

Trajectoire thermique à l'échelle de la plaine de la Bassée. Du suivi de la température au sol au suivi thermique par drone

Fayçal Rejiba¹, Cyrille Fauchard² Raphaël Antoine², Cécile Finco¹, Cyril Schamper³,
Romain Levailan¹, Agnès Rivière⁴, Nicolas Flipo⁴

¹ Université de Rouen Normandie, UMR 6143 M2C

² Cerema, Equipe recherche ENDSUM

³ Sorbonne Université, UMR 7619 METIS

⁴ MINES ParisTech, PSL - Research University, Centre de Géosciences, 77 305

* faycal.rejiba@univ-rouen.fr

Résumé

Le territoire de la plaine alluviale de la Bassée est sujet à de multiples intérêts et à des usages différents : réserve d'eau souterraine, gisement de matériaux alluvionnaires, zone naturelle de grand intérêt écologique, zone récréative, voie navigable, production d'énergie, et implantation d'un casier pilote pour la protection de la Métropole du Grand Paris vis-à-vis des inondations. Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'illustrer l'intérêt du suivi de température par drone sous contrainte de données acquises au sol dans un but de calibration, puis de l'estimation de la diffusivité thermique du sous-sol et d'une vitesse d'infiltration, tout en illustrant très efficacement l'impact de l'évapotranspiration.

Points clefs

- ✓ Mesures infrarouges thermiques par drone
- ✓ Calibration/validation de données thermiques hors sol
- ✓ Estimation des propriétés physiques thermiques spatialisées, impact de l'évapotranspiration

Abstract

The alluvial plain of La Bassée is subject to multiple interests and different uses: groundwater reserve, deposit of alluvial materials, natural area of great ecological interest, recreational area, waterway, energy production, and implementation of a pilot case for the protection of "la Métropole du Grand Paris" against floods. The purpose of this study is to illustrate the interest of temperature monitoring by drone the calibration process associated using data acquired on the ground. We show also how an estimation of several key parameters as the thermal diffusivity and the infiltration velocity can be assessed, while illustrating the impact of evapotranspiration.

Key points

- ✓ Thermal infrared measurements by drone
- ✓ Calibration/validation of above ground thermal data
- ✓ Estimation of spatialized thermal physical properties, impact of evapotranspiration

Introduction

Les plaines alluviales concentrent de forts enjeux de développement urbain, puisque les densités de population les plus fortes se trouvent localisées dans ces secteurs des bassins versants, et que des enjeux socio-écologiques (biodiversité, services écosystémiques, risques) sont particulièrement patents au niveau de cette interface. De plus, un certain nombre d'études pointe l'importance de ces zones dans le fonctionnement écologique des bassins versants, mais elles souffrent actuellement d'un déficit de connaissances, ne serait-ce que pour la quantification des échanges nappe-rivière dans ces secteurs (Flipo et al. 2014).

Une meilleure compréhension de la relation entre les zones urbaines et industrialisées et les fleuves ou rivières autour desquels elles se développent depuis le XIX^{ème} siècle apparaît nécessaire. Cela implique de mieux appréhender le fonctionnement biogéochimique de ces zones et leur métabolisme complexe et très transitoire (notamment en termes de production de gaz à effet de serre), afin d'évaluer leur influence sur les communautés vivantes (micro-organismes, poissons, végétation) et la manière dont les polluants sont transférés en leur sein. L'acquisition de ces connaissances est un défi à relever afin d'améliorer la mise en place des trames vertes et bleues (<http://www.trameverteetbleue.fr/>), qui est au cœur des questionnements de la phase 8 du PIREN-Seine qui mobilise ses compétences historiques sur la plaine alluviale de la Bassée (320 km² situés à 120 km au sud-est de Paris entre la confluence Seine-Aube et la confluence Seine-Yonne).

La plaine alluviale de la Bassée a également fait l'objet de travaux dans le cadre des SDT et ST de la mission SWOT (Jost et al. 2017). Elle continuera à mutualiser les efforts au sein du PIREN-Seine dans la prochaine phase 8 (2020-2023) du programme dans le cadre de l'axe 3 portant sur la « Construction de la qualité des milieux aquatiques conciliant risques hydrologiques et biodiversité ».

La compréhension du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des plaines alluviales requiert une caractérisation des propriétés structurales et hydriques des terrains superficiels incluant l'interface air/sol. Cette caractérisation physique constitue l'élément de contrainte de base vis-à-vis de l'évaluation des flux hydriques à toutes les échelles.

Les hétérogénéités superficielles en contexte de sol nu ou végétalisé sont essentiellement dues au remaniement du remplissage grossier de la période froide (rivière en tresses) par une Seine méandrique au cours de l'Holocène. Les fluctuations climatiques de plus haute fréquence au cours de cette dernière période (quelques milliers d'années) induisent une variabilité hydrologique qui se traduit par des tailles de chenaux variables : certains paléo-chenaux présentent des largeurs de plus de 200 m, d'autres de 25-30 m, par rapport à une Seine actuelle de 50 m de large environ. La dynamique de migration du fleuve engendre l'abandon de boucles de méandres (ou de tronçons) comblés au fil des crues par du matériel fin (argile, limon, matière organique).

Dans le cas spécifique de La Bassée, plaine alluviale du bassin de la Seine, l'étude exhaustive des fonctionnements passé et actuel repose, entre autres, sur le développement à grande échelle, donc à haut rendement, de l'imagerie des propriétés thermiques (convection mais aussi conduction) de sols nus ou végétalisés. En effet, les échanges thermiques sans couverture végétale sont intrinsèquement liés à la minéralogie et aux conditions hydriques de l'état de surface, alors qu'en présence d'un couvert végétal, la réponse radiométrique IR intègre une réponse intimement liée à l'évapotranspiration.

Parallèlement à l'imagerie radiométrique concernant l'état de surface, il est important de mettre en œuvre, dans un objectif de calibration, des méthodes d'imagerie géophysique permettant de quantifier l'impact sur le signal thermique de la variabilité structurale du sous-sol sur une profondeur d'ordre métrique (Rejiba et al, 2018). En effet, couplée à l'imagerie géophysique au sol de type électromagnétique et électrique, la mesure spatialisée et le suivi de la température à plusieurs profondeurs et à différentes échelles de temps ont déjà permis de caractériser les contributions distinctes provenant des mécanismes de convection et de conduction (Cucchi et al., 2018), qui peuvent très fortement varier au gré des contextes sédimentaires (Rivière et al., 2020), ainsi que la recharge moyenne des aquifères (Tabbagh et al. 2017), les flux d'eau ayant une influence non-négligeable sur la température du sol traversé. En présence d'un écoulement, la diffusivité apparente peut être déduite de l'amortissement de l'amplitude et/ou du déphasage de la température entre deux profondeurs différentes.

Cette étude illustre une ébauche de traitement destiné à l'analyse de données thermiques obtenues par drone comparées à des mesures thermiques au sol à plusieurs profondeurs, afin 1) d'estimer la diffusivité thermique du sol sur la parcelle étudiée, mais aussi 2), d'appréhender quantitativement et de manière indirecte l'impact de l'évapotranspiration.

1. Présentation de la zone d'étude

Dans cette étude, la parcelle est située à quelques mètres de l'écluse du Vezoult, à Noyen-sur-Seine (77), située au cœur de la plaine alluviale de la Bassée. Elle repose sur un socle de craie blanche du Campanien, âgé de 54 millions d'années, altéré par la Seine et ses affluents au début de l'ère quaternaire et recouvert par deux couches alluvionnaires (anciennes et récentes). L'analyse pédologique des sondages décrite dans le rapport PIREN de 2019 (Rejiba et al., 2019) montre des sols en général hydromorphes de type rédoxique (cf la description pédologique du sondage S5 en Figure 6).

Deux campagnes de mesures thermiques en avril et juin 2019 ont été effectuées par drone. Entre avril et juin 2019, les mesures de températures au sol réparties sur l'ensemble de la parcelle ont été faites à un pas de temps de 15 min. La température locale observée dépend des conditions climatiques et sa variation en profondeur est essentiellement dépendante de la variabilité structurale du sous-sol et de son état hydrique.

L'inférence des propriétés thermiques du sous-sol s'appuie sur la conception d'un modèle thermique qui puisse être concordant avec les observations directes et les températures mesurées à différentes profondeurs. C'est à partir de ce modèle que les températures obtenues par drone peuvent être calibrées ponctuellement, puis dans un deuxième temps sur l'ensemble de la couverture « drone ».

Dans ce contexte, la prise en compte de la végétation sur la température « drone » constitue un défi que seules des données complémentaires s'appuyant sur des modèles conceptuels, stochastiques ou pseudo-déterministes, pourront aider à relever.

Des mesures de température à plusieurs profondeurs ont été effectuées ponctuellement sur la parcelle (Figure 1). Chaque sonde de température contient 4 capteurs, situés à 5 cm, 20 cm, 35 cm et 50 cm de profondeur. La valeur de température enregistrée à 5 cm de la surface est celle utilisée pour une première approche comparative avec les mesures thermiques par drone.



Figure 1. Plan de position des dispositifs de calibration multi-profondeurs de température et des sondages électriques (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S12), des forages à la tarière (S1, S2, S5, MARE OUEST) et de la mesure de la température de la Seine (PTSEINE); E1 et E2 indique respectivement le début et la fin de la tomographie résistivité électrique de références. A gauche, photo du drone durant l'acquisition.

Pour les phases 1 et 2 des 14 avril et 25-26 juin 2019, respectivement 11 et 14 vols thermiques ont été réalisés au-dessus de la zone. Chaque vol permet d'obtenir des orthophotos ayant une résolution de 4,3 et 5,7 cm, respectivement dans le visible et dans le spectre infrarouge thermique. Un exemple d'orthophotos thermiques est représenté sur la Figure 2. Ces relevés proviennent du vol thermique de la phase 1 à 10 h 22 et du vol thermique de la phase 2 à 10 h 00. Sur ces clichés, la zone rouge située à l'extrémité ouest de la Figure 2 a), et la zone jaune à l'extrémité ouest de la Figure 2 b) correspondent à l'eau de la Seine. La température relevée (pointée dans la zone rouge ou jaune sur plus de dix points) par drone est de 8,5 à 10,2 °C en phase 1

et de 24 à 27,6 °C en phase 2, alors que la sonde de température correspondante immergée dans la Seine (sonde PTSEINE de la Figure 1) indique 10,1°C et 23,8°C, respectivement. La nécessité d'une calibration entre les deux techniques de mesure apparaît clairement sur ce simple exemple.

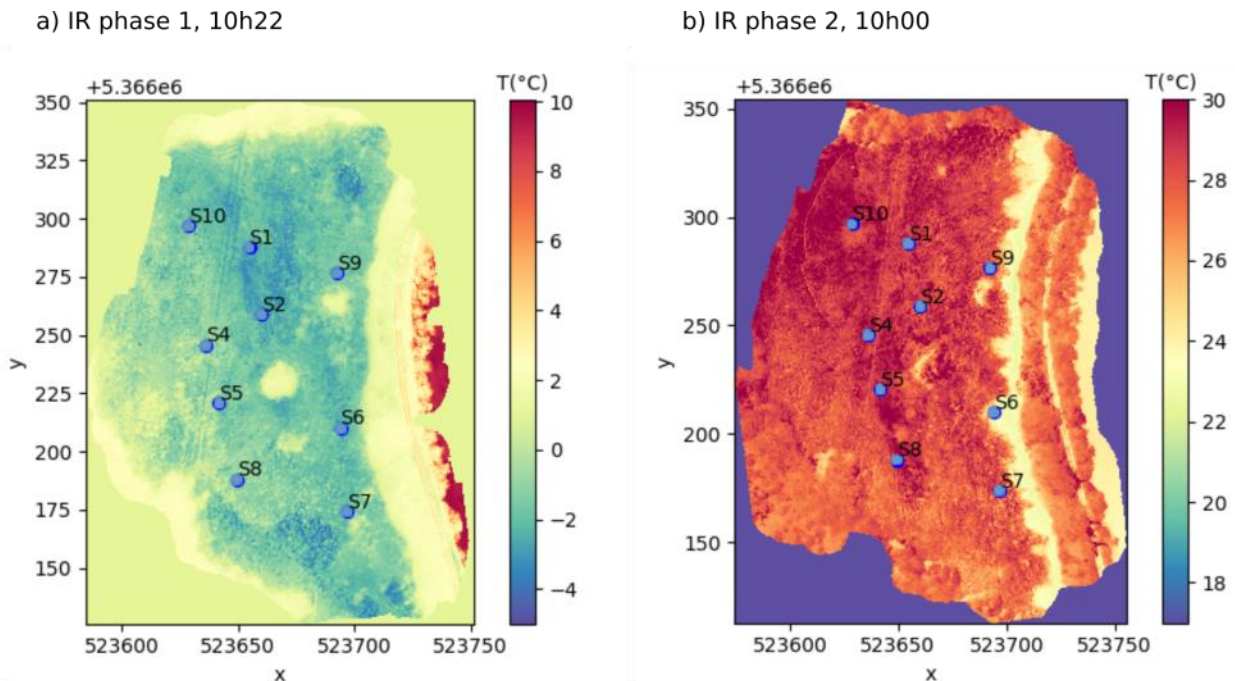


Figure 2. Orthophotos infrarouges thermiques a) de la phase 1 à 10h22 et b) de la phase 2 à 10h00. Pour plus de lisibilité, les échelles de température sont différentes.

2. Protocole de traitement des données

Si l'on souhaite relier les températures relevées par drone aux températures relevées par sondes ponctuelles, une première approche consiste à prélever sur les orthophotos thermiques, autour de chaque sonde, les températures de surface les plus proches des sondes ponctuelles. Pour localiser ces sondes ponctuelles, nous disposons des coordonnées GPS de cibles au sol (Ground Control Points) posées exactement au pied des sondes de température. Nous pouvons par ailleurs identifier facilement ces sondes sur les orthophotos thermiques : elles sont composées soit de polyéthylène blanc, soit d'aluminium. Les réponses thermiques de ces cibles sont extrêmes, en particulier pour les cibles en aluminium dont les valeurs atteignent sur certains clichés moins de -30°C.

Il convient donc de choisir des zones autour de ces cibles suffisamment éloignées. Pour cela, nous avons choisi de définir des polygones autour de chaque cible, de forme carrée, de côté variable, ici fixé à 60 cm. Ainsi, 9 polygones sont définis autour de chaque cible, et ce pour chacune des 9 cibles/sondes ponctuelles. Un exemple explicitant la démarche est donné sur la Figure 3.

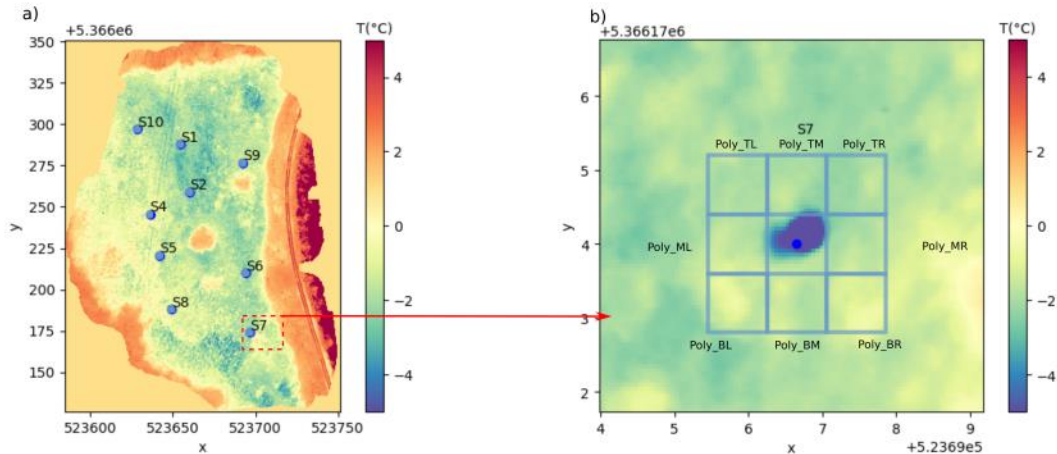


Figure 3. a) Exemple d'orthophoto thermique, phase 1, vol de 7h29. b) Zoom autour de la sonde/cible S7 et construction des 8 polygones autour de la cible. C'est au sein de chacun de ces polygones que les températures moyennes sont calculées puis pourront être comparées dans une première approche aux températures des sondes ponctuelles. On notera que la cible, ici en aluminium, a une température négative inférieure à -30° .

Au sein de chaque polygone, la température est moyennée (typiquement 16×16 températures pour un polygone de 60 cm de côté), comme illustré sur la Figure 4.

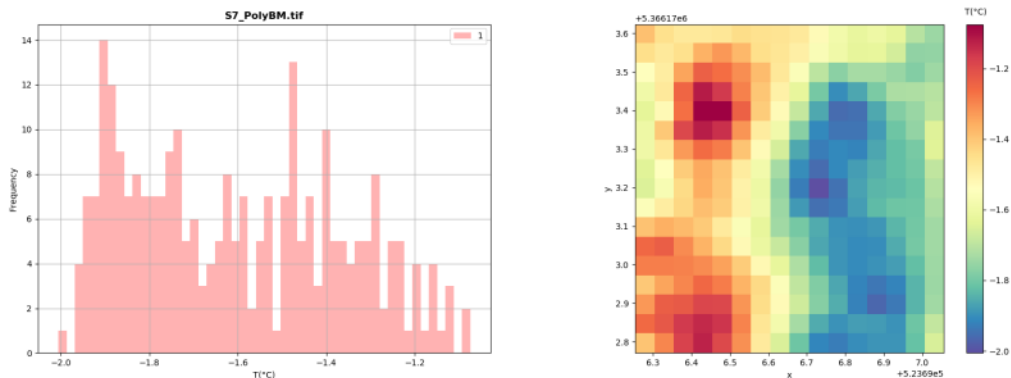


Figure 4. Statistique de la température sur le polygone PolyBM (voir Figure 3, b) autour de la sonde S7. L'échelle des températures été modifiée pour plus de lisibilité.

Ces températures sont ensuite comparées à celles relevées par les sondes ponctuelles avec le capteur situé à 5 cm de profondeur. Les résultats pour un polygone choisi au hasard proche de chaque cible sont montrés sur la Figure 5.

La Figure 5 montre que les variations des températures relevées par drone ou ponctuellement sont en phase. Il n'y a pas de phénomène d'inertie thermique relevé par les deux types de mesures aux échelles de temps considérées (mesure ponctuelle environ toutes les heures pour le drone, mesures toutes les 15 mn pour les dispositifs enterrés). En revanche, l'amplitude des variations au cours du cycle diurne est beaucoup plus forte dans les résultats obtenus par drone. Le capteur embarqué est essentiellement sensible aux températures de surface, végétalisée ou non, alors que le capteur à 5 cm de profondeur est protégé par cette même végétation et par une mince couche de sol qui atténue globalement les températures. Si on fait l'hypothèse que cette mince couche de surface est négligeable (puisque'il n'y pas de phénomène d'inertie observée aux échelles de temps considérées), on peut tracer la différence entre les températures drone et les températures locales (Figure 5, c). On observe que ces différences sont importantes (jusqu'à 10°C au lever du soleil). Cet écart thermique dont les multiples origines (structurelles, biologique...) restent à déterminer modifie grandement les températures « drone » par rapport à celles mesurées au sol.

Ce phénomène se stabilise en cours de la matinée puis s'inverse en milieu de journée. Finalement, la différence entre température enregistrée par drone et au sol tend vers une valeur négligeable aux alentours de

18h. Bien que basée sur les températures d'un seul polygone autour des cibles, comparées aux températures locales à 5 cm, cette observation illustre la nécessité de prendre en compte non seulement la structuration du proche sous-sol mais également la végétation et sa physiologie.

Une stratégie envisagée pour la suite de ces travaux consiste à classifier, de manière supervisée ou non, les réflectances issues des clichés « visibles » et des mesures thermiques, et de les associer à une typologie de végétation, et ce à chaque instant de mesure. Le protocole d'analyse est actuellement en cours d'élaboration.



Figure 5. a) Températures moyennes recueillies à +/- 30 cm des sondes au sein d'un polygone de 60 cm de côté contenant 16*16 pixels. b) Température des sondes ponctuelles recueillies au premier capteur à 5 cm de profondeur. c) Moyenne et écarts-types des différences entre la température de surface relevée par drone et la température à 5 cm de profondeur relevée par sonde ponctuelle, présentées dans les figures a) et b) pour chacune des 11 heures de vol en drone.

3. Détermination de paramètres physiques du sol à partir de mesures de températures en profondeur

Parallèlement à la calibration des données thermique par drone, il est important d'exploiter les séries de températures au sol multi-profondeurs pour inférer les propriétés thermiques et hydriques du terrain superficiel (sur les 50 cm qui sont instrumentés). L'objectif est de permettre ce passage à l'échelle des propriétés du sous-sol à partir des températures drones.

3.1 Estimation de la diffusivité thermique

Une première étude des séries temporelles de température consiste à analyser les déphasages respectifs, mesurés entre les différentes profondeurs de capteur. Ce déphasage permet de quantifier la diffusivité thermique du milieu. La diffusivité thermique du milieu étudié peut être approximée selon la relation suivante (Turcotte et Schubert, 2002):

$$\kappa = \frac{D^2}{4t} \quad (1)$$

avec :

κ (m²/s) la diffusivité thermique de la subsurface

D (m) la distance entre les 2 capteurs

t(s) le temps que met l'onde de chaleur à parcourir la distance entre les deux capteurs.

Au niveau du sondage S5, caractérisé par très forte proportion d'argile (Figure 7), le calcul du retard entre les capteurs de température à 5 et 20cm pour la fréquence journalière (Figure 7C) est de l'ordre de 25 000 (la phase à la fréquence « journalière » $X=1.08e^{-5}$ Hz, sur le graphique Figure 7D est égale à 1.69 rad, soit un retard de $1.69/(X*2*\pi)=24900$ s).

L'estimation de ce déphasage entre les deux signaux à 5cm et 20cm est effectuée dans le domaine spectral (Figure 7A) après avoir retiré une tendance d'ordre quadratique correspondant aux variations « saisonnières » (Figure 7B). Ce retard entre les signaux à 5cm et 20cm, pour la fréquence journalière, permet d'estimer une diffusivité thermique de l'ordre de 2.10^{-7} m²/s grâce à l'équation (1)

La diffusivité thermique de la subsurface est liée à la conductivité thermique effective du sol k_s par la formule suivante (Turcotte and Shubert, 2002) :

$$\kappa = \frac{k_s}{\rho c_p} \quad (2)$$

avec :

ρ (kg.m⁻³) la masse volumique du milieu poreux

c_p (J.kg⁻¹.K⁻¹) la capacité calorifique massique du milieu poreux.

En considérant une masse volumique d'un limon argileux autour de 2000kg.m⁻³ et une capacité calorifique massique typique d'un sol de 1000 J kg⁻¹.K⁻¹, l'équation (2) permet d'estimer une conductivité thermique de 0,4 W.m⁻¹.K⁻¹ pour la tranche de terrain comprise entre 5cm et 20cm, ce qui semble être dans la fourchette basse pour un terrain très argileux (Abu-Hamedh and Reeder, 2000) et reste cohérent avec la description pédologique du sondage S5 (Figure 6).

A titre de comparaison, en exploitant la formule de milieu équivalent, proposée par Rivière et al. (2020), ces valeurs, en faisant l'hypothèse d'un milieu insaturé, indiquent une conductivité thermique des grains de 0,8 W.m⁻¹.K⁻¹, validant la présence d'argile dans le sol en proportion non négligeable, tout en illustrant la variabilité des estimation entre différents modèles d'homogénéisation.

Enfin, la porosité de sol ϕ peut être approximée suivant la relation suivante (Kurita et al., 2007) :

$$\phi = \frac{\ln(k_e) - \ln(k_s)}{\ln(k_a) - \ln(k_s)} \quad (3)$$

avec :

k_s , la conductivité thermique du milieu poreux (1,5 W.m⁻¹.K⁻¹)

k_a la conductivité thermique de l'air ($0,02 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

L'équation (3) permet d'estimer une porosité du sol d'environ 0,3, valeur cohérente pour un sol argilo-limoneux, la conductivité thermique étant par ailleurs également dépendante de la teneur en eau.


S5	Profil	Profondeur	Horizon	Descriptif
		0 - 18 cm	A	Horizon organo-minéral limoneux enrichi en matière organique, à forte porosité. Couleur brunâtre. Absence d'éléments grossiers.
		18 - 27 cm	Aca	Horizon de transition limoneux argileux avec la présence de divers éléments grossiers (anciennes trace de crue). Couleur marron-brunâtre.
		27 - 60 cm	Sca	Horizon argileux limoneux avec présence d'éléments fins (coquillés ?). Couleur Marron clair.
		60 - 72 cm	Sca / C	Horizon argileux sableux avec présence d'éléments grossiers.
		72 - 82 cm	C	Horizon sableux avec présence d'éléments grossiers, mélangés avec de fins morceaux de calcaire (roche mère ?)

Figure 6 : Description pédologique du sondage S5.

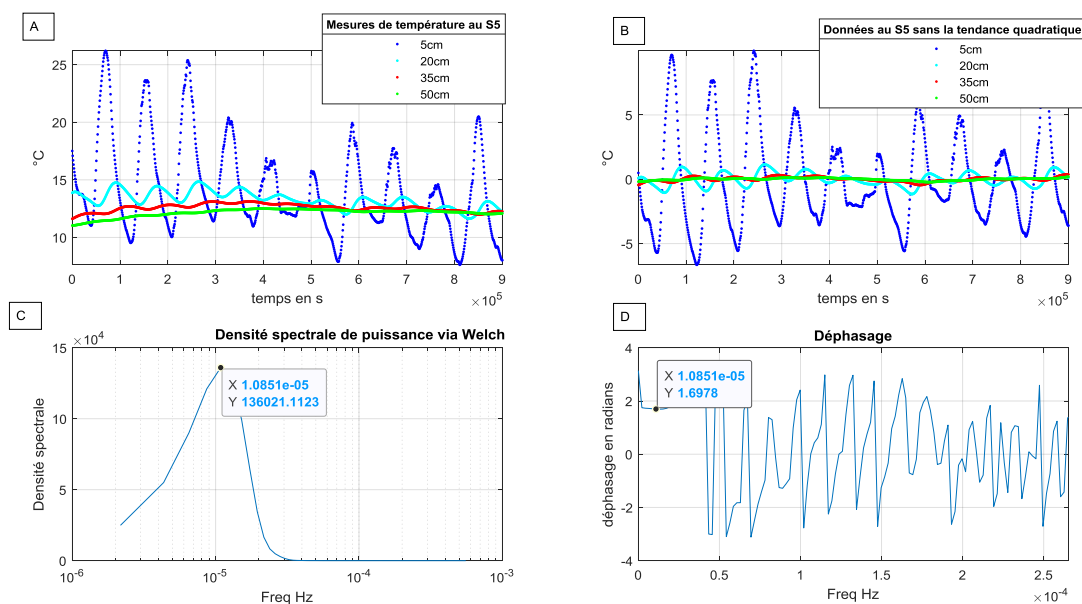


Figure 7. Déphasage entre le capteur localisé à 5 cm et celui à 20 cm pour la sonde S5.
 A) Séries temporelles au niveau du S5 pendant une dizaine de jours. B) Données correspondant à A) dont une tendance quadratique a été retiré. C) Densité spectrale de puissance (méthode de Welch) illustrant la position de la fréquence (période) journalière contenu entre les signaux à 5cm et 20cm de profondeur. D) Déphasage correspondant au graphe présenté en C).

3.2 Estimation de la vitesse de Darcy dans le sol suite à un évènement pluvieux

Nous nous sommes ici intéressés à l'identification des évènements pluvieux et à la vitesse d'infiltration. Pour vérifier le comportement thermique vis-à-vis d'un extrême pluviométrique, nous avons obtenu les séries pluviométriques de stations météorologiques se situant à 40-50 km autour du site d'étude (<https://www.infoclimat.fr>) (Figure 8). Nous avons alors sélectionné la période du 4 au 14 juin 2019 comme étant un évènement pluvieux commun à l'échelle de cette région, et donc, par conséquent, au site d'étude de la Bassée. Figure 8

La Figure 9 présente l'évolution de la température enregistrée par les 4 capteurs de la sonde S6 durant le mois de juin 2019. L'amplitude de la température en période de pluie est inférieure de plusieurs degrés à la température observée sans pluie. De plus, le graphique montre l'apparition d'un signal journalier à différentes profondeurs.

Malgré une faible amplitude (moins de $0,5^{\circ}\text{C}$), ce signal apparaît à toutes les profondeurs et pour plusieurs sondes sur le site à cette date (sondes S2, S5, S6, S9 et S10). Ce signal ne peut clairement pas être lié à un problème instrumental, toutes les sondes étant indépendantes les unes des autres. Par ailleurs, ce type de fluctuation n'apparaît pas sans intervention d'un fluide sur les capteurs profonds (notamment à 50 cm), qui sont peu sensibles aux fluctuations journalières de température.

L'interprétation de ce signal (Figure 10), apparaissant simultanément sur l'ensemble des capteurs, permet d'estimer une vitesse d'infiltration. Sachant que le pas de mesure est de 15 mn, et en considérant le capteur à 5 cm de profondeur et celui à 50 cm de profondeur, cela correspond à une vitesse d'infiltration (vitesse de Darcy) de l'ordre de $5.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, soit une perméabilité intrinsèque de l'ordre de 10^{-11} m^2 pour l'horizon superficiel où ce signal a été observé.

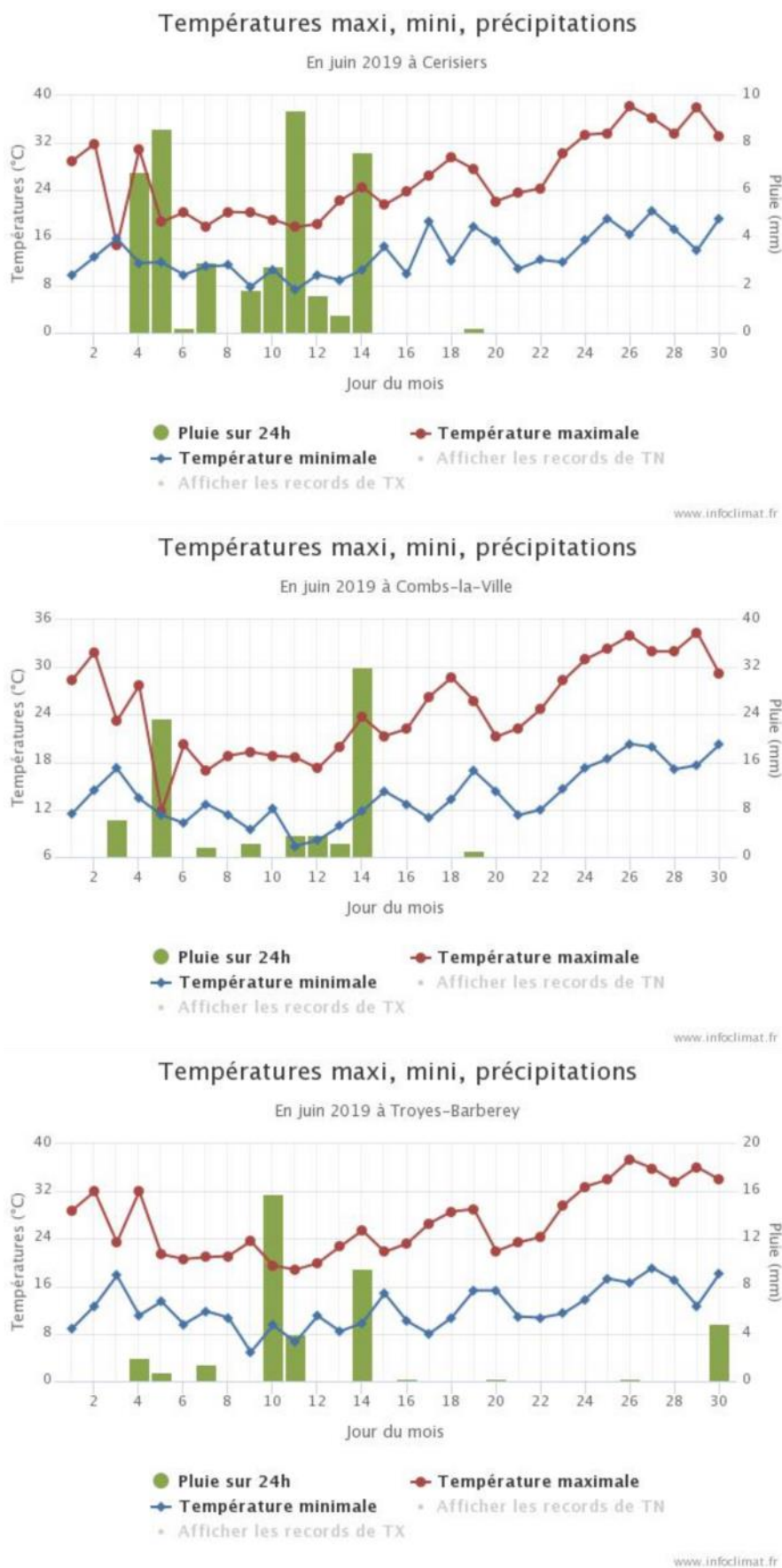


Figure 8. Pluviométrie sur les stations météorologiques de Cerisiers, Combs-La-Ville et Troyes-Barbery pendant le mois de juin. Noter l'évènement pluvieux commun pendant la 1^{ère} quinzaine du mois de juin (www.infoclimat.fr).

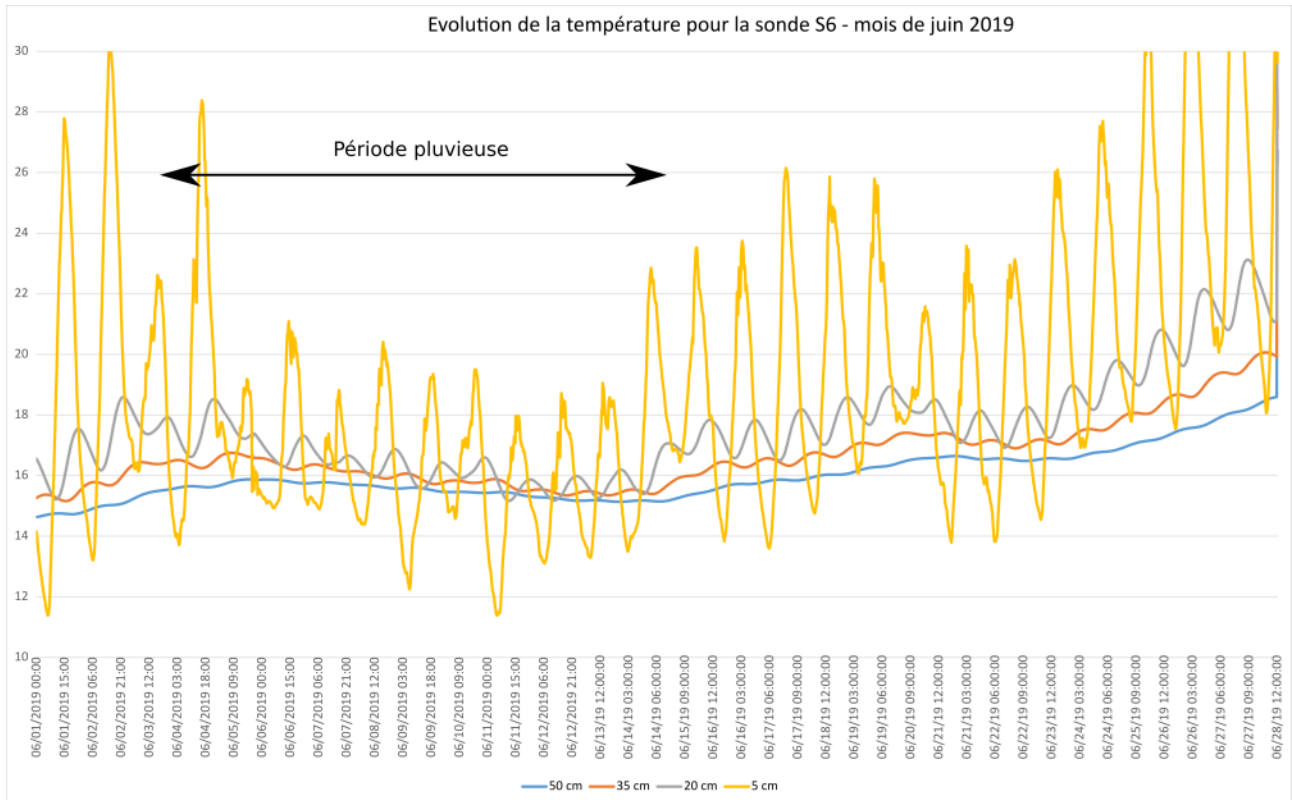


Figure 9. Températures des capteurs de la sonde S6 durant le mois de juin 2019.

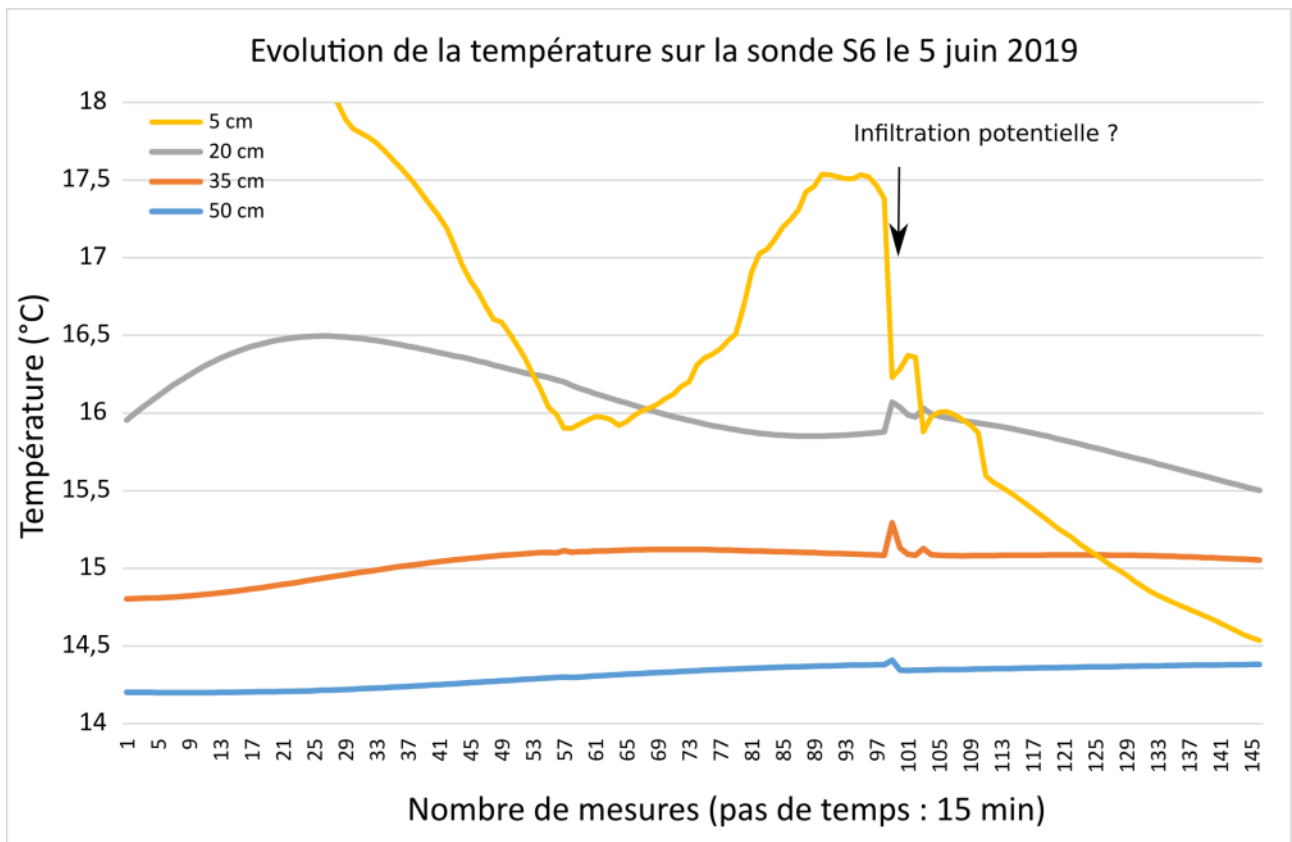


Figure 10. Effet d'une infiltration potentielle sur les capteurs de la sonde S6 lors d'un évènement pluvieux (zoom de Figure 8, autour du 5 juin).

Conclusion

L'utilisation des températures comme traceur des transferts hydriques n'est plus à démontrer. Elle a été une fois de plus illustrée dans le cas présent au sol, mais aussi à partir de données thermiques relevées par drone à plusieurs pas de temps. Cette démarche innovante offre une perspective de changement d'échelle considérable.

Dans le cas présent, l'interprétation des températures a été effectuée sur une parcelle de quelques hectares avec des relevés 1) effectués par drone (avec une résolution pluri-centimétrique en caméra infrarouge thermique), durant deux vols sur un cycle diurne réalisés en avril et juin 2019, et 2) effectués au sol à 5, 20, 35 et 50 cm de profondeur grâce à 9 sondes réparties sur l'aire d'étude. Ce protocole de mesure, associé à une prospection géophysique permettant de contraindre spatialement la variabilité structurale de la parcelle dite de calibration, semble généralisable à n'importe quel contexte hydrogéologique. Par ailleurs, il ouvre clairement la perspective d'un passage à l'échelle vis-à-vis de données acquises à plus haute altitude, donc traitant d'emprise pouvant être beaucoup plus importante. Il est donc naturel d'envisager des démarches similaires pour le passage entre les données à l'échelle du drone et celle à l'échelle de l'aéroporté, voire à celles satellitaires.

Néanmoins, certains verrous restent à lever afin de fiabiliser l'évaluation en absolu des températures mesurées hors sol. Leur calibration, ainsi que l'estimation des fonctions de transfert entre les différents protocoles de mesures thermiques, requièrent l'évaluation précise de la contribution du couvert végétal au signal thermique quel que soit le type de mise en œuvre pour ces mesures.

Il est important de noter que la quantité considérable de données associées à ce type de mesure hors sol, radiométriques (IR thermiques, visibles, voire hyperspectrales) et de géophysique de proche surface, nécessite la mise en œuvre de techniques de traitement massif/fusion de données, et de techniques d'apprentissage et de classification, qu'elles soient supervisées ou pas. Ce point concentrera l'essentiel des efforts de recherche et constituera l'un des défis à relever pour les travaux de reconstitution des trajectoires thermiques de la Bassée.

Bibliographie

- Abu-Hamdeh, N.H. and Reeder, R.C., 2000. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil science society of America Journal*, 64(4), pp.1285-1290.
- Cucchi, K., Rivière, A., Baudin, A., Berrhouma, A., Durand, V., Rejiba, F., Rubin, Y. and Flipo, N., 2018. LOMOS-mini: A coupled system quantifying transient water and heat exchanges in streambeds. *Journal of Hydrology*, 561, pp.1037-1047.
- Flipo, N., Mouhri, A., Labarthe, B., Biancamaria, S., Rivière, A. and Weill, P., 2014. Continental hydrosystem modelling: the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, pp.3121-3149.
- Jost, A., Schneider, A.C., Oudin, L. and Ducharne, A., 2017. On the use of a physically-based baseflow timescale in land surface models. *AGUFM*, 2017, pp.H13G-1469.
- Kurita, K., Baratoux, D., Sato, H., Suzuki, A., Vaucher, J., Kodama, S., Ichihara, M., Saiki, K., Kaneko, T., Kimura, J. and Takahashi, S., 2007. Thermal imaging of volcanic areas and implications for the interpretation of surface temperatures on mars. *LPICo*, 1353, p.3113.
- Rejiba, F., Schamper, C., Chevalier, A., Deleplancque, B., Hovhannissian, G., Julien, T. and Weill, P., 2018. Multiconfiguration electromagnetic induction survey for paleochannel internal structure imaging: a case study in the alluvial plain of the River Seine, France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), pp.159-170.
- Rejiba, F., Fauchard C., Antoine, R., Finco, C., Schamper, C., Levailant, R. and Rivière, A., 2019. Imagerie Infrarouge Thermique par un drone par la caractérisation des hétérogénéités des températures de surface d'un hydrosystème (rivière, surface du sol, gravière). Rapport PIREN Seine.

- Rivière, A., Flipo, N., Goblet, P., Berrhouma, A. (2020) Thermal reactivity of the stream-aquifer interface in headwater streams *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1735-1753. doi:10.1007/s10040-020-02154-6
- Tabbagh, A., Cheviron, B., Henine, H., Guérin, R. and Bechkit, M.A., 2017. Numerical determination of vertical water flux based on soil temperature profiles. *Advances in Water Resources*, 105, pp.217-226.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G., 2002. *Geodynamics*. Cambridge university press.
- Weill, P., Deleplancque, B. and Norgeot, C., 2013. Etude de faisabilité sur la caractérisation des hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée par géoradar. Rapport PIREN Seine.