

Les variations climatiques des derniers millénaires ont laissé des empreintes dans les profondeurs du sous-sol. Par simple diffusion thermique, les fluctuations de la température du sol se propagent lentement en profondeur. En analysant scrupuleusement les courbures des géothermes, il est possible de reconstruire les grands traits de l'histoire climatique d'une région, à une échelle de temps allant jusqu'à plusieurs millénaires. Les analyses globales des données géothermiques ont ainsi permis de déchiffrer les variations spatiales des tendances paléoclimatiques.

Les carottes de forage nous apprennent que la diffusion thermique est un processus très lent dans le sous-sol.

Core samples tell us that thermal diffusion is a slow process in the subsurface.

© Christian Judei / Palais de la découverte

Les empreintes paléothermiques du sous-sol



Laurent Guillou-Frottier

GÉOPHYSICIEN
SERVICE DES RESSOURCES
MINÉRALES – BRGM
l.guillou-frottier@brgm.fr

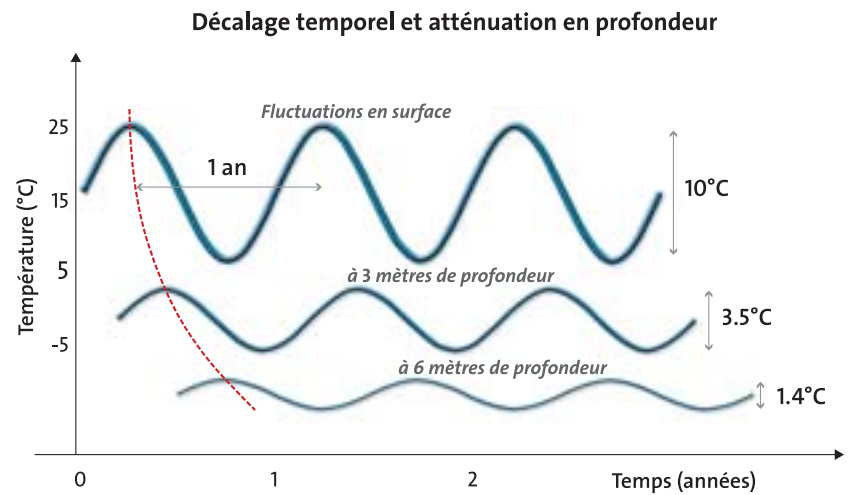
Paléoclimat et forages

La paléoclimatologie consiste à reconstruire et à comprendre les changements du climat, qu'il s'agisse des derniers siècles, des derniers millénaires ou même encore des périodes plus reculées. Les données instrumentales des stations météorologiques sont trop rares et ne remontent, au mieux, qu'à quelques siècles. Ainsi, de nombreuses techniques ont été développées pour déchiffrer les variations anciennes de la température de l'air à la surface du globe. Parmi celles-ci, des méthodes dites "indirectes", permettent de retrouver les durées et les amplitudes anormales des saisons. On analyse par exemple l'air emprisonné dans les carottes de glace pour connaître l'évolution de l'atmosphère. L'étude des cernes des arbres ("dendrochronologie") permet également, selon l'espacement entre chacune, de préciser les périodes froides et chaudes du passé, par rapport à des "années repères". D'autres disciplines comme la palynologie (étude des pollens) renseignent également sur l'histoire de la végétation et donc sur les changements climatiques anciens.

Afin de retrouver "directement" les changements de température de la surface du sol pour une période donnée, une méthode simple et pourtant peu connue, a été développée puis validée dans les années 1980 [Vasseur et al. (1983)].

Fig. 1 : Diagramme expliquant la propagation verticale d'une fluctuation de température en surface (ici la variation annuelle). Les trois courbes sont décalées verticalement pour la lisibilité, mais les amplitudes sont respectées.
Fig. 1: Sketch explaining the vertical propagation of annual surface temperature fluctuations. Curves are offset for better viewing, but respective amplitudes are conserved.

Source : L. Guillou-Frottier



Elle consiste à mesurer – dans un forage de plusieurs centaines de mètres de profondeur – la variation verticale de la température (mesure du "géotherme"), et à transformer l'information spatiale obtenue en information temporelle, par le biais de la théorie de la diffusion thermique. En d'autres termes, le gradient thermique naturel, généralement considéré comme constant, est en réalité affecté dans les premières centaines de mètres par la variabilité temporelle de la température du sol. Ainsi, toute perturbation thermique en surface, qui s'est produite dans le passé, se propage dans le sous-sol en y laissant une empreinte caractéristique. La théorie de la conduction de la chaleur fournit les expressions exactes – au sens mathématique – de l'amplitude et du décalage temporel de cette empreinte, pour une profondeur donnée. L'exercice consiste donc à inverser le signal géothermique (température en fonction de la profondeur) pour en déduire une information paléoclimatique (température de surface en fonction du temps).

Les méthodes paléoclimatologiques classiques citées en introduction résolvent difficilement les paléoevolutions à long terme (plusieurs siècles) du climat. En effet, les techniques de reconstruction empirique des températures passées, utilisées par ces méthodes, ont été analysées statistiquement, et il apparaît que les amplitudes de la variabilité séculaire auraient été sous-estimées d'un facteur 2 [von Storch et al. (2004)].

Toute perturbation thermique en surface, qui s'est produite dans le passé, se propage dans le sous-sol en y laissant une empreinte caractéristique.

Grâce à la lenteur du processus de diffusion thermique, les géothermes filtrent les fluctuations de courte durée pour ne garder que l'empreinte des tendances paléoclimatiques séculaires. Les sources de perturbations thermiques du sous-sol sont toutefois nombreuses (voir encadré), et les incertitudes demeurent non négligeables : la comparaison des résultats issus de la méthode thermique avec ceux des autres méthodes reste donc indispensable.

Diffusion des perturbations, atténuation et décalage temporel

Dans le cas où les transferts de chaleur dans le sous-sol sont purement conductifs (donc en l'absence de mouvement de fluides souterrains), la température du sous-sol à une profondeur donnée dépend principalement de trois paramètres, à savoir la température à la surface, la conductivité thermique du milieu et le flux de chaleur profond. En supposant que sur des périodes de plusieurs millénaires, les deux derniers paramètres restent constants, alors ce sont les variations temporelles de la température de surface qui régissent celles du proche sous-sol.

La théorie de la diffusion thermique fournit des outils analytiques pour déterminer quantitativement l'influence des conditions de surface sur les températures profondes. Pour donner un exemple concret, les variations annuelles de la température du sol, disons $\pm 10^\circ\text{C}$, se diffusent en profondeur à une "vitesse" verticale de 1,6 m/mois, tout en s'atténuant. Par exemple, le maximum estival ($+10^\circ\text{C}$ début août) se traduira à une profondeur de 3 m par une perturbation maximum de $+3,5^\circ\text{C}$, mais que l'on mesurera 2 mois après ; à 6 m de profondeur, le maximum de la perturbation atteindra $+1,4^\circ\text{C}$ et sera mesuré début décembre (voir fig. 1).

La théorie de la diffusion thermique fournit des outils analytiques pour déterminer quantitativement l'influence des conditions de surface sur les températures profondes.



Une perturbation climatique jouant sur 100 ans pénétrera dix fois plus profondément que la variation annuelle, mais à une vitesse dix fois moindre (valeurs issues de la théorie de la conduction). Lorsque l'on mesure la température à 100 mètres sous nos pieds, on obtient une information sur la température moyenne qui régnait à la surface il y a environ 300 ans, et l'effet des dernières glaciations (il y a environ 20 000 ans) se distingue dans les géothermes profonds de plusieurs milliers de mètres.

Des gradients thermiques négatifs !

«La température augmente avec la profondeur». Cette affirmation - tout à fait correcte lorsque l'on considère un intervalle de plusieurs centaines de mètres de profondeur - peut être trompeuse si l'on examine les températures dans la première centaine de mètres. En effet, le réchauffement climatique du siècle dernier (de l'ordre de + 1 °C à la surface), s'est diffusé dans les profondeurs du sous-sol. Selon les conditions de surface qui caractérisent les échanges entre l'atmosphère et le sol (présence, nature et évolution du couvert végétal, en particulier), on enregistre ou non ce signal.

Dans le cas où les conditions thermiques de surface n'ont pas varié (voir un contre-exemple dans l'encadré ci-contre), on distingue aisément une courbure du géotherme, se traduisant par des gradients thermiques négatifs dans les premières dizaines de mètres de profondeur. C'est le cas de plusieurs profils montrés dans la figure 2, chacun étant mesuré dans la même région du bouclier canadien : le réchauffement climatique actuel se visualise aisément sur quatre profils (94-10, 94-11, 94-06, 94-07), mais cette courbure n'est pas présente sur certains (exemple 94-13), ce qui montre que les conditions de surface peuvent affecter les températures profondes.

Inversion des géothermes

Afin d'éviter une interprétation qualitative trop hasardeuse, on procède à une analyse mathématique du signal (voir encadré page suivante). Pour décrypter les perturbations causées par des événements paléoclimatiques à la fois récents et anciens, on réalise une "inversion" des profils thermiques. En d'autres termes, on suppose que les mesures contiennent non seulement l'augmentation naturelle de la température avec la profondeur, mais également les signaux correspondant aux propagations successives d'un ensemble d'événements paléoclimatiques. La précision sur l'amplitude et la durée d'un événement paléoclimatique diminue dès que l'on examine des données très profondes, c'est-à-dire correspondant à des périodes très anciennes. Pour les siècles derniers, l'incertitude reste faible et l'on distingue facilement les "petits âges glaciaires" tout comme le réchauffement actuel.

LES «FAUX» SIGNAUX PALÉOCLIMATIQUES

Les géothermes peuvent être perturbés de façon permanente par des hétérogénéités de la surface, menant à des courbures similaires à celles des signaux paléoclimatiques.

C'est le cas de profils thermiques situés au voisinage d'un corps géologique anormalement conducteur (comme les quartzites), et l'inversion des géothermes permet même de proposer une histoire paléoclimatique analogue à celle de la figure 3. C'est également le cas dans les

régions froides où des lentilles de pergélisol sont encore présentes. La figure 5 montre trois profils mesurés au nord du Canada. On remarque qu'en s'éloignant de la lentille, le profil thermique montre une courbure identique à un "réchauffement récent". Lorsque ces perturbations sont permanentes (plusieurs décennies à un siècle), alors il y a un risque à confondre les courbures dues à des hétérogénéités de surface, avec les signaux paléoclimatiques. ■

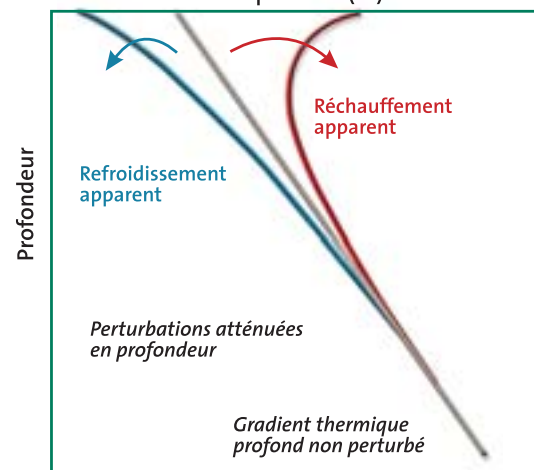
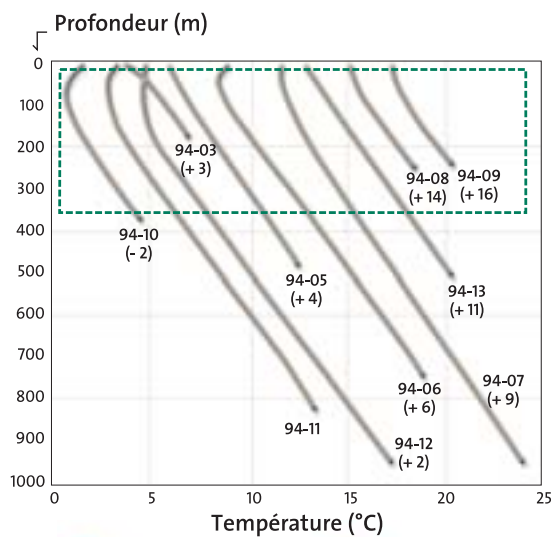


Fig. 2 : En haut, les 10 profils de température mesurés dans une même région (ceinture de nickel de Thompson, Manitoba) montrent diverses courbures dans les 300 premiers mètres (zone encadrée). Le schéma du bas précise l'interprétation visuelle des courbures du géotherme. La présence d'un gradient thermique négatif (courbe rouge) est le signe du réchauffement récent.

Fig. 2: Top: 10 temperature profiles measured in boreholes in the Thompson nickel belt, Manitoba, Canada, showing various curvatures within the first 300 m (dashed rectangle). Bottom: visual interpretation of geotherm curvatures. Presence of a negative temperature gradient (red curve) marks the signature of recent global warming.

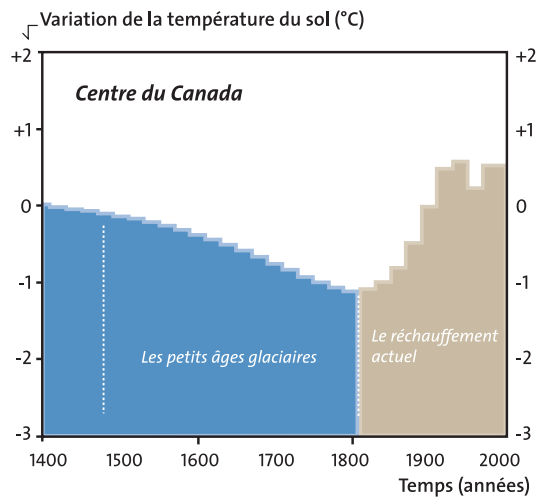
Source : L. Guillou-Frottier et al. 1998



Fig. 3 : Histoire de la température du sol obtenue par inversion simultanée de dix profils thermiques au centre du Canada.

Fig. 3: Ground-surface temperature history in central Canada as shown by simultaneous inversion of ten temperature profiles.

Source : L. Guillou-Frottier



Des résultats compatibles dans le monde entier

Les «petits âges glaciaires»

La figure 3 montre l'histoire de la température du sol dans le centre du Canada, après avoir inversé simultanément 10 profils thermiques particulièrement adaptés à ce type d'études.

On distingue les "petits âges glaciaires", dont le minimum se situe vers 1820, suivi du réchauffement actuel, chacun des deux épisodes montrant des amplitudes d'environ 1°C. Toujours au Canada, mais dans la partie orientale, le signal du réchauffement actuel corrèle parfaitement avec l'augmentation de la teneur en CO₂ des carottes de glace. La chronologie des petits âges glaciaires a également été confirmée par des données dendrochronologiques [Beltrami et al. (1995)]. Dans le centre et dans l'ouest des Etats-Unis, des signatures similaires sont obtenues, mais les amplitudes des périodes anormales montrent clairement une dépendance avec la latitude.

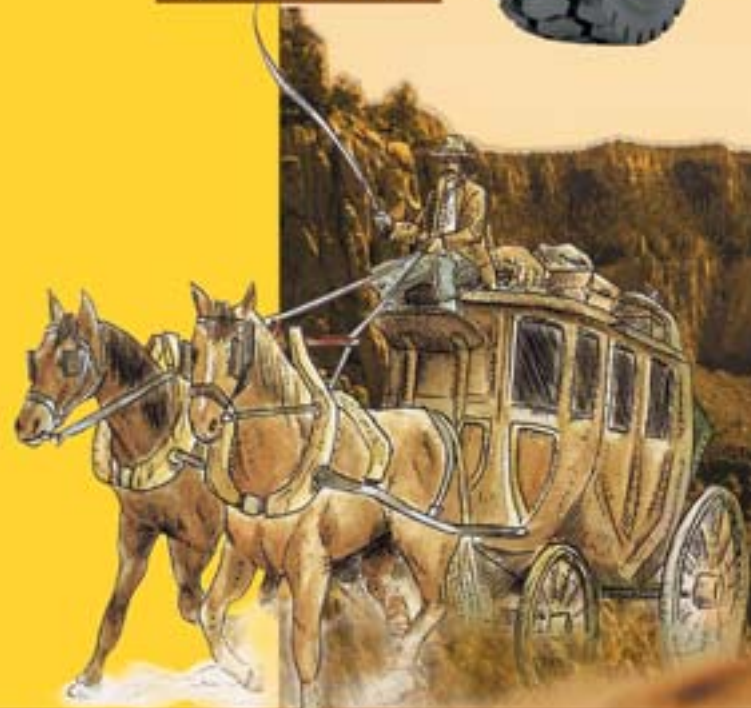
Dans plusieurs régions d'Europe (République Tchèque, Bavière, centre de la France), les quelques forages très profonds (plus de mille mètres) ont permis d'identifier les petits âges glaciaires, mais également le "petit optimum climatique" de l'an Mil [Mareschal & Vasseur (1992)].

► LE RETOUR AUX CLIMATS ANCIENS

Pour «inverser» un profil thermique on isole la composante transitoire du signal. Un géotherme contient en effet la superposition de l'augmentation naturelle permanente de la température en fonction de la profondeur, et la réponse aux changements successifs de la température du sol. L'une des méthodes d'inversion, dite de "décomposition en valeurs singulières" permet de résoudre un système d'équations linéaires où les inconnues sont le géotherme d'équilibre, les amplitudes et les durées de chaque épisode paléoclimatique (fig. 6). ■



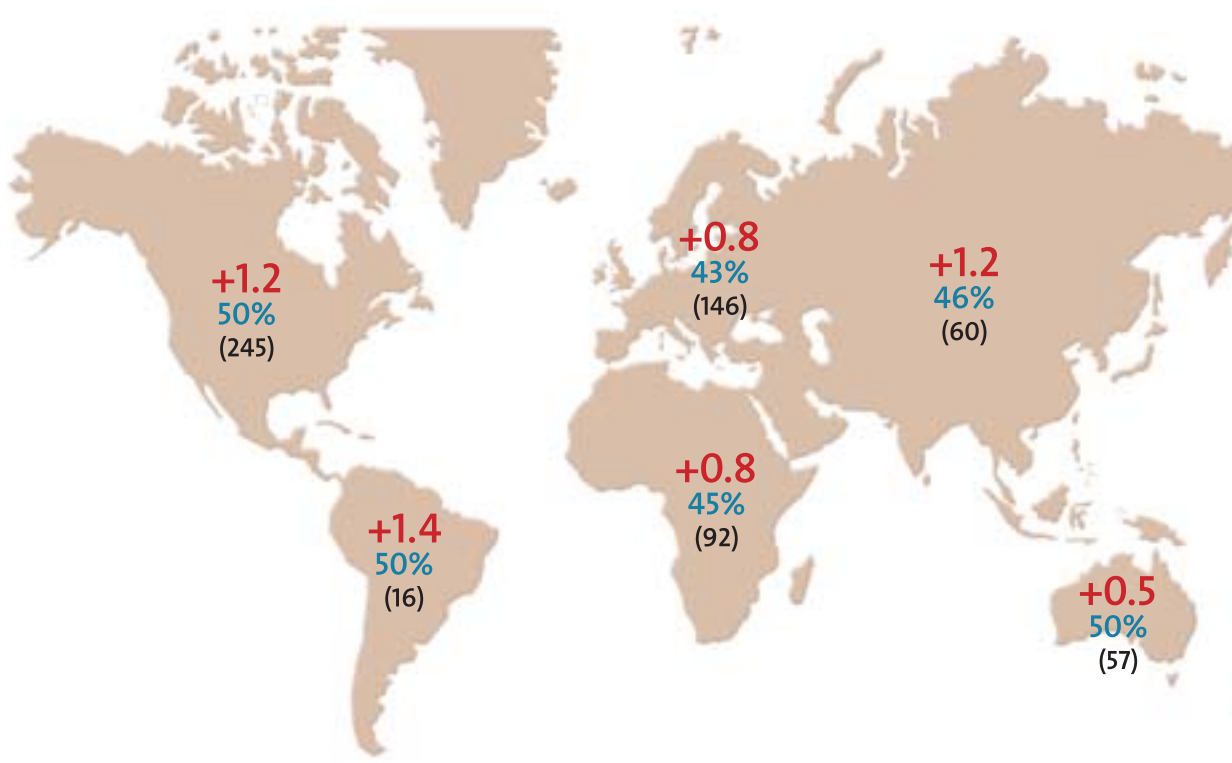
Les défricheurs d'espaces ont troqué la diligence pour les engins de travaux mais l'esprit est resté le même...



* Nous voulons Goodyear

GOODYEAR DUNLOP TIRES FRANCE

Tél. : 01 47 16 23 06 - Fax : 01 47 16 23 13



■ Élévation de la température du sol du continent (en °C) depuis 500 ans
 ■ Pourcentage de cette élévation au cours du XX^{ème} siècle
 (Nombre de forages utilisés pour les reconstructions paléoclimatiques)

◀ Fig. 4 : Analyses globales des changements de la température du sol sur les 5 derniers siècles, à partir des mesures thermiques en forage, dont le nombre est indiqué entre parenthèses pour chaque continent. La moitié de cette élévation a eu lieu au cours du XX^{ème} siècle (d'après Huang et al., 2000).
 Fig. 4: Global analyses of ground-surface temperature changes over the past five centuries, as shown by inversion of borehole-temperature profiles. Number of used boreholes is indicated in brackets. Half of the temperature increase occurred during the 20th century (after Huang et al., 2000).
 Source : L. Guillou-Frottier

Le réchauffement actuel

L'ensemble des reconstructions paléoclimatiques (plus de 600 forages analysés) a été compilé pour donner une image globale sur les 5 derniers siècles (fig. 4, d'après Huang et al., 2000). Il apparaît que le réchauffement climatique est bien planétaire et, que sur tous les continents, c'est au cours du XX^{ème} siècle que l'augmentation de la température à la surface du globe est la plus marquée. Toutefois, il est à noter que les amplitudes et le démarrage du réchauffement récent varient d'un continent à l'autre. Ces résultats, qu'ils concernent les petits âges glaciaires ou le réchauffement climatique actuel, confirment les modèles climatiques selon lesquels deux régions distantes d'au moins 500 km pourraient réagir différemment à des événements climatiques globaux.

“ Le réchauffement climatique est bien planétaire et, sur tous les continents, c'est au cours du XX^{ème} siècle que l'augmentation de la température à la surface du globe est la plus marquée. ”

Perspectives pour la paléoclimatologie thermique

La connaissance précise des variations anciennes du climat permet de tester des modèles prédictifs basés sur la simulation de l'évolution future du climat. Les modèles numériques de l'évolution du climat sont particulièrement sensibles à l'évolution à long terme de certains paramètres (concentration des gaz à effet de serre, température de l'eau de mer...).



Paleoclimatic signatures in the subsurface

The knowledge and understanding of past climatic changes are essential and necessary for validating global climate models dedicated to predictive scenarios dealing with recent global warming. Numerous techniques allow inferring temperature histories over the past centuries. One way of directly obtaining past ground-surface temperatures consists in inverting temperature profiles measured in sufficiently deep boreholes. Transient surface-temperature perturbations propagate downward and, although attenuated, are recorded in the Earth's subsurface as perturbations of a steady-state temperature regime. In deep boreholes, two main episodes are clearly identified in the surface-temperature history: a cold period lasting several hundreds of years before the 19th century (the "Little Ice Ages") and the global warming trend of the past century. Comparisons between available reconstructions suggest that timing and amplitude of these climate episodes vary between regions. Amplitudes of long-term paleoclimatic trends derived from borehole temperatures are not easily decipherable with other techniques. Since numerous deep boreholes are still available in the world, it may be worth increasing the geothermal database on paleoclimatic signatures.

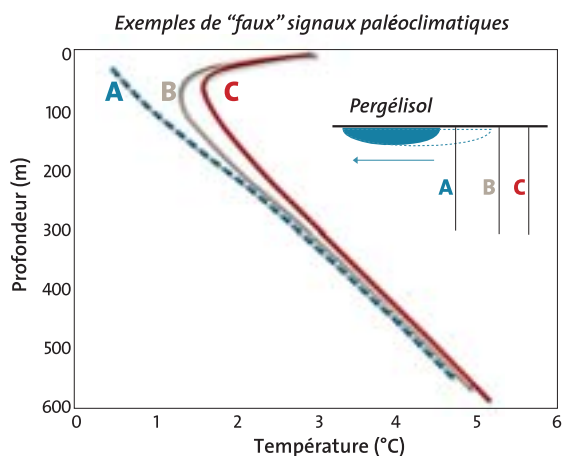


Fig. 5 : Profils de température mesurés dans trois forages adjacents, au voisinage d'une lentille de sol gelé. Les courbures des profils B et C ressemblent à celles des signaux paléoclimatiques concernant le réchauffement actuel (d'après Guillou-Frottier et al., 1998).

Fig. 5: Temperature profiles recorded in three neighbouring boreholes near a permafrost lens. Curvatures of profiles B and C look like those of paleoclimatic signatures related to recent warming (after Guillou-Frottier et al., 1998).

Source : L. Guillou-Frottier

Les différents scénarios prédictifs présentés par le GIEC, plus ou moins catastrophiques, montrent l'extrême sensibilité de ces modèles à l'estimation précise du réchauffement planétaire actuel. Aussi, c'est en affinant les différentes méthodes et en les comparant les unes aux autres que ces modèles prédictifs seront de plus en plus précis.

“ C'est en affinant les différentes méthodes et en les comparant les unes aux autres que ces modèles prédictifs seront de plus en plus précis. ”

Chaque année, on peut estimer le nombre de nouveaux forages suffisamment profonds à plusieurs milliers. Il n'est pas inconcevable d'imposer aux compagnies minières la mise à disposition et la conservation de ces nouveaux forages dans le but de réaliser de nouveaux profils thermiques. Par exemple, dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, certains projets industriels peuvent bénéficier de "crédits CO₂", comme cela est le cas depuis l'année 2000 au travers du programme "Carbon Finance" de la Banque Mondiale. De tels engagements permettraient d'alimenter significativement la base de données "paléoclimats et forages", donc de parvenir rapidement à une couverture globale des archives paléoclimatiques du sous-sol. ■

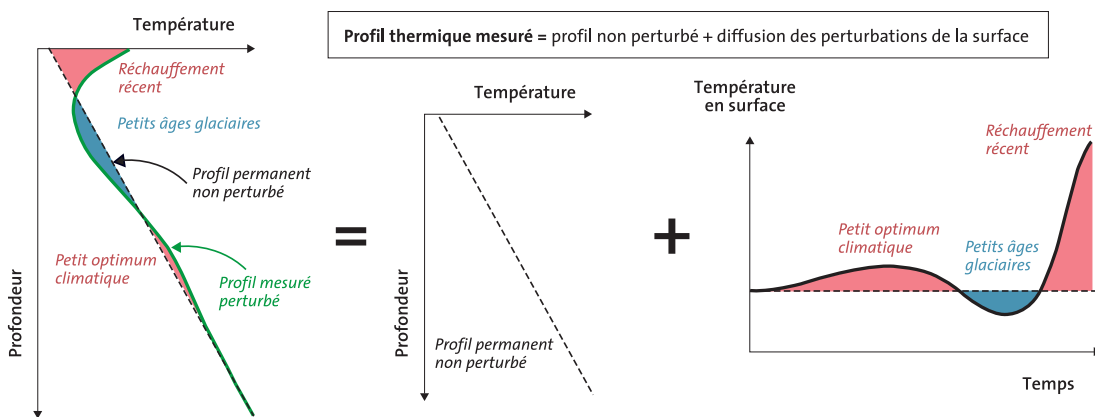


Fig. 6 : Décomposition du signal mesuré en une composante permanente et une composante transitoire, qui représente la solution de l'inversion du géotherme, c'est-à-dire l'histoire de la température du sol.

Fig. 6: Break-down of the measured signal into a steady-state and a transient component, which is the solution of the temperature-profile inversion, i.e. the ground-surface temperature history.

Source : L. Guillou-Frottier

Bibliographie : Beltrami H., Chapman D.S., Archambault S., et Bergeron Y. (1995) - Reconstruction of high resolution ground surface temperature histories combining dendrochronological and geothermal data, Earth and Planetary Science Letters, 136, 437-445. Guillou-Frottier L., Mareschal J.C., et Musset J. (1998) - Ground surface temperature history in central Canada inferred from ten selected borehole temperature profiles, Journal of Geophysical Research, 103, B4, 7385-7397. Huang S., Pollack H.N., et Shen P.Y. (2000) - Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, Nature, 403, 756-758. Mareschal J.C. et Vasseur G. (1992) - Ground temperature history from two deep boreholes in central France, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, Global and Planetary Change section, 98, 185-192. Vasseur G., Bernard P., van de Meulebrouck J., Kast Y., et Jolivet, J. (1983) - Holocene paleotemperatures deduced from geothermal measurements, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 43, 237-259. Von Storch H., Zorita E., Jones J., Dimitriev Y., Gonzales-Rouco F., et Tett S. (2004) - Reconstructing past climate from noisy data, Science, 306, 679-682.