

Mesures des paramètres thermiques du sol : capteurs heatpulse

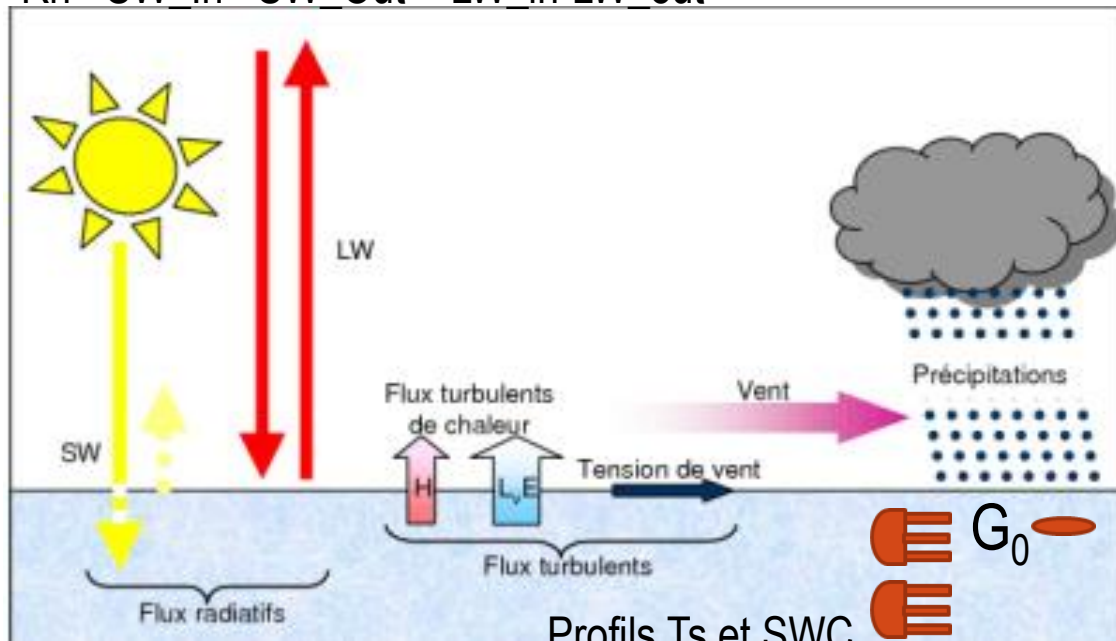
ANR MOSAI



Bartosz Zawilski, Franck Granouillac, Mathieu Pognard, Odile De La Rüe du Can, Aurore Brut

Contexte

$$R_n = SW_{In} - SW_{Out} + LW_{in} - LW_{out}$$

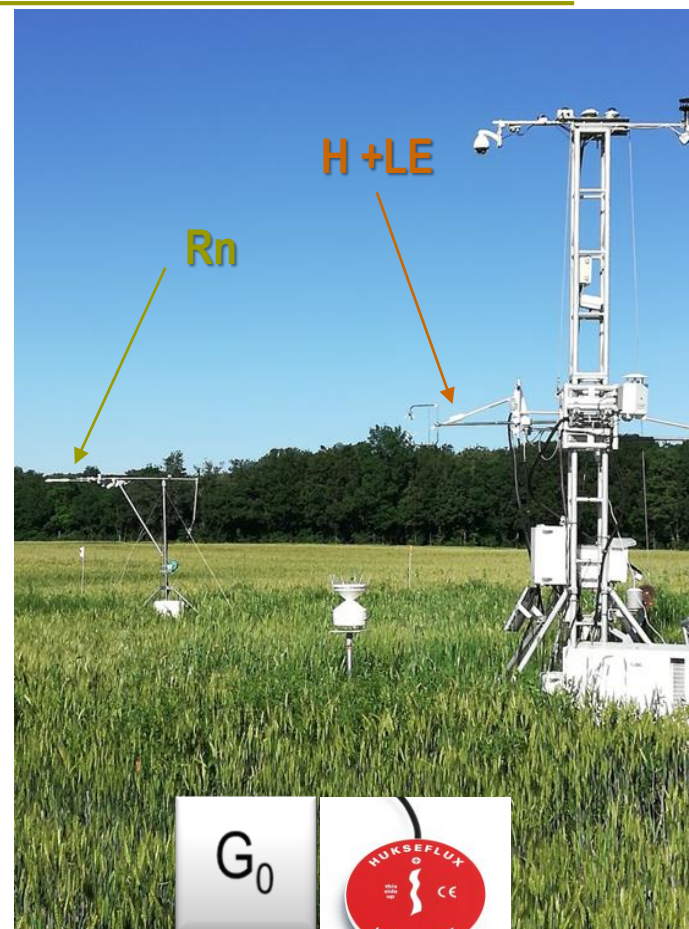
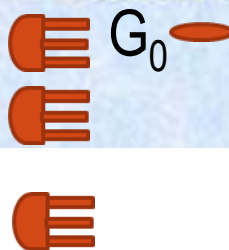


R_n : Net radiation (W/m^2)

H : Sensible heat (W/m^2)

LE : Latent heat (W/m^2)

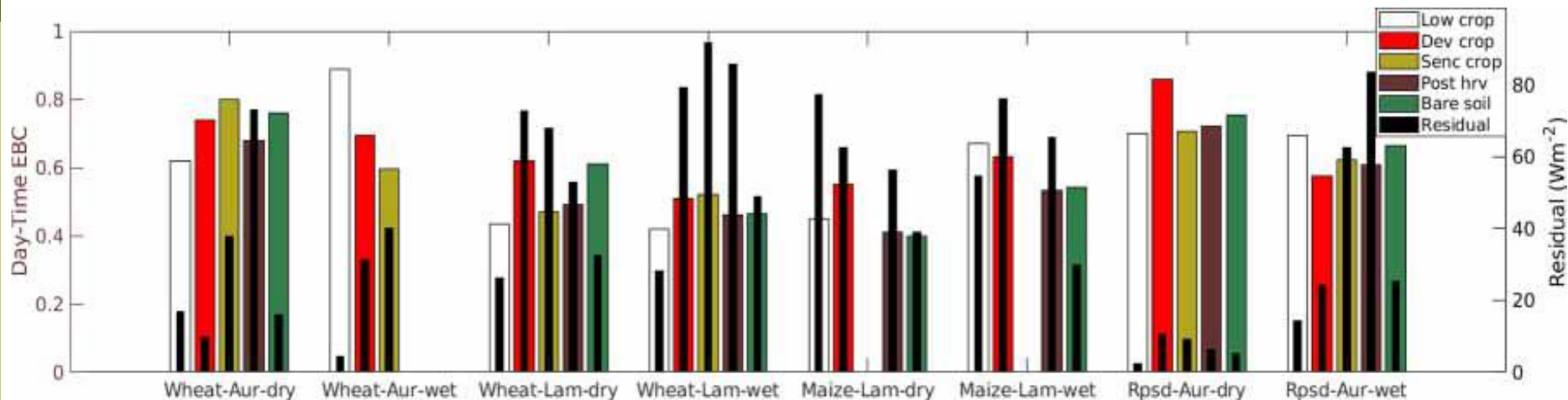
G_0 : Ground heat flux
at the surface (W/m^2)



$$R_n = H + LE + G_0 \quad \text{bilan non fermé!}$$

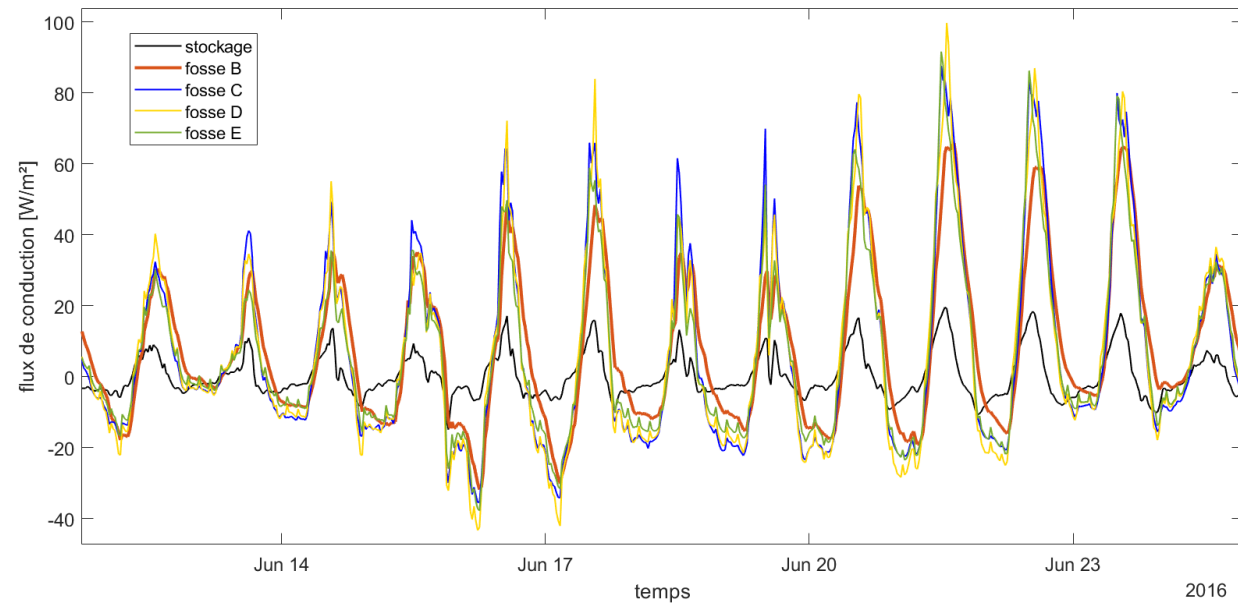
Contexte

Bilan d'énergie sur cultures en fonction du stade de développement



- Forte dépendance au site
- Saisonnalité du bilan d'énergie
- Pas de lien très marqué entre types de culture et climatologie

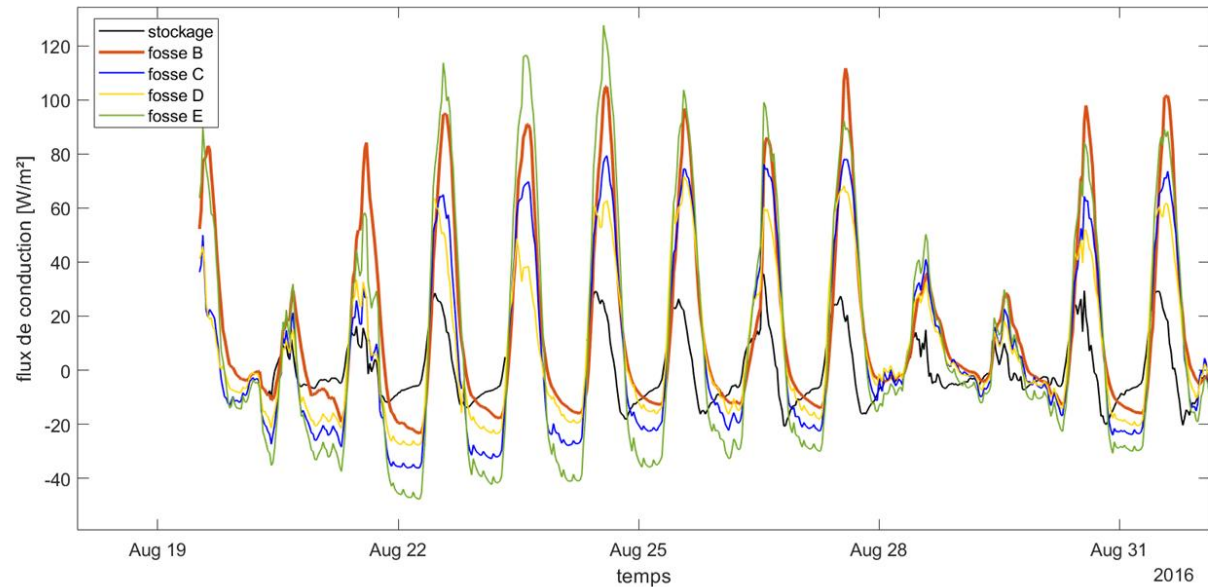
Contexte



Période avant récolte : blé à maturité

Pas de très forte variabilité d'une fosse à l'autre.
Stockage ≤ 20 W/m²

Contexte



Période après récolte : sol nu et résidus

Flux de conduction G plus fort
Forte variabilité d'une fosse à l'autre.
Stockage $\leq 20 \text{ W/m}^2$

Estimation de G_0

$$G_0 = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z_r} + \int_0^{z_r} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dz$$

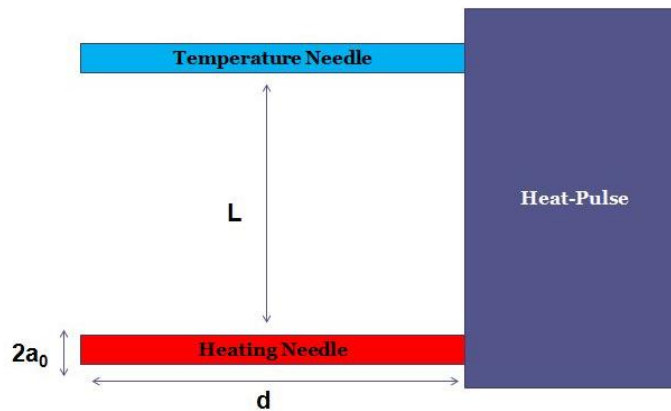
Mesure avec la plaquette de flux à la profondeur z_r



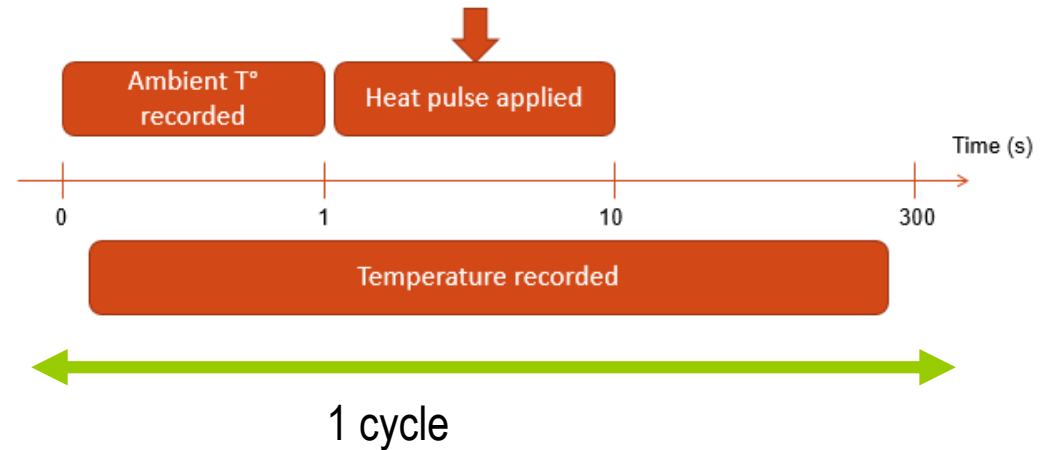
Stockage dans la couche de 5 cm en surface

On considère 95% de sol minéral, 5% de sol organique, dépend de la densité du sol et du contenu en eau du sol

Heat-Pulse sensor



~23J input



Parameter	Value
$2a_0$	1.27 mm
d	30 mm
L	6 mm
accuracy	$\pm 5\%$

Models of temperature profile

Pour résoudre l'équation de diffusion, nous avons testé 3 modèles :

- Infinite Line Heat Source (ILHS)
- Continuous Line Heat Source (CLHS)
- Identical Cylindrical Perfect Conductors (ICPC)

Models of temperature profile

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t}$$

heat diffusion equation

Hypothesis	ILHS	CLHS	ICPC
Milieu homogène et isotrope	✓	✓	✓
Température initiale uniforme	✓	✓	✓
Durée de chauffage	✗	✓	✓
Diamètre des aiguilles	✗	✗	✓
Capacité thermique et diffusivité des aiguilles	✗	✗	✓
Conductivité thermique des aiguilles	✗	✗	✗
Niveau de précision	-	+	++



$\Delta T(\lambda, C, \kappa \dots)$

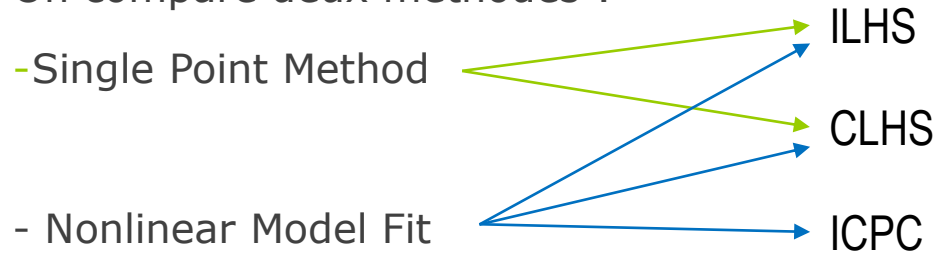
$\kappa(\Delta T, \dots) = ?$

$C(\Delta T, \dots) = ?$

$\lambda = \kappa C$

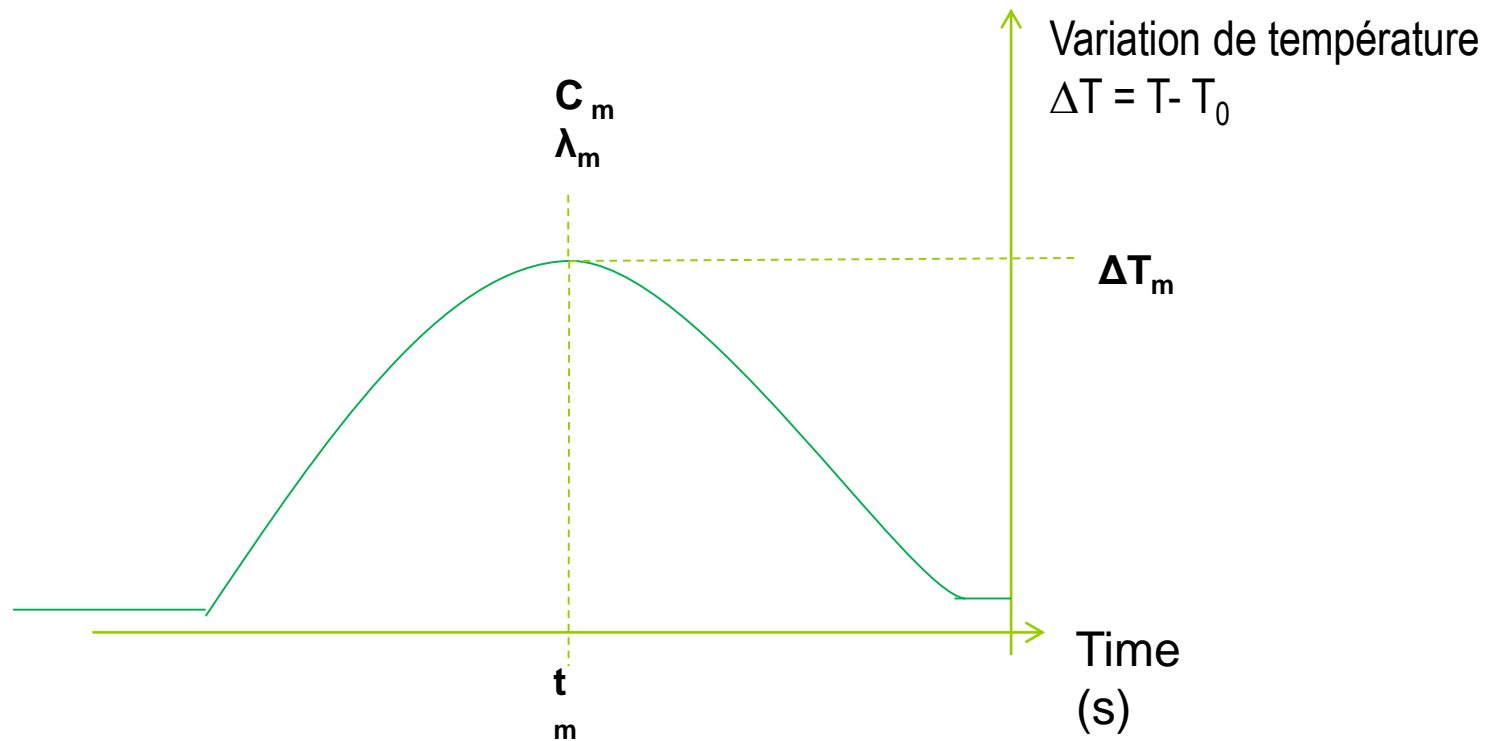
Méthode mathématique pour résoudre les modèles

On compare deux méthodes :



Single Point Method (SPM)

On ne considère que le maximum de temperature sur l'ensemble du cycle de mesures de temperature



Single Point Method (SPM)

➔ Recherche de la dérivée nulle au maximum

Infinite Line Heat

Source:

$$\kappa_m = \frac{L^2}{4t_m}$$

$$C_m = \frac{Q}{\pi L^2 \Delta T_m \exp 1}$$

Continuous Line Heat

Source:

$$\kappa_m = \frac{L^2}{4} \left(\frac{\frac{1}{(t_m - t_0)} - \frac{1}{t_m}}{\ln \frac{t_m}{t_m - t_0}} \right)$$

$$C_m = \frac{q}{4\pi\kappa_m\Delta T_m} \left(-E_1\left(\frac{L^2}{4\kappa_m(t_m - t_0)}\right) + E_1\left(\frac{L^2}{4\kappa_m t_m}\right) \right)$$

Source: *Correcting for finite probe diameter in the dual probe heat pulse method of measuring soil water content*, J.H. Knight and G.J. Kluitenberg

Carlaw and Jaeger, 1959, p258

Nonlinear Model fit (NMF)



Sensor data

Temperature models (ILHS,CLHS,ICPC)

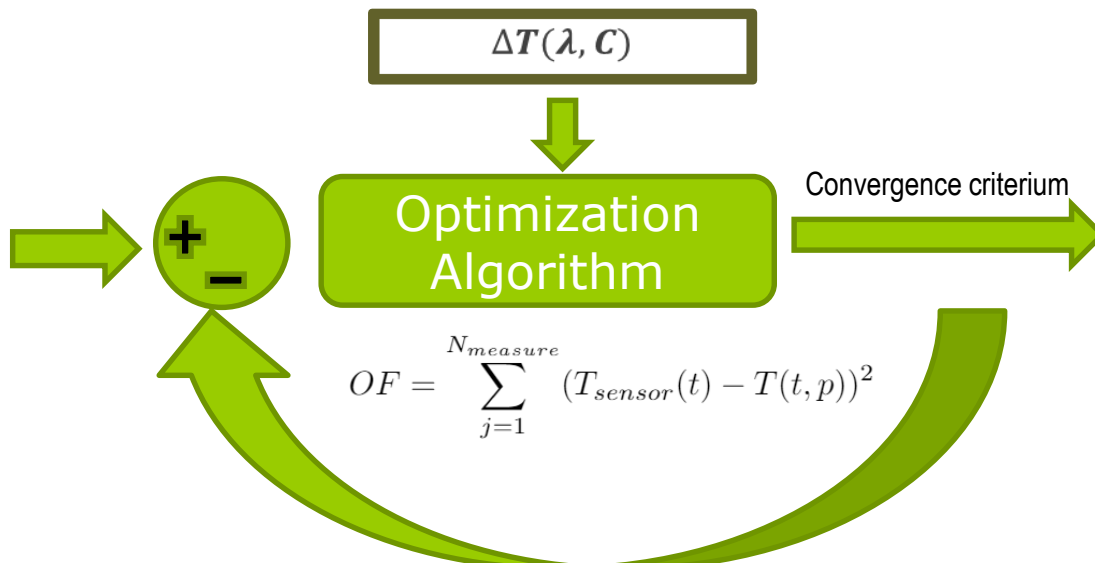
$$\Delta T(\lambda, C)$$

Optimization
Algorithm

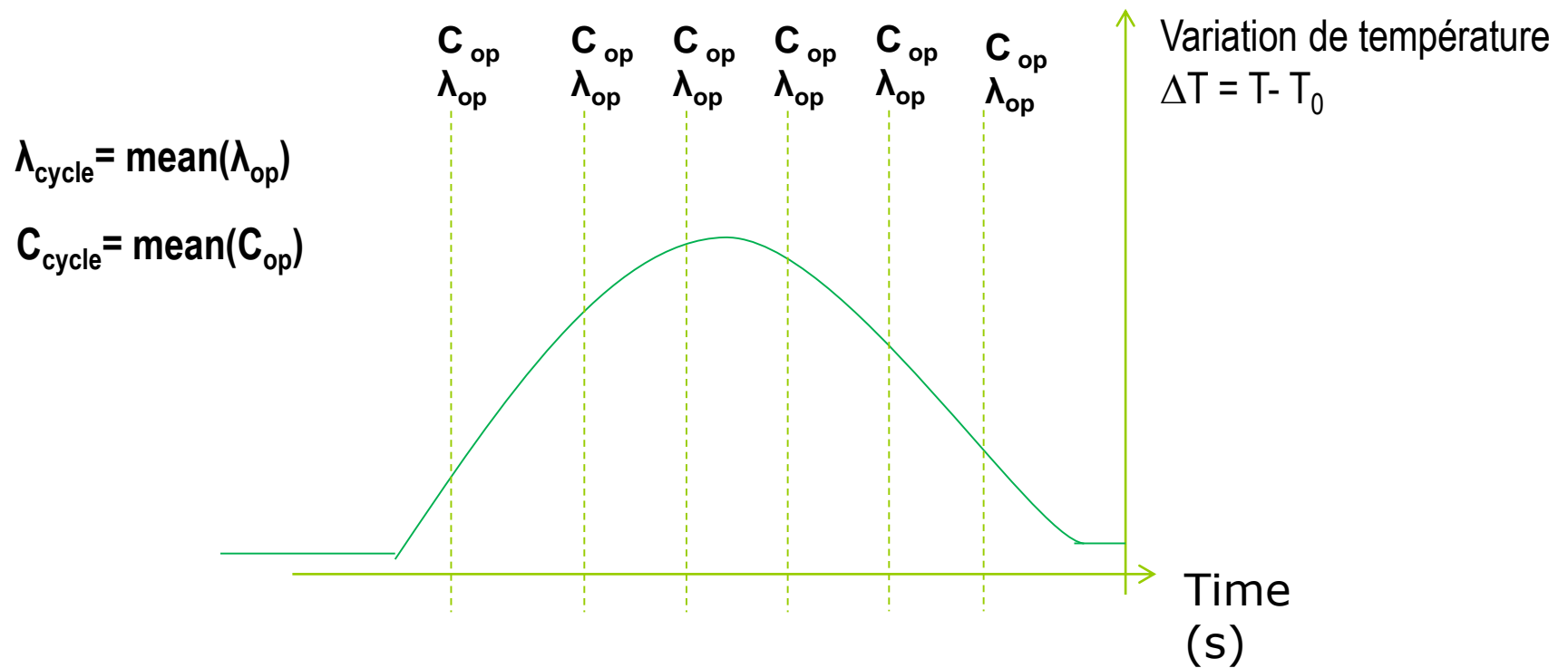
Convergence criterium

$\lambda_{\text{optimized}}$
 $C_{\text{optimized}}$

$$OF = \sum_{j=1}^{N_{\text{measure}}} (T_{\text{sensor}}(t) - T(t, p))^2$$



Nonlinear Model fit (NMF)



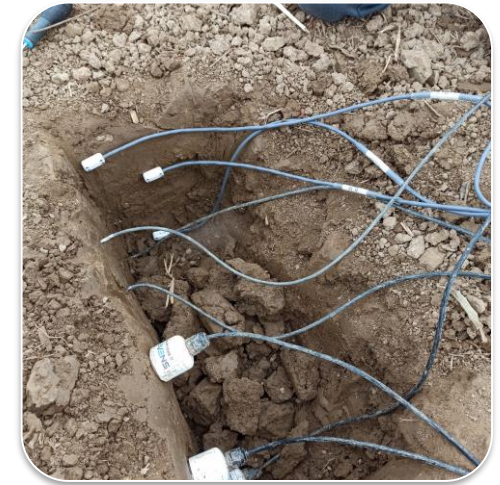
Méthodologie



Evaluer la mesure des capteurs dans un milieu avec des paramètres thermiques connus et estimer leur précision et leur dispersion



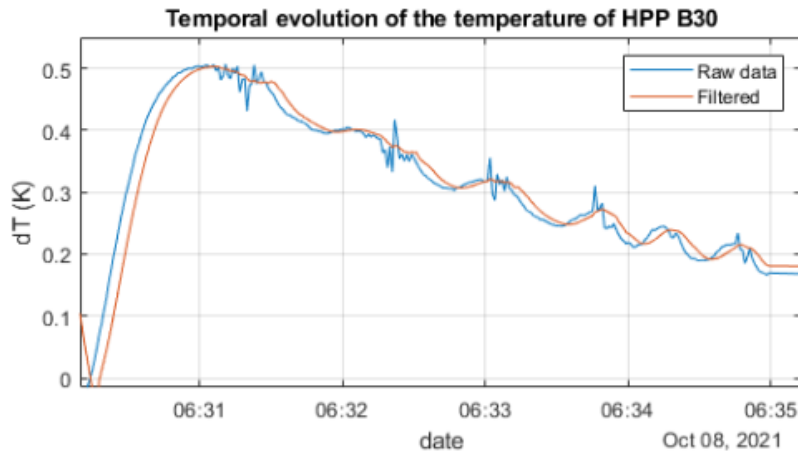
Evaluer le comportement des capteurs dans un milieu contrôlé sec (sable)



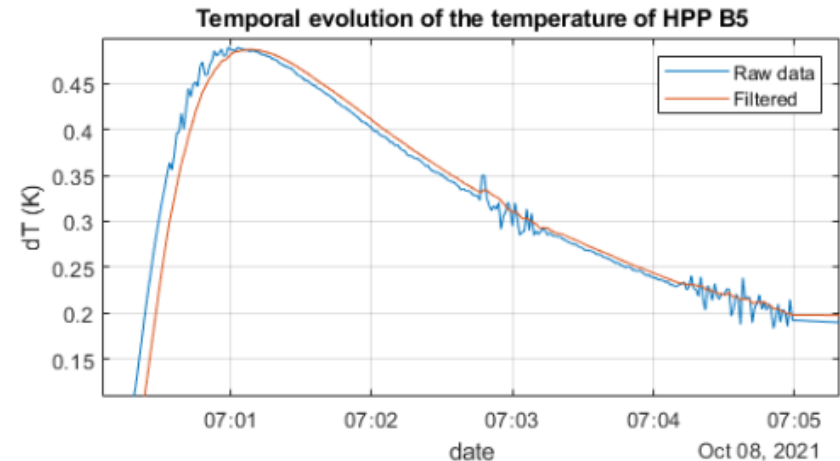
Installation du dispositif à Lamasquère

Résultats préliminaires

Agar-Agar (propriétés thermiques de l'eau)



1 cycle pour le B30 avec du bruit hautes et basses fréquences



1 cycle pour le capteur B5 avec du bruit hautes fréquences

Filtrage basse fréquence difficile à éliminer

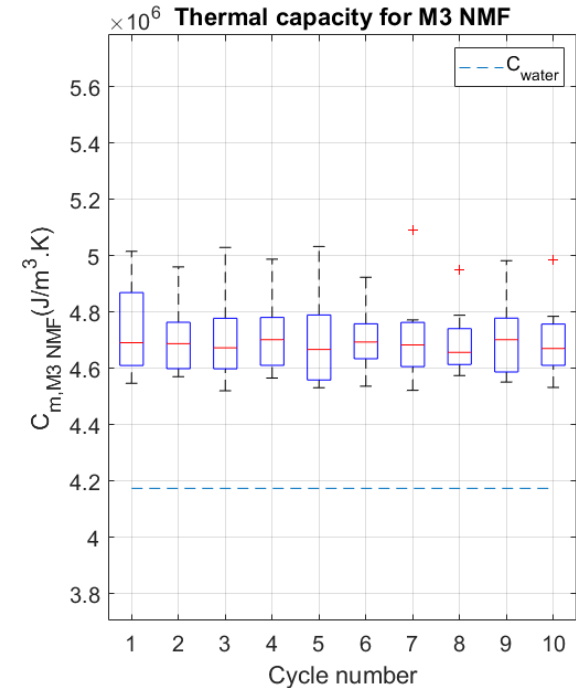
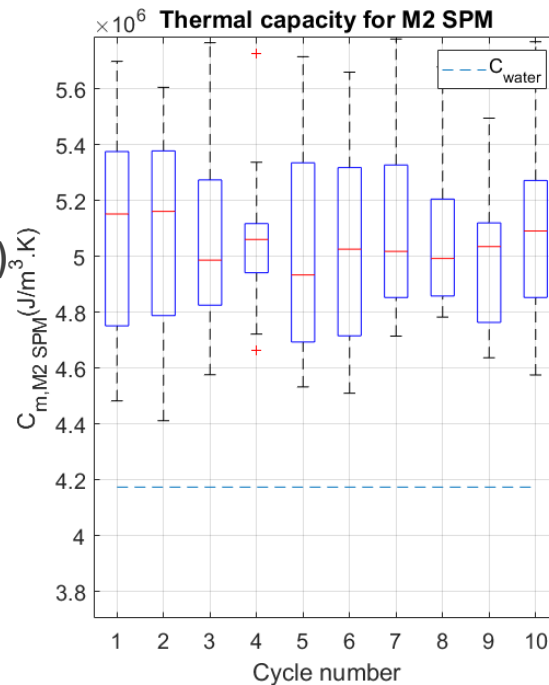
Résultats préliminaires

Agar-Agar

Tous capteurs confondus (même niveau)

Models: Continuous Line Heat Source (left)
Identical Cylindrical Perfect Conductors (right)

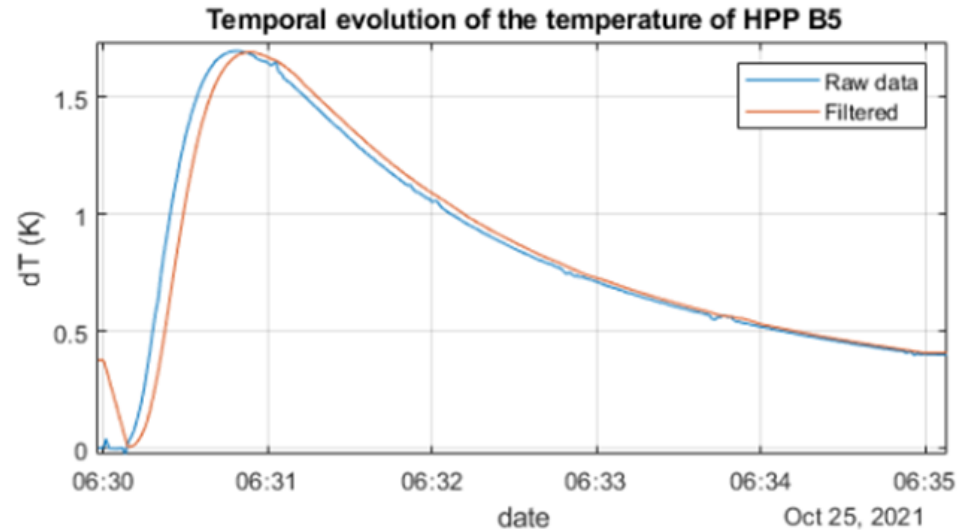
Methods: Single Point Method (left)
Nonlinear Model Fit (right)



Forte dispersion pour le méthode Single Point Model (SPM) avec une sur-estimation par rapport à la valeur attendue de la capacité calorifique volumique

Résultats préliminaires

Cycle et résultats dans le sable



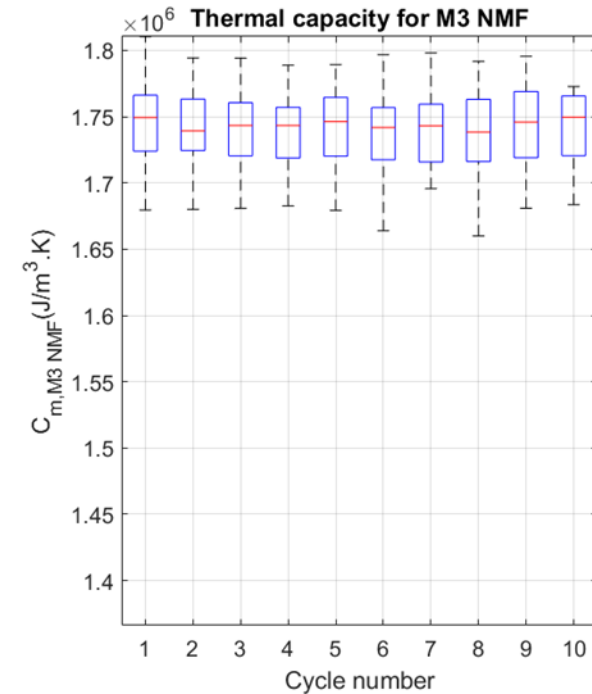
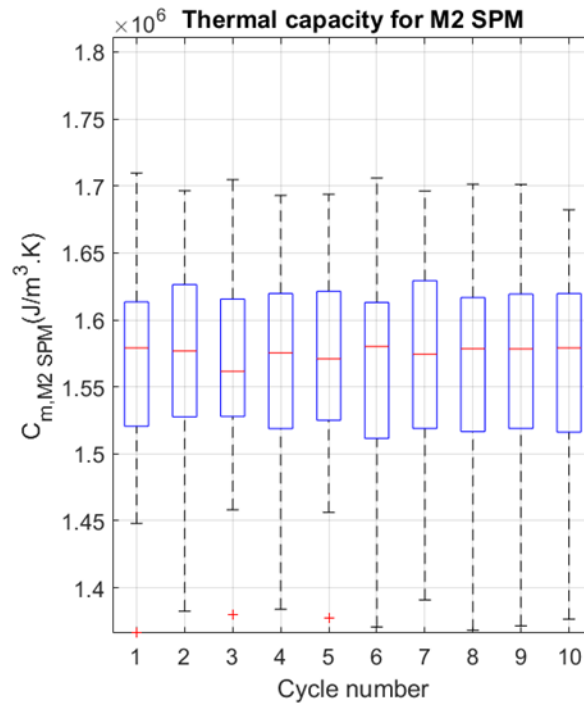
Cycles en général moins bruités pour les capteurs installés dans le sable.
(Bruit hautes fréquences)

Résultats préliminaires

Cycle et résultats dans le sable pour l'ensemble des capteurs.

Models: Continuous Line Heat Source (left) Identical Cylindrical Perfect Conductors (right)

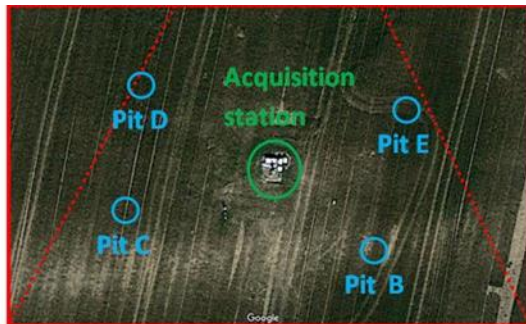
Methods: Single Point Method (left) Nonlinear Model Fit (right)



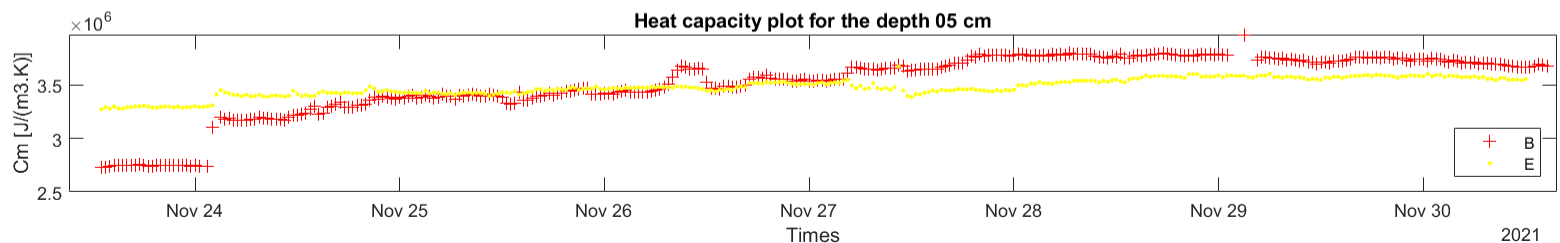
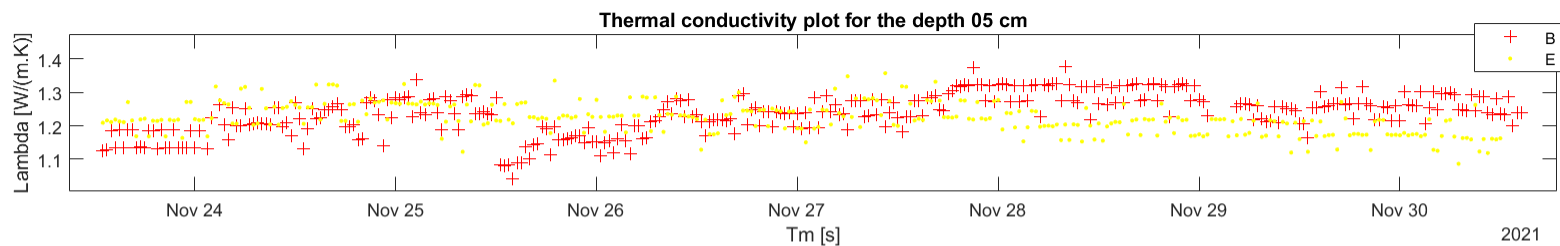
Valeur typique attendue pour le sable sec : $C = 1.3$ to 1.6 MJ/m³.K

Résultats sur le site

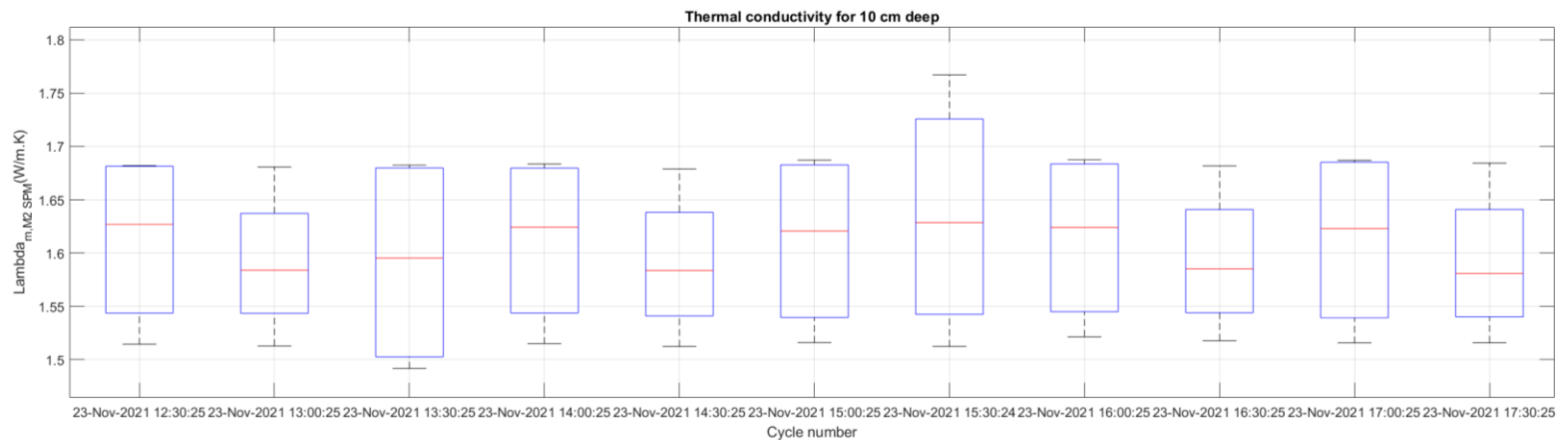
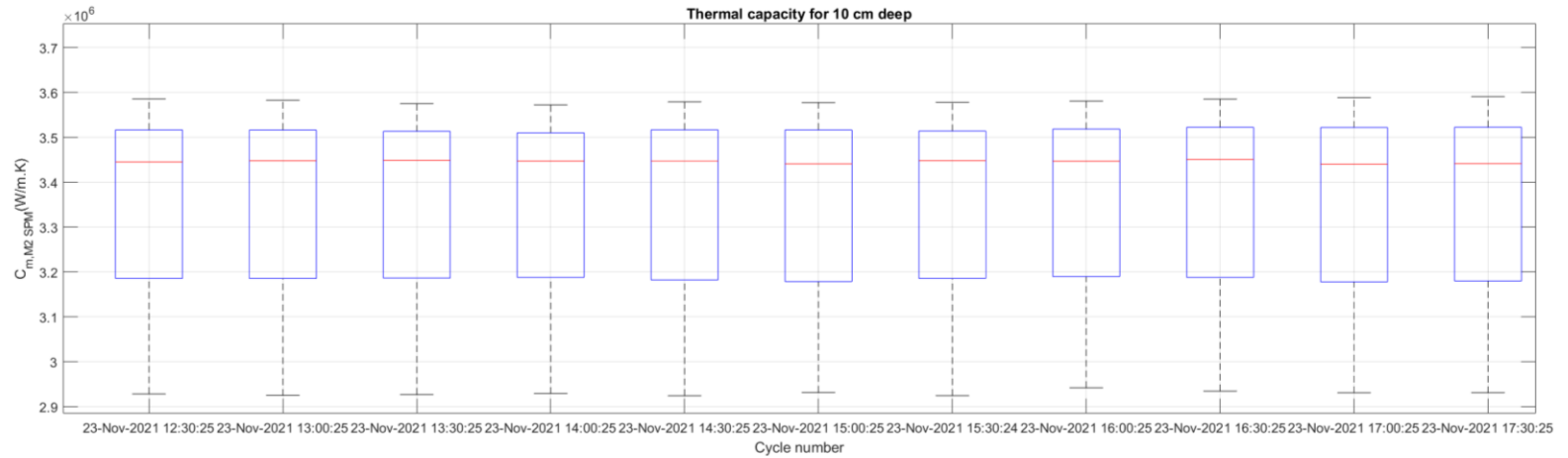
Installation des 12 capteurs dans les fosses B, C, D et E aux profondeurs de 5, 10 et 30 cm



- Croûte de labour (sol très dynamique)
- Installation au 13 novembre 2021, après le semis du blé.
- Actuellement, encore 9 -10 capteurs en fonctionnement
- Sondes C5 et D5 ont été rongés par des animaux.



Résultats sur le site



Conclusions et perspectives

□ Dans cette phase de pré-expérimentation, on a constaté :

- Un contenu en eau du sol plus élevé affecte davantage la qualité des données (bruit basse fréquence)
- La méthode SPM est plus sensible à la qualité des données
- La méthode de résolution NMF (non linear model fit) est très sensible aux valeurs initiales pour l'optimisation.
- La dispersion est deux fois plus importante pour la méthode SPM mais le temps de calcul est substantiellement plus long avec la méthode d'optimisation NMF.

⇒ Finalement on retient le model intermédiaire CLHS avec la méthode de calcul SPM

□ Impact des précipitations, du contenu en eau du sol, de la température sur les paramètres thermiques du sol

- Comparaison des termes de stockage « modélisé » et mesuré
- Estimation de G à partir des profils de température du sol et des paramètres thermiques du sol.