

Imagerie thermique et changement d'échelle sur la Bassée

Développements méthodologiques

F. Rejiba, E. Léger, A. Ayari, S. Aubier, A. Rivière, C. Fauchard, N. Flipo, C. Finco, C. Schamper, R. Antoine, R. Levailant

M2C, GEOPS, CEREMA, Mines Paristech, METIS

Stages de M2 (GEOPS/M2C) - Sophie Aubier et Alexandre Ayari

Contexte

A l'échelle régionale, la variation de température du sol et du sous-sol est un marqueur très pertinent pour le suivi des ressources en eaux mais aussi de l'impact du changement climatique.

Le développement des grands aménagements sur le territoire, dans une mesure qui reste à estimer, doit impacter ces gradients thermiques.

L'interprétation des variations de température permet d'expliquer en grande partie les échanges hydriques le long du continuum sous-sol / sol / atmosphère.

Problématique et démarche

Il est très difficile d'estimer la distribution en profondeur à l'échelle régionale uniquement à partir de mesures aériennes, car les mesures thermiques aériennes ne permettent de caractériser que la surface (sauf à revenir régulièrement au même endroit).

Il est nécessaire de développer un protocole de **calibration/inversion multi-profondeur, et de spatialisation des propriétés thermiques du sol et proche sous sol**

→ Analyse de données thermiques par drone et de sondes au sol, et ce, sur **une parcelle test** de 2 hectares de la plaine alluviale de La Bassée.

Deux travaux en //:

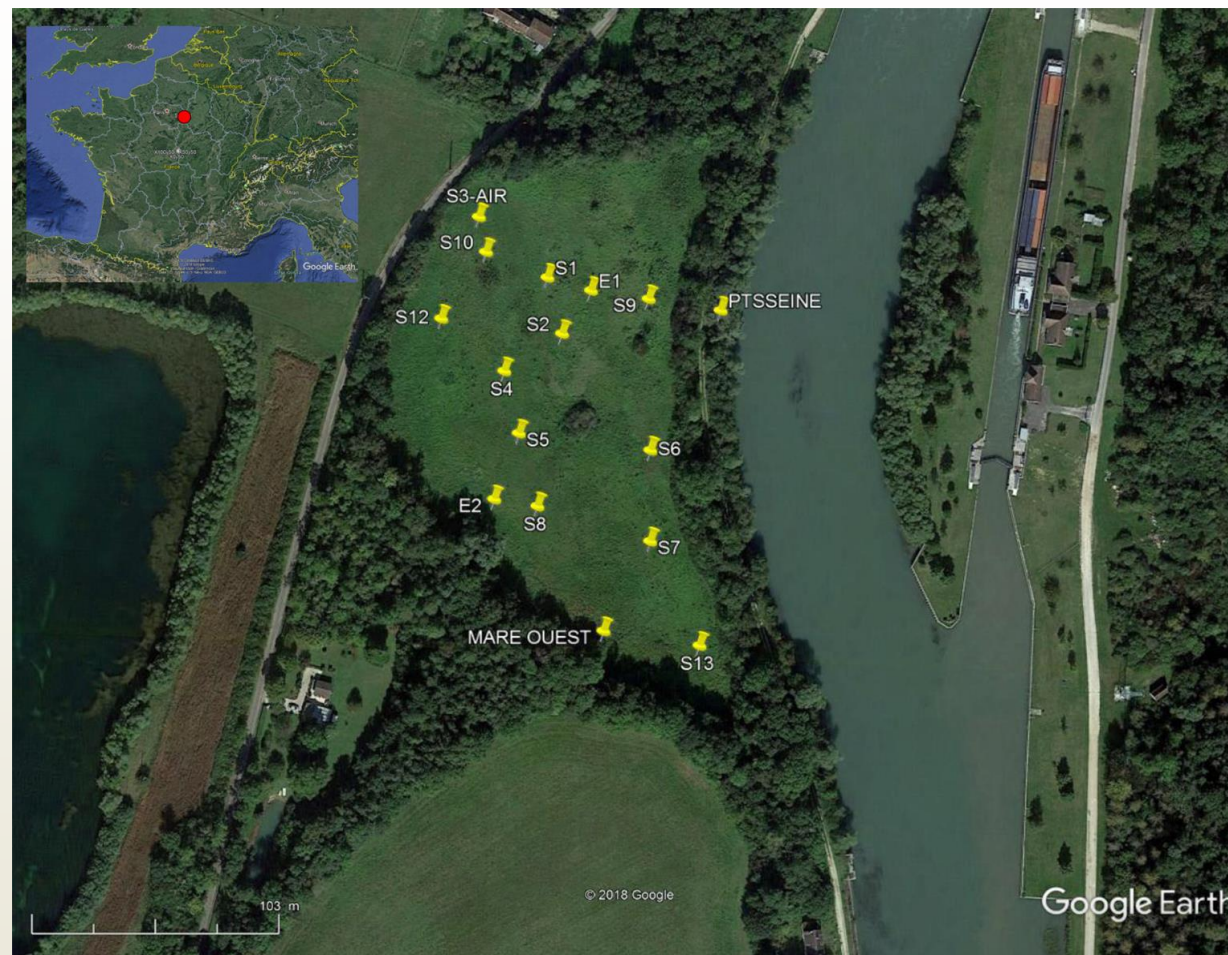
- 1- La détermination de propriétés thermiques du sol à partir de suivis de températures multi profondeurs.
- 2- La spatialisation des températures du proche sous sol sous contrainte des températures mesurées par drone.

L'idée étant, à terme, de fiabiliser l'estimation des flux hydriques à partir des flux de chaleur.

1ème étape: où mesurer les températures du sous sol ?

Identification des zones "homogènes" pour les mesures de températures au sol.

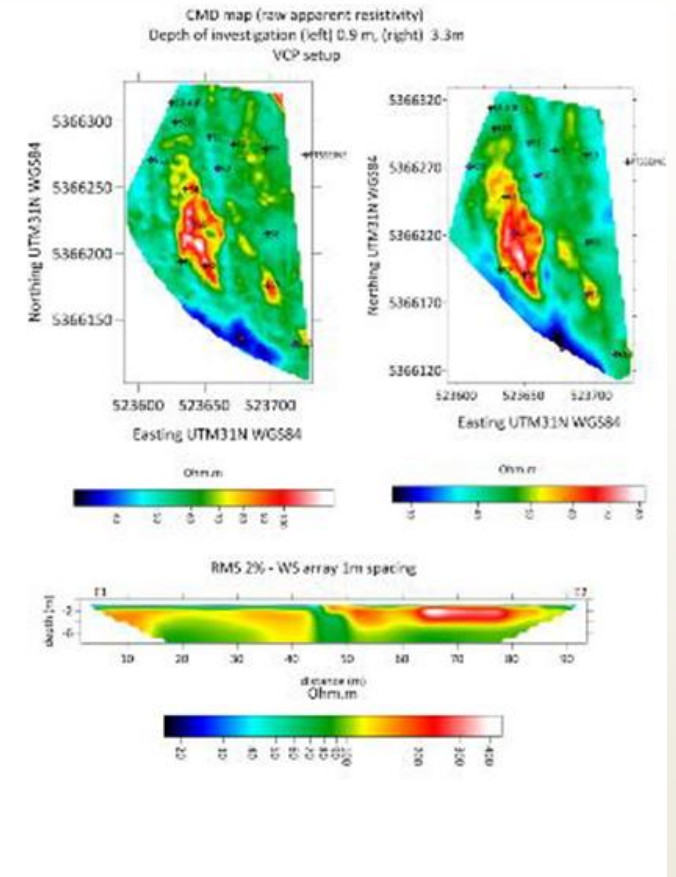
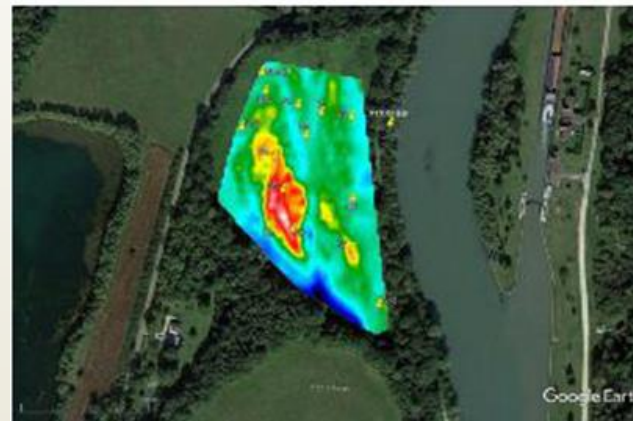
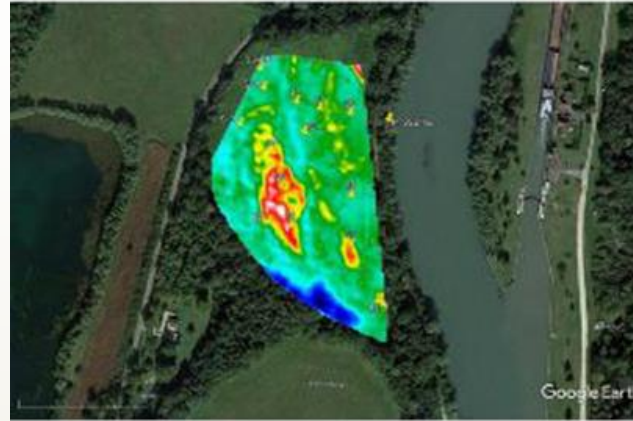
Reconnaissance géophysique du sous sol à l'aide des méthodes électriques et électromagnétiques.



1ère étape: où mesurer les températures du sous sol ?

Identification des zones "homogènes" pour les mesures de températures au sol.

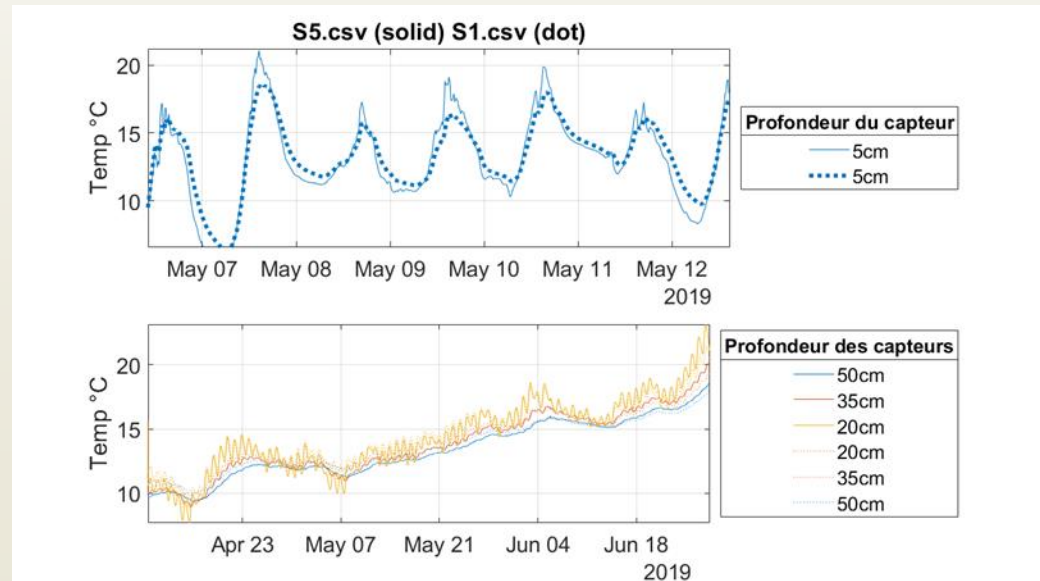
Reconnaissance géophysique du sous sol à l'aide des méthodes électriques et électromagnétiques.



2ème étape: comment mesurer les températures du sous sol ?

A l'aide d'un dispositif de mesures de température fait maison (sans mesure de succion).

4 sondes PT100 (détecteur de température à résistance, tol $\sim 0,1^{\circ}\text{C}$) à 5, 20, 35 et 50 cm le long d'une tige plastique + boîtier d'acquisition (Hobo).



3ème étape: vers un modèle thermique apparent ou inversé du sol (<50cm)

- ↯ Soit à la volée, en estimant des propriétés apparentes (déphasage, différence d'amplitude)
- ↯ Soit en se donnant un modèle direct 1D, s'appuyant sur l'équation de la chaleur adv+conduc & l'eq. du bilan massique pour la pression de pores: avec GINETTE (Rivière et al. 2019)

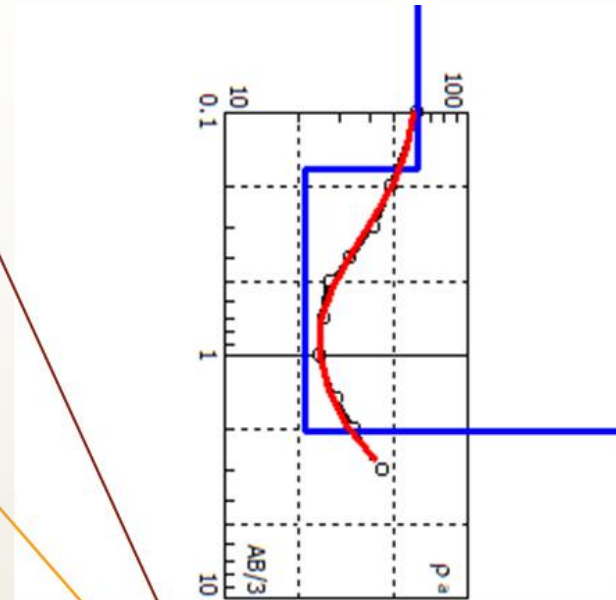
Les paramètres : la chaleur spécifique, la conductivité thermique, l'épaisseur des horizons, la perméabilité intrinsèque, la densité. Tout cela dépend naturellement de la structure géométrique du milieu poreux, du contenu hydrique et de la minéralogie.

Les quelques sondages à la tarière et l'imagerie géophysique à l'échelle de la parcelle suggèrent qu'une structure deux-terrains est raisonnable pour commencer (mais des modèles plus complexes sont naturellement testés)

Un exemple au niveau du point S2

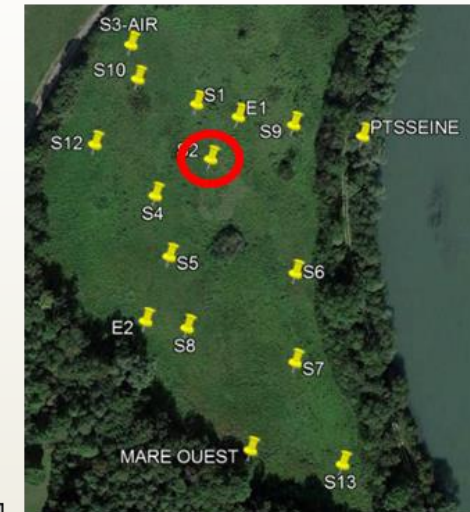
S2	Profil	Profondeur	Horizon	Descriptif
		0 - 6 cm	A	Horizon organo-minéral limoneux enrichi en matière organique, à forte porosité. Couleur brunâtre. Absence d'éléments grossiers.
		6 - 13 cm	S	Horizon limoneux argileux avec une accumulation de matière organique (liserés et taches noirs). Couleur marron foncée.
		13 - 85 cm	Go	Horizon rédoxique argileux avec présence de tâches rouilles de fer oxydé (engorgement temporaire). Couleur marron clair.
		85 - 100 cm	Gr	Horizon réductique de « gley » argileux saturé en eau. Couleur bleue-grisâtre. Absence d'éléments.
		100 - 132 cm	Gr	Horizon réductique de « gley » argileux saturé en eau. Couleur bleue-grisâtre. Quelques éléments coquillés supposés ?
		132 cm	c	Présence de la roche mère calcaire traduit par une résistance importante et la présence de résidu calcaire lors du sondage

Description pédologique



N	p	h	d	Alt
1	47.5	0.229	0.229	-0.229
2	19.5	1.15	1.38	-1.379
3	139			

Sondage électrique au niveau du S2



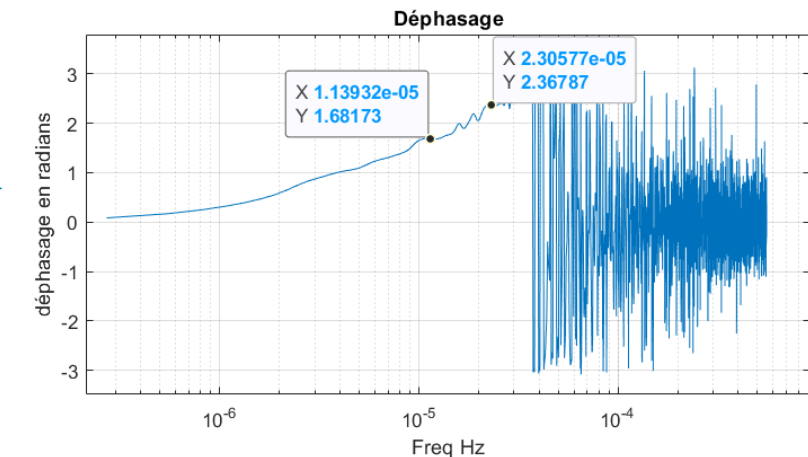
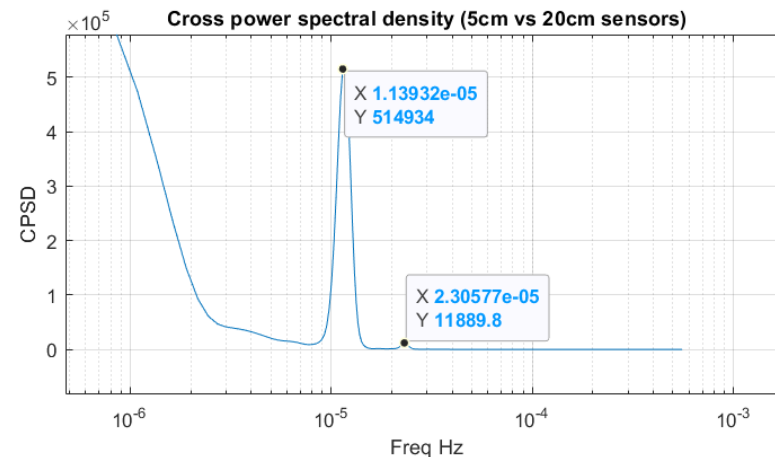
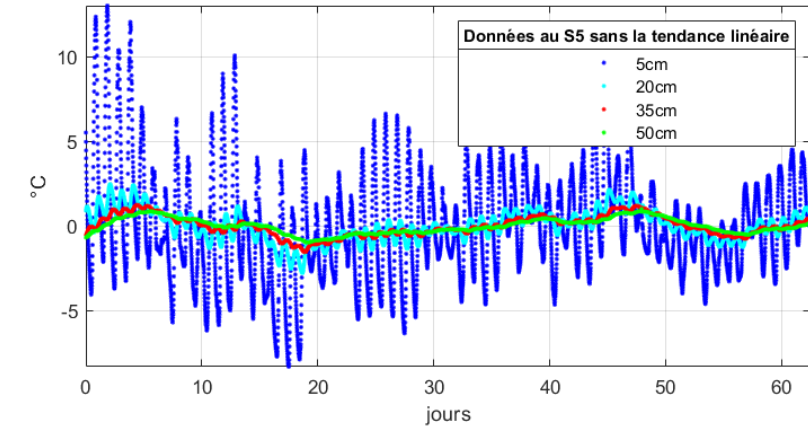
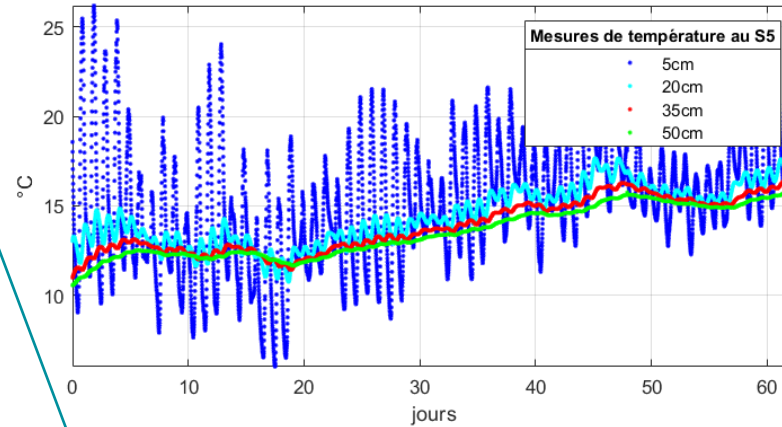
La nappe n'a pas été observée sur les sondages à la tarière (< 1.3m). Niveau saturé au point Mare ouest (à 65cm).

Analyse exploratoire des séries de températures #1

- Retard estimé à 7h entre les mesures à 5 cm et 20 cm par mesure du déphasage entre les séries temporelles.

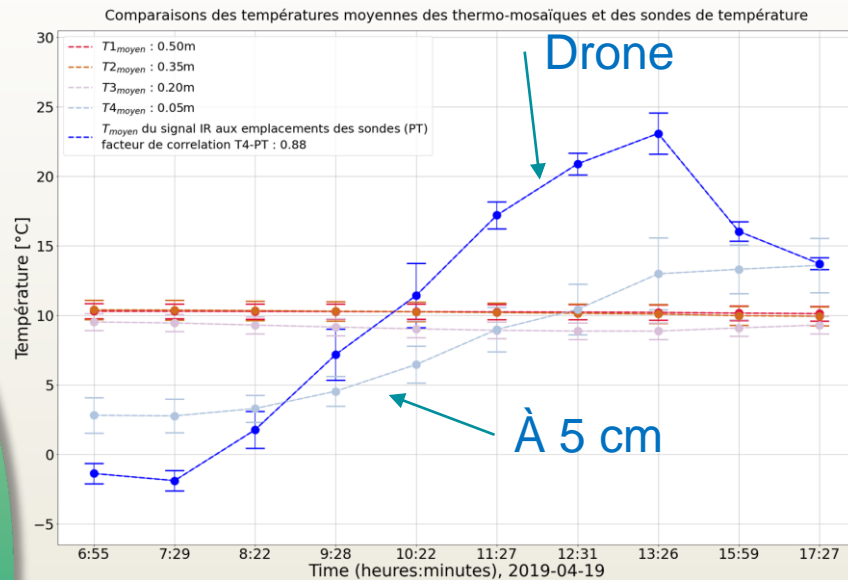
➤ *La différence de phase et/ou le rapport d'amplitude permet de remonter à la diffusivité apparente du milieu (Tabbagh et al, 1999).*

→ mais comme on a un deux-terrains au minimum...la propriété apparente n'est pas très représentative



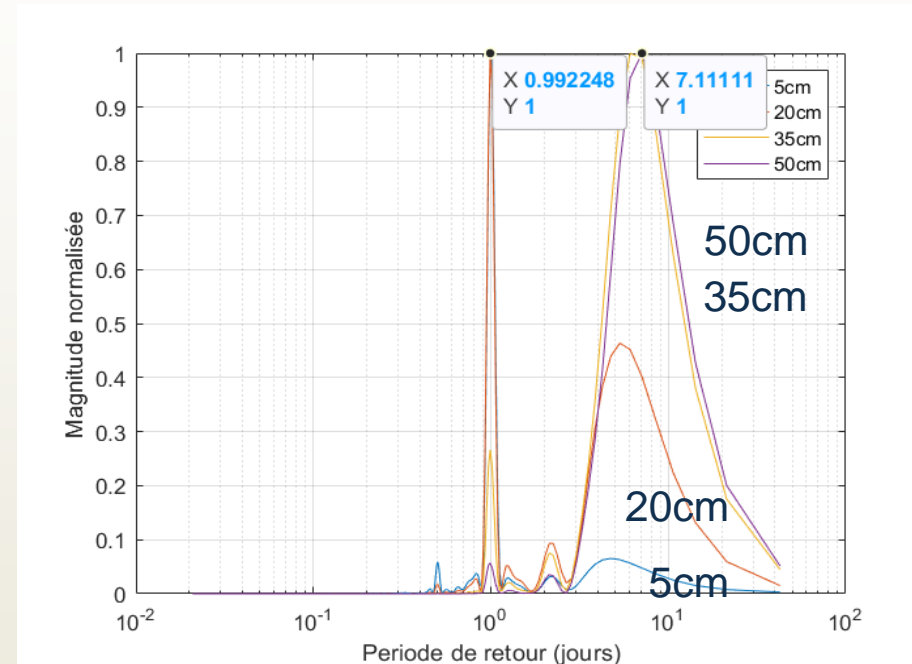
Analyse exploratoire des séries de températures #2

Les températures : drone vs sol



Tendance cohérente des températures drones (1 campagne par heure) et des températures à 5cm sur une demi journée.

Représentation dans le domaine spectrale normalisée pour chaque profondeur

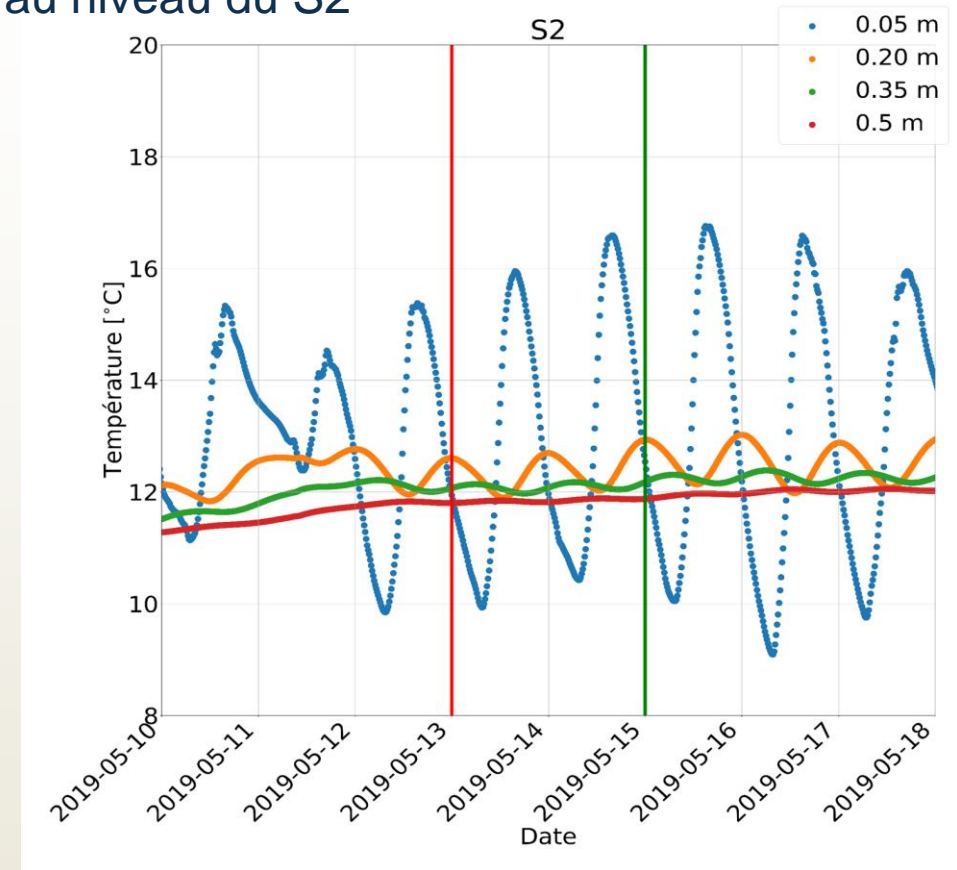


Identification de différents cycles dans les séries de températures: journalier et ses harmoniques...et des choses à 2 jours et entre 4 et 7 jours :) ...attention au biais numérique et à l'activité anthropique...à la durée de la série (~3 mois seulement)

Sélection d'une portion de signal thermique « calme »

- Considérons un modèle lissé (polynôme d'ordre 3)
- Choix d'une période d'observation sans extrême
- Utilisation du programme GINETTE comme modèle direct (1D)

Données au niveau du S2



Exploration systématique de l'espace des paramètres

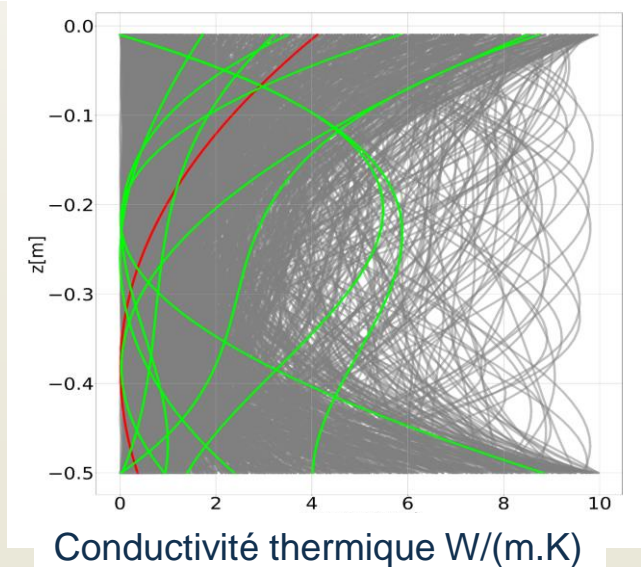
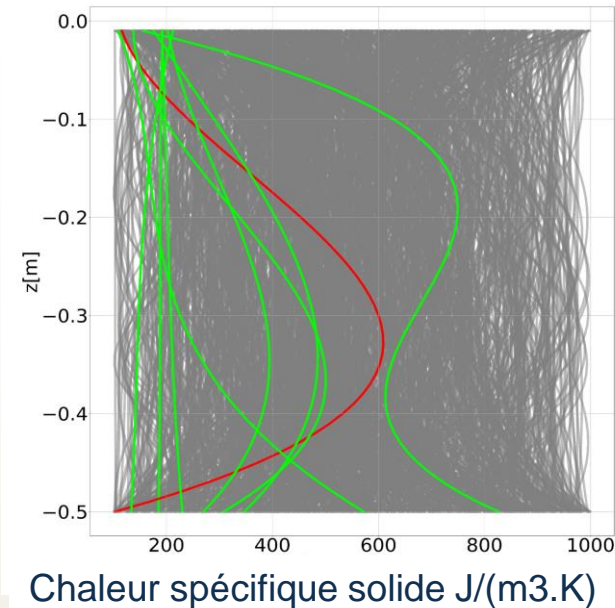
Exploration systématique de l'espace des paramètres CS et CT représentées par un polynôme du 3^{ème} degré, le reste (porosité,...) est estimé et fixé.

- 10^6 modèles
- Rouge : Meilleur
- Verts : +5% de RMSE du meilleur → au moins un deux terrains (cf sdg élec., mais attention à la profondeur)

Préalable à la résolution du problème inverse.
Work in progress

- *Revenir à la seule diffusivité pour l'instant ?*
- *Il faut reconnaître que pour l'instant ce l'estimation des propriétés thermiques est sujette à de nombreuses équivalences.*
- *Les conditions aux limites se discutent également*

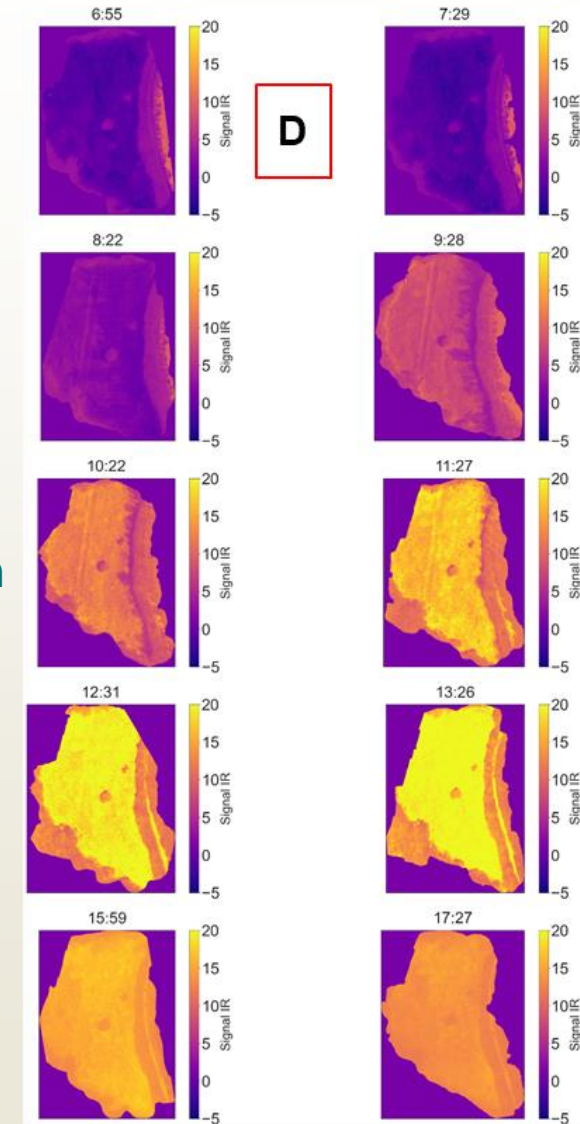
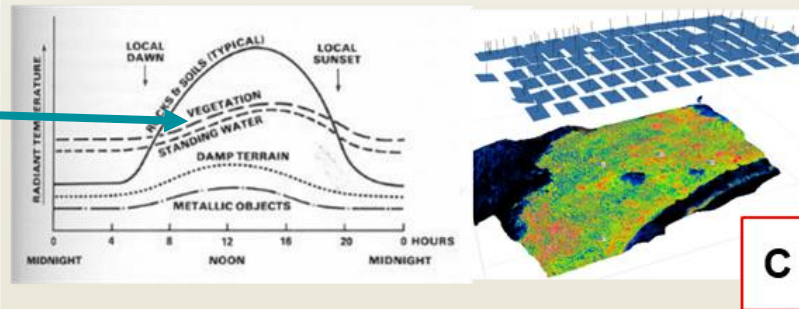
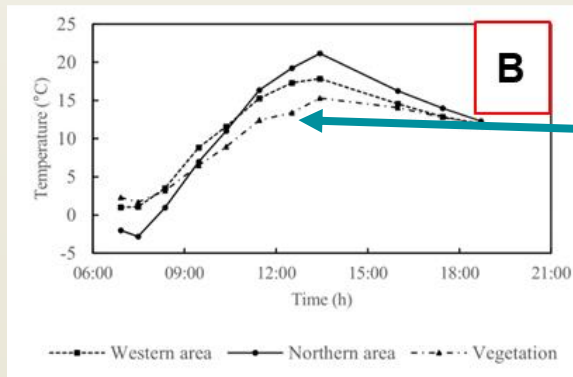
Pour la suite on revient aux températures pour la suite.



4ème étape: La spatialisation de la mesure thermique du sous sol #1

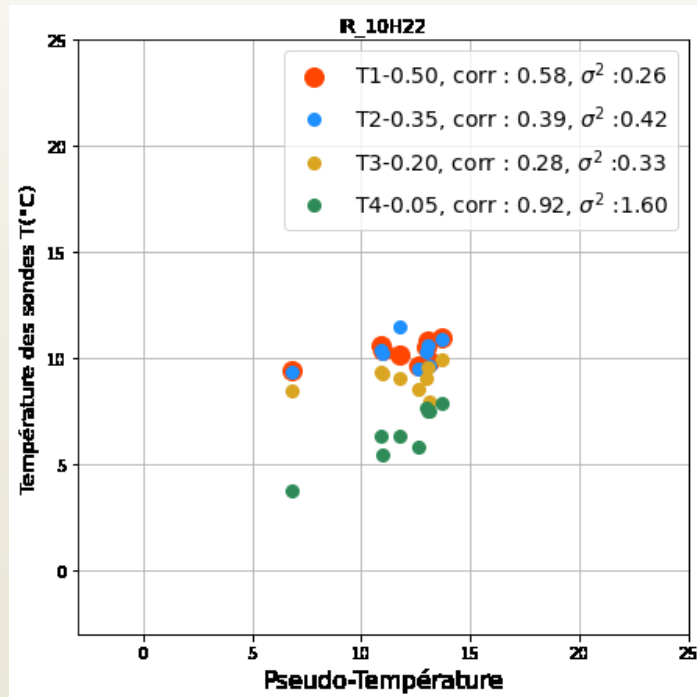


- A) acquisition sur la parcelle test (La Bassée)
- B) Mesures brutes de température et comportement théorique (impact de la végétation)
- C) Photogrammétrie en bonus sur le site, avec pour objectif de déconvoluer les effets de la microtopographie/végétation
- D) Données IR thermique (températures) à différentes heures de la journée



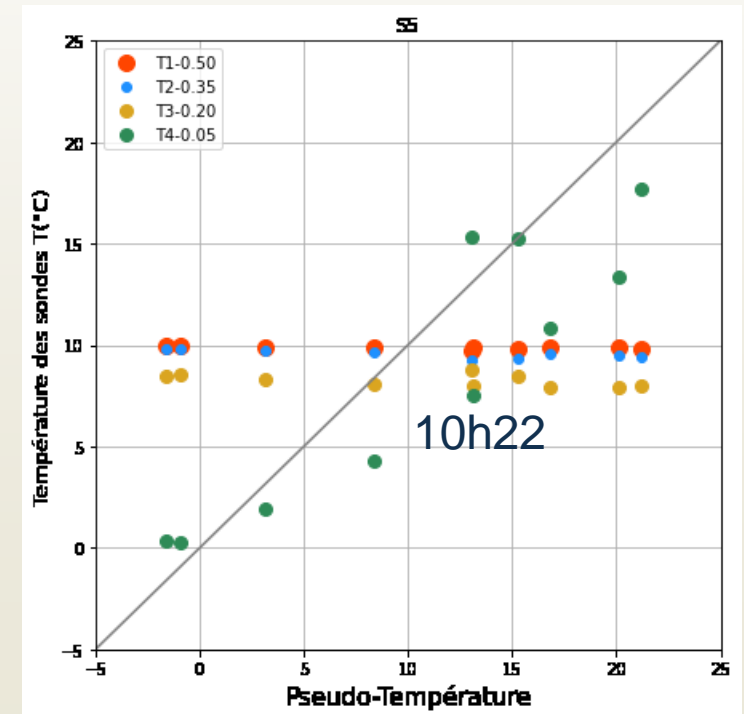
Comparaison des données de températures au sol (5cm de profondeur) et par drone

- ↯ impact de l'inertie thermique entre la mesure au sol et aérienne: surtout très tôt le matin
- ↯ On commence par analyser une heure où l'on a le maximum de corrélation (drone/sol)



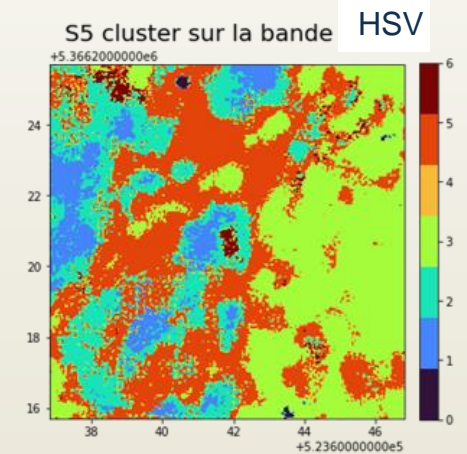
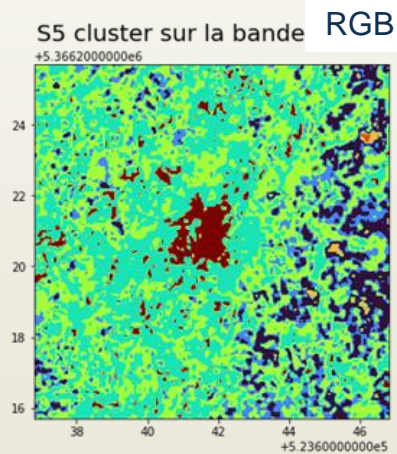
Températures moyennes des sondes vs celle du drone à 10h22

Températures moyennes des sondes vs celle du drone à toutes heures

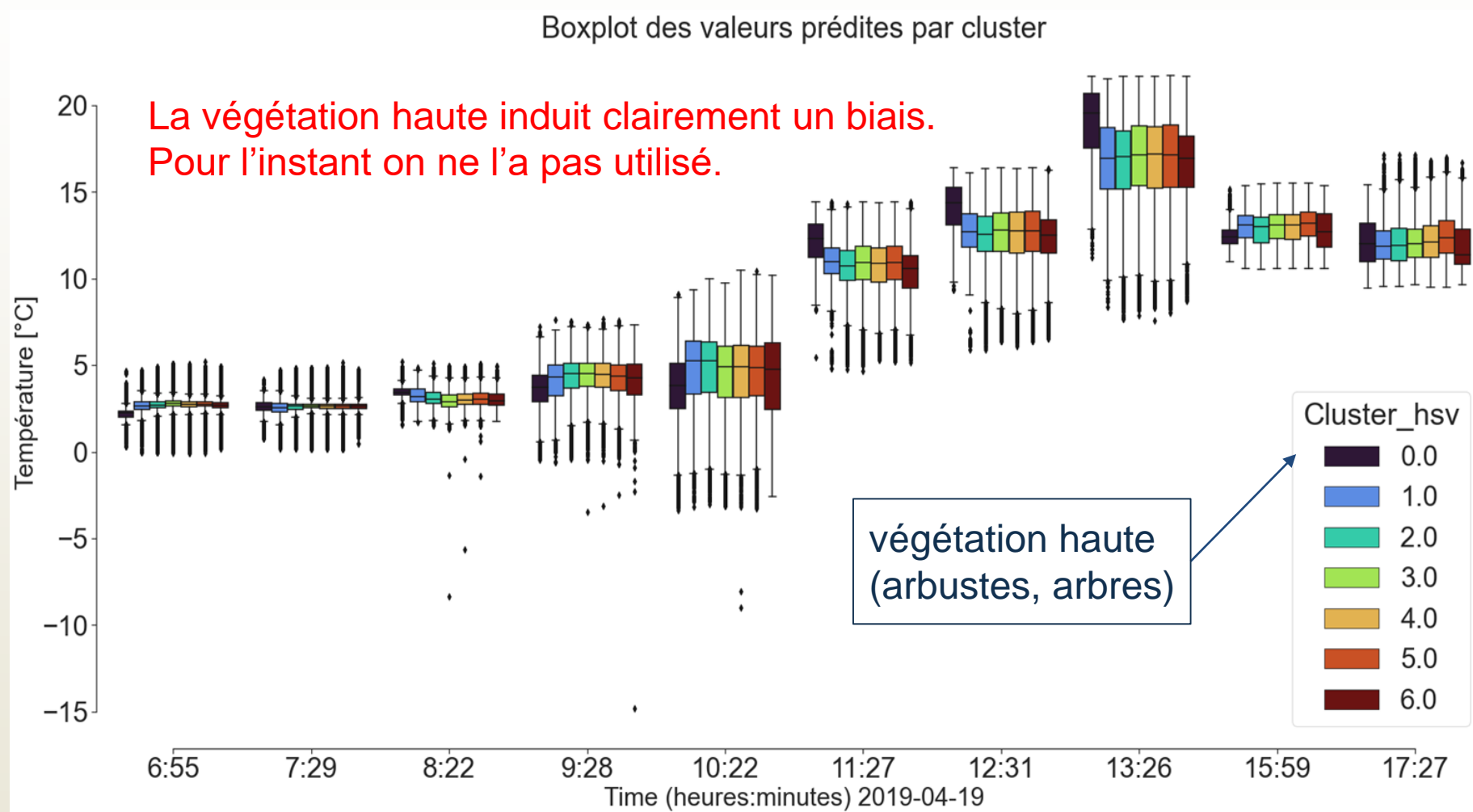


Classification de l'état de surface #1

- Classification non supervisé des couleurs du visible en RGB/HSV → décorréler l'impact d'un couvert différencié, mais pour l'instant sans sens physique immédiat (cela se fait après calibration).
- Même procédure qu'avec la microtopographie, du sol nu... quand il y a en a.



Classification de l'état de surface #2

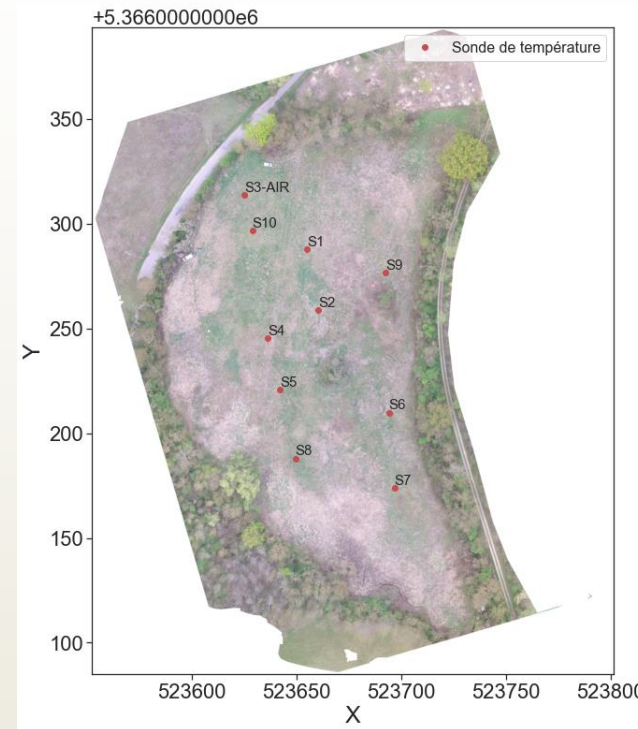


Interpolation des T° à 5cm de profondeur sous contrainte des données drone #1

- ▶ Test du cokrigage intrinsèque colocalisé (ICCK) (<https://geostatisticslessons.com/lessons/collocatedcokriging>, Samson et Deutsch, 2020)

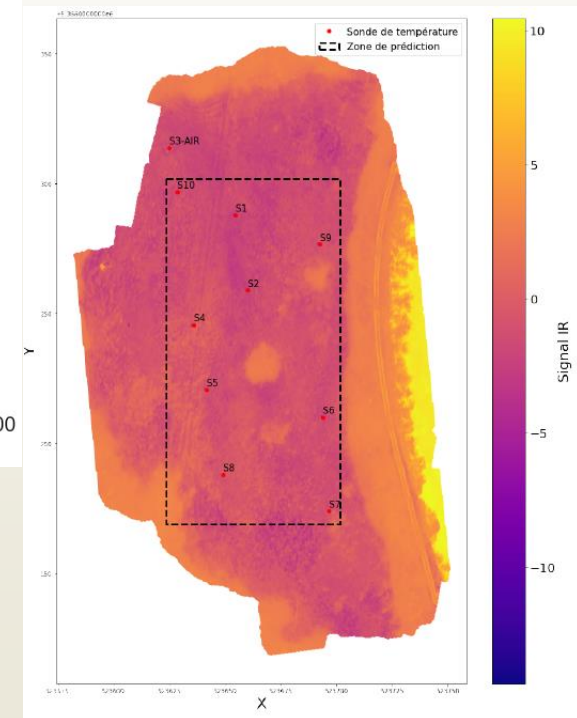
On utilise les données de température du drone uniquement aux points d'estimation et aux points expérimentaux.

- ↯ **variable primaire** : les températures à 5cm dans le sol
- ↯ **variable secondaire**: les températures (les mieux calibrées possibles) fourni par le drone et après avoir vérifier les niveaux de corrélations avec la variable primaire



Visible

Température drone 10h22

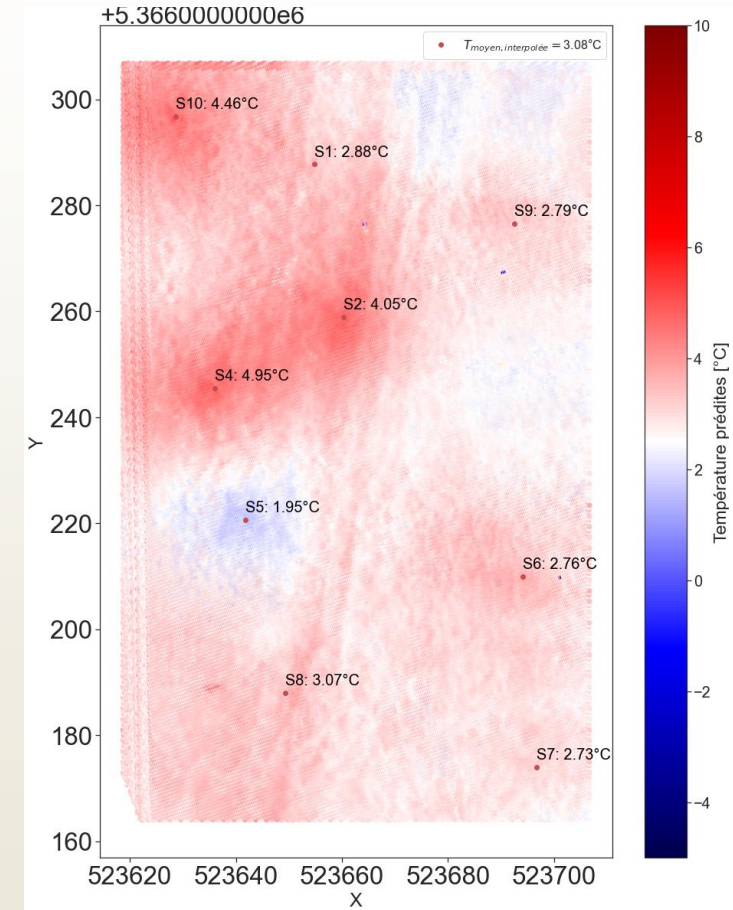


Interpolation des T° à 5cm de profondeur sous contrainte des données drone#1

- ▶ Test du cokrigage intrinsèque colocalisé (ICCK) (<https://geostatisticslessons.com/lessons/collocatedcokriging>, Samson et Deutsch, 2020)

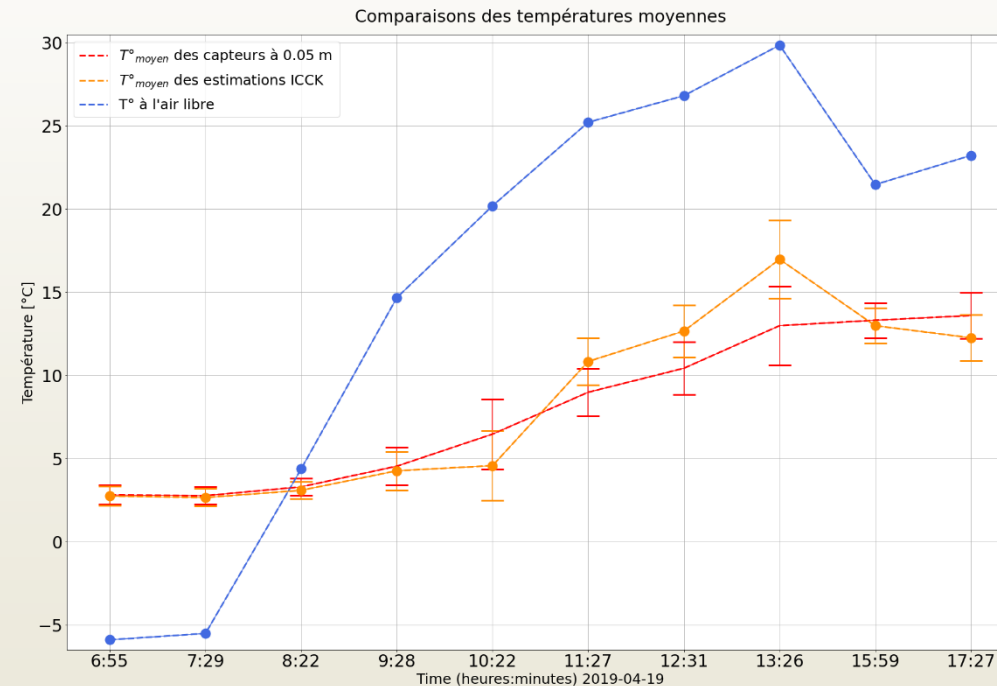
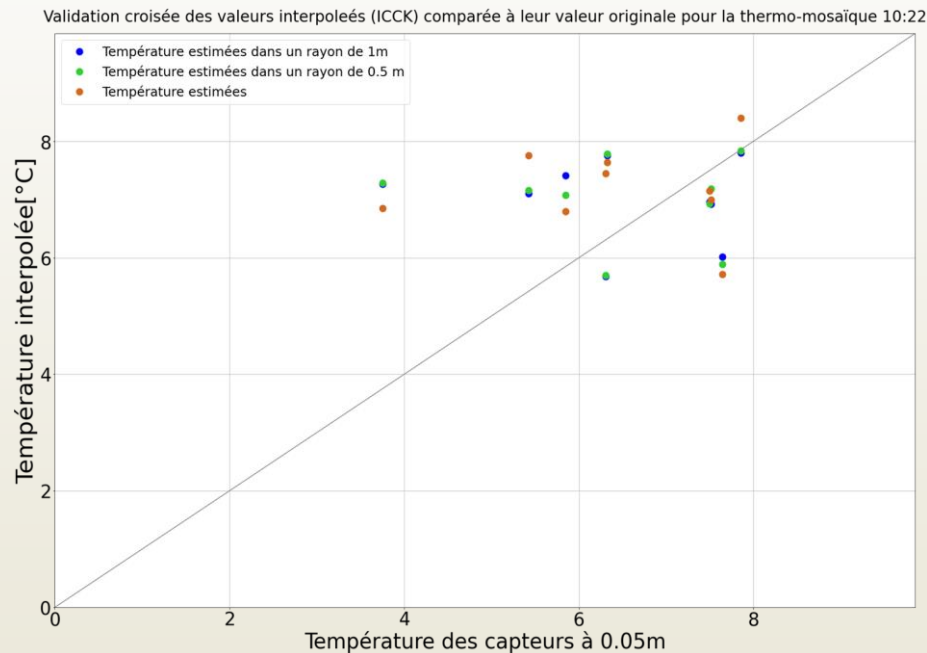
On utilise les données de température du drone uniquement aux points d'estimation et aux points expérimentaux.

- ↻ **variable primaire** : les températures à 5cm dans le sol
- ↻ **variable secondaire**: les températures (les mieux calibrées possibles) fourni par le drone et après avoir vérifier les niveaux de corrélations avec la variable primaire



Interpolation des T° à 5cm de profondeur sous contrainte des données drone#2

- Moyenne des températures interpolées (ICCK) et mesurées à 5cm de profondeur, à 10h22 + une validation croisée (gauche).



La moyenne de la carte interpolée semble représenter assez bien les moyennes des sondes à 5cm (bonne représentativité des zones sélectionnées)

La suite

Inversion

- ↯ Aborder le problème inverse (détermination des propriétés thermiques de la proche surface) parallèlement à l'analyse de sensibilité.
- ↯ Estimer/mesurer ? la succion → **la courbe de rétention d'eau** dans le sol

Spatialisation

- Fiabiliser la classification des données spatialisées du visible (voire hyperspectrale) vis à vis du **couvert végétal** → améliorer le lien “linéaire”, ou pas d’ailleurs, entre les deux températures sol/drone.
- **stochastique par** cokrigeage et/ou “machine learning” (dans le cadre d’un suivi)
- A moyen-long terme, poursuite du changement d’échelle (**aéroporté, et télédétection**)



Merci