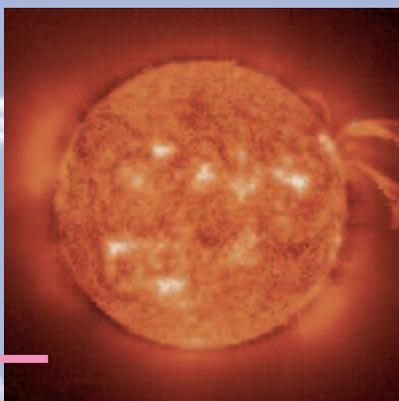


Découvertes glaciales

Un long chemin: De la calotte
du Groenland aux analyses de Zurich **6**



Soleil et climat:
Ça discute sur la banquise **8**



Rayonnement cosmique
et nébulosité **16**



La glace en flammes –
Les émissions de méthane dans l'atmosphère **26**



Découvertes glaciales

2 Retour vers le futur dans les glaces
polaires

Article thématique

3 La glace et le climat

Recherches actuelles

6 Un long chemin: De la calotte du
Groenland aux analyses de Zurich

8 Soleil et climat: Ça discute sur la
banquise

11 Pourquoi un soudain retour du froid à la
fin de la dernière période glaciaire?

14 La boussole dans les glaces polaires

16 Rayonnement cosmique et nébulosité

19 La couverture de glace des lacs et
rivières

23 Le phénomène climatique de
l'Oscillation Nord-Atlantique

26 La glace en flammes – Les émissions
de méthane dans l'atmosphère

Divers

29 Publications

36 Divers

Editeur Distribution et ©:
EAWAG, Case postale 611, CH-8600 Dübendorf
Tél. +41 (0)44 823 55 11
Fax +41 (0)44 823 53 75
<http://www.eawag.ch>

Rédaction Martina Bauchrowitz, EAWAG

Traductions Laurence Frauenlob-Puech, D-Waldkirch

Conseiller linguistique Fabrice Combes, F-Marseille

Copyright Reproduction possible après accord avec
la rédaction.

Figures Peter Nadler, Küsnacht; Lydia Zweifel, EAWAG

Parution 2–3x par an en français, allemand et anglais.
Production chinoise en coopération avec INFOTERRA
China National Focal Point.

Crédit photographique M. Märki et J. Beer, EAWAG;
NASA; Research Center Ocean Margins, Bremen

Maquette Inform, 8005 Zurich

Graphisme Peter Nadler, 8700 Küsnacht

Impression sur papier recyclé

Abonnements et changements d'adresse Les nou-
veaux abonné(e)s sont les bienvenu(e)s!
Veulliez contacter: martina.bauchrowitz@eawag.ch

Retour vers le futur dans les glaces polaires



Martina Bauchrowitz,
Rédactrice

Imaginez que vous ayez rendez-vous avec des amis pour aller au cinéma. Par un concours de circonstances, vous ne parvenez à la salle de cinéma qu'une heure après le début du film. Et comble de malchance, peu après que vous vous soyez confortablement installé dans votre fauteuil et enfin immergé dans l'histoire, la pellicule se déchire et la projection doit être interrompue. Vous êtes évidemment très déçu car vous aimeriez beaucoup connaître la fin. Que pouvez-vous faire? Il ne vous reste qu'à essayer de deviner la suite de l'histoire. Vous disposez pour cela des brèves séquences que vous avez vues vous-même et du souvenir qu'ont vos amis du début du film. Le récit de vos amis n'est certes pas aussi détaillé que vos propres impressions, loin s'en faut, mais il a l'avantage de concerner une période beaucoup plus longue. Dans tous les cas, votre pronostic sur la fin du film restera toujours du domaine de la supposition.

C'est un peu la situation dans laquelle se trouvent les chercheurs qui développent des modèles numériques pour la prévision du climat à venir. Plus ils disposent d'informations au moment de l'élaboration du modèle, plus les prédictions obtenues seront fiables. Les climatologues s'appuient sur des séries de données portant sur divers paramètres d'ordre climatique qui ont pu être relevés avec précision dans un passé récent soit par des observations soit par des mesures instrumentales. Il peut s'agir par exemple de la température de l'air, de la date de dégel des lacs au printemps, de l'activité solaire ou de l'extension des glaces sur la Terre. Deux articles de ce numéro des EAWAG news portent sur l'analyse de relevés historiques de la durée de la couverture de glace des lacs comme ceux compilés depuis 1832 pour le lac de St-Moritz. Replacés

dans le contexte de notre film, ces relevés climatiques historiques correspondent à la séquence que vous avez vue vous-même. Mais les climatologues ont également besoin de témoins visuels du début de l'histoire du climat. Ils se tournent alors vers les archives naturelles. Les calottes de glace polaires renferment ainsi des informations très précieuses sur des conditions climatiques vieilles de plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'années. Dans le cadre du projet international «Greenland Ice core Project» auquel a également participé l'EAWAG, une carotte de glace de 3 km, renfermant les précipitations des 100 000 dernières années, a été forée dans la calotte arctique. Pendant 12 ans, elle a fait l'objet d'analyses précises, l'EAWAG ayant pour sa part traité plusieurs milliers d'échantillons. Le présent numéro des EAWAG news livre une partie des résultats.

Un autre facteur potentiellement intéressant pour les climatologues a trait au comportement de l'hydrate de méthane. Ce mélange gelé de méthane et d'eau se forme à basse température et à forte pression, notamment dans les sédiments des fonds marins. On estime à quelque 10 000 milliards de tonnes la quantité de méthane stockée sous cette forme dans le fond des mers du monde. La vue de ces quantités énormes suscite une inquiétude grandissante de voir tout ce méthane «congelé» se libérer dans l'atmosphère et accentuer l'effet de serre et le réchauffement climatique. Une équipe de l'EAWAG s'intéresse tout particulièrement au comportement du méthane dans les fonds marins.

Sous diverses formes, la glace livre donc une grande quantité d'informations des plus précieuses sur les conditions environnementales du passé et du présent. C'est uniquement si nous parvenons à reconstituer le début du «film climatique» que nous aurons une chance d'émettre des prédictions à peu près fiables sur l'avenir.

Martina Bauchrowitz

La glace et le climat

Près de 80% des réserves mondiales en eau douce sont immobilisées sous forme de glace dans les deux régions arctique et antarctique. Ces glaces constituent une archive naturelle d'une valeur exceptionnelle étant donné qu'elles renferment une foule d'informations sur le climat emmagasinées au cours de centaines de milliers d'années. Mais les données historiques concernant les glaces de lacs sont elles aussi sources d'informations précieuses sur le climat, comme en témoignent les études menées sur le lac Baïkal et le lac de St-Moritz. Il existe d'autre part une substance assez mystérieuse qui ressemble à la glace, l'hydrate de méthane. Accumulée dans les sédiments marins, elle peut être libérée vers la surface sous l'effet de changements environnementaux mineurs, notamment de la température de l'eau. Dans ce cas, de grandes quantités de méthane, gaz à effet de serre des plus puissants, seraient libérées dans l'atmosphère, produisant une accélération dramatique du réchauffement planétaire.

On associe volontiers l'idée de l'eau à celle de torrents de montagne ou de lacs majestueux dans lesquels se reflètent des sommets enneigés. Mais l'eau se présente également dans d'autres états physiques, c'est-à-dire sous forme de gaz quand elle s'évapore en passant par exemple de la mer vers les terres, ou bien sous forme de neige et de glace quand la température est inférieure à zéro. Si on considère la répartition des différents états physiques de l'eau douce sur la terre, on est surpris de constater que son état de loin le plus fréquent n'est pas l'état liquide des lacs et rivières mais bien plutôt l'état solide de la glace (Fig. 1).

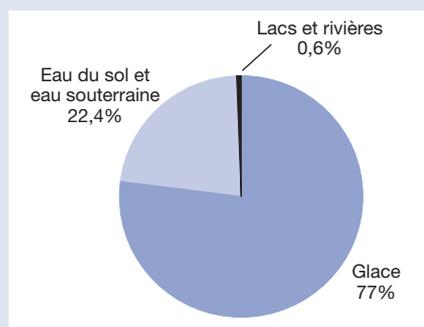


Fig. 1: Répartition des ressources en eau douce de la Terre. La part de la vapeur d'eau atmosphérique n'est pas représentée. Elle ne représente que 0,04% du total.

Cette eau «gelée» est principalement stockée au niveau des deux pôles: 99,4% de la glace terrestre se trouvent en antarctique et au Groenland. La calotte glaciaire antarctique présente ainsi par endroit une épaisseur avoisinant les 5 km, tandis que celle du Groenland atteint tout de même l'épaisseur respectable de 3 km. La part, malheureusement en constante diminution, des glaciers continentaux des latitudes moins élevées ne représente à l'inverse que 0,6% des réserves de glace.

Or la glace est en réalité bien plus que de l'eau gelée. Elle renferme une grande quantité d'informations des plus précieuses sur les changements passés et présents de l'environnement planétaire. Beaucoup d'éléments autrefois engloutis par la glace n'attendent que d'être mis à jour et étudiés [1].

La glace est une archive naturelle

Il n'existe presque rien qui ne puisse être stocké pour très longtemps dans les archives de glace. Mais comment les glaces deviennent-elles des archives naturelles? Les glaces continentales se forment à partir de neige. Quand elle vient de tomber, la neige est tout d'abord de consistance poudreuse et contient près de 90% d'air (Fig. 2). Mais au bout de quelques jours à peine, les

cristaux de glace se densifient, s'agglomèrent et forment du névé. Sous la pression de nouveaux apports de neige, ce névé se densifie et durcit jusqu'à ce qu'à une certaine profondeur les grains qui le composent soient assez comprimés pour former de la glace (Fig. 3).

La neige et la glace ne sont cependant pas uniquement constituées d'eau. En effet, lors de la formation des nuages, la vapeur d'eau se condense autour de noyaux de condensation qui sont généralement des particules aérosols de composition chimique des plus variables. Ensuite, lors de leur lente chute vers la surface de la Terre, les flocons de neige peuvent entraîner diverses substances se trouvant sur leur passage. Enfin, les éléments les plus divers peuvent s'accumuler sur une couche de neige fraîche: des grains de pollen, des poussières d'origine volcanique ou désertique ou encore des éléments plus spectaculaires comme l'homme préhistorique Ötzi ou des dépouilles de mammouths.

Le fait que tous ces éléments arrachés à l'environnement soient congelés et donc parfaitement conservés explique déjà à lui seul toute la valeur de la glace en tant qu'archive naturelle [2].

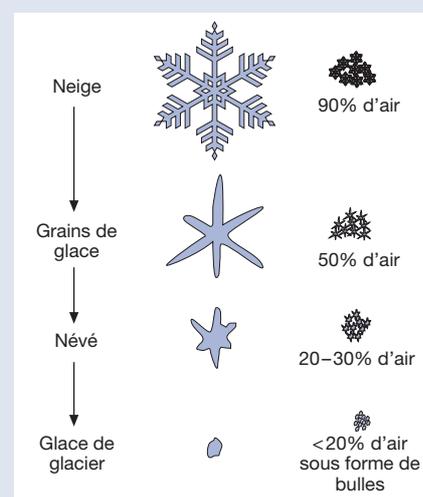


Fig. 2: Formation de la glace de glacier à partir de la neige.

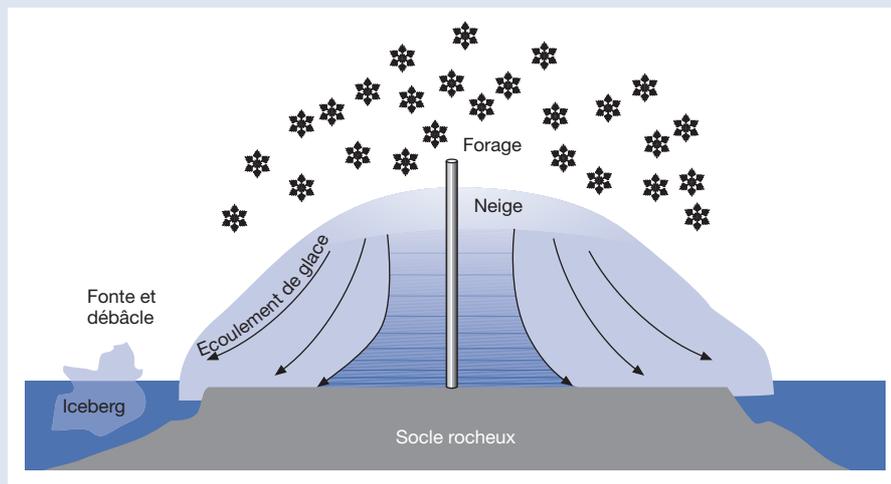


Fig. 3: Structure de l'inlandsis polaire (en coupe). Dans la partie supérieure de la calotte, de la neige se transforme continuellement en glace qui s'écoule lentement vers la mer où elle fond ou se détache en blocs en formant des icebergs (c'est ce que l'on appelle la débâcle). L'écoulement de la glace s'accompagne d'un amincissement des couches annuelles avec la profondeur.

La carotte de glace GRIP

Le carottage des inlandsis polaires représente un défi à la fois technique et logistique. L'installation d'un campement de forage et la réalisation de carottages pendant plusieurs étés à 3000 ou 4000 m d'altitude et à plus de 1000 kilomètres de toute trace de civilisation constituent une entreprise pratiquement irréalisable sans coopération internationale. Les premiers forages ayant permis de traverser toute la calotte glaciaire pour atteindre la roche sous-jacente datent de près de 40 ans. Une douzaine de projets similaires ont été réalisés depuis. L'une des dernières grandes campagnes de forage a été menée au Groenland Central dans le cadre du projet GRIP (Greenland Ice core Project). De 1990 à 1992, des scientifiques venus de Belgique, du Danemark, d'Allemagne, d'Angleterre, de France, d'Islande, d'Italie et de Suisse ont creusé une carotte de glace de 3029 m de long et de 10 cm de diamètre renfermant les précipitations des 100 000 dernières années.

Au cours de longues négociations, les équipes de chercheurs ont tenté de se partager la carotte de glace de façon aussi équitable que possible. Près de 50 paramètres différents devaient en effet être étudiés, allant de la structure de la glace aux poussières et cendres volcaniques en passant par divers isotopes et autres substances chimiques. Cette véritable « quadrature du cercle » était encore aggravée par le fait qu'une certaine partie de la carotte devait être conservée pour d'éventuelles études et vérifications à venir.

Le forage a été effectué à l'aide d'un caroteur mécanique à moteur électrique spécialement conçu à cet effet. L'appareil, pouvant être introduit dans le trou de forage à l'aide

d'un câble en acier, était en mesure de prélever à chaque opération une carotte de 2,5 m de long au maximum. Pour éviter que le trou de forage ne se referme progressivement sous la pression énorme de la glace, il a été comblé à l'aide d'un liquide ne gelant pas encore à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (température annuelle moyenne au lieu du forage) et présentant la même densité que la glace. Le caroteur a ensuite été ramené à la surface pour en extraire la glace carottée.

Après avoir été mesurés et numérotés, les morceaux de glace ont été les uns après les autres soumis à une première étude suite à laquelle de premiers sous-échantillons ont été constitués. Les morceaux de carotte ont ensuite été subdivisés en portions de 55 cm de long qui, conditionnées dans des sacs en plastique, ont été transportées par avion à Copenhague dans des caisses en polystyrène bien isolantes. C'est là qu'ils ont alors été découpés selon le plan négocié pour être envoyés aux équipes de recherche correspondantes.

Les radionucléides cosmogéniques dans la glace

L'information à laquelle s'intéresse tout particulièrement l'EAWAG dans la carotte GRIP est fournie par un radionucléide cosmogénique, le béryllium 10 (^{10}Be). Il s'agit d'un isotope radioactif de l'élément béryllium qui se forme en permanence dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique et qui se dépose donc en continu à la surface de la Terre par le biais des précipitations (voir encadré). La quantité de ce cosmonucléide qui se forme dans l'atmosphère est cependant extrêmement faible: seuls 1 million d'atomes de ^{10}Be se déposent chaque année sur chaque cm^2 de surface terrestre. Il

n'est donc pas surprenant qu'il faille recourir à une méthode extrêmement sensible, la spectrométrie de masse par accélérateur, pour détecter et compter chacun de ces atomes dans la glace (voir l'article de S. Bollhalder, p. 6).

Reconstitution du paléoclimat

Mais pourquoi se donner tant de peine pour compter ces quelques atomes de ^{10}Be ? C'est principalement parce que ce cosmonucléide livre des informations sur l'activité solaire et la force du champ magnétique terrestre du passé. En effet, le taux de formation du ^{10}Be dans l'atmosphère n'est pas constant mais dépend notamment de l'activité du soleil [3]: Le rayonnement cosmique responsable de cette formation provient de notre galaxie, elle-même constituée d'environ 100 milliards d'étoiles similaires à notre soleil. Quand il se rapproche du système solaire, il entre tout d'abord en collision avec l'héliosphère, un espace sphérique d'un rayon de 15 milliards de kilomètres qui entoure le soleil. L'héliosphère est formée par ce que l'on appelle le vent solaire, un flux très rapide de gaz ionisé émanant du soleil et porteur de champs magnétiques solaires. De ce fait, le vent solaire joue un rôle de bouclier contre le rayonnement cosmique (Fig. 4) et atténue donc la formation de cosmonucléides dans l'atmosphère. Autrement dit: plus le soleil est actif, plus la production de ^{10}Be est faible. Nous disposons ainsi d'une méthode certes délicate et laborieuse mais en tout point remarquable d'étude de l'histoire du soleil et des fluctuations de son activité (voir les articles de M. Vonmoos, p. 8 et de R. Muscheler, p. 11). A partir des données sur le béryllium 10, il a d'autre part été possible de tester une hypothèse émise à la fin des années 1990 par des chercheurs danois, hypothèse selon laquelle le rayonnement cosmique influencerait sur le climat terrestre (voir l'article de J. Beer, p. 16).

Le taux de formation du ^{10}Be dans l'atmosphère est d'autre part influencé par le champ magnétique terrestre. Les lignes de champ qui entourent la terre d'un pôle à l'autre ne laissent pénétrer les particules chargées du rayonnement cosmique que si celles-ci disposent de suffisamment d'énergie (plus exactement sous la forme d'impulsions par unité de charge) pour les traverser. Ainsi, plus le champ géomagnétique est fort, plus il protège du rayonnement cosmique et plus la production de ^{10}Be dans l'atmosphère est faible. L'étude de roches et de sédiments volcaniques montre que le champ magnétique terrestre a fortement varié au cours des millénaires. Conformément à nos attentes, ces fluctuations ont

elles aussi été enregistrées dans les glaces polaires et cette évolution peut être reconstituée (voir l'article de J. Beer, p. 14).

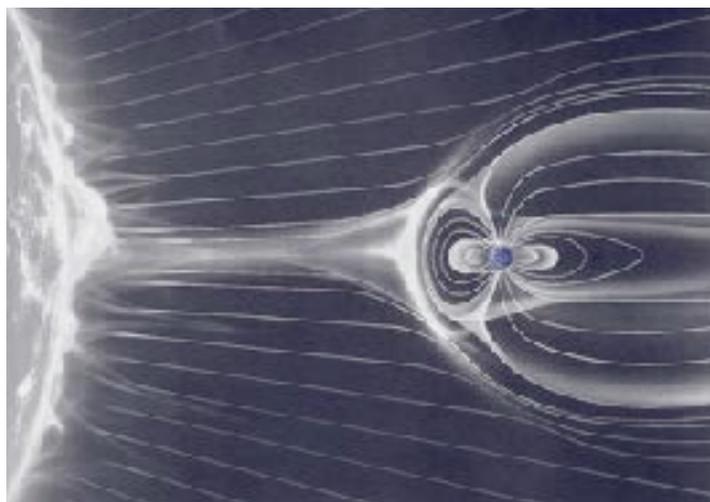
La couverture de glace des lacs: un autre paramètre climatique

La glace ne constitue pas uniquement une archive de valeur pour l'étude de l'activité solaire et du magnétisme terrestre. L'étude historique de la couverture de glace des lacs fournit elle aussi de précieuses informations sur l'évolution plus récente du climat (voir l'article de D. Livingstone, p. 19). On dispose ainsi par exemple de relevés quasi-continus de la durée des glaces du lac Suwa, au Japon, depuis 1443. Il s'agit là d'une série de données unique en son genre qui a trouvé une large utilisation dans l'étude historique du climat du Nord-Pacifique. Pour la Suisse, la série de données la plus longue est celle du Lac de St-Moritz qui remonte à 1832. Dans un autre projet, l'EAWAG a tenté de savoir s'il existait une relation entre la couverture de glace des lacs et l'Oscillation Nord-Atlantique (voir l'article de D. Livingstone, p. 23). L'Oscillation Nord-Atlantique est un phénomène climatique qui se produit particulièrement en hiver entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Elle est à l'origine de forts vents d'ouest qui, chargés d'air marin chaud et humide, balayent l'Europe d'ouest en est. Cette oscillation est donc porteuse d'hivers doux et humides en Europe et dans une grande partie de l'Asie centrale et donc d'un dégel plus précoce des lacs de ces régions du monde [4].

La glace des hydrates de méthane

Quittons maintenant la glace en tant que telle et en tant qu'indicateur paléoclimatique pour nous pencher sur les hydrates de méthane. Il s'agit là d'un mélange gelé d'eau (donc de glace) et de méthane. Ces composés se forment à basse température

Fig. 4: Le champ magnétique du vent solaire percute le champ magnétique terrestre. Ces deux champs magnétiques forment alors un bouclier naturel qui affaiblit le rayonnement cosmique qui pénètre dans l'atmosphère en provenance de l'espace.



et à forte pression, par exemple dans les sédiments marins profonds, et ne sont stables que dans ces conditions. Dans le projet communautaire CRIMEA, un groupe international de recherche auquel participe l'EAWAG tente d'évaluer le danger potentiel que représentent les hydrates de méthane pour l'environnement (voir l'article de C. Schubert, p. 26). En effet, des changements minimes des conditions environnementales, par exemple un léger réchauffement de l'eau de mer ou des variations de pression dues à des fluctuations du niveau de la mer, peuvent provoquer une libération et donc une désintégration de ces hydrates de gaz. Des quantités très importantes de méthane se libéreraient alors dans l'atmosphère. Etant donné que le méthane est un gaz à effet de serre encore plus puissant que le dioxyde de carbone, la déstabilisation des hydrates de méthane pourrait avoir des conséquences dramatiques sur le climat [5].

Un regard en arrière pour entrevoir l'avenir

Les hommes ont toujours rêvé de prévoir l'avenir. Tandis que les prophètes du passé n'avaient qu'un succès très relatif en lisant

les cartes divinatoires ou le marc de café, les scientifiques d'aujourd'hui misent sur des modèles numériques extrêmement complexes pour prédire le climat à venir. Les résultats livrés par ces modèles informatiques ne peuvent cependant être fiables que si ces derniers donnent une représentation conforme à la réalité des principaux processus impliqués et de leurs interactions ou interrelations. Or, avant de pouvoir intégrer des informations correctes dans la programmation, il faut étudier ces processus sur de longues périodes. Nous ne pourrions donc espérer prédire l'avenir que lorsque nous aurons bien compris les changements climatiques du passé. Seul celui qui sait regarder en arrière peut donc être un bon prophète.



Jürg Beer, physicien, dirige l'équipe «Traceurs radioactifs» du département «Eaux superficielles» de l'EAWAG. Professeur titulaire de l'EPF de Zurich, ses recherches se concentrent sur les radionucléides cosmogéniques et l'influence de l'activité solaire sur le climat.

Formation des radionucléides cosmogéniques

Les radionucléides cosmogéniques apparaissent suite à un processus que les alchimistes ont tenté en vain de reproduire au Moyen-Âge, la transmutation de la matière, comme par exemple de l'azote en béryllium ou de l'argon en chlore. Ce que les alchimistes n'ont pas réussi à produire est pour la nature un jeu d'enfant. Le rayonnement cosmique constitué de particules hautement énergétiques (des protons et des noyaux d'hélium) pénètre dans l'atmosphère terrestre, entre en collision avec les atomes d'oxygène, d'azote et d'argon de l'air et les désintègre. Ces collisions donnent naissance à toute une série de particules nouvelles, entre autres de neutrons, qui viennent à leur tour heurter d'autres atomes qu'elles peuvent briser. Alors que les nouveaux fragments formés sont en général instables et se retransforment rapidement en isotopes stables indiscernables de ceux présents à l'origine, le béryllium 10 et le chlore 36 persistent très longtemps grâce à des périodes de demi-vie très longues, respectivement de 1,5 millions d'années et de 301 000 ans. Après avoir séjourné en moyenne un an dans l'atmosphère, ces cosmoneutrons se déposent à la surface de la Terre, en général avec les précipitations. Si un atome de ^{10}Be a élu un flocon de neige pour descendre sur la Terre, il est bien possible qu'il se retrouve dans un glacier ou une calotte de glace polaire.

- [1] Bradley R.S. (1985): Climate and climate variability. In: Quaternary Paleoclimatology – Methods of Paleoclimatic Reconstruction (ed. R.S. Bradley). Allen and Unwin, Boston, p. 11–46.
- [2] Beer J. (1995): Mémoire climatique des glaces polaires. EAWAG news 38f, 3–5.
- [3] Beer J., Mende W., Stellmacher R. (2000): The role of the Sun in climate forcing. Quaternary Science Reviews 19, 403–415.
- [4] Straile D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G. (2003): The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the Nord Atlantic Oscillation. In: The North Atlantic Oscillation – Climatic Significance and Environmental Impact (ed. J.W. Hurrell). American Geophysical Union, Washington, p. 263–279.
- [5] Kvenvolden K.A. (1988): Methane hydrates and global climate. Global Biogeochemical Cycles 2, 221–229.

Un long chemin: De la calotte du Groenland aux analyses de Zurich

leur dosage au spectromètre de masse par accélérateur à l'EPF de Zurich.

De l'arctique au laboratoire de l'EAWAG

Les carottes de glace prélevées au Groenland sont découpées en portions de 55 cm de long, dont une part correspondant au maximum à un quart de la section transversale est conservée dans un sac en plastique scellé. Ces parts de cylindres sont alors transportées dans des caisses en polystyrène vers Dübendorf où elles sont stockées dans une chambre froide à -20°C en attendant d'être traitées (Photo 1). Quelques portions de glace sont ensuite découpées à la scie à ruban en sous-échantillons de petite taille (Photo 2) qui permettront une analyse chronologique de meilleure résolution. Avant le traitement à proprement parler, chaque sous-échantillon est tout d'abord rincé à l'eau distillée pour éliminer tout reste éventuel de boue de forage ou toute autre contamination extérieure. Ces échantillons de glace sont ensuite placés dans des bécards et pesés avant de subir l'ajout d'une quantité bien déterminée de carrier ^9Be (Photo 3). La glace est alors mise à fondre dans un four à micro-ondes traditionnel (Photo 4) puis versée au goutte-à-goutte sur un échangeur de cations qui retient les ions de béryllium (Photo 5). L'échangeur de cations renfermant les ions de béryllium peut alors être conservé pendant plusieurs mois en attendant la poursuite du traitement.

Dans l'étape suivante, les ions de béryllium sont élués de l'échangeur de cations avec une solution d'acide puis mis en présence d'ammoniaque pour former un précipité d'hydroxyde de béryllium $[\text{Be}(\text{OH})_2]$ qui sera ensuite séparé du reste puis remis en solution par ajout d'acide. Pour que le béryllium livre des ions négatifs dans la source ionisante du spectromètre de masse par accélérateur, il doit être associé à un métal conducteur. Nous utilisons à cet effet de l'argent fourni par une solution de nitrate d'argent. Le béryllium et l'argent réagissent en formant un précipité d'hydroxyde. Pour l'analyse au spectromètre, le $\text{Be}(\text{OH})_2$ doit encore être oxydé. Pour ce faire, les échantillons sont brièvement pré-séchés sous une lampe à UV puis placés à 850°C dans un four à moufle (Photo 6) dans lequel le $\text{Be}(\text{OH})_2$ s'oxyde en l'espace de deux heures en BeO . Dans une dernière étape, les échantillons sont pressés dans des cibles de cuivre à travers un orifice de 1 mm de diamètre (Photo 7). Au bout de 24 heures, les échantillons sont enfin prêts (Photo 8) à être analysés au spectromètre de masse par accélérateur (Photos 9 et 10).

Les indices laissés dans les archives naturelles permettent de retrouver la trace de changements survenus par le passé au niveau de l'environnement planétaire. C'est pour suivre leur piste que nous nous sommes lancés dans l'étude détaillée d'une carotte de 3 km de long prélevée dans les glaces du Groenland. Couche après couche, la glace est soumise à des analyses comprenant notamment un dosage de béryllium 10 (^{10}Be), un radionucléide de grande importance pour les paléoclimatologues. L'étude des teneurs en ^{10}Be permet en effet de reconstituer l'évolution climatique d'époques très reculées de l'histoire de la Terre. Près de 10 000 échantillons de glace ont transité par le laboratoire de l'EAWAG au cours des dernières années pour y être préparés en vue de leur analyse par spectrométrie de masse par accélérateur à l'EPFZ/PSI.

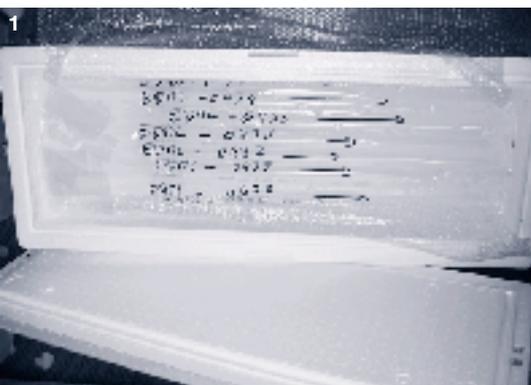
Près d'un million d'atomes de béryllium 10 (^{10}Be) se déposent chaque année avec les précipitations sur chaque cm^2 de la surface terrestre. Ces atomes de béryllium sont stockés couche après couche dans les glaces polaires. Si on considère une quantité moyenne globale de précipitations de 1 m par an, on peut estimer que 1 kg de glace renferme environ 10 millions d'atomes de ^{10}Be . A première vue, ce chiffre semble énorme, mais 10 millions d'atomes de béryllium 10 ne pèsent en définitive qu'environ 10^{-15} g. Cette quantité équivaut à une seule

goutte d'eau pour l'ensemble du lac de Constance. Le dosage de quantités aussi infimes pose un véritable défi à la chimie analytique. Accompagnant le développement de la spectrométrie de masse par accélérateur, une méthode élégante de préparation des échantillons a été établie à l'EAWAG (voir encadré). Le présent article a pour ambition de donner un aperçu des manipulations de routine effectuées dans ce cadre au laboratoire et de décrire comment les atomes de béryllium 10 sont extraits de la carotte de glace et préparés en vue de

Extraction et dosage du ^{10}Be

La méthode classique de dosage des radionucléides est basée sur leur décomposition radioactive. Cette démarche n'est cependant pertinente que si les radionucléides étudiés ont un temps de demi-vie suffisamment court. Il faut en effet qu'un nombre suffisant d'atomes se soit décomposé pendant une période de mesure raisonnable de quelques jours à quelques semaines pour que le dosage s'effectue avec une marge d'erreur acceptable. Et c'est bien là le problème du béryllium 10. Sa demi-vie est de 1,5 millions d'années, ce qui est bien trop long. Cela signifie en effet que sur les 10 millions d'atomes de ^{10}Be que compte un kg de glace, seuls 5 atomes se désintègrent en une année. Le dosage du béryllium 10 par la technique de comptage des décroissances radioactives est par conséquent voué à l'échec.

La spectrométrie de masse constitue une bonne alternative au comptage classique. Cette technique se sert du fait que la plupart des éléments sont présentes sous la forme de plusieurs isotopes de masses différentes. C'est également le cas du béryllium qui compte un isotope radioactif de masse atomique 10, le ^{10}Be , et un isotope non radioactif de masse atomique 9, le ^9Be . La spectrométrie de masse permet de déterminer le rapport entre deux isotopes, dans notre cas, le rapport isotopique $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, ce qui permet de calculer assez facilement le nombre d'atomes de ^{10}Be présents dans un échantillon. Mais comme les échantillons de glace ne renferment que des quantités infimes de béryllium 9, on leur rajoute une quantité connue de cet isotope avant l'analyse (en général 0,2 mg). Le ^9Be ajouté joue un rôle de carrier et assure une extraction totale des quelques atomes de ^{10}Be intrinsèques à la glace en même temps que les atomes de ^9Be .



Photos: EAWAG

De l'EAWAG au dosage sur l'Hönggerberg

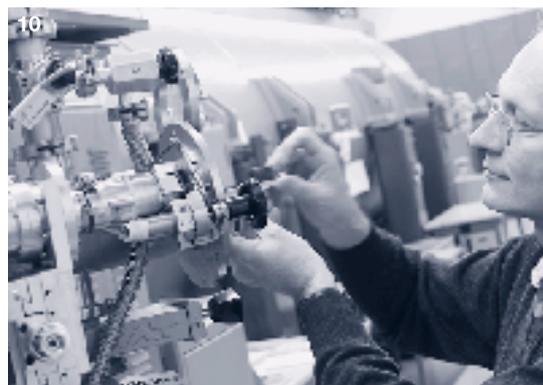
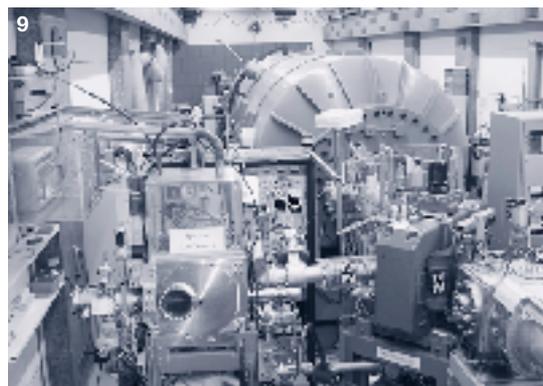
Nos échantillons sont caractérisés par des rapports isotopiques particulièrement faibles, de l'ordre de 10^{-13} , qui ne sont pas mesurables avec les spectromètres de masse classiques car ils se situent dans le domaine du bruit de fond qui constitue leur limite de détection. En conférant aux ions une très haute énergie, en appliquant une différence de potentiel d'accélération de plusieurs millions de volts au lieu de quelques milliers dans les processus classiques, il devient possible au niveau du détecteur non seulement de compter chacun des atomes, mais aussi de les identifier à partir de leur masse et de leur numéro atomique. C'est le seul moyen de permettre au détecteur de distinguer correctement les atomes, rares, de béryllium 10, au sein de la multitude d'autres atomes qui lui parviennent. La mesure en elle-même ne prend qu'une quinzaine de minutes. Ces spectromètres de masse à haute énergie ont besoin pour fonctionner d'une unité centrale d'accélération et sont donc appelés spectromètres de masse par accélérateur. L'un des premiers exemplaires au monde de ce type d'appareils est installé dans les locaux de l'EPF de Zurich sur le Hönggerberg et géré conjointement par cette EPF et par l'Institut Paul Scherrer. La partie centrale du spectromètre, un accélérateur tandem, a été construit dans les années 60 et a longtemps été utilisé à des fins de recherche fondamentale en physique atomique et nucléaire.

Au cours des 15 dernières années, près de 10 000 échantillons ont été préparés à l'EAWAG et analysés par le spectromètre de masse par accélérateur. Ce travail a permis d'étudier près de 5 km de carotte de glace et de déterminer la concentration en béryllium 10 des quelque 100 000 dernières années. Les quatre articles qui suivent (pages 8 à 18) montrent comment ces données brutes sur les concentrations en ^{10}Be peuvent être utilisées pour décrypter les évolutions climatiques et environnementales du passé.



Silvia Bollhalder (à gauche) et Irene Brunner (à droite) sont techniciennes au sein de l'équipe «Traceurs radioactifs» du département «Eaux superficielles» de l'EAWAG. Elles y sont notamment responsables des manipulations de routine de préparation des échantillons de glace.

Coauteurs: M. Vonmoos et J. Beer



Soleil et climat: Ça discute sur la banquise

Grâce à la paléoclimatologie, nous savons maintenant que le climat du passé, loin d'être stable, présentait de fortes fluctuations. Pendant plus de 10 000 ans, l'activité du soleil, le volcanisme et les phénomènes internes au système ont constitué les principaux facteurs naturels influant sur le climat. Depuis la révolution industrielle, cependant, un autre facteur de poids est venu se surimposer: l'homme. Les activités anthropiques constituent depuis une vingtaine d'années le facteur prépondérant du réchauffement climatique. Pour pouvoir comprendre le système complexe qui régit le climat et se faire une idée de l'emprise de l'homme sur ce système, il est tout d'abord nécessaire de bien étudier les facteurs climatiques naturels. C'est dans cet esprit que l'EAWAG s'est penché sur les fluctuations de l'activité du soleil dans le passé.

Le soleil représente de loin la source d'énergie la plus importante de la Terre et constitue donc le moteur de notre système climatique. Il stimule la circulation atmosphérique à la fois directement par le biais

de son rayonnement et indirectement en influençant la composition de l'atmosphère (ozone, vapeur d'eau, etc.).

L'apport d'énergie par le soleil a longtemps été considéré comme constant, étant dé-

signé par les climatologues sous le terme de «constante solaire». Il s'élève à environ 1366 W/m^2 et correspond à l'intensité du rayonnement solaire (=irradiance) qui atteint la limite supérieure de l'atmosphère à une distance de 1 unité astronomique du soleil (distance moyenne entre le soleil et la Terre). La mesure directe de l'irradiance solaire par satellite n'est possible que depuis 1978. Et on observe depuis que la constante solaire n'est en réalité pas constante du tout. Bien plus, elle fluctue selon un cycle d'environ 11 ans (Fig. 1A) avec une amplitude moyenne de 0,1% [1]. Ceci montre bien que le moteur de notre système climatique n'est pas régulier, mais qu'il fonctionne tantôt à haut régime, tantôt à bas régime. Les variations de l'irradiance sont liées aux fluctuations de l'activité du soleil. Mais qu'en était-il avant 1978, avant que nous ne disposions de mesures directes? En association avec d'autres équipes de recherche internationales, l'EAWAG s'est mis à la recherche d'indices permettant de retracer l'activité du soleil jusque dans un lointain passé [2, 3].

Les taches solaires trahissent l'activité du soleil

Les astronomes ont commencé à accumuler des indices sur la variabilité de l'activité solaire il y a environ 400 ans. Depuis l'invention de la lunette astronomique en 1610, la surface du soleil est constamment observée et ses modifications consciencieusement notées [4]. On s'est ainsi aperçu que le nombre de taches sombres à la surface du soleil variait fortement, pouvant aller de 0 à plus de 300. Tout comme l'irradiance, le nombre de taches solaires fluctue avec un rythme d'environ 11 ans (Fig. 1B + 2). Les taches solaires sont le reflet de processus magnétiques et sont donc les témoins directs de l'activité du soleil. Plus le soleil est actif, plus il présente de taches à sa surface. Si elles paraissent sombres, c'est que leur température superficielle (env. 4000 kelvins soit $3700 \text{ }^\circ\text{C}$) est plus faible que la normale (env. 5800 kelvins ou $5500 \text{ }^\circ\text{C}$) et qu'elles émettent donc moins d'énergie.

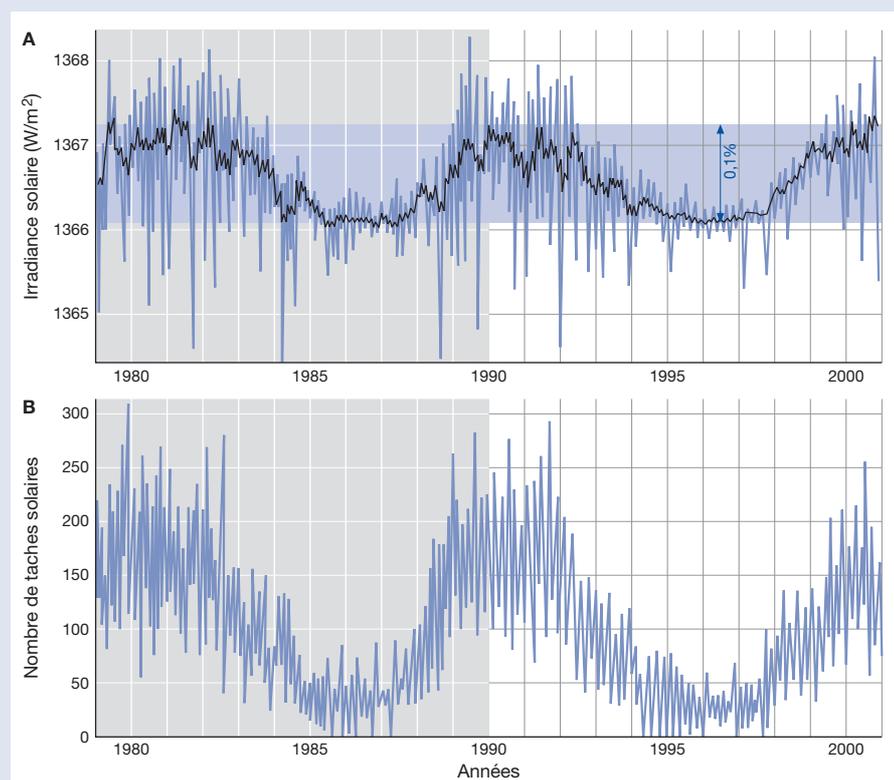


Fig. 1: Mesures d'irradiance solaire effectuées par satellite depuis 1978 (A) [1] et comparées au nombre de taches solaires observées pendant la même période (B) [4].

Mais comme les zones qui entourent les taches solaires sont, elles, beaucoup plus chaudes que la normale, l'énergie globalement émise par le soleil est plus importante quand ces taches sont nombreuses.

Cette relation se trouve confirmée par les mesures d'irradiance solaire effectuées par les satellites: les deux courbes évoluent en parallèle (Fig. 1A + B). Forts de cette constatation, de nombreux scientifiques ont alors tenté de retracer l'évolution de l'irradiance à partir du nombre de taches solaires observées et par là même d'expliquer certaines variations du climat au cours des 400 dernières années.

De fortes fluctuations de l'activité solaire au cours des 400 dernières années

Si on considère les observations des taches solaires consignées depuis bientôt quatre cents ans [4], on constate que l'activité du soleil s'est caractérisée par des fluctuations plus fortes et plus irrégulières que ne l'avaient suggéré les mesures satellitaires (Fig. 2). Ainsi, le minimum de Maunder entre 1645 et 1725 et celui de Dalton entre 1795 et 1830 ont été respectivement marqués par une absence quasi-totale et une présence très limitée de taches, ce qui indique une très faible activité du soleil. Depuis ce dernier minimum, le nombre de taches solaires ne cesse d'augmenter. Lean et ses collaborateurs ont étudié ce phénomène de plus près et tenté de quantifier l'intensité passée de l'éclairement solaire à partir du nombre de taches. D'après leurs calculs, l'irradiance solaire aurait augmenté de 0,24% depuis le minimum de Maunder [2] (Fig. 3). Il s'agit là d'une augmentation beaucoup plus forte que celle qui s'inscrit dans le cadre des

fluctuations mesurées jusqu'à présent. D'un autre côté, on sait à partir de l'étude d'autres systèmes solaires que l'irradiance peut présenter de très fortes variations. Ainsi, le rayonnement d'étoiles aux propriétés voisines de celles du soleil peut aller jusqu'à varier de 1%. Enfin, certains indices d'ordre climatique indiquent sur la Terre que de telles variations de l'irradiance sont loin d'être irréalistes. Ainsi par exemple, le «petit âge glaciaire» qui a touché l'Europe entre 1400 et 1850 et qui s'est traduit par une accumulation de matériaux morainiques en contrebas et à l'intérieur des Alpes sous l'effet de l'avancée des glaciers, coïncide avec une période d'activité réduite du soleil. On sait d'autre part de source historique que la Tamise était gelée tous les hivers pendant cette période. Pendant l'hiver 1683/1684, en plein minimum de Maunder, la couche de glace aurait été particulièrement épaisse. La Tamise n'a plus gelé depuis l'hiver 1813/1814 et depuis cette époque, les glaciers se retirent progressivement et les taches se multiplient à la surface du soleil.

L'archivage de l'activité du soleil des derniers 11 500 ans dans les glaces polaires

Que faire, cependant, si l'on souhaite remonter plus loin que ces derniers 400 ans? C'est là qu'interviennent les recherches de l'EAWAG. Notre objectif est de retracer l'évolution de l'activité solaire pendant tout l'Holocène, c'est-à-dire pendant la période interglaciaire qui dure depuis environ 11 500 ans. Là encore, notre travail se base sur des indices indirects. Le témoin de l'activité du soleil que nous avons choisi de suivre est un radionucléide d'origine cosmogénique, le béryllium 10 (^{10}Be). Cet isotope s'est formé

dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique et s'est accumulé dans les calottes glaciaires des pôles après avoir été entraîné par les précipitations (cf. article thématique, p. 3). Ces archives glaciaires très épaisses permettent de remonter très loin dans le temps sur des distances verticales relativement faibles. En effet, les différentes couches annuelles occupent une épaisseur très réduite du fait d'une part de la pression exercée par les couches plus jeunes sus-jacentes et d'autre part de l'écoulement de la glace. La carotte GRIP étudiée par l'EAWAG provient du Groenland, elle mesure environ 3 km de long et renferme plusieurs centaines de milliers d'années de glace. Dans un véritable travail de Sisyphe, les concentrations de ^{10}Be ont tout d'abord été déterminées couche après couche dans la carotte (cf. Article de S. Bollhalder et I. Brunner, p. 6). En observant deux règles fondamentales, on peut évaluer l'activité du soleil à partir de la concentration en ^{10}Be :

- La production de ^{10}Be ne dépend pas uniquement de l'activité solaire mais également des fluctuations du champ magnétique terrestre. Si on veut étudier l'activité du soleil, il faut donc filtrer l'influence de ce champ magnétique.

- La concentration de ^{10}Be mesurable dans la glace est influencée à la fois par la quantité de ^{10}Be produite dans l'atmosphère et par la quantité de précipitations: Plus les précipitations sont importantes, plus le ^{10}Be est dilué. L'activité solaire n'est donc pas directement déduite de la concentration en ^{10}Be mais du flux de ^{10}Be préalablement calculé: il s'agit du nombre d'atomes de ^{10}Be déposés avec les précipitations dans un centimètre carré de glace en une seconde.

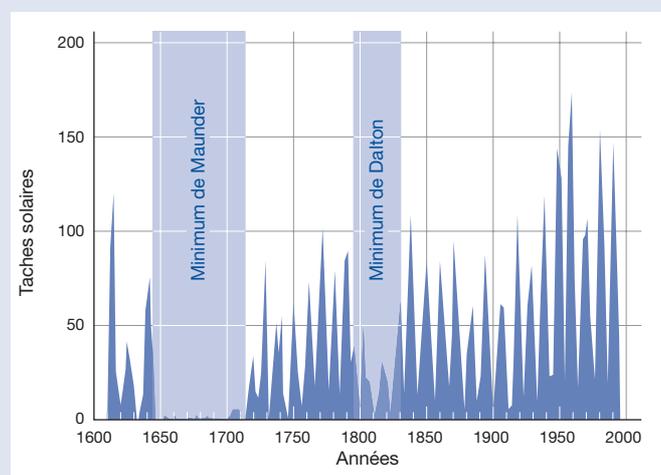


Fig. 2: Nombre de taches solaires observées depuis 1610 [4] représenté à partir des moyennes annuelles. Plus le soleil est actif, plus les taches formées à sa surface sont nombreuses. On observe en plus d'un cycle de 11 ans très net une tendance à l'augmentation de l'activité solaire depuis le début du XVIII^e siècle.

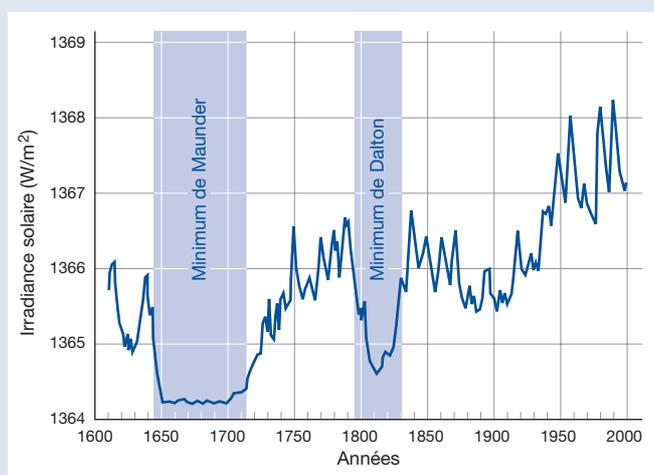


Fig. 3: Evolution de l'irradiance solaire retracée de 1610 à nos jours. La courbe a été obtenue à partir des protocoles d'observation des taches solaires et de l'étude d'étoiles similaires au soleil. D'après ces calculs, l'éclairement solaire a augmenté de 0,24% depuis le minimum de Maunder. D'après [2], modifié.

la granulométrie de ces couches est supérieure ou égale à celle de la fraction sableuse. D'où viennent ces matériaux?

Selon l'explication la plus plausible, ils auraient été transportés par des icebergs à la dérive. Lors d'une débâcle glaciaire (effondrement des bords de la calotte de glace), les icebergs formés emportent avec eux des débris arrachés au socle rocheux et maintenus par la glace sur leur face inférieure. Lorsque les icebergs fondent, ces débris sont libérés et se déposent sur les fonds océaniques. Ces matériaux détritiques grossiers amenés par les glaciers sont appelés «ice-rafted debris» (IRD) en référence à leur mode de transport.

Une accumulation de débris rocheux rouges groenlandais dans les sédiments marins

Une étude détaillée de la composition des IRD contenus dans les carottes sédimentaires permet en grande partie d'en déterminer la provenance géographique. Ainsi, la présence de matériaux vitrifiés volcaniques trahit une origine islandaise. D'autres minéraux provenant nécessairement du Groenland ou de Terre-Neuve peuvent également servir de «traceurs pétrologiques». Ainsi, une composante rougeâtre dans les IRD indique la présence de débris arrachés aux «red beds», roches typiques de l'est du Groenland.

Le lieu de sédimentation de ces matériaux détritiques polaires révèle d'autre part que les icebergs pouvaient migrer très loin vers le sud au cours de l'Holocène. Ces longs déplacements n'étaient possibles que si les températures de l'eau et de l'air étaient très faibles et à même de retarder la fonte des icebergs. Ces niveaux sableux dans les sédiments marins sont donc des indicateurs

de périodes froides. Dans le cadre d'un projet international de recherche, la part d'IRD a été déterminée dans plusieurs carottes sédimentaires (Fig. 4, courbe blanche) [3] et les résultats ont été comparés avec ceux des flux de ^{10}Be (Fig. 4, courbe bleu foncé). Les deux courbes présentent des similitudes. Une forte proportion d'IRD dans les sédiments indique une période de froid pendant laquelle les icebergs pouvaient se déplacer loin vers le sud. Pendant les périodes plus chaudes, la fonte des icebergs se produisait plus au Nord, ce qui se traduit par une faible part d'IRD dans les carottes sédimentaires étudiées.

Nos résultats indiquent les relations suivantes:

- Une «forte proportion d'IRD \approx période froide» est corrélée avec un «flux élevé de $^{10}\text{Be} \approx$ faible activité solaire».
- Une «faible proportion d'IRD \approx période chaude» est liée à un «faible flux de $^{10}\text{Be} \approx$ forte activité solaire».

Ces constatations indiquent que la dérive des icebergs pendant l'Holocène était vraisemblablement contrôlée par l'activité du soleil.

Toutes ces observations affirment bien le rôle dominant du soleil dans notre système climatique. Mais de nombreuses questions restent encore en suspens: Comment notre système climatique réagit-il aux variations de la quantité d'énergie rayonnée? Quels sont les processus responsables? De faibles variations de l'activité solaire se trouvent-elles amplifiées par des mécanismes internes au système climatique terrestre intervenant par exemple au niveau de l'atmosphère? La recherche actuelle cherche des réponses à ces questions et reste à l'affût de nouveaux indices.



Maura Vonmoos, spécialiste en géoscience, effectue actuellement un travail de thèse au département des «Eaux superficielles» de l'EAWAG dans lequel elle s'attache à retracer l'évolution de l'activité solaire au cours de l'Holocène.

- [1] Fröhlich C. (2000): Observations of irradiance variations. *Space Science Reviews* 94, 15–24.
- [2] Lean J., Beer J., Bradley R. (1995): Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change. *Geophysical Research Letters* 22, 3195–3198.
- [3] Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. (2001): Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130–2136.
- [4] Hoyt D.V., Schatten K.H. (1998): Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction. *Solar Physics* 179, 189–219.

Nos travaux ont montré une forte irrégularité du flux de ^{10}Be et donc de l'activité du soleil tout au long de l'Holocène (Fig. 4, courbe bleu foncé). Les valeurs élevées du flux de ^{10}Be correspondent à une faible activité solaire et inversement. Nous cherchons actuellement à exprimer cette indication assez grossière de l'activité solaire en termes d'irradiance solaire. Comme cela avait déjà été fait avec les taches solaires, nous tentons de suivre l'évolution de l'irradiance à travers les concentrations de ^{10}Be .

D'autres indices climatiques livrés par la dérive des icebergs

Des informations contenues dans d'autres archives paléoclimatiques viennent confirmer la thèse d'une influence très variable du rayonnement solaire pendant l'Holocène [3]. Diverses carottes sédimentaires prélevées dans les fonds marins de l'Atlantique Nord au large de l'Irlande à l'est et au large de Terre-Neuve à l'ouest se distinguent par la présence accusée de plusieurs couches de matériaux assez grossiers. Alors qu'à une si grande distance des côtes, les sédiments marins ne renferment en principe plus que des particules fines d'argiles et de limons,

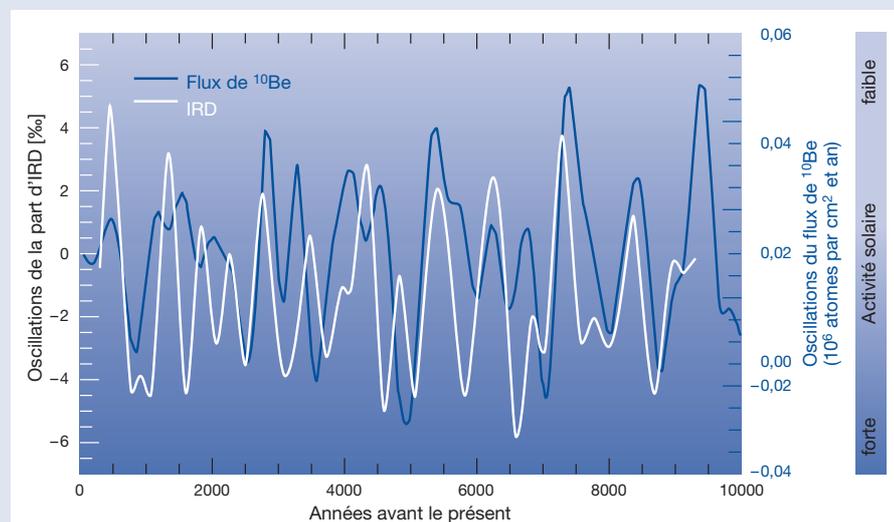


Fig. 4: Oscillations du flux de ^{10}Be dans la carotte glaciaire GRIP (courbe bleu foncé) et de la part d'IRD dans les sédiments marins (courbe blanche). IRD = «ice rafted debris». D'après [3], simplifié.

Pourquoi un soudain retour du froid à la fin de la dernière période glaciaire?

Les changements climatiques globaux qui touchent la zone nord-atlantique sont souvent mis en relation avec une perturbation de la circulation océanique. La dernière phase de froid du tardiglaciaire würmien, le Dryas récent, n'y fait pas exception. Cette période a été marquée par un brusque retour du froid qui a replacé la zone nord-atlantique qui s'était déjà réchauffée dans un climat glaciaire. Les indicateurs climatiques fournissent jusqu'à présent des informations contradictoires sur les causes de ce refroidissement. L'EAWAG a tenté de trouver de nouvelles indications dans les forages du Groenland.

Le Würmien correspond à la glaciation la plus récente de l'histoire géologique de la Terre. Elle a duré environ 100 000 ans et s'est achevée il y a près de 10 000 ans. Cette époque glaciaire a été caractérisée par une succession de changements climatiques rapides dans la région nord-atlantique. On appelle Dryas récent le dernier épisode froid du tardiglaciaire würmien qui s'est amorcé très brusquement il y a environ 12 700 ans pour se maintenir pendant à peu près 1200 ans. Pendant ce laps de temps, la température moyenne du Groenland a chuté de près de 10 °C (Fig. 1A) [1]. Selon une hypothèse répandue, ce changement de climat aurait été causé par une perturbation des courants océaniques. En effet, une

interruption du transport vers le nord des eaux chaudes tropicales peut entraîner une chute soudaine des températures dans les régions septentrionales. Cette hypothèse est étayée par un grand nombre d'observations mais la reconstruction des concentrations de ¹⁴C dans l'atmosphère pendant le Dryas récent livre des résultats qui la contredisent partiellement. L'EAWAG s'est penché sur les causes et les implications de cette contradiction.

Des données contradictoires

Le ¹⁴C, isotope radioactif du carbone (voir encadré), est un traceur naturel d'une importance fondamentale pour les climatologues. Il est en effet produit en permanence

dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique et s'intègre tout naturellement au cycle du carbone après s'être oxydé en ¹⁴CO₂.

Les océans échangent en permanence de l'air et du CO₂ avec l'atmosphère, et donc aussi du ¹⁴C radioactif. On considère en général que sous l'effet du brassage des océans, du ¹⁴C est transporté de la surface vers les fonds marins et qu'à l'inverse, des eaux pauvres en ¹⁴C remontent des profondeurs vers la surface. Ces processus impliquent un appauvrissement en ¹⁴C de l'atmosphère dans le cas d'une circulation océanique importante. Si on suppose, donc, que cette circulation était ralentie dans l'Atlantique Nord pendant le Dryas récent, la chute de température de cette période a dû s'accompagner d'un enrichissement de l'atmosphère en ¹⁴C.

A partir de dosages de ¹⁴C dans les sédiments, il a été possible de retracer l'évolution du ¹⁴C atmosphérique pendant le Dryas récent [3]. On observe effectivement une augmentation de la teneur atmosphérique en ¹⁴C au début du Dryas récent, ce qui semble confirmer l'hypothèse d'une perturbation des courants océaniques. Mais curieusement, cette teneur s'est mise à chuter bien avant une remontée significative des températures dans la région nord-atlantique (Fig. 1B). Ces observations sont en contradiction avec les relations déjà énoncées entre transport de chaleur, circulation océanique profonde et teneur en ¹⁴C de l'atmosphère. Nous avons alors cherché à savoir si d'autres facteurs avaient pu intervenir.

La datation au carbone 14

En plus de ses deux isotopes stables, le ¹²C et le ¹³C, le carbone possède un isotope radioactif, le ¹⁴C. Celui-ci présente une période de demi-vie de 5730 ans, ce qui signifie qu'au bout de 5730 ans, la moitié du carbone 14 initialement présent s'est désintégré. C'est cette propriété qui est mise à profit dans la méthode de datation au ¹⁴C. Tous les êtres vivants échangent en permanence du ¹⁴C avec leur environnement. Cet échange cesse au moment de la mort. Avec le temps, le ¹⁴C radioactif renfermé par les organismes se désintègre et leur teneur en carbone 14 baisse progressivement. En déterminant la concentration en ¹⁴C d'un échantillon, il est donc possible d'en évaluer l'âge ou plus exactement le moment de l'interruption des échanges avec l'environnement.

Cette évaluation ne peut cependant être effectuée avec une certaine exactitude que si on dispose de suffisamment de connaissances sur l'histoire de la teneur en carbone 14 de l'atmosphère. En effet, si cette teneur était plus élevée par le passé, il aura fallu davantage de temps pour qu'elle atteigne une concentration donnée. Si on fait abstraction de cet état de fait, on risque d'attribuer à l'échantillon étudié un âge plus récent qu'il ne l'est en réalité. Dans le cas opposé, on aboutirait à une surestimation de cet âge.

C'est pour éviter cet écueil que les scientifiques travaillent actuellement à l'établissement d'une courbe de calibration du ¹⁴C basée sur des dosages de ¹⁴C effectués dans les cernes de croissance de troncs fossiles et les varves ou couches annuelles de sédiments. Les données sont déjà disponibles à l'année près pour les 11 500 dernières années [2].

La production de nucléides influe sur la teneur en ^{14}C

La teneur en ^{14}C atmosphérique ne dépend pas uniquement de l'intensité des courants océaniques, mais également du taux de production de cet isotope dans l'atmosphère. Ainsi, une période de faible activité solaire s'accompagnera d'une formation accrue de ^{14}C dans l'atmosphère terrestre qui se traduira par une augmentation de sa teneur atmosphérique. Un tel accroissement s'est par exemple produit pendant le minimum de Maunder entre 1645 et 1715 [4]. A cette époque, le climat de l'Europe était beaucoup plus froid que celui que nous connaissons aujourd'hui. A partir des observations effectuées alors avec la lunette

astronomique tout juste inventée, on sait d'autre part que la surface du soleil se caractérisait alors par une absence quasi-totale de taches sombres (Fig. 2; voir aussi l'article de M. Vonmoos, p. 8). Cette absence de taches solaires indique qu'à cette époque le soleil était nettement moins actif qu'aujourd'hui. Dans le cas du minimum de Maunder, l'observation des taches solaires permet donc d'établir un parallèle entre l'augmentation de la teneur en ^{14}C atmosphérique et la faible activité du soleil. Mais comment étudier cette relation dans des temps plus reculés pour lesquels on ne dispose pas d'observations directes du soleil? Un certain nombre d'indicateurs peuvent nous y aider.

Le ^{10}Be comme indicateur de la production atmosphérique de radionucléides

Le dosage de l'isotope radioactif du béryllium, le béryllium 10 (^{10}Be), est une source très intéressante d'informations. Comme le ^{14}C , il se forme dans l'atmosphère suite à l'impact du rayonnement cosmique sur les atomes de l'air (cf. article thématique, p. 3), mais il est ensuite soumis à des processus totalement différents de ceux qui interviennent pour le carbone 14: Après avoir été lessivé de l'atmosphère, le ^{10}Be se dépose plus ou moins directement sur la

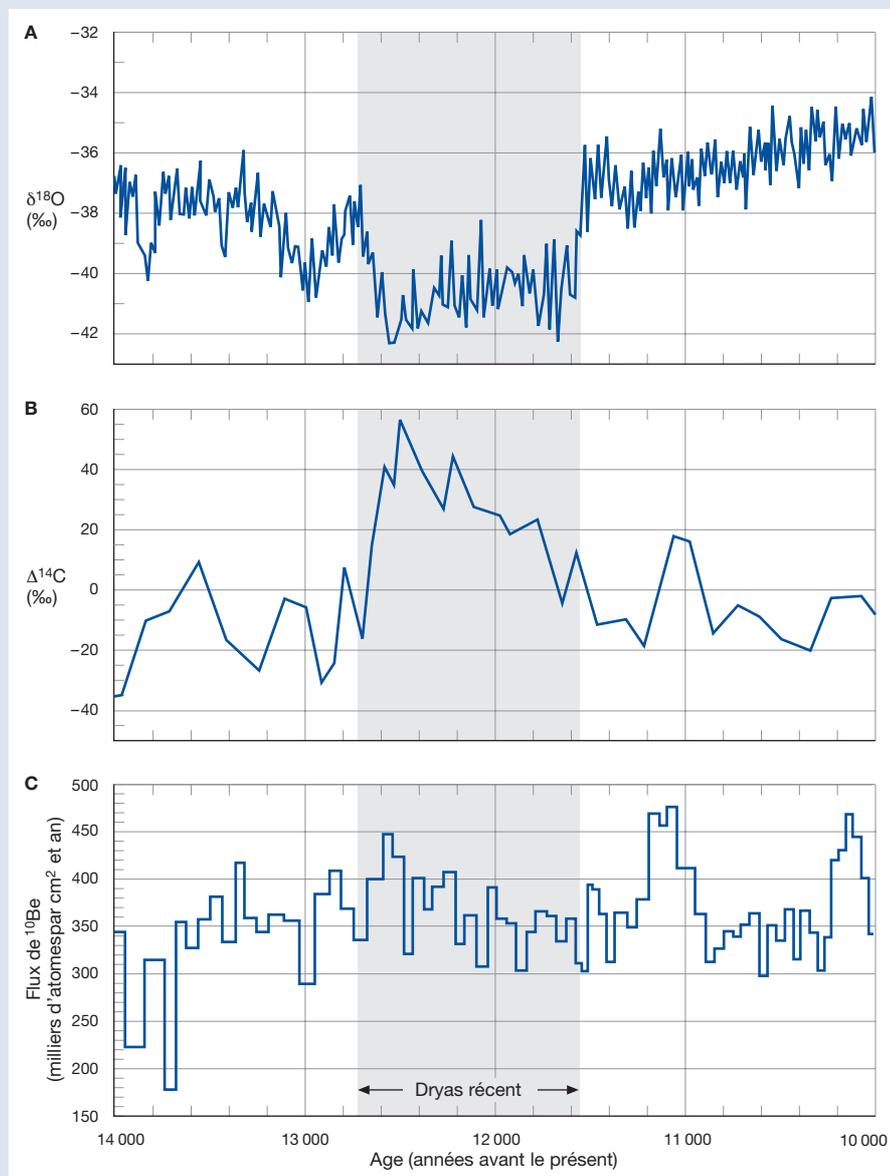


Fig. 1: Evolution de la température, de la teneur en ^{14}C atmosphérique et du flux de ^{10}Be au cours du Dryas récent. A) $\delta^{18}\text{O}$, indicateur de la température au Groenland. B) Reconstruction de la teneur en ^{14}C atmosphérique exprimée sous la forme d'un $\Delta^{14}\text{C}$ calculé à partir de l'étude de sédiments du bassin de Cariaco sur la côte du Venezuela. $\Delta^{14}\text{C}$ correspond à la variation de la concentration en ^{14}C de l'atmosphère par rapport à une valeur standard. C) Flux de ^{10}Be , indicateur de la production de nucléides.

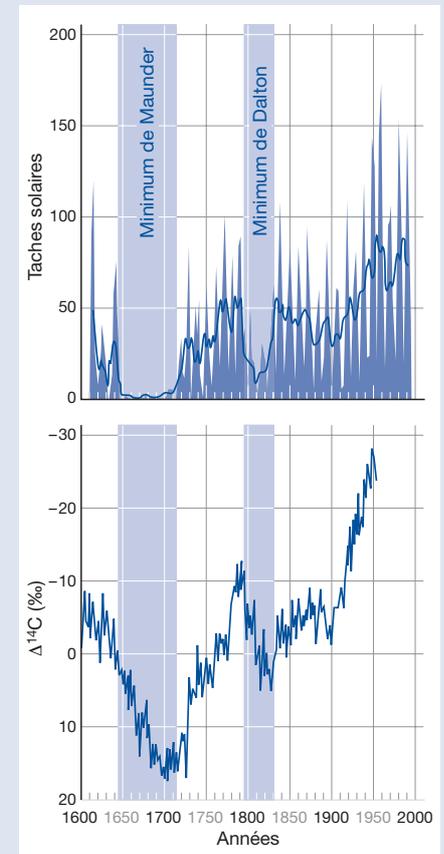


Fig. 2: Comparaison du nombre de groupes de taches solaires avec les variations de la teneur en ^{14}C atmosphérique. Dans les phases de faible activité solaire, comme par exemple pendant les minimums de Maunder et de Dalton, la teneur en ^{14}C de l'atmosphère augmente ($\Delta^{14}\text{C}$ est représenté en courbe inverse).

déposée dans les glaces du Groenland devrait donc être quasiment constante. A l'inverse, si le Dryas récent a de plus été marqué par une variation des taux de production de nucléides, il faut s'attendre à observer une certaine variabilité des concentrations de ^{10}Be dans les couches de glace correspondant à cette période.

Une production variable d'isotopes de ^{10}Be

Comme nous l'avions soupçonné, l'analyse des dosages de ^{10}Be [5] a effectivement montré que les taux de production de cosmnucléides et donc très probablement l'activité du soleil étaient très variables pendant le Dryas récent (Fig. 1C). Si, à présent, on convertit les données de ^{10}Be en teneurs en ^{14}C , on constate que l'évolution du ^{14}C atmosphérique s'explique en grande partie par cette variabilité de production (Fig. 3A). Mais c'est uniquement en tenant compte, en plus de ce premier paramètre, d'une réduction de 30% de la circulation océanique que l'on obtient une explication quasi-totale de cette évolution au cours du Dryas récent (Fig. 3B) [6]. Nos analyses confirment

donc l'intervention, dans cette période de refroidissement, d'un ralentissement de la circulation d'eau vers les profondeurs. La raison de ce changement climatique soudain reste cependant inexplicée. Toutefois, le fait que le début de cette dernière phase du tardiglaciaire ait été marqué par une augmentation de la production de nucléides dans l'atmosphère semble indiquer qu'une réduction de l'activité solaire pourrait être à l'origine de ce retour du froid.

L'étude du Dryas récent a montré pour la première fois qu'il était possible de faire la distinction entre variations de la production de nucléides dans l'atmosphère et modifications du cycle du carbone par la comparaison des flux de ^{10}Be et des teneurs en ^{14}C . Cette approche peut être adoptée pour l'ensemble de la période couverte par la méthode au ^{14}C , c'est-à-dire pour les 50 000 dernières années, et jouera certainement un rôle important dans les études à venir sur les changements globaux au niveau du cycle du carbone.

Terre et n'est pas intégré à un cycle biogéochimique comme c'est le cas du ^{14}C . L'histoire de la production de ^{10}Be peut être retracée à l'aide de ce que l'on appelle les archives paléoclimatiques. Les meilleurs résultats ont été fournis par les carottes de glace du Groenland central dans lesquelles le béryllium 10 s'est accumulé année après année et donc couche après couche suite à son lessivage de l'atmosphère. Si les variations de la teneur en ^{14}C atmosphérique pendant le Dryas récent étaient uniquement dues à des perturbations des courants océaniques, la quantité de ^{10}Be

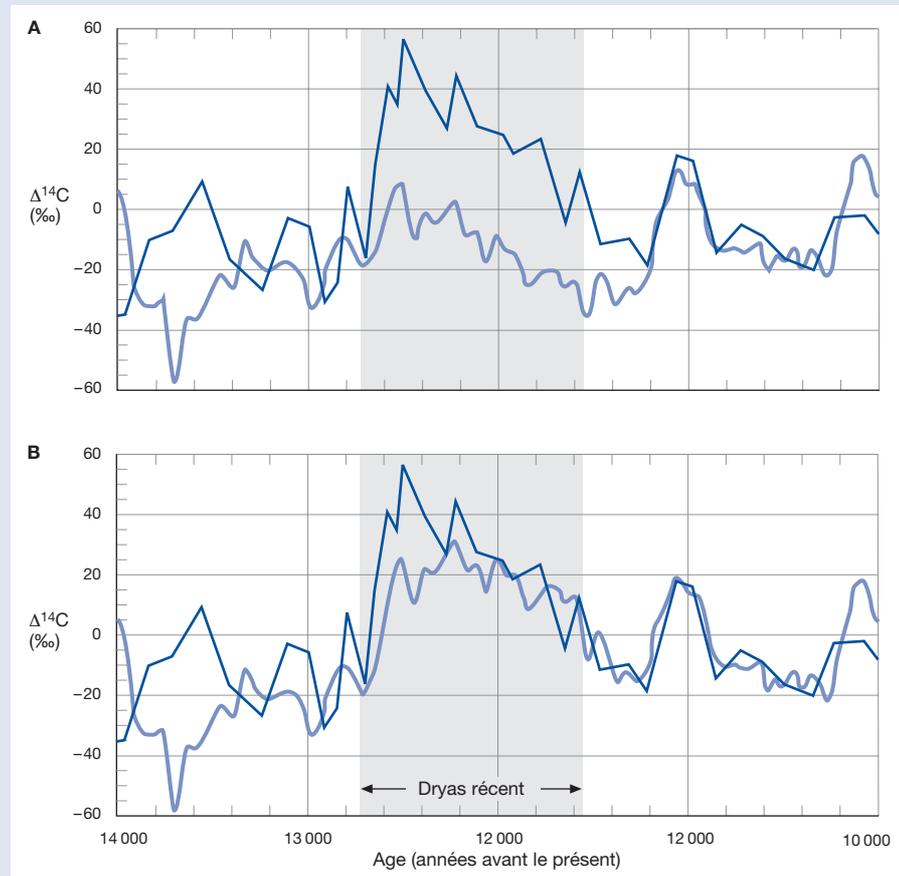


Fig. 3: Modélisation des teneurs en ^{14}C de l'atmosphère (courbes bleu clair):
A) en tenant compte du paramètre de formation des cosmnucléides,
B) en tenant compte à la fois de la formation des nucléides et de la circulation océanique.
A titre comparatif figure également la reconstruction des teneurs réelles en ^{14}C atmosphérique pour la même période (courbe bleu foncé).



Raimund Muscheler s'est consacré à ce projet dans le cadre de la thèse qu'il a préparée au sein du département des «Eaux superficielles» de l'EAWAG. Il effectue depuis 2003 un stage post-doctoral à l'Université de Lund en Suède.

- [1] Johnsen S.J., Clausen H.B., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N., Hammer C.U., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B., Steffensen J.P. (1992): Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature* 359, 311–313.
- [2] Stuiver M., Reimer P.J., Bard E., Beck J.W., Burr G.S., Hughen K.A., Kromer B., McCormac G., Van der Plicht J., Spurk M. (1998): INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP. *Radiocarbon* 40, 1041–1083.
- [3] Hughen K., Overpeck J.T., Lehmann S., Kashgarian M., Southon J., Peterson L.C., Alley R., Sigman D.M. (1998): Deglacial changes in ocean circulation from an extended radiocarbon calibration. *Nature* 391, 65–68.
- [4] Eddy J.A. (1976): The Maunder Minimum. *Science* 192, 1189–1201.
- [5] Finkel R.C., Nishiizumi K. (1997): Beryllium 10 concentrations in the Greenland ice sheet project 2 ice core from 3–40 ka. *Journal of Geophysical Research* 102, 26 699–26 706.
- [6] Muscheler R., Beer J., Wagner G., Finkel R.C. (2000): Changes in deep-water formation during the Younger Dryas cold period inferred from a comparison of ^{10}Be and ^{14}C records. *Nature* 408, 567–570.

La boussole dans les glaces polaires

Chacun sait qu'une aiguille aimantée mobile pointe automatiquement vers le Nord et permet donc de s'orienter sur les terrains inconnus ou dans les conditions de mauvaise visibilité. Le principe de la boussole magnétique est connu depuis plus de 1000 ans et a rendu des services inestimables à l'humanité pour tout ce qui touche à la navigation. Les oiseaux migrateurs et bien d'autres animaux semblent disposer eux aussi d'un système d'orientation magnétique interne qui leur permet de se diriger avec précision vers leur but. Notre système de boussole magnétique semble donc parfaitement fiable, mais s'il avait existé il y a plusieurs milliers d'années, il n'aurait pas toujours indiqué le pôle Nord géographique. En effet, au cours de son histoire, la Terre a connu toute une série d'inversions de la polarité de son champ magnétique.

Bien que le champ magnétique terrestre (Fig. 1) soit étudié très en détail depuis déjà 300 ans, Einstein le désignait comme l'un des plus grands problèmes non résolus de la science moderne. Certaines questions concernant son origine et son orientation (Fig. 2) ont pu être élucidées (voir encadré). Mais on ignore encore les raisons des inversions de polarité qu'il a connues à plusieurs reprises au cours des temps géologiques (Fig. 3). Pour tenter d'éclaircir ce mystère, il faut tout d'abord retracer l'évolution de l'intensité et de la polarité du champ géo-

magnétique d'époques très anciennes à nos jours. L'EAWAG a pu montrer que la mesure de radioisotopes dans les carottes de glace constituait une nouvelle méthode de détermination du champ magnétique terrestre.

L'inscription du champ magnétique terrestre dans les paléo-archives

Les paléomagnéticiens se servent traditionnellement des sédiments et des coulées volcaniques pour reconstituer l'histoire du magnétisme terrestre. Dans les sédiments, l'information est fournie par les particules aimantées qui s'y sont déposées couche après couche au cours des temps géologiques. Tant que ces particules étaient encore mobiles dans le sédiment, elles pouvaient s'aligner sur la polarité magnétique à la manière de l'aiguille d'une boussole. Leur alignement est d'autant plus strict que l'intensité du champ magnétique était forte au moment de la solidification du sédiment. Il est ainsi possible de reconstituer aussi bien l'intensité que l'orientation de ce champ géomagnétique passé par l'étude de carottes sédimentaires. L'étude des coulées volcaniques est basée sur un principe similaire. Lors d'une éruption volcanique, des masses rocheuses extrêmement chaudes sont propulsées de l'intérieur de la Terre vers la surface. Tant que la lave est encore en fusion, sa température est trop élevée

pour permettre l'aimantation des particules qu'elle contient. Lorsqu'elle se refroidit, ces particules ferro-magnétiques s'aimantent et s'alignent sur le champ magnétique terrestre dont la direction et l'intensité se trouvent enregistrées et fossilisées.

Ces méthodes de reconstitution du champ magnétique sont particulièrement efficaces pour les périodes de fort magnétisme terrestre et pour les sédiments homogènes et riches en particules aimantées dans lesquels l'enregistrement du géomagnétisme n'a pas été perturbé par des processus ultérieurs.

La méthode radioisotopique

La nouvelle méthode radioisotopique se base sur l'analyse de carottes de glace polaires. Bien que cette glace soit constituée presque exclusivement d'eau pure et ne contienne que très peu de particules aimantées, elle renferme une information très précieuse sur l'histoire du champ magnétique terrestre. Cette information est livrée par la quantité de radioisotopes tels que le béryllium 10 (^{10}Be) ou le chlore 36 (^{36}Cl) contenue dans un gramme de glace. Le champ magnétique terrestre forme une sorte de bouclier qui protège la Terre du rayonnement cosmique. Quand il est fort, la production de radionucléides dans l'atmosphère se trouve donc limitée. Par contre, le taux

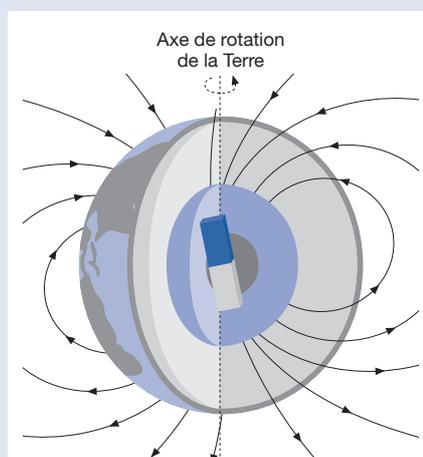


Fig. 1: Le champ magnétique terrestre peut être représenté de façon simplifiée par un champ bipolaire généré par un barreau aimanté imaginaire placé au centre de la Terre. Toutefois, l'axe de ce barreau est légèrement décalé par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

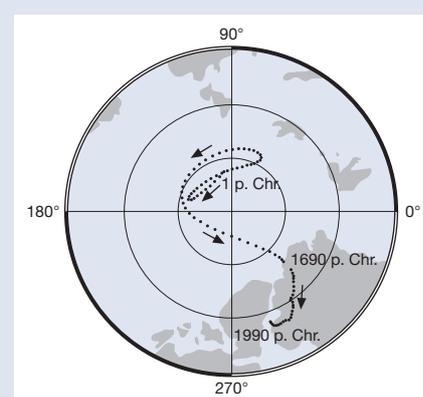


Fig. 2: Migration du pôle Nord magnétique à travers la région arctique au cours des 2000 dernières années [1]. Le voyage continue.

Origine, direction et intensité du champ magnétique terrestre

La Terre est entourée d'un champ magnétique (Fig. 1) qui trouve son origine dans les courants convectifs de fer en fusion dans le noyau. Un peu comme dans le cas de l'eau, le fer le plus chaud monte vers la périphérie du noyau tandis que le fer le plus froid descend vers le cœur.

L'orientation du champ magnétique terrestre ne suit pas tout à fait l'axe de rotation de la Terre, ce qui fait que les pôles magnétiques ne correspondent pas aux pôles géographiques (Fig. 1). De plus, les pôles magnétiques se déplacent en permanence. Ainsi, le pôle Nord magnétique s'est déplacé de plusieurs milliers de kilomètres dans la région arctique au cours des deux derniers millénaires (Fig. 2). Il a atteint le Groenland il y a environ 300 ans et se trouve actuellement au Canada. Personne ne sait où l'amènera son voyage.

Le champ géomagnétique ne change pas seulement de direction mais également d'intensité au cours du temps. A certains moments de l'histoire de la Terre, il arrive que l'intensité du champ s'approche de zéro et que lorsqu'elle remonte, la polarité retrouvée soit l'inverse de la précédente. A la suite d'une telle inversion de polarité le pôle Nord magnétique se retrouve dans l'hémisphère Sud. Il s'y maintient en général dans les 100 000 ans avant de regagner l'hémisphère Nord à l'occasion d'une nouvelle inversion. Le rythme de ces inversions géomagnétiques est irrégulier et ne semble obéir à aucune règle. Il est donc impossible d'en prévoir la prochaine. La dernière inversion, celle de Brunhes-Matuyama, s'est produite il y a 780 000 ans (Fig. 3).

de formation moyen de radionucléides augmente de plus du double quand le champ magnétique terrestre s'annule. Si encore, on part du principe que les variations lentes des teneurs en ^{10}Be et en ^{36}Cl de la glace sont uniquement liées au magnétisme terrestre et que les variations plus rapides liées à l'activité solaire s'annulent en moyenne sur ces périodes, on dispose d'une toute nouvelle méthode pour reconstituer l'évolution de l'intensité du champ magnétique terrestre au cours des âges. Et contrairement aux autres, cette méthode radioisotopique est d'autant plus sensible que le géomagnétisme est faible. Autre avantage,

les variations locales du champ magnétique n'ont pas d'influence notable sur les résultats.

Fiabilité des résultats de la méthode radioisotopique

Pour juger de la fiabilité des résultats livrés par la nouvelle méthode de l'EAWAG, nous avons comparé l'approche sédimentologique et l'approche radioisotopique. La figure 4 présente les valeurs de l'intensité du champ magnétique terrestre reconstituées à partir des teneurs en ^{10}Be et en ^{36}Cl déterminées dans la carotte glaciaire GRIP du Groenland d'une part [2] et des mesures traditionnelles effectuées dans une carotte sédimentaire de Méditerranée d'autre part [3]. A quelques exceptions près, les deux méthodes livrent des résultats similaires. Ainsi, les dosages de radionucléides ont confirmé l'occurrence, il y a environ 40 000

ans, d'un événement géomagnétique caractérisé par une inversion avortée. Après un affaiblissement du champ de 90% par rapport à sa valeur actuelle, le système est revenu à son état d'origine au lieu de basculer en polarité inversée. La méthode radioisotopique a donc ainsi passé son baptême du feu avec succès. Elle pourra dorénavant être appliquée à l'ensemble de la période couverte par les carottes glaciaires, ce qui devrait permettre de reconstituer l'intensité du champ magnétique terrestre du dernier million d'années.

Mais que nous réserve l'avenir? A quand la prochaine inversion géomagnétique? La force du champ magnétique terrestre est à nouveau en baisse constante depuis environ 2000 ans, ce qui, si la vitesse se maintient, pourrait conduire à une inversion dans à peu près 2000 ans. Ce changement ne devrait pas être perceptible au niveau des êtres humains, mais qu'en est-il par exemple des oiseaux migrateurs? Seront-ils encore capables de retrouver leur destination?

Jürg Beer, portrait p. 5.

- [1] Hongre L., Hulot G., Khokhlov A. (1998): An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 106, 311–335.
- [2] Wagner G., Masarik J., Beer J., Baumgartner S., Imboden D., Kubik P.W., Synal H.-A., Suter M. (2000): Reconstruction of the geomagnetic field between 20 and 60 kyr BP from cosmogenic radionuclides in the GRIP ice core. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 172, 597–604.
- [3] Tric E., Valet J.P., Tucholka P., Paterne M., LaBeyrie L., Guichard F., Tauxe L., Fontugne M. (1992): Paleointensity of the geomagnetic field during the last 80,000 years. *Journal of Geophysical Research* 97, 9337–9351.

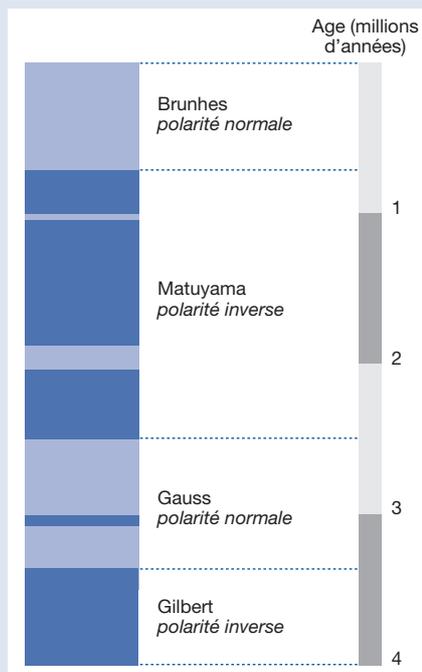


Fig. 3: Succession des inversions de polarité du champ magnétique terrestre au cours des derniers 4 millions d'années. Les périodes en bleu clair sont caractérisées par la même polarité qu'aujourd'hui, celles en bleu foncé par une polarité inverse. Certaines époques portent le nom de grands pionniers de l'étude du magnétisme terrestre.

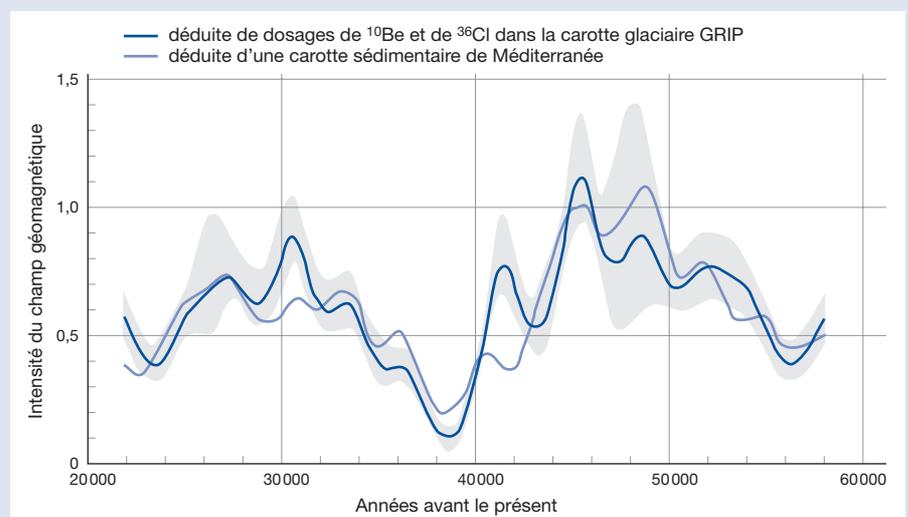


Fig. 4: Reconstruction de la force du champ magnétique de 20 000 à 60 000 ans avant le présent. Comparaison de la nouvelle méthode radioisotopique (courbe bleu foncé: données combinées de ^{10}Be et de ^{36}Cl de la carotte GRIP [2]) avec la méthode traditionnelle (courbe bleu clair: orientation des particules aimantées dans une carotte sédimentaire de Méditerranée [3]). La zone grise correspond à l'intervalle d'erreur de la méthode radioisotopique. La bande d'erreur de la méthode traditionnelle n'est pas représentée.

Rayonnement cosmique et nébulosité

Gaz à effet de serre et rayonnement solaire

On observe depuis environ 1850 une augmentation quasiment continue de la température de l'air dans l'hémisphère Nord (Fig. 1) [4–6]. Parmi les facteurs soupçonnés d'intervenir, l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la variation de l'activité solaire figurent en bonne place:

■ Si on considère par exemple l'évolution du CO₂ atmosphérique, un gaz à effet de serre des plus importants, on constate effectivement depuis 150 ans une augmentation exponentielle de sa teneur qui s'accroît très rapidement depuis la moitié du XX^e siècle (Fig. 1). La cause unanimement reconnue de cette évolution exponentielle est la consommation croissante de combustibles fossiles. La température a en revanche fortement varié pendant cette période. On distingue nettement deux périodes de réchauffement important, l'une de 1910 à 1940, l'autre de 1970 à aujourd'hui. La période de 1940 à 1970 a même été marquée par un léger refroidissement. Ces fluctuations correspondent mal à l'augmentation exponentielle des teneurs en CO₂.

■ En ce qui concerne l'éclairement solaire, les mesures effectuées par les sondes spatiales depuis 1980 montrent d'un côté que l'intensité du rayonnement solaire n'est pas constant mais fluctue en suivant le cycle de 11 ans des taches solaires (voir Fig. 1, p. 8). D'un autre côté, une observation plus détaillée des mesures révèle que la variation de la constante solaire sur un cycle n'est que de 2 W/m² sur une moyenne de 1367 W/m², soit 0,15%, ce qui est beaucoup trop faible pour expliquer les variations de température observées.

Ainsi, aucun des deux facteurs traditionnellement tenus pour responsables du réchauf-

Les carottes de glace livrent une foule d'informations sur les variations environnementales du passé. Mais elles permettent aussi de traiter des questions bien spécifiques ou de tester des hypothèses bien précises. L'une de ces hypothèses stipule que les changements climatiques seraient principalement dus à des variations de l'intensité du rayonnement cosmique. Si tel était le cas, l'effet de serre ne jouerait qu'un rôle subalterne. Il s'agit donc d'une hypothèse pour le moins explosive sur le plan politique qu'il importe de vérifier avec soin.

En 1997, des chercheurs danois se sont adressés à la presse, annonçant non sans fierté qu'ils avaient trouvé l'explication des changements climatiques des derniers 150 ans [1]. D'après eux, le rôle majeur ne serait joué ni par l'effet de serre ni par la constante solaire (voir l'article thématique, p. 3) mais par la nébulosité globale (voir encadré). Celle-ci serait influencée par le rayonnement cosmique et aurait considérablement diminué au cours du XX^e siècle. Ces travaux ont trouvé une résonance très importante dans les médias. Journaux, magazines et télévision consacrèrent coup sur coup articles et émissions à ce sujet et un livre intitulé «The Manic Sun» parut peu de temps après [2]. Etant donné que l'hypothèse danoise présente le réchauffement climatique comme un phénomène entièrement naturel

qui se produit sans aucune responsabilité de l'Homme, elle a été particulièrement bien accueillie dans les milieux économiques et politiques traditionnellement hostiles à toute mesure de réduction des gaz à effet de serre. Il était alors du devoir de la communauté scientifique d'intervenir et l'EAWAG a, comme beaucoup d'institutions, participé aux débats [3]. Ces discussions ont montré une fois de plus que les changements climatiques étaient de nature très complexe et s'expliquaient rarement par un phénomène unique. Parmi les principales causes avancées figurent en effet les gaz à effet de serre, l'irradiance solaire, les aérosols, les éruptions volcaniques et les fluctuations internes du système climatique. Dans les lignes qui suivent, nous aborderons surtout les deux premières causes citées.

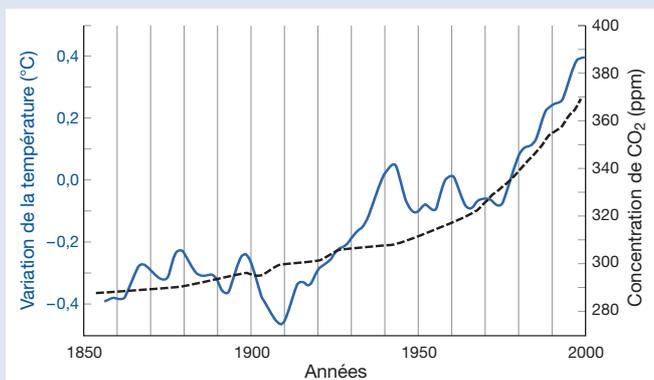


Fig. 1: Comparaison de la variation globale de la température depuis 1850 (rapportée à la période 1961–1990) avec les teneurs en CO₂ de l'atmosphère. Courbe de température: moyenne d'une multitude de données provenant de diverses stations météo [4]. Courbe du CO₂: avant 1953, données provenant de l'analyse de bulles d'air emprisonnées dans la glace de la carotte de Siple [5]; depuis 1958, mesures directes de CO₂ à Mauna Loa [6]. ppm = parts per million = parties par millions.

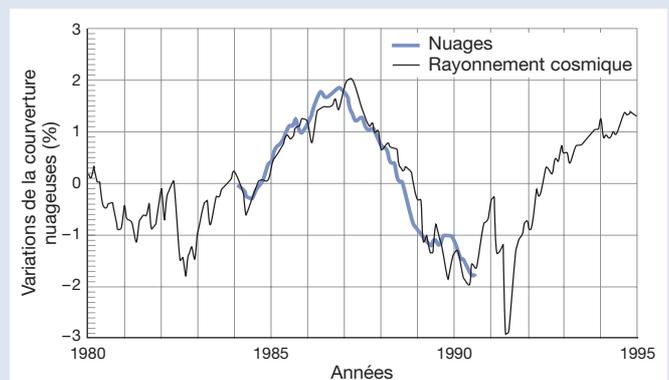


Fig. 2: La variation de la couverture nuageuse suit très bien l'évolution de rayonnement cosmique incident entre 1980 et 1995 et s'élève à plus de 2% [1]. La figure donne une représentation à la même échelle des moyennes glissantes sur 12 mois de la couverture nuageuse (exprimées en pourcentage de variation) et des moyennes mensuelles normalisées de mesures du rayonnement cosmique effectuées à Colorado (USA).

fement climatique ne peut expliquer à lui seul le phénomène. Tel est le constat actuel, unanimement accepté, également des Danois. Mais quels arguments développent-ils à partir de ce constat?

Rayonnement cosmique et nuages

Les scientifiques danois se sont demandés si le rayonnement cosmique pouvait avoir une influence sur notre climat. D'après eux, plus le rayonnement cosmique qui pénètre dans l'atmosphère terrestre est important, plus la couverture nuageuse globale doit l'être aussi (voir encadré). Pour tenter de vérifier cette hypothèse, ces chercheurs ont étudié des images satellitaires de la couverture nuageuse de 1980 à 1995 et les ont comparées aux mesures d'intensité du rayonnement cosmique. Ils ont alors constaté que la nébulosité avait varié d'environ 2% pendant cette période, suivant exactement l'évolution du rayonnement cosmique (Fig. 2). L'hypothèse danoise semble donc capable d'expliquer les fluctuations climatiques observées par le passé. Mais l'étude des Danois repose tout de même sur une base instable étant donné qu'elle s'appuie sur une période d'observation très courte, d'à peine 15 ans. Pour pouvoir étayer cette hypothèse, il faudrait disposer de données supplémentaires sur le rayonnement cosmique et sur le climat des derniers siècles et millénaires. L'EAWAG a trouvé des informations à ce sujet dans les carottes de glace du Groenland.

Un rayonnement cosmique affaibli ces 300 dernières années

Si on considère l'évolution des 300 dernières années, on constate une baisse globale du rayonnement cosmique pénétrant dans l'atmosphère. Cette information nous est fournie d'une part par les mesures directes de rayonnement cosmique incident effectuées depuis les années 1950 à l'aide de moniteurs à neutrons; d'autre part, des radionucléides emmagasinés dans la glace du Groenland, comme le béryllium 10 (^{10}Be)

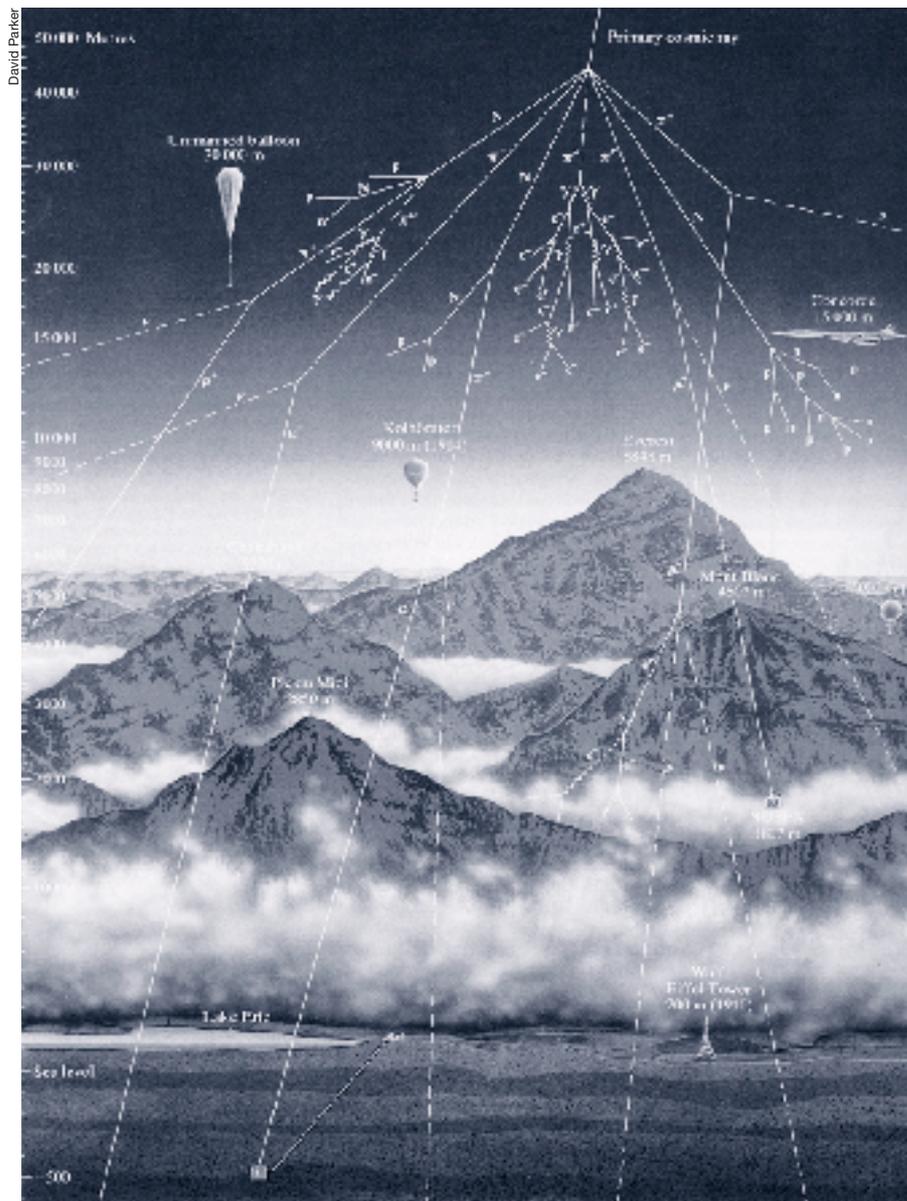


Fig. 3: Le rayonnement cosmique en provenance de l'espace pénètre avec une très forte énergie dans l'atmosphère et percute les atomes de l'air. Ces collisions provoquent la formation de particules secondaires qui viennent à leur tour heurter des atomes de l'air, les divisant en fragments, ce qui aboutit à la formation de radionucléides cosmogéniques. Dans le même temps, les particules primaires et secondaires du rayonnement cosmique provoquent une ionisation de l'air, ce qui, d'après l'hypothèse danoise, favoriserait la formation de nuages. La figure est un montage. Elle indique à quelle altitude les différents processus se déroulent dans l'atmosphère.

et le chlore 36 (^{36}Cl) servent d'indicateurs indirects pour reconstituer le rayonnement cosmique du passé. Cet affaiblissement est probablement lié à une recrudescence de l'activité solaire (voir Fig. 2 et 3, p. 9). D'après l'hypothèse danoise, cette période

d'affaiblissement du rayonnement cosmique devrait être couplée à une baisse de la nébulosité et donc à un réchauffement du climat. Au vu des observations récentes, l'hypothèse danoise semble donc bien tenir la route.

L'hypothèse danoise sur l'implication du rayonnement cosmique et de la nébulosité

L'hypothèse des scientifiques danois Svensmark et Friis-Christensen [1] semble simple et évidente: Le rayonnement cosmique – un flux de particules hautement énergétiques provenant du fin fond de l'espace – pénètre dans l'atmosphère où il provoque une ionisation de l'air (Fig. 3). Ces ions constituent alors des noyaux autour desquels la vapeur d'eau vient se condenser pour former des gouttelettes, ce qui conduit finalement à la formation de nuages. Plus les nuages sont abondants, plus la part du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre est faible et plus il fait froid. À l'inverse, il y a réchauffement quand les nuages se raréfient et ne font donc plus obstacle aux rayons du soleil.

La part du rayonnement cosmique qui peut pénétrer dans l'atmosphère est régulée par le jeu de deux facteurs: l'activité solaire et le champ magnétique terrestre. Le soleil propulse en permanence des gaz brûlants vers l'espace, formant ce que l'on appelle le vent solaire. Le champ magnétique terrestre protège la terre du vent solaire en le déviant autour de la planète (voir Fig. 4, p. 5). Il se forme alors un bouclier naturel qui limite de son côté la pénétration du rayonnement cosmique. Donc, plus le soleil est actif et plus le champ magnétique terrestre est fort, plus le rayonnement cosmique pénétrant dans l'atmosphère est faible.

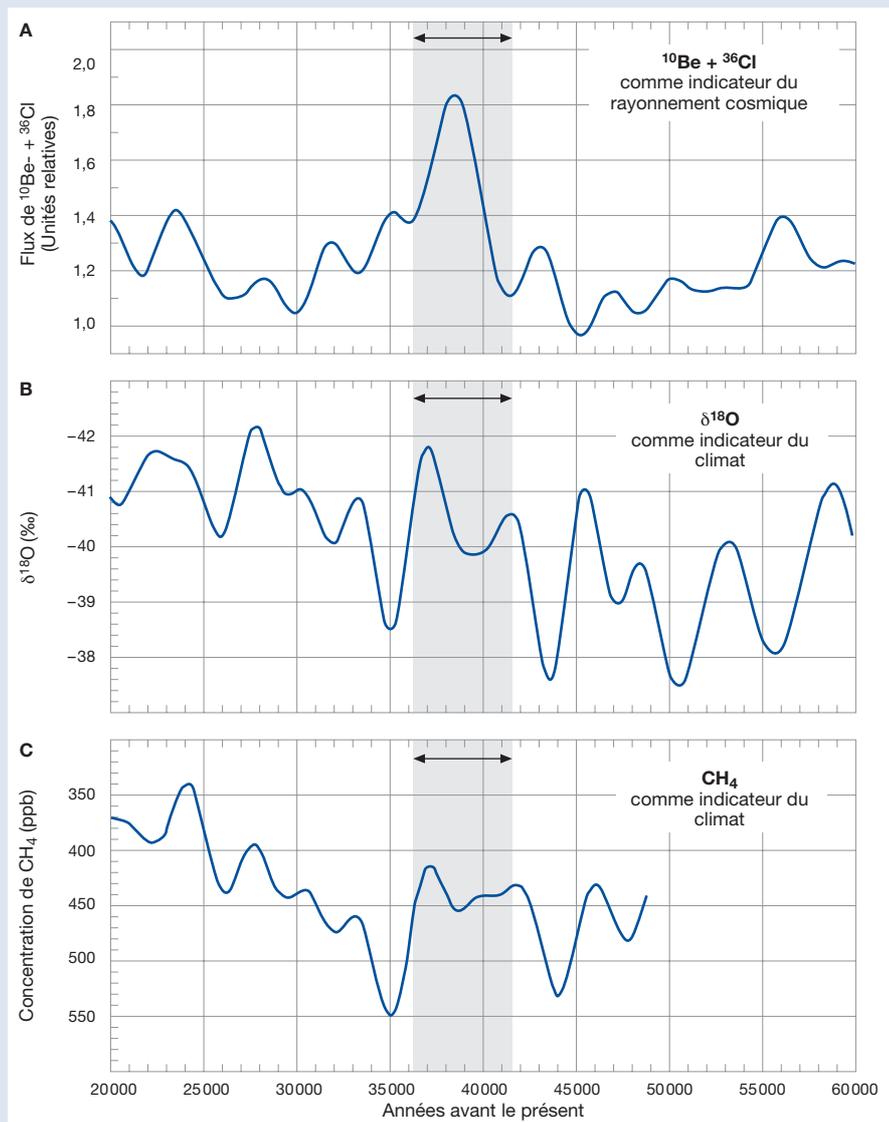


Fig. 4: Comparaison des teneurs combinées en ^{10}Be et en ^{36}Cl (A) avec les paramètres climatiques $\delta^{18}\text{O}$ (B) et CH_4 (C) à partir de l'analyse de la carotte glaciaire GRIP. Suite à un affaiblissement du champ magnétique terrestre il y a environ 40 000 ans (zone grisée), l'intensité du rayonnement cosmique pénétrant dans l'atmosphère a fortement augmenté, stimulant la formation de ^{10}Be et de ^{36}Cl . Contrairement à ce que stipule l'hypothèse danoise, les deux paramètres climatiques n'indiquent aucun refroidissement pendant cette période. Les coefficients de corrélation calculés sont pratiquement nuls. ppb = parts per billion = parties par milliard.

Un fort rayonnement cosmique incident il y a 40 000 ans

Si on remonte encore plus loin dans le passé, la situation change du tout au tout. On constate en effet l'existence il y a environ 40 000 ans d'une période de près de 3000 ans de fort rayonnement cosmique sur la terre. A cette époque, notre planète a subitement perdu son bouclier magnétique, ce qui a permis au rayonnement cosmique de pénétrer presque sans encombre dans l'atmosphère. La cause de ce chamboulement était une baisse dramatique du champ magnétique terrestre dont l'intensité s'est presque annulée, atteignant à peine 10% de sa valeur actuelle. Si l'hypothèse danoise est vraie, la couverture nuageuse globale doit avoir augmenté pendant cette période qui doit donc s'être accompagnée d'un refroidissement du climat [3].

Les carottes de glace du Groenland livrent une fois de plus toutes les informations nécessaires à la vérification de cette hypothèse. La figure 4A indique les données combinées de ^{10}Be et de ^{36}Cl qui présentent un pic très net il y a environ 40 000 ans. Ce pic de radionucléides correspond tout à fait à nos attentes puisqu'un fort rayonnement cosmique incident induit une production accrue de radionucléides dans l'atmosphère. Dans le même temps, deux paramètres indicateurs du climat ont également été mesurés dans la glace carottée, le $\delta^{18}\text{O}$ et le méthane. Si l'on croit l'hypothèse danoise, le climat a dû se refroidir pendant la période considérée, ce qui se traduirait par une baisse sensible des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en méthane. Or ce n'est pas du tout le cas (Fig. 4B et C). Les deux paramètres présentent certes une bonne concordance entre

eux mais ne s'accordent pas avec la courbe des radionucléides. Nos résultats sont donc en net désaccord avec l'hypothèse des Danois. Etant donné que tous les paramètres ont été mesurés simultanément dans la même carotte de glace, ce résultat est totalement indépendant de l'exactitude de la datation de la glace.

Une interprétation un peu trop ambitieuse

Entre-temps, de nouveaux points de dissension sont apparus, notamment lors de l'analyse de nouvelles données sur la couverture nuageuse qui ne suivent plus l'évolution du rayonnement cosmique. En ce moment, l'hypothèse danoise est donc plutôt en perte de vitesse, même si ses défenseurs n'ont pas encore dit leur dernier mot. Il s'avère une fois de plus que le climat est bien trop complexe pour pouvoir expliquer ses changements à partir d'un seul mécanisme. Par contre, de plus en plus d'éléments semblent indiquer que le soleil aurait effectivement joué un rôle central avant 1970, sans toutefois utiliser le biais du rayonnement cosmique mais bien directement de par les variations de l'intensité de son éclairage (voir l'article de M. Vonmoos, p. 8). Le réchauffement important de ces 30 dernières années ne peut cependant s'expliquer par l'activité du soleil. Tout semble indiquer qu'il serait bien le résultat d'une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère causée par les activités humaines. Nous saurons très certainement la vérité d'ici quelques années, mais nous n'aurons plus alors la possibilité de limiter les conséquences de nos actes.

Jürg Beer, portrait p. 5

- [1] Svensmark H., Friis-Christensen E. (1997): Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics* 59, 1225–1232.
- [2] Calder N. (1997): *The Manic Sun*; Edition Pilkington Press, London.
- [3] Wagner G., Livingstone D.M., Masarik J., Muscheler R., Beer J. (2001): Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate. *Journal Geophysical Research* 106, 3381–3388.
- [4] Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. (2001): Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, USA.
- [5] Neftel A., Moor E., Oeschger H., Stauffer B. (1985): Evidence from polar cores for the increase in atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature* 315, 45–47.
- [6] Keeling C.D., Whorf T.P. (2003): Atmospheric CO_2 concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Made available online by C.D. Keeling.

La couverture de glace des lacs et rivières

L'évolution du climat de source historique

Les lacs gèlent d'autant plus tôt et dégèlent d'autant plus tard que les hivers sont longs et rigoureux. Nous concevons intuitivement cette évidence sans chercher à connaître les phénomènes météorologiques complexes qui sont à la base de cette observation. L'EAWAG a voulu en savoir plus en analysant des données historiques sur les dates de gel et de dégel de plusieurs lacs et rivières, notamment du lac de St-Moritz et du lac Baïkal en Sibérie. Ces séries de données permettent de dégager les tendances climatiques du passé et d'envisager celles du futur.

Le moment du gel des lacs ou des rivières en hiver et de leur dégel au printemps dépend de divers facteurs météorologiques. Le plus important d'entre eux est sans aucun doute la température de l'air. De manière empirique, on peut donc considérer la formation et la fonte de la couche de glace comme des réactions temporelles aux variations saisonnières de la température de l'air. A l'inverse, il est également possible d'évaluer la température de l'air qui régnait par le passé à proximité des lacs et rivières en étudiant les données historiques sur les dates de gel et de dégel. Etant donné que les valeurs de la température de l'air sont en général corrélées entre elles sur de grandes distances, souvent des centaines de kilomètres, les variations historiques de la durée

des glaces livrent une information non seulement sur les changements des conditions météorologiques locales mais également sur certaines variations climatiques à l'échelle régionale ou même suprarégionale, ce qui est autrement plus intéressant.

La couverture de glace sous l'influence des changements climatiques?

Des données historiques sur les dates de formation et de fonte de la couverture de glace (respectivement définies comme le premier jour de couverture totale et le premier jour absolument sans glace) de lacs et de rivières du Canada, des USA, de Finlande, de Suisse, de Russie et du Japon ont apporté la preuve que les lacs et cours

d'eau de l'hémisphère nord gèlent plus tard et dégèlent plus tôt depuis le milieu du XIX^{ème} siècle (Fig. 1) [1]. Ces décalages à long terme du début et de la fin de la couche de glace sont en moyenne de 6 jours sur 100 ans, ce qui correspond à un réchauffement de l'air de 1,2 °C sur cette même période. Ces données historiques viennent

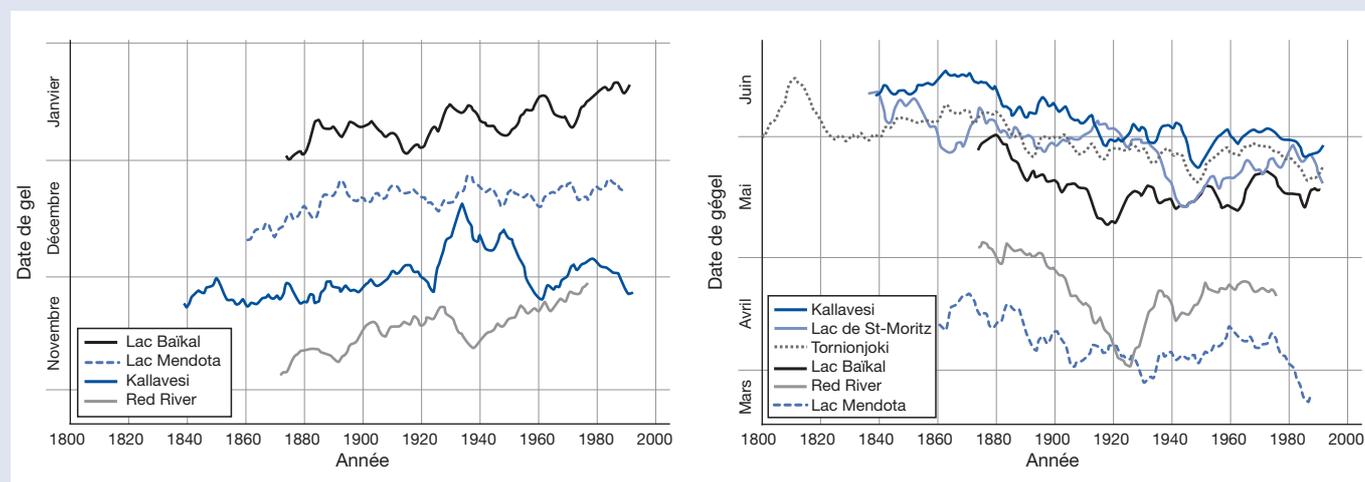
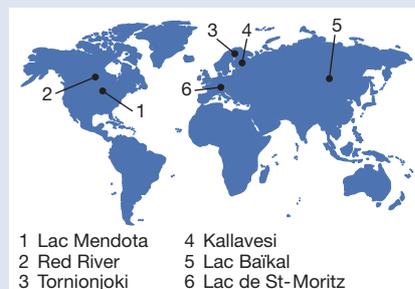




Fig. 2: Course de chevaux sur le lac de St-Moritz gelé.

donc non seulement étayer l'hypothèse d'un réchauffement global amorcé dans le passé et perdurant de nos jours, mais elles permettent de surcroît une certaine prédiction des effets du réchauffement planétaire à venir sur les dates de gel et de dégel du bouclier de glace des lacs et rivières. Si le réchauffement se poursuit conformément aux prévisions, la durée de persistance de la glace sera toujours plus brève et son épaisseur toujours plus faible, ce qui devrait avoir des répercussions aussi bien négatives que positives tant sur le plan socio-économique que sur le plan écologique. Sous les grandes latitudes, le transport des personnes et des biens sur la banquise des grands lacs comme le lac Baïkal en Sibérie ou sur les grandes rivières comme la rivière Yukon en Alaska pourrait ainsi être rendu plus difficile et plus coûteux. A l'inverse, sur le lac Supérieur en Amérique du Nord, l'effet d'un allongement de la durée sans glace serait bénéfique aux transports qui s'y effectuent par bateau. D'un point de vue écologique, le raccourcissement de la durée de la glace induirait une meilleure oxygénation des lacs normalement recouverts d'un bouclier de glace pendant presque tout l'hiver [2]. Ceci aurait d'une part pour conséquence de limiter le risque de mortalité pour les poissons pendant l'hiver mais provoquerait également un brassage précoce des eaux au printemps qui s'accompagnerait d'une initiation hâtive de l'efflorescence de phytoplancton. Cette précocité serait plutôt néfaste, le phytoplancton devant alors croître sous une intensité lumineuse plus faible que

s'il s'était développé plus tard. Il faut donc également s'attendre à ce qu'intervenant à cette période cruciale de l'année, ces changements se répercutent sur la composition des communautés phytoplanctoniques dont une modification ne manquerait pas de s'accompagner d'autres conséquences écologiques.

Données sur les glaces du lac de St-Moritz

Le lac de St-Moritz, situé à 1778 m d'altitude en Haute Engadine (Fig. 2), livre la série de données la plus ancienne de Suisse sur les dates de gel et de dégel de la couverture de glace. Cette précieuse source d'informations, unique en son genre en Europe, couvre sans interruption la période de 1832 à nos jours. On dispose d'autre part depuis le milieu du XIX^{ème} siècle de mesures instrumentales fiables de la température de l'air provenant de différentes stations météorologiques suisses et européennes. En confrontant ces séries de données, nous avons étudié la relation entre la fonte des glaces du lac de St-Moritz et l'évolution des températures de l'air correspondantes.

La couverture de glace sous l'influence du climat suprarégional

La date moyenne de dégel du lac de St-Moritz est le 12 mai. Notre analyse (Fig. 3) a montré qu'il existait entre cette date de dégel et la température de l'air une corrélation caractérisée par une part maximale de variance commune (r^2) de 64% [3],

ce qui signifie que 64% de la variabilité de la date de dégel s'explique statistiquement par la variabilité de la température de l'air. Il est donc possible d'évaluer approximativement la température moyenne locale au printemps sur une période de 4 à 8 semaines à partir des données de dégel (Fig. 3). Mais il existe également une bonne corrélation entre la date de fonte de la glace du lac de St-Moritz et les températures de l'air dans des localités plus éloignées [3, 4]. Ainsi, si l'on s'appuie sur les données de température de la station météorologique de Neuchâtel située à quelque 230 km du lac, on obtient un pourcentage de variance commune de 61%, donc à peine plus faible que pour les données locales (Fig. 3). Cette observation révèle que le dégel du lac de St-Moritz, et de bien d'autres lacs alpins, constitue avant tout une réponse au climat régional et n'est que secondairement influencé par les événements météorologiques locaux.

Cette thèse se trouve appuyée par l'observation d'une corrélation encore plus étroite à l'échelle suprarégionale, si on compare

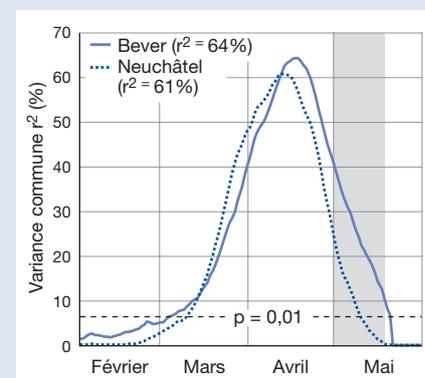


Fig. 3: Part de variance commune (r^2) entre la date de dégel du lac de St-Moritz (Haute Engadine, Suisse) et la température de l'air moyennée sur 51 jours, mesurée à Bever, à 7 km du lac, et à Neuchâtel, à 230 km à l'ouest du lac. Chaque courbe a été tracée à partir des valeurs de r^2 calculées pour 120 différentes périodes de 51 jours et reportées sur la date marquant le milieu de chacune de ces périodes. La bande ombragée correspond à la période habituelle de fonte des glaces du lac (date moyenne \pm 1 écart-type). La ligne pointillée indique le seuil de significativité $p = 0,01$. D'après [3], modifié.



Fig. 4: En hiver, personnes et biens circulent à la surface du lac Baïkal.

par exemple les dates de dégel du lac de St-Moritz avec les températures de l'air en Grande-Bretagne ou aux Pays-Bas. Par contre, la corrélation cesse d'être significative si on se réfère aux températures moyennes de l'ensemble de l'hémisphère nord. L'influence du climat sur le dégel des lacs semble donc se manifester à une échelle plus suprarégionale que globale. Un article apparenté (p. 23) décrit la relation entre la

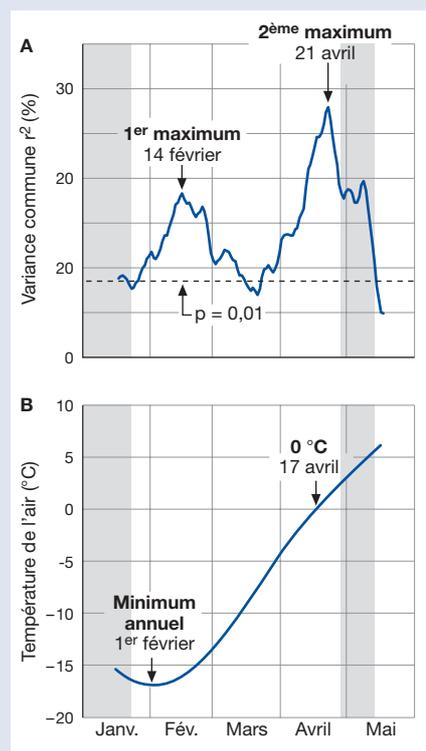


Fig. 5: (A) Part de la variance commune (r^2) entre les dates de dégel observées à Listvyanka dans la partie sud du Baïkal et les températures de l'air mesurées à la station météo de Babouchkine au sud du lac Baïkal moyennées sur 31 jours.

(B) Evolution saisonnière de la température de l'air moyennée sur 31 jours tracée à partir de données récoltées de 1931 à 1994 à Babouchkine.

Les valeurs r^2 présentent deux maxima situés respectivement les 14 février et 21 avril (A). Ces deux dates suivent de peu celles du minimum annuel de température (le 1^{er} février) et du passage de la courbe des températures à travers la ligne 0°C (le 17 avril). Les bandes ombragées correspondent aux périodes habituelles de gel et de dégel dans la partie sud du Baïkal (date moyenne ± 1 écart-type). La ligne pointillée correspond au seuil de significativité $p = 0,01$. D'après [5], modifié.

date de dégel des eaux de l'hémisphère nord et l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO).

Données sur les glaces du lac Baïkal

Le Baïkal en Sibérie orientale est le lac d'eau douce le plus profond (env. 1650 m) et le plus volumineux (env. 23 000 km²) du monde (Fig. 4). Il dépasse 600 km de long pour une largeur moyenne de 50 m et ne contient pas moins de 20% de la quantité totale d'eau douce disponible à l'état liquide à la surface de notre planète. D'après les estimations, ce lac est vieux de plus de 25 millions d'années et présente la biodiversité la plus élevée de tous les lacs existant à l'heure actuelle, son écosystème exceptionnel étant composé de près de 1500 espèces et sous-espèces dans le règne végétal et de plus de 3500 dans le règne animal.

Le Baïkal est gelé de quatre à cinq mois par an. On observe cependant un gradient nord-sud le long du lac étant donné les différents climats qu'il traverse et qui induisent des différences tant au niveau des dates de formation de la couverture de glace que de sa fonte. Le lac commence à geler fin octobre. La majeure partie du bassin septentrional est en général couverte de glace avant début décembre alors que le bassin méridional ne gèle au plus tôt qu'un mois plus tard. Dans la partie sud du lac, la fonte de la glace s'amorce en général entre fin mars et début avril, alors qu'elle ne commence que de deux à trois semaines plus tard au nord. Le bassin sud est généralement totalement dégelé à partir de la mi-mai. Etant donné

l'importance de ces différences nord-sud, l'observation des glaces du Baïkal doit nécessairement se limiter à une zone précise du lac. Pour le bonheur des chercheurs, la date de fonte du bouclier de glace a été relevée en continu depuis 1869 à la station limnologique de Listvyanka dans la partie sud du Baïkal.

Un autre paramètre d'influence: La température minimale annuelle de l'air

Comme pour le lac de St-Moritz, les dates de dégel du Baïkal étaient fortement corrélées à la température de l'air (pic de droite, Fig. 5A). La situation du lac Baïkal paraît toutefois plus complexe si on en juge par l'existence d'une deuxième corrélation significative observable plus tôt dans l'année (pic de gauche, Fig. 5A) [5]. Il se trouve en effet que la date de fonte de la banquise du Baïkal ne dépend pas uniquement de la température de l'air au moment du dégel au printemps mais également de la température minimale pendant la période la plus froide de l'hiver sibérien (Fig. 5B). Cette dernière définit d'une part l'épaisseur maximale atteinte par le bouclier de glace – plus cette température est basse, plus la glace est épaisse – mais aussi, d'autre part, l'épaisseur de la couche de neige isolante qui se dépose à sa surface – plus la température minimale est basse, moins il neige. La température de l'air au mois de mars, peu avant l'amorce du dégel, se situe en général en dessous de zéro mais reste supérieure au minimum annuel et n'a d'influence ni sur

l'épaississement de la banquise ni sur sa fonte (Fig. 5B). Elle a donc une importance bien moindre que les températures de février et d'avril pour la date de dégel du lac. Comme dans le cas du lac de St-Moritz, les dates de dégel du Baïkal ne sont pas uniquement corrélées avec les températures locales mais également avec celles qui règnent dans des endroits éloignés, en l'occurrence dans le nord de l'Asie. Cette constatation est particulièrement valable pour les mois de février et d'avril (Fig. 6).

Influence du changement climatique sur la couverture de glace

Dans le cadre d'un autre projet, nous avons étudié les dates de dégel des quatre dernières décennies de 196 lacs suédois répartis sur 13 degrés de latitude suivant un gradient nord-sud [6, 7]. Notre analyse a montré que la relation entre la date de dégel et la température de l'air était non-linéaire. Cela signifie concrètement que les lacs des régions chaudes (en général plus méridionales) réagissent plus fortement aux changements climatiques que ceux des régions froides (généralement plus septentrionales). Autrement dit: plus le réchauffement planétaire progressera, plus il aura d'influence sur

le dégel des lacs et donc sur les processus écologiques qui leurs sont propres.

Les séries de données servent d'archives pour la prédiction du climat

Nos résultats montrent que les observations historiques des dates de gel et de dégel des lacs et rivières donnent des indications précieuses sur le climat régional à supra-régional du passé. En effet, elles permettent aussi bien de reconstituer l'évolution du climat sur plusieurs siècles que de suivre sur quelques années ou quelques décennies ses variations à plus court terme. De plus, les séries de données fournissent des informations de valeur pour la prédiction de l'impact des changements climatiques à venir sur les glaces des lacs et rivières. Etant donné que la durée et l'épaisseur de la couverture de glace subissent davantage l'influence du climat à l'échelle suprarégionale que celle de manifestations locales des changements globaux, il ne semble pas nécessaire d'appuyer les prédictions sur des modèles climatiques à haute résolution spatiale (dont nous ne disposons de toute façon pas encore actuellement). Pour statuer sur l'avenir écologique et physico-chimique des lacs et rivières situés à des latitudes éle-

vées, il est très important de savoir s'ils seront couverts de glace en hiver et combien de temps cette couverture persistera. C'est donc par l'estimation de la couverture de glace à venir de ces eaux que devra passer toute tentative de prédiction de l'impact éventuel des changements climatiques sur les ressources en eau à l'échelle de la planète.

Les études scientifiques présentées dans cet article ont été réalisées dans le cadre des projets européens MOLAR, EMERGE, REFLECT, CLIME et Euro-limpac.



David M. Livingstone est physicien et spécialiste d'analyse de données au sein de la division «Ressources en eau et eau potable» de l'EAWAG. Ses activités se concentrent sur les effets passés, présents et futurs des changements climatiques sur les ressources en eau en Europe.

[1] Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingstone D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vulginski V.S. (2000): Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. *Science* 289, 1743-1746.

[2] Livingstone D.M. (1993): Lake oxygenation: application of a one-box model with ice cover. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 78, 465-480.

[3] Livingstone D.M. (1997): Break-up dates of Alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures. *Climatic Change* 37, 407-439.

[4] Livingstone D.M. (1998): Das Auftauen des St. Moritzer Sees: Ein Indikator für überregionale Lufttemperatur und globalen Vulkanismus. *EAWAG Jahresbericht* 1997, Dübendorf, 41-42.

[5] Livingstone D.M. (1999): Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44, 1486-1497.

[6] Weyhenmeyer G.A., Meili M., Livingstone D.M. (2004): Nonlinear temperature response of lake ice breakup. *Geophysical Research Letters* 31 (7), L07203, doi:10.1029/2004GL019530.

[7] Weyhenmeyer G.A., Meili M., Livingstone D.M. (in press): Systematic differences in the trend towards earlier ice-out on Swedish lakes along a latitudinal temperature gradient. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie* 29.

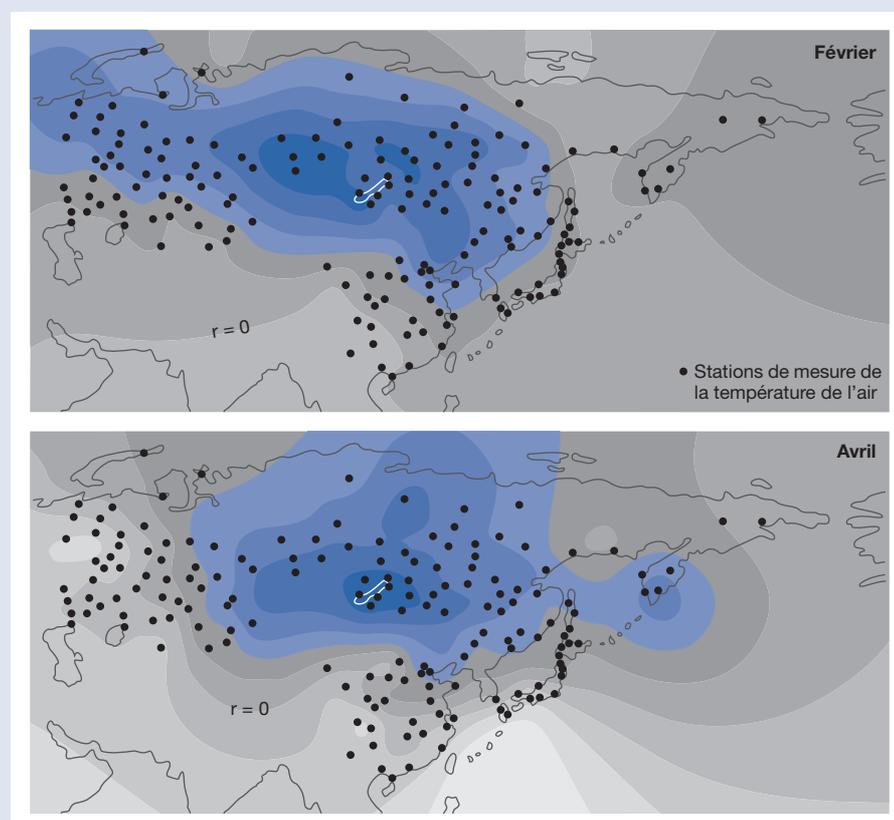


Fig. 6: Représentation en courbes de niveau («contour plot») des coefficients de corrélation entre les dates de dégel dans la partie sud du lac Baïkal et les moyennes mensuelles en février et en avril de la température de l'air dans 170 stations de mesure réparties sur la Russie, le Kazakhstan, la Chine et le Japon (1936-1989). La corrélation est maximale dans la zone en bleu ($r < -0,2$ est significatif pour un seuil de significativité approximatif de $p < 0,01$). L'intervalle entre les courbes de niveau est de 0,1. Le contour du lac Baïkal est indiqué en blanc. D'après [5], modifié.

Le phénomène climatique de l'Oscillation Nord-Atlantique

A-t-elle une influence sur la date de dégel des lacs de l'hémisphère nord?

L'Oscillation Nord-Atlantique est un phénomène climatique de grande échelle qui définit le climat d'une grande partie de l'hémisphère nord. Etant donné que son influence s'exerce principalement en saison hivernale, l'EAWAG a cherché à savoir si l'Oscillation Nord-Atlantique influait sur le moment du dégel des lacs de l'hémisphère nord. Il s'est alors avéré que la zone d'influence de l'Oscillation Nord-Atlantique s'était décalée au cours des 130 dernières années. Son activité se fait aujourd'hui sentir jusqu'en Sibérie mais elle touche moins l'Amérique du Nord.

La dépression d'Islande centrée sur l'Islande et l'anticyclone des Açores qui s'étend de ce groupe d'îles à la péninsule ibérique constituent le couple climatique le plus important de l'Atlantique Nord (Fig. 1). Le gradient nord-sud qui s'installe entre ces deux pôles au niveau de la pression au sol

n'est évidemment pas constant mais varie en fonction de leur intensité respective. Le va-et-vient de l'air au-dessus de la région nord-atlantique dû à ces fluctuations dans le temps est appelé Oscillation Nord-Atlantique (NAO, «North Atlantic Oscillation»). Si ce phénomène a une action particulière-

ment forte sur les pays au contact direct de l'Atlantique Nord, il influence également le climat d'une grande partie du reste de l'hémisphère nord, notamment aux latitudes élevées [1]. Ainsi, la température moyenne de l'hémisphère nord est liée à la NAO qui expliquerait quasiment un tiers de sa variabilité. L'influence de la NAO sur le climat de l'hémisphère nord est particulièrement sensible de la fin de l'automne au début du printemps.

Implications météorologiques de la NAO

L'Oscillation Nord-Atlantique est généralement décrite à l'aide de l'indice NAO. Cet indice est calculé à partir de la différence de pression au niveau de la mer entre deux stations météo situées près des centres respectifs de la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores [1]. Si cette différence est très grande, c'est-à-dire si la pression est très faible au-dessus de l'Islande et très forte au-dessus des Açores, l'indice NAO est positif. Il est négatif dans le cas inverse d'une faible différence de pression due à une intensité plus faible de la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores (Fig. 2).

Un indice NAO élevé en hiver indique donc un fort gradient méridien de pression (aligné sur le méridien) sur l'Atlantique Nord. Ce gradient induit de forts vents d'ouest qui transportent vers l'est et donc vers l'Europe de l'air chaud et humide en provenance de la mer (Fig. 1). Cette dynamique apporte des hivers doux et humides à l'Europe et à une grande partie de l'Asie centrale. A l'inverse, un indice NAO faible est le reflet d'un gradient méridien de pression peu prononcé qui ne génère sur l'Atlantique Nord que des vents d'ouest de faible force et se traduit donc par des hivers secs et froids en Europe. La situation est exactement inverse à l'est du Canada où un fort indice NAO équivaut à de forts vents de nord et donc à des hivers froids tandis qu'un indice NAO faible correspond à des vents de nord plus modérés et donc des hivers plus doux. Les

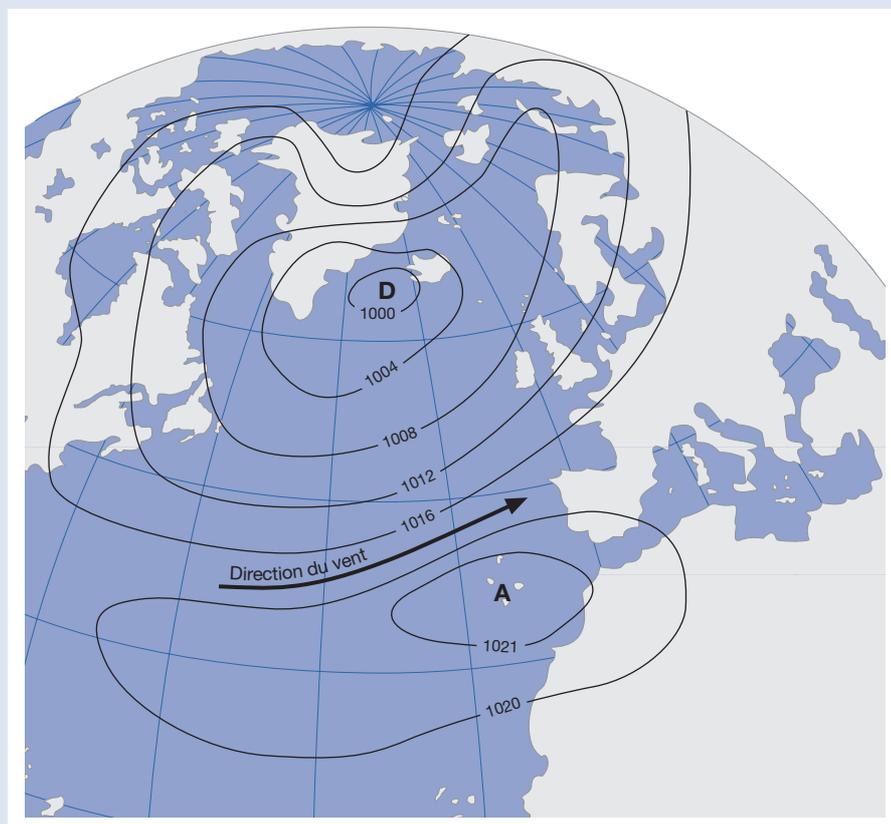


Fig. 1: Distribution de la pression atmosphérique moyenne de janvier au niveau de la mer sur l'Atlantique Nord pendant la période 1941-1970. Sont indiqués la dépression d'Islande, l'anticyclone des Açores et la direction principale des vents qui soufflent sur l'Europe en provenance de l'Atlantique. D'après [2], modifié.



Beat Müller, EAWAG

Le lac Baïkal est complètement gelé pendant 4 à 5 mois par an.

inversions, rares, de la répartition normale des pressions sur l'Atlantique Nord (fortes pressions sur l'Islande et faibles pressions sur les Açores) provoquent un déplacement massif vers le sud des masses d'air polaire qui atteignent l'Europe où elles génèrent des hivers extrêmement froids [2]. Cela s'est produit pour la dernière fois en janvier 1963, date à laquelle même le lac de Zurich avait gelé.

Analyse de séries de données historiques

Le moment de la fonte du bouclier de glace des lacs dépend fortement de la température de l'air en hiver et au printemps (voir aussi l'article p. 19). Etant donné que c'est pendant cette période que l'influence de la NAO sur le climat est la plus forte, on peut supposer qu'elle influe également sur la date de dégel des lacs situés dans son rayon d'action. Cette hypothèse a été testée sur différents lacs de l'hémisphère nord pour lesquels de longues séries de données d'observation de la fonte des glaces étaient disponibles [3–6]. Nous nous pencherons ici sur quatre lacs représentatifs: le Kallavesi en Finlande, le lac de St-Moritz dans les Alpes suisses, le lac Baïkal en Sibérie et le lac Mendota dans le Wisconsin aux USA.

Pour savoir s'il existait réellement un rapport entre la NAO et le dégel de ces quatre lacs, nous avons étudié la corrélation entre les séries de données sur les dates de dégel et les indices NAO saisonniers. Dans l'ensemble, nous nous attendions à observer une corrélation négative étant donné que les indices élevés sont synonymes d'hivers

doux et donc probablement d'un dégel des lacs plus précoce et inversement. D'autre part, pour appréhender les fluctuations dans le temps de l'influence de la NAO, nous avons étudié ces corrélations pour une série de fenêtres de 50 ans qui se succèdent en se chevauchant de 1865–1914 à 1947–1996.

Les coefficients de corrélation obtenus sont représentés en courbes de niveau «contour plots» bidimensionnels dans la figure 3. Pour ce faire, les coefficients de corrélation sont représentés à la fois en fonction de la saison pour laquelle un indice NAO a été calculé et en fonction des fenêtres de données historiques. Les corrélations négatives significatives correspondent aux plages bleues foncées dans les graphiques. Elles indiquent le moment d'une influence probable de la NAO sur la date de dégel du lac correspondant.

La zone d'influence de la NAO s'est-elle déplacée?

Etant donné que l'influence de la NAO sur la température de l'air en Finlande est particulièrement forte [1], nous nous attendions à observer une forte corrélation entre la date de dégel du Kallavesi et l'indice NAO. Nos résultats vont effectivement dans ce sens: Sur toute la durée d'observation, il existe une corrélation négative significative entre le moment de la fonte des glaces et l'indice NAO de l'hiver et du printemps immédiatement précédents (Fig. 3). La corrélation maximale atteinte pour le Kallavesi correspond à une variance commune de 43%, ce qui signifie que 43% de la variabilité de la date de dégel s'expliquent statistiquement par la variabilité de l'indice NAO. Ce pour-

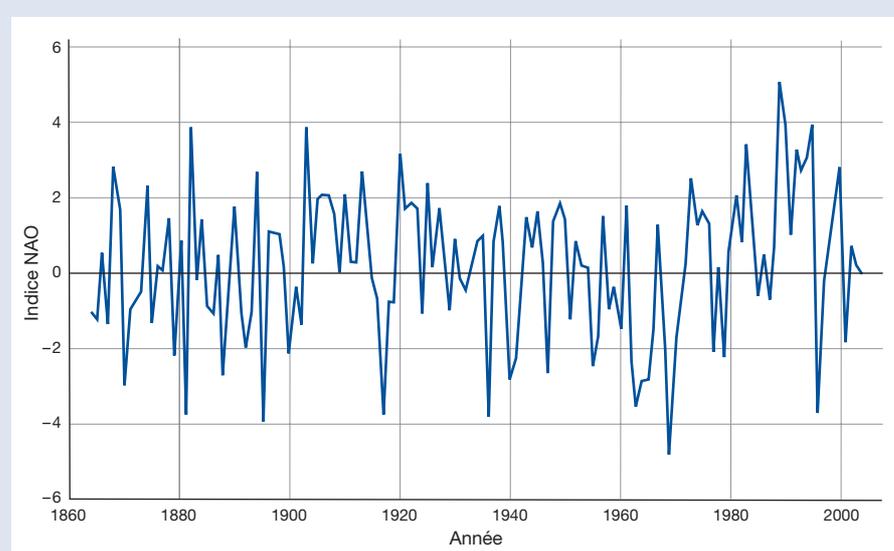


Fig. 2: Fluctuations de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) en hiver (de décembre à mars) depuis 1864 au vu de l'indice NAO. D'après [1], modifié.

centage est étonnamment élevé, si on considère la grande simplicité de l'indice utilisé par rapport à la complexité des processus climatiques qui agissent sur le Kallavesi.

Le lac de St-Moritz se situe dans une région dont la température est bien moins influencée par la NAO qu'elle ne l'est en Finlande. Nos résultats ne font donc que suggérer une faible relation entre la date de dégel et les indices NAO hivernaux de la dernière période d'observation (Fig. 3). La variance commune atteint tout de même 11% dans ce cas.

Au lac Baïkal, l'influence de la NAO hivernale sur le moment de la fonte des glaces s'est considérablement renforcée au cours des dernières années [5]. Avant la fenêtre 1918–1967, l'oscillation Nord-Atlantique n'avait pas d'influence notable sur le dégel (Fig. 3); dans les périodes qui suivent, la part de la variance de la date de dégel expliquée par l'indice NAO progresse jusqu'à atteindre 16%.

Mais le résultat le plus étonnant de notre étude concerne le lac Mendota (Fig. 3). Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, la température du centre de l'Amérique du Nord a été assez peu influencée par la NAO.

La faible corrélation observée entre la date de dégel du lac Mendota et les indices NAO hivernaux des dernières périodes de mesure corrobore cette observation. Si toutefois on remonte plus loin dans le passé, on constate une augmentation du coefficient de corrélation négative qui va jusqu'à indiquer une variance commune comparable à celle calculée pour le Kallavesi pour la période actuelle. Couplé au décalage déjà observé dans le cas du lac Baïkal et soupçonné dans celui du lac de St-Moritz, ce résultat suggère un déplacement vers l'est de la zone d'influence de l'Oscillation Nord-Atlantique au cours des 130 dernières années. Il semble en effet que la NAO ait eu

par le passé une influence beaucoup plus importante qu'actuellement sur le climat de l'Amérique du Nord et qu'à l'inverse, cette influence se soit renforcée en Sibérie.

Pour tenter de conforter les résultats présentés ici, nous nous consacrons actuellement à l'étude d'autres lacs répartis sur différentes régions de l'hémisphère nord. Les premiers résultats indiquent que ces lacs sont eux aussi soumis à l'influence de l'Oscillation Nord-Atlantique. Il semble d'autre part que l'Oscillation Arctique, étroitement liée à la NAO, ait également un rôle à jouer à leur niveau.

Les travaux de recherche présentés ici ont été effectués dans le cadre des projets européens REFLECT, CLIME et Euro-limpacs.

David M. Livingstone, voir portrait p. 22.

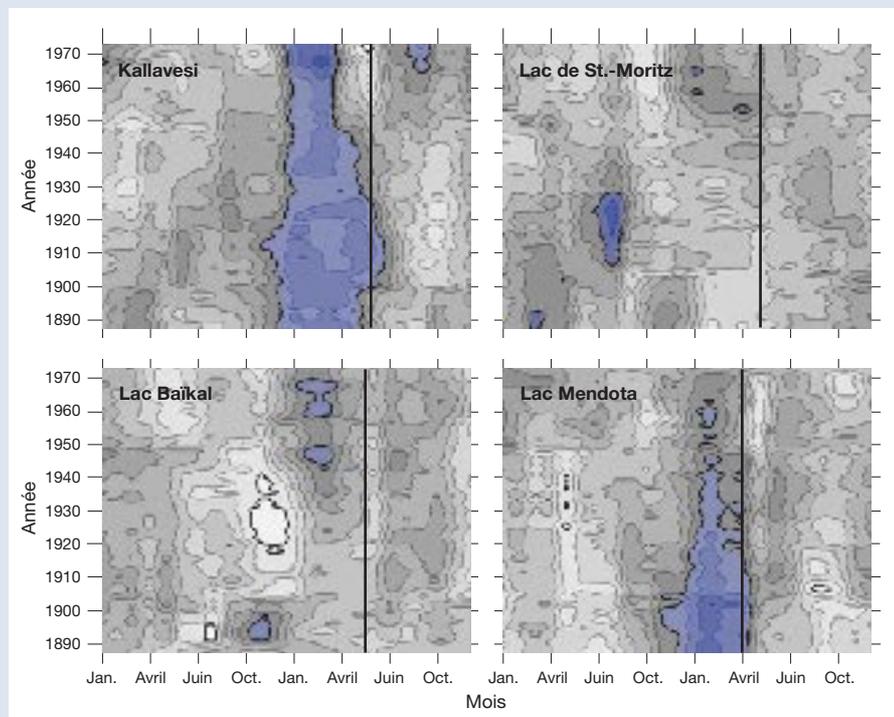


Fig. 3: Représentation en courbes de contour («contour plots») des coefficients de corrélation (r) entre la date de dégel et les indices saisonniers de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) pour 4 lacs de différentes parties de l'hémisphère nord: Kallavesi, Finlande; Lac de St-Moritz, Suisse; Lac Baïkal, Sibérie; Lac Mendota, Wiconsin, USA. Les indices saisonniers de la NAO (axe horizontal) portent respectivement sur 3 mois (de janvier à mars par ex.). Toutes les corrélations ont été calculées en fenêtres de 50 ans (axe vertical) (de 1871 à 1920 par ex.). Pour une représentation plus simplifiée, seul le mois central des saisons et l'année centrale des fenêtres ont été indiqués respectivement en abscisse et en ordonnée. Les coefficients de corrélation négatifs significatifs sont indiqués par les plages bleues. L'espacement des courbes de contour est de 0,1. Les lignes épaisses qui entourent les plages bleu foncé et les zones gris clair correspondent respectivement à $r = -0,3$ et à $r = +0,3$. Les valeurs $r = \pm 0,28$ et $r = \pm 0,36$ sont respectivement significatives à $p = 0,05$ et à $p = 0,01$. La ligne verticale indique la date moyenne de dégel du lac correspondant. D'après [3], modifié.

[1] Hurrell J.W. (1995): Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676–679.

[2] Moses T., Kiladis G.N., Diaz H.F., Barry R.G. (1987): Characteristics and frequency of reversals in mean sea level pressure in the North Atlantic sector and their relationship to long-term temperature trends. *Journal of Climatology* 7, 13–30.

[3] Livingstone D.M. (2000): Large-scale climatic forcing detected in historical observations of lake ice break-up. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung der Limnologie* 27, 2775–2783.

[4] Livingstone D.M. (2000): Der grossskalige Einfluss der nordatlantischen Oszillation auf das Auftauen von Seen in der nördlichen Hemisphäre. *EAWAG Jahresbericht 1999*, Dübendorf, S. 39–40.

[5] Livingstone D.M. (1999): Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44, 1486–1497.

[6] Stralle D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G. (2003): The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climate significance and environmental impact* (eds. J.W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen and M. Visbeck). American Geophysical Union, Geophysical Monographs Series Volume 134, 263–279.

La glace en flammes – Les émissions de méthane dans l'atmosphère

Une menace du fond des mers?

Les marins du temps jadis parlaient souvent d'icebergs en flammes. Longtemps qualifiés de superstition, leur existence a enfin été prouvée vers la fin du siècle dernier. Ces icebergs sont constitués d'hydrate de méthane, un mélange de glace et de méthane déposé dans les sédiments marins. De temps à autre, des blocs de grande taille se détachent et parviennent à la surface de la mer. Si par aventure, ils sont touchés par un éclair lors d'un orage, ils se mettent à brûler et ressemblent à s'y méprendre à de la glace en flammes. On considère que près de 10 000 milliards de tonnes de méthane sont immobilisées sous la forme d'hydrate de gaz dans les sédiments des mers du monde. Dans le cadre du projet européen CRIMEA, l'EAWAG étudie les réserves de méthane de la mer Noire.

L'hydrate de méthane ressemble à s'y méprendre à de la glace ordinaire. Il se décompose à l'air, ne laissant de lui-même qu'une simple flaque d'eau. Le mélange gelé d'eau et de méthane appartient à la famille des hydrates de gaz (voir encadré et Fig. 1) et se rencontre principalement dans les sédiments marins et dans les pergélisols polaires. On trouve des gisements particulièrement vastes d'hydrate de méthane sur les talus continentaux des océans, entre 500 et 2000 m de profondeur [1]. Suite à des séismes sous-marins, les hydrates de méthane enfermés dans les sédiments pourraient être libérés vers la surface ce qui entraînerait une libération massive de méthane dans l'atmosphère. Etant donné que le méthane est un gaz à effet de serre encore plus puissant que le dioxyde de carbone (voir encadré), un tel événement aurait des conséquences dramatiques sur le climat. Tout laisse à penser qu'une telle catastrophe se serait déjà produite il y a 55 millions d'années, entraînant effectivement un réchauffement du climat [2].

Les sources de méthane de la mer Noire

Mais même un changement assez faible des conditions environnementales, comme par exemple un léger réchauffement de l'eau de mer en profondeur ou une modification des conditions de pression suite à des variations du niveau de la mer, peut lui aussi provo-

quer une libération du méthane contenu dans l'hydrate de méthane. Ce processus ne saurait être négligé si on considère que la concentration atmosphérique en méthane a doublé au cours des 150 dernières années et qu'elle se situe actuellement à 1,7 ppm (ppm = parts par million; donc 1,7 parts de méthane pour un million de parts d'air). Mais il existe en dehors des gisements d'hydrate de méthane d'autres sources sous-marines qui contribuent à une augmentation de la concentration atmosphérique en méthane. Elles résultent des processus microbiens et

géochimiques qui génèrent du méthane dans les sédiments.

On recense jusqu'à ce jour dans la partie nord-ouest de la mer Noire plus de mille sources actives de méthane. Celles-ci sont identifiées en surface par des méthodes hydroacoustiques visualisant les bulles produites par la source. Rien qu'au cours des sorties en mer effectuées dans le cadre du projet CRIMEA, quelque 2800 sources supplémentaires ont été découvertes. Des mesures de flux de méthane effectuées dans la partie géorgienne du plateau continental de la mer Noire ont montré qu'entre 0,7 à 7,0 l de méthane étaient libérés par m² et par jour. Si on extrapole ces résultats à toute la surface de la mer Noire, on peut estimer à environ 70 000 tonnes la quantité de méthane libérée chaque année dans l'atmosphère. On ignore encore toutefois ce qu'il advient du méthane au cours de sa remontée de la colonne d'eau.

Le projet CRIMEA

C'est l'une des questions auxquelles les équipes de recherche de dix instituts et universités européens, dont l'EAWAG, tentent d'apporter une réponse dans le cadre du

Les hydrates de gaz

Définition, distribution, formation

Les hydrates de gaz sont des substances cristallines non stœchiométriques formées de gaz et d'eau. Les molécules d'eau forment des structures en forme de cage dans lesquelles sont enfermées les molécules de gaz (Fig. 1). C'est pour cela que les hydrates de gaz sont également appelés clathrates (du latin clatratus = cage). On recense cinq différentes formes de cages. Les hydrates de méthane représentent 90% des hydrates de gaz naturel. Les autres types connus sont des hydrates de dioxyde de carbone ou d'hydrogène sulfuré. L'hydrate de méthane se forme à basse température et à forte pression. Le méthane nécessaire à sa formation provient de la dégradation anaérobie de la matière organique par les microorganismes. A la longue, il ne peut y avoir formation de grandes quantités d'hydrates de méthane que si ces processus de biodégradation se produisent continuellement.

L'énergie du futur?

Les hydrates de gaz stockent à eux seuls nettement plus d'énergie que l'ensemble des réserves de gaz naturel, de charbon et de pétrole de la planète. Ils représentent donc à ce titre une source potentielle d'énergie pour l'avenir. Les problèmes techniques liés à la prospection du méthane des clathrates sont cependant loin d'être résolus et ces questions occuperont encore les technologues pendant un certain nombre d'années. Si on aboutissait un jour à une exploitation à l'échelle industrielle, il faudrait toutefois garder à l'esprit que la combustion du méthane s'accompagne d'une libération de dioxyde de carbone, le gaz à effet de serre numéro 1 (avec la vapeur d'eau).

projet CRIMEA («Contribution of high intensity gas seeps in the Black Sea to methane emission to the atmosphere»). Le projet CRIMEA a tout particulièrement pour objectif:

- de cartographier les sources de méthane dans la mer Noire,
- de quantifier les flux de fluides et de gaz émis,
- de caractériser les bactéries dégradant activement le méthane sur le fond marin et dans la colonne d'eau,
- de chiffrer la transformation du méthane et
- de caractériser les processus physiques, chimiques et biologiques susceptibles d'intervenir lors de la remontée du méthane vers la surface.

La première expédition «Mer Noire»

En juin 2003, nous nous sommes lancés dans la première expédition «Mer Noire» à bord d'un bateau ukrainien, le «Prof. Vodyanitsky». Nous avions pour objectif deux sources de méthane différentes, l'une à 90 m, l'autre à 1980 m de profondeur. L'existence de ces sources a pu être confirmée grâce à un procédé particulier de visualisation des bulles de gaz. A titre de comparaison, nous avons également étudié deux sites de référence sans émission de méthane situés à respectivement 80 et 1660 m de profondeur dans la mer Noire.

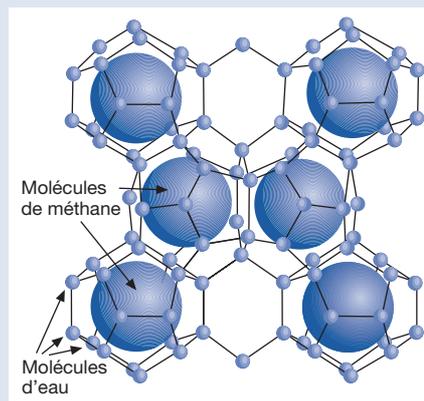


Fig. 1: Structure de l'hydrate de méthane.

Le parcours du méthane dans la colonne d'eau

Nous nous sommes tout d'abord concentrés sur deux questions [3]: Quelles sont les concentrations de méthane au point d'émergence de la source? Et comment le méthane se comporte-t-il lors de sa remontée dans des colonnes d'eau de hauteurs différentes? Pour tenter d'y répondre, nous nous sommes servis d'une rosette pour prélever des échantillons d'eau au-dessus des deux sources de méthane et sur les sites de référence. La rosette est pourvue de 12 bouteilles de 10 l chacune qui peuvent être refermées à différentes profondeurs à partir du bateau.

Les premiers résultats montrent que les concentrations en méthane sont maximales juste à l'aplomb des points d'émergence des deux sources (Fig. 2A + B). Ces concentrations varient peu sur les premiers 40 m au-dessus de la source superficielle et sur les premiers 1500 m au-dessus de la source profonde. Dans le cas de la source profonde, on n'observe une réduction notable de la concentration de méthane que dans les 500 m restant avant d'arriver à la surface de l'eau.

Nous nous attendions par contre à des concentrations de méthane nettement plus faibles sur les sites de référence. Et c'est effectivement ce que nous avons observé dans la zone peu profonde: la concentration de méthane du site de référence y était en moyenne dix fois plus faible qu'au-dessus de la source correspondante (Fig. 2A). A l'inverse, aucune différence n'était mesurable entre la concentration de méthane au-dessus de la source profonde et celle au-dessus du site de référence correspondant. Au vu de ce résultat très surprenant, nous nous



Pour remonter les échantillons d'eau à la surface, on se sert d'un appareil pourvu de 12 bouteilles pouvant être refermées à différentes profondeurs depuis le bateau.

Les gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre absorbent le rayonnement infra-rouge renvoyé par la terre vers l'atmosphère et contribuent de la sorte à un réchauffement de l'atmosphère et donc du climat. Ce processus est également connu sous le terme d'effet de serre. Les principaux gaz à effet de serre, en plus du méthane, sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique, les oxydes d'azote et l'ozone. L'effet de ces gaz est très variable et dépend principalement de leur potentiel spécifique de réchauffement global. Bien que le méthane ne soit présent dans l'atmosphère qu'à des concentrations très faibles, son rôle ne saurait être négligé puisqu'il est près de 20 fois plus puissant que le gaz carbonique. Notons cependant que sans les gaz à effet de serre, la terre ne serait pas habitable, sa température moyenne étant de -18°C au lieu des 15°C que nous connaissons actuellement.

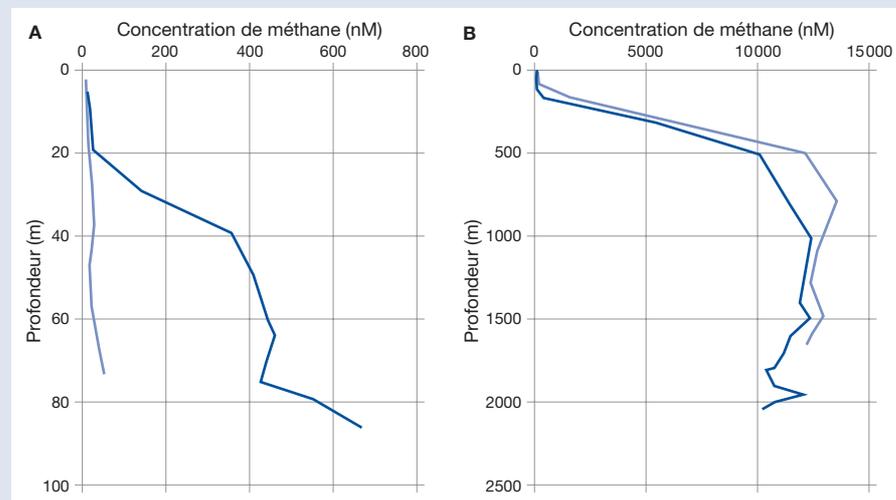


Fig. 2: Concentrations de méthane dans la colonne d'eau à l'aplomb de deux sources de méthane (en bleu foncé) et de deux sites de référence sans dégagement de méthane (en bleu clair) situés (A) en eaux peu profondes ou (B) en eaux profondes.

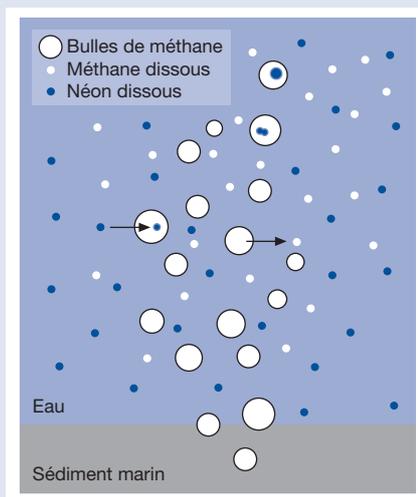


Fig. 3: Echange gazeux entre les bulles de méthane dégagées par la source et l'eau profonde environnante. Une partie du néon dissous dans l'eau diffuse dans les bulles sous l'effet de la différence de concentration pour être remplacée par une quantité correspondante de méthane qui se dissout dans l'eau.

sommes demandés si la résolution de la méthode employée pour doser le méthane, la chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme, permettait de détecter une différence de concentration aussi faible.

Face à cette incertitude, nous avons eu recours à une deuxième méthode de mesure basée sur la distribution d'un gaz rare, le néon (voir encadré). Normalement, la concentration de néon devrait être quasiment constante dans tous les fonds marins de la mer Noire. Un abaissement de la concentration de néon dans l'eau au-dessus d'un point de dégagement de méthane serait donc le signe d'échanges gazeux entre les bulles de méthane émergeant de la source et l'eau profonde environnante. Une partie du néon dissous dans l'eau diffuserait dans les bulles sous l'effet de la différence de concentration et serait remplacée par

une quantité correspondante de méthane qui se dissoudrait dans l'eau (Fig. 3). Conformément à cette théorie, nous avons effectivement mesuré une concentration de néon plus faible à l'aplomb de la source de méthane qu'au-dessus du site de référence, ce qui, intégré sur le temps, indique une concentration de méthane environ 20% supérieure au-dessus de la source.

Y a-t-il dégradation microbienne du méthane dans la colonne d'eau?

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à savoir si le méthane était dégradé par l'action de bactéries lors de son ascension dans la colonne d'eau [4]. La baisse continue de la concentration de méthane du fond marin vers la surface de l'eau que nous avons observée semble l'indiquer (Fig. 2A + B). Les bactéries qui effectuent l'oxydation du méthane font partie des Euryarchaeota, l'un des deux sous-groupes des Archaea. Dans les couches supérieures de la mer, le méthane est oxydé en présence d'oxygène en gaz carbonique sous l'action de bactéries aérobies. Par contre, en profondeur, où le milieu est anaérobie, le méthane est oxydé à partir du sulfate et non de l'oxygène. Ce processus fait intervenir un assemblage microbien bien particulier: alors que des bactéries sulfato-réductrices réduisent les sulfates en sulfites, des Archaea oxydent le méthane en dioxyde de carbone.

Les techniques de biologie moléculaire permettent aujourd'hui d'identifier ces différents groupes de prokaryotes et de déterminer leur contribution relative au nombre total de bactéries dans l'eau. Nous avons ainsi constaté que les échantillons prélevés au-dessus des sources de méthane contenaient en moyenne 25% d'Archaea de plus que ceux issus des sites de référence. Nos

résultats indiquent que les microorganismes qui oxydent le méthane sont présents aussi bien à l'aplomb des sources profondes qu'au-dessus des sources plus superficielles et qu'ils oxydent le méthane en CO_2 aux deux profondeurs. Reste encore à savoir exactement si le méthane dégagé à partir des sources que nous avons étudiées parvient à la surface de la mer et s'il est alors libéré dans l'atmosphère. Les modélisations les plus récentes indiquent que la quantité de méthane libérée dans l'atmosphère est très faible ou quasiment nulle si le gaz provient de sources situées à plus de 100 m de profondeur [5]. Nous nous consacrons actuellement à l'étude des échantillons raménés de la mer Noire lors de l'expédition de 2004. Le projet CRIMEA se poursuit jusqu'au début de 2006 et nous espérons obtenir d'ici là une image claire de la situation.

Le projet CRIMEA est financé par l'Union européenne et par l'Office fédéral suisse de l'éducation et de la science.



Carsten Schubert, géologue, dirige l'équipe de «Biogéochimie» au sein du département «Eaux superficielles» de l'EAWAG. Ses principaux axes de recherche sont: l'oxydation anaérobie du méthane et de l'ammonium dans les systèmes marins et limniques et la dégradation du carbone organique dans les sédiments.

Coauteurs: Edith Kaiser, Lucia Klausner, Christian Holzner, Dan McGinnis, Rolf Kipfer, Johny Wüest, Bernhard Wehrli.



Research Center Ocean Margins, Bremen

De l'hydrate de méthane confiné dans un échantillon de sédiment marin.

La méthode au néon

Le néon est un gaz naturellement contenu dans l'air. Une certaine quantité de néon pénètre dans l'eau dès que celle-ci entre en contact avec l'air par la voie d'échanges gazeux à l'interface eau-air. La concentration de néon dans l'eau dépend de la concentration d'équilibre qui est déterminée elle-même par les conditions physico-chimiques (température ou salinité par exemple) régissant au moment de l'échange gazeux. Etant donné que la mer Noire présente une stratification stable de ses eaux et que le néon est un gaz inerte, les eaux profondes ont une concentration spécifique. Toute variation de cette concentration trahit l'intervention de processus physiques.

- [1] Kvenvolden K.A. (1988): Methane hydrates and global climate. *Global Biogeochemical Cycles* 2, 221–229.
- [2] Norris R.D. & Röhl U. (1999): Carbon cycling and chronology of climate warming during the Palaeocene/Eocene transition. *Nature* 401, 775–778.
- [3] Schubert C.J., Kaiser E., Kuypers M.M.M., Wehrli B. (2004): Methane formation and oxidation in the Black Sea. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 02867.
- [4] Kaiser E., Schubert C.J., Wehrli B. (2003): Anaerobic oxidation of methane in the water column of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, A193–A193 Suppl.
- [5] McGinnis D.F., Wüest A., Schubert C.J., Klausner L., Lorke A., Kipfer R. (2005): Upward flux of methane in the Black Sea: Does it reach the atmosphere? In: *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management* (eds. Lee & Lam). Taylor and Francis Group, London p. 423–429.

Publications

Les publications sont disponibles en fichiers pdf sous: <http://library/ris/risweb.isa>

Recherche possible par auteur, titre ou mot clé. En cas de problème, veuillez contacter: bibliothek@eawag.ch

- [3342] **Müller R., Meng H.J., Enz C.A., Bia M.M., Schäffer E.** (2002): Forecasting Year-class Strength and Yield of Lake Hallwil Whitefish in an Eutrophic Lake. *Arch. Hydrobiol., Spec. Issues Advances in Limnology* 57, 615–625.
- [3343] **Enz C.A., Müller R., Bia M.M., Heeb J.** (2002): A Population Dynamics Model for Evaluating Mortality Factors in Whitefish (*Coregonus suidteri*) Larvae in Lake Hallwil. *Arch. Hydrobiol., Spec. Issues Advances in Limnology* 57, 343–358.
- [3344] **Behra R., Landwehrjohann R., Vogel K., Wagner B., Sigg L.** (2002): Copper and Zinc Content of Periphyton from Two Rivers as a Function of Dissolved Metal Concentration. *Aquat. Sci.* 64 (3), 300–306.
- [3345] **Hare M., Deadman P., Lim K.** (2002): Towards a Taxonomy of Agent-based Simulation Models in Environmental Management. *Proc. «Socioeconomic Systems»*, Vol. 3, F. Ghassemi et al. (Eds.), Internat. Congress on Modelling and Simulation 10–13 December 2001, Canberra, Australia», pp. 1115–1122.
- [3346] **Hare M., Heeb J., Pahl-Wostl C.** (2002): An Applied Methodology for Participatory Model Building of Agent-based Models for Urban Water Management. 3rd Workshop on Agent-Based Simulation, C. Urban (Ed.), April 7–9, 2002, Passau, Germany, pp. 61–66.
- [3347] **Reichert P., Borsuk M.E.** (2002): Uncertainty in Model Predictions: Does it Preclude Effective Decision Support? *Proc. Conf. International Environmental Modelling and Software Society*, A.E. Rizzoli et al. (Eds.), June 24–27, 2002, Lugano, Switzerland, Vol. 2, 43–48.
- [3348] **Borsuk M.E., Burkhardt-Holm P., Reichert P.** (2002): A Bayesian Network for Investigating the Decline in Fish Catch in Switzerland. *Proc. Conf. Internat. Environmental Modelling and Software Society*, A.E. Rizzoli et al. (Eds.), Lugano, Switzerland, Vol. 2, 108–113.
- [3349] **Tillmann D.E., Larsen T.A., Pahl-Wostl C., Gujer W.** (2002): Risikoverminderung durch Steuerung des Wasserverbrauchs. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 82 (10), 743–750.
- [3350] **Pahl-Wostl C.** (2002): Participative and Stakeholder-based Policy Design, Evaluation and Modeling Processes. *Integrated Assessment* 3 (1), 3–14.
- [3351] **Wedekind C., Müller R., Spicher H.** (2001): Potential Genetic Benefits of Mate Selection in Whitefish. *J. Evolut. Biol.* 14, 980–986.
- [3352] **Yang H., Abbaspour K.C., Zhang Y.L.** (2002): Desertification Control and Sandstorm Mitigation in the Area Encircling Beijing – with a Discussion on the Application of Bayesian Network and Hydrological Modeling. In: «Sustainable Utilization of Global Soil and Water Resources», *Proc. 12th International Soil Conservation Organization Conference*, Beijing, China, Vol. IV, 1–6.
- [3353] **Peters I., Brassel K.-H., Spörri C.** (2002): A Microsimulation Model for Assessing Urine Flows in Urban Wastewater Management. In: «Integrated Assessment and Decision Support», A.E. Rizzoli et al. (Eds.), *Proc. 1st Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society SEA*, Como, pp. 508–513.
- [3354] **Hare M., Letcher R.A., Jakeman A.J.** (2002): Participatory Natural Resource Management: A Comparison of Four Case Studies. In: «Integrated Assessment and Decision Support», A.E. Rizzoli et al. (Eds.), *Proc. 1st Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, Vol. 3 SEA, Como, pp. 73–78.
- [3355] **Borsuk M.E., Powers S.P., Peterson C.H.** (2002): A Survival Model of the Effects of Bottom-water Hypoxia on the Population Density of an Estuarine Clam (*Macoma balthica*). *Canad. J. Fish. Aquat. Sci.* 59, 1266–1275.
- [3356] **Borsuk M.E., Stow C.A., Reckhow K.H.** (2002): Predicting the Frequency of Water Quality Standard Violations: A Probabilistic Approach for TMDL Development. *Environ. Sci. Technol.* 36 (10), 2109–2115.
- [3357] **Belevi H.** (2002): Material Flow Analysis as a Strategic Planning Tool for Regional Waste Water and Solid Waste Management. *Proc. Workshop «Globale Zukunft: Kreislaufwirtschaftskonzepte im kommunalen Abwasser- und Fäkalienmanagement*. München, Deutschland, 15 p.
- [3358] **Berg M., Hug S., van der Meer J.R., Zobrist J.** (2002): Neue Herausforderung: Arsen im Trinkwasser. *Aqua Press Internat.* 4, 15–17.
- [3359] **Hooper D.U., Solan M., Symstad A., Díaz S., Gessner M.O., Buchmann N., Dégrange V., Grime P., Hulot F., Mermillod-Blondin F., Roy J., Spehn E., van Peer L.** (2002): Species Diversity, Functional Diversity and Ecosystem Functioning. In: «Biodiversity and Ecosystem Functioning – Synthesis and Perspectives», M. Loreau et al. (Eds.), Oxford University Press, Oxford, UK, p. 195–208.
- [3360] **Maurer M., Muncke J., Larsen T.A.** (2002): Technologies for Nitrogen Recovery and Reuse. In: «Water Recycling and Resource Recovery in Industry». P. Lens et al. (Eds.), IWA Publishing, London, p. 491–510.
- [3361] **Tockner K.** (2002): Ausgedehnte Wildflusslandschaft Hochwasserschutz bedroht. *Garten+Landschaft* 12, 42.
- [3362] **Snyder E.B., Robinson C.T., Minshall G.W., Rushforth S.R.** (2002): Regional Patterns in Periphyton Accrual and Diatom Assemblage Structure in a Heterogeneous Nutrient Landscape. *Canad. J. Fish. & Aquat. Sci.* 59, 564–577.
- [3363] **Krivova N.A., Solanki S.K., Beer J.** (2002): Was One Sunspot Cycle in the 18th Century Really Lost? *Astronomy & Astrophysics* 396, 235–242.
- [3364] **Müller R., Bia M.M.** (2001): Poissons à jeun: les petits corégones du lac des Quatre-Cantons. Effets de la ré-oligotrophisation sur la population de petits corégones et conséquences pour l'exploitation piscicole. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP/BUWAL), Informations concernant la pêche no 68, Berne, p. 37–49.
- [3365] **Mondi C., Leifer K., Mavrocordatos D., Perret D.** (2002): Analytical Electron Microscopy as a Tool for Accessing Colloid Formation Process in Natural Waters. *J. Microscopy* 207 (3), 180–190.
- [3366] **Boller M.** (2002): Membranes – Water Treatment Technology of the Future. *Proc. Internat. Water Treatment Technology Conference*, Kunming, China.
- [3367] **Steiner M., Boller M.** (2002): Meteorwasser von Kupfer-Dachflächen muss künftig gefiltert werden. *Kommunalmagazin* 19 (10), 23–25.
- [3368] **Rothenberger D., Moosmann L., Boller M.** (2002): Reformen in der Schweizer Siedlungswasserwirtschaft – EAWAG-Workshop – ein zusammenfassender Rückblick, GWA Gas, Wasser, Abwasser 82 (9), 691–694.
- [3369] **Furumai H., Balmer H., Boller M.** (2002): Dynamic Behavior of Suspended Pollutants and Particle Size Distribution in Highway Runoff. *Water Sci. Technol.* 46 (11–12)
- [3370] **Shieh S.-H., Ward J.V., Kondratieff B.C.** (2002): Energy Flow Through Macroinvertebrates in a Polluted Plains Stream. *J. North Amer. Benthol. Soc.* 21 (4), 660–675.
- [3371] **Mavrocordatos D., Kaegi R., Schmatloch V.** (2002): Fractal Analysis of Wood Combustion Aggregates by Contact Mode Atomic Force Microscopy. *Atmospheric Environment* 36, 5653–5660.
- [3372] **Boller M., Steiner M.** (2002): Wasser vom Dach – Menge und Qualität. In: «Dächer – leistungsfähig und ausdrucksstark mit Holz». 34. SAH-Fortbildungskurs, Schweiz. Arbeitsgemein-

- schaft für Holzforschung, Tagungsband, Lignum, Zürich, S. 125–135. ISBN 3-906703-14-2.
- [3373] **Lienert J., Larsen T.A.** (2002): Urinseparierung – eine Alternative für die schweizerische Siedlungswasserwirtschaft? GWA Gas, Wasser, Abwasser 82 (11), 819–826.
- [3374] **Medilanski E., Kaufmann K., Wick L.Y., Wanner O., Harms H.** (2002): Influence of the Surface Topography of Stainless Steel on Bacterial Adhesion. Biofouling 18 (3), 193–203.
- [3375] **Larsen T.A., Gujer W.** (2002): Waste Design, Source Control und On-Site-Technologien: Der Weg zu einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. Korrespondenz Abwasser 49 (10), 1372–1379.
- [3376] **Burgherr P., Ward J.V., Robinson C.T.** (2002): Seasonal Variation in Zoobenthos Across Habitat Gradients in an Alpine Glacial Floodplain (Val Roseg, Swiss Alps). J. North Amer. Benthol. Soc. 27 (4), 561–575.
- [3377] **Holocher J., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Hofer M., Brennwald M., Kinzelbach W., Kipfer R.** (2002): Experimental Investigations on the Formation of Excess Air in Quasi-saturated Porous Media. Geochim. Cosmochim. Acta 66 (23), 4103–4117.
- [3378] **Friedl G., Wüest A.** (2002): Disrupting Biogeochemical Cycles – Consequences of Damming. Aquat. Sci. 64 (1), 55–65.
- [3379] **Lorke A., Wüest A.** (2002): Probability Density of Displacement and Overturning Length Scales under Diverse Stratification. J. Geophys. Res. 107 (C12), 7-1–7-11.
- [3380] **Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A.** (2002): Application of $k-\epsilon$ Turbulence Models to Enclose Basins: The Role of Internal seiches. J. Geophys. Res. 107 (C12), 23-1–23-13.
- [3381] **Suter M.J.-F., Aerni H.-R., Kobler B., Fallner P., Rutishauser B.V., Wettstein F.E., Burkhardt-Holm P., Fischer R., Giger W., Hungerbühler A., Peter A., Schönenberger R., Eggen R.I.L.** (2002): The Combination of Biological and Chemical Analysis for the Determination of Estrogenicity in Swiss Wastewater Treatment Plant Effluents. Center of Excellence in Analytical Chemistry, ETH Zurich, Annual Report 2001, 14–18.
- [3382] **Lämmlli C.** (2002): Comparison of Two Functional Gene Clusters for Degradation of Chlorocatechols Present on Plasmid pJP4 in *Ralstonia eutropha* JMP134. Diss. ETHZ No. 14 543, Zurich.
- [3383] **Gessner M.O. Schmitt A.L.** (1996): Use of Solid-Phase Extraction to Determine Ergosterol Concentrations in Plant Tissue Colonized by Fungi. Appl. Environ. Microbiol. 62 (2), 415–419.
- [3384] **Ammann A.** (2002): Analytik anionischer Schwermetallkomplexe mit IC ICP-MS in der aquatischen Umweltforschung. In: «Ionenanalyse mit modernen Trenntechniken». K. Fischer, D. Jensen (Hrsg.). Proc. 3. Fachtagung, Trier, 26.–27. Februar. Dianox GmbH, Idstein, S. 28–37. ISBN 3-00-010300-7.
- [3385] **Larsen T.A., Lienert J.** (2002): Societal Implications of Re-engineering the Toilet. Extended abstract. Proc. IWA Leading Edge Conference Series: Sustainability in the Water Sector. Venice, Italy, p. 29.
- [3386] **Montangero A., Koné D., Strauss M.** (2002): Planning Towards Improved Excreta Management. Proc. 5th IWA Conference on Small Water and Wastewater Treatment Systems, Istanbul, Turkey.
- [3387] **Hare M., Pahl-Wostl C.** (2002): Stakeholder Categorisation in Participatory Integrated Assessment Processes. Integrated Assessment 3 (1), 50–62.
- [3388] **Pecher K., Haderlein S., Schwarzenbach R.P.** (2002): Reduction of Polyhalogenated Methanes by Surface-bound Fe(II) in Aqueous Suspensions of Iron Oxides. Environ. Sci. Technol. 36 (8), 1734–1741.
- [3389] **Ammann A.A., Hoehn E. Koch S.** (2003): Ground Water Pollution by Roof Runoff Infiltration Evidenced with Multi-Tracer Experiments. Water Res. 37 (5), 1143–1153.
- [3390] **Müller J., Vologina E.G., Sturm M.** (2001): Recent Clay Mineral Distribution as a Possible Indicator for Sediment Sources in the North Basin of Lake Baikal. Russ. Geol. Geophys. 42 (1).
- [3391] **Sulzberger B.** (2002): Why a «New» Journal in Aquatic Sciences? Aquatic Sci. 64 (1), i-ii.
- [3392] **Fux C., Böhler M., Huber P., Siegrist H.-R.** (2001): Stickstoffelimination durch anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox). In: «Der Stickstoff im Wasser/Abwasser». Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Bd. 166, Oldenbourg Verlag, München, S. 35–50.
- [3393] **Escher B.I., Eggen R.I.L., Schreiber U., Schreiber Z., Vye E., Wisner B., Schwarzenbach R.P.** (2002): Baseline Toxicity (Narcosis) of Organic Chemicals Determined by in Vitro Membrane Potential Measurements in Energy-transducing Membranes, Environ. Sci. Technol. 36, 1971–1979.
- [3394] **Wüest A., Lorke A.** (2003): Small-Scale Hydrodynamics in Lakes. Ann. Rev. Fluid Mech. 35, 373–412.
- [3395] **Canonica S., Tratnyek P.G.** (2003): Quantitative Structure-activity Relationships for Oxidation Reactions of Organic Chemicals in Water. Environ. Toxicol. Chem. 22 (8), 1743–1754.
- [3396] **Schleheck D., Lechner M., Schönenberger R., Suter M.J.-F., Cook A.M.** (2003): Desulfonation and Degradation of the Disulfidophenylethercarboxylates from Linear Alkyldi-phenylethersulfonate Surfactants. Appl. Environ. Microbiol. 69 (2), 938–944.
- [3397] **Livingstone D.M.** (2003): Impact of Secular Climate Change on the Thermal Structure of a Large Temperate Central European Lake. Climatic Change 57, 205–225.
- [3398] **Hofstetter T.H., Schwarzenbach R.P., Haderlein S.B.** (2003): Reactivity of Fe(II) Species Associated with Clay Minerals. Environ. Sci. Technol. 37 (3), 519–528.
- [3399] **Wedekind C.** (2002): Induced Hatching to Avoid Infectious Egg Disease in Whitefish. Current Biology, 12 (1), 69–71.
- [3400] **Brunner P.H., Morf L., Rechberger H.** (2002): Thermal Waste Treatment – A Necessary Element for Sustainable Waste Management. In: «Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation», I. Twardowska et al. (Eds.), Elsevier.
- [3401] **Zika U., Peter A.** (2002): The Introduction of Woody Debris into a Channelized Stream: Effect on Trout Populations and Habitat. River Res. Appl. 18 (4), 355–366.
- [3402] **Perlinger J.A., Kalluri V.M., Venkatapathy R., Angst W.** (2002): Addition of Hydrogen Sulfide to Juglone. Environ. Sci. Technol. 36 (12), 2663–2669.
- [3403] **Hausmann S., Lotter A.F., van Leeuwen J.F.N., Ohlendorf C., Lemcke G., Grönlund E., Sturm M.** (2002): Interactions of Climate and Land Use Documented in the Varved Sediments of Seeburgsee in the Swiss Alps. The Holocene 12 (3), 297–289.
- [3404] **Steiner M., Boller M.** (2002): Meteorwasser von Kupfer-Dachflächen muss künftig gefiltert werden. Kommunal Magazin 19 (10), 1–6.
- [3405] **Springael D., Peys K., Rynagaert A., Van Roy S., Hooyberghs L., Ravatn R., Heyndrickx M., van der Meer J.-R., Vandecasteele C., Mergey M., Diels L.** (2002): Community Shifts in a Seeded 3-Chlorobenzoate Degrading Membrane Biofilm Reactor: Indications for Involvement of *in situ* Horizontal Transfer of the *clc*-Element from Inoculum to Contaminat Bacteria. Environ. Microbiol. 4 (2), 70–80.
- [3406] **Minorov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T.** (2002): Radiatively Driven Convection in Ice-Covered Lakes: Observations, Scaling, and Mixed Layer Model. J. Geophys. Res.-Oceans 107 (C4), 7/1–7/16.
- [3407] **Hauger M.B., Rauch W., Linde J.J., Mikkelsen P.S.** (2002): Cost Benefit Risk – a Concept for Management of Integrated urban Wastewater Systems? Water Sci. Technol. 45 (3), 185–193.
- [3408] **Dittrich M., Koschel R.** (2002): Interactions Between Calcite Precipitation (Natural and Artificial) and Phosphorus Cycle in the Hardwater Lake. Hydrobiologia 469 (1–3), 49–57.
- [3409] **Aeschbach-Haertig W., Stute M., Clark J.F., Reuter R.F., Schlosser P.** (2002): A Paleotemperature Record Derived From Dissolved Noble Gases in Groundwater of the Aquia Aquifer (Maryland, USA). Geochim. Cosmochim. Acta 66 (5), 797–817.
- [3410] **Straile D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G.** (2002): The Response of Freshwater Ecosystems to Climate Variability Associated with the Nord Atlantic Oscillation. In: «The North Atlantic Oscillation – Climatic Significance and Environmental Impact», J.W. Hurrell et al. (Eds.), Geophysical Monograph 134, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 263–279.
- [3411] **Kottonau J.** (2002): Simulating the Formation and Change of the Strength of Political Attitudes. Diss. ETHZ No. 14 664, Zurich.
- [3412] **Egli K.R.** (2003): On the Use of Anammox in Treating Ammonium-Rich Wastewater. Diss. ETHZ No. 14 886, Zurich.
- [3413] **Keller B., Bürgi H.R., Sturm M., Spaak P.** (2002): Ehippia and *Daphnia* Abundances Under Changing Trophic Conditions. Verh. Internat. Verein. Limnol. 28, 851–855.
- [3414] **Sonnleitner M.A., Abbaspour K.C., Schulin R.** (2003): Hydraulic and Transport Prop-

- erties of the Plant-Soil System Estimated by Inverse Modelling. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 127–138.
- [3415] **Tockner K.** (2003): Totholz – entsorgungspflichtig oder wertvoll? *Petri Heil* 54 (3), 43.
- [3416] **Wüest A., Moosmann L., Friedl G.** (2003): Alpine Wasserkraftwerke und Ihre «Fernwirkung» auf talwärts liegende Gewässer. *Bull. SEV* 94 (2), 11–14.
- [3417] **Gächter R., Müller B.** (2003): Why the Phosphorus Retention of Lakes Does Not Necessarily Depend on the Oxygen Supply to Their Sediment Surface. *Limnol. Oceanogr.* 48 (2), 929–933.
- [3418] **Matzinger A., Wüest A.** (2001): The Effect of Cascading on Nutrient Pathways and Productivity in Dams – Toward a Sensitivity Analysis. *Proc. 2001 Internat. Sympos. on Environmental Hydrodynamics*, 6 p.
- [3419] **Huber M.M., Canonica S., Park G.Y., von Gunten U.** (2003): Oxidation of Pharmaceuticals During Ozonation and Advanced Oxidation Processes. *Environ. Sci. Technol.* 37 (5), 1016–1024.
- [3420] **Egli T., Köster W.** (2002): From Counting of *E. coli* to Pathogen Detection by Molecular Methods. *Gaia* 11 (4), 259–262.
- [3421] **Bürgi H.R.** (1999): Veränderungen der Phytoplanktondiversität durch Nährstoffabnahme und seeinterne Sanierungsmassnahmen im Baldeggersee und Sempachersee. *Protokoll 33. Tagung Cercle'eau, Verein. kant. Gewässerschutzlimnologen und -chemiker*, 25. März 1999, Wasserver-sorgung Zurich.
- [3422] **Tixier C., Singer H.P., Oellers S., Müller S.R.** (2003): Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibrac Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters. *Environ. Sci. Technol.* 37 (6), 1061–1068.
- [3423] **Hofer M., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Brennwald M., Holocher J., Livingstone D.M., Romanovski V., Kipfer R.** (2002): Rapid Deep-Water Renewal in Lake Issyk-Kul (Kyrgyzstan) Indicated by Transient Tracers. *Limnol. Oceanogr.* 47 (4), 1210–1216.
- [3424] **Zehnder A.J.B., Yang H., Schertenleib R.** (2003): Water Issues: The Need for Action at Different Levels. *Aquat. Sci.* 65, 1–20.
- [3425] **Zwank L., Berg M., Schmidt T.C., Haderlein S.B., Schwarzenbach R.P.** (2003): Compound-Specific Stable Isotope Analysis of Organic Groundwater Contaminants: Environmental Applications and Analytical Challenges. *Chimia* 57 (1–2), 44.
- [3426] **Nozhevnikova A.N., Zepp K., Vazquez F., Zehnder A.J.B., Holliger C.** (2003): Evidence for the Existence of Psychrophilic Methanogenic Communities in Anoxic Sediments of Deep Lakes. *Appl. Environ. Microbiol.* 69 (3), 1832–1835.
- [3427] **Uehlinger U., Malard F., Ward J.V.** (2003): Thermal Patterns in the Surface Waters of a Glacial River Corridor (Val Roseg, Switzerland). *Freshwater Biol.* 48 (2), 284–300.
- [3428] **Mash H.E., Chin Y.P., Sigg L., Hari R., Xue H.B.** (2003): Complexation of Copper by Zwitterionic Aminosulfonic (Good) Buffers. *Anal. Chem.* 75 (3), 671–677.
- [3429] **von Gunten U.** (2003): Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics and Product Formation. *Water Res.* 37 (7), 1443–1467.
- [3430] **von Gunten U.** (2003): Ozonation of Drinking Water: Part II. Disinfection and By-Product Formation in Presence of Bromide, Iodide or Chlorine. *Water Res.* 37 (7), 1469–1487.
- [3431] **Gujer W., von Gunten U.** (2003): A Stochastic Model of an Ozonation Reactor. *Water Res.* 37 (7), 1667–1677.
- [3432] **Beer J.** (1995): Modulation of the Cosmic Radiation and its Manifestation in Cosmogenic Isotopes. In: «Highlights of Astronomy», I. Appenzeller (Ed.), Vol. 10, IAU, 313–316.
- [3433] **Shen C., Liu T., Yi W., Sun Y., Jiang M., Beer J., Bonani G.** (1998): ¹⁴C Dating of Terrestrial Moss in Tern Lake Deposits, Antarctica. *Radio-carbon* 40 (2), 849–854.
- [3434] **Peeters F., Beyerle U., Aeschbach-Hertig W., Holocher J., Brennwald M.S., Kipfer R.** (2003): Improving Noble Gas Based Paleoclimate Reconstruction and Groundwater Dating Using ²⁰Ne/²²Ne Ratios. *Geochim. Cosmochim. Acta* 67 (4), 587–600.
- [3435] **Ivy-Ochs S., Schlüchter C., Prentice M., Kubid P.W., Beer J.** (1997): ¹⁰Be and ²⁶Al Exposure Ages for the Sirius Group at Mount Fleming, Mount Feather and Table Mountain and the Plateau Surface at Table Mountain. In: «The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes», C.A. Ricci (Ed.), Terra Antarctica Publication, pp. 1153–1158.
- [3436] **Anklin M., Barnola M., Beer J., et al.** (1993): Climate Instability During the Last Interglacial Period Recorded in the GRIP Ice Core. *Nature* 364, 203–207.
- [3437] **Beer J., Raisbeck G.M., Yiou F.** (1991): Time Variations of ¹⁰Be and Solar Activity. In: «The Sun in Time», C.P. Sonett et al. (Eds.), The University of Arizona Press, Tucson, pp. 343–359.
- [3438] **Müller T.A., Werlen C., Spain J., van der Meer J.R.** (2003): Evolution of a Chlorobenzene Degradative Pathway Among Bacteria in a Contaminated Groundwater Mediated by a Genomic Island in *Ralstonia*. *Environ. Microbiol.* 5 (3), 163–173.
- [3439] **Synal H.-A., Beer J., Bonani G., Lukaszczuk C., Suter M.** (1994): ³⁶Cl Measurements at the Zurich AMS Facility. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* B92, 79–84.
- [3440] **Synal H.-A., Beer J., Bonani G., Suter M., Wölfli W.** (1990): Atmospheric Transport of Bomb-Produced ³⁶Cl. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* B52, 483–488.
- [3441] **Scheffel C., Blinov A., Massonet S., Sachsenhauser H., Stan-Sion C., Beer J., Synal H.-A., Kubid P.W., Kaba M., Nolte E.** (1999): ³⁶Cl in Modern Atmospheric Precipitation. *Geophys. Res. Lett.* 26 (10), 1401–1404.
- [3442] **Henken-Mellies W.U., Beer J., Heller F., Hsü K.J., Shen C., Bonani G., Hofmann H.J., Suter M., Wölfli W.** (1990): ¹⁰Be and ⁹Be in South Atlantic DSDP Site 519: Relation to Geomagnetic Reversals and to Sediment Composition. *Earth & Planetary Sci. Lett.* 98, 257–276.
- [3443] **Blinov A., Massonet S., Sachsenhauser H., Stan-Sion C., Lazarev V., Beer J., Synal H.-A., Kaba M., Masarik J., Nolte E.** (2000): An Ex-
- cess of ³⁶Cl in Modern Atmospheric Precipitation. *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.* B172, 537–544.
- [3444] **Beyerle U., Ruedi J., Leuenberger M., Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Kipfer R., Do-dol A.** (2003): Evidence for Periods of Wetter and Cooler Climate in the Sahel Between 6 and 40 kyr BP Derived from Groundwater. *Geophys. Res. Lett.* 30 (4), 22/1–22/4.
- [3445] **Ivy-Ochs S., Schluchter C., Kubik P.W., Synal H.A., Beer J., Kerschner H.** (1996): The Exposure Age of an Egesen Moraine at Julier Pass, Switzerland Measured with the Cosmogenic Radionuclides ¹⁰Be, ²⁶Al and ³⁶Cl. *Eclog. Geol. Helv.* 89 (3), 1049–1063.
- [3446] **Eugster O., Beer J., Burger M., Finkel R.C., Hofmann H.J., Krähenbühl U., Michel T., Synal H.A., Wölfli W.** (1991): History of the Paired Lunar Meteorites MAC88104 and MAC88105 Derived from Noble Gas Isotopes, Radionuclides, and Some Chemical Abundances. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 3139–3148.
- [3447] **Dowgiallo J., Nowicki Z., Beer J., Bonani G., Suter M., Synal H.A., Wölfli W.** (1990): ³⁶Cl in Ground Water of the Mazowsze Basin (Poland). *J. Hydrol.* 118, 373–385.
- [3448] **Baltensperger U., Schwikowski M., Gäg-geler H.W., Jost D.T., Beer J., Siegenthaler U., Wagenbach D., Hofmann H.J., Synal H.A.** (1993): Transfer of Atmospheric Constituents into an Alpine Snow Field. *Atmos. Environ.* 27A (12), 1881–1890.
- [3449] **Monaghan M.T., Hieber M., Robinson C.T., Spaak P., Ward J.V.** (2002): Spatial Patterns of Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera Diversity in Fragmented Alpine Streams. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28, 1429–1435.
- [3450] **Harder A.** (2002): Assessment of the Risk Potential of Reactive Chemicals with Multiple Modes of Toxic Action. *Diss. ETHZ Nr. 14 966* Zurich.
- [3451] **Claret C., Ward J.V., Tockner K.** (2002): Temperature Heterogeneity of Interstitial Water in Island-Associated Water Bodies of a Dynamic Flood Plain. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28, 345–351.
- [3452] **Arscott D.B., Glatthaar R., Tockner K., Ward J.V.** (2002): Larval Black Fly (Diptera: Simuliidae) Distribution and Diversity Along a Floodplain River in the Alps (Tagliamento River, Italy). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28, 524–531.
- [3453] **Hügel K.** (2003): Ökobilanzen in der Siedlungswasserwirtschaft. *Schr. Institut für Hydro-mechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW)*, Bd. 12, Zurich, VIII + 104 S. ISBN 3-906445-12-7
- [3454] **Aeschbach-Hertig W., Hofer M., Schmid M., Kipfer R., Imboden D.M.** (2002): The Physical Structure and Dynamics of a Deep, Meromictic Crater Lake (Lac Pavin, France). *Hydrobiologia* 487 (1), 111–136.
- [3455] **Holocher J., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Kinzelbach W., Kipfer R.** (2003): Kinetic Model of Gas Bubble Dissolution in Groundwater and its Implications for the Dissolved Gas Composition. *Environ. Sci. Technol.* 37 (7), 1337–1343.
- [3456] **Marchetti F., Fravezzi L., Buesing N.** (2000): Nutrient Loading from the Sarca River into

- Lake Garda, Italy. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 3129–3131.
- [3457] **Rubli S., Belevi H., Baccini P.** (2003): Optimizing Municipal Solid Waste Combustion Through Organic and Elemental Carbon as Indicators. *Environ. Sci. Technol.* 37 (5), 1025–1030.
- [3458] **Reichert P., Wanner O.** (1997): Movement of Solids in Biofilms: Significance of Liquid Phase Transport. *Water Sci. Technol.* 36 (1), 321–328.
- [3459] **Schellenberg E.T., Hartmann U., Zah R., Meyer E.I.** (2001): Response of the Epibenthic and Hyorheic Invertebrates to Stream Drying in a Prealpine River. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 3733–3737.
- [3460] **Zah R., Burgherr P., Bernasconi S.M., Uehlinger U.** (2000): Contribution of Organic Resources to a Glacial Stream (Val Roseg, Swiss Alps) – a Stable Isotope Study. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 1635–1639.
- [3461] **Escher B.I., Hunziker R.W., Schwarzenbach R.P.** (2001): Interaction of Phenolic Uncouplers in Binary Mixtures: Concentration-Additive and Synergistic Effects. *Environ. Sci. Technol.* 35 (19), 3905–3914.
- [3462] **Flaim G., Corradini F., Buesing N.** (2001): Anthropogenically Induced Phytoplankton Blooms in Lake Serrai. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 3370–3373.
- [3463] **Medilanski E., Wick L.Y., Wanner O., Harms H.** (2003): Mutual Influences of *Pseudomonas aeruginosa* and *Desulfovibrio desulfuricans* on Their Adhesion to Stainless Steel. *Biofouling* 19 (2), 125–132.
- [3464] **Spadini L., Sturm M., Wehrli B., Bott M.** (2003): Analysis and Dating of Pb, Cd, Cu, Zn Sediment Profiles from the Vitznau Basin of Lake Lucerne (Switzerland). *Rev. Géogr Alpine* 91 (1), 41–48.
- [3465] **Udert K.M., Larsen T.A., Biebow M., Gujer W.** (2003): Urea Hydrolysis and Precipitation Dynamics in a Urine-Collection System. *Water Res.* 37, 2571–2582.
- [3466] **Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W.** (2003): Estimating the Precipitation Potential in Urine-Collecting Systems. *Water Res.* 37 (11), 2667–2677.
- [3467] **Shoemaker J., Reeves G.T., Gupta S., Pilyugin S.S., Egli T., Narang A.** (2003): The Dynamics of Single-Substrate Continuous Cultures: the Role of Transport Enzymes. *J. Theor. Biol.* 222 (3), 307–322.
- [3468] **Köster W., Landini P.** (2003): Qualitätskontrolle: Molekulare Methoden sind im Kommen. *Kommunalmagazin* 20 (4), 32–34.
- [3469] **Alex J., Rieger L., Winkler S., Siegrist H.** (2003): Progress in Sensor Technology – Progress in Process Control? Part II: Results From a Simulation Benchmark Study. *Water Sci. Technol.* 47 (2), 113–120.
- [3470] **Buesing N.** (2002): Microbial Productivity and Organic Matter Flow in a Littoral Reed Stand. Diss. ETHZ No. 14 667, Zurich.
- [3471] **Boller M., Mavrocordatos D.** (2003): Membrane Applications in Western Europe: Raw Water Constituents Interfering with Membranes. In: «Water Resources and Water Supply in the 21st Century», Y. Watanabe, N. Funamizu (Eds.), Hokkaido University Press, Sapporo, 2003, pp. 109–126. ISBN 4-8329-0312-8
- [3472] **Kulbe T., Niederreiter jr. R.** (2003): Freeze Coring of Soft Surface Sediments at a Water Depth of Several Hundred Meters. *J. Paleolimnol.* 29 (2), 257–263.
- [3473] **Mavrocordatos D., Steiner M., Boller M.** (2003): Analytical Electron Microscopy and Focused Ion Beam: Complementary Tool for the Imaging of Copper Sorption onto Iron Oxide Aggregates. *J. Microscopy* 210 (1), 45–52.
- [3474] **Fabian D.** (2002): Sedimentation and Remobilisation of Metals in Baldeggersee: from Early Diagenesis to Paleo-Indicators. Diss. ETHZ No. 14 917, Zurich.
- [3475] **von Gunten U.** (2003): Trinkwasser in der Schweiz – Ein alltägliches Gut. Bull. ETHZ Nr. 289, 40–44, Zürich.
- [3476] **Giger W., Alder A.C., Golet E.M., Kohler H.-P.E., McArdell C.S., Molnar E., Schaffner C.** (2003): Chemische Spurensuche – Neue Verunreinigungen in Abwasser und Gewässern. Bull. ETHZ Nr. 289, 46–49, Zürich.
- [3477] **Kipfer R., Frank M.** (2003): Umweltarchiv Wasser – Wasser im Spiegel des Klimas. Bull. ETHZ Nr. 289, 50–53, Zürich.
- [3478] **Tockner K.** (2003): The Tagliamento River: An Ecosystem of European Importance. *FBA news* No. 22, 6.
- [3479] **Amirbahman A., Schönenberger R., Furrer G., Zobrist J.** (2003): Experimental Study and Steady-state Simulation of Biogeochemical Processes in Laboratory Columns with Aquifer Material. *J. Contam. Hydrol.* 64, 169–190.
- [3480] **Eggen R.I.L.** (2003): Biologische Tracer in der Ökotoxikologie. *Der Gartenbau* 22, 12–13.
- [3481] **Winder M., Boersma M., Spaak P.** (2003): On the Cost of Vertical Migration: Are Feeding Conditions Really Worse at Greater Depths? *Freshwater Biol.* 48, 383–393.
- [3482] **Lass S., Spaak P.** (2003): Temperature Effects on Chemical Signalling in a Predator-Prey System. *Freshwater Biol.* 48, 669–677.
- [3483] **Winder M., Bürgi H.R., Spaak P.** (2003): Mechanisms Regulating Zooplankton Populations in a High-Mountain Lake. *Freshwater Biol.* 48, 795–809.
- [3484] **Zehnder A.J.B.** (2003): Editorial: Wasserfragen – was kann die Schweiz beitragen? / Quelle pourrait être la contribution de la Suisse à la résolution du problème de l'eau? *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 83 (6), 379–380.
- [3485] **Fabian D., Zhou Z., Wehrli B., Friedl G.** (2003): Diagenetic Cycling of Arsenic in the Sediments of Eutrophic Baldeggersee, Switzerland. *Appl. Geochem.* 18, 1497–1506.
- [3486] **Elsner M.** (2002): Reductive Dehalogenation of Chlorinated Hydrocarbons by Surface-Bound Fe(II) – Kinetic and Mechanistic Aspects. Diss. ETH No. 14 955, Zurich.
- [3487] **Albrecht A.** (2003): Validating Riverine Transport and Speciation Models Using Nuclear Reactor-derived Radiocobalt. *J. Environ. Radioactivity* 66, 295–307.
- [3488] **Duong H.A., Berg M., Hoang M.H., Pham H.V., Gallard H., Giger W., von Gunten U.** (2003): Trihalomethane Formation by Chlorination of Ammonium- and Bromide-containing Groundwater in Water Supplies of Hanoi, Vietnam. *Water Res.* 37, 3242–3252.
- [3489] **Hieber M., Robinson C., Uehlinger U.** (2003): Seasonal and Diel Patterns of Invertebrate Drift in Different Alpine Stream Types. *Freshwater Biol.* 48, 1078–1092.
- [3490] **Baccini P.** (1999): Bauen und Nachhaltigkeit. In: «Zukunft der Nachhaltigkeit», Ökosoziales Forum Österreich, Wien, S. 114–121.
- [3491] **Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J., Granin N.G., Jewson D.H., Ryves D.B., Sturm M.** (2003): Assessing the Potential for Developing Internal Diatom-based Transfer Functions for Lake Baikal. *Limnol. Oceanogr.* 48 (3), 1183–1192.
- [3492] **Bürgi H.R., Bührer H., Keller B.** (2003): Long-Term Changes in Functional Properties and Biodiversity of Plankton in Lake Greifensee (Switzerland) in Response to Phosphorus Reduction. *Aquatic Ecosystem Health & Manag.* 6 (2), 147–158.
- [3493] **Egli K., Langer C., Siegrist H., Zehnder A.J.B., Wagner M., van der Meer J.R.** (2003): Community Analysis of Ammonia and Nitrite Oxidizers During Start-up of Nitrification Reactors. *Appl. Environ. Microbiol.* 69 (6), 3213–3222.
- [3494] **Sentchilo V., Ravatn R., Werlen C., Zehnder A.J.B., van der Meer J.R.** (2003): Unusual Integrase Gene Expression on the *clc* Genomic Island in *Pseudomonas* sp. Strain B13. *J. Bacteriol.* 185 (15), 4530–4538 (2003)
- [3495] **Vologina E.G., Sturm M., Vorob'eva S.S., Granina L.Z., Toshchakov S.Yu.** (2003): Character of Sedimentation in Lake Baikal in the Holocene. *Russ. Geol. & Geophys.* 44 (5), 407–421.
- [3496] **Jonas T., Terzhevik A.Y., Mironov D., Wüest A.** (2003): Radiatively Driven Convection in an Ice-covered Lake Investigated by Using Temperature Microstructure Technique. *J. Geophys. Res.* 108 (C6), 14/1–14/18.
- [3497] **Ryves D.B., Jewson D.H., Sturm M., Battarbee R.W., Flower R.J., Mackay A.W., Granin N.G.** (2003): Quantitative and Qualitative Relationships Between Planktonic Diatom Communities and Diatom Assemblages in Sedimenting Material and Surface Sediments in Lake Baikal, Siberia. *Limnol. Oceanogr.* 48 (4), 1643–1661.
- [3498] **Udert K.M., Fux C., Münster M., Larsen T.A., Siegrist H., Gujer W.** (2003): Nitrification and Autotrophic Denitrification of Source-Separated Urine. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 119–130.
- [3499] **Köster W., Egli T., Ashbolt N., Botzenhart K., Burlion N., Endo T., Grimont P., Guillot E., Mabilat C., Newport L., Niemi M., Payment P., Prescott A., Renaud P., Rust A.** (2003): Analytical Methods for Microbiological Water Quality Testing. In: «Assessing Microbial Safety of Drinking Water – Improving Approaches and Methods», Chapter 8, pp. 237–295, OECD-Publ., Paris Cedex. ISBN 92-64-09946-8
- [3500] **Baur I., Johnson C.A.** (2003): Sorption of Selenite and Selenate to Cement Minerals. *Environ. Sci. Technol.* 37 (15), 3442–3447.

- [3501] **Maurer M.** (2003): Nährstoffrecycling in der Siedlungsentwässerung. PUSCH – praktischer umweltschutz schweiz: Thema Umwelt H. 2, 6–7.
- [3502] **Joss A., Monti A., Fux C., Manser R., Rozzi A., Siegrist H.** (2001): Anaerobic Ammonia Oxidation (Anammox) with a Submerged Membrane System. Proc. IWA-Conf. «Membrane technology for waste water reclamation and reuse», Tel-Aviv, 9.–13.9.2001, pp. 90–97.
- [3503] **Eugster W., Kling G., Jonas T., McFadden J.P., Wüest A., MacIntyre S., Chapin III F.S.** (2003): CO₂ Exchange Between Air and Water in an Arctic Alaskan and Midlatitude Swiss Lake: Importance of Convective Mixing. *J. Geophys. Res.* 108 (D12), 7/1–7/14.
- [3504] **van der Meer J.R., Sentschilo V.** (2003): Genomic Islands and the Evolution of Catabolic Pathways in Bacteria. *Current Opinion in Biotechnol.* 14, 248–254.
- [3505] **Maurer M., Schwegler P., Larsen T.A.** (2003): Nutrients in Urine: Energetic Aspects of Removal and Recovery. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 37–46.
- [3506] **Wilsenach J.A., Maurer M., Larsen T.A., van Loosdrecht M.C.M.** (2003): From Waste Treatment to Integrated Resource Management. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 1–9.
- [3507] **Pahl-Wostl C., Schönborn A., Willi N., Muncke J., Larsen T.A.** (2003): Investigating Consumer Attitudes Towards the New Technology of Urine Separation. *Water Sci. Technol.* 48 (1), 57–65.
- [3508] **Lienert J., Haller M., Berner A. Stauffer M., Larsen T.A.** (2003): How Farmers in Switzerland Perceive Fertilizers from Recycled Anthropogenic Nutrients (Urine). *Water Sci. Technol.* 48 (1), 47–56.
- [3509] **Lienert J., Fischer M.** (2003): Habitat Fragmentation Affects the Common Wetland Specialist *Primula farinosa* in North-East Switzerland. *J. Ecology* 91, 587–599.
- [3510] **Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W.** (2003): Biologically Induced Precipitation in Urine-collecting Systems. *Water Sci. & Technol.: Water Supply* 3 (3), 71–78.
- [3511] **Gujer W., Larsen T.A.** (1988): Technologische Anforderungen an eine nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft. In: «Wasserwirtschaft in urbanen Räumen», B. Weigert et al. (Hrsg.), Schr. Wasserforschung, Band 3, Franke, Berlin, 1988, S. 65–82.
- [3512] **Faller P., Kobler B., Peter A., Sumpter J.P., Burkhardt-Holm P.** (2003): Stress Status of Gudgeon (*Gobio gobio*) from Rivers in Switzerland With and Without Input of Sewage Treatment Plant Effluent. *Environ. Toxicol. Chem.* 22 (9), 2063–2072.
- [3513] **Larsen T.A., Gujer W.** (2001): Elimination von Mikroverunreinigungen. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 81 (3), 159–166.
- [3514] **Sentschilo V.** (2003): Molecular Aspects of Catabolic Gene Evolution in *Pseudomonas*. Diss. ETHZ No. 15 178, Zurich.
- [3515] **Lass S., Spaak P.** (2003): Chemically Induced Anti-Predator Defences in Plankton: a Review. *Hydrobiologia* 491, 221–239.
- [3516] **Friedrich J., Dinkel C., Grieder E., Radan S., Secieru D., Steingruber S., Wehrli B.** (2003): Nutrient Uptake and Benthic Regeneration in Danube Delta Lakes. *Biogeochemistry* 64, 373–398.
- [3517] **Sentschilo V., Zehnder A.J.B., van der Meer, J.R.** (2003): Characterization of Two Alternative Promoters for Integrase Expression in the *clc* Genomic Island of *Pseudomonas* sp. Strain B13. *Molecular Microbiol.* 49 (1), 93–104.
- [3518] **Wehrli B.** (2003): Wird der Strom der Forschungsgelder in neue Kanäle gelenkt? (Rezension zu Deutsche Forschungsgemeinschaft (Ed.): Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung – Denkschrift. Weinheim 2003). *Gaia* 12 (3), 215–216.
- [3519] **Escher B.** (2003): Neue Ansätze in Ökotoxikologie und Chemikalienbewertung. *Gaia* 12 (3), 176–180.
- [3520] **Thomann M.P.** (2003): Datenkontrolle von Abwasserreinigungsanlagen mit Massenbilanzen, Experimenten und statistischen Methoden. Diss. ETHZ Nr. 14 824. Schr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW), Bd. 15, Zürich, 243 S. ISBN 3-906445-15-1.
- [3521] **Withers P.J.A., Ulén B., Stamm C., Bechmann M.** (2003): Incidental Phosphorus Losses – Are They Significant and Can They Be Predicted? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 459–468.
- [3522] **Zinn M., Weilenmann H.-U., Hany R., Schmid M., Egli T.** (2003): Tailored Synthesis of Poly([R]-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHB/HV) in *Ralstonia eutropha* DSM 428. *Acta Biotechnol.* 23, 309–316.
- [3523] **Tockner K.** (2003): Pro Tagliamento – Pro Friuli. Der «König der Alpenflüsse» vor seinem Ende? *natur+mensch* 45 (4), 26–27.
- [3524] **Xue H., Nhat P.H., Gächter R., Hooda P.S.** (2003): The Transport of Cu and Zn from Agricultural Soils to Surface Water in a Small Catchment. *Adv. Environ. Res.* 8, 69–76.
- [3525] **Harms H., Volkland H.-P., Repphun G., Hiltbold A., Wanner O., Zehnder A.J.B.** (2003): Action of Chelators on Solid Iron in Phosphate-containing Aqueous Solutions. *Corrosion Sci.* 45 (8), 1717–1732.
- [3526] **Maurer M., Gujer W.** (2003): Ist unsere Abwasserentsorgung nachhaltig? VSA-Sympos. Winterthur.
- [3527] **Peduzzi S.** (2003): Interactions Among Sulfate-reducing and Purple Sulfur Bacteria in the Chemocline of Meromictic Lake Cadagno, Switzerland. Diss. ETHZ No. 15 015, Zurich.
- [3528] **Ohlendorf C.** (1998): High Alpine Lake Sediments as Chronicles for Regional Glacier and Climate History in the Upper Engadine, Southeastern Switzerland. Diss. ETHZ No. 12 705, Zurich.
- [3529] **Udert K.M.** (2003): The Fate of Nitrogen and Phosphorus in Source-Separated Urine. Diss. ETHZ No. 14 847, Schr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW), Bd. 16, Zurich, ISBN 3-906445-16-X
- [3530] **Mian P., Heilmann J., Bürgi H.-R., Sticher O.** (2003): Biological Screening of Terrestrial and Freshwater Cyanobacteria for Antimicrobial Activity, Brine Shrimp Lethality, and Cytotoxicity. *Pharmaceut. Biol.* 41 (4), 243–247.
- [3531] **Yang H., Zhang X., Zehnder A.J.B.** (2003): Water Scarcity, Pricing Mechanism and Institutional Reform in Northern China Irrigated Agriculture. *Agricult. Water Manag.* 61, 143–161.
- [3532] **Gilg R., Inderwildi A., Binggeli S.** (2003): Selbstbewertungsinstrument für die Abwasserentsorgung. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (7), 483–487.
- [3533] **Zehnder A.J.B., Reller A.** (2002): Editorial: Water Issues. *Gaia* 11 (4).
- [3534] **Yang H., Zehnder A.J.B.** (2002): Water Endowments and Virtual Water Trade. *Gaia* 11 (4), 263–266.
- [3535] **Yang H., Reichert P., Abbaspour K.C., Zehnder A.J.B.** (2003): A Water Resources Threshold and Its Implications for Food Security. *Environ. Sci. Technol.* 37 (14), 3048–3054.
- [3536] **Schmid M., Lorke A., Wüest A., Halbwachs M., Tanyileke G.** (2003): Development and Sensitivity Analysis of a Model for Assessing Stratification and Safety of Lake Nyos during Artificial Degassing. *Ocean Dynamics* 53, 288–301.
- [3537] **Müller B., Reinhardt M., Gächter R.** (2003): High Temporal Resolution Monitoring of Inorganic Nitrogen Load in Drainage Waters. *J. Environ. Monit.* 5, 808–812.
- [3538] **Müller B., Wang Y., Dittrich M., Wehrli B.** (2003): Influence of Organic Carbon Decomposition on Calcite Dissolution in Surficial Sediments of a Freshwater Lake. *Water Res.* 37, 4524–4532.
- [3539] **Kulli B., Stamm C., Papritz A., Flüeler H.** (2003): Discrimination of Flow Regions on the Basis of Stained Infiltration Patterns in Soil Profiles. *Vadose Zone J.* 2, 338–348.
- [3540] **Wiesmann J., Binggeli S.** (2002): Unternehmensführung in den Abwasserbetrieben. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (7), 451–455.
- [3541] **Binggeli S.** (2002): Prozessoptimierung in der Abwasserentsorgung. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (7), 477–482.
- [3542] **Kaiser E.** (2002): Sources, Transformations, and Fates of Riverine Organic Matter. Diss. ETHZ No. 14 880, Zurich.
- [3543] **Jakob C., Robinson C.T., Uehlinger U.** (2003): Longitudinal Effects of Experimental Floods on Stream Benthos Downstream from a Large Dam. *Aquat. Sci.* 65 (3), 223–231.
- [3544] **Robinson C.T., Uehlinger U.** (2003): Using Artificial Floods for Restoring River Integrity. *Aquat. Sci.* 65 (3), 181–182.
- [3545] **Robinson C.T., Uehlinger U., Monaghan M.T.** (2003): Effects of a Multi-year Experimental Flood Regime on Macro-invertebrates Downstream of a Reservoir. *Aquat. Sci.* 65 (3), 210–222
- [3546] **Eggen R.I.L., Segner H.** (2003): The Potential of Mechanism-based Bioanalytical Tools in Ecotoxicological Exposure and Effect Assessment. *Anal. Bioanal. Chem.* 377, 386–396.
- [3547] **Zwank L., Berg M., Schmidt T.C., Haderlein S.B.** (2003): Compound-specific Carbon Isotope Analysis of Volatile Organic Compounds in the Low-microgram per Liter Range. *Anal. Chem.* 75 (20), 5575–5583.

- [3548] **Lotter A.F., Sturm M.** (1994): High-resolution Paleoenvironmental Studies: an Editorial Note. *J. Paleolimnol.* 11, 311–312.
- [3549] **Flower R.J., Ryves D., Battarbee R.W., Mueller J., Sturm M.** (1999): Lake Baikal: Some Topical Aspects of Current Research. *J. Paleolimnol.* 22, 223–224.
- [3550] **Wick L., Lemcke G., Sturm M.** (2003): Evidence of Lateglacial and Holocene Climatic Change and Human Impact in Eastern Anatolia: High-resolution Pollen, Charcoal, Isotopic and Geochemical Records from the Laminated Sediments of Lake Van, Turkey. *The Holocene* 13 (5), 665–675.
- [3551] **Maurer M., Fux C., Siegrist H.** (2003): Nitrifikation, Denitrifikation und Energieeffizienz des Wirbelbettverfahrens in der kommunalen Abwasserreinigung. *KA – Abwasser, Abfall* 50 (9), 1142–1151.
- [3552] **Joss A.** (2001): Mikroverunreinigungen. *Umwelt Focus*, April, S. 27–31.
- [3553] **Joss A., Siegrist H.** (2001): Mikroverunreinigungen: Brauchen wir neue Kläranlagen? *Kommunalmagazin* 18 (12), 11–14.
- [3554] **Joss A., Siegrist H.** (2002): Membranen – Material, Module, Betrieb. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 82 (1), 7–11.
- [3555] **Fuchs W., Braun R., Joss A.** (2001): Status and Development of MBR-Technology. *H₂O* 34, 58–59.
- [3556] **Fux C.** (2001): Biological Nitrogen Elimination of Ammonium-rich Sludge Digester Liquids. *Schrr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ (IHW)*, Bd. 18, 112 p.
- [3557] **Fenner K., Scheringer M., Hungerbühler K.** (2003): Comment on General Fugacity-based Model for Multiple Chemical Species. *Environ. Toxicol. Chem.* 22 (10), 2219–2220.
- [3558] **Fenner K., Scheringer M., Hungerbühler K.** (2003): Joint Persistence of Transformation Products in Chemicals Assessment: Case Studies and Uncertainty Analysis. *Risk Analysis* 23 (1), 35–53.
- [3559] **Joss A., Siegrist H.** (2001): Mikroverunreinigungen: Brauchen wir neue Kläranlagen? *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 81 (3), 151–157.
- [3560] **Uehlinger U., Kawecka B., Robinson C.T.** (2003): Effects of Experimental Floods of Periphyton and Stream Metabolism Below a High Dam in the Swiss Alps (River Spöl). *Aquat. Sci.* 65 (3), 199–209.
- [3561] **Brennwald M.S., Hofer M., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Strassmann K., Kipfer R., Imboden D.M.** (2003): Analysis of Dissolved Noble Gases in the Porewater of Lacustrine Sediments. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 1, 51–62.
- [3562] **Hug T.** (2001): Gensonden – Chancen und Grenzen im Einsatz gegen Bläh- und Schwamm-schlamm. 219. VSA-Mitgliederversammlung, 20.9.2001, Luzern, S. 42–48.
- [3563] **Hug T., Siegrist H.** (2001): Gensonden zur Identifizierung fadenförmiger Bakterien. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 81 (11), 741–746.
- [3564] **Hug T., Ziranke M., Siegrist H.** (2003): Dynamics of Population and Foaming on a Full-scale WWTP. *Proc. Post-Conference Colloquium on Foam and Scum in Biological Wastewater Treatment*, Prague Inst. of Chemical Technology, 5th September 2003, Prague, pp. 26–32.
- [3565] **Binggeli S.** (2003): Leistungsprozesse der Abwasserentsorgung – Methoden und Instrumente der Bewertung und Optimierung. *Diss. ETHZ Nr. 14 993. Schrr. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zurich (IHW)*, Bd.17, 206 S. ISBN 3-906445-17-8
- [3566] **Jonas T., Stips A., Eugster W., Wüest A.** (2003): Observations of a Quasi Shear-free Lacustrine Convective Boundary Layer: Stratification and its Implications on Turbulence. *J. Geophys. Res.* 108 (C10), 26/1–26/15.
- [3567] **Muscheler R., Beer J., Kromer B.** (2003): Long-term Climate Variations and Solar Effects. *Proc. ISCS 2003 Symposium «Solar Variability as an Input to the Earth's Environment»*, Tatranská Lomnica, Slovakia, 23–28 June 2003. *ESA SP-535*, pp. 305–316.
- [3568] **Prigent-Combaret C., Brombacher E., Vidal O., Ambert A., Lejeune P., Landini P., Dorel C.** (2001): Complex Regulatory Network Controls Initial Adhesion and Biofilm Formation in *Escherichia coli* via Regulation of the *csgD* Gene. *J. Bacteriol.* 183 (24), 7213–7223.
- [3569] **Egli K., Bosshard F., Werlen C., Lais P., Siegrist H., Zehnder A.J.B., van der Meer J.R.** (2003): Microbial Composition and Structure of a Rotating Biological Contactor Biofilm Treating Ammonium-rich Wastewater without Organic Carbon. *Microbial Ecology* 45, 419–432.
- [3570] **Baur I., Johnson C.A.** (2003): The Solubility of Selenate-AFt (3 CaO · Al₂O₃ · 3 CaSeO₄ · 37,5 H₂O) and Selenate-AFm (3 CaO · Al₂O₃ · CaSeO₄ · x H₂O). *Cement & Concrete Res.* 33, 1741–1748.
- [3571] **Hausmann S., Lotter A.F., van Leeuwen J.F.N., Ohlendorf C., Sturm M.** (2001): The Influence of Land-use and Climate Change on Alpine Lakes: a High-resolution Case Study Focusing on the Past 1000 Years. *Terra Nostra* 2001/3, 6th Workshop of the European Lake Drilling Programme, May 11–16, 2001, Potsdam, Germany, pp. 96–99.
- [3572] **Sturm M., Francus P., Friedl G., Hajdas I., Hausmann S., Hirt A.M., Heiri O., Koinig K.A., Lanci L., Lemcke G., Lotter A.F., Ohlendorf C., Wick L.** (2001): A Decade of High-resolution Research of Holocene and Late Glacial Lacustrine Archives. *Terra Nostra* 2001/3, 6th Workshop of the European Lake Drilling Programme, May 11–16, 2001, Potsdam, Germany, pp. 204–205.
- [3573] **Ohlendorf C., Sturm M., Hausmann S.** (2003): Natural Environmental Changes and Human Impact Reflected in Sediments of a High Alpine Lake in Switzerland. *J. Paleolimnol.* 30, 297–306.
- [3574] **Koinig K.A., Shotyk W., Lotter A.F., Ohlendorf C., Sturm M.** (2003): 9000 Years of Geochemical Evolution of Lithogenic Major and Trace Elements in the Sediment of an Alpine Lake – the Role of Climate, Vegetation, and Land-use History. *J. Paleolimnol.* 30, 307–320.
- [3575] **Chèvre N., Gagné F., Blaise C.** (2003): Development of a Biomarker-based Index for Assessing the Ecotoxic Potential of Aquatic Sites. *Biomarkers* 8 (3–4), 287–298.
- [3576] **Kaiser E., Schubert C.** (2003): Book Review: «Aquatic Ecosystems: Interactivity of dissolved organic matter» (S.E.G. Findlay, R.L. Sinsabaugh, ISBN 0-12-356371-9). *J. Experimental Marine Biol. Ecol.* 293, 125–126.
- [3577] **Oechlin R., Lengweiler P., Seiler K., Götz C., Gomides Freitas L., Singer H., Müller S.** (2003): Rückstände von Pestiziden in Oberflächen- und Grundwasser. *Mitt. Naturforsch. Ges. Schaffhausen* 47, 57–67.
- [3578] **Johnson C.A., Glasser F.P.** (2003): Hydroxalite-like Minerals (M₂Al(OH)₆(CO₃)_{0.5} · xH₂O, where M = Mg, Zn, Co, Ni) in the Environment: Synthesis, Characterization and Thermodynamic Stability. *Clays & Clay Minerals* 51 (1), 1–8.
- [3579] **Ruckstuhl S., Suter M.J.-F., Giger W.** (2003): Sorption and Mass Fluxes of Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates in Aquifers. *J. Contaminant Hydrol.* 67, 1–12.
- [3580] **Andersen H., Siegrist H., Halling-Sørensen B., Ternes T.A.** (2003): Fate of Estrogens in a Municipal Sewage Treatment Plant. *Environ. Sci. Technol.* 37 (18), 4021–4026.
- [3581] **Winder M., Buergi H.R.** (2003): Seasonal Vertical Distribution of Phytoplankton and Copepod Species in a High-mountain Lake. *Arch. Hydrobiol.* 158 (2), 197–313.
- [3582] **Boller M.** (2003): Oberflächenabflüsse von Dächern und Strassen – Experimentelle Untersuchungen in Burgdorf. 59 VSA Verbandsbericht Nr. 553., S. 37–56.
- [3583] **Steiner M.** (2003): Adsorbersysteme als Barrieren gegen Schadstoffe in Oberflächenabflüssen. *VSA Verbandsbericht Nr. 553*, S. 59–66.
- [3584] **Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J., Jewson D., Lees J.A., Ryves D.B., Sturm M.** (1999): The Deposition and Accumulation of Endemic Planktonic Diatoms in the Sediments of Lake Baikal and an Evaluation of their Potential Role in Climate Reconstruction during the Holocene. *Terra Nostra*, 1st Baikal-Sed Internat. Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and Subrecent Sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 34–48.
- [3585] **Wüest A., Granin N., Kocsis O., Ravens T.M., Schurter M., Sturm M.** (1999): Deep Water Renewal in Lake Baikal – Matching Turbulent Kinetic Energy and Internal Cycling. *Terra Nostra*, 1st Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 60–74.
- [3586] **Sturm M.** (1999): Sedimentation Processes in Lake Baikal: Sensitive Instruments to Link Biological, Geochemical and Physical Concepts. *Terra Nostra*, 1st Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 108–109.
- [3587] **Vologina E.G., Sturm M., Vorobyova S.S., Granina L.Z.** (1999): New Results of High Resolution Studies of Surface Sediments of Lake Baikal. *Terra Nostra*, 1st Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 115–130.
- [3588] **Müller J., Sturm M., Vologina E.G.** (1999): Clay Mineral Distribution in Surface Sediments of

- Lake Baikal – Results from a West-East Transect in the Northern Basin. *Terra Nostra*, 1st Baikal-Sed International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal – Recent and subrecent sedimentation, November 18–22, 1999, Berlin, Germany, pp. 244–245.
- [3589] **Chèvre N., Gagné F., Gagnon P., Blaise C.** (2003): Application of Rough Sets Analysis to Identify Polluted Aquatic Sites Based on a Battery of Biomarkers: a Comparison with Classical Methods. *Chemosphere* 51, 13–23.
- [3590] **McCracken K.G., Beer J., McDonald F.B.** (2003): Atypical Cosmic Ray Propagation during the $q_A > 0$ Sunspot Minimum of 1954. 28th Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4041–4034.
- [3591] **McCracken K.G., Beer J., McDonald F.B.** (2003): Properties of the Long Term Heliospheric Modulation – Tests to Be Met by Modulation Theory. 28th Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4123–4126.
- [3592] **Masuda K., Furuzawa H., Miyahara H., Muraki Y., Hajdas I., Bonani G., Beer J.** (2003): Radiocarbon Content in Japanese Cedar during the Maunder Minimum. 28th Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4143–4146.
- [3593] **Beer J., Vonmoos M.V., Muscheler R., McCracken K.G., Mende W.** (2003): Heliospheric Modulation over the Past 10,000 Years as Derived from Cosmogenic Nuclides. 28th Internat. Cosmic Ray Conference, Universal Academy Press, pp. 4147–4150.
- [3594] **Truffer B.** (2003): User-led Innovation Processes: The Development of Professional Car Sharing by Environmentally Concerned Citizens. *Innovation* 16 (2), 139–154.
- [3595] **Golet E.M., Xifra I., Siegrist H., Alder A., Giger W.** (2003): Environmental Exposure Assessment of Fluoroquinolone Antibacterial Agents from Sewage to Soil. *Environ. Sci. Technol.* 37 (15), 3243–3249.
- [3596] **Stocker J., Balluch D., Gsell M., Harms H., Feliciano J., Daunert S., Malik K.A., van der Meer J.R.** (2002): Development of a Set of Simple Bacterial Biosensors for Quantitative and Rapid Measurements of Arsenite and Arsenate in Potable Water. *Environ. Sci. Technol.* 37 (20), 4743–4750.
- [3597] **Lacour S., Kolb A., Landini P.** (2003): Nucleotides from –16 to –12 Determine Specific Promoter by Bacterial σ^S -RNA Polymerase. *J. Biol. Chem.* 278 (39), 37160–37168.
- [3598] **Brombacher E., Dorel C., Zehnder A.J.B., Landini P.** (2003): The Curli Biosynthesis Regulator CsgD Co-ordinates the Expression of Both Positive and Negative Determinants for Biofilm Formation in *Escherichia coli*. *Microbiology* 149, 2847–2857.
- [3599] **Elovitz M., von Gunten U., Kaiser H.-P.** (2000): Hydroxyl Radical/Ozone during Ozonation Processes. II. The Effect of Temperature, pH, Alkalinity, and DOM Properties. *Ozone Sci. Engng.* 22, 123–150.
- [3600] **Meier W., Bonjour C., Wüest A., Reichert P.** (2003): Modeling the Effect of Water Diversion on the Temperature of Mountain Streams. *J. Environ. Engng.* 129 (8), 755–764.
- [3601] **Lorke A., Müller B., Maerki M., Wüest A.** (2003): Breathing Sediments: The Control of Diffusive Transport Across the Sediment-Water Interface by Periodic Boundary-Layer Turbulence. *Limnol. Oceanogr.* 48 (6), 2077–2085.
- [3602] **Boehler M., Pinnow D., Krauss W., Brauchli H., Siegrist H.** (2003): An Innovative Application for an Established Technology to Improve Sludge Dewatering. Proc. Annual Conf. New Zealand Water and Waste Assoc. NZWWA, Auckland, September, 8 pp.
- [3603] **Boehler M., Siegrist H.** (2003): Partial Ozonation of Activated Sludge to Reduce Excess Sludge, Improve Denitrification and Control Scumming and Bulking. Proc. IWA Specialised Conf. «Biosolids 2003 Wastewater Sludge as a Resource», Trondheim, Norway, 23–25 Juni, pp. 47–54.
- [3604] **Egli T., Zinn M.** (2003): The Concept of Multiple-nutrient-limited Growth of Microorganisms and Its Application in Biotechnological Processes. *Biotechnol. Advances* 22, 35–43.
- [3605] **Fux C.** (2003): Faulwasserbehandlung – Separate anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox). *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 83 (11), 1–11.
- [3606] **Harder A., Escher B.I., Landini P., Tobler N.B., Schwarzenbach R.P.** (2003): Evaluation of Bioanalytical Assays for Toxicity Assessment and Mode of Toxic Action Classification of Reactive Chemicals. *Environ. Sci. Technol.* 37 (21), 4962–4970.
- [3607] **Harder A., Escher B.I., Schwarzenbach R.P.** (2003): Applicability and Limitation of QSARs for the Toxicity of Electrophilic Chemicals. *Environ. Sci. Technol.* 37 (21), 4955–4961.
- [3608] **Stein R., Schubert C., Macdonald R.W., Fahli K., Harvey H.R., Weiel D.** (2004): The Central Arctic Ocean: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon. In: «The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean», Chapter 7.9, R. Stein et al., (Eds.), Springer-Verlag, pp. 295–314.
- [3609] **Truffer B., Bratrich C., Markard J., Peter A., Wüest A., Wehrli B.** (2003): Green Hydro-power: The Contribution of Aquatic Science Research to the Promotion of Sustainable Electricity. *Aquat. Sci.* 65, 99–110.
- [3610] **von Gunten U.** (2003): Unterirdische Grundwasseraufbereitung – Langzeitverhalten und Mechanismen der *In-situ*-Enteisung und Entmanganung am Beispiel von La Neuveville. *gwa Gas, Wasser, Abwasser* 83 (11), 821–828.
- [3611] **Gabereil M., Chin Y.-P., Hug S.J., Sulzberger B.** (2003): Role of Dissolved Organic Matter Composition on the Photoreduction of Cr(VI) to Cr(III) in the Presence of Iron. *Environ. Sci. Technol.* 37 (19), 4403–4409.
- [3612] **Kaiser E., Simpson A.J., Dria K.J., Sulzberger B., Hatcher P.G.** (2003): Solid-state and Multidimensional Solution-state NMR of Solid Phase Extracted and Ultrafiltered Riverine Dissolved Organic Matter. *Environ. Sci. Technol.* 37 (13), 2929–2935.
- [3613] **Sulzberger B.** (2003): Limnologists and Oceanographers – Two Scientific Families that Should Talk Together More Freely. *Aquat. Sci.* 65, i–ii.
- [3614] **Giger W., Berg M., Pham H.V., Duong H.A., Tran H.C., Cao T.H., Schertenleib R.** (2003): Environmental Analytical Research in Northern Vietnam – A Swiss-Vietnamese Cooperation Focusing on Arsenic and Organic Contaminants in Aquatic Environments and Drinking Water. *Chimia* 57, 529–536.
- [3615] **Scheringer M., Salzmann M., Stroebe M., Wegmann F., Fenner K., Hungerbühler K.** (2004): Long-range Transport and Global Fractionation of POPs: Insights from Multimedia Modeling Studies. *Environ. Pollution* 128, 177–188.
- [3616] **Rieger L., Siegrist H., Winkler S., Pressl A.** (2003): Praktische Erfahrungen mit Ionen-sensitiven Messsonden. Proc. Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen (VDI/VDE, ATV-DVKW, GMA), 25./26. November 2003, Wuppertal, Deutschland, 8 Seiten.
- [3617] **Langergraber G., Rieger L., Winkler S., Alex J., Wiese J., Owerdieck C., Ahnert M., Simon J., Maurer M.** (2003): A Guideline for Simulation Studies of Wastewater Treatment Plants. Proc. 9th IWA Specialised Conference – Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, Praha, Czech Republic, Sept. 2003, 8 pp.
- [3618] **Rieger L., Alex J., Winkler S., Siegrist H.** (2003): Entwurf und Optimierung von MSR-Systemen mittels dynamischer Simulation – Sensormodelle. Proc. Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen (VDI/VDE, ATV-DVKW, GMA), 25./26. November 2003, Wuppertal, Deutschland, 6 Seiten.
- [3619] **Winkler S., Rieger L., Thomann M., Siegrist H., Bornemann C., Fleischmann N.** (2002): In-line Monitoring of COD and COD-fractionation: Improving Dynamic Simulation Data Quality. Proc. 3rd IWA world water congress, Melbourne, 9 pp.
- [3620] **Rieger L., Alex J., Winkler S., Boehler M., Thomann M., Siegrist H.** (2003): Progress in Sensor Technology – Progress in Process Control? Part I: Sensor Property Investigation and Classification. *Water Sci. Technol.* 47 (2), 103–112.
- [3621] **Schertenleib R., Morel A., Kalbermatten J., Saywell D.** (2003): Guidelines for the Implementation of the Bellagio Principles and the Household-centred Environmental Sanitation Approach (HCES). Conference Proceeding, IWA 2. International Symposium on Ecological Sanitation, Lübeck (Deutschland), p. 93–100.
- [3622] **Winkler S., Saracevic E., Rieger L., Siegrist H., Nadler J.** (2001): Kostengünstige und wartungsarme *In-situ*-Ammonium- und -Nitratmessung. VDI-Berichte Nr. 1619, 279–284.
- [3623] **Bornemann C., Winkler S., Rieger L., Thomann M., Siegrist H.** (2001): UV-Vis-Spektroskopie zur *In-situ*-Messung von CSB, Trübung und Nitrat – Erste Erfahrungen auf dem Abwassersektor. VDI-Berichte Nr. 1619, 301–306
- [3624] **Rieger L., Siegrist H.** (2002): MSR-Technik macht's möglich: Energie sparen bei der Stickstoffelimination. *Kommunalmagazin* 19 (11), 17–19.
- [3625] **Strauss M., Barreiro W.C., Steiner M., Mensah A., Jeuland M., Bolomey S., Montangero A., Koné D.** (2003): Urban Excreta Management – Situation, Challenges, and Promising Solutions. IWA Asia-Pacific Regional Conference Bangkok, Thailand, October 19–23, 2003.

Prix de l'environnement

Le groupe de recherche de l'EAWAG «Eau et assainissement dans les pays en développement» (Sandec) a été récompensé par l'Energy Globe Award 2004. Martin Wegelin s'est vu remettre cette récompense au nom de l'équipe le 27 avril 2005 à l'exposition universelle 2005 de Aichi au Japon. Ce prix a été décerné pour le développement du système SODIS, un procédé à la fois simple et ingénieux qui permet de désinfecter l'eau de consommation dans de simples bouteilles en plastique du commerce. L'Energy Globe Award est l'un des prix de l'environnement les plus renommés au monde et servira certainement de tremplin à SODIS dont la diffusion sera favorisée par la forte présence médiatique qui entoure la remise du prix.



RUMBA: Développement durable

En 1999, le Conseil Fédéral décidait de lancer un programme de gestion des ressources et de management environnemental dans l'administration fédérale (programme RUMBA). Ce programme concerne également le domaine des EPF. Sous la direction de Herbert Güttinger, Responsable Environnement de l'EAWAG, ce projet a pu être mené à son terme en l'espace d'un peu de moins de quatre ans. RUMBA a été intégré à la gestion de l'EAWAG dès avril 2003. Le programme a incité la formulation d'une nouvelle politique environnementale de même qu'une révision des processus de management, une redistribution des compétences et la définition d'objectifs explicites. Ainsi, l'EAWAG souhaite avoir réduit en 2025 sa consommation d'énergie non renouvelable de 80 % par rapport à 1990. La mise en service en 2006 du nouveau «Forum Chriesbach», un bâtiment «Minergie P», devrait y contribuer fortement. Le rapport final sur le projet «RUMBA dans le domaine des EPF» et de plus amples informations sont disponibles sur les sites www.ethrat.ch (ou www.cepf.ch) (rubrique Management environnemental) et www.umwelt.eawag.ch.

Programme PEAK 2005/2006

Sous le nom de PEAK (Cours de l'EAWAG pour la pratique) l'EAWAG offre des cours de formation continue en sciences de l'environnement pour des spécialistes professionnels. Les cours s'appuient sur les derniers résultats et expériences de la recherche. Pour plus d'informations veuillez consulter www.peak.eawag.ch

24./25. August 2005	«Natürliche» Tracer in der Umwelt: Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten
21./22. September 2005	Minimierung von Unsicherheiten bei Probenahmen und Online-Messungen
8./9. November 2005	30 Jahre Fliessgewässerdaten – Fakten, Analysen, Konsequenzen
16.–18. November 2005	Taxonomie und Ökologie aquatischer Organismen Teil 1: Trichoptera
8.–10. März 2006	Ökotoxikologie-Kurs Hauptmodul I
17/18 Mai 2006	Cours d'Ecotoxicologie Module de base

Les cours sont dispensés dans la langue de leur intitulé respectif.

Le «Forum Chriesbach» avance

Après que la première pierre a été posée en octobre dernier, les artisans ont fêté la fin du gros œuvre du nouveau bâtiment de l'EAWAG, le «forum Chriesbach», le 2 juin 2005. Ce bâtiment destiné à abriter quelque 120 personnes fait figure de pionnier en matière de développement durable et sera achevé dans le courant de l'année 2006. Lors de la cérémonie de pose de la première pierre, les plans d'architecture du bâtiment, un journal, un rapport annuel de l'EAWAG, un microprocesseur pour la détection de l'arsenic dans l'eau et un échantillon d'eau du Greifensee datant du 16 août 1999 (jour de la mort massive des corégones du lac) ont été emmurés dans les fondations à l'intention des générations futures.



Nouveau procédé breveté

En Suisse, la qualité irréprochable de l'eau potable semble aller de soi. Pourtant, certaines contaminations bactériennes peuvent s'avérer préoccupantes pour les distributeurs et les consommateurs ou consommatrices. L'EAWAG vient de développer une nouvelle méthode permettant de déterminer la qualité microbiologique de l'eau de façon plus rapide, plus fiable et à moindre coût que celles utilisées jusqu'à présent. En effet, au lieu de prendre jusqu'à 12 jours, la nouvelle méthode livre de premiers résultats en l'espace de 6 à 24 heures. L'EAWAG a fait breveter son nouveau procédé et cherche actuellement un fabricant pour le nouvel appareil. Etant donné que les différents composants existent déjà dans d'autres applications, la méthode peut se passer d'une étape onéreuse de développement. Elle présente un immense potentiel sur le marché mondial. La technique de l'EAWAG devrait intéresser non seulement les sociétés distributrices d'eau potable mais aussi toutes celles du secteur des eaux minérales.

Bureau de conseil pour la pêche

Depuis le 1^{er} juillet 2004, le nouveau bureau suisse de conseil pour toutes questions piscicoles, le FIBER, est à la disposition des pêcheurs. La plate-forme d'information très appréciée du projet «Fischnetz» alors mise en place pour répondre aux questions touchant aux eaux et à la faune piscicole est ainsi maintenue. Le FIBER est le fruit d'une collaboration entre l'EAWAG, l'OFEFP et la Fédération suisse de pêche (FSP). Susanne Haertel-Borer et Guy Périat assument la direction de ce service de conseil installé dans les locaux de l'EAWAG à Kastanienbaum. www.fischereiberatung.ch