

Étude de l'origine du calcium dans les écosystèmes forestiers

Utilisation des isotopes naturels du strontium

Thomas Drouet

Résumé

Le calcium est un élément essentiel dans la nutrition minérale des arbres et joue un rôle important dans la neutralisation des apports d'acidité dans les écosystèmes forestiers. Le déclin des réserves en calcium biodisponibles du sol, lié aux retombées acides produites par l'activité industrielle, a été mis en évidence dans de nombreux sites forestiers et impose donc une connaissance précise de ses sources d'approvisionnement. La mesure des isotopes naturels du strontium permet de déterminer avec précision l'origine du calcium dans la végétation, et de mettre ainsi en évidence l'extrême dépendance de certains écosystèmes forestiers vis-à-vis des apports de calcium par les précipitations atmosphériques. L'utilisation de ce traceur isotopique a également permis de caractériser les échanges de calcium entre différents compartiments de l'écosystème. Enfin, l'application de cette méthode en dendrochimie a ajouté une pièce importante à la compréhension de l'historique du processus d'acidification des sols. Le changement du rapport isotopique du strontium dans les cernes de croissance des arbres dans plusieurs sites en Belgique et la comparaison avec des tendances similaires dans d'autres régions, suggèrent que l'acidification des sols dans les pays industrialisés a commencé au début du XX^e siècle, c'est-à-dire bien plus tôt que ce qui est généralement admis.

Mots-clés

Isotopes du strontium, dendrochimie, calcium, dépôts acides.

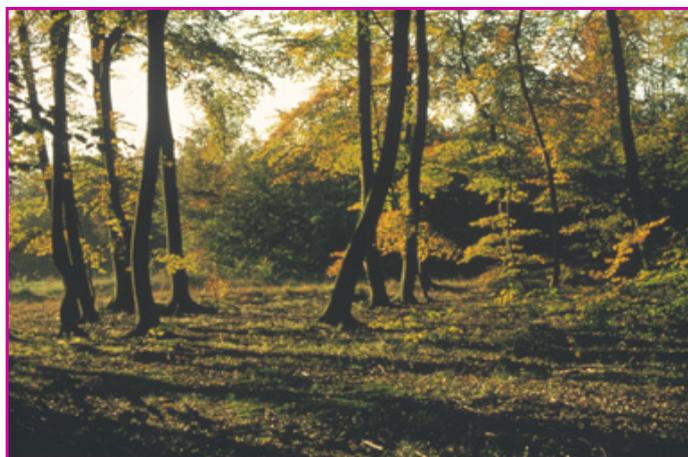
Abstract

The origin of calcium in forest ecosystems: use of natural strontium isotopes

Calcium is essential for tree mineral nutrition and plays a major role in the neutralization of acid inputs in forest ecosystems. The decline in bioavailable Ca reserve in the soil, linked to acid deposition produced by industrial activity, was highlighted in a lot of forest sites. This requires a precise knowledge of the supplying sources of Ca. Measurements of natural strontium isotopes allow to determine accurately the origin of Ca in the vegetation. By means of this method, we highlight the extreme dependence of some forest ecosystems to the Ca input by atmospheric precipitation. The use of this isotopic tracer also allows characterizing the Ca exchanges between the ecosystem components. Finally, the coupling of this method with dendrochemistry adds an important piece to the knowledge of the soil acidification story. The change of the Sr isotopic ratio in the tree-rings of several Belgian sites and the comparison with similar trends in other regions suggest that the soil acidification in industrial regions started in the beginning of the XXth century, i.e. earlier than it is generally admitted.

Keywords

Strontium isotopes, dendrochemistry, calcium, acid deposition.



Hêtraie en automne (forêt de Fontainebleau). © CNRS Photothèque/PONTAILLER Jean-Yves.

L'hypothèse d'une acidification des sols forestiers des régions tempérées d'Europe et d'Amérique du Nord sous l'action de dépôts atmosphériques acides fait encore aujourd'hui l'objet de recherches actives. Les processus impliqués sont à ce point complexes et intimement imbriqués que nombre de questions ne sont toujours pas résolues. Il s'agit pourtant d'un problème dont la compréhension est primordiale pour tenter de garantir le maintien de la qualité de l'environnement et permettre une gestion durable des peuplements forestiers.

Les effets néfastes des dépôts acides [1] et de la réduction de la teneur en cations basiques dans les eaux de précipitation [2] sont des phénomènes reconnus comme dommageables pour les écosystèmes forestiers des régions tempérées. Peu de méthodes permettent de décrire avec précision les étapes du mécanisme d'acidification des sols ainsi que son impact sur la nutrition minérale des peuplements forestiers. L'étude des sources de calcium au sein du

système sol-végétation-atmosphère permet d'estimer les dangers réels des processus d'appauvrissement des sols sur la nutrition minérale des peuplements forestiers. Le calcium joue en effet un rôle central dans ces écosystèmes, à la fois comme nutriment, et pour tamponner les apports d'acidité. Rappelons que les deux sources principales de calcium dans les écosystèmes forestiers sont l'altération des minéraux du sol et les apports par les précipitations atmosphériques.

Notre démarche a consisté à utiliser le strontium comme traceur du calcium. Ces deux éléments ont en effet des structures chimiques voisines, ce qui leur confère des comportements géochimiques proches. Ils évoluent donc de manière similaire dans le système sol-plante [3].

Le principe de la méthode a été de mesurer la variation naturelle de la composition isotopique du strontium, exprimée par le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et précédemment utilisée pour d'autres applications en géologie (datation absolue des roches, origine des magmas), comme traceur des deux sources de calcium dans les écosystèmes forestiers. Les signatures isotopiques distinctes du strontium contenu dans les précipitations et de celui issu de l'altération des minéraux permettent de quantifier les apports respectifs de ces deux sources [4] (figure 1). Le strontium libéré par altération de substrats géologiques anciens est généralement caractérisé par un rapport isotopique élevé (riche en ^{87}Sr radiogénique). Par contre, celui issu des précipitations atmosphériques a un rapport isotopique bas, proche de celui de l'eau de mer. De plus, en raison du rapport de masse très faible entre les isotopes du strontium, les processus biologiques et chimiques n'engendrent qu'un très faible fractionnement isotopique qui peut être corrigé lors de la mesure au spectromètre de masse. Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ne varie donc qu'en fonction des proportions du ^{87}Sr radiogénique présentes dans l'échantillon. La méthode isotopique permet d'établir des relations qualitatives et quantitatives entre

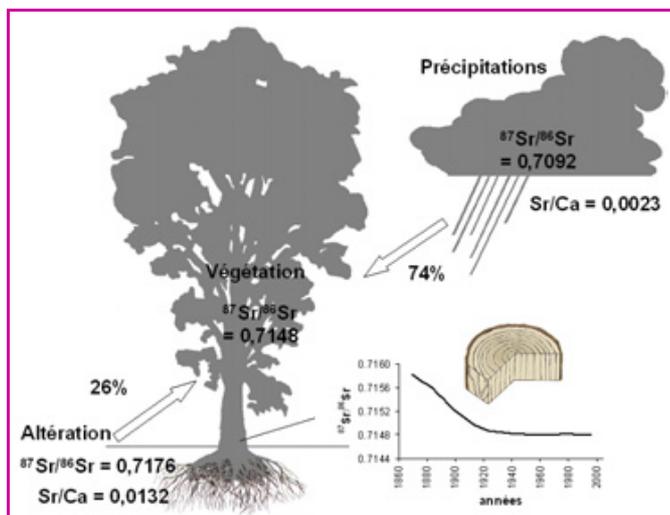


Figure 1 - L'altération des minéraux et l'apport des précipitations atmosphériques constituent les deux sources d'alimentation en calcium de l'écosystème forestier. Le calcul des contributions de ces deux sources sur base de la composition isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) est illustré pour une hêtraie ardennaise (forêt d'Herbeumont). Le graphique représente la diminution du rapport isotopique du strontium dans les cernes de hêtres de 1870 à 1920 et traduit un changement d'origine du calcium dans la végétation et sur le complexe d'échange du sol, au profit de la source atmosphérique.

apports issus de l'altération, apports atmosphériques et alimentation en calcium des arbres [3]. Les techniques de traçage présentent l'avantage de s'affranchir de la détermination des flux d'éléments (variables extensives) en utilisant des variables de type intensives (rapports isotopiques) qui ne nécessitent pas la connaissance de la structure et des limites du système.

Nos recherches ont montré que, étonnamment, certaines stations forestières étaient alimentées à plus de 70 % par du calcium d'origine atmosphérique (figure 1), ce qui illustre l'extrême sensibilité de ces écosystèmes aux apports d'acidité étant donné le faible apport annuel de calcium par les précipitations atmosphériques [5]. Cette découverte fondamentale a des implications importantes en ce qui concerne la gestion des peuplements forestiers.

Le calcul des contributions des deux sources précitées dans quatorze écosystèmes forestiers de Moyenne et Haute Belgique [3] (figure 2) croissant sur des sols présentant une très large gamme de réserves en calcium a montré que l'alimentation calcique des peuplements était tantôt majoritairement issue de l'altération des minéraux, tantôt principalement d'origine atmosphérique. Nous avons mis en évidence des relations générales entre la contribution atmosphérique à l'alimentation en Ca de la végétation et le taux de saturation en bases ainsi que les teneurs en Ca échangeable du sol. D'autre part, nous avons pu établir un lien direct entre les proportions de Ca atmosphérique sur le complexe d'échange du sol et le pourcentage de Ca atmosphérique dans la végétation.

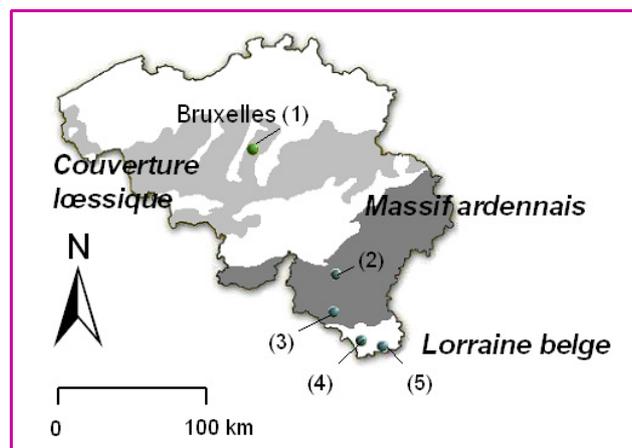


Figure 2 - Localisation des sites étudiés : (1) forêt de Soignes, neuf sites ; (2) forêt d'Herbeumont ; (3) bois de Smuid ; (4) bois de Meix-devant-Virton ; (5) bois de la Côte, deux sites.

Les isotopes stables du strontium permettent non seulement de quantifier les sources, mais aussi d'étudier les échanges de calcium entre les différents compartiments du sol. Dans le sol, les réserves de cations biodisponibles se trouvent principalement sous une forme dite échangeable, adsorbée à la surface des minéraux et à la matière organique (complexe d'échange). L'avantage de l'utilisation des isotopes du strontium est que le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans le sol demeure une signature robuste, alors que les concentrations des éléments majeurs libérés par altération peuvent être modifiées par la formation de minéraux secondaires ou des phénomènes d'échange sur le complexe adsorbant. L'étude d'un grand nombre de stations forestières (figure 2) a permis de montrer que le complexe d'échange n'est pas toujours le reflet d'un équilibre entre l'altération actuelle des minéraux et

la source atmosphérique, mais qu'il peut conserver la signature de processus pédogénétiques plus anciens ou celle héritée de transferts d'éléments au sein du profil. Ainsi, dans des sols développés sur loess, le calcium et le strontium issus de la dissolution des carbonates présents à l'origine et aujourd'hui disparus ont pu se maintenir sur le complexe d'échange [6]. Dans un autre profil de sol sur substrat argilo-sableux du Tertiaire, le complexe d'échange est constitué de strontium provenant de l'altération ancienne de la glauconite, un minéral hautement radiogénique aujourd'hui fortement altéré et qui n'imprime plus sa marque sur le produit d'altération actuel [3]. Ce phénomène de « mémoire » du complexe d'échange semble particulièrement présent dans les horizons de sol à fort taux d'argile.

Enfin, la mesure des isotopes du strontium associée à la dendrochimie, qui utilise les propriétés d'archivage des cernes d'accroissement des arbres, permettent une analyse rétrospective de l'origine du calcium dans la nutrition des arbres [7-9]. Cette dernière méthode est basée sur l'hypothèse que la distribution radiale d'un élément dans les cernes de croissance reflète la chimie de l'environnement au moment de la formation du cerne. La dendrochimie isotopique est susceptible de fournir des informations sur l'évolution de la nutrition en calcium des arbres sur de longues périodes (de plus de cent ans).



Rondelle d'un hêtre (*Fagus sylvatica* L.) où l'on voit les limites de cernes. © CNRS Photothèque/CLAIR Bruno.

Dans notre étude [3], la validité de l'enregistrement dendrochimique a dans un premier temps été évaluée à partir d'échantillons de cernes de hêtres d'une station ayant subi une forte perturbation nutritionnelle, c'est-à-dire un chaulage. La signature isotopique caractéristique de l'amendement calcaire (CaCO_3) est décelable dans le bois, de manière dégressive, jusque dans les cernes formés cinquante ans avant l'application du carbonate de calcium. Ceci peut s'expliquer par le fait que les cernes demeurent actifs durant plusieurs années. La circulation de la sève maintient donc l'équilibre isotopique entre le bois et la solution du sol. L'évaluation de ce phénomène appelé

ré-équilibrage latérale est cruciale pour l'interprétation d'autres profils dendrochimiques.

Des mesures isotopiques dans les cernes de hêtres et de chênes pédonculés ont ensuite été réalisées sur d'autres peuplements forestiers de Moyenne Belgique et d'Ardenne. Ces données de dendrochimie isotopique ont mis en évidence une diminution synchrone du rapport isotopique du strontium des cernes de croissance de différentes essences forestières, au profit de la source atmosphérique (figure 1). La modification du signal isotopique s'est produite sur une période de temps relativement courte (1870-1920). La comparaison avec d'autres chronologies en Scandinavie [10] et aux États-Unis [11] témoigne aussi de l'étendue géographique de cette perturbation. Cette étude montre que les écosystèmes forestiers à statut en calcium critique ont subi un bouleversement majeur dans leur nutrition calcique, à une époque plus ancienne que généralement admis. Ce changement abrupt semble lié à un apport d'anions dans le système dû à l'essor des activités industrielles du début du XX^e siècle. Ceci est conforté par le fait que le début de la décroissance isotopique correspond au début de l'augmentation des sulfates d'origine anthropiques enregistrés dans les glaces du Groenland [12] ou des Alpes [13]. De plus, d'autres méthodes ont mis en évidence une désaturation des sols au cours du temps (par ex. [1]).

Une hypothèse alternative fait intervenir l'augmentation des teneurs en poussières alcalines à bas rapport isotopique dans l'atmosphère pour expliquer la baisse du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans le bois. Ce changement de signature isotopique des arbres ne serait alors pas dû à la désaturation progressive du complexe d'échange, mais bien au remplacement des cations échangeables par des apports atmosphériques à bas rapport isotopique. En effet, outre son rôle dans l'accroissement de retombées acides, la révolution industrielle a également été à l'origine d'une augmentation des émissions de particules contenant du calcium (cimenteries, charbonnage...). Cependant, on dispose de peu d'informations pour confirmer cette hypothèse puisque les dépôts totaux en cations basiques et les émissions de particules fines (PM-10) n'ont pas été mesurés à des dates antérieures à 1940. Il faut également noter que l'apport annuel de calcium provenant de l'altération et de l'atmosphère est très inférieur aux réserves biodisponibles du sol, ce qui induit une certaine inertie du système face à un changement dans les quantités d'apports atmosphériques. Un tel changement aurait donc dû se traduire par une modification progressive du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les cernes d'arbres et est incompatible avec le changement brusque (si l'on tient compte du phénomène de ré-équilibrage latérale) observé dans les sites sensibles.

Ces différentes études montrent donc que les isotopes du strontium sont un outil précieux pour retracer l'origine du calcium à différents niveaux de l'écosystème forestier. Cependant, la mesure du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ne donne pas d'information sur le cycle interne du calcium (minéralisation de la matière organique, recyclage par la végétation...). Or ces flux internes sont généralement majoritaires en forêt. La mesure de la composition isotopique d'autres éléments (Ca, Mg) pourrait constituer un outil précieux pour quantifier l'effet de la végétation sur le cycle des éléments nutritifs. Malgré certaines difficultés techniques, les rapports isotopiques du calcium peuvent aujourd'hui être déterminés avec précision. Plusieurs études récentes montrent que les processus biotiques fractionnent les isotopes du calcium

[14]. Dans les écosystèmes forestiers, ses isotopes légers sont privilégiés lors de l'absorption par la végétation, ce qui entraîne un enrichissement en isotopes lourds dans le sol. Étant donné le fractionnement isotopique induit par chaque passage du calcium au sein du matériau biologique, le rapport $^{44}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ dans les peuplements forestiers pourrait donc être utilisé comme mesure directe de l'intensité du recyclage des éléments par la végétation et offrir de nouvelles perspectives de recherche.

Références

- [1] Thimonier A., Dupouey J.L., Tacon F.L., Recent losses of base cations from soils of *Fagus sylvatica* L. stands in northeastern France, *Ambio*, **2000**, 29, p. 314.
- [2] Hedin L.O., Granat L., Likens G.E., Buishand T.A., Galloway J.N., Butler T.J., Rodhe H., Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America, *Nature*, **1994**, 367, p. 351.
- [3] Drouet T., Étude de l'origine du calcium dans les écosystèmes forestiers par les méthodes de géochimie et de dendrochimie isotopiques du strontium, Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, **2005**.
- [4] Capo R.C., Stewart B.W., Chadwick O.A., Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods, *Geoderma*, **1998**, 82, p. 197.
- [5] Drouet T., Herbauts J., Gruber W., Demaiffe D., Strontium isotope composition as a tracer of calcium sources in two forest ecosystems in Belgium, *Geoderma*, **2005**, 126, p. 203.
- [6] Drouet T., Herbauts J., Gruber W., Demaiffe D., Natural strontium isotope composition as a tracer of weathering patterns and of exchangeable calcium sources in acid leached soils developed on loess of Central Belgium, *Eur. J. Soil Sci.*, **2007**, sous presse.
- [7] Poszwa A., Wickman T., Dambrine E., Ferry B., Dupouey J.-L., Helle G., Schleser G., Breda N., A retrospective isotopic study of spruce decline in the Vosges mountains (France), *Water, Air, and Soil Pollution*, **2003**, 3, p. 201.
- [8] Drouet T., Herbauts J., Demaiffe D., Strontium isotopes highlight change in Ca sources in forest ecosystems, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2005**, 69, p. A692.
- [9] Drouet T., Herbauts J., Demaiffe D., Long-term records of strontium isotopic composition in tree-rings suggest changes in forest calcium sources in the early 20th century, *Global Change Biology*, **2005**, 11, p. 1926.
- [10] Åberg G., The use of natural strontium isotopes as tracers in environmental studies, *Water, Air, and Soil Pollution*, **1995**, 79, p. 309.
- [11] Bullen T.D., Bailey S.W., Identifying calcium sources at an acid deposition-impacted spruce forest: a strontium isotope, alkaline earth element multi-tracer approach, *Biogeochemistry*, **2005**, 74, p. 63.
- [12] Mayewski P.A., Lyons W.B., Spencer M.J., Twickler M.S., Buck C.F., Whitlow S., An ice-core record of atmospheric response to anthropogenic sulphate and nitrate, *Nature*, **1990**, 346, p. 554.
- [13] Schwikowski M., Döschner A., Gäggeler H.W., Schotterer U., Anthropogenic versus natural sources of atmospheric sulphate from an Alpine ice core, *Tellus*, **1999**, 51B, p. 938.
- [14] Schmitt A.-D., Chabaux F., Stille P., The calcium riverine and hydrothermal isotopic fluxes and the oceanic calcium mass balance, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **2003**, p. 503.



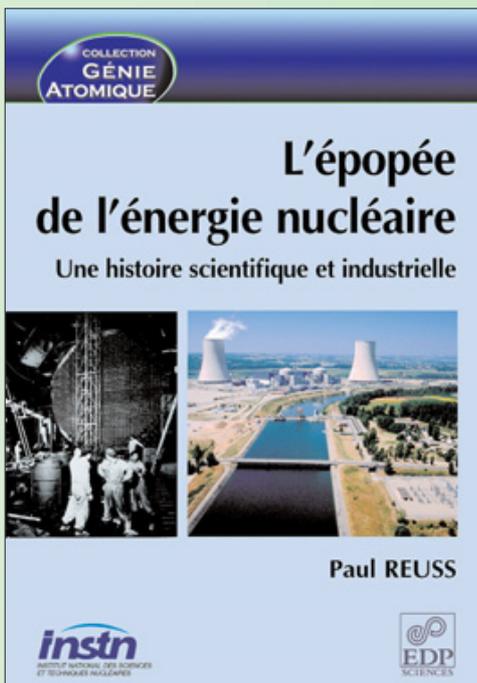
Thomas Drouet

est premier assistant au Laboratoire de génétique et d'écologie végétales de l'Université Libre de Bruxelles*.

* Laboratoire de génétique et d'écologie végétales, Université Libre de Bruxelles (ULB), 1850 chaussée de Wavre, B-1160 Bruxelles, Belgique.
Tél. : + 32 26509155. Fax : + 32 26509170.
Courriel : tdrouetd@ulb.ac.be



NUCLÉAIRE : CULTURE GÉNÉRALE



L'épopée de l'énergie nucléaire

Une histoire scientifique et industrielle

NOUVEAUTÉ

Paul Reuss - Collection "Génie Atomique"

L'épopée nucléaire est une des aventures scientifiques et industrielles les plus excitantes ; en France, cette énergie est devenue, en quelques décennies, la source principale de la production électrique. L'objet de cet ouvrage est de présenter les enjeux de ce pari, de mieux cerner les difficultés qui ont accompagné son déroulement, afin d'appréhender la complexité d'une telle construction.

Après un panorama des acquis successifs de la physique atomique et nucléaire depuis un peu plus d'un siècle, l'ouvrage décrit la genèse de l'énergie nucléaire, puis ses développements industriels, pour finir sur un aperçu de perspectives encore largement ouvertes. La conclusion dresse un bilan des atouts et des risques de cette énergie. On y trouvera les témoignages d'un autre acteur de ces recherches, Pierre Benoist, et de l'un de ceux qui les poursuivra, Sylvain David. La préface d'Hélène Langevin, fille de Frédéric et Irène Joliot-Curie, rappelle utilement que l'énergie nucléaire a été et restera le lieu d'une synergie vivante entre la recherche et l'industrie.

Conçu pour les étudiants en Génie Atomique, cette histoire de l'épopée nucléaire intéressera aussi toutes les personnes impliquées dans le développement de l'énergie nucléaire ou simplement curieuses de mieux connaître l'histoire énergétique française.

Cet ouvrage n'est pas l'œuvre d'un historien mais d'un acteur de cette fantastique aventure scientifique et industrielle ; elle sera considérée comme une introduction à la lecture des nombreux ouvrages consacrés à ce sujet.

Paul Reuss, polytechnicien et docteur ès sciences physiques, est aujourd'hui professeur émérite à l'Institut national des sciences et techniques nucléaires. Il a mené toute sa carrière au Commissariat à l'énergie atomique, partageant ses activités entre les développements des méthodes de calcul des réacteurs nucléaires et l'enseignement de la neutronique, la science qui décrit le cheminement des neutrons et les conditions de la réaction en chaîne de fissions induites par ces neutrons et libératrices d'énergie. Il est l'auteur de nombreuses publications, notamment, dans la même collection, du "Précis de neutronique" et des "Exercices de neutronique" associés.

• Parution 8 février 2007 • ISBN 978-2-86883-880-3 • 192 pages • 25 €

www.edpsciences.org