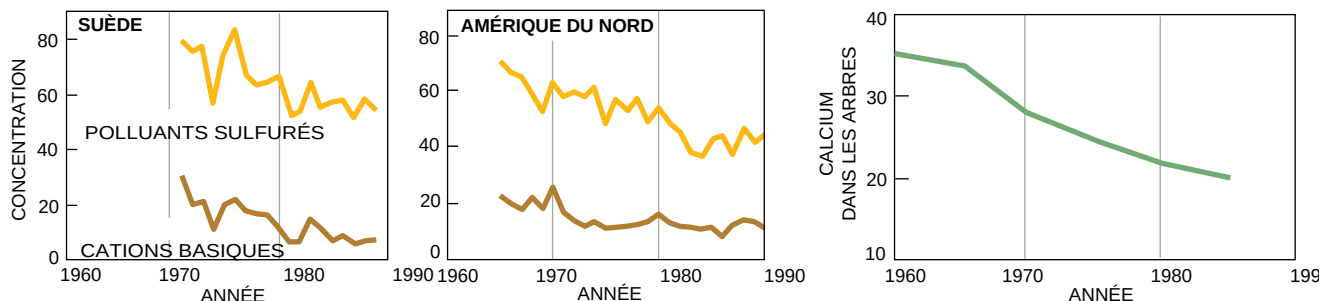




Jennifer C. Christiansen

2. LES DIMINUTIONS SIMULTANÉES des quantités de polluants soufrés acides et des cations basiques qui les neutralisent se sont compensées pour réduire à presque rien les bénéfices écologiques attendus de la diminution des émissions de polluants acides. On a

notamment observé que les cations basiques étaient raréfiés dans les arbres des forêts du New Hampshire, ces dix dernières années. De telles raréfactions affaiblissent les forêts, parce qu'elles les privent d'éléments nutritifs.

gés positivement (simultanément se forment des anions, négativement chargés).

Les cations basiques réduisent l'acidité des précipitations, et ils atténuent également les effets des pluies acides dans les sols : là, les petites particules d'argile et l'humus (composé de matière organique végétale en décomposition) contiennent des ions négatifs, qui attirent les ions calcium

ou magnésium. Ainsi, le sol est une réserve naturelle de cations basiques qui, lorsqu'il est exposé aux ions hydrogène des pluies acides, limite l'acidité de l'eau qui percole en échangeant les ions hydrogène de cette dernière contre ses cations basiques (dans certains sols, les pluies acides provoquent en outre la dissolution d'ions aluminium toxiques qui déplacent les cations basiques).

Ce mécanisme d'échanges d'ions protège normalement les forêts contre les effets néfastes des pluies acides, mais il n'agit plus lorsque les réserves naturelles en cations s'épuisent, parce que le sol a été excessivement arrosé par les pluies acides. Ainsi, dans certaines régions d'Europe et d'Amérique du Nord, les ions hydrogène et aluminium ont déplacé une grande partie des cations basiques, augmenté la concentration en aluminium et acidifié le sol. De surcroît, les sols acides ne protègent plus des ruissellements acides les écosystèmes situés en aval : l'eau qui les traverse se charge d'ions hydrogène et aluminium, qui empoisonnent les rivières, les lacs et les fleuves.

Les poussières en France

La France et plusieurs pays européens ont considérablement réduit leurs émissions de polluants (oxydes de soufre, d'azote, poussières) contribuant au phénomène général de retombées acides.

Les courbes ci-contre présentent les émissions de dioxyde de soufre (SO_2), d'oxydes d'azote (NO et NO_2) et de poussières en France. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 3 900 000 tonnes par an pour le dioxyde de soufre, de 1 650 000 tonnes par an pour les oxydes de soufre, de 650 000 tonnes par an pour les poussières.

Pour le dioxyde de soufre, les émissions ont été globalement réduites de plus de quatre fois entre 1960 et 1994, essentiellement en raison des économies d'énergie, du développement de l'usage du gaz naturel et du développement de l'énergie nucléaire.

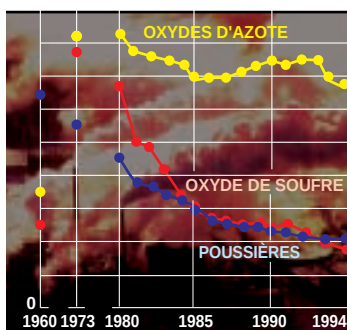
Pour les oxydes d'azote, les émissions globales n'ont diminué que

de 15 pour cent, entre 1973 et 1994. Les émissions par les sources fixes ont diminué dans un rapport 2, tandis que les émissions par le trafic automobile ont augmenté de 17 pour cent dans cette même période.

Pour les poussières, les émissions (toutes sources confondues) ont diminué dans un rapport de 3,2 : en retirant les émissions par les sources mobiles (diesel) qui ne présentent pratiquement aucun caractère basique, le rapport de réduction est alors de 5.

On estime généralement que la part de responsabilité des oxydes d'azote dans les dépôts acides est de l'ordre de 15 pour cent. Il est donc vrai que la France a considérablement diminué à la fois ses émissions acides et ses émissions de poussières.

Rémy BOUSCAREN – Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique



Les particules de poussière ont un autre rôle important, car elles contiennent des éléments comme le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium, qui sont des éléments nutritifs essentiels pour de nombreuses plantes. Non seulement les pluies acides arrachent ces éléments aux argiles et aux humus, mais elles les entraînent dans les lacs et les rivières, appauvrissant ainsi l'écosystème.

Naguère, seuls le Suédois Hans Egner et l'Anglais Eville Gorham avaient imaginé que l'atmosphère puisse être la principale source de cations basiques du sol ; on supposait plutôt que les cations se renouvelaient régulièrement dans les sols en raison d'une lente dissolution des minéraux des roches profondes, lors de l'érosion. Des études récentes ont bouleversé la théorie de la régénération des cations dans les sols. Dans la plupart des cas, l'atmosphère semble être la principale source de cations, de sorte que de nombreuses forêts seraient plus sensibles à la composition de l'atmosphère que les agronomes ne le pensaient.

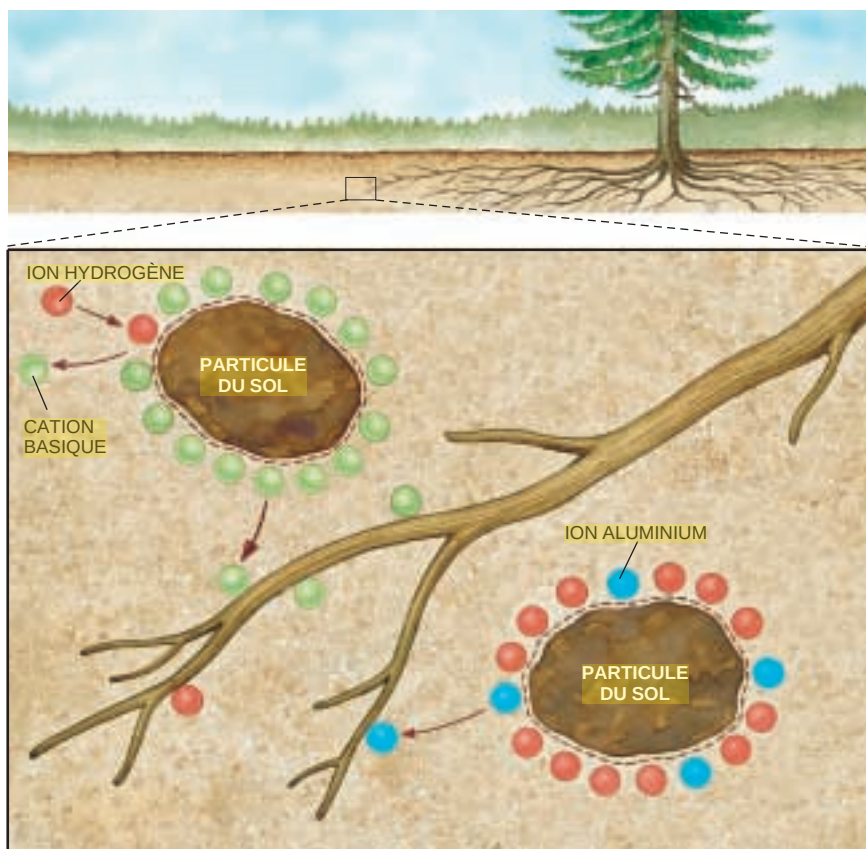
Moins de poussières, plus de dégâts

Les réductions des émissions de polluants acides ont initialement donné des résultats encourageants : au cours des trois dernières décennies, les concentrations en dioxyde de soufre ont spectaculairement chuté dans l'atmosphère de la plus grande partie de l'Europe et de l'Est de l'Amérique du Nord. Toutefois nous étions étonnés que les bilans des premières mesures ne tiennent pas compte des éléments basiques de l'atmosphère ; aussi nous avons décidé d'étudier l'impact des nouvelles réglementations sur la quantité de poussières rejetées dans l'atmosphère, afin de mieux mesurer leur impact réel sur la croissance des forêts et sur la réduction des effets des pluies acides.

Les États luttent contre les rejets de poussières dans l'atmosphère, parce que l'inhalation d'air pollué provoque des troubles respiratoires et que les poussières causent des problèmes écologiques variés. Depuis 20 ans, les gouvernements européens et américains ont défini les quantités admissibles pour chaque type de particules, mais les États-Unis n'ont pas tenu compte des réglementations sur les polluants acides. Quels ont été les effets de ces mesures ? Pour le savoir, nous avons réexaminé les analyses anciennes des précipitations dans le Nord-Est de l'Amérique et dans l'Ouest de l'Europe. Les concentrations en cations basiques dissous dans l'eau de pluie et dans la neige renseignent sur la concentration en minéraux basiques dans l'atmosphère et sur l'arrivée de ces cations dans les écosystèmes forestiers : la quantité de cations basiques a considérablement chuté pendant les 10 à 30 dernières années.

En Europe, la plus longue série d'enregistrements fiables, effectuée dans la région forestière de Sjöängen, au Sud de la Suède, révèle une chute de la concentration en cations, qui atteint 74 pour cent depuis 1971. Cette raréfaction brutale des cations basiques, dans de grandes régions européennes, a été confirmée par d'autres mesures, aux États-Unis.

Cette raréfaction des poussières basiques dans l'atmosphère a-t-elle contrecarré, voire annulé les bénéfices environnementaux de la réduction des émissions de polluants acides ? Apparemment oui, car la raréfaction des sul-



3. LES CATIONS BASIQUES (en vert) du sol sont des éléments nutritifs que les plantes absorbent par leurs racines. Habituellement, ces cations s'attachent aux particules d'humus ou d'argiles (à gauche). Cependant, lorsque des pluies acides drainent le sol, les ions hydrogène (en rouge) présents dans l'eau mettent les cations en solution, ce qui permet leur entraînement. Progressivement les ions hydrogène et les ions aluminium (en bleu) libérés dans le sol par les pluies acides peuvent se rassembler en particules (à droite). Non seulement les ions hydrogène et aluminium éloignent les éléments nutritifs essentiels, mais ils perturbent la biochimie des plantes. L'ion aluminium, notamment, est toxique en concentration excessive.

fures atmosphériques s'est accompagnée d'une raréfaction rapide des composés basiques de l'atmosphère ; plus précisément, nous avons calculé que la raréfaction des bases atmosphériques a supprimé 54 à 68 pour cent des effets liés à la réduction des polluants acides en Suède et jusqu'à 100 pour cent dans l'Est de l'Amérique du Nord (voir la figure 2). Ainsi, malgré la limitation des rejets d'acides, l'environnement est resté exposé aux acides, parce que les poussières basiques étaient simultanément moins nombreuses.

Pourquoi cette brusque réduction des émissions de poussières ? La diversité mal connue des sources de poussières empêche de répondre à cette question. Nous savons que l'avènement de techniques industrielles plus propres a fortement contribué à cette réduction des poussières : l'amélioration des brûleurs et des systèmes de dépoussiérage des fumées a fortement réduit les pollutions liées à la combustion des énergies fossiles, par

exemple. La détermination quantitative de l'émission de poussières par les transports, par l'agriculture ou par l'érosion due au vent reste difficile, mais l'ensemble des données conduit à penser que, au total, la diminution des rejets de poussières est principalement liée à des changements de comportements humains.

Une source majeure d'éléments nutritifs

Depuis des années, les agronomes enregistrent une diminution mondiale des concentrations en ions calcium, magnésium et potassium dans les sols forestiers. Ainsi, Leif Hallbäck et Carl Olof Tamm, de l'Université d'Uppsala, ont mesuré la disparition de 56 à 74 pour cent des cations dans les forêts d'épicéas norvégiennes, au cours des 60 dernières années. Des évolutions tout aussi catastrophiques ont été observées en Angleterre, en Allemagne et aux États-Unis. Des travaux récents s'accordent



4. LES TEMPÊTES DE SABLE dans le Sahara dispersent des particules de poussière sur tout le Globe : on retrouve parfois des poussières sahariennes jusque en Amazonie, à des distances supérieures à 5 000 kilomètres.

pour montrer que la brusque raréfaction des cations basiques est une cause importante de la dégénérescence des forêts : Ernst-Detlef Schulze et ses collègues de l'Université de Bayreuth pensent que l'appauvrissement des sols en magnésium contribue au dépérissement des forêts de résineux d'Allemagne, et, dans les Appalaches, les troubles de croissance des séquoias semblent également correspondre à une décalcification du sol. Par ailleurs, des expériences de fertilisation de sols forestiers par des apports de cations basiques ont amélioré l'état de forêts d'érables, au Québec, et de sapins, en France, en Norvège et en Allemagne. Ces expériences confirment que certains sols souffrent non seulement des pluies acides, mais aussi de la pénurie de cations basiques dans l'atmosphère.

Les chimistes savent aujourd'hui déterminer l'origine des cations basiques et suivre leurs déplacements dans les écosystèmes forestiers en mesurant l'abondance des isotopes naturels du strontium (ces isotopes se distinguent par des nombres de neutrons différents). Cet élément est un bon marqueur du calcium, car il se comporte chimiquement comme lui. Or la composition isotopique du strontium est différente, selon que le strontium provient de l'atmosphère ou du sous-sol. Par des dosages des isotopes du strontium, on a établi le rôle prépondérant de la poussière atmosphérique comme source importante d'ions pour les écosystèmes forestiers. En outre, ces dosages ont montré que, dans les régions où les sols ont été dégradés par

les pluies acides ou dans les sols naturellement pauvres en ions basiques, la majeure partie du calcium semble provenir de l'atmosphère plutôt que des roches. Ainsi le hêtre qui domine les forêts non polluées du Chili se nourrit presque exclusivement de calcium atmosphérique.

Ces observations montrent comment l'atmosphère contribue à l'alimentation des forêts et comment l'appauvrissement de l'atmosphère en cations basiques a ralenti la régénération des sols. Bien sûr, les concentrations naturelles en poussières n'ont jamais été constantes, dans l'atmosphère, mais, dans le passé, les variations s'étaient étalées sur des siècles ou sur des millénaires. Analysant des carottes de glace du Groenland, Paul Mayewski et ses collègues de l'Université du New Hampshire ont montré que le contenu en poussières de l'atmosphère a été fortement modifié par les variations climatiques au cours des 20 000 dernières années : lors des périodes arides et froides, les concentrations en ions calcium et en poussières étaient élevées ; lors des périodes humides et chaudes, elles étaient faibles. En outre, les concentrations actuelles sont inférieures à celles des 1 200 dernières années (il y eut toutefois une raréfaction considérable de la concentration en poussières au cours des années 1930, dans la région de l'Ouest des États-Unis).

Encore moins de soufre

En découvrant le rôle fondamental des composés basiques de l'atmosphère et, plus récemment, le lien étroit entre les émissions de poussières atmosphériques et les éléments nutritifs des sols, les agronomes ont mieux compris les réactions des forêts à la pollution. L'ensemble des études montre que les mécanismes d'action des pluies acides sont plus complexes que prévu et que les ravages causés par la pollution sont plus graves qu'on ne l'imaginait. Le gouvernement américain fondait ses récents programmes de lutte contre les pluies acides sur un audit de 1990, qui concluait que ces pluies n'avaient pas d'action prouvée sur les forêts ; cette conclusion n'est aujourd'hui plus tenable.

Le phénomène des pluies acides, ajouté à la raréfaction des éléments basiques, semble placer la plupart des espèces végétales, notamment dans les écosystèmes sensibles, dans des condi-

tions écologiques qu'elles n'ont jamais connues ; aussi la prévision de leur résistance et de leurs comportements au cours des prochaines décennies semble difficile. De surcroît, les effets de la pollution pourraient ne pas se limiter aux plantes : Jaap Graveland et ses collègues de l'Université de Groningue ont observé que, dans les forêts les plus gravement touchées par les pluies acides, où les concentrations en éléments basiques du sol sont les plus faibles, certains oiseaux, telles les mésanges de Hollande, produisent des œufs dont les coquilles sont plus minces et plus fragiles.

Comment résoudre ce problème des pluies acides et des poussières atmosphériques ? Les solutions les plus étonnantes ont été imaginées : après la publication d'un de nos récents articles, par exemple, un lecteur proposa des campagnes de lâchers de ballons qui, une fois en altitude, relargueraient des particules riches en calcium. C'est une solution poétique, mais coûteuse. Nous proposons plutôt de continuer à réduire les émissions de polluants acides à un niveau tel que ces derniers puissent être compensés par les constituants basiques naturels de l'atmosphère : autrement dit, il faudrait réduire les émissions de dioxyde de soufre et de dioxyde d'azote plus encore qu'on ne le fait aujourd'hui.

Lars HEDIN et Gene LIKENS sont respectivement professeurs d'écologie à l'Université Cornell et à l'Université de Millbrook.

Ecology and Decline of Red Spruce in the Eastern United States, sous la direction de C. Eagar et M.B. Adams, Springer-Verlag, 1992.

J. GRAVELAND, R. van der WAL, J.H. van BALEN et A.J. van NOORDWIJK, *Poor Reproduction in Forest Passerines from Decline in Snail Abundance of Acidified Soils*, in *Nature*, vol. 368, pp. 446-448, 31 mars 1994.

Lars O. HEDIN, Lennart GRANAT, Gene E. LIKENS, T. Adri BUSHAND, James N. GALLOWAY, Thomas J. BUTLER et Henning RHODE, *Steep Declines in Atmospheric Base Cations in Regions of Europe and North America*, in *Nature*, vol. 367, pp. 351-354, 27 janvier 1994.

Gene E. LIKENS, Charles T. DRISCOLL et Donald C. BUSO, *Long-Term Effects of Acid Rain : Response and Recovery of a Forest Ecosystem*, in *Science*, vol. 272, pp. 244-246, 12, avril 1996.