

Histoire de la température du sol déduite de profils thermiques en forage: méthode, limites et perspectives

Laurent Guillou-Frottier

▶ **To cite this version:**

Laurent Guillou-Frottier. Histoire de la température du sol déduite de profils thermiques en forage: méthode, limites et perspectives. Regards croisés sur les changements globaux, Nov 2002, Arles, France. 2002. hal-01132965

HAL Id: hal-01132965
https://brgm.hal.science/hal-01132965

Submitted on 18 Mar 2015

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

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

Histoire de la température du sol déduite de profils thermiques en forage : méthode, limites et perspectives

Laurent Guillou-Frottier

BRGM, Service des Ressources Minérales, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans, France .

Tel : 02 38 64 47 91 ; Fax : 02 38 64 36 52 ; e-mail : l.guillou-frottier@brgm.fr

Résumé

• Par simple **diffusion thermique**, les variations de la température du sol se propagent en profondeur. Pour les variations climatiques séculaires, de l'ordre de 1°C, on retrouve 10 à 50% du signal de la perturbation entre 50 et 500m de profondeur, selon la durée et l'âge de la perturbation. Par exemple, les analyses théoriques montrent qu'on retrouve à 300 m de profondeur, 23% d'une perturbation thermique instantanée de la surface, qui aurait eu lieu 1000 ans auparavant. Les estimations quantitatives précises nécessitent néanmoins la connaissance *a priori* de l'histoire paleoclimatique.

• **L'inversion des profils thermiques** réalisés en forage permet de retrouver l'histoire de la température du sol (évènements et durées), dans un domaine temporel intermédiaire entre celui atteint par les archives historiques (quelques centaines d'années) et celui approché par les données géologiques (plusieurs millénaires). En outre, cette « méthode thermique » représente **la seule méthode « directe »** pour évaluer l'histoire paleoclimatique d'une région (comparativement à la palynologie ou la dendrochronologie par exemple). Elle reste peu utilisée en France et en Europe, alors que plusieurs centaines de forages sont disponibles.

• Afin de mieux résoudre le **passé climatique récent**, imprimé dans les premières dizaines de mètres du sous-sol, il est toutefois nécessaire de **combiner à la fois** :

- une meilleure connaissance de la diffusivité thermique des sols non rocheux (**mesures en laboratoire**)
- des **enregistrements précis de profils thermiques** dans les premières dizaines de mètres du sous-sol, non perturbés par des écoulements souterrains (**mesures sur le terrain**)
- des estimations de la diffusivité thermique et de ses variations géographiques et temporelles par thermographie infrarouge, « interférométrie thermique », ... (**télédétection**)

Principe et méthode d'inversion

Plusieurs méthodes d'inversion des profils thermiques ont été mises au point dans les années 80-90. Il s'agit de séparer la composante transitoire $T_t(z)$ dans le profil thermique mesuré $T(z)$ (donc connu), où T est la profondeur mesurée à la profondeur z :

$$T(z) = T_0 + R(z)\,q_0 + T_t(z) \qquad (1)$$

avec T_0 et q_0 les températures et flux de chaleur de référence à la surface (non perturbés, donc inconnus), et où R(z) est la résistance thermique à la profondeur z, que l'on exprime avec $k(z)$, conductivité thermique mesurée en laboratoire (connue) :

$$R(z) = \int_0^z \frac{dz'}{k(z')} \qquad (2)$$

En assimilant la composante transitoire $T_t(z)$ à la réponse aux K changements successifs de température (T_k) entre les instants t_{k-1} et t_k, la perturbation est égale à la somme de ces changements qui se sont diffusés en subsurface au cours du temps :

$$pour \quad t_{k-1} < t < t_k, \quad T(z=0,\,t) = T_k \quad \Rightarrow \quad T_t(z) = \sum_{k=1}^{K} T_k \left[erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa\, t_k}}\right) - erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa\, t_{k-1}}}\right)\right] \qquad (3)$$

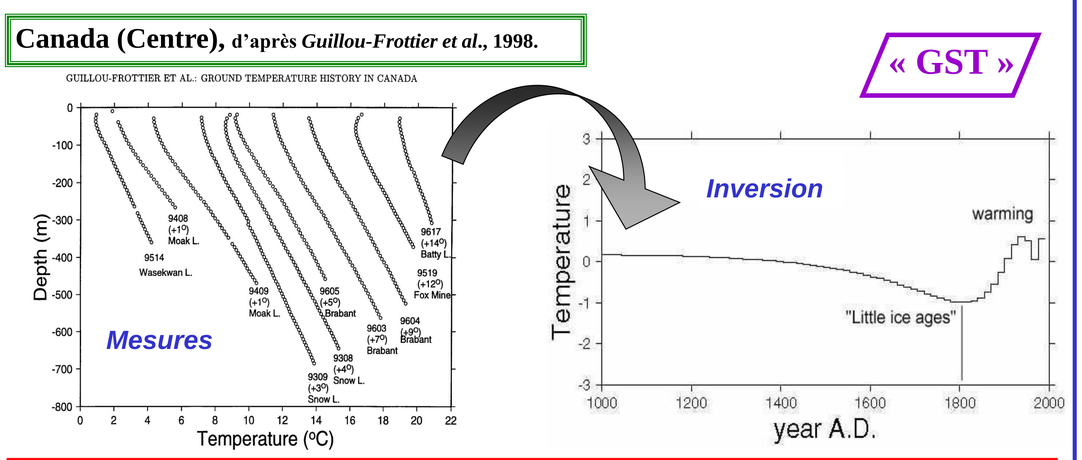
(voir *Carslaw et Jaeger*, 1959 ; *Vasseur et al.*, 1983). Le problème inverse s'écrit alors comme un système d'équations linéaires :

$$\theta_j = A_{jk}\, X_k \qquad (4)$$

où θ_j sont les températures mesurées aux profondeurs z_j, et X_k les K+2 paramètres inconnus (T_0, q_0, T_1, ...T_K). La matrice A_{jk} contient 1 dans la première colonne, les résistances thermiques $R(z_j)$ dans la deuxième, et les différences exprimées dans l'équation (3) dans les autres. On obtient ainsi un système de N équations (N étant le nombre de mesures de températures) à K+2 inconnues, système pouvant être à la fois sur-déterminé et sous-déterminé. La méthode de décomposition en valeurs singulières permet alors de résoudre de tels systèmes en ajustant un paramètre d'amortissement (voir *Lanczos*, 1961).

Exemples (USA et Canada)

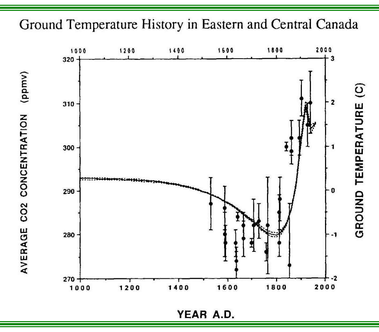
Canada (Centre), d'après *Guillou-Frottier et al.*, 1998.



Inversion simultanée (à droite) des 10 profils thermiques sélectionnés (à gauche) : on obtient l'histoire de la température du sol durant le dernier millénaire. On distingue une signature du type **« petit âge glaciaire »,** ainsi que le **réchauffement récent** de + de 1°C depuis 1820 (cas du centre du Canada).

Canada (centre et est), d'après *Beltrami et Mareschal*, 1992.

+ CO_2



Reconstruction de l'histoire de la température du sol en combinant les données du centre et de l'est du Canada (courbe continue). La variation de la **concentration de CO_2** dans une carotte de glace du Groënland (points et barres d'erreur) est en **corrélation avec le réchauffement récent** à partir du début du XIX^{ème} siècle.

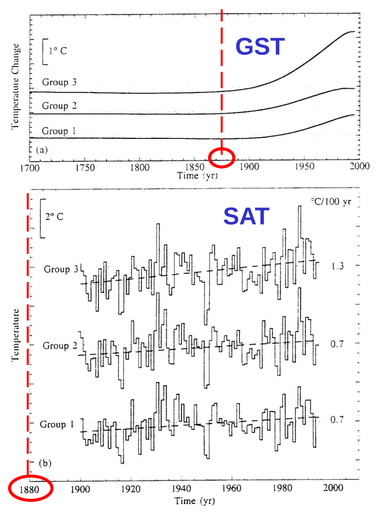
Nord des U.S.A., d'après *Harris et Gosnold*, 1999.

+ SAT

Reconstruction de l'histoire de la température du sol (**ground surface temperature, GST**) dans les grandes plaines, au nord des U.S.A., selon trois régions voisines, ici appelées « groupe » 1, 2, et 3. Le groupe 3 est situé au bord du Canada, et sujet au pergélisol.

La figure du dessous montre la température de l'air en surface (**surface air temperature, SAT**), pour les trois groupes.

Les **allures générales sont confirmées** pour les deux types d'information. Selon les auteurs, GST et SAT se ressemblent d'autant plus que le sol n'est pas sujet au pergélisol (groupes 1 et 2) : voir les amplitudes déduites des deux sources d'informations.



Limites

• Quelle que soit la méthode utilisée (voir *Beck et al*. 1992), **les résultats peuvent légèrement différer dans les amplitudes et dans la précision temporelle** des perturbations.

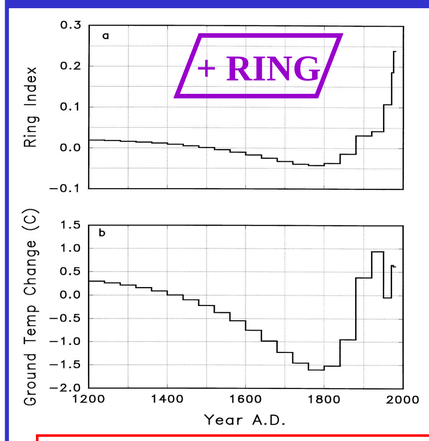
• Afin d'augmenter la résolution, il semble nécessaire de **combiner les informations thermiques avec d'autres informations indépendantes** (isotopes de l'oxygène, cernes des arbres, etc).

• Il n'est pas possible, par la **lenteur de la diffusion thermique dans les roches**, de reconstruire un passé climatique datant de plus de 5 à 6 millénaires.

• Par contre, avec des mesures très précises dans des terrains non perturbés, et à condition de bien connaître les propriétés thermiques du sous-sol, il est possible de **remonter au passé climatique récent** (quelques décades à quelques siècles) afin de valider les informations historiques, ou de compléter les archives manquantes dans une région.

Autres ressemblances

+ RING



Comparaison entre histoire de la température du sol et signaux « filtrés » issus des **anneaux de croissance des arbres** (dendrochronologie), d'après *Beltrami et al.* (1995).

Les petits âges glaciaires apparaissent dans les deux reconstructions.

Perspectives méthodologiques

• ***Diffusivité thermique du sous-sol ???***



Roches / Sables : $\kappa \approx$ **0.8-1.2 . 10^{-6} m²/s**

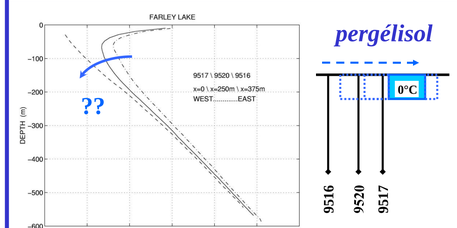


Sol meubles ; Argles : $\kappa \approx$ **0.3 - ??? . 10^{-6} m²/s**

Besoin de développements méthodologiques pour connaître la diffusivité thermique κ du proche sous-sol :
la vitesse de transfert des perturbations thermiques de la surface est régie par κ, valeur constante pour le sous-sol rocheux, mais trop peu connue pour les sols meubles.

Mesures en laboratoire

« Faux signaux » climatiques

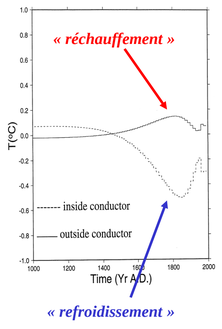


Profils thermiques enregistrés autour d'une lentille de pergélisol. Le **refroidissement apparent** n'est dû qu'à l'ancienne extension latérale de la lentille.
(un modèle simple reproduit le signal)

Inversions de 2 profils thermiques théoriques calculés à l'intérieur et à l'extérieur d'un **conducteur thermique**, comme pour le cas d'un filon de quartzites.

Un signal apparent de réchauffement ou de refroidissement, centré vers 1850, apparaît dans l'histoire de la température du sol...

réfraction



Et pour l'Europe...

MASSIF CENTRAL (*Mareschal et Vasseur*, 1992)

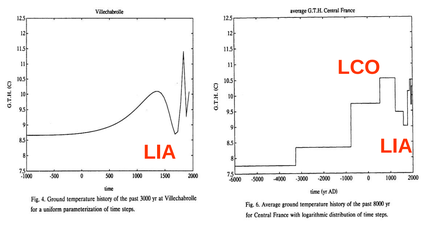
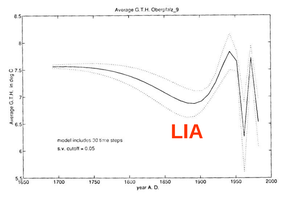


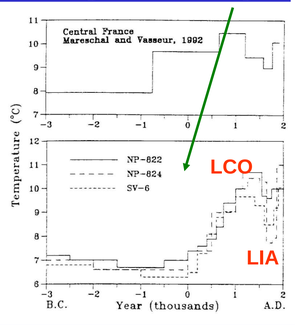
Fig. 4. Ground temperature history of the past 3000 yr at Villechaboile for a uniform parameterization of time steps.

Fig. 6. Average ground temperature history of the past 8000 yr for Central France with logarithmic distribution of time steps.

BAVIERE (*Clauser et Mareschal*, 1995)



REPUBLIQUE TCHEQUE (*Bodri et Cermak*, 1997) - *forages jusqu'à 6000m de profondeur.*



Comme pour l'Amérique du Nord, l'ensemble des inversions de profils thermiques en Europe a permis de reconnaître les épisodes tels que celui du réchauffement récent, celui des petits âges glaciaires (LIA), ainsi que celui du « little climatic optimum » (LCO) du début du 2^{e} millénaire.

(voir également Huang et al., 2000)

• ***Variabilité géographique du signal climatique ???***

Les signaux paleoclimatiques varient d'une région à l'autre (quelques 100 km) : l'apport de la télédétection pour la variabilité des propriétés thermiques (**thermographie infrarouge**), devrait permettre de préciser les sources de variation des signaux géothermiques à faible profondeur.

• ***Variabilité temporelle de la diffusivité thermique ???***

Par des études de type « **interférométrie thermique** », il devrait être possible d'identifier une variabilité temporelle (quelques 10 ans) de la réponse du sol aux sollicitations paleoclimatiques, voire d'en déchiffrer les causes.

BRGM
3, av. C-Guillemin
BP 6009
45060 Orléans Cedex
FRANCE
Phone : 02 38 64 47 91
Fax : 02 38 64 36 52

Présenté au colloque :

« Regards croisés sur les changements globaux »

Arles, France.

25-29 nov. 2002

SERVING THE EARTH

Références :

- **Beck, A.E., P.Y. Shen, H. Beltrami, J.-C. Mareschal, J. Safanda, M.N. Sebagenzi, G. Vasseur and K. Wang**, A Comparison of Five Different Analyses in the Interpretation of Five Borehole Temperature Data Sets, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Paleoecol.*, (*Glob. Planet. Change Section*), 98, 101-112, 1992.
- **Beltrami, H. and J.-C. Mareschal**, Ground Temperature Histories for Central and Eastern Canada from Geothermal Measurements : Little Ice Age Signature, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 689-692, 1992.
- **Beltrami, H., D.S. Chapman, S. Archambault and Y. Bergeron**, Reconstruction of High Resolution Ground Temperature Histories Combining Dendrochronological and Geothermal Data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 136, 437-445, 1995. et al., 1995.
- **Bodri, L. and V. Cermak**, Reconstruction of remote climate changes from borehole temperatures, *Glob. Planet. Change*, 15, 47-57, 1997.
- **Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger**, Conduction of Heat in Solids, 2nd Ed., Oxford University Press, 510 pp., 1959.
- **Clauser, C. and J.-C. Mareschal**, Ground Temperature History in Central Europe from Borehole Temperature Data, *Geophys. J. Int.*, 121, 805-817, 1995.
- **Guillou-Frottier, L., J.-C. Mareschal and J. Musset**, Ground Surface Temperature History in Central Canada Inferred from 10 Selected Boreholes Temperature Profiles, *J. Geophys. Res.*, 103, B4, 7385-7397, 1998.
- **Harris, R.N. and W. D. Gosnold**, Comparison of borehole temperature-depth profiles and surface air temperatures in the northern plains of the USA, *Geophys. J. Int.*, 138, 541-548, 1999.
- **Huang, S., H.N. Pollack and P.-Y. Shen**, Temperature Trends over the Past Five Centuries Reconstructed from Borehole Temperatures, *Nature*, 403, 756-758, 2000.
- **Lancsoz, C.**, Linear Differential Operators, 564 pp., D. Van Nostrand, Princeton, N.J., 1961.
- **Mareschal, J.-C. and G. Vasseur**, Ground Temperature History from two Deep Boreholes in Central France, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, (*Glob. Planet. Change Section*), 98, 185-192, 1992.
- **Vasseur, G., P. Bernard, J. Van de Meulebrouck, Y. Kast and J. Jolivet**, Holocene Paleotemperatures Deduced from Geothermal Measurements, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 43, 237-259, 1983.