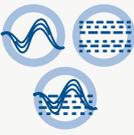


Modèles hydrothermiques à base physique (code Metis) et dispositif de mesure d'écoulement d'eau (Molonari)

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
										
Nappes libres Zone hyporhéique Aquifères multi-couches	Ponctuelle Maille	<100 m Maille de 1 à 10 cm	Locale (Modèle Metis et Molonari) Extrapolation au tronçon de cours d'eau	Transitoire ou haute fréquence	Horaire voire infra-horaire	Important	Important	Important	Important	Important

Description rapide

Il s'agit d'une approche à l'échelle du transect d'un cours d'eau qui combine des mesures sur site (niveau de l'eau dans la nappe et la rivière, température) à de la modélisation des écoulements et de la thermie de l'eau. Le couplage d'un dispositif de mesure appelé Molonari (Monitoring local des échanges nappe/rivière) et de la modélisation (par ex. le code Metis) permet, lorsqu'il est utilisé sur plusieurs transects d'un linéaire de cours d'eau, une estimation intégrée sur plusieurs échelles spatiales des échanges nappe/rivière. Cette approche permet par exemple de travailler sur des bassins sédimentaires avec vallées incisées dans un contexte d'aquifères multi-couches. Cette méthode experte permet une estimation à pas de temps fin des échanges nappe/rivière. Elle est plutôt adaptée aux petits et moyens cours d'eau. Elle continue à être développée pour estimer le colmatage biologique.

Principe de caractérisation des échanges

À grande échelle et au niveau des bassins versants, les flux entre les eaux souterraines et les eaux de surface peuvent être fortement affectés par de fortes hété-

rogénéités géologiques qui contrôlent le champ d'écoulement des eaux souterraines. À petite échelle, les échanges de flux à l'interface aquifère/rivière semblent être plutôt contrôlés par la répartition spatiale de la conductivité hydraulique et par la géomorphologie du lit tels les ruptures de pente et les obstacles. La méthode présentée ici permet, pour chaque hétérogénéité grande échelle identifiée (par ex. par des sondages géologiques ou de la géophysique), d'explorer les échanges nappe/rivière à petite échelle sur des transects de rivière représentatifs.

Elle utilise la température comme traceur pour suivre les mouvements de l'eau à travers cette interface grâce à un dispositif de suivi en continu (dispositif Molonari) et nécessite des outils d'inversion de cette mesure pour quantifier *a posteriori* les flux d'eau (modèle à base physique).

Dispositif Molonari. Ce dispositif (figure 20 et photos 3, 4 et 5) permet d'effectuer des mesures hydrogéophysiques (niveau d'eau, pression de l'eau, température) grâce à des piézomètres implantés au niveau des berges et dans les petits cours d'eau. Il est composé de plusieurs éléments (Mouhri *et al.* 2013) :

- ✓ deux dispositifs de mesure de profils verticaux de température sur une profondeur de 40 à 60 cm et avec une discrétisation de 10 à 20 cm. Chaque dispositif est implanté au niveau de la berge de rivière. La mesure automatique de la température est réalisée grâce aux sondes reliées à des enregistreurs avec un pas de temps de 15 minutes ;

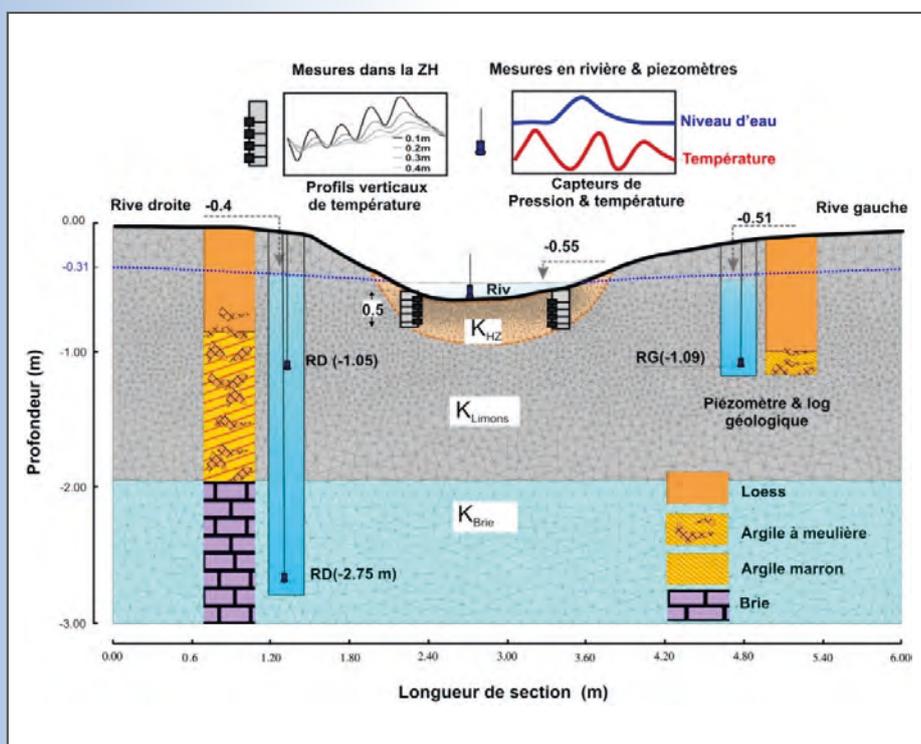


Figure 20. Exemple de maillage du modèle hydro-thermique 2D vertical à 3 couches. Station Molonari (Mouhri *et al.* 2013).



© F. Paron

Photo 3. Dispositif Molonari sur un petit cours d'eau du bassin versant de l'Orgeval.



© N. Filpo

Photo 4. Dispositif Molonari sur une rivière plus large du bassin versant de l'Orgeval.



© F. Paron

Photo 5. Sonde de pression/température sur son socle pour extraction de données.

L'essentiel du protocole

1. Caractérisation du contexte hydrogéologique par méthode géophysique, sondage, ou carte géologique
2. Sélection de sites pour l'implantation des dispositifs Molonari
3. Implantation des dispositifs Molonari et acquisition de données
4. Mise en œuvre du modèle Metis
5. Double calibration du modèle Metis, estimation des échanges nets et absolus
6. Extrapolation linéaire des résultats

- ✓ deux piézomètres de bordure équipés par des mini-sondes de température et de pression avec enregistrement à pas de temps 15 minutes ;
- ✓ une sonde de température et de niveau d'eau enregistre la température et la pression de la colonne d'eau du cours d'eau. Ces données permettent également d'estimer les débits au niveau de chaque section via l'utilisation de courbes de tarage ;
- ✓ une mesure verticale conjointe de la température discrétisée en quatre profondeurs (jusqu'à 40 ou 60 cm sous le lit de la rivière) et de la pression différentielle entre la rivière et le capteur le plus profond. Ce dernier type de mesure est actuellement en cours de développement.

Il est ainsi possible de caractériser la variabilité spatio-temporelle des échanges nappe/ri vière, et de fournir un jeu de données spatialement et temporellement dense pour mieux contraindre les conditions limites des modélisations à l'échelle locale, et de réduire ainsi les incertitudes sur la quantification des échanges.

Modèle distribué à base physique. Il s'agit d'un modèle thermique/hydrogéologique fondé sur l'équation du transport de chaleur couplée à l'équation de la diffusivité en milieu poreux couplant la conservation de la masse à la loi de Darcy. Le modèle utilisé ici est le code Metis dans sa version aux éléments finis 1D et 2D verticaux (Goblet, 2010).

■ Protocole de mesure des échanges

- ▶ Caractérisation de la structure grande échelle et de la géométrie de la ou des couches aquifères et de la zone hyporhéique par carottage et/ou utilisation de la carte géologique et/ou prospections géophysiques (par ex. campagnes de tomographie de résistivité électrique)
- ▶ Sélection des sections, ou transects de rivière représentatifs des différents types de contact entre la rivière et le substrat géologique pour l'implantation des dispositifs Molonari
- ▶ Implantation du dispositif pour suivi haute fréquence (encart : Matériel) : deux piézomètres de bordure de cours d'eau et deux ensembles de capteurs de température distribués verticalement dans la zone hyporhéique. Piézomètres et rivière équipés de capteurs de mesure de la pression et de la température en continu
- ▶ Mise en œuvre du modèle (code Metis) et calibration des paramètres hydrodynamiques et thermiques de la zone hyporhéique au niveau des sections équipées du dispositif Molonari
- ▶ Simulation des profils de température dans la zone hyporhéique en milieu saturé (modèle 1D) et simulation des écoulements verticaux et du transfert de chaleur en milieu poreux (modèle 2D)
- ▶ Extrapolation des résultats obtenus sur une section Molonari à l'échelle de tronçons de rivière «homogènes» (hypothèse forte de l'homogénéité de la perméabilité de la zone hyporhéique à l'échelle d'un tronçon présentant, d'amont en aval, le même type de connectivité nappe/ri vière) ou paramétrisation d'un modèle hydrodynamique à base physique (fiche outils n°2).
- ▶ Cartographie des résultats

Dispositifs / matériel

Matériel

Carte géologique, sondage, tomographe (pour caractériser le contexte hydrogéologique et choisir la localisation des transects d'observation)

Piézomètres

Sondes enregistreuses de pressions

Sondes enregistreuses de température

Pluviomètre

Pompe

Logiciel

Modèle Metis ou autre code de résolution couplée transfert d'eau et de chaleur dans le sol

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain

Crayon papier et gomme

Les coûts hommes/jours mis en œuvre sont précisés dans le tableau 13.

Tableau 13. Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour les dispositifs Molonari.

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Molonari		
Collecte et analyse de données préalables (par ex. géophysique)	10 j	Au moins 3 (technicien, géophysicien, hydrogéologue)
Installation d'une station Molonari	5 j	Au moins 2 (technicien, hydrogéologue) + équipe forage
Collecte de données	1 h/mois	2
Modèle METIS		
Collecte de données	5 j	1 hydrogéologue modélisateur
Construction, calibration, validation du modèle et simulation	9 à 18 mois	
Résultats		
Calcul des bilans par station	3 j	1
Extrapolation de la station au linéaire de cours d'eau	1 j	1
Cartographie des résultats	1 j	1

Interprétation des données et des résultats

Le code de simulation Metis, qui représente en 1D ou 2D les écoulements verticaux et le transfert de chaleur en milieu poreux (Goblet, 2010), est utilisé pour interpréter les données expérimentales. Les équations sont formulées et résolues par la méthode des éléments finis. Le transfert de chaleur s'effectue par les processus d'advection (associés aux flux d'eau) et de conduction (à travers la phase solide/liquide). Ces processus sont décrits par le couplage de plusieurs équations qui permettent de quantifier (encart : Formules) :

- ✓ la charge hydraulique ou charge piézométrique (h) ;
- ✓ les écoulements souterrains transitoires (équation de diffusivité) ;
- ✓ les transferts thermiques transitoires (équation de transport de chaleur).

Formules de calcul

Charge hydraulique

$$h = \frac{p}{\rho_0 g} + z$$

Où h est la charge piézométrique [L], P est la pression du fluide [ML⁻¹T⁻²], ρ masse volumique du fluide [ML⁻³], g la constante de gravité [LT⁻²], et z la hauteur calculée par rapport au niveau de la mer [L].

Équation de diffusivité qui décrit les écoulements souterrains transitoires à partir de la charge hydraulique

$$\nabla \left[\frac{k \rho g}{\mu} \nabla h \right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Où μ est la viscosité dynamique [ML⁻¹T⁻¹], K la perméabilité intrinsèque [L²], t le temps [T], S_s coefficient d'emménagement [L⁻¹], ρ masse volumique du fluide [ML⁻³].

Équation de transport de chaleur qui décrit le transfert thermique transitoire en prenant en compte l'advection, la dispersion cinématique et la conduction

$$\nabla \left[(\alpha \gamma_\omega \|U\| + \Lambda) \nabla T - \gamma_\omega U T \right] = \gamma \frac{\partial T}{\partial t}$$

Où α est la dispersivité intrinsèque [L], Λ la conductivité thermique du milieu [MLT⁻³θ⁻¹], γ la capacité calorifique du milieu [ML⁻¹T²θ⁻¹], γ_w la capacité calorifique de l'eau [ML⁻¹T²θ⁻¹], T la température [θ] et U la vitesse de Darcy [LT⁻¹].

Bilan des échanges nappe/rivière

Échanges nets et absolus (mm)

$$Q_{net} = \sum E + \sum I$$

$$Q_{abs} = \sum |E| + \sum |I|$$

Bilans hydriques pour les tronçons amont (mm)

$$Q = \sum E + \sum I + R$$

Bilans hydriques pour les tronçons aval (mm)

$$Q = \sum E + \sum I + R + Q_{amont}$$

Où E est l'exfiltration, I l'infiltration et R le ruissellement, Q représente le débit mesuré au droit de la section et Q_{amont} le débit en amont du tronçon considéré.

Les résultats obtenus pour chaque tronçon sont extrapolés de manière linéaire (Mouhri *et al.* 2014a). Les flux échangés obtenus doivent être comparés aux débits observés au niveau de ces sections, grâce à des courbes de tarage reliant niveau d'eau mesuré en rivière à l'estimation du débit. Pour préciser le fonctionnement du système hydrologique il est nécessaire de quantifier les échanges nets (Q_{net}) et les échanges absolus (Q_{abs}) (encart : Formules). Le volume des flux échangés est divisé par la surface du bassin versant et sont au final exprimés en mm/an. Ce travail reste l'affaire de spécialistes du domaine.

Valeurs guides et repères

Gamme de variation classique des paramètres de la zone hyporhéique utilisés dans la modélisation.

- ▶ Porosité (S) : < 0,4
- ▶ Perméabilité intrinsèque (k) : 10^{-14} à 10^{-11} m²
- ▶ Conductivité thermique du solide : 1,8 à 3 W.m⁻¹.K⁻¹
- ▶ Capacité calorifique du solide : 600 à 1 200 J.kg⁻¹.K⁻¹
- ▶ Densité solide : 2 200 à 3 000 kg.m⁻³

Résultats : exemple du bassin de l'Orgeval

La figure 21 montre les résultats de la caractérisation des échanges nappe/rievière sur le bassin versant de l'Orgeval pour lequel cinq stations Molonari ont été implantées (numérotées de 1 à 5, Mouhri *et al.* 2014b). Ces stations ont été implantées après avoir localisé les couches géologiques incisées par la rivière à partir d'une méthode géophysique (tomographie) :

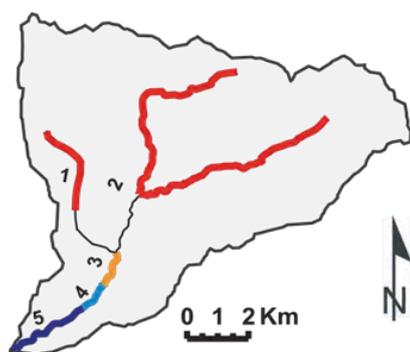


Figure 21. Carte des échanges nappe/rievière à l'échelle du bassin des Avenelles, obtenue par extrapolation des estimations des débits échangés à l'échelle des sections Molonari : l'exfiltration est dominante sur les tronçons rouges et l'infiltration sur les tronçons bleus (Mouhri *et al.* 2014a, b).

- ✓ sur les tronçons amont 1 et 2 (en rouge) on observe des échanges de la nappe vers la rivière (exfiltration). En raison de la faible valeur des infiltrations, les flux nets échangés (67,9 mm/an) sont quasiment équivalents aux flux absolus échangés (70,5 mm/an). Le ruissellement (36,6 mm/an) représente près de 40 % du débit observé ;
- ✓ le tronçon intermédiaire 3 est caractérisé par un très faible flux net (3,4 mm/an) et un fort flux absolu (20,6 mm/an). On observe une faible infiltration (orange) ;
- ✓ en aval, la différence entre les échanges nets et les échanges absolus est plus remarquable. En effet, le débit absolu (\approx 53 mm/an) est deux fois plus élevé que le débit net (\approx 28 mm/an) au niveau des tronçons 4 et 5 (bleu) où l'on observe des échanges de la rivière vers la nappe (infiltration).

Points forts

- ▶ Quantification de flux à haute résolution temporelle et cartographie spatiale des échanges le long de la rivière à pas de temps fin possible quelle que soit la saison
- ▶ Estimation multi-échelles de la variabilité spatiale et temporelle des flux avec l'utilisation de plusieurs transects le long d'un cours d'eau
- ▶ Distinction des échanges par les berges et par le fond

■ Informations et données nécessaires

- ▶ Géométrie du milieu (carte géologique, prospection géophysique, stratigraphie)
- ▶ Conditions limites (h rivière et nappe [cotes], T rivière et nappe [température])
- ▶ Profils thermiques de la zone hyporhéique (calibration et validation, photos 6 et 7)

■ Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- ▶ Méthode lourde à mettre en œuvre en termes de moyens financiers et techniques aussi bien au niveau de la mesure (gros effort d'acquisition de données) que de la modélisation (appropriation du code)
- ▶ Problème de transfert d'échelle
- ▶ Méthode réservée aux petits et moyens cours d'eau
- ▶ Bonne connaissance de l'hydrogéologie et de la pédologie-géologie nécessaires pour le suivi de l'installation Molonari

■ Méthodes complémentaires

- ▶ Modélisation hydrodynamique à base physique à plus grande échelle (fiche outils n°2).
- ▶ Géophysique (fiche outils n°8).

Références et liens pour en savoir plus

Goblet P. (2010) Programme METIS - *Simulation d'écoulement et de transport miscible en milieu poreux et fracturé* - Notice de conception mise à jour le 6/09/10. Tech. rep., Centre de Géosciences - École des Mines de Paris.

Mouhri A., Flipo N., Rejiba F., Bodet L., Jost A., Goblet P. (2014b) *Designing a multi-scale sampling Spatio-temporal distribution of stream-aquifer water exchanges along a multi-layer aquifer system*.

Mouhri A., Flipo N., Rejiba F., Bodet L., Jost A., Durand V., Goblet P. (2014a) *Caractérisation et quantification spatio-temporelle des échanges hydriques dans la vallée incisée des Avenelles*. Tech. rep., PIREN Seine.

Mouhri A., Flipo N., Rejiba F., de Fouquet C., Bodet L., Goblet P., Kurtulus B., Ansart P., Tallec G., Durand V., Jost A. (2013) *Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in a sedimentary basin*. Journal of Hydrology 504, p. 194-206.

Personnes ressources

Nicolas Flipo (Hydrogéologue) : École nationale supérieure des mines de Paris (ENSM), Centre de Géosciences - Systèmes hydrologiques et Réservoirs, nicolas.flipo@mines-paristech.fr

Amer Mouhri (Hydrogéologue) : École nationale supérieure des mines de Paris (ENSM), Centre de Géosciences - Systèmes hydrologiques et Réservoirs, amer.mouhri@gmail.com



Photo 6. Sonde hyporhéique à quatre capteurs verticaux de température.



Photo 7. Sonde hyporhéique à quatre capteurs verticaux de température connectés à leur datalogger.

© N. Flipo

© N. Flipo