



Transmission de chaleur appliquée aux sciences de la Terre

GEO-1504

Cours 2 – Géodynamique

Nomenclature

- b (m) Épaisseur de sédiments
- f (-) Facteur de correction pour le temps de circulation de la boue de forage
- g (K m⁻¹) Gradient géothermique
- g' (K m⁻¹) Gradient atmosphérique
- H (m) Hauteur d'une colline
- q (W m⁻²) Flux de chaleur
- \dot{Q} (W m⁻³) Taux de génération de chaleur
- T (K) Température
- V (K) Pas de température
- w (m) Demi-largeur d'une colline
- λ (W m⁻¹ K⁻¹) Conductivité thermique

Le flux de chaleur terrestre

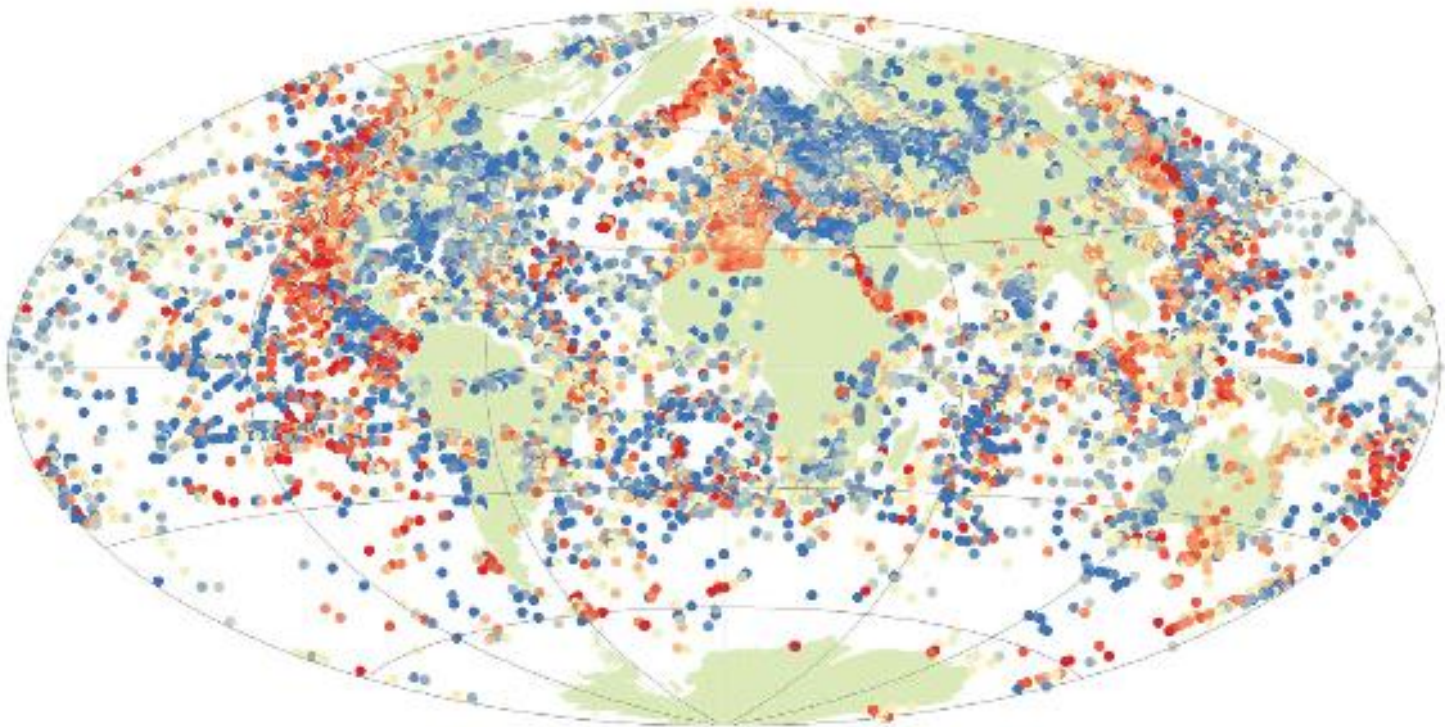
Chaleur dégagée à la surface de la Terre qui provient du refroidissement de la Terre et de la génération de chaleur issue de la dégradation des éléments radioactifs (mW m^{-2})

- Méthode de mesure
- Analyse et corrections
- Interprétation

Rappel - le flux de chaleur terrestre

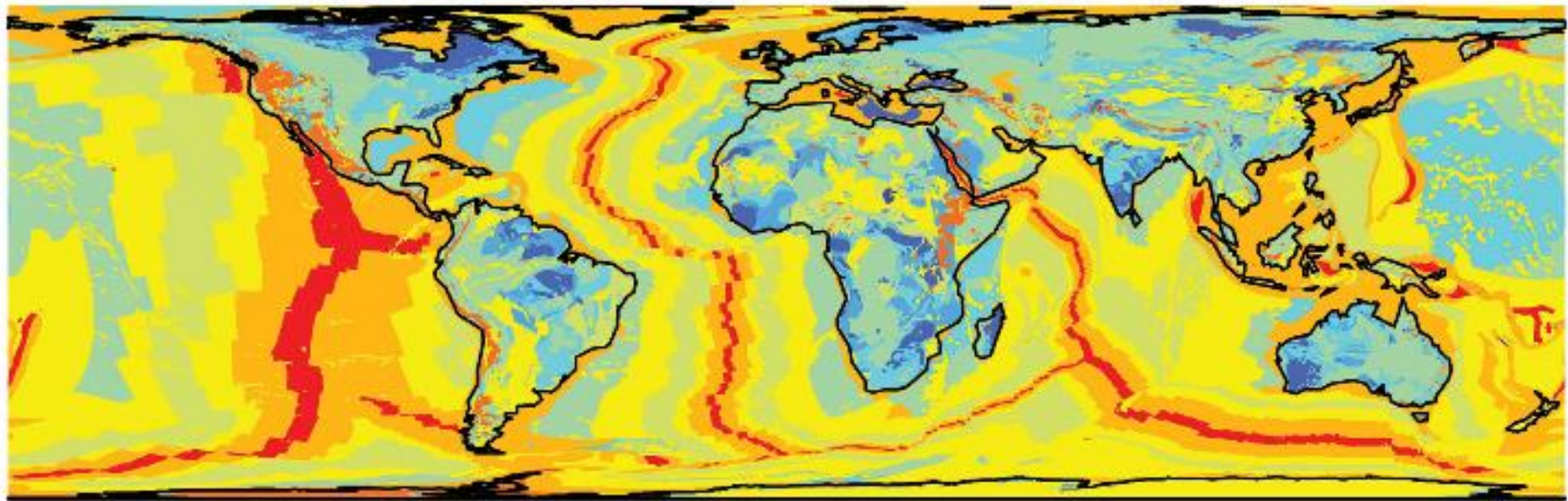
Heat Flow Data-points (mW m⁻²)

- 0 - 32
- 33 - 43
- 44 - 50
- 51 - 57
- 58 - 65
- 66 - 74
- 75 - 86
- 87 - 106
- 107 - 162
- 163 - 9999

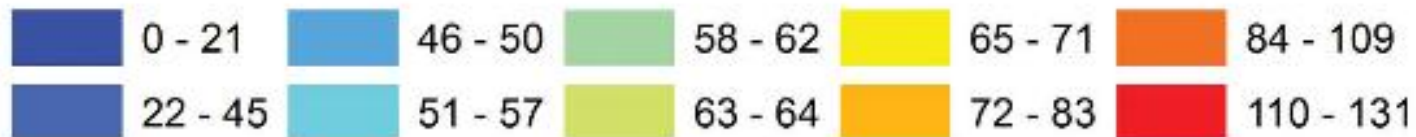


Davies , 2013. G³ doi: 10.1002/ggge.20271 – Nb mesures >38k

Rappel - le flux de chaleur terrestre



Heat Flow based on Geology (mW m^{-2})



Davies , 2013. G³ doi: 10.1002/ggge.20271 – Flux de chaleur moyen et total : 86 mW m^{-2} , $\sim 44 \text{ TW}$
Flux de chaleur moyen des croûtes continentale et océanique : 65 mW m^{-2} et 96 mW m^{-2}

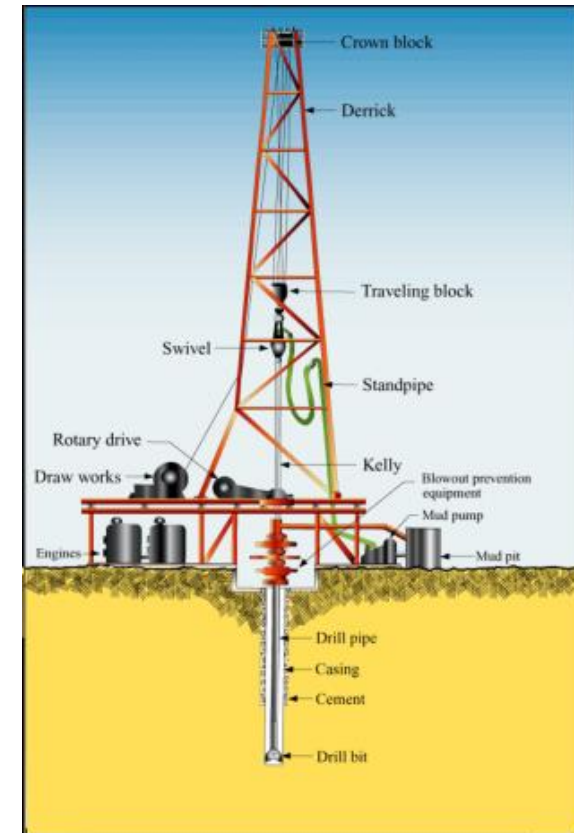
Méthode de mesure



- **Indirectement**, à l'aide de mesures de température, de conductivité thermique et de génération de chaleur dans la croûte terrestre
 - Un **profil de température** dans un forage profond (> 300 m) est d'abord réalisé avec une sonde submersible
 - Des **carottes** de roc sont **échantillonnées** pour déterminer la conductivité thermique et la concentration en éléments radioactifs en laboratoire

Méthode de mesure

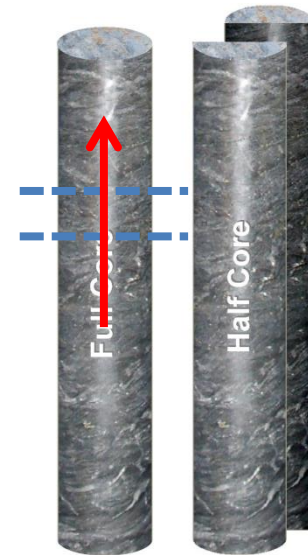
- Le profil de **température** est effectué à l'**équilibre** après le forage
- La sonde doit être suffisamment **exacte** ($< 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) et d'une petite **résolution** ($< 0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Le diamètre du forage doit être petit, idéalement un forage au diamant (1 à 2 po de diamètre)
- Le forage doit être vertical



<http://www.suncoenergygroup.com/drilling%20rigs.htm>

Méthode de mesure

- La **conductivité thermique** est mesurée sur une **tranche de carotte**
- Une **sonde** chauffante pour forage peut être utilisée pour des mesures **in situ**



<http://www.geologyforinvestors.com/terrax-re-assays-old-giant-mine-core-with-interesting-results/>

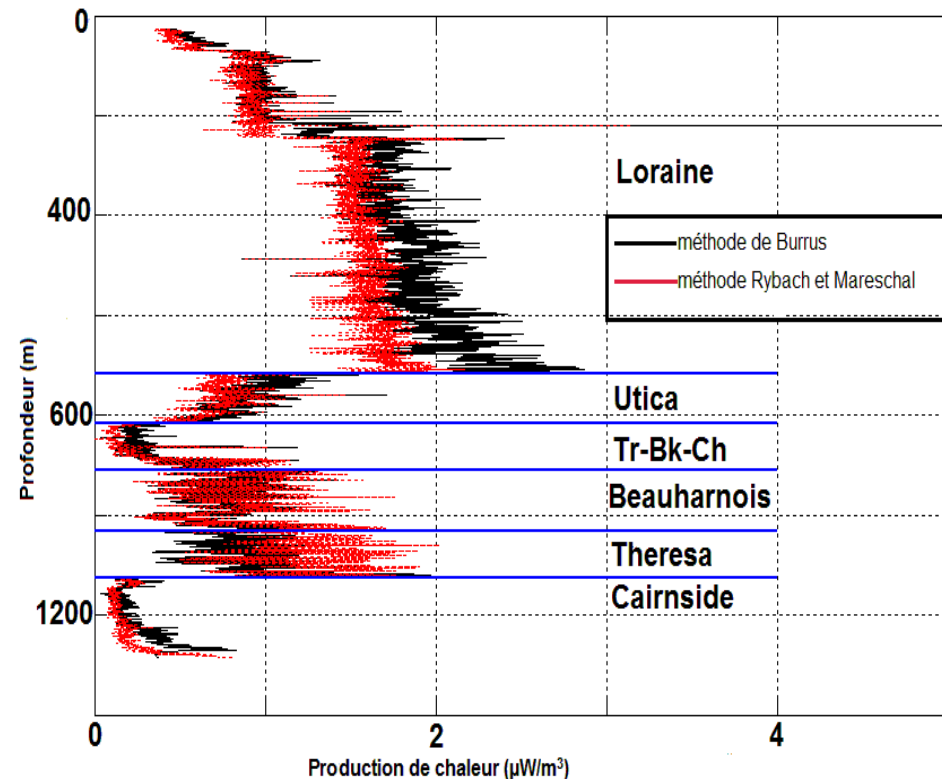
Méthode de mesure

- La concentration en éléments radioactifs (U, Th, K) est mesurée sur avec des échantillons broyés
- L'analyse des diagraphies rayons gamma est aussi utilisée pour calculer le potentiel de génération de chaleur (Burrus, 1986)

$$A = 0,0145 (GR - 5)$$

$$A (\mu\text{W}/\text{m}^3)$$

$$GR (\text{API})$$



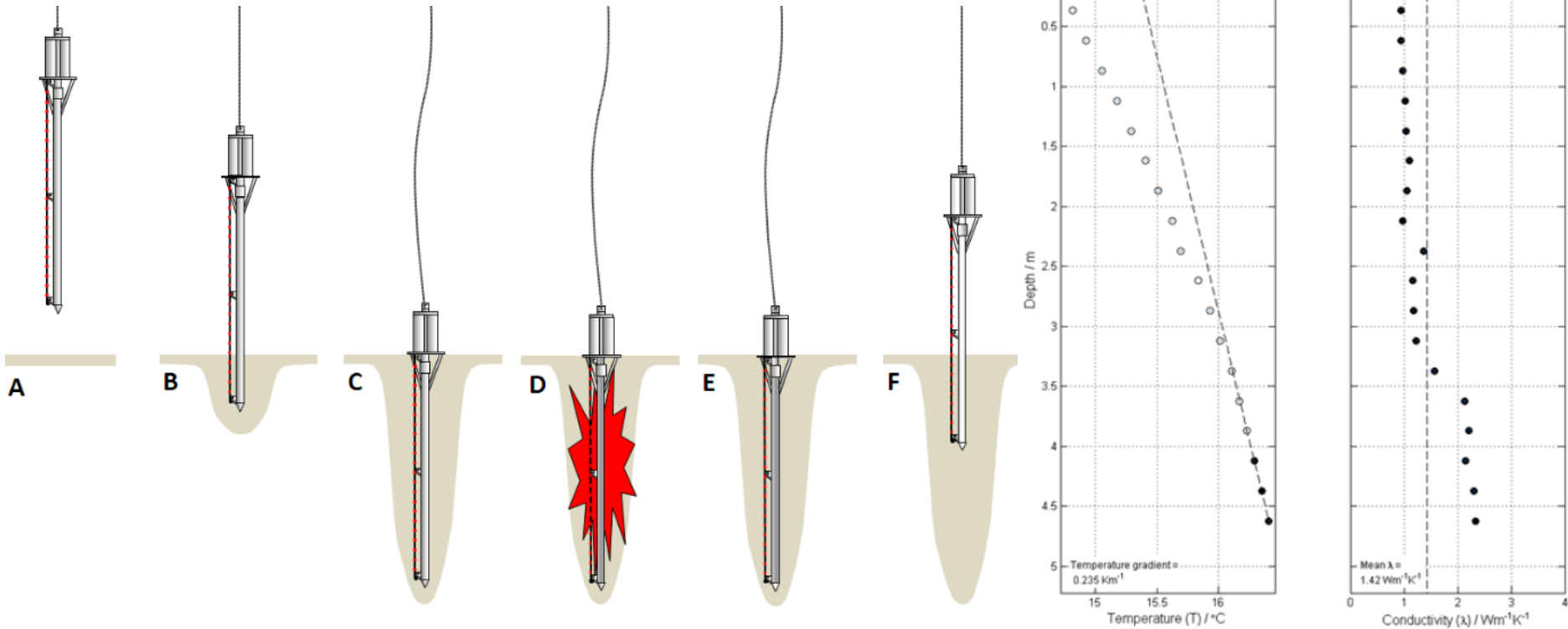
Méthode de mesure

- La mesure peut également être effectuée en enfonçant une sonde chauffante dans les dépôts meubles au fond des océans



Méthode de mesure

- L'épaisseur de dépôts sondés est de 5 à 6 m



Calcul de la température en profondeur

- En régime permanent, la transmission de la chaleur dans l'axe vertical de la croûte terrestre est :

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{Q} = 0$$

- Où z est positif vers le bas
- Sachant qu'à la surface $z=0$, $T=T_0$ et $q=-q_0$
- L'équation peut être intégrée pour trouver la solution de température :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + c_1 = \dot{Q}z$$

Calcul de la température en profondeur

- $z=0, q=-q_0$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + c_1 = \dot{Q}z$$

$$q_0 = c_1$$

$$q + c_1 = \dot{Q}z$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + q_0 = \dot{Q}z$$

- Après une seconde intégration

- $z=0, T=T_0$

$$-\lambda T + q_0 z + c_2 = \dot{Q} \frac{z^2}{2}$$

$$\lambda T_0 = c_2$$

$$-\lambda T + q_0 z + \lambda T_0 = \dot{Q} \frac{z^2}{2}$$

$$T(z) = T_0 + \frac{q_0}{\lambda} z - \frac{\dot{Q} z^2}{2\lambda}$$

Calcul de la température en profondeur

L'équation peut être réorganisée pour exprimer

$$T(z) = T_0 + \frac{q_0}{\lambda} z - \frac{\dot{Q} z^2}{2\lambda}$$

- Le gradient géothermique à $z/2$ (milieu)

$$g_{z/2} = \frac{T(z) - T_0}{z} = \frac{q_0}{\lambda} - \frac{\dot{Q} z}{2\lambda}$$

- Le flux de chaleur en surface

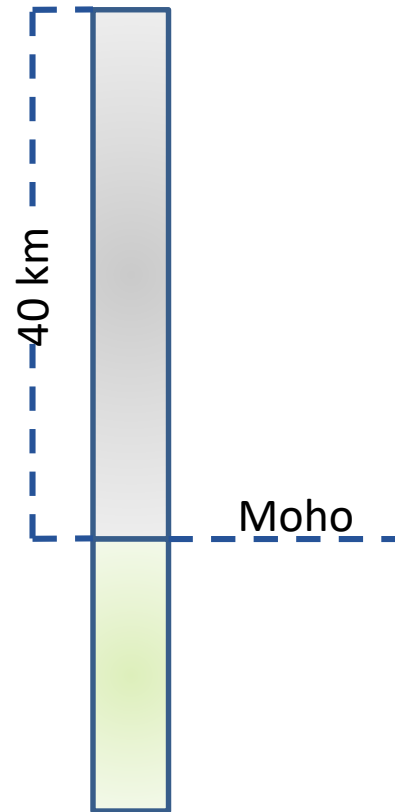
$$q_0 = \left(\frac{T(z) - T_0}{z} \right) \lambda + \frac{\dot{Q} z}{2}$$

Exemple de résolution avec une approche analytique

Calculez un profil de température pour les conditions suivantes et comparez le profil à celui déterminé avec l'approche numérique

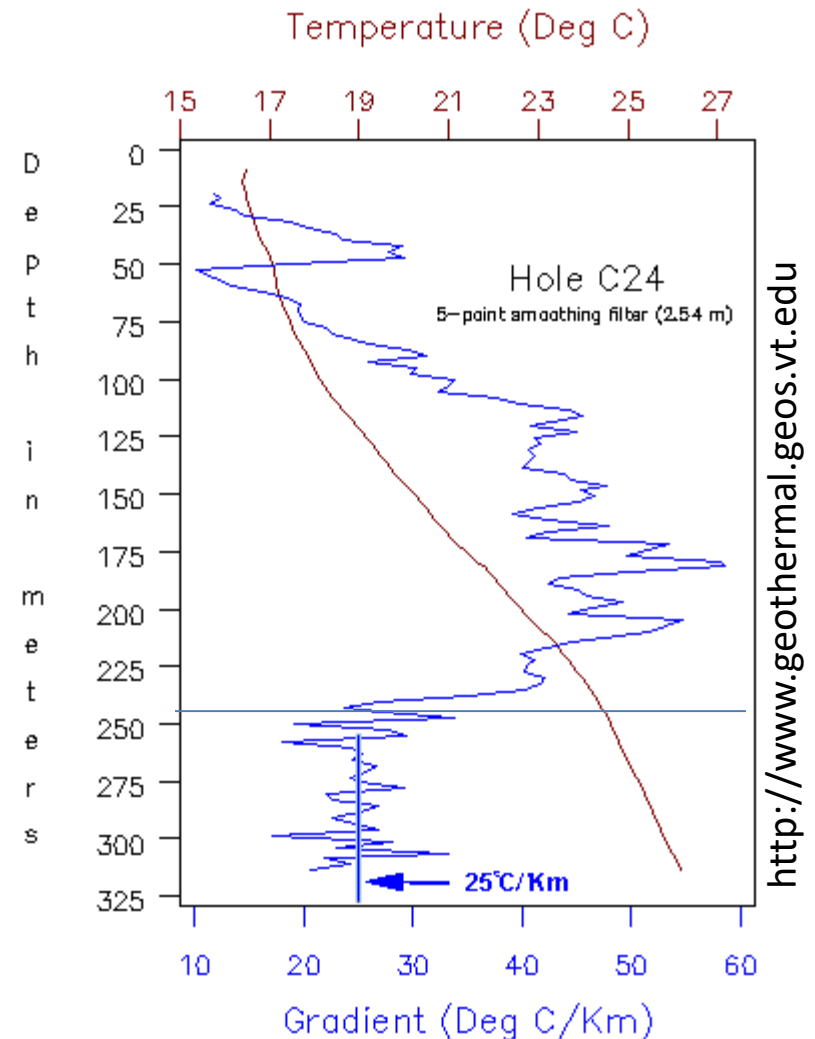
- Température en surface $10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Profondeur du Moho 40 km
- Flux de chaleur du manteau 15 mW m^{-2}
- Conductivité thermique de la croûte terrestre $2,5\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$
- Production de chaleur dans la croûte terrestre $1\text{ }\mu\text{W m}^{-3}$

Quel est le flux de chaleur en surface?



Analyse des données de température

- Approches pour trouver le flux de chaleur selon les observations de température
- Pour un système multicouche, ajuster q_0 de façon à reproduire la température observée
- Pour un système homogène, q_0 est directement calculé selon λ , \dot{Q} et dT/dz moyens

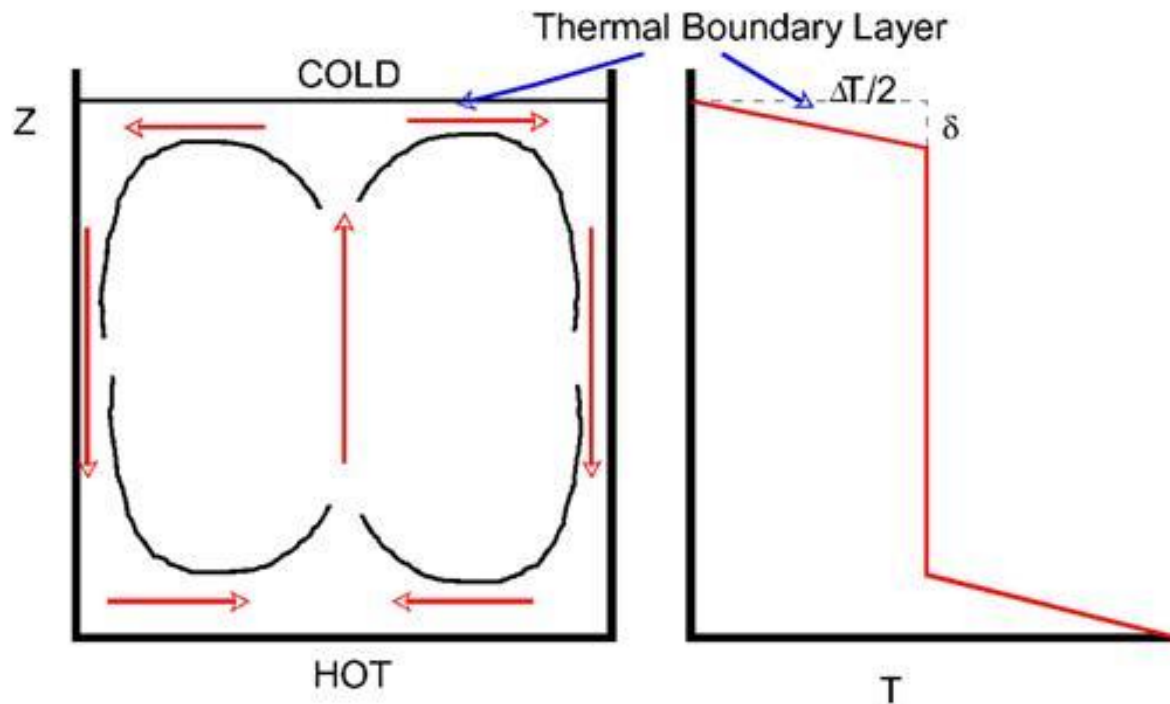


Analyse des données de température

- La **conductivité thermique** et la **génération** de chaleur sont généralement évaluées de façon **ponctuelle** (> 10 m) alors que le profil de **température** peut-être **quasi continu** (< 1 m)
- Différentes approches sont utilisées pour trouver le flux de chaleur
 - Calcul de λ , \dot{Q} et dT/dz moyens selon les formations géologiques
 - Calcul de λ , \dot{Q} et dT/dz moyens selon des intervalles d'épaisseur définis

Analyse des données de température

- L'analyse suppose un transfert de chaleur conductif alors que des mouvements advectifs peuvent affecter le gradient

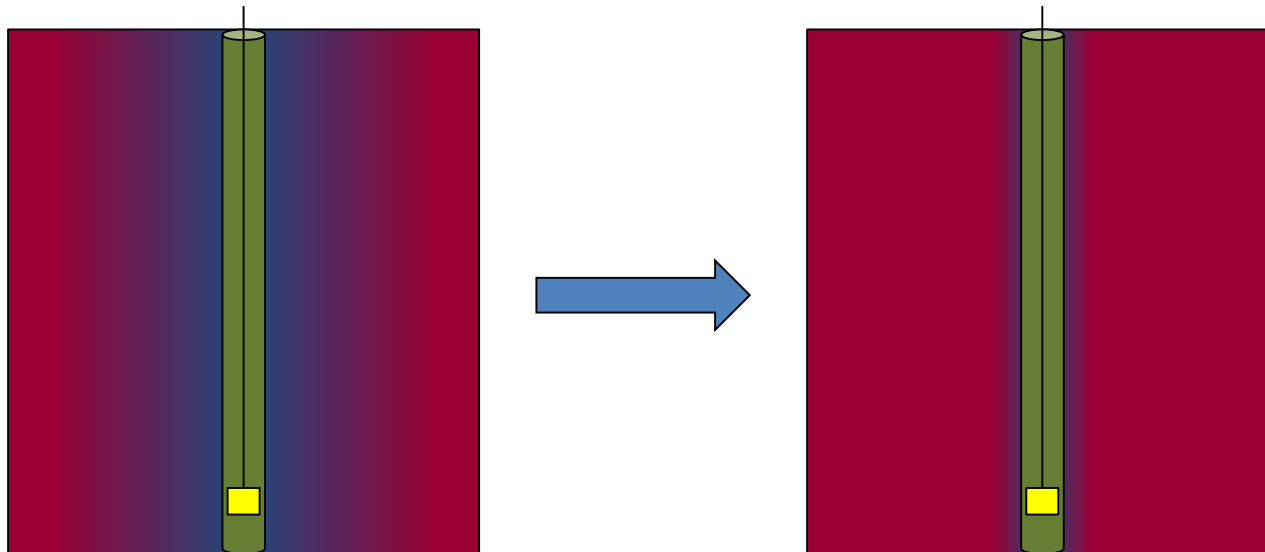


Correction de l'évaluation du flux de chaleur

- La température dans la croûte terrestre peut être affectée selon différentes perturbations:
 - La circulation de boue lors du forage
 - L'angle du forage
 - La topographie
 - Les changements climatiques

Correction pour la circulation de boue

- La **circulation de boue** dans un forage **refroidit** la température de la croûte terrestre
- La température mesurée rapidement après le forage (lors de diagraphies) n'est pas à l'équilibre
- Plusieurs mesures de température sont utilisées pour retrouver la température du sous-sol non perturbée



Correction pour la circulation de boue

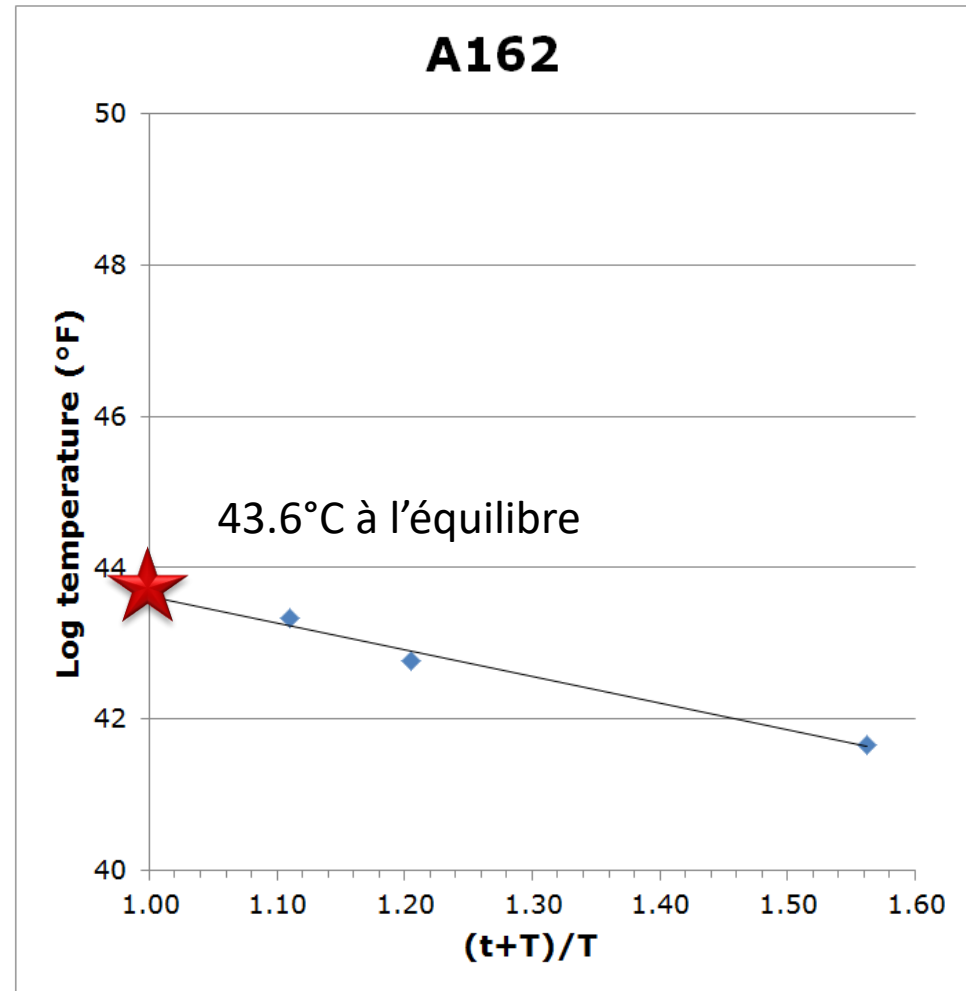
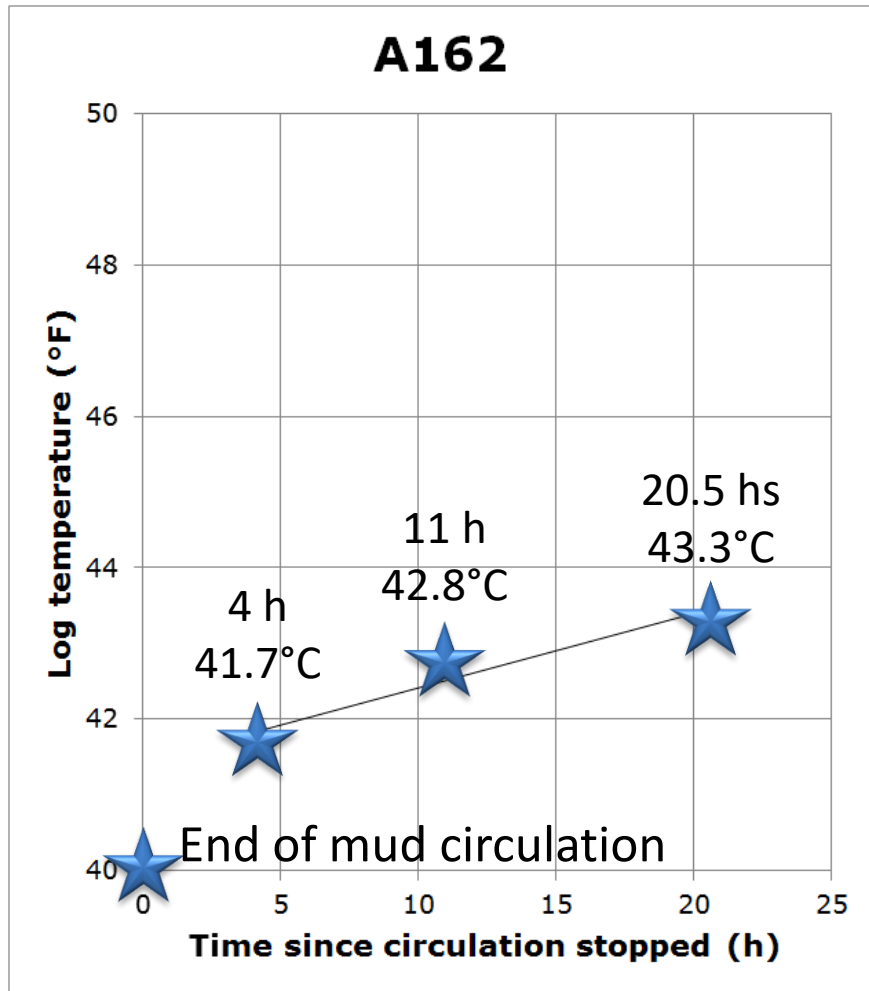
- La méthode de **Horner (1951)** est couramment utilisée à cet effet
- Approche **analytique** basée sur la **solution LSI**
- Un graphique de la température mesurée en fonction du temps normalisé t^+ est effectué

$$t^+ = \ln[(t + t_1)/t]$$

Où t est le temps écoulé depuis la fin du forage et t_1 est le temps qu'a nécessité la réalisation du forage

Correction pour la circulation de boue

L'ordonnée à l'origine permet de retrouver la température non perturbée



Correction pour la circulation de boue

- Des méthodes empiriques existent également
- Basées sur la comparaison des températures à l'équilibre et perturbées
- La correction dépend de la profondeur seulement
- Harrison et al. (1983) ont proposé

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = -16.51 + 1.827 \times 10^{-2}z - 2.345 \times 10^{-6}z^2$$

pour $914 < z < 3932$ m

où ΔT est l'augmentation de température nécessaire pour trouver la température à l'équilibre

Correction pour la circulation de boue

- Une autre méthode combinant **profondeur (z)** et le **temps depuis la fin du forage (t)** a été développée par **Waples et Ramly (2001)**

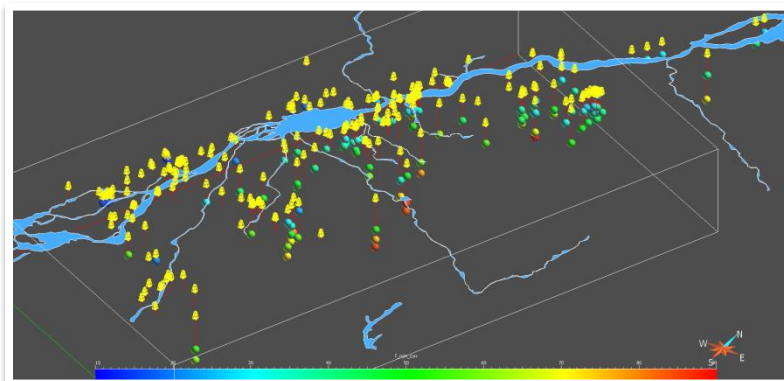
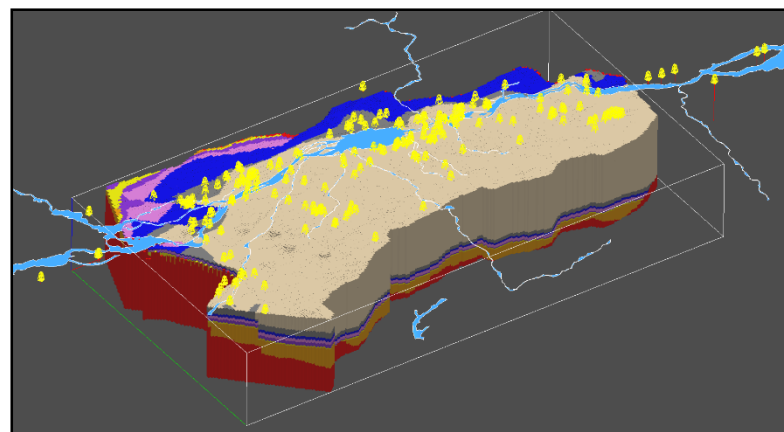
$$T_c(^{\circ}\text{C}) = T_0 + f(T_{\text{BHT}} - T_0)$$

$$f = \frac{-0,1462 \times \ln(t) + 1,699}{0,572 \times z^{0,075}}$$

T_c , T_{BHT} et T_0 ($^{\circ}\text{C}$) sont la température corrigée, non corrigée (en fond de trou) et non perturbée en surface

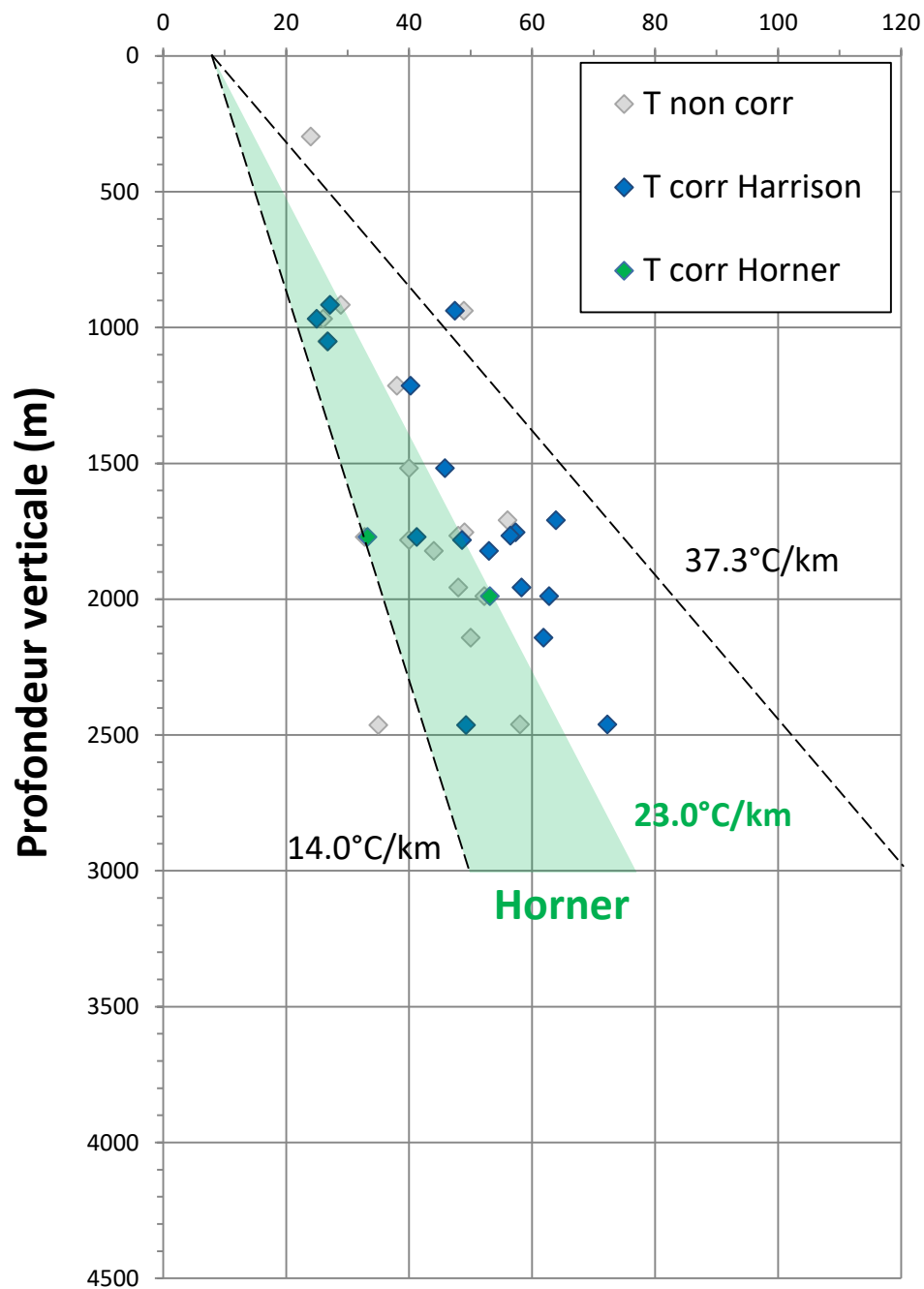
Exemple – Basses-terres du Saint-Laurent

- 82 puits
- 125 températures enregistrées en fond de trous
- Profondeur 250-4300 m
- Valeurs de 12 à 99 °C

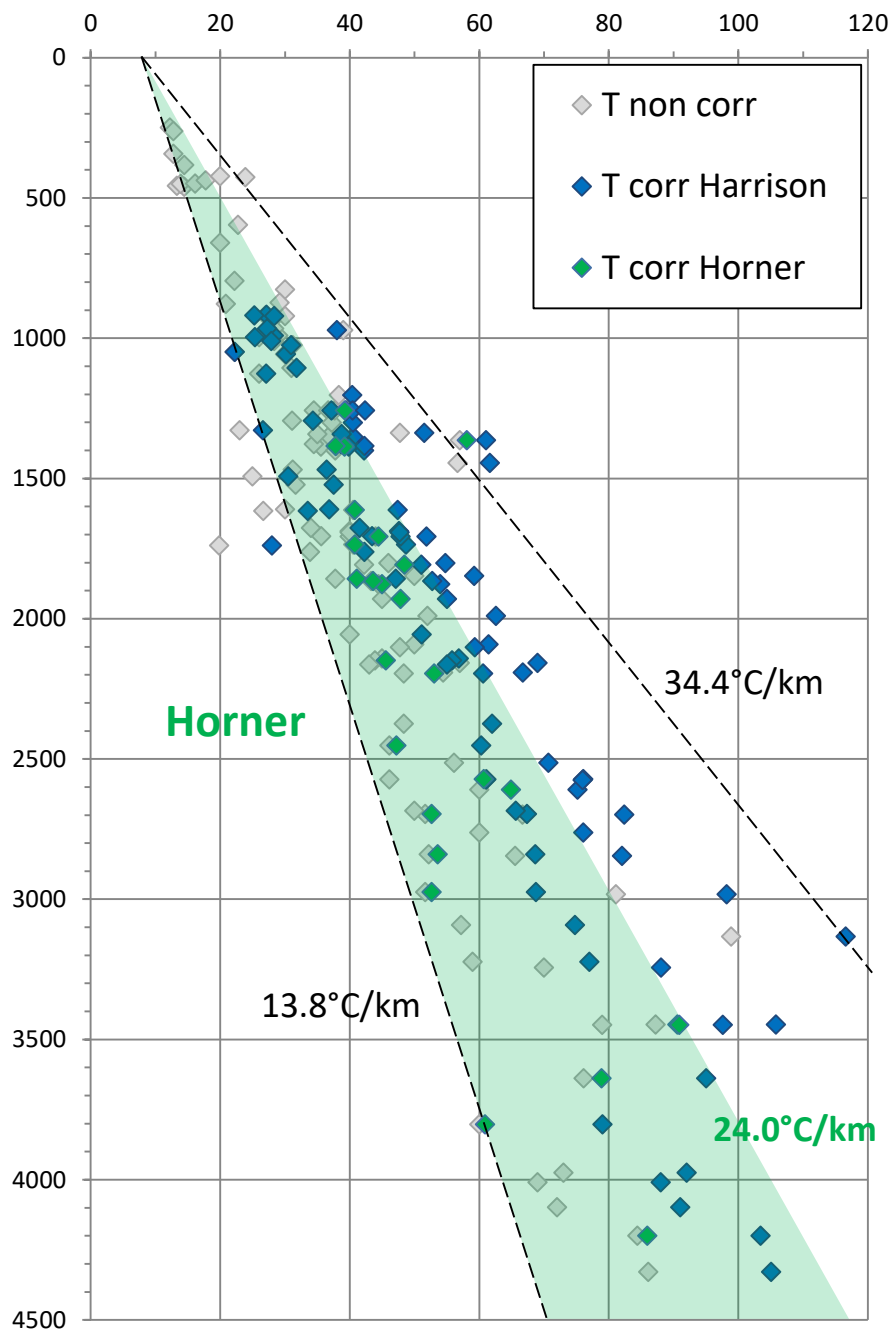


Température 10-90 °C

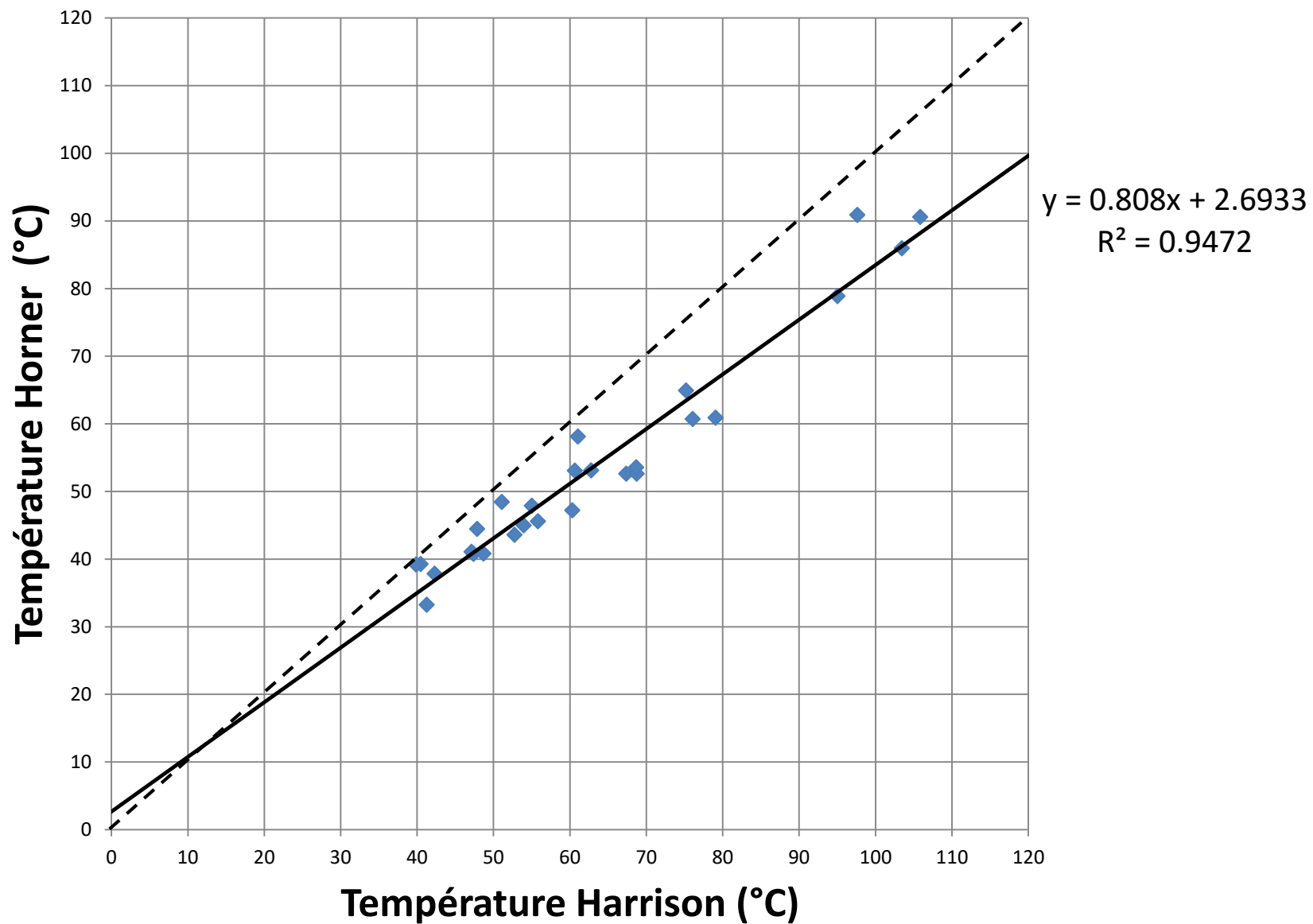
Roches couvertures T (°C)



Roches Réservoirs T (C)



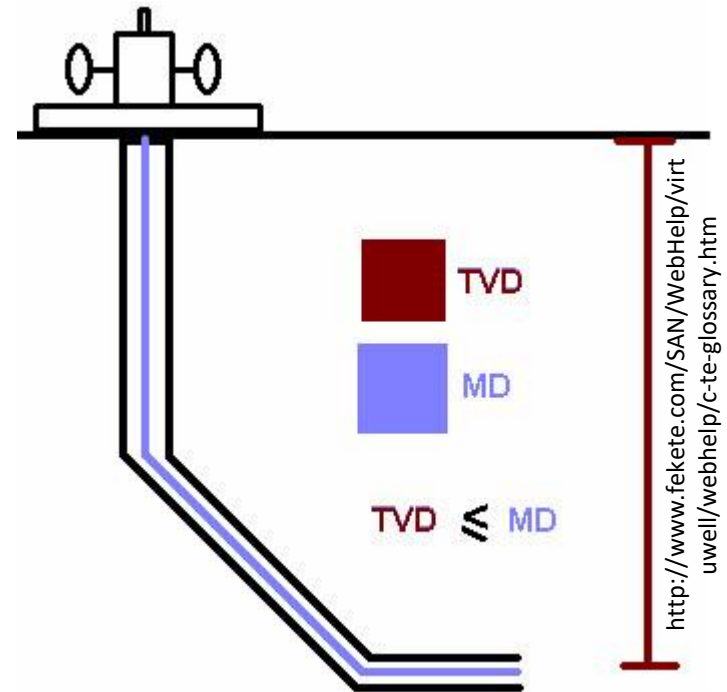
Comparaison des méthodes de Horner et Harrison



Correction pour l'angle du forage

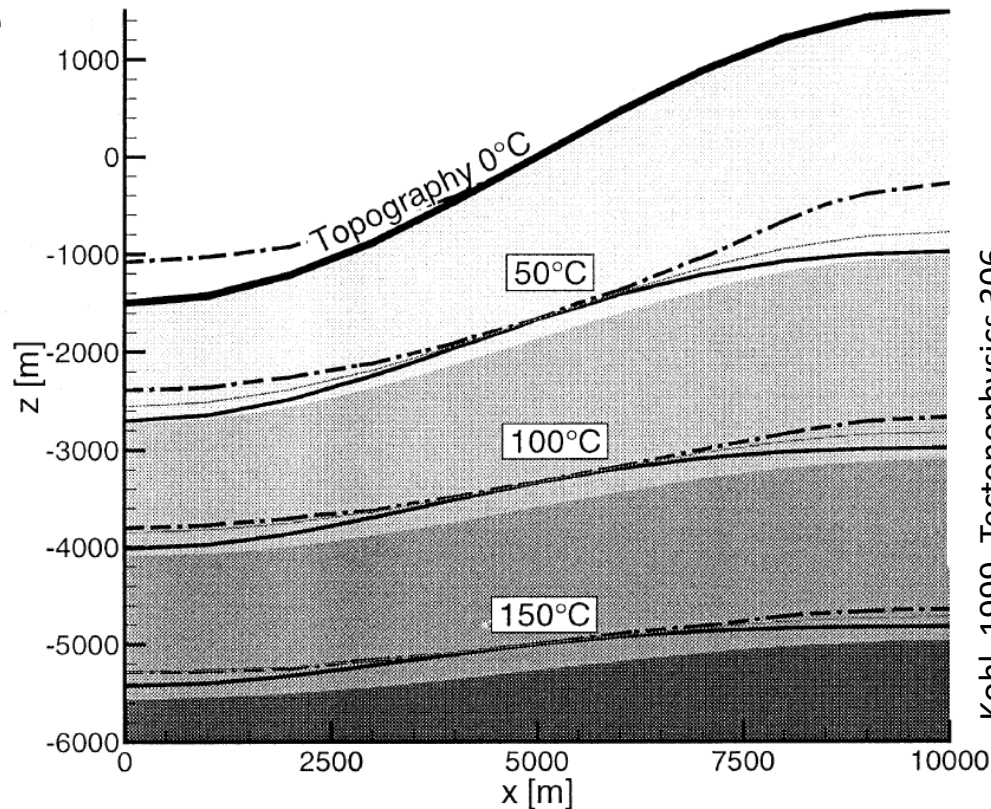
- Les forages sont rarement verticaux
- Une déviation de 8° par rapport à la verticale peut entraîner une erreur de 1% dans l'estimation du gradient de température
- La profondeur verticale est évaluée selon l'angle θ (°) du forage et la profondeur mesurée h (m)
- Les mesures d'angle se font par sections de forage

$$z(TVD\ m) = h \cos(\theta)$$



Correction pour la topographie

Le **flux de chaleur** mesurée dans une **vallée** est **plus élevé** que celui mesuré sur un **sommet de montagne** puisque la montagne offre une couche d'isolation additionnelle au flux de chaleur qui désire s'échapper de la Terre



Kohl, 1999. Tectonophysics 306.

Correction pour la topographie

- Différentes **approches analytiques et numériques** sont utilisées pour corriger les mesures de température
- Pour une **colline** avec transfert conductif dans un milieu **2D**, **Lees (1910)** propose

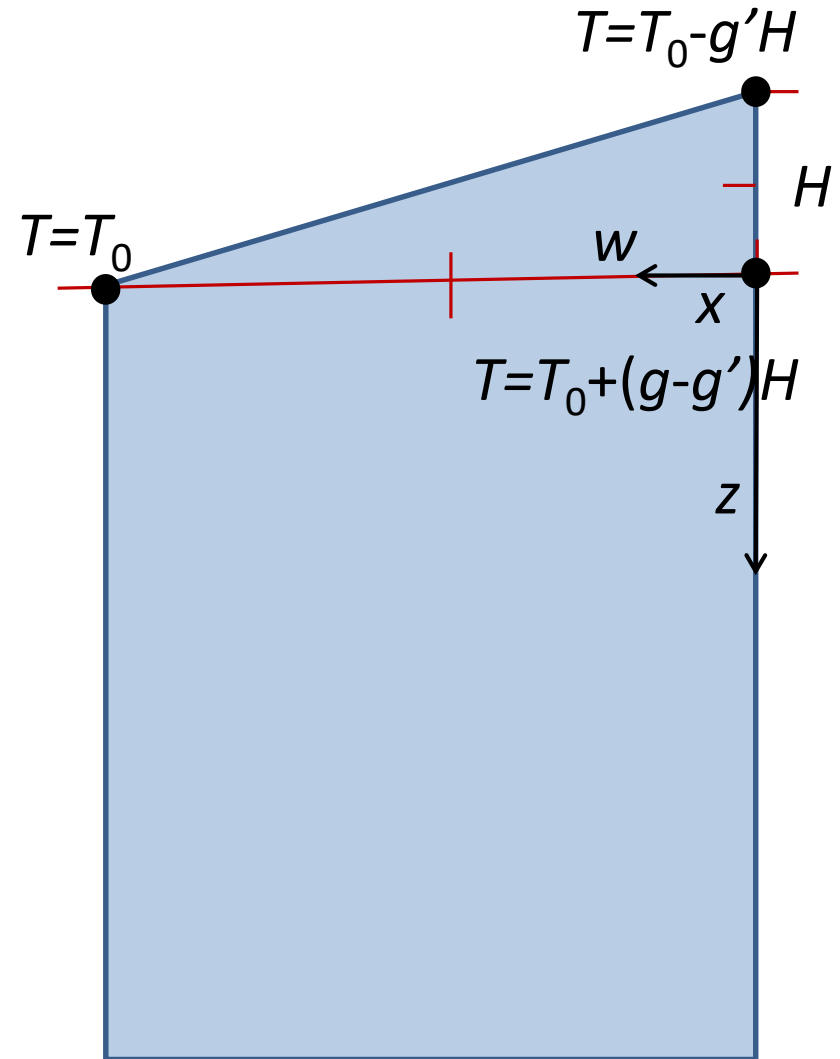
$$T(x, z) = T_0 + gz + \frac{b(z + a)}{x^2 + (z + a)^2}$$

$$a = H + \left(\frac{H^2}{4} + w^2 \right)^{1/2}$$

$$b = (g - g')H \left(\frac{H^2}{4} + w^2 \right)^{1/2}$$

Correction pour la topographie

- H (m) est la hauteur de la colline
- w (m) est la largeur de la colline à la moitié de sa hauteur
- T_0 (°C) est la température au bas de la vallée
- g (°C/m) est le gradient géothermique non perturbé
- g' (°C/m) est le gradient de température atmosphérique entre le bas et le haut de la vallée
- z est positif sous T_0

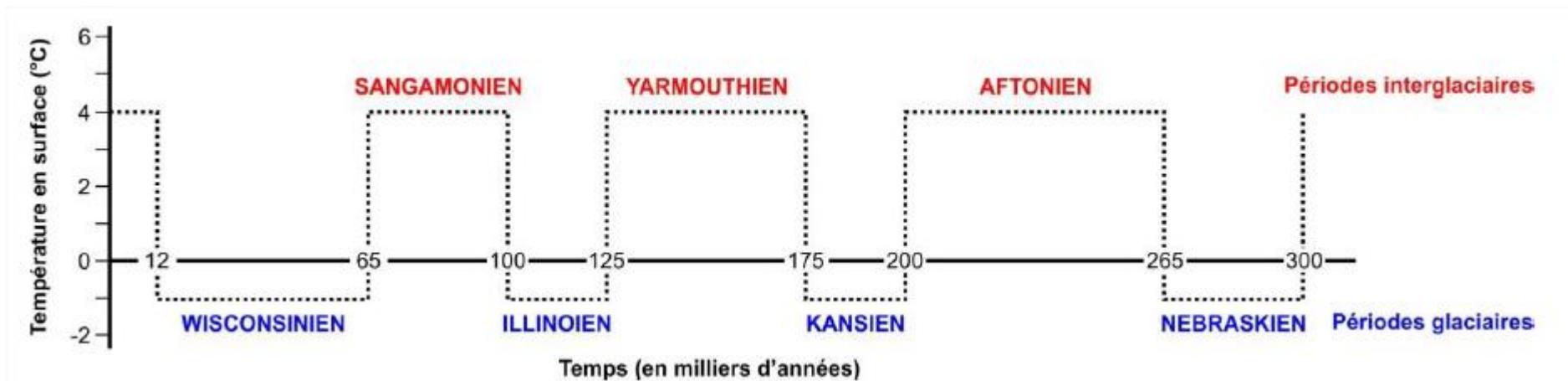


Correction paléoclimatique

- La température près de la surface varie selon la température atmosphérique
- Cette perturbation se propage sous la forme d'une onde qui affecte le gradient géothermique
- Les perturbations récentes, comme le réchauffement climatique, sont observées jusqu'à ± 300 m sous la surface
- Les perturbations anciennes, comme les quatre dernières glaciations, sont observées jusqu'à ± 3000 m sous la surface

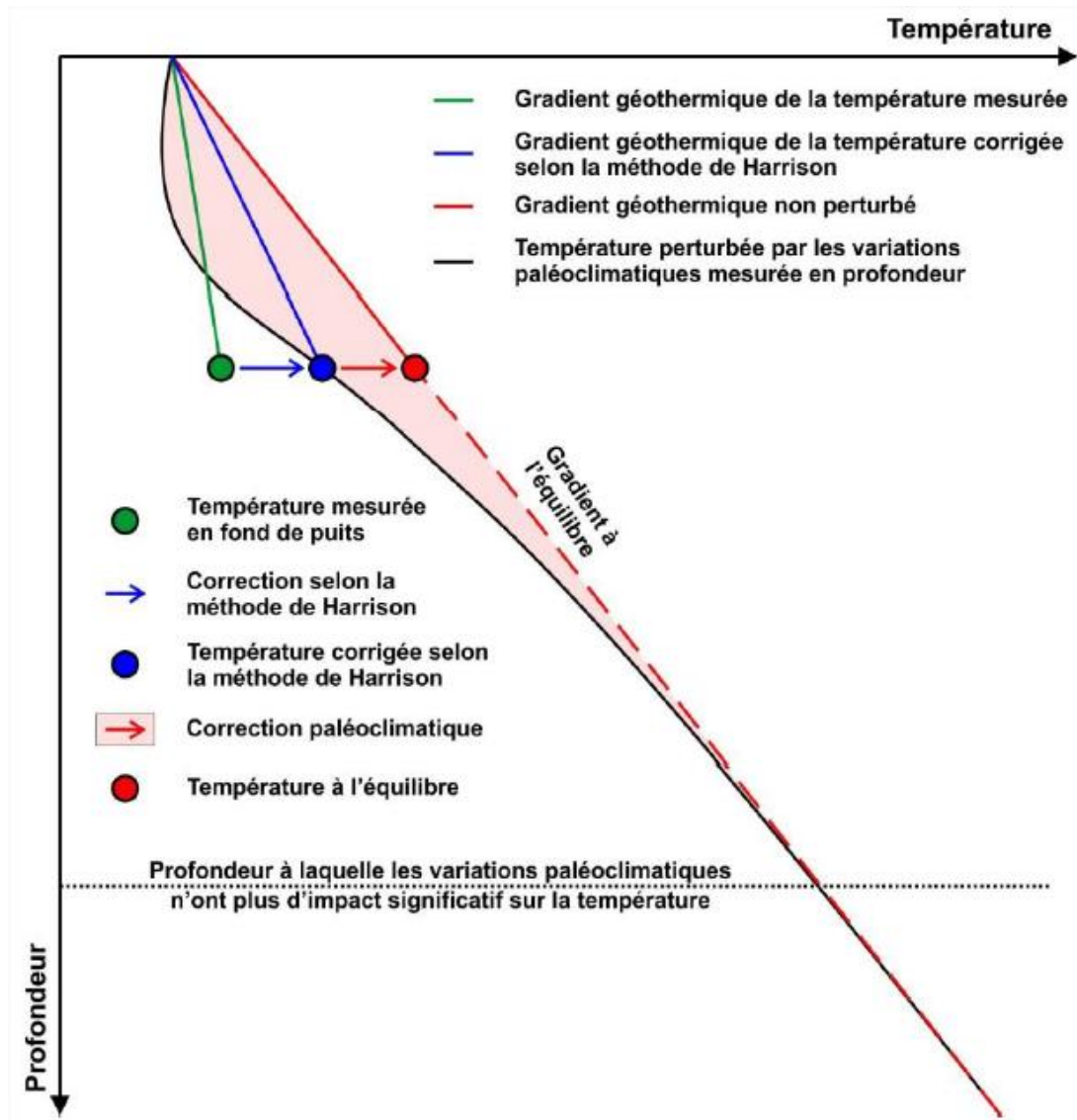
Correction paléoclimatique

Changements de température causés par les glaciations quaternaires



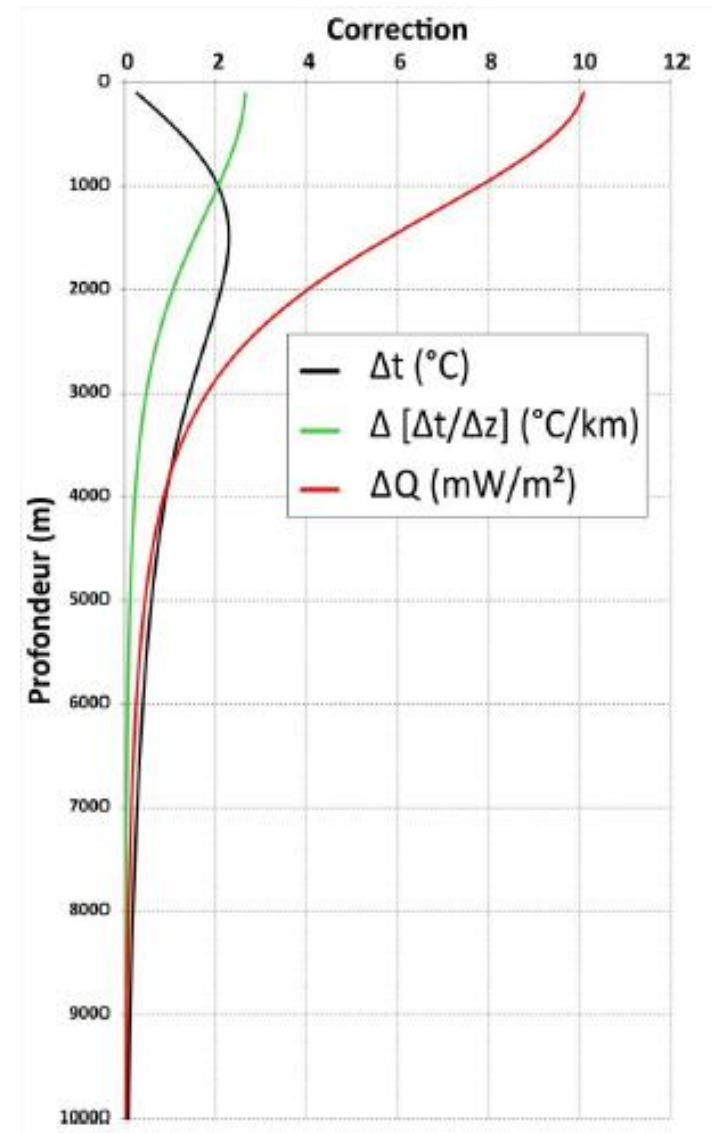
Bédard et al., 2016. Rapport INRS R1659

Correction paléoclimatique



Correction paléoclimatique

- La **correction** peut être apposée à la température ou au gradient géothermique
- Au Canada, pour un écart de **5 °C** entre chaque glaciation et **$\alpha = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$** , la correction sur la température est environ 2 °C ou moins



Correction paléoclimatique

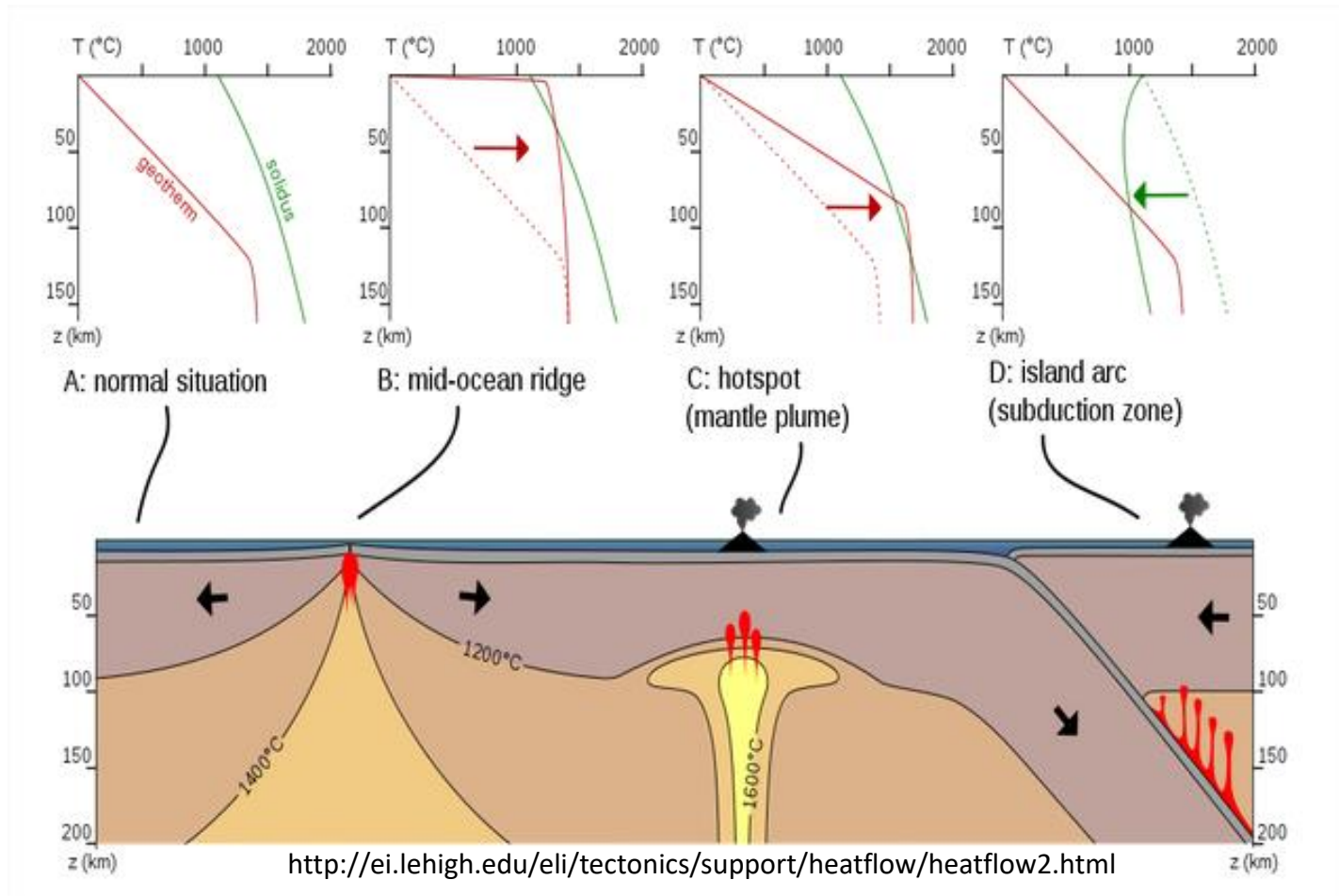
La **température** ou le **gradient géothermique** corrigé pour l'effet des variations de température paléoclimatiques est:

$$T(z) = T_0 + gz + V \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{z}{2\sqrt{(\alpha t_{\text{fin}})}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{z}{2\sqrt{(\alpha t_{\text{début}})}} \right] \right\}$$

$$\frac{dT}{dz} = g + V \left[\begin{array}{c} (\pi\alpha t_{\text{fin}})^{-1/2} \cdot e^{(-z^2/4\alpha t_{\text{fin}})} \\ -(\pi\alpha t_{\text{début}})^{-1/2} \cdot e^{(-z^2/4\alpha t_{\text{début}})} \end{array} \right]$$

- **V (°C)** est le **pas de température** qui est environ **5 °C** pour une glaciation
- **t_{début}** et **t_{fin}** sont les **temps** au début et à la fin de la **perturbation**
- L'effet des différentes glaciations est superposé

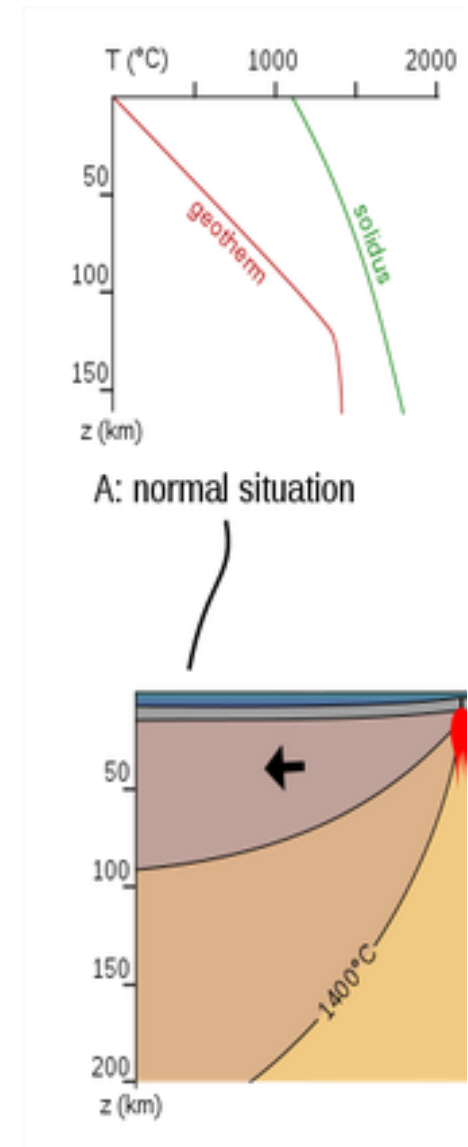
Flux de chaleur - interprétation



Le gradient géothermique et le flux de chaleur sont caractéristiques des environnements géologiques

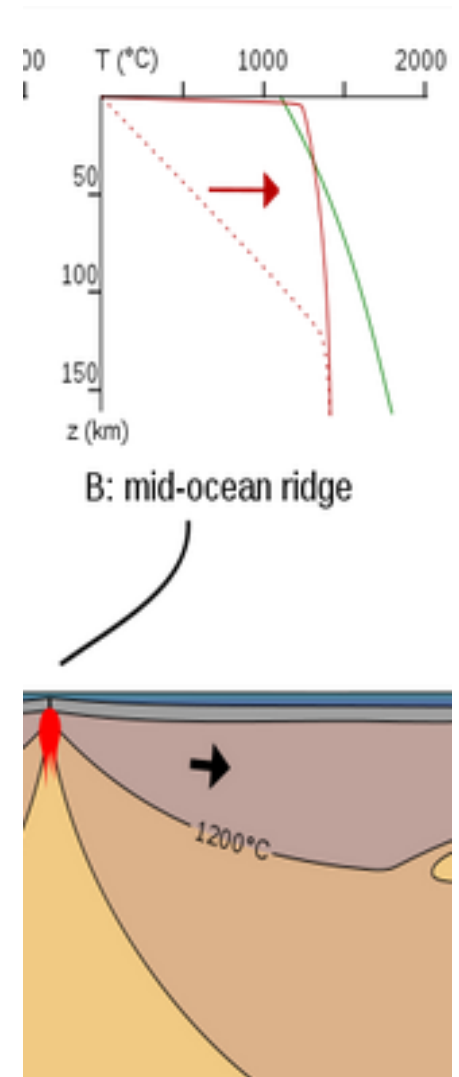
Flux de chaleur – contient

- Sur les continents et au milieu des croûtes océaniques en zones passives, le flux de chaleur est faible à modéré,
- Le gradient géothermique est sous le solidus qui définit les conditions de fusion



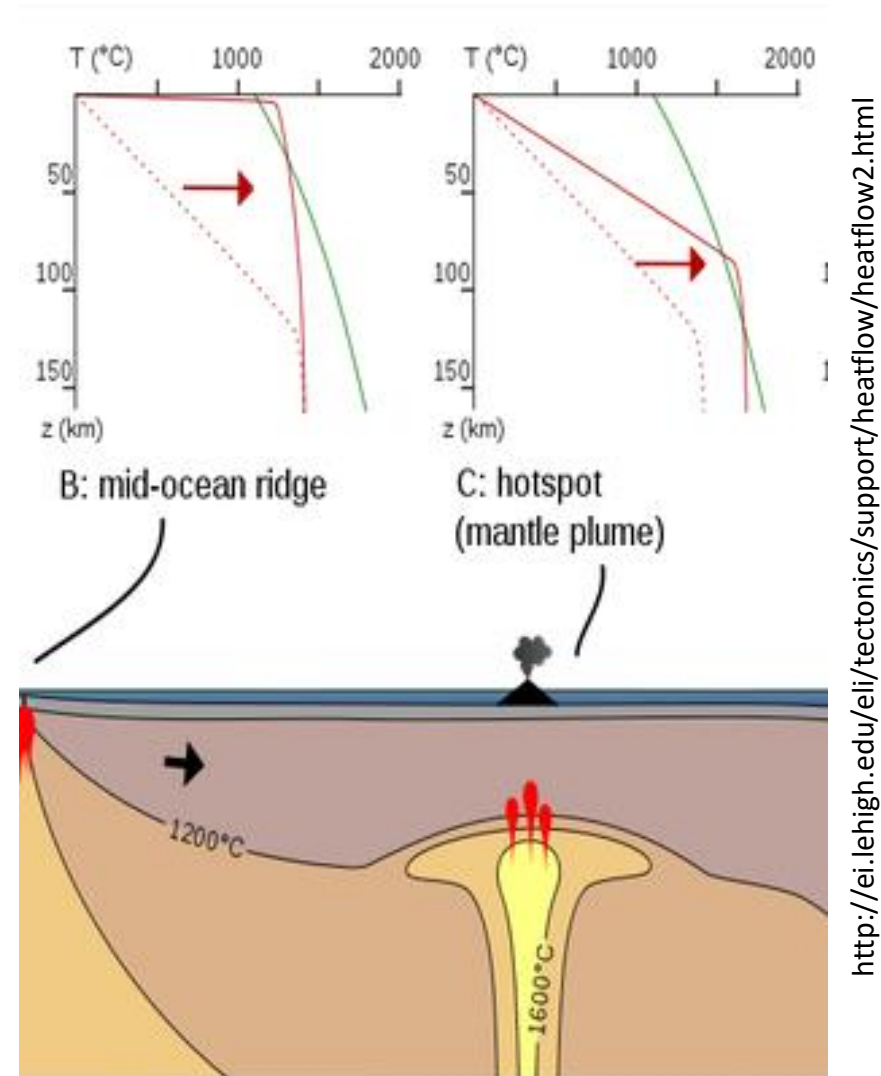
Flux de chaleur – dorsale océanique

- Près des dorsales océaniques, le flux de chaleur est élevé
- Le gradient géothermique excède le solidus et il y a fusion



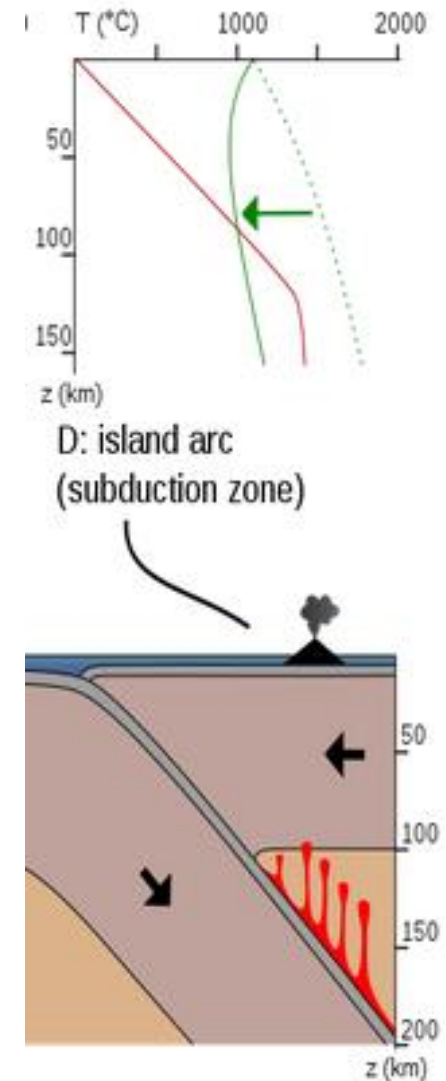
Flux de chaleur – croûte océanique, point chaud

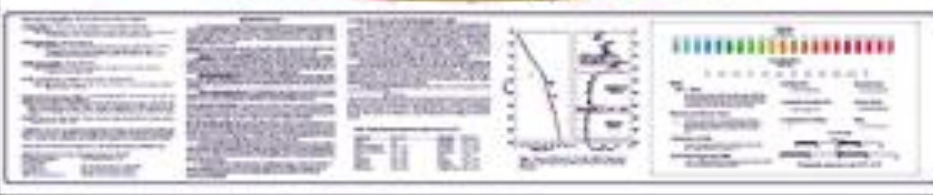
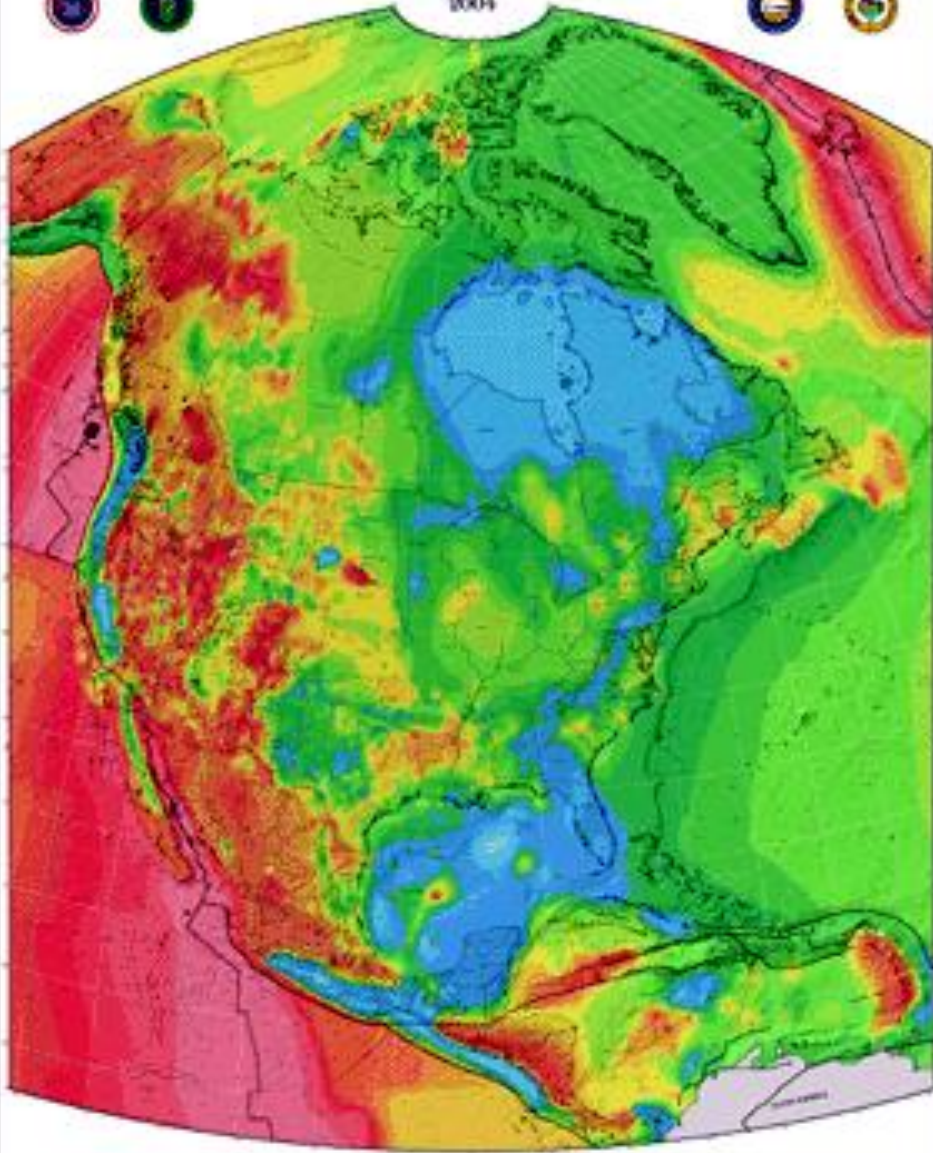
- Près des dorsales océaniques et des points chauds, le flux de chaleur est élevé
- Le gradient géothermique excède le solidus et il y a fusion
- Le gradient est caractéristique de la profondeur de fusion



Flux de chaleur – zone de subduction

- Dans une **zone de subduction**, le flux de chaleur est **modéré**
- Le **gradient géothermique** croise tout de même le **solidus** puisque la température de fusion se trouve abaissée par la subduction de matériaux hydratés





Flux de chaleur – interprétation

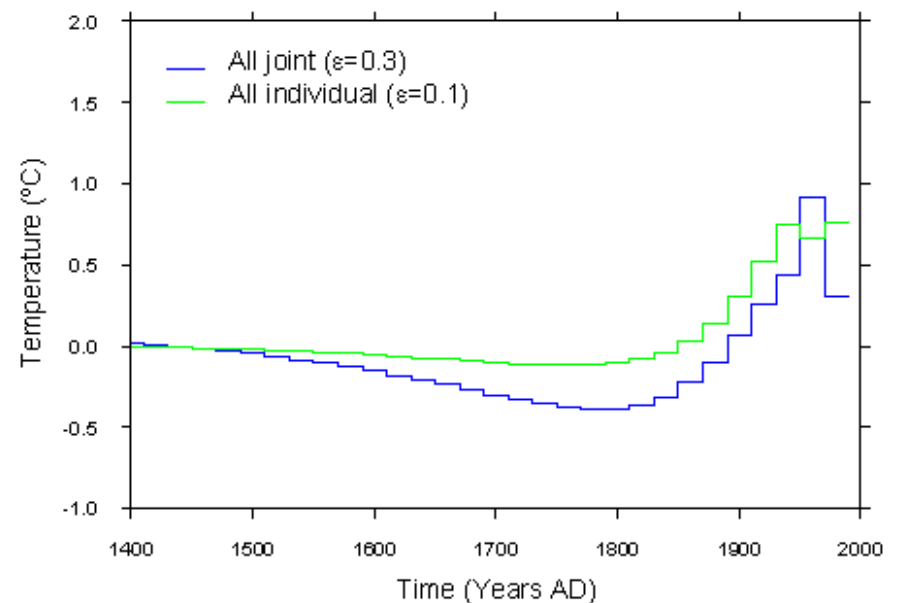
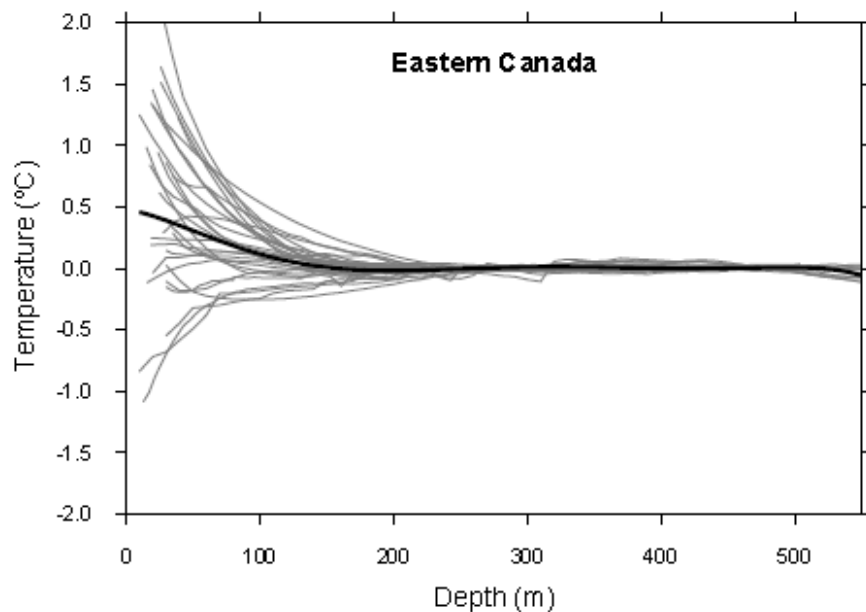
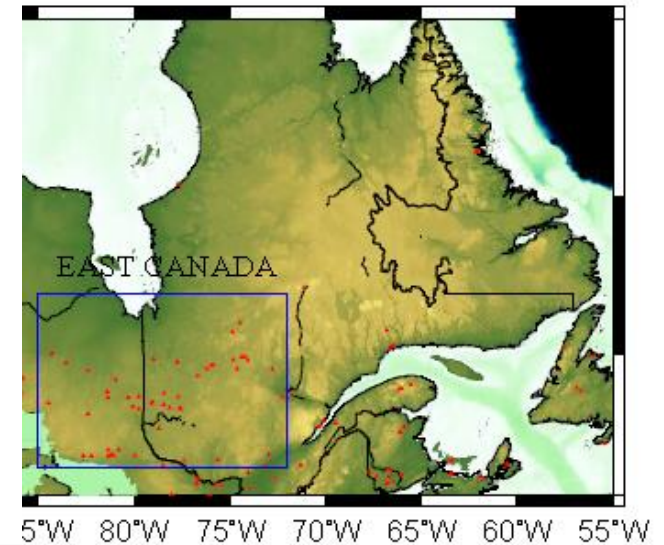
L'évaluation du flux de
chaleur permet de
mieux définir la
position des plaques
tectoniques

Évaluation du réchauffement climatique

- Le gradient géothermique inversé et observé dans les forages peu profonds est fonction du réchauffement climatique
- L'historique des fluctuations de température est retrouvé par modélisation inverse du gradient mesuré connaissant la conductivité thermique du sous-sol

Reconstitution climatique

- Les profils de température de plusieurs forages d'une région sont inversés pour reconstituer le climat (Chouinard et Mareschal, 2007. Climate of the Past -3)



Flux de chaleur

—Base de données mondiale

<http://www.heatflow.und.edu/index2.html>

—Base de données nord-américaine

<http://smu.edu/geothermal/2004NAMap/2004NAmap.htm>

—Base de données canadienne

<http://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/downloadf.web&search1=R=220364>

—Base de données pour l'est du Canada

<http://www.unites.uqam.ca/geotop/geophysique/flux/map/Eastern.htm>