

# LA VIE SECRETE DU LAC SOUS-GLACIAIRE DE VOSTOK.

## DES CAILLOUX DANS LA GLACE ?

Vostok, 9 janvier 1998, le carottier remonte de 3 540 m de profondeur du forage numéro 5 avec une nouvelle carotte. La routine pour ce forage commencé il y a plus de 9 ans, sauf que ce jour là : *Kamini ! vot Kamini ! Look at the stones !* clame l'équipe de foreurs russe qui s'affaire autour de la carotte en la ramenant avec précaution au labo. Quoi ? Des cailloux ? On aurait atteint le bedrock, maintenant ? Les petites fragments de quelques millimètres qui apparaissent sont des inclusions de sédiments fins pris dans cette glace transparente comme du cristal. Mais c'est impossible, on est à plus de 200 m du fond et de plus le glacier flotte sur un lac, et les cailloux eux ne flottent pas ! Quelle nouvelle surprise nous réserve donc « encore » cette carotte de Vostok ? Elle, déjà célèbre car fut la première qui permis de retracer le climat et l'environnement au cours des 400 000 dernières années, de mettre en évidence la relation étroite entre climat et effet de serre, relation devenue indissociable de la discussion sur l'avenir climatique de notre planète et le mode développement de notre société.

La séquence climatique est continue jusqu'à 3 310 m de profondeur et au-delà, les couches sont mélangées et difficiles à exploiter. Les opérations de forage du trou numéro 5 étaient donc en passe de se terminer, et on pliait bagage à la fin du mois. La carotte qu'on vient d'extraire est immédiatement étudiée pour ses propriétés électriques, paramètre lié à la charge ionique, une façon de prendre le pouls de la glace. Pas de signal, absolument rien même, sous 3 000 volts la glace ne laisse passer aucun électron ! Son réseau serait-il comme celui des cristaux de laboratoire, sans défaut juste parfait, et ce malgré ces...cailloux ? Observés en lumière polarisée, les cristaux apparaissent démesurés et dépassant les 20 cm du champ d'observation qu'il fallut modifier pour la circonstance. De retour en France, les analyses révélaient des glaces issues d'un processus de gel de l'eau du lac, et les inclusions d'argiles sont des sédiments inclus par le contact de la base du glacier avec un relief. Le forage a été arrêté à 3 623 m de profondeur soit 130 m au-dessus du lac, et les dernières carottes sont des témoins inattendus du milieu sous-glaciaire.

A 3 539 m, il existe une transition abrupte avec l'apparition dans les carottes de glace d'inclusions de sédiments ou de roches, des cristaux de grande la taille et la conductivité électrique qui s'effondre. La composition isotopique (deutérium et oxygène 18) présente aussi une transition rapide en 30 cm, donnant des valeurs plus élevées de 10 ‰ par rapport à la glace de glacier et restant pratiquement constantes. Enfin, cette glace ne contient pas de gaz. Le changement isotopique fut d'abord utilisé comme indice montant le gel de l'eau, mais c'est sans doute l'absence de gaz dans cette glace qui apporte la meilleure évidence du gel de l'eau. On applique d'ailleurs cette dernière propriété de la glace pour extraire par fusion et regel, les gaz de la glace de glacier afin d'en étudier la composition.

Jean Robert Petit<sup>1</sup>,  
Michel Blot<sup>2</sup>,  
Sergei Bulat<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, CNRS, BP96, 38402 St Martin d'Hères Cedex, France

<sup>2</sup> Plasticité et Expression des Génomés Microbien, CNRS-CEA-Université Joseph Fourier, rue de la Piscine, 38041 Grenoble, France (†\_décédé le 8 septembre 2002)

<sup>3</sup> Nuclear Physic Institute, Gatchina, Leningrad region, Saint Petersburg, Russie

37

Rapport d'activité IPEV 2002





## THE SECRET LIFE OF THE SUBGLACIAL LAKE VOSTOK

At Vostok station, on January 9<sup>th</sup>, 1998, Russians drillers retrieved from 3540m depth a new ice core section containing unexpected "stones" from the bedrock. This ice section was the first from 85m retrieved, displaying also unusually large to giant ice crystals as well as very low electrical properties. Further laboratory measurements revealed a stable isotope composition which is different from the glacier ice as well as the total absence of air in ice. While the "stones" are sediment scrapped by the glacier against a relief upstream Vostok, all information suggested the drill has penetrated into ice sheet formed by the freezing of the lake water. These unexpected ice cores are the best witness of the lake environment.

Subglacial lakes have been firstly detected by 1970's from extensive the radio echoes survey, and up to 100 lakes are now localized in Antarctica. Lake Vostok, is the largest (14.000 km<sup>2</sup>) and the deepest (down to 1200m) and fully depicted from the ERS1 satellite altimetry data, by only 1993. Subglacial lakes result from the basal ice melting under the continuous long term action of the geothermal heat. While their prediction is difficult, lakes mainly occur in central area of Antarctica such as dome (e.g. Dome Concordia) having large ice thickness, a slow glacier dynamic and a low accumulation rate.

Lake Vostok is covered by the glacier having an ice thickness varying from 3750m in the southern (at Vostok) and 4200m in the northern area. The lake-glacier interface is tilted and this makes a slight difference in the water-ice equilibrium temperature between the northern and the

southern area of the lake. Due to the water circulation within the lake, the glacier ice is melted in the northern area, while the lake water freezes in the southern area and the lake waters are renewed every 85.000 years. The study of the biological content of Antarctic ice is not trivial because its very low concentration. Tracking contaminations from artefacts and laboratory environment is a crucial issue. If we refer to recent studies from Russian and French, which are conducted according to geochemistry standard procedure yielding reliable chemistry, the biological content of the lake appear dramatically low. Only a few DNA fingerprints have been identified as genuine from lake Vostok. The DNA signatures are close or related to those from existing micro-organisms detected in hot springs and/or in hydrothermal environment. Such environment, not expected before in lake Vostok, seems possible within the faults and deep fractures in the lake bedrock, and also activated by seismotectonic events.

The water sampling and the sediments retrieval from Lake Vostok represent considerable scientific interests, but rise the technical challenge to avoid contamination of the pure and pristine environment. Exploration of subglacial lakes are now discussed at the international level (SCAR) and new clean technology has to be developed and possibly tested first in small lakes: lake Vostok being the final target. In this respect, the dozen of lakes in the vicinity of the new station Concordia could be represent a matter to built federative projects.

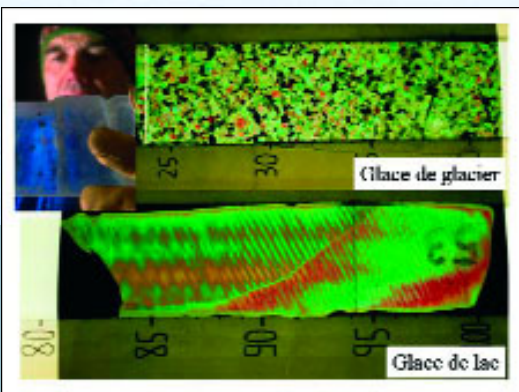


Figure 1: Inclusions de sédiment du lac Vostok (photo L. Meydard-CNRS) dans une carotte de glace et lames minces (épaisseur 2 mm) de glace de glacier (cristaux de quelques mm) et de glace d'accrétion (cristal de 32 cm) observées en lumière polarisée. L'échelle est en centimètres. Les irrégularités de la surface correspondent aux irrégularités de la surface.

Sediment inclusions from lake Vostok (photo L. Meydard-CNRS) within an ice core section and thin sections (thickness 2 mm) of glacier ice (size a few mm) and accreted ice (32 cm crystal) as observed through polarized light. The scale is given in cm.

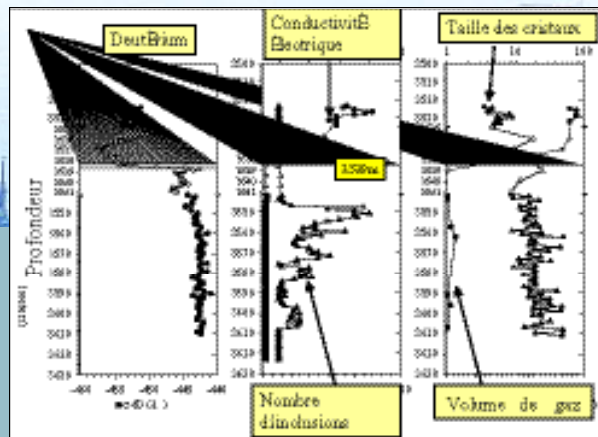


Figure 2 : Variation des paramètres physiques et géochimiques de la glace basale de Vostok à la transition glacier -glace de lac (d'après Souchez et al, 2002, modifiée). A 3 539 m, il existe une transition abrupte avec l'apparition dans les carottes de glace d'inclusions de sédiments ou de roches, des cristaux de grande taille et la conductivité électrique qui s'effondre. La composition isotopique (deutérium et oxygène 18) présente aussi une transition rapide en 30 cm, donnant des valeurs plus élevées de 10 ‰ par rapport à la glace de glacier et restant pratiquement constantes. Enfin cette glace ne contient pas de gaz.

Down core variation of physical and chemical composition of the ice at the boundary between glacier ice and lake ice (from Souchez et al, 2000, with changes). At 3539 m depth, there is a sharp transition with a shift in deuterium content (left), the presence of sediments inclusion and the drastic decrease of the electrical conductivity (middle), crystal size increasing and depletion in total air content (right).



## DECOUVERTES DES LACS SOUS GLACIAIRES ET LE LAC VOSTOK.

Dès les années 70, les sondages radar réalisés de manière extensive sur une grande partie de l'Antarctique donnaient par endroits de très forts échos associés à la présence d'eau. Ces échos s'alignant horizontalement sur des dizaines de kilomètres représentent la surface de lac sous glaciaire. Plus d'une centaine de lacs sous-glaciaires sont actuellement détectés en Antarctique. De tailles variables, ils représentent des complexes « glacio-géologiques » dont la formation reste très difficile à prévoir. Il s'y ajoute un mystère supplémentaire puisque ces milieux liquides isolés de notre environnement depuis bien longtemps, représentent des milieux hostiles dans lesquels il n'est pas exclu de trouver des niches de vie qui sortiraient évidemment de l'ordinaire.

A la station de Vostok, soviétique à l'époque, on y avait également détecté de l'eau près du socle rocheux, mais les cinq lignes de sondages réalisées dans un rayon de 300 km autour de la station, n'avaient pas permis de mettre en évidence la continuité et l'immense lac. Ce dernier fut cartographié dans sa totalité en 1993 grâce aux altitudes précises de la surface données par le satellite ERS1. Sur une grande zone 250 km x 50 km, la surface du glacier apparaît anormalement plane, témoignant d'une base également plane et lisse que ne peut donner qu'une étendue d'eau, alors que les régions environnantes épousent les grands reliefs sous-glaciaires.

La station de Vostok (78°S, 106°E, altitude 3 488 m) a été installée en 1957 au pôle géomagnétique sud à l'occasion de l'année géophysique internationale et elle est maintenue en opération jusqu'à ce jour. Le hasard a voulu qu'elle soit localisée à l'extrémité sud du lac. De forme allongé le lac s'étend sur plus de 250 km en direction du nord, et 60 km en largeur. Sa profondeur moyenne évaluée par les récentes études sismiques, est de 400 m, mais une fosse de 1 200 m existe à une trentaine de kilomètres de Vostok. Sa surface (14 000 km<sup>2</sup>), 2,2 fois inférieure à celle du lac Baïkal, est comparable à celle de la Corse ; son volume de 5 600 km<sup>3</sup> représente 30 fois celui du lac Léman.

Tout ceci met le lac Vostok au premier plan pour les études de la vie en milieu extrême, les recherches en exobiologie. Les derniers 85 mètres de glace qui viennent du gel de l'eau et ont été partagés entre la Russie, les Etats-Unis et la France engagés dans la campagne. Français et Russes travaillent ensemble et les échantillons font actuellement l'objet d'une étude pluridisciplinaire rassemblant entre autres glaciologues, géochimistes et biologistes.

## COMMENT SE FORMENT LES LACS SOUS GLACIAIRES ?

Les températures moyennes annuelles des régions centrales des calottes polaires sont toujours de l'ordre de -50°C ou plus bas encore, et lorsqu'on entend « lac en antarctique » on pense immédiatement à un lac gelé. Il s'agit cependant bel et bien d'eau liquide, en équilibre avec la glace à la température fixe du point de fusion. Sans faire appel à des volcans sous la glace, le glacier fond sous l'effet du flux géothermique. Quand on s'enfonce de 3 ou 4 km dans le glacier, la température s'élève en réponse au chauffage naturel par la terre. La glace est isolante et sa partie basse accumule la chaleur au point de fondre. En chaque point du glacier, le flux de chaleur venant du bas est contrebalancé par le flux de froid que transmet la glace en s'enfonçant. Le flux de frigories qu'apporte la glace est lié à la dynamique du glacier, à la quantité de neige qui tombe et à la température à la surface du glacier.

Dans les régions côtières ou dans la pente, les précipitations de neige sont élevées, les couches de neige s'enfoncent rapidement et le flux de froid vers le bas est très supérieur au flux géothermique. La température près du socle reste négative et le glacier est gelé au rocher. Dans les régions centrales l'accumulation est très faible, l'épaisseur de glace y est importante et malgré une température plus basse en surface, le froid ne compense plus la chaleur de la terre et la glace fond. L'eau qui se forme reste en équilibre stable avec la glace à la température de fusion (celle-ci est un peu inférieure à 0°C, -2,5°C à Vostok, car il y a un effet de pression et des sels).

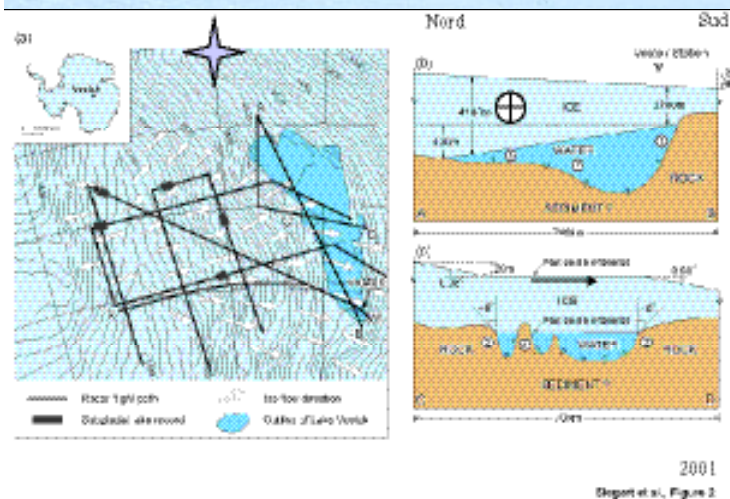


Figure 3 : Le lac Vostok (d'après Siegert et al, 2001) montrant les routes des sondages radar des années 70. La glace provient de la région de ridge B à 3 800 m d'altitude en s'écoulant vers l'Est, dans la région de Vostok. Le glacier traverse le lac d'Ouest en Est selon sa largeur. Au-delà de Vostok, en direction du Nord, la surface du glacier est légèrement en pente et à 200 km elle est plus haute d'environ 50 m. En fait, l'équilibre isostatique de la partie flottante est réalisé par une différence d'épaisseur de glace 10 fois supérieure, comme un iceberg, soit ~500 m, ce qui donne ~4 250 m de glace au Nord et 3 750 m au Sud. L'écoulement du glacier se fait perpendiculairement à cette pente.

Map of Lake Vostok (from Siegert et al, 2001) with the track of the 1970's radio echo soundings. The glacier flows eastward from ridge B area (3800 m a.s.l.) and it floats across Vostok lake width. From Vostok to the northern area, there is a gentle slope making a 50 m difference in the surface altitude at 200 km distance. As the glacier is floating, equilibrium is given by a difference in glacier thickness and opposite slope (~10 times greater as far as iceberg). The glacier is 4250 m thick in northern area and 3750 m in the southern area respectively. Ice flows perpendicular to these slopes.



L'eau peut disparaître dans les sédiments ou dans des chenaux sous-glaciaires, mais si elle s'accumule dans une dépression du relief un lac peut se former. Le volume de ce lac augmentera jusqu'à un nouvel équilibre, la fusion de la glace accélère localement la vitesse verticale de la glace. Le lac sera stable dès lors qu'à l'interface le flux de chaleur est compensé par le froid du glacier.

La modélisation de la formation d'un lac sous-glaciaire est très difficile car trop de paramètres sont mal connus et les phénomènes sont intégrés sur de très longues durées. C'est le cas du flux géothermique, de la loi de déformation de la glace pour des couches profondes, des reliefs sous-glaciaires toujours complexes... Une faible différence dans les estimations des flux peut produire dans un cas le contact glace-rocher gelé et une température de quelques dixièmes de degrés en-dessous du point de fusion, dans un autre une fusion intégrée sur plusieurs milliers d'années, produisant un lac d'une centaine de mètres.

## LE LAC VOSTOK EST DIVISÉ EN DEUX ZONES ET SES EAUX SE RENOUVELLENT.

Avec la présence du lac au site de forage de Vostok, on avait imaginé que la glace devait y fondre. Lorsque le forage dépassa 3 540 m de profondeur, les carottes de glace ne ressemblant en rien à de la glace de glacier habituelle, laissaient les premiers observateurs se perdre en conjecture. Le regel de l'eau du lac : personne n'y avait songé une seconde ! En fait, on aurait pu bel et bien prévoir le regel et la glace d'accrétion à Vostok, en se souvenant des propriétés de l'équilibre eau-glace. La température de l'équilibre dépend en outre de la salinité des eaux, mais pour le problème qui nous intéresse c'est la différence de pression qui joue le premier rôle. La pression abaisse le point de fusion de  $0,0074 \text{ }^\circ\text{C}$  par bar, soit  $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$  d'eau. Appliqués à l'interface inclinée du lac Vostok, les 500 m de différence entre nord et sud imposent une température d'équilibre variant de  $-2,5^\circ\text{C}$  au sud, à Vostok et  $-2,8^\circ\text{C}$  dans la région à 200 km au nord. Si l'on accepte l'idée d'une circulation des eaux du lac permettant des échanges de chaleur plus rapides que par la conduction, la température moyenne des eaux du lac devrait être proche de  $-2,65^\circ\text{C}$ , température moyenne de l'interface. Cette valeur

moyenne divise alors le lac en deux régions bien distinctes :

- dans la partie profonde du lac au Nord, l'interface à  $-2,8^\circ\text{C}$  sera tôt ou tard en contact avec l'eau du lac à  $-2,65^\circ\text{C}$ , celle ci plus chaude provoquera la fusion de la glace.
- dans la partie sud du lac, région de Vostok, l'interface est à  $-2,5^\circ\text{C}$ . L'eau du lac ( $-2,65^\circ\text{C}$ ) apparaîtra en surfusion par rapport à l'interface et gèlera.

Finalement pour les lacs sous-glaciaires, à chaque fois que l'interface eau-glace sera inclinée, une instabilité thermodynamique existera et le système devra évoluer par la fusion et le regel : l'état stable correspondant à une interface horizontale. Ainsi pour Vostok, dès que les données satellitales de 1993 ont permis de cartographier le lac et d'en déduire la pente de l'interface, on aurait pu anticiper la présence de glace d'accrétion sous le site de forage à Vostok. Mais comme dans les westerns, la cavalerie arrive toujours trop tard.

La glace d'accrétion est entraînée avec le glacier hors du lac. On montre facilement que la quantité de glace qui peut fondre est limitée par la quantité d'énergie qui est introduite dans le lac, en l'occurrence le flux géothermique. On a calculé qu'il fondait à 67 millions de  $\text{m}^3$  de glace par an et en même temps le mouvement du glacier exporte annuellement un volume de glace d'accrétion équivalent. Le lac Vostok serait un système en équilibre avec le glacier. La production, le regel et l'export permettent de renouveler le volume entier du lac tous les 85 000 ans environ.

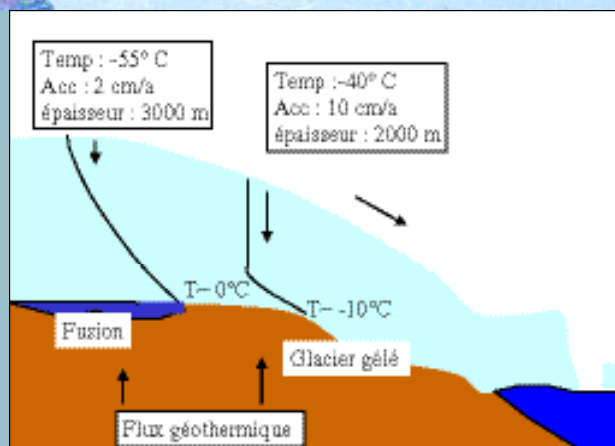
## DE LA VIE DANS LA GLACE ET LE LAC VOSTOK ?

Le glacier contient des poussières issues de l'érosion des continents et transportées par le vent. Des microorganismes des sols peuvent les accompagner et se retrouver dans la neige de la région de Ridge B, puis quelque 800 000 ans plus tard libérés dans le lac. Leur survie dépendra de leur capacité à résister pendant tout ce temps au broyage par le glacier, puis au milieu du lac pressurisé, à une température proche de  $0^\circ\text{C}$ , sans lumière, dans un milieu pauvre en éléments minéraux et en carbone organique.

Le chercheur russe Sabit S. Abysov, fut le premier dès les années 80 à s'intéresser au contenu biologique de la glace de Vostok, en appliquant les techniques classiques de culture et

Figure 4 : Schéma du profil de la température dans la calotte glaciaire où le flux de froid vers le bas (flèche) dépend de la température (Temp) mais surtout de l'accumulation (Acc) de la neige en surface. Le flux géothermique le compense dans les régions centrales où la fusion apparaît et des lacs peuvent se former.

Cartoon showing temperature variation in ice in Antarctica. The flux of cold is downward (arrow) and depends on surface temperature (Temp) but mostly from the surface accumulation rate (Acc). In central regions, the geothermal heat is able to compensate and to overcome the downward flux, melting occurs and lake can be formed.





d'observations microscopiques. Des levures et des bactéries diverses ont été observées et cultivées. Si ces études ont le mérite d'être les premières, il est difficile de leur accorder un véritable crédit. En effet, l'étude du contenu chimique de la glace polaire, requiert des chambres « sans poussière » et des techniques ultra propres. Ce n'est qu'à ces conditions, maintenant universellement adoptées par les géochimistes, que le contenu chimique de la glace est déterminé avec confiance. Il est dès lors difficile d'accepter les résultats des études biologiques si les conditions similaires ne sont pas appliquées. A ce jour, constat doit être fait que l'étude du contenu biologique de la glace de glacier de Vostok et aussi de la calotte Antarctique reste à découvrir.

La glace d'accrétion offre l'opportunité d'étudier le contenu du lac. Trois équipes américaines ont publié rapidement leurs résultats, en 2001 mais qui n'ont toujours pas été confirmés à ce jour. De ces études on retiendra l'observation de microorganismes par microscopie, la possibilité de mise en culture directe sur substrat ou la détection d'activité biologique dans l'eau en utilisant des substrats marqués ( $^{14}\text{C}$ ), des concentrations en ADN suffisantes pour réaliser des amplifications par PCR directement sur l'eau, et les microorganismes identifiés paraissent très proches de ceux de notre environnement avec une faible diversité. Les auteurs ont plaidé pour le scénario d'un ensemencement du lac par le glacier, et l'extraordinaire adaptabilité des microorganismes de notre environnement à survivre aux conditions extrêmes.

On pourrait suivre ces auteurs et leur scénario qui paraît plausible, cependant leurs résultats interpellent les géochimistes de la glace, car les concentrations en éléments chimiques qui accompagnent ces études biologiques, suggèrent des contaminations. Au premier rang le fluide de forage car des valeurs de 80 ou 500 ppb de carbone qui ont publiées, sont incompatibles avec la chimie des acides organiques, et aucun des résultats n'a été confirmé. Ceci jette un doute sur les procédures de décontamination. On sait maintenant aussi que le kérosène de Vostok est loin d'être stérile, et il contient en outre des bactéries qui le dégradent et que l'on a identifié dans les parties extérieures des carottes mal décontaminées.

L'étude du contenu biologique extrêmement dilué de la glace d'accrétion, ne paraît possible qu'au travers de l'association des techniques très sensibles de biologie moléculaire (PCR) à celles utilisées pour les mesures chimiques de la glace. Russes et Français se sont associés dans cette aventure

lancée par M. Blot. Un inventaire complet et le traçage des contaminations à très faible niveau a demandé plusieurs années d'effort, et se poursuit encore, profitant de sensibilité des méthodes chimiques couplées à la puissance de l'identification de brins d'ADN après amplification. Les premiers résultats sur un échantillon qui contient des sédiments indiquent un très faible contenu biologique, et encore 70% des signatures ADN trouvées sont des bactéries vivant dans notre environnement, sur l'homme ou dans le fluide de forage, suggérant encore des contaminations résiduelles.

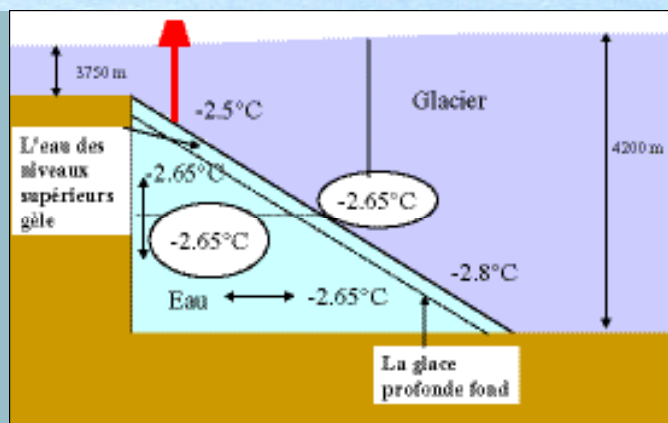
Cependant, 30 % des signatures restantes n'entrent pas dans la longue liste des agents de contamination et trois taxons sont considérés avec confiance étant autochtones du lac. Parmi eux, une bactérie thermophile modérée *Hydrogenophilus thermonucléus* ( $\beta$ Protéobactérie) trouvée dans les sources chaudes (40-50°C) ou dans les mines profondes, chimio-litho-autotrophe facultative pouvant oxyder l'hydrogène et fixer le  $\text{CO}_2$ . Les deux autres n'ont pas d'équivalent dans la banque de gènes, elles seraient nouvelles et l'analyse phylogénique les rattache à des micro-organismes vivant aussi dans les sources chaudes. Les résultats des études biologiques apparaissent indiscutables, car il est difficile d'imaginer une contamination du laboratoire avec de telles bactéries au demeurant pas très commune.

On n'avait pas envisagé de sources chaudes dans le lac Vostok vu le contexte géologique de vieux bouclier continental épais et froid. En fait, le relief entourant le lac, la dépression dans laquelle le lac est engoncé, les bords abrupts, impliquent ensemble des failles, fractures ou cassures provoquées par l'orogénèse ancienne (ancien rift). En fait, les infiltrations d'eau du lac dans les profondes fissures pourraient conduire au chauffage et une circulation hydrothermale. De plus, une activité tectonique locale (séismes) a été enregistrée au cours d'une campagne de terrain en janvier 2001. Ceci est d'importance car l'énergie des séismes des failles est libérée dans le lac et active la circulation des eaux.

Les indices de présence d'organismes chimio-autotrophes, les seuls qui finalement apparaissent capables de survivre aux conditions extrêmes, nécessitent d'être confirmés et approfondis par de nouvelles analyses, des tests de cultures en un milieu adapté (pression, température, hydrogène,  $\text{CO}_2$ ...). Ces recherches devraient se réaliser dans le cadre du programme « Geomex » qui se met en place.

Figure 5 : Schéma de principe montrant les différences de température de l'interface eau-glace pour le lac Vostok. La température varie entre le nord et le sud en réponse à la variation de pression. La température moyenne du lac est égale à la température moyenne de l'interface. Les eaux du lac produisent la fusion du glacier dans les profondeurs et elles regèlent dans la partie haute du lac.

Cartoon showing temperature variations of the interface lake-glacier for lake Vostok. Temperature change between the northern and the southern area, in response to the pressure variation of the melting point. The lake water temperature should be equivalent to the mean interface temperature. Due to the water circulation, water allow the deep ice layers to melt. Conversely, in upper level of the lake, lake water appear as super cooled with respect to the interface temperature and freezes.



## L'EXPLORATION FUTURE DES LACS SOUS GLACIAIRES.

Avec cette glace d'accrétion, l'exploration du lac Vostok, vient de commencer. Le prélèvement d'eau et les mesures *in-situ* apparaissent dès lors comme nécessaires pour de réelles avancées dans la connaissance de ce milieu extrême. Les sédiments du lac sont aussi intéressants car accumulés avant que l'Antarctique ne s'englace, il y a 35 millions d'années, représenteraient une série géologique de la période tertiaire. La NASA qui voit dans le lac Vostok un analogue à l'océan qui existerait sous la glace d'Europa, a très vite saisi l'opportunité et imaginé, l'exploration par sondes autonomes pénétrant la glace puis navigant dans la lac en l'analysant. Les Russes affichent un projet visant à prélever directement l'eau du lac en forant les 130 derniers mètres du forage numéro 5. Si le forage de la glace ne semble poser de problèmes, les risques de contamination du lac sont sérieux. La glace est un matériau mou et on ne peut se passer de 100 tonnes de fluide, actuellement un mélange à base de kérosène pour maintenir le trou ouvert. Si ce fluide n'a pas de conséquence pour les carottes de glace car elles sont imperméables, il est loin d'être compatible chimiquement et biologiquement avec les eaux pures du lac. Conscients de ces risques et de l'impact médiatique négatif en cas de pollution, les Russes limiteront probablement leur projet à sa première phase qui prévoit de forer 50 m de glace d'accrétion supplémentaire pour analyser les carottes de glace et laisseront les derniers 80 m intacts préservant ainsi l'intégrité du lac. Beaucoup de nations qui participent aux recherches en Antarctique ou dans l'espace sont intéressées par l'exploration des lacs sous-glaciaires et ce thème fait partie des discussions internationales au sein du SCAR. Une commission a été créée pour faire l'inventaire de tous les aspects scientifiques, techniques, et d'impacts environnementaux qu'entraînent de telles opérations. La commission qui s'est réunie dernièrement à Chamonix en avril 2003, a produit quatre rapports consultables électroniquement (<http://salegos-scar.montana.edu/>).

Actuellement la pénétration du lac Vostok reste un objectif ultime. Mas en attendant la solution technique sans risque, on se tourne dans un premier temps vers l'exploration des petits lacs où les avaries techniques n'auraient que des conséquences limitées. Les Américains envisagent les petits lacs près de la station de Pôle Sud. Dans la région de Dôme C, il existe une dizaine de lacs dont l'un d'eux, proche de la future station franco-italienne de Dome Concordia porte déjà son nom : Lac sous-glaciaire de Concordia. Il est plus petit que celui de Vostok (50 km) mais son interface inclinée devrait en faire un modèle réduit de Vostok. Il y a donc là, matière à proposer et réaliser dans le futur un grand projet fédérateur.

- Abysov, S. S. (1993). *Microorganisms in the Antarctic ice. Antarctic Microbiology*. E. I. Friedman. New York, John Wiley & Sons, Inc: 265-295.
- Bell R.E, M. s., A.A Tikku, G.K.C. Clarke, M.M. Gunter, C. C Meertens (2002). "Origin and fate of lake Vostok water frozen to the base of the east Antarctic ice sheet." *Nature* 416: 307-310.
- Jouzel, J., J. R. Petit, et al. (1999). " More than 200 meters of lake ice above subglacial Lake Vostok, Antarctica.." *Science* 286: 2138-2141.
- Kapitsa , A., J. F. Ridley, et al. (1996). "Large deep freshwater lake beneath the ice of central Antarctica." *Nature* 381(684-686).
- Karl, D. M., D. F. Bird, et al. (1999). "Microorganisms in the accreted ice of Lake Vostok, Antarctica." *Science* 286: 2144-2147.
- Petit, J. R., J. Jouzel, et al. (1999). "Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica." *Nature* 399(6735): 429-436.
- Prisco, J. C., E. E. Adams, et al. (1999). " Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica." *Science* 286: 2141-2143.
- Siebert, M. J., M. R. Dowdeswel, et al. (1996). "An inventory of Antarctic sub-glacial lakes." *Antarctic Science* 8: 281-286.
- Siebert, M. J., J. C. Ellis-Evans, et al. (2001). "Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes." *Nature* 414: 603-609.
- Souchez, R., J. R. Petit, et al. (2000). "Ice information in subglacial lake Vostok, central antarctica." *Earth Planetary Science Letters* 181: 529-538.
- <http://salegos-scar.montana.edu/>

## Remerciements >>>

Nous voudrions dédier ce texte à la mémoire de Michel Blot. Nous avons perdu accidentellement un collègue apprécié, dynamique, passionné qui n'a pas hésité à s'investir dans la biologie des glaces polaires. Les campagnes sur le terrain ont bénéficié du support de l'IPEV (programme Vostok et GLACIOLAC), des expéditions Russes et de la NSF américaine. Les travaux sur la glace d'accrétion ont bénéficié des soutiens du CNES (connaissance de l'Univers, exobiologie), des départements SDU-SDV du CNRS pour l'attribution d'un poste rouge à S. Bulat, de la fondation Balzan et du programme « Geomex ». Nous voulons tirer notre chapeau aux foreurs Russes, saluer tous ceux qui ont participé aux missions sur le terrain et nos collègues russes, américains et français qui nous ont aidés ou soutenus de près ou de loin dans ce projet.