

Détermination de l'évolution de la recharge à partir des données de température du sol des stations météo du bassin de la Seine

Bruno CHEVIRON, Roger GUÉRIN, Hocine BENDJOUDI et Alain TABBAGH

UMR 7619 Sysiphe, Université Pierre et Marie Curie, bruno.cheviron@ccr.jussieu.fr

1. Introduction	1
2. Le lien entre la percolation de l'eau et la température	1
3. Les caractéristiques des relevés de température	2
4. Les signaux de température	3
5. La diffusivité thermique	3
6. Le modèle d'un terrain homogène est-il satisfaisant ?	3
7. Le modèle général d'un terrain tabulaire multi-couche	4
8. Modèles de terrain à deux couches	4
9. Modèles de terrain à trois couches	5

1. Introduction

Le projet de recherche vise d'abord à évaluer, à partir des enregistrements de la température du sol réalisés à différentes profondeurs aux stations météo, l'évolution pluriannuelle de la recharge. Dans un deuxième temps en utilisant l'ensemble des stations météo du bassin hydrologique de la Seine et en régionalisant les résultats obtenus, on se propose de calculer ce terme d'entrée sur l'ensemble du bassin. Le projet étant prévu sur deux ans, le présent rapport rend compte de la première phase du travail.

2. Le lien entre la percolation de l'eau et la température

Au niveau mathématique, le lien entre l'eau et la température se fait à travers l'équation de la chaleur, qui décrit l'évolution spatio-temporelle de la température, en fonction des caractéristiques thermiques du sol et des différents flux de chaleur qui lui sont appliqués. On regarde le sol comme un milieu triphasique où coexistent une matrice solide, une phase liquide, constituée d'eau fixe ou mobile, et une phase gazeuse, qui peut contenir de l'air et de la vapeur d'eau.

On distingue classiquement trois modes de transferts thermiques dans le sol :

- La thermomigration, qui concerne uniquement la phase gazeuse, dans laquelle un gradient thermique ou un gradient de densité provoquent un déplacement de matière qui s'accompagne d'un transport de chaleur latente.
- La conduction qui est une propagation de la chaleur, à travers les trois phases, par contact moléculaire, donc sans déplacement de matière.
- La convection, où un déplacement de la phase liquide modifie l'équilibre thermique.

Quelle est l'importance relative des différents termes de flux ?

- La thermomigration est un terme extrêmement variable, qui peut avoir un effet marquant dans des circonstances particulières, sur des temps très courts, par exemple aux heures chaudes, à la belle saison. Mais ce transfert n'affecte que les couches superficielles (les 10 premiers centimètres), elle est donc sans effet sur les mouvements profonds, comme à l'échelle de temps qui nous intéresse, plusieurs années.

- La conduction est le mode de transfert dominant, pour deux raisons : d'une part elle existe partout et tout le temps, inconditionnellement, dès lors qu'une modification de température se produit, par exemple en surface, et d'autre part elle est très efficace. C'est la conduction qui dicte la répartition des températures dans le sol et leur évolution.
- La convection n'est pas pour autant négligeable, puisqu'elle provoque ce qu'on appelle une « redistribution des températures » par rapport au cas conductif.

Le terme de redistribution a ici un sens bien précis : il veut dire que les températures obtenues en présence de convection ressemblent fortement à celles obtenues sans convection, puisque la conduction est dominante dans la répartition des températures, mais que les différences entre les cas avec et sans convection sont exploitables et significatives.

Conceptuellement, c'est en étudiant les importances relatives de ces modifications à plusieurs profondeurs que l'on arrive à déterminer les mouvements d'eau qui les ont causées, tout ceci uniquement grâce à des relevés de température.

Il s'agit certes d'une méthode indirecte de détermination de la vitesse de Darcy, mais elle est beaucoup moins lourde à mettre en place que des méthodes directes, comme l'utilisation d'un lysimètre ; elle est aussi beaucoup moins coûteuse. Dans le cas présent, on exploite des données déjà acquises.

3. Les caractéristiques des relevés de température

Les stations de Météo France réparties sur la zone qui nous intéressent effectuent des relevés de température sur leur site, on peut facilement se les procurer. Les stations effectuent des relevés journaliers de température sur un profil vertical, aux profondeurs de 10, 20, 50 et 100 cm.

Ces relevés offrent des caractéristiques intéressantes :

- Les terrains sont plans, donc on nous sommes sûrs de bien détecter des mouvements d'eau verticaux sans interférence avec des effets horizontaux de ruissellement.
- Les stations ne sont ni couvertes, ni arrosées artificiellement, ce qui garanti les conditions naturelles de pluviométrie et d'évaporation, deux termes qui sont calculés sur certaines stations et nous servent de références.
- Le nombre de stations disponibles permet un maillage spatial assez dense, à l'échelle régionale, avec la possibilité d'établir des corrélations entre les calculs effectués sur des points suffisamment proches. La région parisienne est sur ce point bien instrumentée.
- Les relevés sont effectués dans la plupart des stations depuis 1984, ce qui permet la collection d'un important nombre de données sur une durée appréciable pour l'étude des variations annuelles de température.

Quels sont leurs points faibles ?

- Les mesures sont effectuées à la précision de 0.1 K, ce qui est très au-dessus du bruit.
- Avec une précision de 0.1 K et un pas de temps journalier, on ne peut étudier avec suffisamment de fiabilité un seul cycle annuel : il faut étudier des cycles d'au moins 3 ans, ou alors il faudrait disposer de mesures plus rapprochées (certaines stations effectuent des mesures horaires mais en général sur des périodes courtes et elles ne sont pas maintenues dans la base de données).
- Le capteur à 0.1 m pose deux types de problèmes : Il tombe plus facilement en panne (rongeurs et autre cause de perturbation). Le pas d'une mesure par jour est trop large pour une profondeur où la variation diurne reste importante. Pour ces deux raisons, les valeurs données par ce capteur sont à écarter.
- La structure du terrain est inconnue: elle n'a pas été étudiée au moment de l'installation, et on ne peut pas rouvrir puisque cela perturberait les mesures en cours. Il faut inventer une procédure qui permette de déterminer *a posteriori* la structure du terrain à partir des mesures de températures elles-mêmes.

4. Les signaux de température

Les enregistrements de température obtenus aux profondeurs de 20, 50 et 100 cm, montrent :

- à chaque profondeur la présence d'un signal que par analogie avec la radio on peut appeler 'porteur', signal de basse fréquence, de période annuelle.
- à ce signal se superposent des oscillations diurnes, associées aux changements de température à chaque cycle de 24h, surtout sensibles aux plus faibles profondeurs.
- on observe enfin des modifications « transitoires », qui ne sont pas périodiques, mais qui correspondent à des périodes de temps plus chaud ou plus froid.

L'étude porte sur la variation de période annuelle. Nous « calons » par la méthode des moindres carrés, une sinusoïde parfaite sur les données de chaque profondeur. Les amplitudes des variations s'atténuent avec la profondeur et elles sont déphasées les unes par rapport aux autres, leurs extrema n'intervenant pas simultanément. Cet amortissement et ce déphasage sont dépendants des propriétés thermiques du terrain et de la percolation qui peut le cas échéant être mise en évidence.

5. La diffusivité thermique

En régime non permanent les transferts par conduction dépendent de la diffusivité thermique, Γ , rapport de la conductivité thermique à la chaleur spécifique. En effectuant des manipulations sur l'équation de la chaleur, il est possible de la faire apparaître explicitement. Dans le cas particulier d'un sol homogène sa valeur peut être très simplement déterminée par deux moyens différents :

- le premier calcule la diffusivité du sol à partir à partir du *rapport d'amplitude* des variations annuelles de température entre deux profondeurs différentes,
- le second calcul utilise la *différence de phase* entre ces mêmes variations.

Ces deux calculs fournissent deux valeurs de la diffusivité, qu'on désigne respectivement par Γ_{amp} et Γ_{phase} . En présence de percolation la vitesse de Darcy a une influence sur les amplitudes et les phases des variations de température, donc une influence sur les valeurs de Γ_{amp} et Γ_{phase} . Les termes Γ_{amp} et Γ_{phase} réagissent, en effet, très différemment à la vitesse de Darcy, u :

- la valeur Γ_{phase} est proche de la valeur « vraie » et très peu dépendante de u ,
- la valeur Γ_{amp} est très dépendante de u , augmente avec l'infiltration, diminue avec l'exfiltration.

A partir des valeurs de Γ_{amp} et Γ_{phase} , des programmes de résolution *numérique* permettent, par itérations successives, de calculer simultanément u et Γ « vraie ». Nous avons aussi démontré récemment l'existence d'une relation *analytique* qui nous permet de calculer u directement.

6. Le modèle d'un terrain homogène est-il satisfaisant ?

En étudiant des périodes longues, allant jusqu'à 18 années complètes, afin d'avoir le meilleur rapport signal/bruit, on observe des différences selon les paires de profondeurs considérées (20/50 cm, 50/100 cm, 20/100 cm) quant à la valeur de u calculée. Les valeurs données par la paire de profondeur 20/100 cm sont médianes et *a priori* les plus précises, car établies à partir du plus grand écart de profondeur (en augmentant l'écartement des capteurs on diminuait l'erreur relative commise sur le calcul des diffusivités, et à travers elle sur u).

En traitant plusieurs séries expérimentales, On a pu observer que les valeurs de la vitesse de percolation obtenues à partir de la paire 20/100 cm aux différentes stations sont parfois visiblement erronées, par exemple elles peuvent être fortement négatives (une valeur négative signifiant un déplacement vers le haut) ou être d'une amplitude supérieure à la pluie. La recherche des différentes causes possibles expliquant ces résultats nous a conduit à mettre en cause l'utilisation du modèle de sol homogène.

7. Le modèle général d'un terrain tabulaire multi-couche

A partir du modèle analytique de la réponse d'un sol tabulaire à une excitation thermique sinusoïdale il est possible de calculer des données « synthétiques » de variation de la température aux profondeurs choisies.

Soit le modèle d'un terrain à N couches, où chaque couche i est caractérisée par un jeu de paramètres : son épaisseur e_i , sa conductivité thermique k_i , sa chaleur volumique Cv_i , sa diffusivité thermique étant Γ_i . En tenant compte des conditions aux limites de continuité du flux de chaleur et de la température, nous résolvons l'équation de la chaleur et obtenons une solution en température $T(z,t)$ fonction sinusoïdale du temps, à chacune des profondeurs choisies.

Cette solution théorique peut être utilisée pour une série de tests synthétiques, de la manière suivante :

- on choisit une valeur d'entrée pour l'infiltration u ,
- puis des jeux de paramètres qui déterminent de façon univoque les solutions $T(z,t)$ aux profondeurs des capteurs,
- on calcule les diffusivités Γ_{amp} et Γ_{phase} entre les différentes paires de profondeurs, en supposant le terrain uniforme,
- on calcule u ,
- on compare le u obtenu à celui donné en entrée.

Les conclusions tirées de ce test théorique sont que les différences obtenues sont très variables suivant le nombre de couches, les caractéristiques de chaque couche, et leur positionnement. Il faut alors passer en revue les différentes configurations géométriques possibles.

8. Modèles de terrain à deux couches

Deux caractéristiques intéressantes sont mises en évidence dans le cas simple à deux couches :

- (1) une couche de recouvrement est sans effet, quelles que soient ses propriétés thermiques : si les trois points de mesure sont tous dans la deuxième couche, recouverte d'une couche de propriétés différentes, la vitesse calculée en supposant le milieu homogène est exacte. Ceci suggère que l'on a intérêt à privilégier les résultats obtenus à partir du rapport le plus profond puisque cela élimine l'effet des changements à une profondeur inférieure à 50cm.
- (2) si au contraire le changement de couche se produit en-dessous des trois points de mesure, on observe des différences très marquées entre la valeur de u donnée « en entrée » et celle calculée « en sortie ». Si la couche sous-jacente est moins conductrice de la chaleur, les valeurs de diffusivités calculées sont trop élevées et conduisent à une valeur de u correspondant à une infiltration anormalement forte. Si la couche sous-jacente est plus conductrice, les diffusivités baissent, et conduisent à une valeur de u correspondant à une forte exfiltration.

On doit faire une première remarque, concernant le point (2): les valeurs de vitesse calculées sont trop fortes en valeur absolue pour être exactes, bien que cohérentes entre les paires de profondeurs, alors que les valeurs de diffusivité du terrain supposé homogène sont très différentes entre les paires de profondeurs.

C'est la variation des diffusivités, calculée à partir des fonctions $T(z,t)$ qui montre que le terrain n'est pas homogène, qui *détecte* l'inhomogénéité du terrain. En particulier, la variation de Γ_{phase} est une indication très fiable, puisque Γ_{phase} , dans le modèle multicouches aussi, reste très peu dépendant de u .

Cette constatation signifie que, même dans l'hypothèse où nous aurions mesuré les propriétés thermiques du terrain en installant les capteurs, une couche inférieure inobservable est susceptible d'avoir une grande influence sur les résultats. Il est donc absolument nécessaire de savoir corriger l'effet d'une inhomogénéité des propriétés thermiques du sol à partir des données enregistrées.

Une autre remarque est importante : les changements de u sont peu modifiés. Même dans les cas où la valeur de u est complètement irréaliste, une modification de la valeur de u en entrée conduit à un résultat toujours irréaliste mais dont l'écart avec le précédent reste proche de l'écart des données d'entrée. L'application brutale du modèle homogène respecte pratiquement les variations de u , même quand elle fournit des valeurs absolues irréalistes

Ce dernier point suggère de suivre la démarche suivante :

- partir des relevés de température,
- calculer, sur une première période de temps, les diffusivités Γ_{amp} et Γ_{phase} , puis la vitesse u_1 associée, comme si le sol était homogène,
- faire les mêmes calculs sur une seconde période de temps, ce qui donne u_2 .
- prendre le terme $u_2 - u_1$ comme information pertinente sur la variation de la percolation, alors que les termes u_1 et u_2 pris séparément sont sans signification.

Dans le cas où un changement de couche se produit entre deux capteurs, les résultats obtenus confirment ceux de la configuration où les trois capteurs se trouvent dans la première couche, au dessus d'une deuxième couche de caractéristiques différentes.

Dans cette hypothèse, les diffusivités et vitesses calculées entre les paires de profondeurs au-dessus et en-dessous de l'interface sont très différentes.

Sans que l'on connaisse la structure du sol, les résultats de diffusivité et de vitesse obtenus à partir du traitement des températures présentent presque toujours de sérieuses variations avec la profondeur, d'où la certitude que le modèle géométrique composite doit comporter *au moins deux couches*.

9. Modèles de terrain à trois couches

Dans la pratique, on peut observer des résultats différents entre les trois paires de profondeurs qui nécessitent de prendre en compte un modèle à trois couches où les propriétés thermiques n'ont pas une variation monotone avec la profondeur

Ayant à faire à une structure *a priori* inconnue on adopte le modèle où les interfaces sont placées à égales distances des capteurs. Les capteurs se trouvant à 20, 50 et 100 cm, les épaisseurs des couches seront $e_1 = 35$ cm, $e_2 = 40$ cm.

Avec trois couches, le modèle comporte six inconnues thermiques (Cv_i et k_i dans chaque couche) plus la vitesse de Darcy. On a donc *a priori* 7 inconnues par période considérée. Or nous ne disposons que de deux rapports complexes indépendants soit 4 équations, le problème est donc indéterminé. Deux approches peuvent être proposées face à cette difficulté. (1) Chercher les caractéristiques communes à l'ensemble, probablement infini, de solutions. Ce qui peut être réalisé en balayant l'ensemble des gammes de valeurs possibles des six propriétés thermiques. (2) Adopter des approximations vraisemblables qui permettent de réduire le nombre d'inconnues, car le problème physique n'a, lui, qu'une seule solution que nous pourrions alors approcher.

La première approche a été abordée à l'aide d'un cas synthétique, qui, à partir de données non bruitées, nous a permis de montrer que si une solution était connue, une autre pouvait être déduite de la première par une simple multiplication de l'ensemble des paramètres thermiques et de u par une même constante. Le signe de u et le sens de ses variations d'une période à l'autre sont donc parfaitement définis. L'amplitude de u ne peut être que bornée en bornant la gamme de variation des propriétés thermiques.

La seconde approche nécessite que l'on établisse de quels facteurs dépendent les propriétés thermiques et quelles valeurs vraisemblables peuvent prendre ces facteurs. Les lois de références sont, pour la chaleur volumique, [de Vries, 1963]

$$C_v = C_w \theta + C_s (1 - n),$$

et pour la conductivité thermique [Cosenza et al., 2003],

$$k=(0.8908-1.0959n)k_s+(1.2236-0.3485n)\theta.$$

Dans ces expressions, n est la porosité, θ la teneur volumique en eau liquide, C_s la chaleur volumique de la fraction solide ($2 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$), C_w la chaleur volumique de l'eau liquide ($4.18 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$), k_s la conductivité thermique de la fraction solide (qui dépend de la teneur en quartz et en matière organique).

Si l'on considère d'abord C_v , C_s est pratiquement constant et indépendant de la minéralogie de la fraction solide, la gamme de variation de n est très limitée (en l'absence de travail agricole), entre 0,4 et 0,5, θ varie au cours de l'année mais sa moyenne sur plusieurs cycles annuels n'a que de très faibles variations. On peut donc considérer les approximations suivantes :

- C_v est indépendant du temps (θ est constant), mais n peut varier selon les couches
- C_v dépend du temps mais reste le même pour les trois couches
- C_v est indépendant du temps et le même pour les trois couches.

Si l'on considère k , k_s peut être très variable car il est sensible aux changements de minéralogie de la fraction solide, la dépendance avec θ est par contre plus faible que celle de C_v , une seule approximation est donc possible : k est indépendant du temps.

Avec ces approximations le nombre d'inconnues thermiques se trouve réduit à 4 ou à 6 et le problème devient soluble dès que l'on peut utiliser au moins deux périodes de temps différentes.