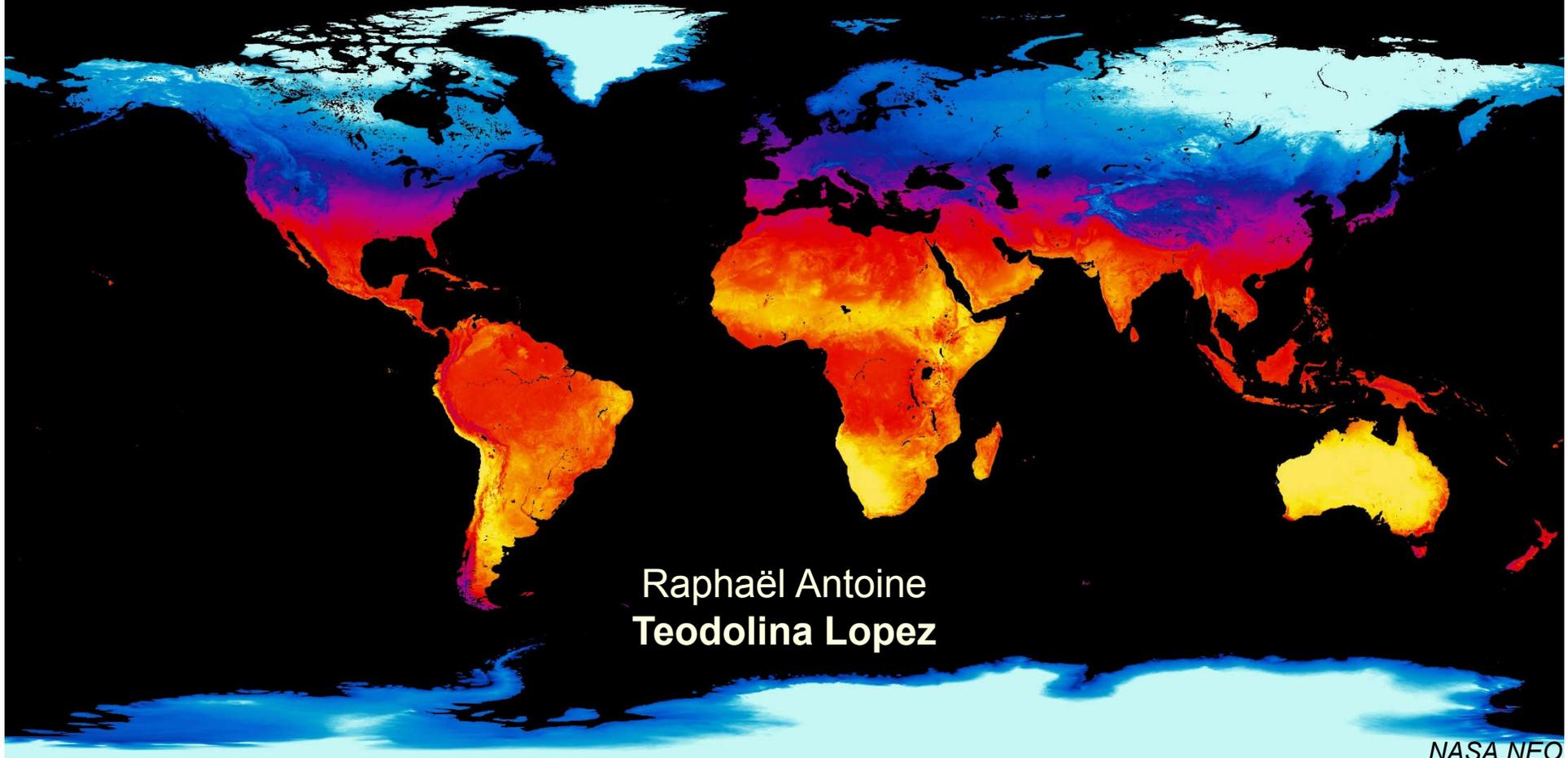




Séance technique
Thermomécanique des roches



TÉLÉDÉTECTION DANS L'INFRAROUGE THERMIQUE ET TEMPÉRATURES DE SURFACE



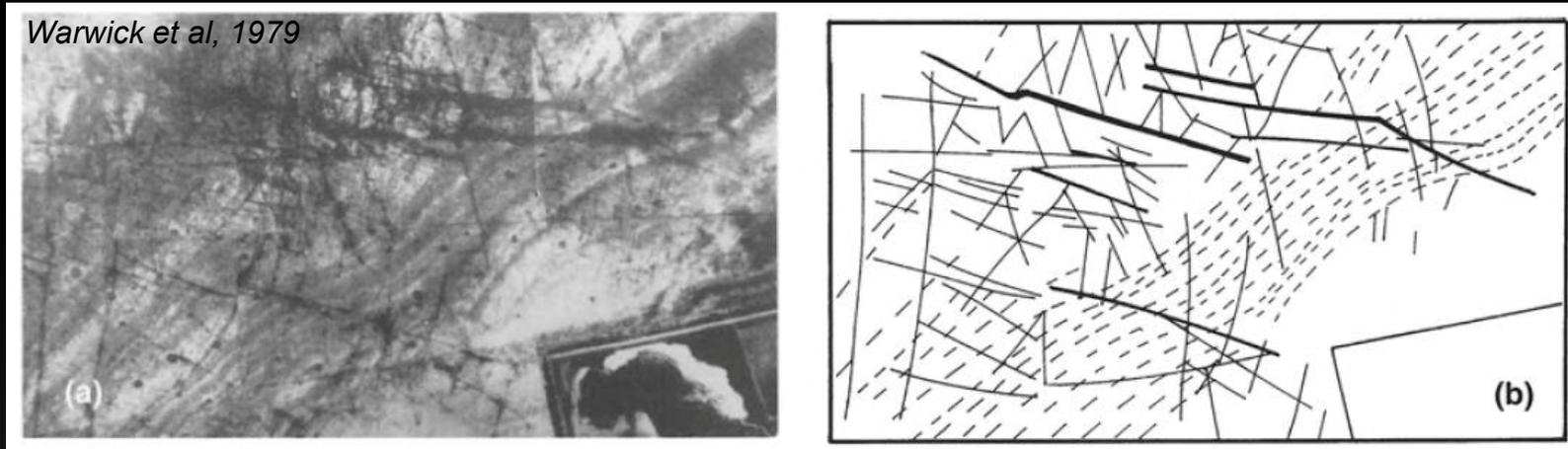
Raphaël Antoine
Teodolina Lopez

NASA.NEO

20/10/2016

UTILISATION DES DONNÉES_CAPTEURS

Géologie > cartographie structurale

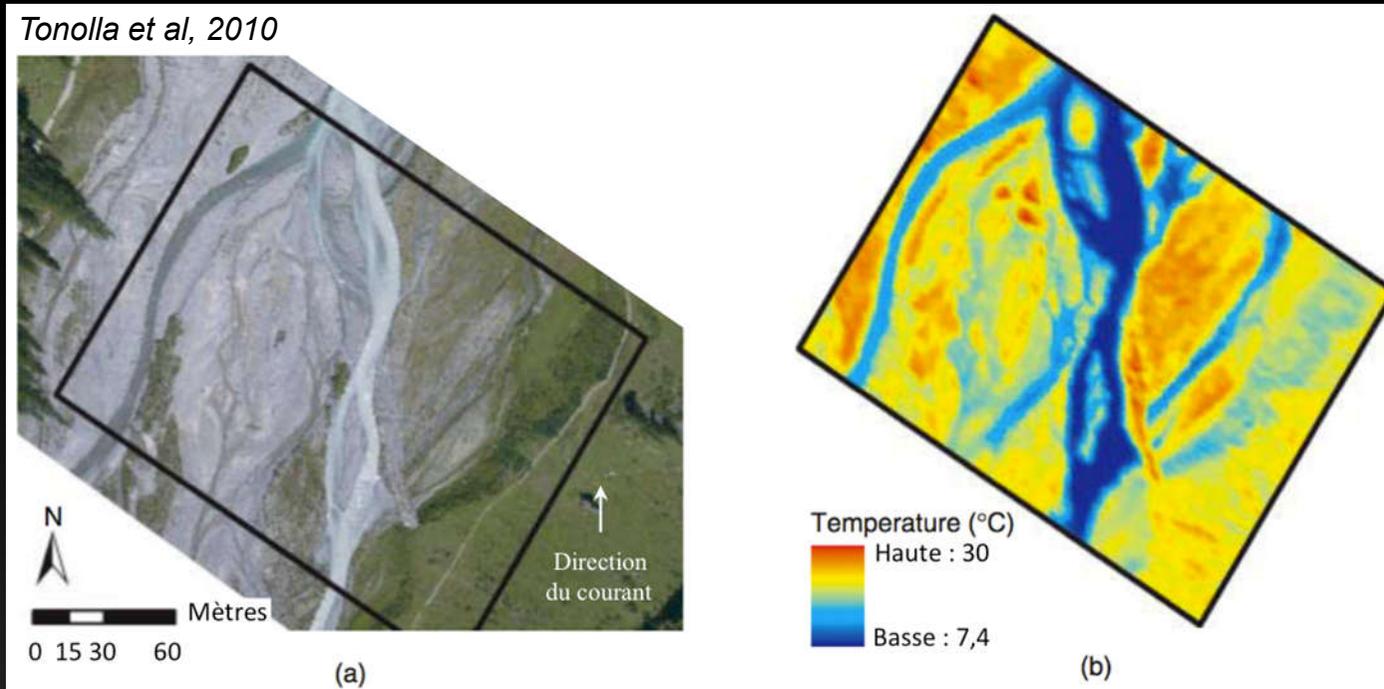


Géotechnique > infiltration d'eau



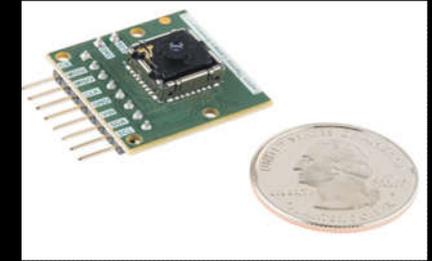
UTILISATION DES DONNÉES_CAPTEURS

Hydrogéologie > caractérisation des cours d'eau

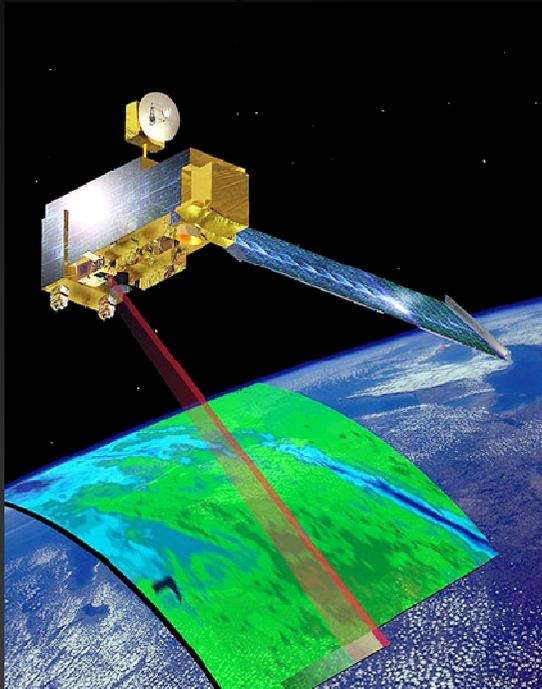


Atmosphère > structure thermique/distribution des particules.
Océanographie > Évolution et intensité des courants océaniques.

CAPTEURS



Spatial



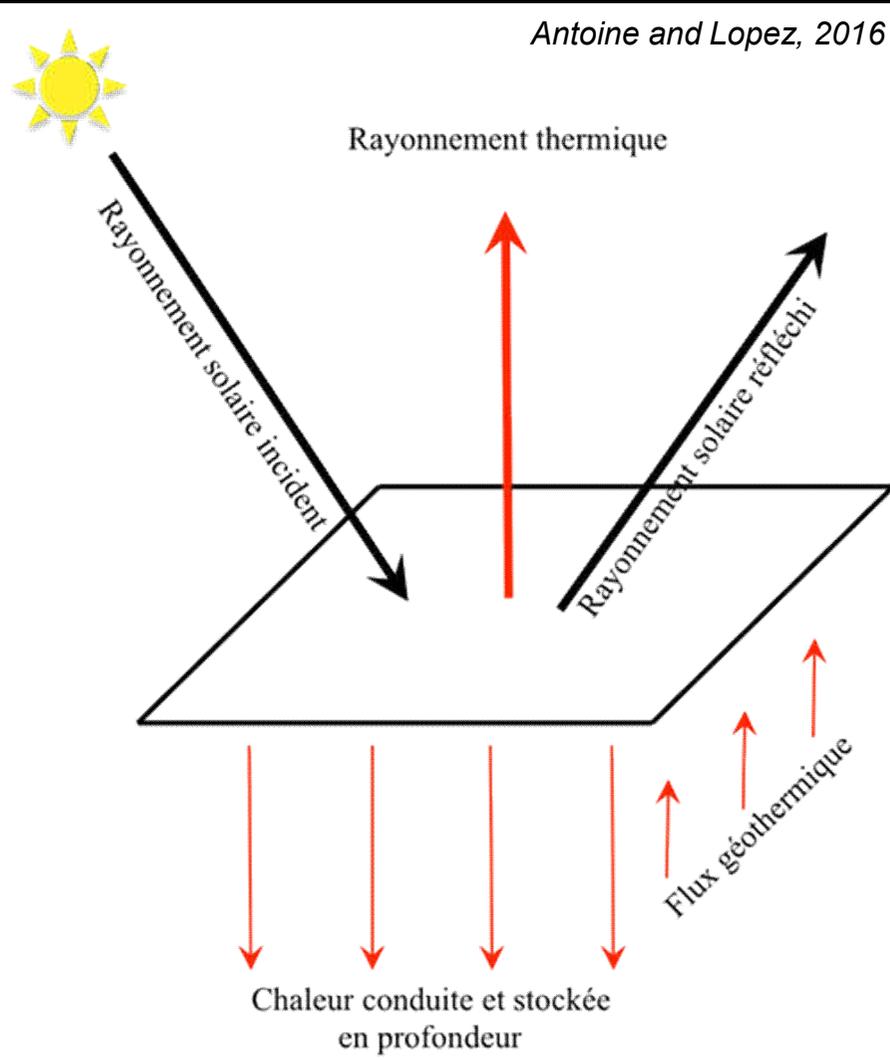
Aéroporté_drones



In-situ



BILAN D'ÉNERGIE



Rayonnement solaire incident :

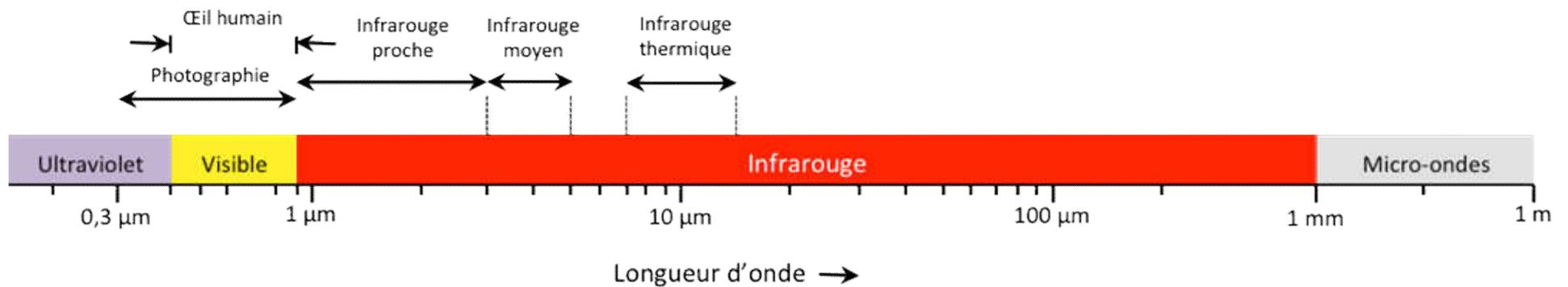
- réfléchi,
- **absorbé**,
- transmis (rare cas).

Rayonnement thermique :

rayonnement émis par un corps ou une surface qui dépend de sa température, elle-même dépendante de la température régnant en profondeur.

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Toutes surfaces planétaires et objets émettent dans le spectre électromagnétique



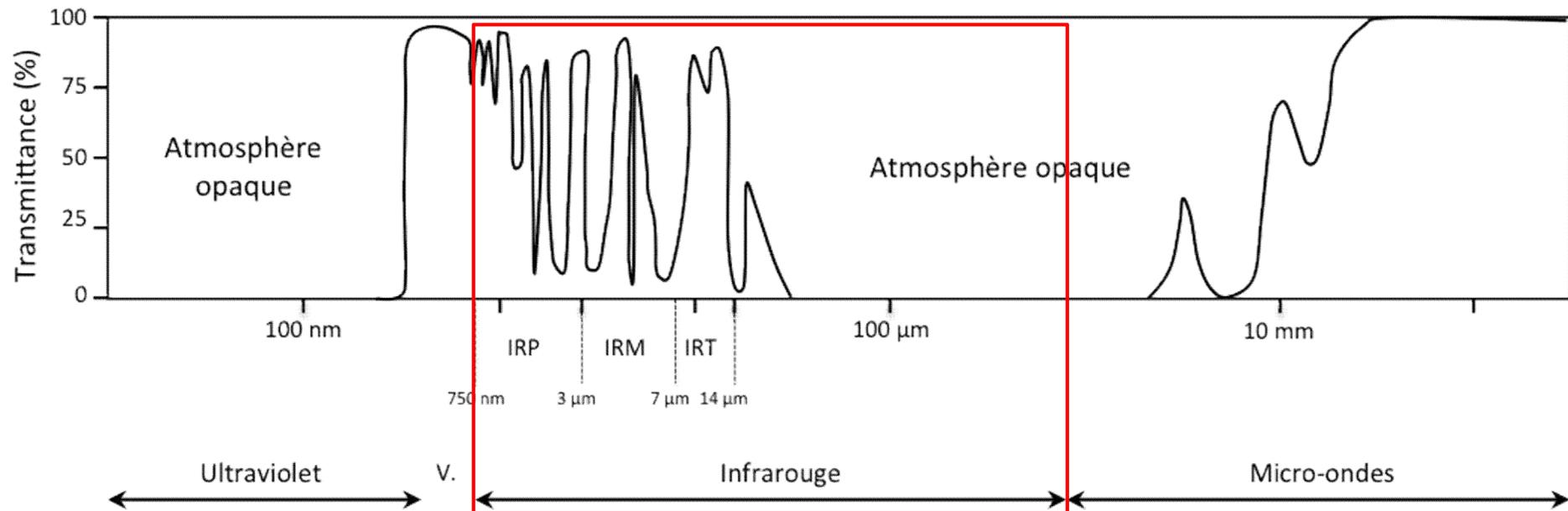
Antoine and Lopez, 2016

$$0.7 \mu\text{m} < \text{Infrarouge} < 1 \text{ mm}$$

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

S'affranchir de l'atmosphère.

Fenêtre atmosphérique > 0,7-3 μm (PIR) ; 3-7 μm (IRM); 7-14 μm (IRT).



Visible et Infrarouge proche > rayonnement réfléchi,

Infrarouge moyen > rayonnement émis et réfléchi,

Infrarouge thermique > rayonnement émis

LOI DU CORPS NOIR

Corps noir : surface absorbant l'ensemble du spectre électromagnétique incident, sans transmission ni réflexion.

> Rayonnement électromagnétique émis ne dépend que de sa température.

Loi de Planck (Radiance $W m^{-2} m^{-1}$) :

$$B(\lambda) = \frac{2 c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{-hc/(\lambda kT)} - 1}$$

h : constante de Planck
($6,62 \cdot 10^{-34} J s$).

c : vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8 m s^{-1}$).

k : constante de Boltzmann
($1,38 \cdot 10^{-23} J K^{-1}$).

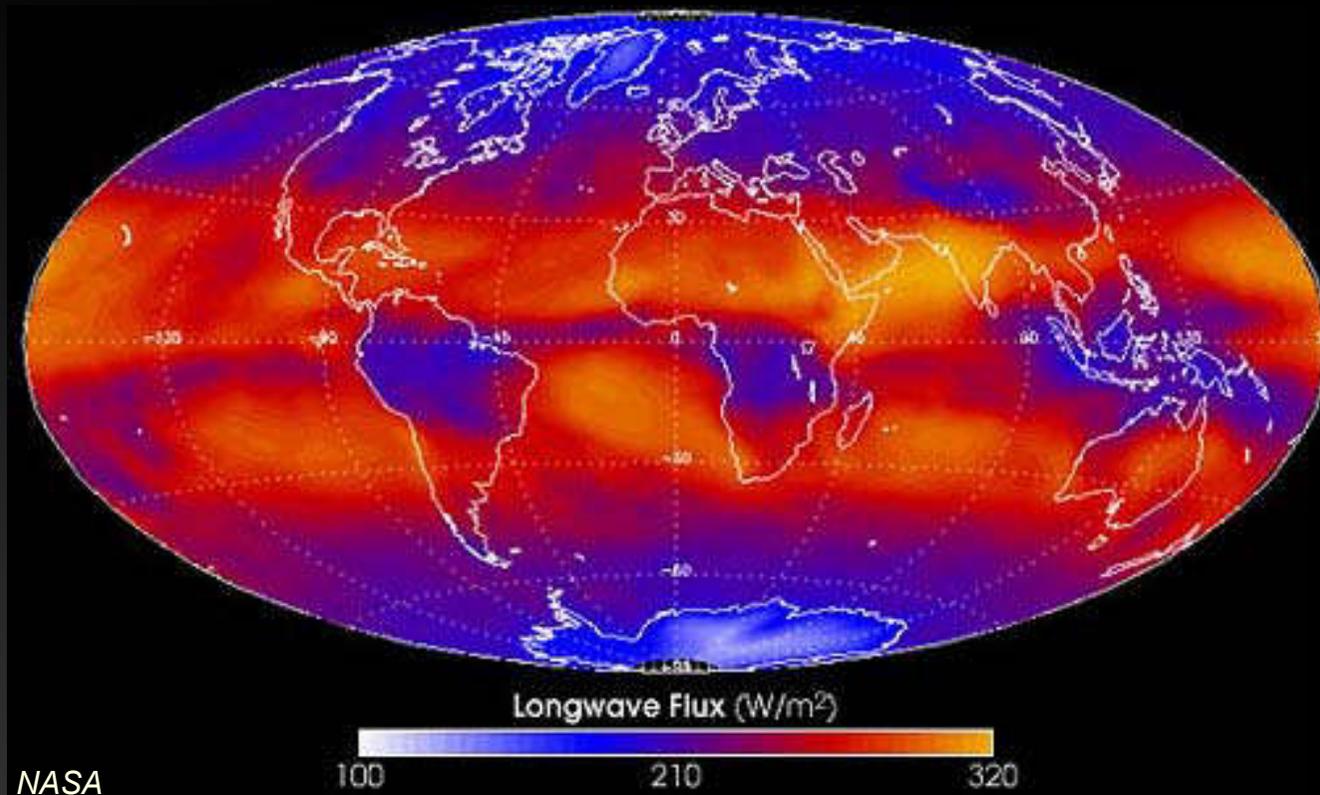
LOI DU CORPS NOIR

Loi de Stefan-Boltzmann (W m^{-2}):

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

ε = émissivité (1 pour un corps noir).

σ = constante de Stefan ($5,671 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)



LOI DU CORPS NOIR

Estimation de la température de brillance :

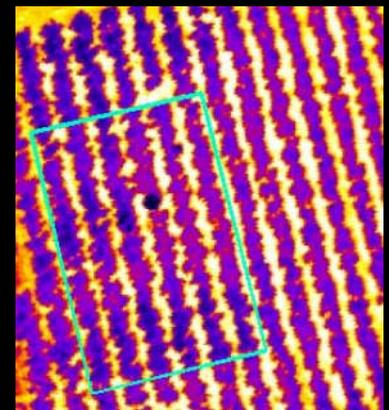
$$T(\lambda) = \frac{\alpha}{\ln\left(\frac{2\alpha ck}{\lambda^4 B(\lambda, T)} + 1\right)}$$

$$\alpha = \frac{hc}{\lambda k}$$

Estimation de la température de surface (bilan d'énergie) :

- propriétés radiatives de la surface (albédo et émissivité),
- propriétés thermiques du sol (conductivité, densité, porosité, granulométrie).

Interprétation de la température de surface > cycle diurne et les conditions de surface (météorologie, végétation, topographie).



PROPRIÉTÉS RADIATIVES

Albédo :

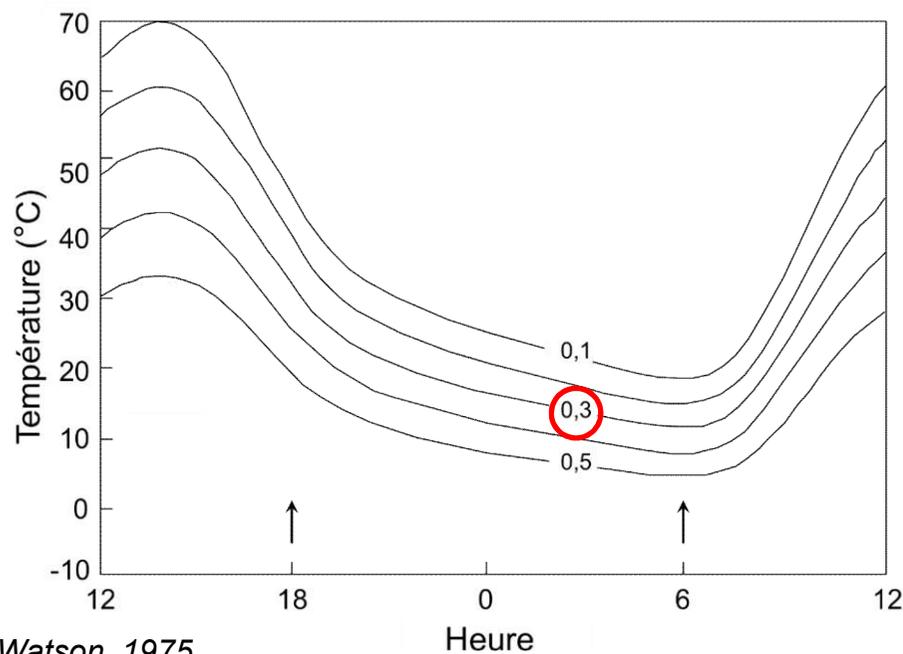
$$A = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$$

Représente la quantité d'énergie disponible pour le chauffage.

Type de matériaux	Albédo
Corps noir	0
Terre	0,36
Surface blanche	1

Pour une même quantité d'énergie reçue, un matériau d'albédo faible est plus chaud qu'un matériau d'albédo fort.

PROPRIÉTÉS RADIATIVES



Watson, 1975

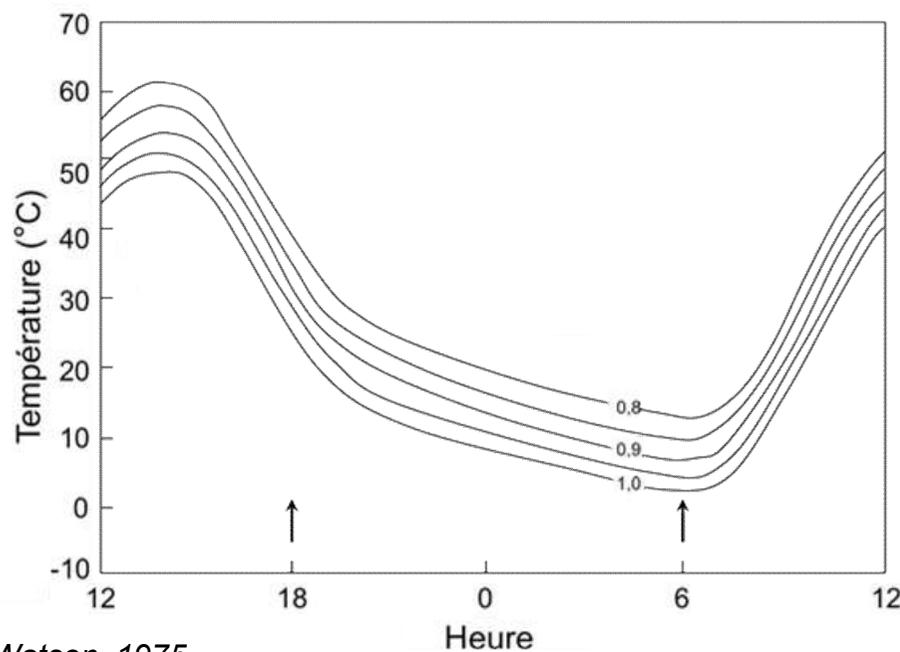
Cycle diurne :
Plus l'albédo est faible, plus l'écart de température durant le cycle diurne est important.

PROPRIÉTÉS RADIATIVES

Émissivité :

$$\varepsilon = \frac{\text{énergie rayonnée par un corps réel}}{\text{énergie rayonnée par un corps noir}}$$

La longueur d'onde ; propriétés électriques du matériau ; de l'état de surface ; de l'angle d'observation ; température.



Watson, 1975

Cycle diurne :
Plus l'émissivité est forte, plus la température mesurée est faible (plus d'énergie rayonnée).

PROPRIÉTÉ THERMIQUE

Inertie thermique ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$) :

$$I = \sqrt{k\rho c}$$

k : conductivité thermique
($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

ρ : densité (kg m^{-3}).

c : capacité calorifique
($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

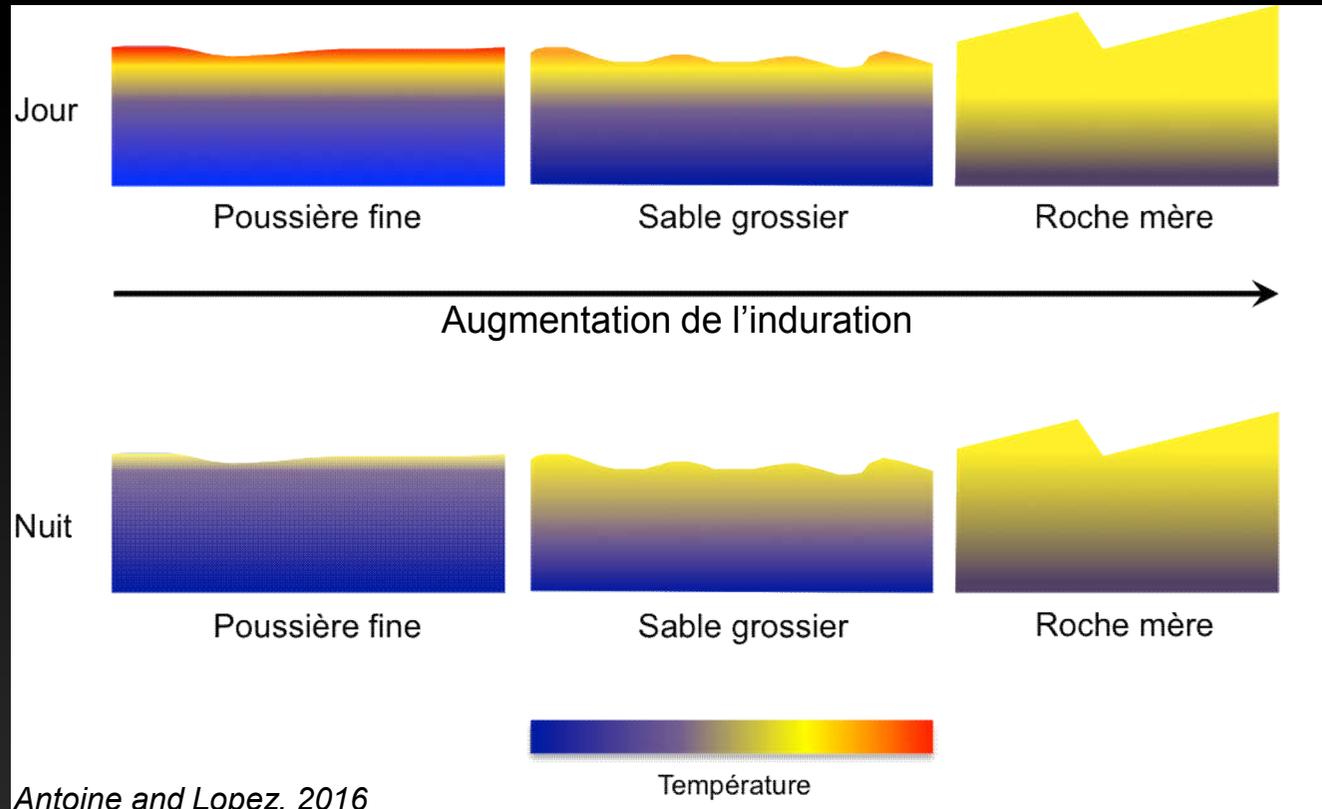
Aptitude du corps à stocker de l'énergie par conduction en profondeur durant la journée et à la restituer durant la nuit.

> Influence fortement la température de surface, en fonction de la nature du sol.

PROPRIÉTÉ THERMIQUE

Inertie thermique :

Degré d'induration du matériau de surface est un facteur déterminant.



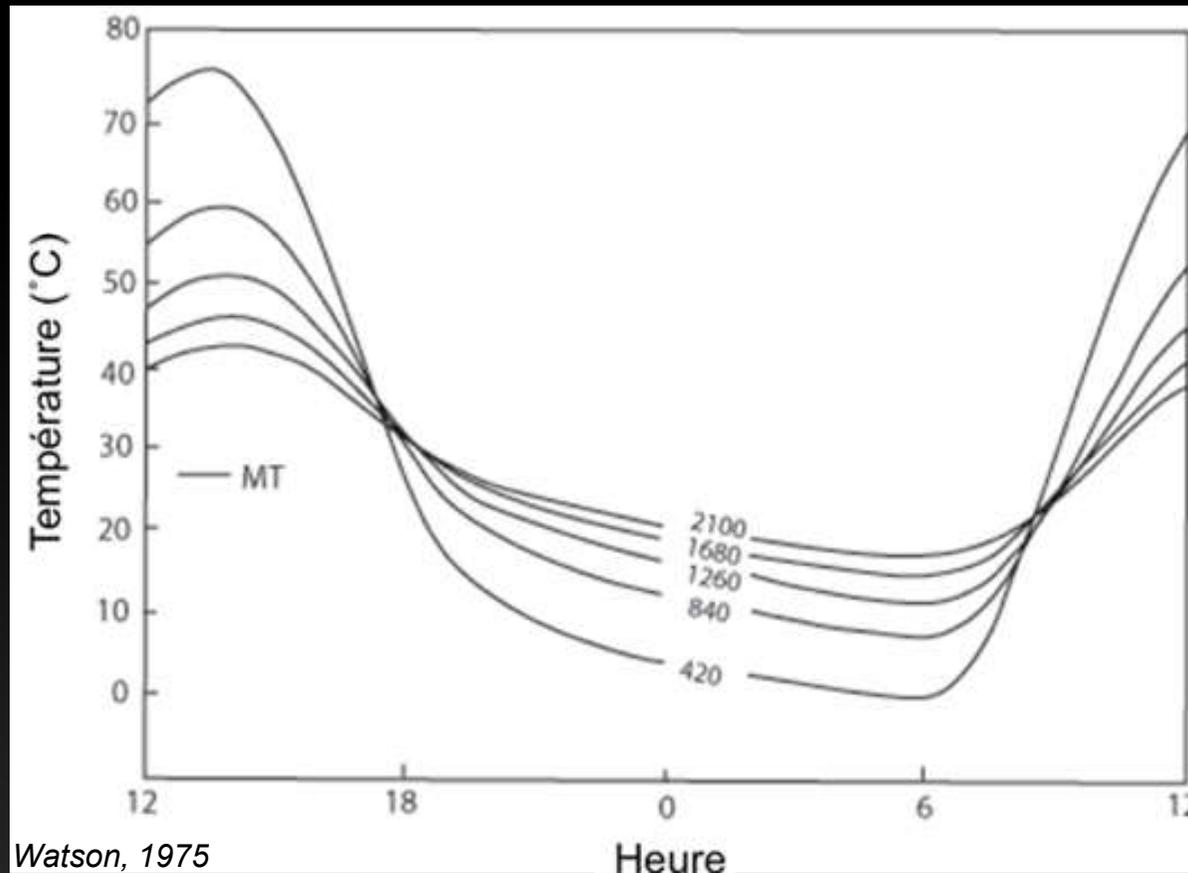
Cycle diurne :

Induration faible > forte variation de température

Induration forte > faible variation de température

PROPRIÉTÉ THERMIQUE

Inertie thermique :



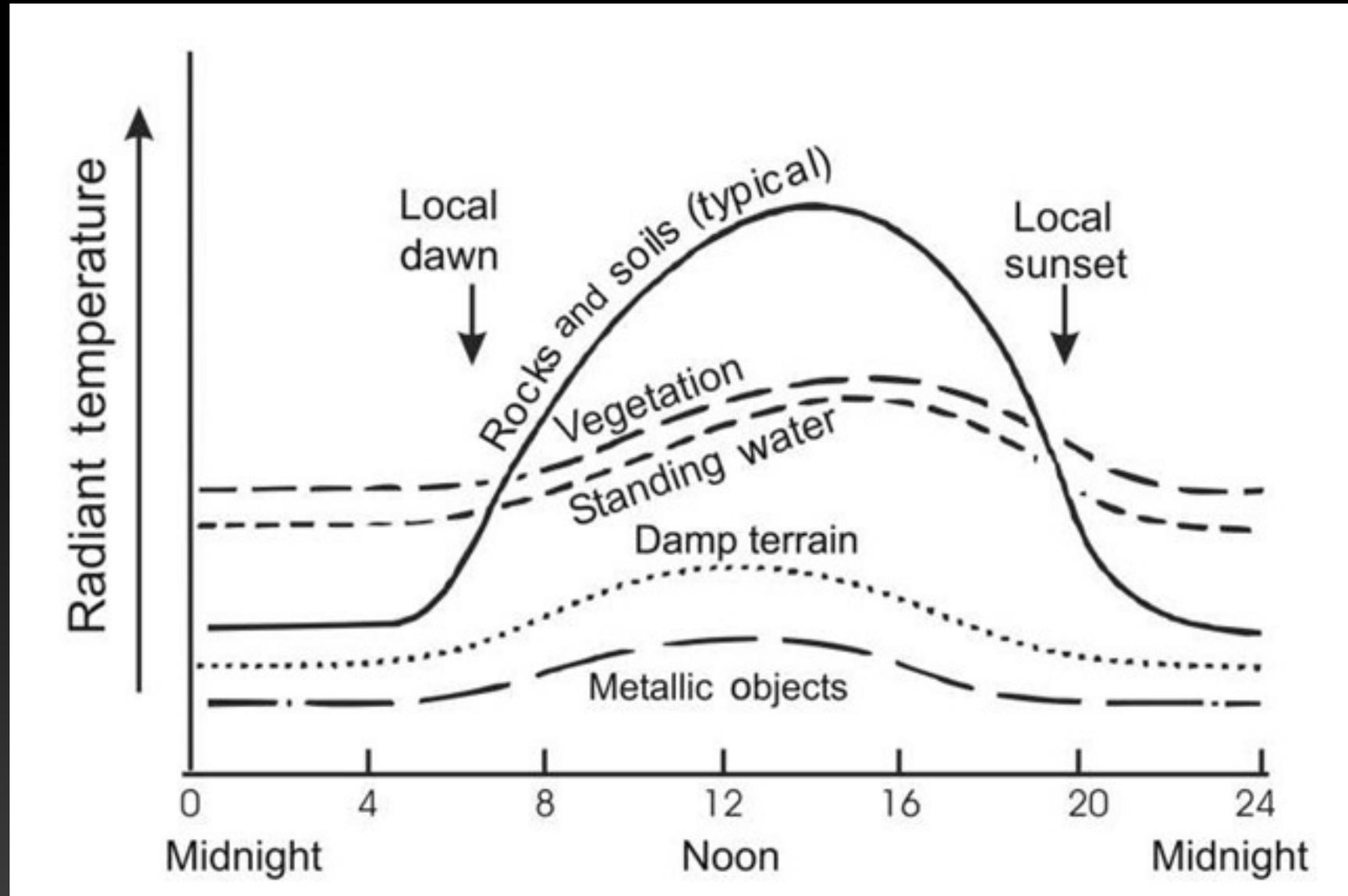
Watson, 1975

Cycle diurne :

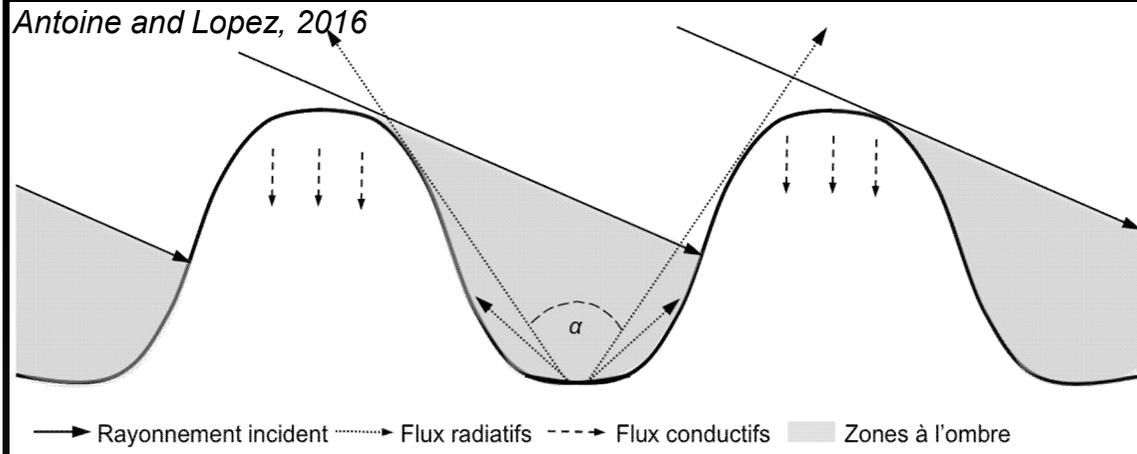
Inertie thermique forte (induration forte) > faibles variations de température.
Inertie thermique faible (induration faible) > fortes variations de température.

PROPRIÉTÉ THERMIQUE

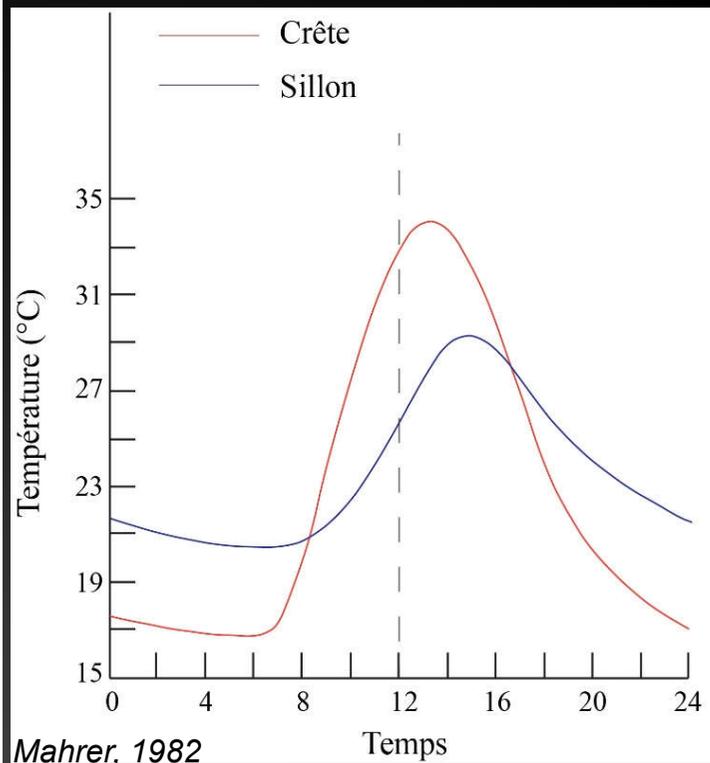
Inertie thermique :



TOPOGRAPHIE



α = proportion de ciel visible.
 α est petit > refroidissement lent.
 α est grand > refroidissement rapide.



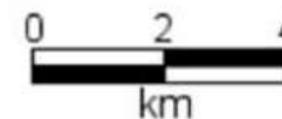
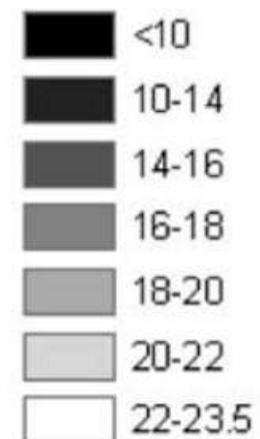
Jour : la crête est plus chaude que le sillon.

Nuit : le sillon est plus chaud que la crête.

TOPOGRAPHIE



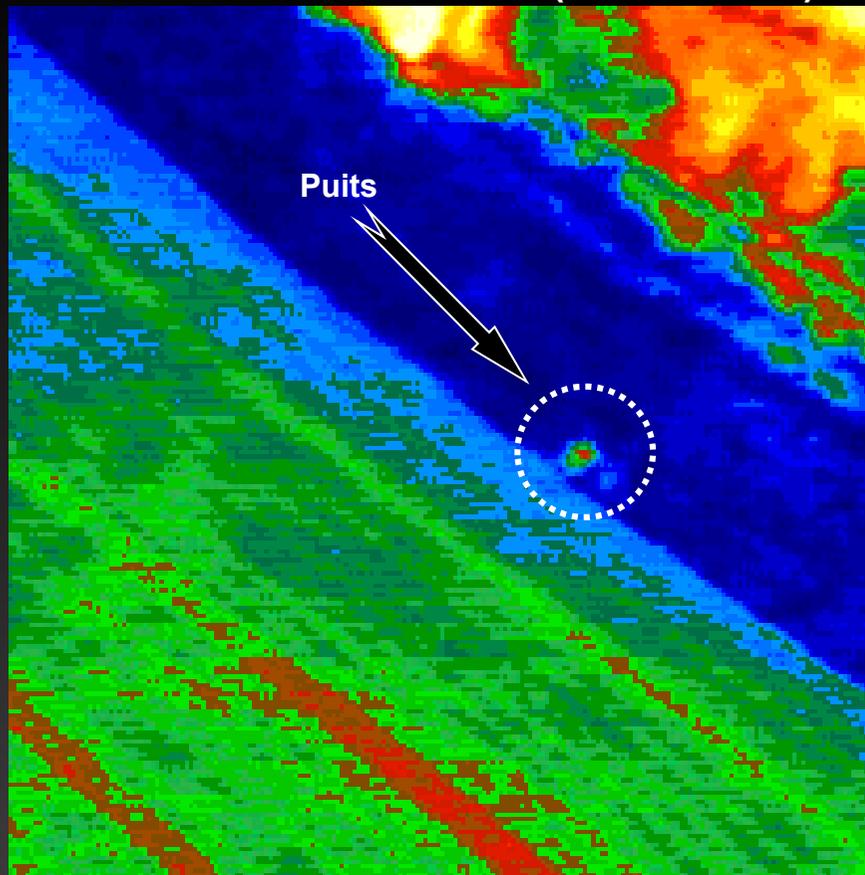
Température du sol (°C)
(20 cm de profondeur)



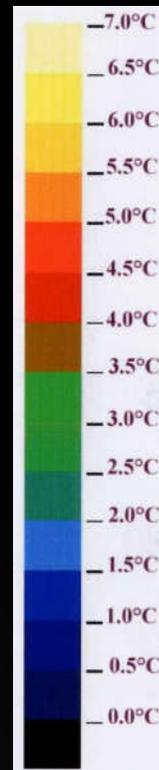
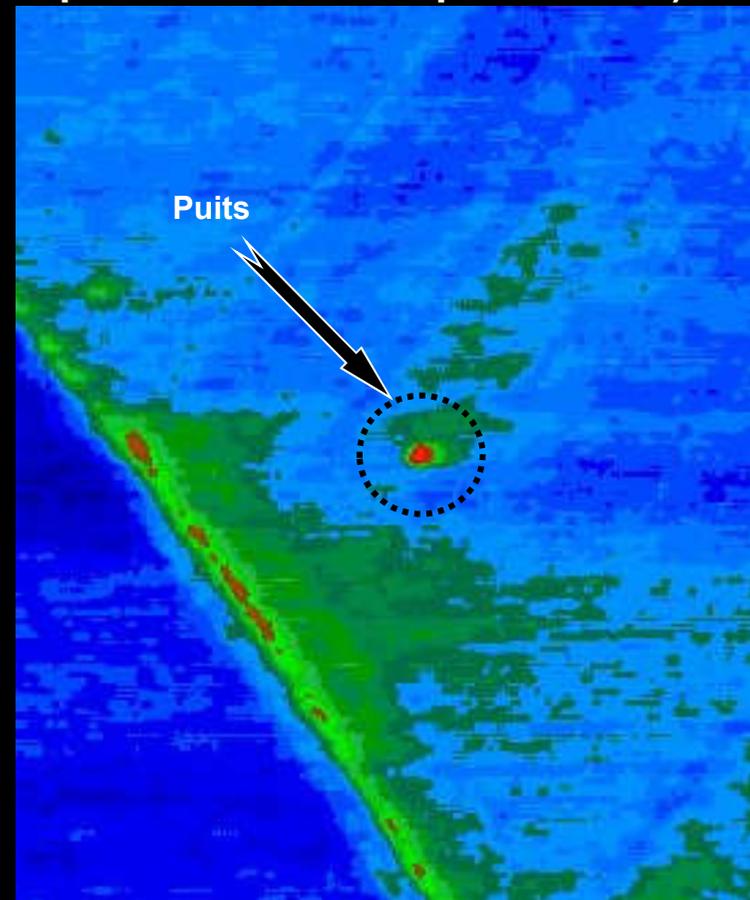
APPLICATIONS



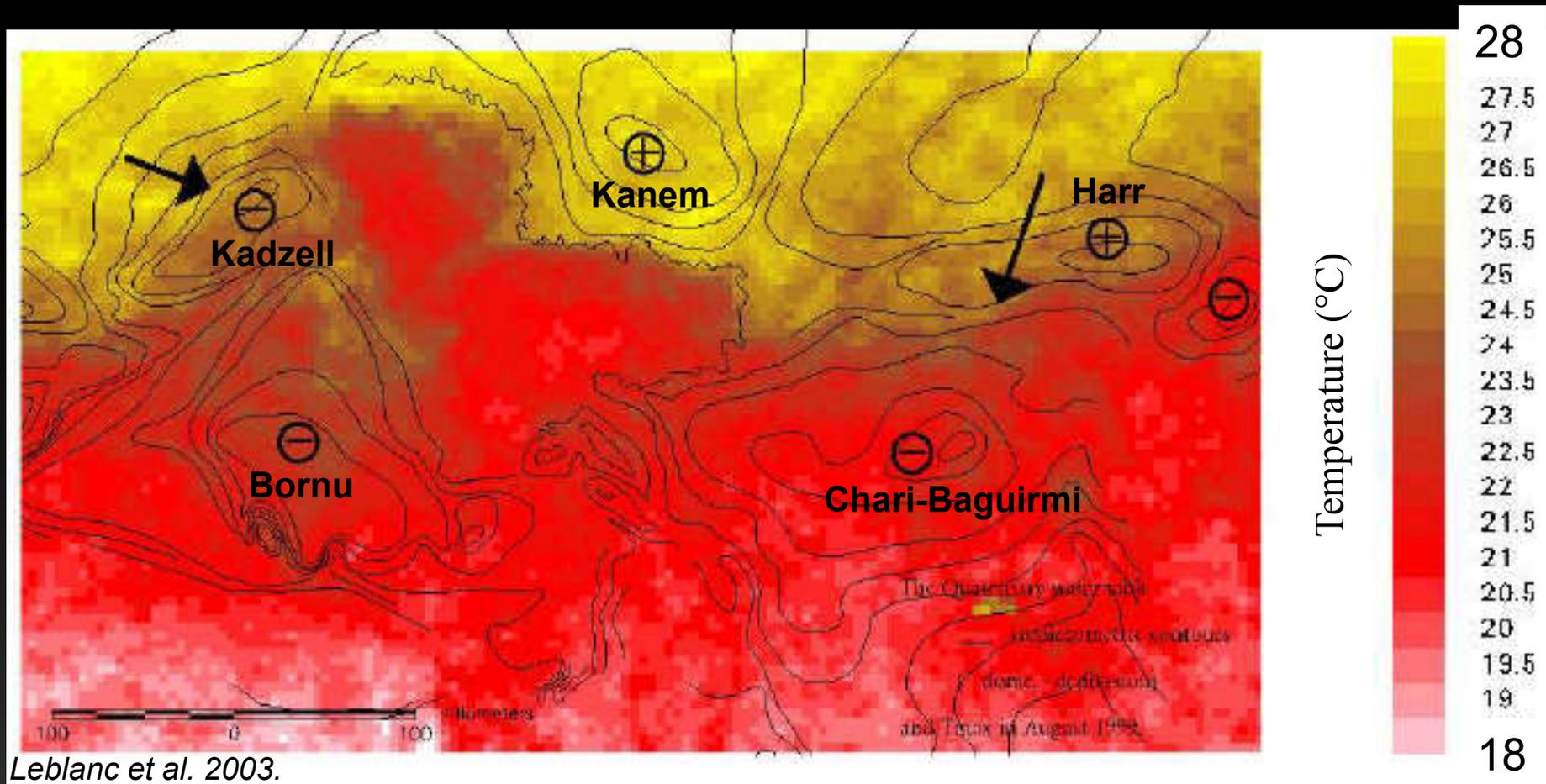
Puits visible en surface (non comblé)



Puits invisible en surface (comblé par des matériaux perméables)



APPLICATIONS

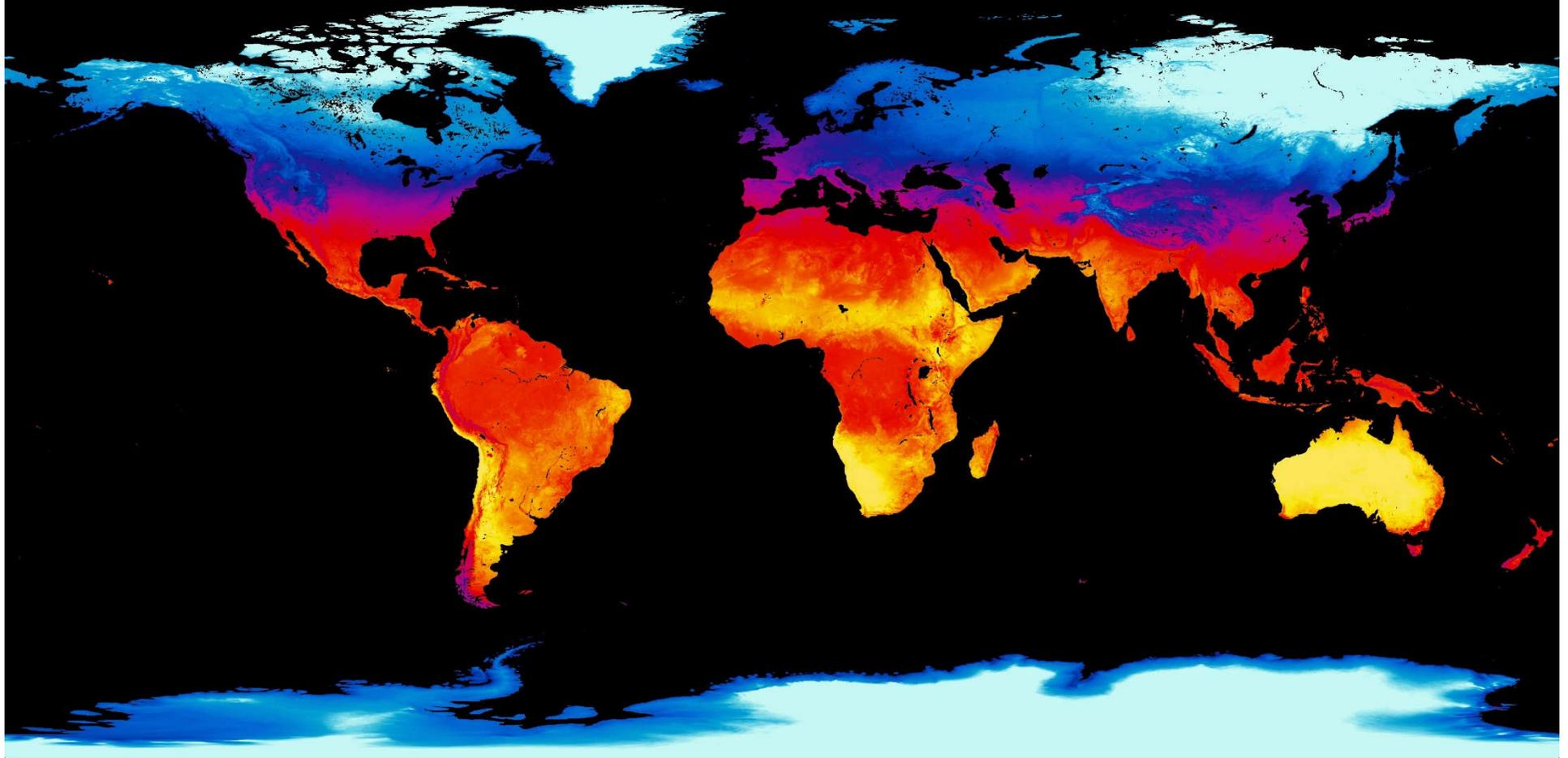


- Cycle d'évaporation/condensation
- Perméabilité de surface

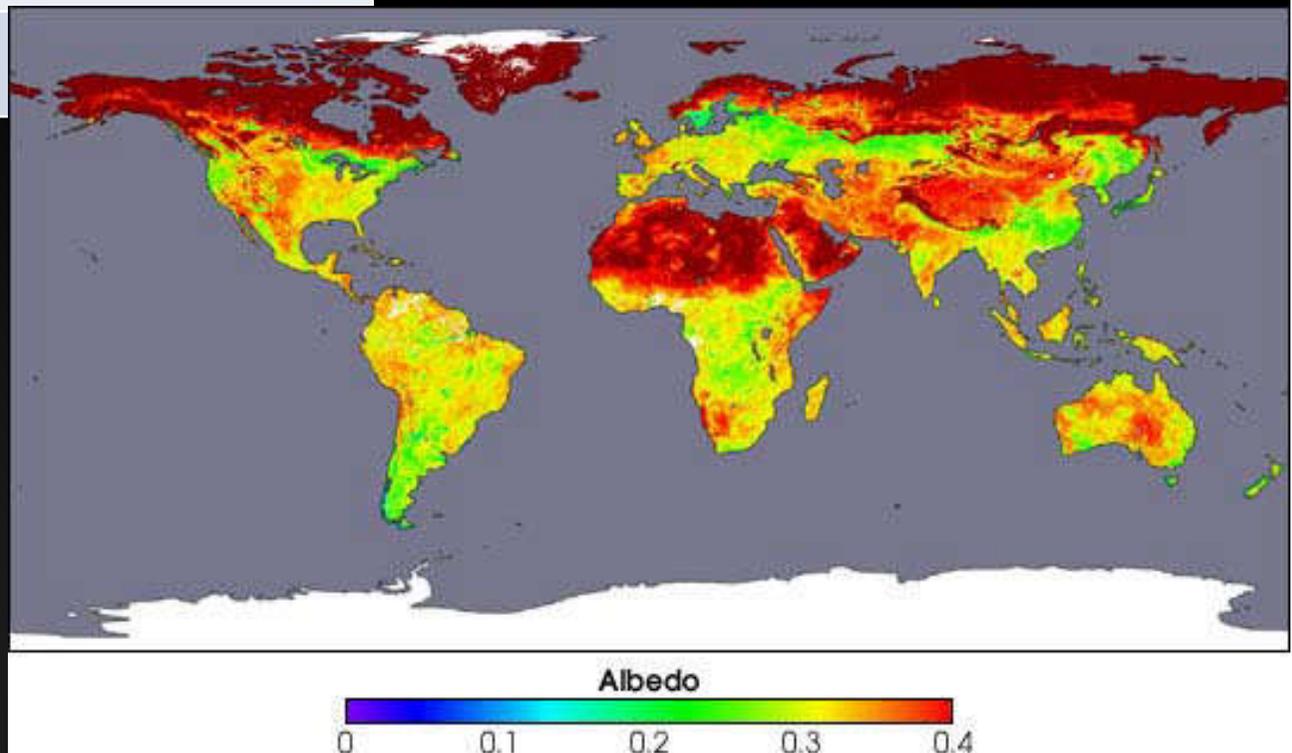
CONCLUSION

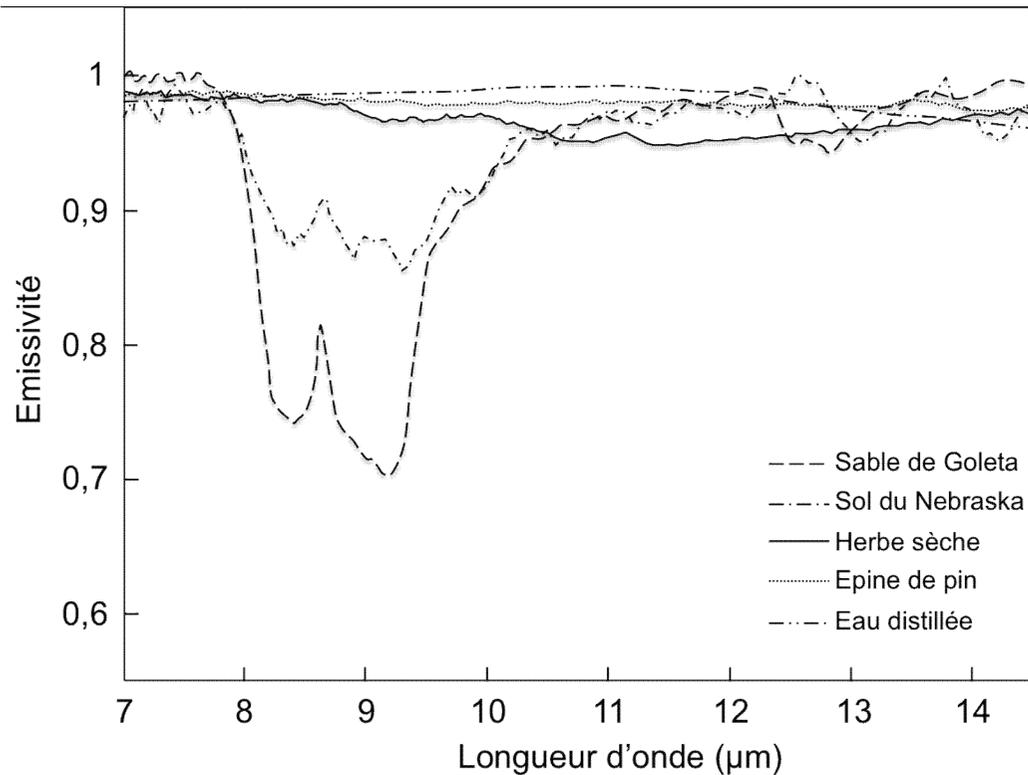
- Images infrarouge thermique sont de plus en plus utilisées malgré leur difficulté d'interprétation.
- Utilisation simplifiée et grand-public.
- Mise en évidence de phénomène d'infiltration, de changement de perméabilité verticale à petite échelle et très grande échelle.

MERCI DE VOTRE ATTENTION



Type	Albédo
Corps noir	0
Foret	0,05-0,20
Prairies et cultures	0,10-0,25
Sols sombres	0,10-0,20
Sol sablonneux sec	0,25-0,45
Sol argileux sec	0,15-0,35
Sable	0,20-0,40
La Terre	0,36
Granite	0,30-0,35
Sols clairs	0,40-0,50
Neige fraîche	0,90
Eau	0,10-1
Surface parfaitement blanche	1





Type	Émissivité
Gravier	0,28
Argile	0,39
Granite	0,45
Grès	0,67
Schiste	0,69
Basalte	0,72
Sable	0,76
Gypse	0,80-0,90
Asphalte	0,90
Brique rouge de construction	0,93
Béton	0,94
Glace lisse	0,93
Glasse rugueuse	0,94
Calcaire	0,95
Velours noir	0,99

Roche	Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Granite	2,1-4,1
Diorite	2,0-2,9
Basalte	1,3-2,3
Gneiss granitique	1,9-4,0
Quartzite	3,6-6,6
Marbre	1,3-3,1
Grès	1,3-5,1
Argile (kaolinite)	0,4-1,0
Schiste	1,5-3,1
Calcaire	2,5-4,0
Gravier sec	0,4-0,5
Tourbe	0,2-0,4

- La conductivité du solide : k_s
- La conductivité du fluide: k_f
- La porosité : ϕ

Le modèle de Beck (1976) :

$$k_{eff} = k_s \frac{\left(2 \frac{k_s}{k_f} + 1\right) 2\phi \left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right)}{\left(2 \frac{k_s}{k_f} + 1\right) + \phi \left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right)}$$

Le modèle à moyenne géométrique (Woodside and Mesmer, 1961)

$$k_{eff} = k_f^\phi k_s^{1-\phi}$$

Pas de base physique mais fournit une bonne approximation de la formule de Beck.

L'épaisseur de peau thermique, δ pour une onde thermique de période P est définie comme (Turcotte and Schubert, 2002 ; Putzig, 2006) :

$$\frac{I}{\rho c} \sqrt{\frac{P}{\pi}}$$

- > Une surface avec une forte inertie thermique conduira la chaleur plus en profondeur qu'une surface possédant une faible inertie thermique.
- > Cette relation traduit aussi le fait que les cycles de température possédant de longues périodes pénètrent plus en profondeur que ceux possédant de courtes périodes.

