



HAL
open science

Chimie atmosphérique polaire : une nouvelle application des isotopes stables de l'oxygène

Samuel Morin, Joël Savarino

► **To cite this version:**

Samuel Morin, Joël Savarino. Chimie atmosphérique polaire : une nouvelle application des isotopes stables de l'oxygène. *L'Actualité Chimique*, 2006, 303, pp.14-18. insu-00421640

HAL Id: insu-00421640

<https://insu.hal.science/insu-00421640>

Submitted on 10 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Chimie atmosphérique polaire

Une nouvelle application des isotopes stables de l'oxygène

Samuel Morin et Joël Savarino

Résumé La mesure de la composition isotopique de l'oxygène du nitrate atmosphérique collecté dans le Haut Arctique Canadien à Alert (Nunavut, 82,5 °N) au cours d'épisodes de destruction de l'ozone des basses couches de l'atmosphère a permis de mettre en évidence un lien entre la teneur en ozone de surface et l'anomalie isotopique du nitrate ($\Delta^{17}\text{O}$). Il est montré que cette anomalie est transmise par l'ozone aux précurseurs du nitrate atmosphérique. Ainsi, l'intensité de l'activité chimique locale de l'atmosphère, due à l'ozone, s'imprime dans la composition isotopique du nitrate. Ce mode d'enregistrement apparaît prometteur dans le cadre d'études approfondies sur les processus à l'œuvre dans l'atmosphère polaire, mais également pour la reconstruction de la composition chimique de l'atmosphère et des climats passés à partir des enregistrements glaciologiques.

Mots-clés Ozone, isotopes stables, nitrate, atmosphère, Arctique.

Abstract **Polar atmospheric chemistry: oxygen stable isotopes as a new investigation tool**

The oxygen isotopic composition of atmospheric nitrate was measured in samples collected in the High Canadian Arctic at Alert (Nunavut, 82.5°N). Focusing on the polar sunrise period in early spring, when "ozone depletion events" are known to occur every year, we show a significant correlation between the isotope anomaly of nitrate ($\Delta^{17}\text{O}$) and the ozone mixing ratio at the surface. This allows establishing a relationship between the magnitude of local atmospheric nitrogen oxides and ozone cycling, and the isotopic composition of nitrate. This isotopic fingerprint of the ozone activity appears promising in the perspective of using the isotopic composition of nitrate embedded in polar ice cores as a paleo-record of the ozone atmospheric mixing ratios. This may yield an indicator for the oxidative power of past atmospheres.

Keywords Ozone, stable isotopes, nitrate, atmosphere, Arctic.

Malgré une concentration qui fait d'elle une espèce minoritaire dans les basses couches de l'atmosphère (4.10⁻⁶ % en moyenne des molécules dans la troposphère, les dix premiers kilomètres de l'atmosphère), l'ozone (O₃) est une espèce clef de son fonctionnement chimique. L'ozone participe en effet à de nombreux cycles photochimiques, dont ceux aboutissant à la formation de radicaux tels que le radical hydroxyl (OH) dont l'action conditionne le temps de vie de très nombreuses espèces émises à la surface de la Terre (notamment les composés organiques volatils, les espèces soufrées et azotées, d'origine naturelle ou humaine). Sous l'action de ces oxydants puissants, les composés primaires émis par la surface sont transformés en espèces secondaires, avec des caractéristiques physiques et chimiques très différentes. Par exemple, l'oxydation des oxydes d'azote ou de soufre (NO/NO₂, SO₂) produit des acides (HNO₃, H₂SO₄) ayant des propriétés radiatives très différentes de leurs précurseurs : en général, les espèces gazeuses possédant au moins trois atomes sont des gaz à effet de serre, alors que les acides s'incorporent aux aérosols, modifiant profondément leurs propriétés radiatives. La capacité oxydante de l'atmosphère (COA), régie entre autres par la teneur en ozone, constitue une brique importante du système climatique. Les études réalisées sur le climat passé de la Terre via des mesures effectuées sur les carottes extraites dans les régions polaires montrent que le climat terrestre a subi des variations importantes au cours des derniers cycles glaciaires. Contrairement au dioxyde de carbone ou au méthane, qui sont des gaz relativement inertes une fois piégés dans les bulles de gaz lors de la transformation de neige en

glace, et dont on peut estimer précisément les teneurs atmosphériques passées en mesurant les teneurs dans les bulles incorporées dans la glace, l'ozone est une molécule réactive qui ne se conserve pas dans la glace. Les variations passées de la COA sont donc très mal contraintes mais sont susceptibles d'avoir joué un rôle important, via les nombreuses rétroactions (par ailleurs très mal connues) entre chimie et climat qui à leur tour amplifient ou atténuent les variations climatiques. La reconstruction de la COA passée constitue donc un enjeu de taille pour les études paléoclimatiques. Or à ce jour, aucun signal chimique ou physique enregistré dans les carottes ne permet de mesurer un indice d'activité chimique de l'atmosphère qui pourrait être relié à la COA. Nous montrons dans cet article que l'anomalie isotopique de l'oxygène dans le nitrate ($\Delta^{17}\text{O}(\text{NO}_3)$) constitue, aux courtes échelles de temps, en région polaire, un indicateur précieux de l'activité chimique locale de l'ozone, et par suite, que la composition isotopique du nitrate stocké dans les carottes glaciaires offre peut-être la possibilité d'accéder aux paléo-concentrations d'ozone, et donc à l'évolution temporelle de la COA au travers des cycles glaciaires de la Terre.

Anomalie isotopique de l'ozone et chimie atmosphérique

Pour débusquer les traces de l'activité de l'ozone, l'outil isotopique est déterminant : l'ozone possède en effet une anomalie isotopique [1-2] (encadré 1) dont il est possible d'obtenir la valeur en mesurant simultanément les

Encadré 1

L'anomalie isotopique de l'ozone

Cette anomalie porte sur la proportion relative des isotopes de l'oxygène en son sein. En effet, l'oxygène possède trois isotopes stables : ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O , représentant respectivement 99,762 %, 0,038 % et 0,200 % de la quantité totale d'oxygène dans le système terrestre. La plupart des phénomènes physiques et chimiques dans la nature dépendent intrinsèquement de la masse des atomes. Cette propriété fondamentale a pour conséquence de répartir les isotopes entre les espèces chimiques et/ou les phases suivant une loi faisant intervenir la différence de masse entre eux : c'est le fractionnement isotopique dépendant de la masse, qui se traduit, dans le cas de l'oxygène, par une relation apparemment linéaire entre les enrichissements isotopiques $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$: $\delta^{17}\text{O} = 0,52 \delta^{18}\text{O}$, où $\delta^{18}\text{O} = (R^{18}_{\text{échantillon}}/R^{18}_{\text{standard}} - 1) \times 1000$ et $R^{18} = [^{18}\text{O}]/[^{16}\text{O}]$ mesuré dans un échantillon ou dans un standard. Le standard de référence pour l'oxygène contenu dans les espèces atmosphériques est le SMOW (« standard mean ocean water »). La plupart des grands réservoirs terrestres d'oxygène (silicates de la croûte et du manteau, eau des océans, dioxygène de l'air) possèdent des compositions isotopiques « normales » et se situent sur une droite de fractionnement terrestre, de pente 0,52, dans un diagramme $\delta^{17}\text{O} - \delta^{18}\text{O}$.

Les expériences de Heidenreich and Thiemens ont montré que des processus indépendants de la masse se produisent sur Terre [1]. La réaction de formation de l'ozone ($\text{O}_2 + \text{O} \rightarrow \text{O}_3$) fractionne les isotopes de l'oxygène indépendamment de leur masse. La composition isotopique de l'ozone se répartit sur une droite de pente 1 dans un diagramme $\delta^{17}\text{O} - \delta^{18}\text{O}$ (voir figure) qui coupe la droite de fractionnement terrestre au niveau de la composition isotopique de l'oxygène de l'air. Pour exprimer l'écart de la composition isotopique de l'oxygène dans une espèce vis-à-vis d'une composition normale, on utilise la quantité $\Delta^{17}\text{O}$, appelée anomalie isotopique de l'oxygène, telle que :

$$\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0,52 \delta^{18}\text{O}$$

proportions en isotopes stables ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O de l'oxygène. Lors des réactions d'oxydation auxquelles il participe, l'ozone transmet tout ou partie de son anomalie (notée $\Delta^{17}\text{O}$) au composé produit. Ainsi, lorsqu'aucun équilibre isotopique avec des molécules de composition « normale » ne vient effacer l'anomalie induite par l'ozone, l'analyse des isotopes de l'oxygène de certains composés atmosphériques révèle le comportement de leurs précurseurs vis-à-vis de l'ozone. C'est le cas du nitrate inorganique atmosphérique (somme du nitrate particulaire NO_3^- et de l'acide nitrique gazeux HNO_3) dont les précurseurs principaux, les oxydes d'azote (NO et NO_2), sont photochimiquement liés à l'ozone. Il est donc attendu que la teneur en ozone et sa composition isotopique dans l'air ambiant déterminent en grande partie la composition isotopique du nitrate atmosphérique.

Afin de tester cette hypothèse, nous avons conduit de mars à mai 2004 une campagne de mesures dans le Haut Arctique Canadien, à la station Alert située en bordure de l'Océan Arctique à plus de 82° de latitude nord, après le lever de soleil polaire. Cette situation géographique présente des caractéristiques particulières : en raison de sa position très proche du Pôle Nord (800 km), la nuit et le jour s'y succèdent par plages de six mois, avec une transition brutale et courte d'une situation de nuit complète à un jour permanent au mois de mars. Pour cette étude, les conditions de jour permanent constituent donc un cas relativement simplifié, car la production de nitrate atmosphérique ne fait pas appel à des mécanismes impliquant des espèces nocturnes, telles que le

radical NO_3 . En outre, la période suivant le lever de soleil polaire s'accompagne d'épisodes photochimiques intenses de destruction de l'ozone des basses couches de l'atmosphère par des composés bromés (notamment le radical BrO) émis en surface de l'océan gelé (voir figure 1) [3-4]. Proches des mécanismes de destruction à l'œuvre dans la haute atmosphère aboutissant au fameux « trou d'ozone stratosphérique » saisonnier découvert au début

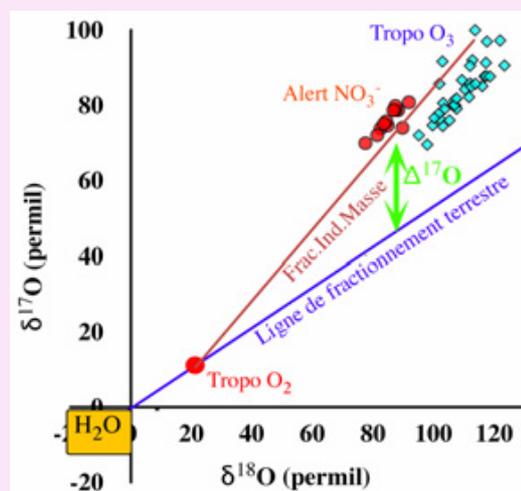


Diagramme à trois isotopes ($^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ en fonction de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) permettant de caractériser la composition isotopique de diverses espèces atmosphériques. L'oxygène et la vapeur d'eau troposphérique s'alignent sur la ligne de fractionnement terrestre, alors que l'ozone troposphérique et le nitrate atmosphérique collecté à Alert s'en éloignent significativement.



Figure 1 - La banquise arctique à Alert (Nunavut).

Le manteau neigeux, alimenté en espèces issues de l'océan (composés bromés notamment), constitue un réacteur chimique à part entière, responsable des phénomènes de destruction catalytique de l'ozone de surface au printemps.

des années 1980, ces mini trous d'ozone de surface font du pourtour de l'Océan Arctique un laboratoire naturel d'études de l'atmosphère dans le contexte rare d'une variabilité importante de la teneur en ozone aux courtes échelles de temps (un à dix jours).

Nous avons analysé douze échantillons, représentant chacun trois à quatre jours de collecte de nitrate atmosphérique (voir encadré 2), et mesuré simultanément la teneur en ozone dans l'atmosphère au niveau du sol. La figure 2 montre l'extrême variabilité de la teneur en ozone dans ces conditions particulières, et met aussi en évidence le lien entre l'anomalie isotopique mesurée dans le nitrate atmosphérique et la teneur en ozone : il existe une corrélation manifeste entre l'anomalie isotopique de l'oxygène du nitrate et la teneur moyenne en ozone pendant chaque période de collecte d'un échantillon. Dans ces conditions, les isotopes de l'oxygène dans le nitrate sont porteurs d'une information reliée directement à la teneur en ozone.

Discussion et implications

En mettant au jour un lien de corrélation entre la teneur en ozone et la composition isotopique du nitrate atmosphérique, nous considérons nos résultats comme une preuve supplémentaire que les cycles photochimiques impliquant l'ozone permettent le transfert d'anomalie isotopique entre l'ozone et les oxydes d'azote, puis le nitrate atmosphérique. Cette hypothèse, qui avait servi de base pour un travail réalisé en Californie [5], se trouve ainsi renforcée par cette étude en conditions naturelles dans un contexte de forte variabilité de la teneur en ozone.

Afin d'affiner l'interprétation de ces mesures, il est nécessaire de quantifier le couplage isotopique entre les espèces en présence. L'usage classique des isotopes stables se fonde sur les fractionnements isotopiques associés à des phénomènes physico-chimiques que l'on

Encadré 2

Technique analytique de mesure simultanée de $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$ pour des échantillons naturels de nitrate

La technique employée pour cette étude a été adaptée à partir de la méthode développée par Michalski *et al* [5]. Les particules atmosphériques sont collectées sur un filtre en papier (Whatman 41) à l'aide d'un dispositif de pompage haut débit ($1 \text{ m}^3/\text{min}$). Chaque échantillon intègre trois à quatre jours de collecte, soit les espèces chimiques contenues dans $10\,000 \text{ m}^3$ d'air en moyenne. Ceci correspond à une quantité de nitrate de l'ordre de 5 à $10 \mu\text{mol}$ pour chaque échantillon. Le contenu ionique stocké sur les filtres est ensuite dissous dans de l'eau ultra-pure. Par chromatographie ionique, le nitrate est isolé des autres ions et récupéré sous forme d'acide nitrique, qui est converti à son tour en nitrate d'argent à l'aide d'une membrane échangeuse d'ions. Le nitrate d'argent est évaporé à sec, puis repris dans de l'eau ultra-pure et transféré dans des capsules en argent. Par évaporation, on obtient un cristal de AgNO_3 . Ce produit est brûlé à $550 \text{ }^\circ\text{C}$ dans une ligne de décomposition thermique sous vide, ce qui produit un mélange d'oxydes d'azote et de dioxygène gazeux. Par cryopiégeage à l'azote liquide, ce mélange est purifié jusqu'à obtenir du dioxygène gazeux pur, qui est à son tour transféré sur un port du spectromètre de masse à rapport isotopique (IRMS, MAT 253 Thermo Finnigan, *Dual Inlet*), où la teneur relative des trois isotopes stables de l'oxygène est mesurée.

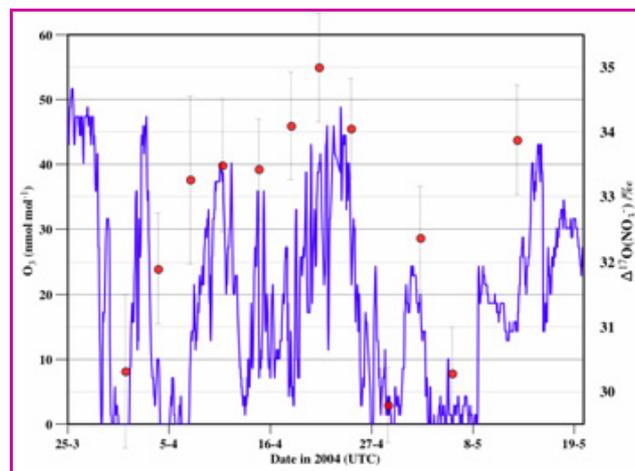


Figure 2 - Évolution temporelle conjointe de la teneur en ozone en surface (courbe violette) et de l'anomalie isotopique de l'oxygène dans le nitrate particulaire (points rouges) à Alert au printemps 2004.

Les périodes du 27/03 au 06/04 et du 27/04 au 10/05 correspondent à des épisodes de destruction de l'ozone troposphérique, au cours desquels la valeur de l'anomalie isotopique de l'oxygène dans le nitrate décroît significativement.

peut ainsi identifier ou suivre. C'est par exemple le cas des atomes d'oxygène et d'hydrogène dans l'eau de pluie, dont les rapports isotopiques sont contrôlés par la température de condensation de la vapeur d'eau et par le taux de transformation de la vapeur en liquide, obéissant ainsi au formalisme de distillation de Rayleigh. Ces fractionnements sont dépendants de la masse et n'affectent aucunement la valeur de l'anomalie isotopique que nous mesurons. Nos raisonnements sont donc essentiellement fondés sur des bilans de masse, où l'on détermine l'origine des atomes d'oxygène dans la molécule étudiée, ce qui permet de connaître l'influence d'un certain nombre d'acteurs chimiques lors des étapes de sa formation. Cette approche est illustrée figure 3, où les anomalies respectives portées par les atomes d'oxygène impliqués sont figurés par un code de couleur, permettant de suivre les transferts d'atomes d'oxygène, et donc d'anomalie isotopique, au cours des réactions chimiques.

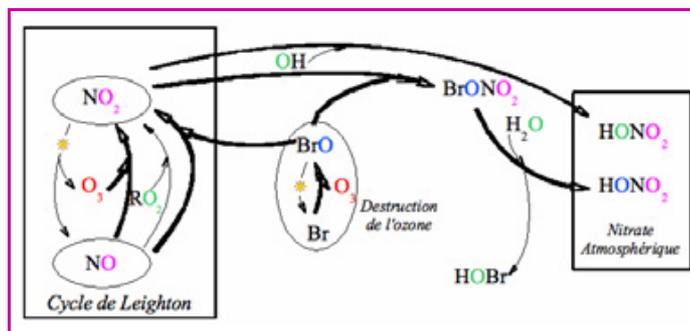


Figure 3 - Schéma simplifié des interactions chimiques entre ozone, composés bromés et oxydes d'azote dans la basse atmosphère arctique après le lever de soleil.

Le code de couleur permet de « suivre » un atome d'oxygène lors de la formation du nitrate atmosphérique, chaque couleur étant caractéristique d'une anomalie isotopique donnée (vert : 0 ‰, rouge : 35 ‰, bleu : 44 ‰, violet : variable selon les cinétiques relatives au sein du cycle de Leighton à un instant donné, voir texte). BrO est une espèce clef du fonctionnement chimique de l'atmosphère arctique, participant aux réactions de destruction de l'ozone et aux cycles chimiques impliquant les oxydes d'azote, comme le mettent en évidence les analyses isotopiques.

La formation du nitrate atmosphérique se fait par le biais de deux cycles photochimiques imbriqués (*figure 3*) : dans un premier temps, les précurseurs du nitrate que sont les oxydes d'azote NO et NO₂ participent au cycle de Leighton, au cours duquel NO₂ est photolysé en NO, libérant un atome d'oxygène qui se recombine avec une molécule d'oxygène pour former de l'ozone. NO est quant à lui oxydé en NO₂ par trois oxydants majoritaires dans l'Arctique : l'ozone (O₃), les radicaux peroxy-alkyls (RO₂, où R note H ou une chaîne carbonée) et le radical monoxyde de brome (BrO), participant aussi à la destruction de l'ozone des basses couches de l'atmosphère arctique. Ces trois oxydants possèdent des signatures isotopiques distinctes. Par exemple, l'anomalie isotopique de l'ozone ($\Delta^{17}\text{O}(\text{O}_3)$) est de l'ordre de 35 ‰ [6], celle des radicaux peroxy-alkyls est négligeable, et celle de BrO est supérieure à celle de l'ozone (de l'ordre de 44 ‰), à cause du mécanisme de la réaction $\text{Br} + \text{O}_3$ et de la distribution spécifique des isotopes de l'oxygène au sein de la molécule d'ozone [7]. A l'équilibre photochimique, $\Delta^{17}\text{O}(\text{NO}_2)$ dépend donc des cinétiques comparées de ces trois réactions d'oxydation et des signatures isotopiques associées à ces trois oxydants.

Par suite, le nitrate atmosphérique est produit par oxydation de NO₂, soit par les radicaux OH, soit par la formation de bromonitrate ($\text{BrO} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{BrONO}_2$). L'hydrolyse de ce dernier conduit à la formation de nitrate atmosphérique. OH ne possède pas d'anomalie isotopique, donc le mode de production de nitrate auquel il participe tend à diluer l'anomalie portée initialement par NO₂. Au contraire, l'étude fine des mécanismes chimiques nous apprend que lors de l'hydrolyse de BrONO₂, l'atome d'oxygène incorporé au nitrate provient initialement de BrO (avec $\Delta^{17}\text{O}(\text{BrO})$ de l'ordre de 44 ‰), et non de la molécule d'eau impliquée dans l'hydrolyse.

Ainsi, l'anomalie isotopique du nitrate atmosphérique dépend essentiellement de la valeur de l'anomalie portée par NO₂ et de la proportion entre les deux mécanismes de formation du nitrate à partir de NO₂ (impliquant OH ou BrO).

Les variations temporelles importantes de $\Delta^{17}\text{O}(\text{NO}_3^-)$, corrélées à celles de l'ozone, sont quantitativement compatibles avec les teneurs en ozone, BrO et RO₂ [7], mesurées lors des épisodes de destruction de l'ozone des basses couches de la troposphère arctique. Par ailleurs, comme le montre la *figure 2*, les valeurs mesurées lors de cette campagne s'échelonnent entre 29 et 34 ‰, soit plus de 8 ‰ au-dessus de celles mesurées en Californie à la même période de l'année [5]. Ce décalage est la preuve de l'importance de l'hydrolyse du bromonitrate comme source de nitrate atmosphérique. Bien que cette réaction soit mise en avant depuis longtemps pour expliquer une partie du recyclage des composés bromés actifs participant à la destruction catalytique de l'ozone arctique, nous apportons la première preuve expérimentale de son impact sur la production du nitrate atmosphérique [7].

Ainsi, notre approche basée sur de simples bilans de masse et des réactions principales permettent d'interpréter l'essentiel des observations et d'apporter des informations mécanistiques supplémentaires concernant la chimie atmosphérique de la basse atmosphère polaire.

Conclusion

Cette étude montre qu'à des variations locales de teneur en ozone en zone polaire correspond une empreinte isotopique significative sur le nitrate atmosphérique, malgré

une grande variété de situations météorologiques et de sources possibles d'oxydes d'azote (transport à longue distance, émission locale par le manteau neigeux, décomposition thermique d'« espèces réservoirs »...). Le cycle de Leighton permet donc une mise en équilibre rapide de la composition isotopique des oxydes d'azote avec les teneurs atmosphériques d'ozone, de BrO et de radicaux peroxy-alkyls. Ces études isotopiques permettent d'explorer les mécanismes de formation du nitrate atmosphérique, en lien avec la chimie de l'ozone. Cette étude montre par exemple le rôle majeur que joue l'hydrolyse du bromonitrate dans la formation de nitrate atmosphérique dans l'Arctique, et constitue un test concluant de l'applicabilité des anomalies isotopiques aux études mécanistiques dans l'atmosphère.

En outre, ce lien offre peut-être la possibilité d'accéder aux concentrations passées en ozone à partir de la composition isotopique du nitrate contenu dans les carottes de glace. Si le nitrate, comme nous le montrons, enregistre un signal isotopique que l'on peut relier à la teneur passée en ozone et, partant, à la capacité oxydante des atmosphères passées, alors il existe un espoir que des reconstructions de la capacité oxydante de l'atmosphère (COA) puissent être établies sur la base de mesures de $\Delta^{17}\text{O}(\text{NO}_3^-)$. Cela permettrait d'affiner les mécanismes décrivant les interactions entre la chimie de l'atmosphère (largement contrôlée par la COA) et le climat, dont une représentation fiable manque cruellement pour la compréhension des climats passés et pour affiner les prévisions sur le climat de la Terre. La chimie réactive atmosphérique a trop longtemps été absente des grands modèles numériques consacrés à l'étude du climat. Son importance étant désormais reconnue, il revient à la communauté des chimistes de l'atmosphère d'inventer des moyens de tester les prédictions de ces modèles, à la fois à l'époque contemporaine et dans les archives glaciaires, afin de les valider et de les améliorer. Dans ce contexte, nos études ne constituent qu'un premier pas : il reste à étudier, par exemple, l'impact des phénomènes de transformation du nitrate dans le manteau neigeux sur $\Delta^{17}\text{O}(\text{NO}_3^-)$, et la fonction de transfert air/neige pour la composition isotopique du nitrate.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement Sunling Gong et Jan Bottenheim, du Service Météorologique du Canada (Toronto, ON), pour leur implication dans la collecte des échantillons à Alert, ainsi que Jean-Luc Jaffrezo pour la mise à disposition de la chromatographie ionique analytique, et Slimane Bekki, du Service d'Aéronomie (IPSL, Paris), pour l'apport de son expérience de la modélisation. Ils remercient également l'Institut Paul Émile Victor (IPEV) pour son soutien à la recherche polaire, la Fondation Balzan pour son aide à l'achat du spectromètre de masse. Cet article, aux frontières de *L'Actualité Chimique*, a pu voir le jour grâce au concours de la Société Française des Isotopes Stables*.

Note et références

- * Ndlr : les Journées « Jeunes chercheurs » organisées par la Société Française des Isotopes Stables ont eu lieu les 19 et 20 octobre 2005. Le premier prix a été décerné à Samuel Morin. Des articles sur les isotopes stables et leurs applications rédigés par les autres lauréats de ces journées seront publiés prochainement dans nos colonnes.
- [1] Thiemens M.H., Heidenreich J., The mass-independent fractionation of oxygen: a novel isotope effect and its possible cosmochemical implications, *Science*, **1983**, 219, p. 1073.

- [2] Savarino J., Thiemens M.H., L'ozone, une molécule hors la loi : comment une anomalie chimique devient un outil d'investigation, *La Recherche*, **2001**, 348, p. 40.
- [3] Barrie L., Bottenheim J.W., Rasmussen R., Schnell R., Crutzen P.J., Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic troposphere, *Nature*, **1988**, 334, p. 138.
- [4] Dominé F., Shepson P., Air-snow interactions and atmospheric chemistry, *Science*, **2002**, 297, p. 1506.
- [5] Michalski G., Scott Z., Kabling M., Thiemens M., First measurements and modeling of $\Delta^{17}\text{O}$ in atmospheric nitrate, *Geophys. Res. Lett.*, **2003**, 30(16), 10.1029/2003GL017015.
- [6] Johnston J., Thiemens M., The isotopic composition of tropospheric ozone in three environments, *J. Geophys. Res.*, **1997**, 102(D21), p. 25395.
- [7] Morin S., Savarino J., Bekki S., Gong S., Bottenheim J.W., Pronounced signature of arctic surface ozone depletion events after polar sunrise on $\Delta^{17}\text{O}$ in atmospheric nitrate, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **2006**, 6, p. 6255.



S. Morin

Samuel Morin¹ est doctorant et **Joël Savarino²** est chargé de recherche CNRS au Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE-CNRS) de Grenoble*.



J. Savarino

* LGGE-CNRS, Université Joseph Fourier, 54 rue Molière, 38400 Saint Martin d'Hères.

¹ Tél. : 04 76 82 42 30. Fax : 04 76 82 42 01.

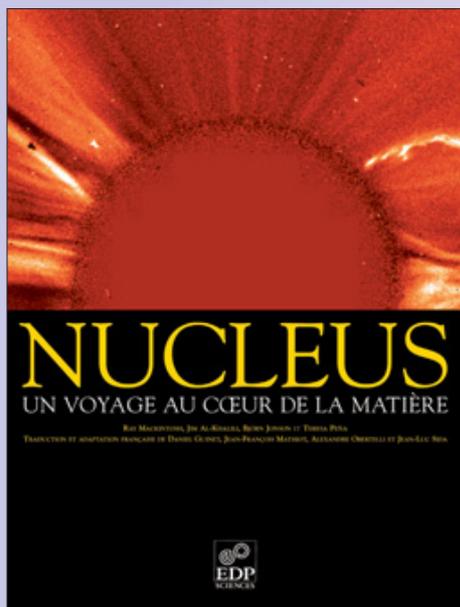
Courriel : samuel.morin@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

² Tél. : 04 76 82 42 51. Fax : 04 76 82 42 01.

Courriel : joel.savarino@lgge.obs.ujf-grenoble.fr



ATTENTION, DESCENTE VERTIGINEUSE... !



NUCLEUS

UN VOYAGE AU CŒUR DE LA MATIÈRE

NOUVEAUTÉ

R. Mackintosh, J. Al-Khalili, B. Jonson et T. Peña

Traduction et adaptation française de D. Guinet, J.-F. Mathiot, A. Obertelli et J.-L. Sida
Préface d'Édouard Brezin

Jamais la matière, si banale et si mystérieuse, n'avait été approchée d'aussi près, jamais elle ne nous était apparue aussi belle et fascinante.

Nucleus nous amène dans ce voyage pour explorer le cœur de l'atome, là où se cache le noyau entouré de son nuage d'électrons : décrivant avec simplicité ses propriétés surprenantes et la manière dont les scientifiques ont construit le modèle standard pour en rendre compte, ce livre aborde la physique nucléaire comme jamais nous ne l'avons apprise...

Car cette science est aujourd'hui au centre des recherches les plus déterminantes de notre époque : énergie, médecine, astrophysique, pour n'en citer que les aspects les plus visibles ; elle porte également l'image d'un formidable essor humain et technologique qui, du laboratoire des Curie aux accélérateurs de particules actuellement en construction, symbolise la quête de l'humanité pour mieux comprendre ses origines, et préparer son avenir. Cet ouvrage richement illustré s'adresse à un large public.

Ses auteurs, Ray Mackintosh, Jim Al-Khalili, Björn Jonson et Teresa Peña sont des experts de la physique nucléaire et des vulgarisateurs chevronnés. La version française de **Nucleus** a été adaptée, mise à jour et enrichie d'illustrations supplémentaires. Quatre chercheurs de la division de physique nucléaire de la Société française de physique (SFP) ont assuré la traduction : Daniel Guinet, spécialiste de la physique des ions lourds, et professeur de physique subatomique à l'université Claude Bernard de Lyon ; Jean-François Mathiot, théoricien spécialiste des interactions élémentaires entre nucléons, et directeur de recherches au CNRS de Clermont-Ferrand ; Alexandre Obertelli physicien au CEA à Saclay ; et Jean-Luc Sida directeur du service de physique nucléaire du CEA à Bruyères-Châtel.

Ce livre s'est vendu à 20 000 exemplaires en Angleterre, et a été traduit en 15 langues. Désormais, l'édition française vous attend...

• Nov. 2006 • ISBN 2-86883-933-9 • 144 pages • 24 €

www.edpsciences.org