage des salines voisines des Vosges (Sarralbe, Dombasle) que des installations d'incinération d'ordures ménagères. Les mines de potasse ne semblent pas en cause (vents dominants de l'ouest-sud-ouest).

Les apports de soufre (7 à 13 kg) et d'azote (5 à 10 kg) sont faibles, l'azote nitrique (NO_3) et l'azote ammoniacal (NH_4) sont sensiblement à égalité. Le pH des pluies est modérément acide (4,5 à 4,8)

avec une valeur exceptionnellement élevée à Gemain goutte, poste sans doute fortement influencé par les activités d'élevage (neutralisation de l'acidité par NH_3).

La variabilité entre les divers points du massif est grande, qu'il s'agisse des concentrations ou des apports totaux : le rapport entre le maximum et le minimum des teneurs dans la pluie est souvent de 1,6 à 2 (sulfates, nitrates, chlorures, sodium, calcium, magnésium) mais atteint 5 pour l'ammonium et le potassium. Il n'y a pas parallélisme entre la variabilité des concentrations et celle des apports, c'est-à-dire que les stations où les teneurs d'éléments dans l'eau de pluie sont les plus fortes ne sont pas celles qui reçoivent le plus d'éléments. En effet ces derniers dépendent beaucoup de la pluviométrie, elle-même très variable dans le massif (plus du simple au double entre les stations les moins arrosées et les plus arrosées). Ainsi, pour ce qui est des sulfates par exemple, Plain du Canon et Val d'Ajol, où la pluie est modérément concentrée, reçoivent de très forts apports, tandis que la Petite Pierre doit ses apports très élevés à une forte concentration de la pluie. On peut dire la même chose des nitrates et de la plupart des éléments. La corrélation entre pluviométrie et apport de sulfates est particulièrement nette (fig. 2) alors qu'elle est très faible pour les apports de nitrates. On note également une corrélation positive entre apports de sulfates et apports de nitrates (fig. 3) bien que les origines des uns et des autres ne semblent pas communes.

En effet, les concentrations en $\text{SO}_4\text{-S}$ dans les pluies ne sont pas liées à la teneur de l'air en SO_2 à Paris ou à Strasbourg (influence d'agglomérations industrielles plus lointaines), tandis que les teneurs les plus élevées des précipitations en $\text{NO}_3\text{-N}$ apparaissent au même moment que les pointes de NO_2 dans ces deux villes.

La concentration des eaux de pluie en divers éléments oppose l'ensemble Donon, Plain du Canon, Sewen, Col du Bonhomme où la charge des pluies est faible, à l'ensemble La Petite Pierre-Ban-sur-Meurthe où elle est forte. Gemaingoutte, La Petite Pierre et Welschbruch ont des pluies très riches en azote minéral total.

Tableau II. Dépôts annuels d'éléments minéraux hors couvert ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

| stations | $\text{SO}_4\text{ S}$ | $\text{NO}_3\text{-N}$ | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | N total | | |
|------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------|
| Ban-sur-Meurthe | 8,79 | 4,58 | 2,85 | 7,43 | | |
| Col du Bonhomme | 7,52 | 2,62 | 3,09 | 5,71 | | |
| Gemaingoutte | 9,92 | 6,03 | 10,5 | 16,53 | | |
| Mousseras | 5,62 | 2,74 | 2,04 | 4,78 | | |
| Le Donon | 8,88 | 3,51 | 3,11 | 6,62 | | |
| La Petite Pierre | 10,06 | 4,68 | 4,35 | 9,03 | | |
| Plain de Canon | 12,76 | 4,58 | 3,57 | 8,15 | | |
| Sewen | 8,83 | 3,85 | 3,34 | 7,19 | | |
| Val d'Ajol | 10,75 | 5,44 | 3,19 | 8,63 | | |
| Welschbruch | 9,54 | 3,88 | 5,85 | 9,73 | | |
| moyenne | 9,27 | 4,19 | 4,19 | 8,38 | | |
| stations | Cl^- | Na^+ | K^+ | Ca^{++} | Mg^{++} | H+ |
| Ban-sur-Meurthe | 23,4 | 7,62 | 4,27 | 4,48 | 0,78 | 0,24 |
| Col du Bonhom | 13,4 | 5,06 | 2,2 | 2,48 | 0,84 | 0,4 |
| Gemaingoutte | 11,2 | 4,98 | 4,11 | 2,32 | 0,92 | 0,05 |
| Housseras | 13,0 | 4,3 | 2,94 | 2,45 | 0,95 | 0,18 |
| Le Donon | 21,6 | 6,29 | 4,9 | 2,33 | 0,51 | 0,25 |
| La Petite Pierre | 26,4 | 5,06 | 5,67 | 3,6 | 0,69 | 0,28 |
| Plain de Canon | 31,3 | 9,2 | 7,48 | 4,23 | 1,03 | 0,42 |
| Sewen | 27,5 | 8,39 | 4,14 | 2,95 | 0,64 | 0,29 |
| Val d'Ajol | 22,1 | 7,07 | 3,71 | 3,06 | 0,71 | 0,4 |
| Welschbruch | 20,8 | 6,19 | 3,36 | 2,45 | 0,43 | 0,19 |
| moyenne | 21,1 | 6,42 | 4,28 | 3,03 | 0,75 | 0,27 |



Forêt vosgienne (photothèque INRA)

Tableau III. Concentrations moyennes des précipitations sous couvert (mg.M)

| stations | SO4 ²⁻ -S | NO3--N | NH4 ⁺ -N | Cl ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | PH |
|------------------|----------------------|--------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----|
| Ban-sur-Meurthe | 2,43 | 1,29 | 0,74 | 3,6 | 1,02 | 3,01 | 1,36 | 0,35 | 3,7 |
| Col du Bonhomme | 2,45 | 1,47 | 0,54 | 2,16 | 0,77 | 2,63 | 1,23 | 0,25 | 3,9 |
| Gemaingoutte | 2,7 | 1,69 | 0,9 | 2,68 | 0,77 | 3,04 | 1,42 | 0,37 | 3,9 |
| Housseras | 1,84 | 0,63 | 0,42 | 3,06 | 0,87 | 3,82 | 0,81 | 0,22 | 3,9 |
| Le Donon | 2,08 | 1,59 | 0,89 | 3,34 | 1 | 1,95 | 1,13 | 0,23 | 3,9 |
| La Petite Pierre | 4,01 | 2,47 | 1,79 | 4,85 | 1,62 | 3,94 | 2,07 | 0,46 | 3,8 |
| Plain de Canon | 1,44 | 0,87 | 0,36 | 2,48 | 0,68 | 2,1 | 0,96 | 0,19 | 4,2 |
| Sewen | 1,66 | 1,02 | 0,38 | 3,02 | 0,76 | 3,53 | 1,27 | 0,28 | 4,0 |
| Val d'Ajol | 2,11 | 1,31 | 0,69 | 3,3 | 1,03 | 3,91 | 1,16 | 0,26 | 3,8 |
| Welschbruch | 3,02 | 2,61 | 0,89 | 4,62 | 1,44 | 4,11 | 2,68 | 0,55 | 4,0 |
| moyenne | 2,37 | 1,49 | 0,76 | 3,31 | 0,97 | 3,2 | 1,41 | 0,32 | 3,9 |

Tableau IV. Dépôts annuels d'éléments minéraux sous couvert (en kg.ha⁻¹)

| stations | SO4--S | N | Cl ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | H+ |
|------------------|--------|------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----|
| Ban-sur-Meurthe | 12,8 | 7,4 | 24,1 | 7 | 13,6 | 5,8 | 1,6 | 1 |
| Col du Bonhomme | 15,5 | 12,3 | 18,6 | 6,4 | 18,9 | 7,3 | 1,5 | 0,9 |
| Gemaingoutte | 17,6 | 15,8 | 15,3 | 4,9 | 16 | 6,5 | 1,9 | 0,9 |
| Housseras | 9,6 | 5,7 | 16,6 | 4,8 | 16,7 | 3,3 | 1 | 0,7 |
| Le Donon | 18,4 | 16,5 | 31 | 10,7 | 13 | 6,7 | 1,6 | 1,3 |
| La Petite Pierre | 23,9 | 20,8 | 34,6 | 13 | 19 | 11,2 | 2,9 | 1,3 |
| Plain de Canon | 16,7 | 15,1 | 38,2 | 11,6 | 18 | 11,8 | 2,4 | 1,0 |
| Sewen | 10,1 | 6,3 | 28,6 | 8,8 | 20,4 | 5,9 | 1,5 | 0,8 |
| Val d'Ajol | 15,3 | 12,4 | 32,2 | 10 | 22,8 | 6,4 | 1,5 | 1,3 |
| Welschbruch | 16,1 | 16,4 | 30 | 10,9 | 30 | 12,2 | 2,5 | 0,8 |
| moyenne | 15,6 | 12,9 | 26,9 | 8,8 | 18,8 | 7,7 | 1,8 | 1,0 |

Apports sous le couvert forestier :

Les concentrations d'éléments dans les pluvolessivats sont en moyenne 1,5 à 5 fois supérieures à celles des pluies : 1,5 fois seulement pour un élément comme $\text{NH}_4\text{-N}$ qui est plus ou moins absorbé par le feuillage après dépôt, 4 à 5 fois pour K, Ca, Mg qui sont l'objet d'une récréation importante, 2 à 3 fois pour Na, Cl, $\text{SO}_4\text{-, -S}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ qui ne sont ni consommés ni récrétés notablement. Ce facteur 2 à 3 peut être considéré comme résultant du lessivage de dépôts secs et occultes et d'une concentration par évaporation partielle de l'eau lors de son passage sur les cimes, hors effet biotique important.

L'augmentation de concentration est cependant très variable d'une station à l'autre : par exemple, pour les sulfates, on a 3,6 au Col du Bonhomme, 3,3 à la Petite Pierre, 3,5 à Welschbruch, ce qui traduit donc des dépôts secs et occultes plus importants dans ces stations que dans les autres. On peut faire la même observation pour les nitrates dans ces mêmes stations, tandis qu'Housseras n'a qu'un enrichissement très faible. Le climat de pollution par dépôts secs et occultes est donc beaucoup plus sévère dans la partie nord du massif, pour ce qui est des sulfates et des nitrates. La station de Sewen se caractérise au contraire par une forte augmentation du taux de KCl sous le couvert, ce qui s'explique probablement par la proximité des mines de potasse.

L'estimation des quantités récrétées de Ca, Mg, K est nécessaire avant que l'on puisse établir l'apport quantitatif de ces éléments. Elle est basée sur l'enrichissement des pluvolessivats en ces trois éléments comparativement à l'enrichissement en sulfates, peu récrétés et peu absorbés. En déduisant la récréation du flux d'enrichissement des pluvolessivats par rapport aux pluies, on arrive à une estimation de dépôts secs et occultes, donc à un dépôt total (pluie + dépôts secs) sous peuplement de résineux (tabl. IV). On constate que les apports totaux sont en moyenne modérés : 15,6 kg de S / ha et / an, 12,9 kg de N, alors que dans les Ardennes on atteint au moins 40 kg de soufre et 50 kg d'azote. Ces apports sont évidemment très variables d'un site à l'autre : 9 à 24 kg de soufre, 5 à 20 kg d'azote, 17 à 38 kg de chlore, 13 à 30 kg de potassium, 3 à 12 kg de calcium, 1 à 2,9 kg de magnésium. L'apport de protons, obtenu en ajoutant à ceux contenus dans les pluvolessivats 50 % environ de l'équivalent des cations récrétés (qui ont été échangés sur les feuillages contre des protons), se chiffre environ à 1,0 kg par ha et par an, donc relativement faible et moins variable que les autres apports : 0,9 à 1,5.

Il faut noter que la hiérarchie des stations en ce qui concerne les apports humides et celle que l'on peut établir pour les apports totaux sous le couvert sont différentes. La Petite Pierre qui reçoit le plus de S et de N totaux ne venait qu'en 3^e position pour les apports humides. Le Donon, en 2^e position pour les apports totaux de S et 4^e pour les apports de N, n'était qu'en 4^e et 8^e positions pour les apports humides de ces mêmes éléments. Tout ceci met en lumière le rôle important joué par les dépôts secs et occultes dans les Vosges.

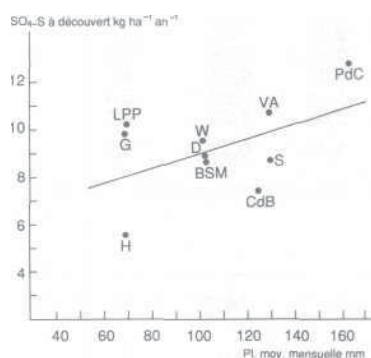


Figure 2. Relation entre l'apport de soufre, sous forme de sulfates, à découvert, et la pluviométrie mensuelle moyenne
BSM : Ban-sur-Meurthe ;
CdB : Col du Bonhomme ; D : Donon ; G : Gemaingoutte ; H : Housseras ; LPP : La Petite Pierre ; S : Sewen ; VA : val d'Ajol ; W : Welschbruch.

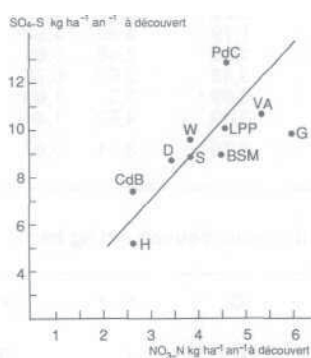


Figure 3. Relation entre apports de soufre sous forme de sulfates et apports d'azote nitrique

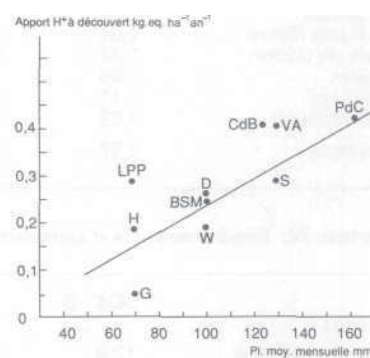
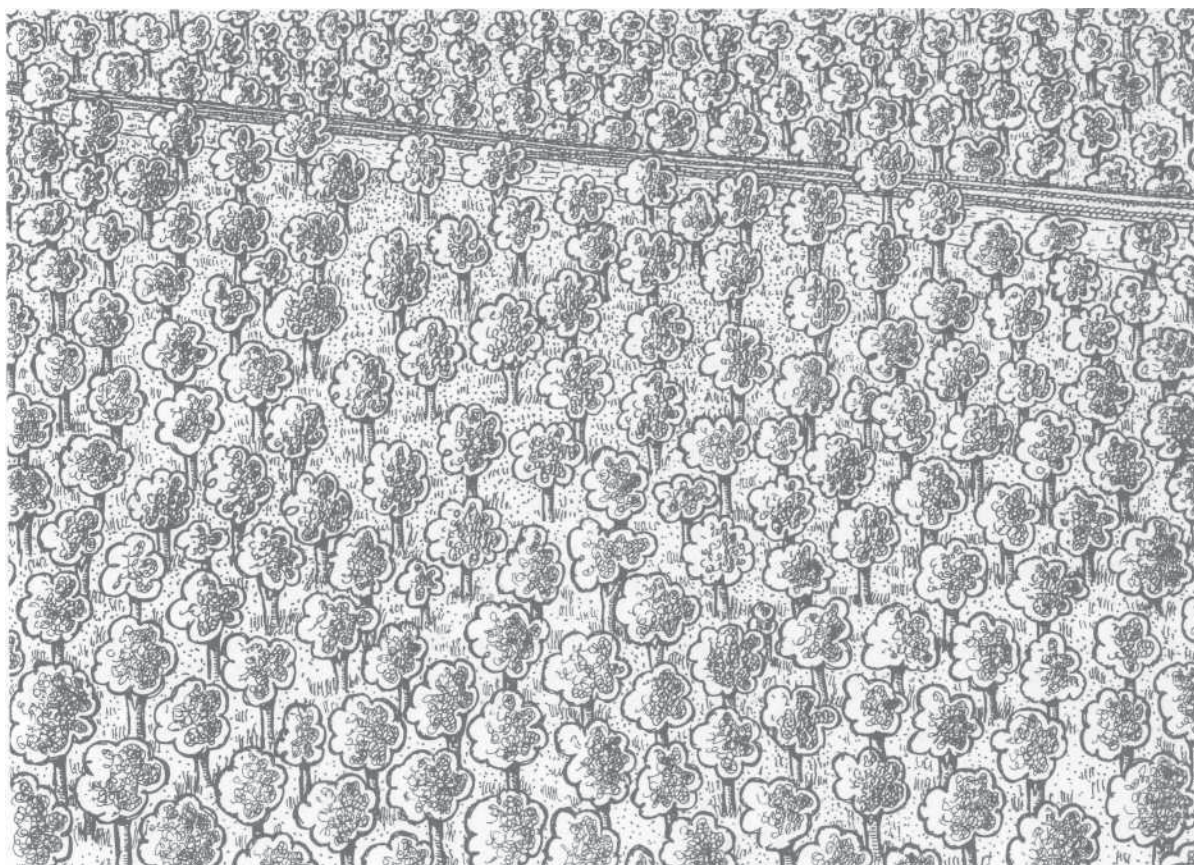


Figure 4. Relation entre apport de protons à découvert et pluviométrie mensuelle moyenne



En conclusion

On sait aujourd'hui que les pertes d'aiguilles des peuplements dans les Vosges sont en grande partie dues à la conséquence de périodes très sèches, et notamment de la dernière, de 1972 à 1976, dont l'effet a été particulièrement sensible sur les sols les plus superficiels ou les plus caillouteux et dans les peuplements trop denses. Il est néanmoins prouvé, par des travaux précis (diagnostic foliaire dans de nombreux peuplements, étude précise du cycle des éléments dans certains écosystèmes vosgiens - Aubure en particulier -, essais de fertilisation) que des carences minérales très accusées en magnésium et calcium sont responsables d'un autre aspect très caractéristique du dépérissement, le jaunissement des feuilles et des aiguilles des résineux à partir de leur 2^e année, et que la pollution acide est un des facteurs de genèse de ces carences. Comme co-facteur intervient la pauvreté de certaines roches des Vosges (certains granités et grès), comme l'ont montré divers travaux de cartographie aérienne du jaunissement et des pertes d'aiguilles qui lui sont liées (et qui s'ajoutent à celles entraînées par le manque d'eau). Ce co-facteur défavorable explique que le jaunissement soit très répandu dans les Vosges malgré un niveau de pollution qui apparaît comme assez modéré : en moyenne 0,27 kg eq. / ha et / an hors couvert et 1 kg eq. sous couvert en ce qui concerne les protons. Les apports d'azote souvent accusés de déséquilibrer la nutrition des peuplements s'ils sont excessifs, et de contribuer à l'acidification du sol par l'apport de NH_4^+ , sont ici assez faibles également : environ 13 kg / ha / an sous le couvert forestier.

La pollution acide varie cependant beaucoup au sein du massif, pour des raisons diverses : pluviométrie très diversifiée en fonction de l'altitude (les apports de sulfates et de protons par la pluie sont fortement liés à la tranche d'eau annuelle), position géographique des stations par rapport à des sources locales (Gemaingoutte dans une zone rurale où le dépôt d'ammonium est important) ou par rapport à de grands courants de pollution acide générateurs de forts dépôts secs et occultes qui pénètrent peu à l'intérieur du massif (fort apport sous couvert d'acide sulfurique et nitrique dans les stations du Nord du massif). Housseras, à l'ouest du massif, se caractérise par de très faibles apports totaux de protons et d'azote.

Mais les dépôts atmosphériques peuvent être utiles (Ca, Mg, K, N). Si on estime que les apports hivernaux sont en majeure partie perdus par lessivage (à cause de l'acidité des eaux de pluviollessivage en ce qui concerne les cations ou par absence de fixation en ce qui concerne les nitrates) et que les apports d'été sont au contraire à peu près totalement consommés, on peut comparer les exportations par le bois des peuplements forestiers (bois et écorce de tronc) au demi-apport annuel total d'éléments nutritifs. Face à des besoins moyens annuels de l'ordre de 3 à 8 kg d'azote, 0,5 à 1 kg de soufre, 2 à 5 kg de potassium, 3 à 7 kg de calcium, 0,5 à 1,2 kg de magnésium, ces demi-apports totaux qui vont de 5 à 16 kg de N, 6 à 13 kg de S, 2 à 7 kg de K, 2 à 4,5 kg de Ca, 0,5 kg à 1 kg de Mg, s'avèrent excédentaires pour le soufre, généralement suffisants pour l'azote, parfois insuffisants pour le potassium et le magnésium et souvent déficitaires pour le calcium.

Sur un plan plus général, on espérait qu'un petit nombre de postes pluviométriques en France (une quarantaine, 15 du réseau MERA et 25 du réseau de placettes d'observation des écosystèmes forestiers en cours de mise en place) serait suffisant pour dresser des courbes d'iso-apport à partir desquelles on pourrait progresser vers un bilan de fertilité des sols forestiers. L'exemple vosgien démontre que cet espoir est probablement vain, au moins en pays de montagne puisque des variations du simple au double ou même davantage sont tout à fait possibles dans un espace relativement restreint.

Il serait intéressant de renouveler en plaine l'exercice effectué dans le massif vosgien afin de voir si une telle variabilité y existe aussi. Par ailleurs de grands progrès sont à accomplir dans la détermination soit des dépôts secs ou occultes, soit de la récréation, si l'on veut avoir une meilleure estimation des apports en milieu forestier •

