

Etat de l'art sur les méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe-rivière

Amer Mouhri^{1*}, Nicolas Flipo^{1*}, Firas Saleh^{1*}

¹Centre de Géosciences, MINES ParisTech, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau

* Contacts : [[amer.mouhri,nicolas.flipo,friras.saleh](mailto:amer.mouhri,nicolas.flipo,friras.saleh@mines-paristech.fr)]@mines-paristech.fr

1 Introduction

Historiquement, les eaux de surface et souterraines ont été étudiées comme deux entités séparées (Kalbus et al 2006). Cependant, depuis peu, l'étude des échanges nappe-rivière est devenue une composante essentielle de la caractérisation hydrogéologique des bassins versants (Hayashi et Rosenberry, 2002). Aujourd'hui, l'interface nappe-rivière est considérée comme une zone de transition caractérisée par une grande variabilité des processus physiques (liés au transport) et biogéochimiques (dégradation, biodégradation, précipitation, sorption-désorption etc). Cette zone de transition correspond à la couche de sédiments saturés en eau située sous le lit de la rivière. Elle est caractérisée par des faibles vitesses d'écoulement tri-dimensionnel. Les écologistes utilisent le terme de la zone hyporhéique (ZH) pour définir cette zone (Schwoerbec 1961). Elle désigne les processus d'interaction entre le biotope, le métabolisme et les eaux de rivière (Hynes, 1983 ; Brunke and Gonser 1997). Sur le plan fonctionnel, les interactions nappe-rivière ont un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes de la zone riparienne (kalbus et al, 2006). Storey et al. (2003) ont suggéré, que les écoulements des eaux souterraines peuvent avoir un impact significatif sur l'étendue de la zone hyporhéique et peuvent affecter la distribution de la faune benthique (Brunke et Gonser, 1997). De plus, les variations temporelles des gradients hydrauliques entre l'aquifère et un cours d'eau peuvent modifier le champ d'écoulement près du ruisseau (Wroblicky et al., 1998).

Les interactions nappe-rivière sont complexes et se développent de manière diverse suivant les échelles spatiales d'étude. Suivant l'échelle d'observation, les hétérogénéités fonctionnelles peuvent varier du centimètre au mètre (Brunke and Gonser, 1997; Woessner, 2000). Ces échanges complexes varient en fonction du secteur morphologique, de la saison, de l'hydraulique du cours d'eau, de la position relative du niveau de la nappe par rapport à celle du niveau de l'eau en surface, et des caractéristiques physiques de la couche de sédiments du fond du cours d'eau.

Du point de vu conceptuel, une typologie des échanges nappe- rivière peut-être établie suivant deux forçages majeurs : le gradient hydraulique et la structure géologique. Le gradient hydraulique définit la direction des échanges entre la rivière et l'aquifère et la structure géologique définit la capacité de transmettre les flux à travers l'interface. On distingue plusieurs situations :

- i) le complexe Rivière-ZH-Aquifère est complètement déconnecté. Dans ce cas, le cours d'eau s'écoule sur substrat imperméable caractérisé par une absence de la ZH et des échanges de flux.
- ii) le complexe Rivière-ZH est déconnecté de l'aquifère, la zone hyporhéique est créée uniquement par l'infiltration des eaux des surface dans le sédiment.
- iii) le complexe Rivière-ZH-Aquifère est connecté et les échanges d'eau se font dans le sens de drainage et/ou de l'alimentation de la nappe.
- iv) un dernier cas particulier, où le cours d'eau s'écoule sur substrat imperméable avec une présence de zone hyporhéique latérale (sur les bords de la rivière) et au niveau du lit majeur uniquement.

Sur le plan méthodologique, les interactions nappe-rivière peuvent être abordées de différentes façons selon l'objectif de l'étude, la discipline et les échelles considérées. L'hydrogéologue s'intéresse aux flux traversant le fond de la rivière, aux chemins d'écoulement dans la zone hyporhéique (hyporheic flowpaths), à la vitesse des écoulements de subsurface et aux temps de transit (Packman and Bencala, 2000). Alors que d'autres disciplines s'orientent vers les interactions entre les processus biogéochimiques et les fonctions écologiques (Boulton et al., 1998 ; Dahm et al., 1998 ; Marmonier et al, in press ; Wroblicky et al. 1998). Il s'agit généralement de méthodes indirectes qui permettent de localiser et d'identifier le sens des échanges de flux en utilisant des traceurs (naturel ou artificiel) et des indicateurs biologiques. Les méthodes de

quantification restent très peu nombreuses et concernent en majorité la modélisation numérique. Dans les dix dernières années, un effort considérable sur le développement d'instruments de mesure automatique *in situ* a été consenti. Ces efforts ont notamment porté sur l'utilisation des approches thermiques via le déploiement de capteurs thermiques dans la zone hyporhéique (Conant, 2004), (Anibas *et al.*, 2011; Brown *et al.*, 2005; "Conant, 2004.pdf," n.d.; Constantz, 2008; Cuthbert *et al.*, 2010; Gordon *et al.*, 2011; Greswell *et al.*, 2009; Hatch *et al.*, 2006; Schmidt *et al.*, 2006; Westhoff *et al.*, 2011) et l'utilisation de la fibre optique (TDS) à grande échelle spatiale (Selker *et al.*, 2006 ; Lane, 2007 ; Lowry *et al.*, 2007 ; Slater *et al.*, 2010 ; Vogt *et al.*, 2010 ; Jensen and Engesgaard, 2011).

En raison de la complexité de l'interface nappe-rivière et de la forte variabilité spatio-temporelle des processus, la quantification des échanges de flux nécessite une approche pluridisciplinaire (Sophocleous, 2002; Winter, 1999; Woessner, 2000) et multi-échelle (Scanlon *et al.*, 2002). Plusieurs méthodes de mesure doivent aussi être combinées afin de limiter les erreurs et valider les estimations (Fleckenstein *et al.*, 2010).

L'objectif de ce rapport est de faire le point sur les différentes méthodes de caractérisation et quantification des échanges nappe-rivière, aussi bien du point de vue expérimental (mesures de terrain plutôt locales) que de la modélisation spatialisée qui permet d'aborder le problème à l'échelle régionale. Nous dresserons un aperçu des approches et des méthodes les plus utilisées pour l'identification et la caractérisation des interactions à l'interface nappe-rivière. Chaque méthode est brièvement décrite. Les méthodes sont regroupées en mesures directes des flux d'eau et en mesures indirectes regroupant les méthodes de traçage (chimique, physique et biologique), les méthodes hydrologiques basées sur la loi de Darcy et sur le bilan hydrologique, les méthodes biologiques et les méthodes géophysiques. La pertinence des différentes méthodes et leur applicabilité aux différentes échelles de temps et d'espace sont discutées.

Par ailleurs, la modélisation des échanges nappe-rivière a évolué rapidement au cours des dernières années, permettant d'aborder l'interface nappe-rivière comme un seul continuum (Jones *et al.*, 2006, 2008; Kollet and Maxwell, 2006; Panday and Huyakorn, 2004; VanderKwaak and Loague, 2001; Werner *et al.*, 2006). Ainsi, les modèles hydro(géo)logiques couplés capables de simuler les interactions nappe-rivière sont de plus en plus utilisés pour mener des études interdisciplinaires en sciences hydrologiques (Ebel *et al.*, 2009). Ils ont permis de mieux comprendre certains problèmes scientifiques qui étaient difficiles à quantifier par les méthodes expérimentales classiques (Loague *et al.*, 2006). Les approches de modélisation seront abordées dans la dernière partie de ce rapport.

2 Méthodes directes

Les méthodes de quantification des échanges de flux entre la rivière et l'aquifère sont peu nombreuses. Elles nécessitent des efforts importants pour tout d'abord développer des outils métrologiques, puis les mettre en œuvre *in situ*. Les méthodes directes utilisent des instruments qui mesurent directement le débit d'eau à l'interface eau de surface-nappe souterraine. Elles sont généralement mises en œuvre sur de petites extensions spatiales. Elles sont de plus spatialement ponctuelles et parfois fournissent des données non continues dans le temps. Il existe deux méthodes couramment utilisées : le compteur d'exfiltration et le jaugeage différentiel.

2.1 Le compteur d'exfiltration (Seepage meters)

La méthode de mesure de l'exfiltration est le dispositif le plus utilisé pour la mesure directe des flux d'eau. Cette méthode, originellement développée pour des lacs et des estuaires, a été utilisée dans de nombreuses études pour la mesure de flux d'eau à travers le lit mineur des cours d'eau (Lee et Hynes, 1978; Libelo et MacIntyre, 1994; Landon *et al.*, 2001 (Alexander & Caissie, 2003)). Le concept de base du compteur d'exfiltration est de couvrir et isoler une partie de l'interface eau-sédiment avec une chambre ouverte à la base et de mesurer sur un intervalle de temps donné la variation du volume d'eau (gain et perte) contenue dans un sac attaché à la chambre.

Le compteur d'exfiltration présente l'avantage de permettre l'estimation de la perméabilité des sédiments, ainsi que le prélèvement d'eau pour l'analyse chimique. Cette méthode peut être utilisée pour valider des méthodes indirectes. Toutefois, cela ne peut être entrepris que lorsque les incertitudes et les erreurs potentielles de mesure ont été déterminées et réduites au minimum. Elle est utile pour définir les différences relatives du flux d'exfiltration, en particulier pour la cartographie des « hot spots ».

Par contre, le compteur d'exfiltration présente l'inconvénient de ne fournir que des mesures ponctuelles

spatialement. Il est difficile de faire des interpolations spatiales significatives. Cette méthode a tendance à avoir une mauvaise reproductibilité de la mesure en raison de la variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques d'échange. Les erreurs de mesure sont importantes. En règle générale, cette méthode ne convient pas pour une implantation sur des lits durs, des sédiments graveleux ou en présence de mauvaises herbes en raison de la difficulté de fournir une étanchéité efficace et une profondeur d'installation souhaitée.

2.2 Jaugeage différentiel

Le jaugeage différentiel est utilisé pour contrôler la continuité hydraulique. Le principe est de mesurer le débit dans des sections successives du cours d'eau drainant des surfaces ou sous bassins emboîtés. La relation de proportionnalité entre le débit et la surface drainée sur chaque section et son évolution au cours du temps est alors estimée. Cette méthode peut être couplée avec le jaugeage par dilution ou par injection de traceur (McCallum *et al.*, 2012a; Ruehl *et al.*, 2006) pour mieux estimer la dilution et les mélange d'eau et ainsi le volume échangé (Harvey and Lee, 2000).

3 Méthodes indirectes

La plupart des méthodes d'estimation des échanges d'eau entre les eaux de surface et souterraines sont indirectes. Cela signifie que la nature et l'ampleur des flux échangés sont déduites ou calculées grâce à l'estimation de paramètres tels que la charge hydraulique, la conductivité hydraulique, la température, les isotopes, les indicateurs biologiques, etc.

3.1 Méthodes hydrologiques

En plus de la méthode par jaugeage différentiel (cf. 2.2), les méthodes hydrologiques regroupent l'ensemble des techniques de quantification des échanges basées sur le principe de la loi de Darcy. Dans cette partie, nous reprenons les travaux de (Kalbus *et al.*, 2006) qui a fait une synthèse assez exhaustive de ces approches. Elle concerne essentiellement l'estimation du gradient hydraulique par la mesure de paramètres de la conductivité hydraulique (Hendricks, 1999); Landon *et al.*, 2001), de la porosité, de la vitesse des écoulements des eaux souterraines (Kalbus *et al.*, 2006). Le calcul de ces paramètres peut être réalisé grâce à plusieurs méthodes en laboratoire ou *in situ*. Généralement ces méthodes mettent en œuvre l'utilisation de traceurs naturels et/ou artificiels (Cox, Su, & Constantz, 2007; Drahota *et al.*, 2012; Hinkle *et al.*, 2001; Knust & Warwick, 2009; Krause, Heathwaite, Binley, & Keenan, 2009; Kranes, & Siegel, 2010; López Correa *et al.*, 2012; J. L. McCallum, Cook, Berhane, Rumpf, & McMahon, 2012a, 2012b; J. W. N. Smith *et al.*, 2008; Stachelhaus, Moran, & Kelly, 2012; Ward, Gooseff, & Singha, 2010) ainsi que des essais de pompage.

D'autres méthodes analytiques (sans base physique) telles que le bilan hydrologique (ref), la séparation de l'hydrogramme (ref) et de traitement du signal (Bayazit *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2008; Fleming *et al.*, 2002; Giudici & Vassena, 2007; Gordon *et al.*, 2012; Hatch *et al.*, 2010; Kumar *et al.*, 1994) sont également utilisées pour quantifier les échanges nappe-rivière.

3.1.1 Méthode basée sur la loi de Darcy

Les méthodes basées sur le principe de la loi de Darcy concernent essentiellement le calcul du gradient hydraulique entre la nappe et la rivière, et de la conductivité hydraulique du milieu. Pour le gradient hydraulique, des piézomètres de bordure mesurant les niveaux de la nappe sont utilisés et mis en regard des niveaux d'eau dans la rivière. Des essais de pompage sont également mis en œuvre pour estimer la transmissivité de l'aquifère d'accompagnement de la rivière.

Le gradient hydraulique est calculé à partir de la différence de charge hydraulique mesurée sur un ensemble de piézomètres et/ou de puits. Dans le cas d'écoulements souterrains horizontaux, le gradient hydraulique est calculé à partir de la différence de charge entre des points séparés par une distance horizontale donnée. La mesure distribuée de la charge permet d'établir des cartes spatiales de piézométrie et de flux. Alors que dans le cas d'écoulements verticaux (tels que les échanges nappe-rivière), les piézomètres doivent être installés au même endroit sur des profondeurs différentes et le gradient hydraulique est calculé à partir de la différence de charge entre deux profondeurs données. Cette méthode est plus adaptée et largement utilisée pour la mesure des échanges de flux au niveau de la nappe alluviale (Freeze and Cherry, 1979) et de la zone hyporhéique (Baxter *et al.*, 2000; Kalbus *et al.*, 2006). Cette méthode est appropriée pour les études locales, et permet de détailler l'hétérogénéité des conditions d'échange.

La conductivité hydraulique peut être mesurée de différentes façons :

- i) par l'analyse des courbes granulométriques des sédiments qui permet d'établir des relations empiriques entre les paramètres statistiques des courbes et la conductivité hydraulique (Hazen, 1892; Schlichter, 1905; Terzhagi, 1925; Shepherd, 1989).
- ii) par test de perméabilité en colonne d'infiltration (Hvorslev, 1951; Freeze and Cherry, 1979; Todd and Mays, 2005) et in situ (Cardenas and Zlotnik, 2003), ou par essai de pompage in situ (Theis (1935), Cooper and Jacob (1946), Chow (1952), Neuman (1975) Landon et al. (2001). Les essais de pompage fournissent des valeurs moyennes de conductivité hydraulique sur un grand volume de sous-sol. Ainsi, ces valeurs sont plus représentatives que celles obtenues par des mesures ponctuelles ou par des essais en colonne. Elles sont aussi moins sensibles aux hétérogénéités du milieu et aux chemins d'écoulements préférentiels.

D'autres paramètres sont utilisés pour estimer les propriétés hydrauliques du milieu et les connectivités hydrauliques telles que les vitesses d'écoulement de la nappe qui sont estimées par injection d'un traceur conservatif (cf. 2.2.2). Les temps de transit sont estimés entre le point d'injection et le point suivi moyennant l'estimation de la porosité du milieu (Freeze and Cherry, 1979).

L'hypothèse sous-jacente à l'utilisation de ces méthodes est que le milieu poreux étudié est continu (absence de discontinuités de type fractures) homogènes (hypothèse de milieu équivalent). Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues sont des moyennes ponctuelles. Un échantillonnage spatial représentatif nécessite le déploiement de dispositifs expérimentaux nécessitant l'implantation de piézomètres et de sondes de mesure.

3.1.2 Analyse de l'hydrogramme

Les développements théoriques et empiriques sur l'analyse de l'hydrogramme, notamment des décrues ont été introduit par Boussinesq (1904), Maillet (1905) et Horton (1933). Ces études concernent la séparation de l'hydrogramme (Linsley et al., 1958), l'analyse des fréquences de débit (Nathan and McMahon, 1990; Fetter, 1994) et l'analyse des courbes de récession (décrues) et des étiages (Hewlett and Hibert, 1963; Hino and Hasebe, 1984; Rutledge and Daniel, 1993; Chapman, 1999). Le débit est décomposé en une composante de base associée aux écoulements lents de la nappe et une composante rapide liée au ruissellement de surface.

L'analyse de l'hydrogramme est une méthode efficace pour estimer la contribution des écoulements souterrains aux débits des rivières. Elle fournit des informations sur la variabilité temporelle de ces contribution, mais rarement sur la distribution spatiale des échanges nappe-rivière. Il s'agit d'une approche globale qui intègre l'ensemble des processus hydrologiques se développant dans une unité hydrologique fonctionnelle telle que le bassin versant.

3.2 Méthodes hydro-chimiques

L'interprétation de la composition chimique de l'eau peut fournir des indications sur connectivité entre le cours d'eau et l'aquifère (Constantz, 2008); Lautz, 2010; Lautz, et al., 2010; Schornberg et al., 2010; (Vogt et al., 2010b); (Vogt et al., 2010a); (Westhoff et al., 2010). Les éléments dissous peuvent être utilisés comme traceurs naturels de l'origine des eaux. Par exemple, les fortes concentrations de radon dans les eaux de surface est un indicateur d'une contribution significative de la nappe au débit des rivières. L'objectif de ces traçages est d'identifier l'origine des eaux et les chemins d'écoulement suivis. Il existe plusieurs types de traceurs. Outre certains indicateurs classiques comme la conductivité électrique (Oxtobee and Novakowski 2002) et le pH des eaux, les traceurs naturels sont présents dans l'environnement. Les plus couramment utilisés sont les éléments géochimiques majeurs (calcium, magnésium, sodium, chlorure, bicarbonates), ainsi que les isotopes stables présents dans la molécule d'eau – oxygène 18 (^{18}O) et deutérium (^2H) - et les isotopes radioactifs comme le tritium (^3H) et le radon (^{222}Rn). Finalement certains traceurs sont générés par les activités anthropiques, comme par exemple les produits chimiques industriels tels que les chlorofluorocarbones (CFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6).

3.2.1 Les éléments majeurs

Des cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et des anions (chlorure, bicarbonates, sulfate, et bromure) ont été utilisés comme traceurs pour déterminer les flux d'eau souterraine en période de crue et au cours des périodes d'étiage. Les eaux souterraines peuvent avoir une chimie nettement différente de celle des cours d'eau. Les solutés présents dans les eaux souterraines proviennent de deux sources principales:

- i) des eaux de pluie qui sont concentrées en sels marins et en poussière continentale
- ii) de la minéralisation des eaux par les processus d'altération et par les interactions eau-roche. Les processus qui affectent l'hydrochimie sont les réactions acide-base, la précipitation et la dissolution des minéraux, la sorption et l'échange d'ions, les réactions d'oxydo-réduction, les réactions de biodégradation, et le dégazage. L'hydrochimie peut être utilisée pour comprendre les processus clés qui ont eu lieu pendant la circulation de l'eau à travers les aquifères et les rivières. Pour appliquer ces méthodes, il convient d'échantillonner les eaux de la rivière, de la nappe et de pluie.

Les teneurs de ces éléments dissous dans les eaux sont généralement utilisées pour établir des modèles de mélange eau de surface eau souterraine. Les ions majeurs sont souvent présentés sous forme graphique. Par exemple le diagramme de Piper décrit le faciès chimique de l'eau, en distinguant sa composition en anions et cations (Hem, 1989). De nombreux outils existent, parmi lesquels on peut citer les diagrammes de Schoeller et Dourov (Howard et Lloyd, 1983; Petalas et Diamantis, 1999). Les relations et l'évolution entre compositions dominantes (par exemple Ca-HCO₃ / Na-Cl) indiquent généralement les parts relatives des temps de mélange entre les masses d'eau et des temps de transfert des écoulements régionaux (Laurent et al, 1976).

3.2.2 Les isotopes

Le deutérium, l'oxygène-18 et le radon-222 sont les isotopes les plus couramment utilisés pour étudier les interactions eaux de surface-eaux souterraines. Les isotopes stables de l'eau (¹⁸O, ¹⁶O, Deutérium ou ²H) sont utilisés pour comprendre l'origine des eaux dans des environnements variés (Coplen et al., 2000 ; Kendall et Caldwell, 1998). Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène, notées respectivement $\delta^{18}\text{O}$ et δD , s'expriment en abondance relative des deux isotopes des éléments considérés par rapport à un standard international qui est l'eau de mer. Le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD des précipitations alimentant les rivières et les nappes sont principalement contrôlés par la température de surface lors de la formation des pluies. On observe un effet de latitude auquel se superpose un effet saisonnier, et également un effet d'altitude. Le principal processus à l'origine de la modification du $\delta^{18}\text{O}$ et du δD d'une eau de surface est le mélange avec des eaux d'une ou plusieurs origines différentes. Ces caractéristiques montrent le potentiel des isotopes stables de l'eau pour différencier des sources d'eau et identifier les zones de recharge des eaux souterraines. Cet outil géochimique a été utilisé avec succès dans des environnements très variés (Gurrieri and Furniss, 2004 ; Rademacher et al., 2002 ; Maréchal and Etcheverry, 2003 ; Barbieri et al., 2005), y compris et depuis longtemps dans le domaine des sites et sols pollués (Petelet-Giraud et al., 2009).

3.2.3 Les traceurs artificiels

Les essais de traçage sont également utilisés pour quantifier les interactions nappe-rivière, Ils fournissent des informations sur les temps de séjour, sur la vitesse d'écoulement, sur les cinétiques de dispersion dans l'aquifère, et sur le degré de connexion hydraulique avec le cours d'eau (Flury et Wai, 2003; Otz et al, 2003). Ces essais consistent à injecter une certaine quantité d'un traceur (particules, colorant) en un point (puits) et de suivre dans le temps et dans l'espace son arrivée en d'autres points comme le lit mineur de la rivière ou un piézomètre de bordure.

La mesure spatialement distribuée d'un traceur est utile pour cartographier des flux d'eaux souterraines. Les isotopes stables et radioactifs peuvent être utilisés comme études préliminaires ou comme moyen indépendant pour confirmer les résultats d'autres méthodes. Par contre, la logistique inhérente à de telles mesures, ainsi que les coûts financiers des analyses en laboratoire sont deux contraintes fortes à la mise en œuvre de ces méthodes.

3.3 Méthodes biologiques

Plusieurs études ont été menées pour caractériser et comprendre les déterminants du biotope de la zone hyporhéique, aussi appelé « écotone » (Orghidan, 1959). Rappelons que la zone hyporhéique est une zone de transition écologique entre l'écosystème rivière et l'écosystème souterrain (sédiment du lit du cours d'eau et zone de mélange avec les eaux souterraines locales). Certaines plantes et animaux peuvent être utilisés pour identifier la nature et l'étendue des interactions nappe-rivière. Les indicateurs écologiques les plus utilisés sont les plantes aquatiques, phréatophytes (Rivoire and Bornette, 2006) et la diversité de la

communauté microbienne (Iriba et al., 2008 ; Lowell et al., 2009) et fongiques (Barlocher et al., 2008 ; Cornut et al., 2010). Un bio-indicateur est composé d'une espèce ou d'un groupe d'espèces qui nous renseigne sur les modifications biotiques ou abiotiques d'un cours d'eau et donc sur les variations de différents facteurs du milieu (Marmonier et al., in press). Plusieurs types de bio-indicateurs comme les diatomées, les macrophytes, les macroinvertébrés benthiques peuvent être utilisés pour caractériser l'origine des eaux grâce à leurs signatures faunistiques.

Les premières études au niveau de cette zone concerne la caractérisation des espèces faunistiques (Karaman, 1935) et floristiques (Kjellin et al., 2007; Lafont et al., 1992) indépendamment de leur interaction avec l'habitat physique, l'hydrologie, la dynamique fluviale. Plus récemment, des études sur la relation entre les communautés écologiques et les conditions environnementales ont été développées (Bretschko and Klemens, 1986 ; Anielopol and Marmonier, 1992). Ces études ont montré que l'activité biologique dépend de plusieurs facteurs :

- i) du flux d'eau (Klijn and Witte, 1999),
- ii) du cycle du carbone et de l'évolution de la matière organique (Bretschko and Leichtfried, 1987 ; Finaly et al., 1993),
- iii) du recyclage de l'azote (Dahm et al., 1987 ; Lefebvre et al., 2005 ; Birgand et al., 2007),
- iv) des apports de phosphore en rivière (Vervier et al., 2009).

Le suivi des indicateurs écologiques peut être utile pour comprendre les variations saisonnières des flux d'eau échangés entre la nappe et le réseau hydrographique. Un tel suivi est important dans l'évaluation et la gestion des écosystèmes tributaires des eaux souterraines. Des études plus détaillées, telles que des relevés dans la zone hyporhéique nécessitent plus de temps et une main-d'œuvre experte. L'utilisation de ces méthodes reste assez limitée car elle repose sur l'expertise de l'observateur pour l'identification des espèces biologiques. De plus, les indicateurs écologiques sont qualitatifs. Ils peuvent localiser des zones d'échange et identifier un sens moyen d'échange, mais aujourd'hui ils ne permettent pas de fournir des informations quantitatives sur les flux.

3.4 Méthodes géophysiques

3.4.1 Méthodes géophysiques traditionnelles :

Les méthodes géophysiques ont deux objectifs différents : la caractérisation du milieu et de la connectivité rivière-substrat géologique (Lischeid *et al.*, 2010) et la quantification des processus dynamiques (Cardenas *et al.*, 2010) (Ward *et al.*, 2010). On distingue plusieurs classes de méthodes (cf. Tableau 1) :

La résistivité / conductivité électrique, est basée sur les différences de tension d'un courant électrique mesurées entre électrodes émettrices et réceptrices. La distorsion du champ électrique et les variations de conductivité, induites par la variabilité de la salinité, de la texture ou de l'humidité, peut être visualisée verticalement à des profondeurs différentes. Les investigations peuvent être menées sur des transects parallèles ou perpendiculaires à l'écoulement. Aussi, les panneaux géo-électriques, soit submersibles ou flottantes, sont utilisés pour cartographier la conductivité électrique de la colonne d'eau et des sédiments sous-jacents (Allen et Merrick, 2004). Cette technique est particulièrement efficace dans la cartographie des intrusions salines ou pour réaliser des traçages au sel.

L'électromagnétisme consiste à mesurer le champ magnétique secondaire généré par des courants électriques induits. Différents instruments sont utilisés couramment.

La Sismique qui consiste à mesurer des réflexions ou des réfractions d'ondes sismiques générées à partir d'une source d'énergie à la surface (telle qu'une masse ou un marteau, une explosion, une plaque vibrante). Cette méthode permet de distinguer les interfaces (en termes de changement de propriétés) telles que la stratigraphie, les structures géologiques ou encore l'interface hydrologique zone non saturée-zone saturée. La cartographie de la géométrie des aquifères et des substratums rocheux permet de contraindre l'écoulement des eaux souterraines et de détecter les voies d'écoulements préférentiels (paléochenaux).

Tableau 1 : Synthèse des méthodes géophysiques (extrait de <http://www.negeophysical.com/#bore>)

Outil	Paramètres mesurés	
Gamma naturel	Radioactivité gamma naturelle.	Lithologie et l'estimation de la teneur en argile
Temperature De Fluide	La température du fluide de forage.	Indique gradient géothermique, et le débit d'eau dans le forage ou entre puits et des fractures.
Résistivité de fluide	Résistivité de fluide de forage.	Indique le débit d'eau dans les puits de forage, ou entre trous de forage et des fractures, et qualité de l'eau.
Résistance d'un point unique	Résistance des matériaux entre la sonde et l'électrode de surface au sol.	Lithologie, l'identification de fracture,
Résistivité normale	Résistivité apparente du matériau.	Lithologie et qualité de l'eau.
Potentiel spontané (self potentiel PS)	Potentiels électriques entre la sonde et des électrodes de surface.	Lithologie, qualité de l'eau, et, dans certains cas, les fractures dans la roche cristalline résistantes.
EM Conductivite (Induction)	La conductivité électrique dans le milieu environnant du forage.	Localisation des panaches de contaminants, les unités d'argile conducteurs, ou des fractures du socle rocheux. Suivre l'évolution de la qualité de l'eau au fil du temps.
TeleViewer ACOUSTIQUE	Fournit une image acoustique générée par les murs de puits	L'exploitation forestière structurel, l'identification et l'orientation des fractures et la foliation; examen de l'enveloppe ou la construction de puits.
TeleViewer OPTIQUE	Fournit une image optiquement généré par les murs de puits	lithologique et structurale, l'identification de l'orientation de la structure et des changements lithologiques; examen de l'enveloppe ou la construction de puits.

Le Radar, permet de mesurer la réflectance de micro-ondes transmises. Cette méthode est utilisée pour interpréter la teneur en eau et la composition chimique du profil de sol peu profond. Le géoradar du sol consiste à mesurer les réflectances des impulsions à haute fréquence pour cartographier, près de la surface, les caractéristiques géologiques;

Avantages et inconvénients

Les méthodes géophysiques offrent des possibilités d'investigation assez rapide et non destructive. Elles peuvent fournir une bonne résolution de la structure spatiale notamment au voisinage des cours d'eau. Cependant, la réalisation et l'interprétation de ces campagnes peuvent être complexes et nécessitent des équipements spécifiques et un soutien logistique. Le traitement des données est complexe et exige une phase d'étalonnage, de calibration et d'inversion des données acquises sur le terrain. L'interprétation des résultats se fait souvent de manière couplée avec d'autres sources de données comme des carottages par exemple. Enfin la mise en place sur le terrain n'est pas toujours aisée, notamment sur des terrains accidentés, ou en présence d'une végétation abondante. La présence de clôtures métalliques ou de voies routières fréquentées peut rendre certaines méthodes caduques du fait de l'apparition de courants induits trop forts.

3.4.2 Méthodes thermiques

De nouvelles méthodes géophysiques ont émergé ces dernières années pour le suivi des processus hydrologiques et pour quantifier les flux entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Ces méthodes utilisent essentiellement le suivi de la température comme traceur naturel des flux thermiques et indirectement des flux d'eau. La différence de température entre les eaux de surface et les eaux de la nappe peut être utilisée pour estimer les écoulements de la nappe et les échanges de flux avec le cours d'eau

(Kalbus *et al.*, 2006 ; Constantz, 2008). Le transfert de la chaleur dans la ZH résulte d'une combinaison de transport de chaleur par convection (le transport de chaleur par l'eau) et par conduction (le transport de chaleur par conduction thermique à travers la phase solide et le liquide de la ZH). Ces processus sont décrits par l'équation de transport de chaleur de Domenico and Schwartz (1998) qui est analogue à l'équation d'advection-dispersion du transport de soluté dans les eaux souterraines. Un des intérêts majeurs de ces méthodes est que la température est un paramètre facile à mesurer.

Une première approche d'estimation de flux d'eau à travers le lit de la rivière utilise des capteurs thermiques qui mesurent des profils de température dans la ZH à différentes profondeurs ((Anderson, 2005; Anibas *et al.*, 2011, 2009; Banzhaf & Scheytt, 2009; Brown *et al.*, 2005; Cho *et al.*, 2009; Constantz, 2008; Duque *et al.*, 2010; Essaid *et al.*, 2008; Fanelli & Lautz, 2008; Ferguson *et al.*, 2006; Ferguson, 2007; Fleckenstein *et al.*, 2010; Foulquier *et al.*, 2009; Gordon *et al.*, 2011; Grassi *et al.*, 2007; Hanrahan, 2008; Hatch *et al.*, 2006; Hyun *et al.*, 2011; Kalbus *et al.*, 2007; Keery *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2008; Lautz & Fanelli, 2008; Li *et al.*, 2009; Loheide II & Gorelick, 2006; Loheide & Booth, 2011; Loheide *et al.*, 2009; Lowry *et al.*, 2007a, b; Miyakoshi *et al.*, 2007; Moffett *et al.*, 2008; Mutiti & Levy, 2010; Rau *et al.*, 2010; Rūhaak *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2006; Schmidt, 2009; Schornberg *et al.*, 2010; Selker *et al.*, 2006; Vandenbohede *et al.*, 2008; Verdoya *et al.*, 2007; Vogt *et al.*, 2010a). L'hypothèse sous-jacente est que les variations de la température sont dues à des variations spatiales de flux d'eau à travers la ZH. Pour analyser ces données, une relation empirique entre les profils de température et les flux d'eau peut être obtenue à l'aide d'une solution analytique unidimensionnelle de l'équation de transport de chaleur (Bredhoeft et Papadopolus, 1965). De plus, l'utilisation de séries temporelles de profils verticaux de température permet de quantifier les changements temporels des flux échangés le long d'un tronçon de rivière (Keery *et al.*, 2007 ; Constantz *et al.*, 2001; Duque *et al.*, 2010).

Une deuxième approche concerne la mesure spatiale (distribuée) de température à l'aide de la fibre optique (FO-DTS). Cette méthode est basée sur une technologie émergente qui pour le moment permet d'identifier au cours du temps le sens des échanges entre la nappe et la rivière (Anibas *et al.*, 2009; Dorigi & Collier, n.d.; Fausch *et al.*, 2002; Jensen & Engesgaard, 2011; Lane *et al.*, 2005; Lowry *et al.*, 2007a; Richar S., 2009; Selker *et al.*, 2006; Slater *et al.*, 2010; Vogt *et al.*, 2010c); Lane, 2007). Bien que les FO-DTS soient couramment utilisées pour surveiller l'état de digues, de barrages, et de puits de pétrole (ref), les applications de la FO-DTS en hydrologie sont peu nombreuses. Cette approche n'a pas encore été mise en œuvre pour la mesure opérationnelle des flux d'eau spatialement échangés entre la nappe et la rivière. Elle permet néanmoins de caractériser qualitativement les hétérogénéités spatiales des échanges (Conant, 2004; Schmidt *et al.*, 2007).

4 Utilisation de la modélisation

L'interprétation des mesures obtenues par des méthodes indirectes nécessitent d'utiliser des modèles afin d'estimer, par approche inverse, les flux hydriques échangés. Une autre fonction des modèles est de permettre un saut d'échelle du local au régional. Dans ce cas le modèle est considéré être un interpolateur spatio-temporel des données distribuées dans l'espace et le temps.

Les modèles de simulation cherchent à reproduire des phénomènes ou à prévoir le comportement d'un système soumis à des sollicitations données. On calcule l'évolution de variables inconnues (les sorties) en fonction des variables connues (les entrées) et des paramètres du système. Nous nous intéresserons uniquement à ces modélisations parmi lesquelles trois grands types de modèles émergent (Kauark-Leite, 1990) :

- i) Les modèles mécanistes qui englobent les modèles physiques et déterministes.
- ii) Les modèles conceptuels qui englobent les modèles paramétriques, boîte-grise, et synthétiques.
- iii) Les modèles empiriques qui englobent les modèles boîte-noire et entrée-sortie.

Les modèles mécanistes décrivent les mécanismes internes du système en se basant sur une bonne connaissance de la structure physique du système et sur des lois de la mécanique, de la physique (conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement, etc.), de la chimie (équilibre chimique

et thermodynamique, cinétiques chimiques) ou de la biologie (lois de comportement de croissance). Quand la structure du système et les lois qui le régissent sont inconnues, ou quand la mise en oeuvre d'un modèle mécaniste devient trop compliquée (informations insuffisantes), on procède à une simplification de la représentation du système en termes de géométrie et de processus. On aboutit alors à des modèles conceptuels qui ont pour objectif de décrire le concept physique de comportement du système par une représentation plus simple. Cette représentation, bien qu'ayant un sens physique, s'éloigne de la réalité physique. Ces modèles peuvent être distribués au sens spatial ou non. Pour leur part, les modèles empiriques ne font pas référence aux processus internes du système et se contentent simplement d'établir des relations directes entre les variables de forçage et les variables de sortie. Au sein de cette classification, certains modèles peuvent aussi être désignés comme étant stochastiques, s'ils prennent en compte le caractère aléatoire de certaines variables du modèle sous la forme d'une fonction de distribution de probabilités.

Pour analyser des données locales, les flux verticaux d'eau à travers la ZH peuvent être quantifiés en appliquant un simple modèle unidimensionnel basé sur une solution analytique de l'équation d'advection-diffusion de la chaleur (Schmidt et al., 2006). Cependant, nous nous intéresserons dans la suite de ce rapport au changement d'échelle à l'aide de modèles mécanistes.

4.1 Etat de l'art des modèles distribués basés sur des processus physiques

Depuis le début des années 70, de très nombreux modèles ont été utilisés pour étudier différents types d'hydrosystèmes. Ces modèles peuvent être soit empirique/conceptuel et/ou stochastique/basé sur une représentation à base physique des processus. Finalement Loague and VanderKwaak (2004) estiment que le nombre de modèles développés dépasse facilement le millier.

Les premiers modèles distribués basés sur des processus physiques de bassins sédimentaires ont été développés au cours des années 70 et 80 en utilisant un schéma numérique aux différences finies (Abbott et al., 1986a,b; de Marsily et al., 1978; Deschesnes et al., 1985; Girard et al., 1980; Freeze, 1971; Ledoux et al., 1989). Pour ce type d'approche, l'hydrosystème est divisé en compartiments qui échangent au travers d'interfaces. En première hypothèse la simulation des interfaces surface/subsurface, principalement le sol et l'interface nappe-rivière, a été pensée analogue à un modèle résistif pour lequel l'interface elle-même a une valeur de conductivité. Plus récemment (depuis la fin des années 90) de nouvelles approches ont été développées. Leur principale innovation est de coupler les processus de surface et de subsurface en s'appuyant sur la continuité du champ de pression de l'eau entre les deux compartiments (Ebel and Loague, 2006; Goderniaux et al., 2009; Kollet and Maxwell, 2006; Li et al., 2008; Mirus et al., 2007, 2009; Panday and Huyakorn, 2004; VanderKwaak and Loague, 2001; Weill et al., 2009). Cette approche est beaucoup plus coûteuse en temps de calcul car elle requiert, entre autres, un calcul de convergence numérique entre la pression de subsurface et celle de surface. De ce fait, l'utilisation de tels modèles n'est pas encore adaptée à la simulation de grands bassins sédimentaires d'une superficie supérieure à 1 000-10 000 km² pour de longues périodes temporelles (quelques décades).

4.2 Les défis de la modélisation des interactions nappe-rivière

années, il reste encore de nombreux défis à relever. Ces défis comprennent des questions liées à l'échelle spatiale et temporelle de modélisation (Kollet and Maxwell, 2006; Loague and Corwin, 2007; Loague and VanderKwaak, 2004; Sudicky et al., 2005 ; Werner et al., 2006), les conditions initiales (Noto et al., 2008), l'absence et/ou l'insuffisance des données mesurées pour le calage et validation de modèle (Beven and Binley, 1992; Lefebvre et al., 2010; Uhlenbrook et al., 1999), l'équifinalité (Beven, 2006; Beven and Freer, 2001a; Ebel and Loague, 2006), les difficultés conceptuelles et numériques (Jolly and Rassam, 2009).

En ce qui concerne les difficultés numériques, plusieurs techniques ont été adaptées pour surmonter ce problème, y compris des méthodes à pas de temps adaptatif (D'Haese et al., 2007; Park et al., 2008), des solveurs non-linéaires (Hammond et al., 2005; Jones and Woodward, 2001; Knoll and Keyes, 2004) et des Algorithmes parallèles (Kollet and Maxwell, 2006).

Malgré ces questionnements, de nombreuses problématiques hydrologiques sont traitées à l'aide de modèles couplés surface-souterrain (Tableau 2). Pour traiter ces problématiques, les niveaux de complexité des modèles est fonction du type d'équations utilisées pour décrire les écoulements, et de la dimension spatiale de discrétisation (1D, 2D ou 3D) (Tableau 3).

Selon Aral et Gundaz (2003), la modélisation des échanges nappe-rivière peut être réalisée avec succès en utilisant un modèle multi couches 2D pour l'écoulement souterrain couplé avec un modèle de type 1D pour les écoulements en rivière, comme le cas dans le modèle CASC2D (Julien et al., 1995), LISFLOOD (De Roo et al., 2000), MIKE-SHE (Refsgaard and Storm, 1995; Thompson et al., 2004), HEC-HMS/HEC-RAS (Knebl et al., 2005), CAWAQS (Flipo et al., 2007a) et EauDyssée (Habets et al., 2011 ; Monteil, 2011 ; Saleh et al., 2011). Un autre obstacle conceptuel est de déterminer la technique de couplage la plus efficace entre le modèle de surface et souterrain. Dans ce contexte, plusieurs options pour coupler les modèles de surface et souterrain sont disponibles (e.g. couplage séquentiel) (Panday and Huyakorn, 2004).

Tableau 2 Problèmes hydrologiques représentés par des modèles nappe-rivière couplés

Problématiques	Références
Impact des pratiques agricoles	(Ledoux et al., 2007; Schoups et al., 2005)
Signatures chimiques et isotopiques	(Baillie et al., 2007; Squillace, 1996; Whitaker, 2000)
Contribution des aquifères au fonctionnement hydrologique à l'étiage	(Baillie et al., 2007; Cox and Stephens, 1988; Gillespie and Perry, 1988; Goodrich et al., 1997; Harrington et al., 2002; Korkmaz et al., 2009; Ledoux, 1989; Lemieux et al., 2008; Marie and Hollett, 1996; Markstrom et al., 2008; Monteil, 2011; Osterkamp et al., 1994; Pearce et al., 1986; Peters and Ratcliffe, 1998; Plummer et al., 2004; Ponce et al., 1999; Sanford et al., 2004; Sorman et al., 1997; Stephens, 1988; Waichler and Wigmosta, 2004)
Problèmes liés aux barrages	(Francis et al., 2010; Heppner and Loague, 2008)
Transport des sédiments et l'érosion	(Ran et al., 2007)
Systèmes de zones humides et échanges avec le système estuarien	(Graham and Refsgaard, 2001; Langevin et al., 2005; Panday and Huyakorn, 2004; VanderKwaak and Loague, 2001; Yeh and Huang, 2003)
Problèmes d'hydrogéomorphologie	(BeVilleville, 2007; Ebel and Loague, 2008; Hodge and Freeze, 1977; Mirus et al., 2007; Wilkinson et al., 2002)
Interactions nappe lac	(Hunt et al., 2008; Kollet and Maxwell, 2006; Smerdon et al., 2007; Winter, 1998)
Contamination par les radionucléides	(Bixio et al., 2002; Dent and Henry, 1999; Lienert et al., 1994; McLaren et al., 2000; Von Gunten et al., 1988; Waber et al., 1990)
Les ruissellements	(Heppner, 2007; Kollet and Maxwell, 2006; Koster et al., 2000; Mirus et al., 2007; Morita and Yen, 2002; Qu and Duffy, 2007; VanderKwaak and Loague, 2001)
Transport de soluté dans les systèmes souterrains	(Sudicky et al., 2008; VanderKwaak, 1999; VanderKwaak and Sudicky, 2000)
Quantification des échanges nappe-rivière	(Brookfield et al., 2008; Cardenas and Gooseff, 2008; Gunduz and Aral, 2005; Osman and Bruen, 2002; Weng et al., 2003)

Tableau 3 Représentation des processus et dimension spatiale de modèles nappe-rivière couplés

Nappe			Rivière			Références
Dimension	Zone	Solution	Dimension	Equation	Solution	
1D	Non saturée	Empirique	1D	Empirique	Numérique	(Moore and Grayson, 1991; Ross et al., 1979)
1D	Non saturée	Numérique	1D	Cinématique	Numérique	(Alley et al., 1980; Smith and Woolhiser, 1971)
1D	Non saturée	Analytique	1D	Cinématique	Numérique	(Engman and Rogowski, 1974; Woolhiser et al., 1990a)
1D	Non saturée & saturée	Empirique	1D	Cinématique	Numérique	(Leavesley et al., 1983)
1D	Non saturée & saturée	Empirique	1D	Empirique	Numérique	(Beven and Kirkby, 1979)
2D	Non saturée	Analytique	1D	Empirique	Numérique	(Wigmosta and Burges, 1997)

Programme PIREN-Seine : Méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe-rivière

	& saturée					
2D	Non saturée & saturée	Analytique	1D	Cinématique	Numérique	(Smith and Hebbert, 1983)
2D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Cinématique	Numérique	(Beven et al., 1987)
2D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Diffusion	Numérique	(Gunduz and Aral, 2005)
2D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Saint-Venant	Numérique	(Abbott et al., 1986a; Akan and Yen, 1981a; Beven, 1977 ; Govindaraju and Kavvas, 1991)
2D	Non saturée & saturée	Numérique	2D	Saint-Venant	Numérique	(Liang et al., 2007; Sparks, 2004)
2D	Non saturée & saturée	Numérique	2D	Navier-Stokes	Numérique	(Bradford and Katopodes, 1998; Spanoudaki et al., 2009)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Équation de continuité	Numérique	(Merrit and Konikow, 2000; Prudic et al., 2004)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	isochrones	Numérique	(Ledoux et al., 1984)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Empirique	Numérique	(Binley et al., 1989; Wigmosta et al., 1994)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Cinématique	Numérique	(Graham and Refsgaard, 2001; Hussein and Schwartz, 2003; Sokrut, 2001)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Muskingum	Numérique	(David et al., 2010)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Muskingum-Cunge	Numérique	(Markstrom et al., 2008)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Diffusion	Numérique	(Jobson and Harbaugh, 1999; Morita and Yen, 2002; Panday and Huyakorn, 2004; Querner, 1997)
3D	Non saturée & saturée	Numérique	1D	Saint-Venant	Numérique	(Flipo et al., 2005; Freeze, 1972; Kollet and Maxwell, 2006; Swain and Wexler, 1996; VanderKwaak, 1999; Yeh and Huang, 2003)

4.3 La modélisation des échanges nappe-rivière à différentes échelles spatiale

Dans un contexte de modélisation des échanges nappe-rivière, l'échelle spatiale est définie par la dimension à laquelle les entités et les processus d'un bassin peuvent être observés ou caractérisés (Aral and Gunduz, 2003).

En général, les échelles spatiales de modélisation peuvent être classifiées en trois catégories :

- i) **Echelle locale** (du site expérimental). Les quantifications spécifiques ou expérimentales à un site donnent un aperçu des processus dans la zone d'interface entre la nappe et la rivière (1 m - 1 km).
- ii) **Echelle intermédiaire**. Par exemple la modélisation des lacs ou d'un tronçon de rivière (10 - 100 km).
- iii) **Echelle régionale**. La quantification des échanges nappe-rivière est placée dans un contexte hydro(géo)logique globale du bassin versant (> 100 km²).

Le Tableau 4 illustre l'utilisation de certains modèles hydro(géo)logiques appliqués aux différentes échelles. Chaque modèle possède différents niveaux de complexité, allant de modèles capables de simuler des hydrosystèmes régionaux (ex. MODHMS, MIKE SHE, EauDyssée) à des modèles qui simulent finement les interactions nappe-rivière à l'échelle locale (ex. InHM).

Tableau 4 Gamme de certains modèles hydro(géo)logiques appliqués à des échelles différentes

Modèle	échelle d'application (km ²)	Références
MEFIDIS	0.013 – 290	(Nearing et al., 2005; Nunes et al., 2006a; Nunes et al., 2005; Nunes et al., 2006b)
InHM	0.1 – 100	(Loague and VanderKwaak, 2002; Loague and VanderKwaak, 2004; VanderKwaak, 1999; VanderKwaak and Loague, 2001; VanderKwaak and Sudicky, 2000)
MODHMS	10 – 420	(Barr and Barron, 2009; Beeson et al., 2004; Panday and Huyakorn, 2004)
KINEROS2	6.4 – 750	(Al-Qurashi et al., 2008; Michaud and Sorooshian, 1994b; Semmens et al., 2008; Smith et al., 1995; Wheeler et al., 1991; Woolhiser et al., 1990b; Yatheendradas et al., 2008)
CASC2D	0.016 – 2300	(Jorgeson, 1999; Julien and Saghafian, 1991; Julien et al., 1995)
IHMM	10 – 50	(Georgakakos et al., 1988)
CAWAQS	jusqu'à 2500	(Flipo, 2005; Flipo et al., 2007a; Flipo et al., 2005)
MIKE SHE	1 – 100 000	(Abbott et al., 1986b; Abbott and Refsgaard, 1996; Andersen et al., 2001; Graham and Refsgaard, 2001; Olesen et al., 2000; Refsgaard, 2001; Refsgaard et al., 1998)
ArcEGMO	0.7 – 100 000	(Becker et al., 2002)
MODCOU/ EauDyssée	jusqu'à 100 000	(Ambroise et al., 1995; Boukerma, 1987; Gomez et al., 2003; Habets et al., 1999b; Habets et al., 2010; Monteil et al., 2010; Thierion et al., 2010)
Hydro-BEAM	jusqu'à 200 000	(Kojiri et al., 1998; Park et al., 2000; Tamura and Kojiri, 2002; Tokai et al., 2002)
WATFLOOD	jusqu'à 2000000	(Bingeman et al., 2006; Kouwen, 1988; Tao and Kouwen, 1989)

A l'échelle régionale, la majorité des modèles hydr(géo)logiques ont une capacité limitée pour prendre en compte les processus se développant localement (ex. pompage près de la rivière, effets de stockage dans la zone Hyporhéique, transfert des polluants) car ces processus nécessitent une discrétisation fine de domaine qui peut pénaliser l'efficacité des calculs, et éventuellement l'efficacité numérique du modèle.

En outre, des problèmes peuvent survenir quand les modèles régionaux sont utilisés pour simuler les

processus locaux ou quand les modèles locaux sont utilisés pour estimer des processus à large échelle (Aral and Gunduz, 2003).

C'est pourquoi des approches alternatives sont nécessaires pour compléter la gamme d'application de modèle (Werner et al., 2006). Tous ces facteurs confirment la nécessité de définir une méthodologie de changement d'échelle afin d'améliorer les simulations des échanges nappe rivière à différentes échelles.

5 Discussion

De nombreuses approches et méthodes sont utilisées pour mesurer les interactions nappe-rivière. Il s'agit généralement de méthodes d'identification, et rarement de quantification de flux échangés. Ces méthodes diffèrent selon l'approche disciplinaire et les échelles spatio-temporelles de la mesure (Tableau 5). Les méthodes hydrologiques (mesure d'exfiltration, charge hydraulique, tests de pompage, jaugeage différentiel, bilan hydrologique et analyse de l'hydrographe) et hydrochimiques (les traçages) sont classiquement les plus utilisées. Plus récemment, les indicateurs biologiques (Marmonier et al., in press) ou encore la température (Fleckenstein et al., 2010) ont été largement utilisés par la communauté scientifique. La détermination des flux est confronté au problème des hétérogénéités (Sophocleous, 2002) et à l'intégration (transpositions) des mesures à des échelles variables. En effet, exceptées les approches de modélisation, les études de quantification des échanges nappe-rivière sont réalisées soit à l'échelle ponctuelle, soit à l'échelle d'un tronçon de rivière. Elles sont donc peu représentatives de l'ensemble des processus qui ont lieu au sein du continuum bassin versant-rivière-zone hyporhéique-aquifère.

Les mesures ponctuelles (locales) donnent des informations précieuses sur l'hétérogénéité du paramètre mesuré. Elles sont généralement utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique et la connectivité nappe- rivière. Les études sur les processus dynamiques et la relation entre la dynamique hydrologique et les processus biologiques au sein de l'interface nappe-rivière sont peu nombreuses. Néanmoins, les paramètres étudiés à l'échelle ponctuelle et qui peuvent être mesurés simplement en utilisant des sondes, comme la pression ou la température, sont appropriés pour le suivi à long terme.

Les investigations à l'échelle du tronçon de rivière qui considèrent des flux à petite échelle ont besoin d'un réseau de surveillance de haute densité. En raison de l'effort d'instrumentation et de mesure, de telles études sont souvent limitées à une zone restreinte (Baxter et Hauer, 2000). Il y a donc un besoin de développement de méthodes quantitatives, peu coûteuses, qui permettent de caractériser les hétérogénéités spatio-temporelles et de quantifier les échanges nappe rivière.

Le choix de la méthode dépend donc des objectifs de l'étude. Pour les études régionales, les techniques de mesure à grande échelle telle que la modélisation sont les plus appropriées. Alors que les études de processus exigent des mesures de grande résolution. Toutes les méthodes comportent leurs limites et leurs incertitudes. Toutefois, une approche multi-échelles combinant plusieurs techniques peuvent considérablement réduire les incertitudes et contraindre les estimations de flux entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Finalement le choix d'un modèle qui sert à interpoler spatialement et temporellement des données est un compromis entre un certain nombre de facteurs tels que la précision requise, le type et la disponibilité des données, le coût de calcul, et l'échelle spatiale et temporelle d'analyse.

Tableau 5 : Synthèse des méthodes d'études des interactions nappe-rivière

Méthodes	Echelle spatiale			Echelle temporelle		Coût	Avantages	Inconvénients
	Locale Ponctuelle	Médiane Pleine alluviale	Régionale Bassin versant	Ponctuelle	Pluriannuelle Annuelle			
Compteur d'exfiltration (Seepage meter)	●	■		●		- - -	Mesure directe de flux Dispositif simple Méthode Semi-quantitative	Fortes incertitudes Mesure ponctuelle Inapplicable sur substrat dur
Jaugeage différentiel	●	■		●	■	- - -	Mesure simple et rapide bilans de fuite en rivière	Mesure ponctuelle Echanges non localisés dépend des points de jaugeage
Hydrologiques								
Basée sur la loi Darcy	●	■		■	■	- à +	Connaissance des niveaux d'eau en rivière et aquifère	Difficultés d'estimation des flux à partir de la conductivité hydraulique et de la perméabilité
Gradient hydraulique	●	■		●	■		identification des processus et du sens d'écoulement	Mesures ponctuelles difficile à interpoler spatialement
Conductivité hydraulique	●	■		●	■			
Analyse de l'hydrogramme	●		■	■	■	- à +	Estimation des contributions de la nappe et de la rivière et de la variabilité des échanges temporellement	Intègre l'ensemble des processus amont Nécessite des traçages et datations de masse d'eau
Hydro-Chimiques								
les éléments majeurs		■	■	●	■	- à +	Calcul des vitesses et des temps de résidence, des propriétés du milieu (transmissivité).	Traceur peut être influencé par les processus de dégradation, d'adsorption etc.
les isotopes		■	■	●	■		Compréhension du mélange des eaux	Mesure ponctuelle et instantanée
les traceurs naturels & artificiels		■	■	●	■			
Méthodes biologiques	●	■		●		- à +	Variations saisonnières du flux Localisation de point d'échanges et du sens du flux	Ponctuelle spatialement Uniquement qualitatif Dépendent de l'observateur
Géophysiques								
Thermique	●			●	■	- à +	Quantification de flux à haute résolution et avec précision Cartographie des échanges le long de la rivière	Calibration assez lourde Inversion des températures en flux Mesures ponctuelles en 1D
géophysique	●	■	■	●		- à +	Rapides et à large échelle Définition de la structure spatiale et de la connectivité cours d'eau/ substrat	Méthodes indirectes Calibration par d'autre méthode (carottage, géochimie etc.) approche statique et qualitative
Modélisation		■	■		■	- à +	Estimation de la variabilité spatiale et temporelle des flux Visualisation 3D des flux possible Test de scénarii	Nécessite une connaissance préalable des processus Mise en oeuvre et validation assez lourdes

6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le PIREN-Seine et l'ONEMA (Office National des Eaux et de Milieux Aquatiques), dans le cadre du projet NAPROM, qui ont permis de financer les deux bourses de post-doctorat.

7 Références bibliographiques

- Alexander, M.D. & Caissie, D., 2003. Variability and comparison of hyporheic water temperatures and seepage fluxes in a small Atlantic salmon stream. *Ground Water*, 41(1), p.72–82.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., E., O.C.P., J., R., 1986a. An introduction to the European Hydrological System -Système Hydrologique Européen, SHE. 2. Structure of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87: 61-77.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J., 1986b. An introduction to the European Hydrological System -Système Hydrologique Européen, SHE. 2. Structure of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology* 87: 61-77.
- Abbott, M.B., Refsgaard, J.C., 1996. *Distributed Hydrological Modelling*. Kluwer Academic, Dordrecht.
- Akan, A.O., Yen, B.C., 1981a. Mathematical model of shallow water flow over porous media. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 107(HY4): 479–494.
- Allen DA and Merrick NP, 2005. Surface water/groundwater interaction investigation using a towed geoelectric array. *Conference Proceedings. Irrigation Association of Australia*.
- Alley, W.M., Dawdy, D.R., Schaake, J.C., 1980. Parametric-deterministic urban watershed model. *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers* 106: 679–690.
- Al-Qurashi, A., McIntyre, N., Wheeler, H., Unkrich, C.L., 2008. Application of the KINEROS2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *Journal of Hydrology*, 355(1-4): 91.
- Ambroise, B., Perrin, J.L., Reutenauer, D., 1995. Multi-criterion validation of a semi-distributed conceptual model of the water cycle in the Fecht catchment (Vosges Massif, France). *Water Resources Research*, 31(6): 1467–1481.
- Andersen, J., Refsgaard, J.C., Jensen, K.H., 2001. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin -- model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247(3-4): 200.
- Anderson, M.P., 2005. Heat as a Ground Water Tracer. *Ground Water*, 43, p.951–968.
- Anibas, C. et al., 2009. Transient or steady-state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater-surface water exchange. *Hydrological Processes*, 23, p.2165–2177.
- Anibas, C. et al., 2011. A simple thermal mapping method for seasonal spatial patterns of groundwater-surface water interaction. *Journal of Hydrology*, 397(1-2), p.93–104.
- Aral, M.M., Gunduz, O., 2003. Scale effects in large scale watershed modeling. In: Singh, V.P., Yadava, R.N. (Eds.), *International Conference on Water and Environment*. WE, Allied Publishers, India, pp. 37–51.
- Baillie, M.N., Hogan, J.F., Ekwurzel, B., Wahi, A.K., Eastoe, C.J., 2007. Quantifying water sources to a semiarid riparian ecosystem, San Pedro River, Arizona. *Journal of Geophysical Research*, 112: G03S02.
- Banzhaf, S. & Scheytt, T., 2009. Auswirkung einer künstlichen Hochwasserwelle auf den fließgewässernahen Grundwasserleiter. *Grundwasser*, 14, p.265–275.
- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M., Marco, T., 2005. Stable isotope (2H , 18O and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Appl. Geochem.* 20, 2063–2081.
- Bärlocher F., Seena S., Wilson K.P. and Williams D.D., 2008. Raised water temperature lowers diversity of hyporheic aquatic hyphomycetes. *Freshwat. Biol.* 53, 368-379.
- Barr, A., Barron, O., 2009. Application of a coupled surface water-groundwater model to evaluate environmental conditions in the Southern River catchment. . CSIRO: Water for a Healthy Country

National Research Flagship.

- Baxter, C. V. and Hauer, F. R. 2000. Geomorphology, hyporheic exchange, and selection of spawning habitat by bull trout (*Salvelinus confluentus*), *Can. J. Fisheries and Aquatic Sci.*, 57(7), 1470–1481.
- Bayazit, M., öNöz, B. & Aksoy, H., 2001. Nonparametric streamflow simulation by wavelet or Fourier analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 46, p.623–634.
- Becker, A., Klocking, B., Lahmer, W., Pfitzner, B., 2002. The Hydrological Modelling System ArcEGMO In *Mathematical Models of Watershed Hydrology*. In: Singh, V.P., Frevert, D.K. (Eds.), Water Resources Publications, , Littleton, Colorado, pp. 891.
- Beeson, P., Duffy, C., Springer, E., Panday, S., 2004. Integrated hydrologic models for closing the water budget. *Whitewater River Basin, Kansas. Eos Trans. AGU*, 85(47), Fall Meeting Supplement, Abstract H34B-05.
- Beven, K., 1977 Hillslope hydrographs by the finite element method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2: 13–28
- Beven, K., 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1-2): 18.
- Beven, K., Kirkby, M.J., 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*. 24: 43–69.
- Beven, K.J., Binley, A.M., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6: 279-298.
- Beven, K.J., Calver, A., Morris, E.M., 1987. The Institute of Hydrology distributed model. Report 98, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Beven, K.J., Freer, J., 2001a. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems. *Journal of Hydrology*, 249: 11–29.
- BeVilLe, S.H., 2007. Physics-based simulation of near-surface hydrologic response for the Lerida Court landslide in Portola Valley, California, Stanford University, Stanford.
- Bingeman, A.K., Kouwen, N., ASCE, M., Soulis, E.D., 2006. Validation of the hydrological processes in a hydrological model. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 11(5): 451-463.
- Binley, A.M., Beven, K., Elgy, J., 1989. A physically-based model of heterogeneous hillslopes. II. Effective hydraulic conductivities. *Water Resources Research*, 25: 1227–1233.
- Bixio, A. et al., 2002. Modeling groundwater-surface water interactions including effects of morphogenetic depressions in the Chernobyl exclusion zone *Environmental Geology*, 42(2-3): 162-177.
- Boukerma, B., 1987. Modélisation des écoulements superficiels et souterrains dans le sud Ouest de la France: Approche du bilan hydrique., Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Boulton AJ, Findlay S, Marmonier P, Stanley EH, Valett HM. 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annu Rev Ecol Syst*;29:59–81.
- Boulton AJ, Findlay S, Marmonier P, Stanley EH, Valett HM. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annu Rev Ecol Syst* 1998;29:59–81.
- Boussinesq J, 1904. Recherches theoretique sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le debit des sources. *J. Math. Pure Appl.* 10 (5): 5-78.
- Bradford, S.F., Katopodes, N.D., 1998. Nonhydrostatic model for surface irrigation *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124 (4): 200–212.
- Brookfield, A.E., Sudicky, E.A., Park, Y.-J., 2008. Analysis of Thermal Stream Loadings In A Fully-Integrated Surface/Subsurface Modelling Framework. *IAHS-AISH Publication*, 321: 117–123.
- Brown, L.E., Hannah, D.M. & Milner, A.M., 2005. Spatial and temporal water column and streambed temperature dynamics within an alpine catchment: implications for benthic communities. *Hydrological Processes*, 19(8), p.1585–1610.
- Brunke, M. and Gonser, T. 1997. The ecological significance of exchange processes between river and

groundwater, *Freshwater Biology*, 37(1), 1–33, 1997.

- Cardenas, M. B. and Zlotnik, V. A.: A simple constant-head injection test for streambed hydraulic conductivity estimation, *Ground Water*, 41(6), 867–871, 2003.
- Cardenas, M.B. et al., 2010. Linking regional sources and pathways for submarine groundwater discharge at a reef by electrical resistivity tomography, 222Rn, and salinity measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 37(16), p.L16401.
- Cardenas, M.B., Gooseff, M.N., 2008. Comparison of hyporheic flow under uncovered and covered channels based on linked surfaceground-water simulations. *Water Resources Research*, 44: W03418.
- Chapman T, 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes* 13, 701-714.
- Chen, C.-S., Liu, C.-H. & Su, H.-C., 2008. A nonlinear time series analysis using two-stage genetic algorithms for streamflow forecasting. *Hydrological Processes*, 22, p.3697–3711.
- Cho, Y.M. et al., 2009. Assessment of Advective Porewater Movement Affecting Mass Transfer of Hydrophobic Organic Contaminants in Marine Intertidal Sediment. *Environmental science & technology*.
- Chow, V. T. 1952. On the determination of transmissivity and storage coefficients from pumping test data, *Trans. Am. Geophys. Union*, 33, 397–404.
- Conant, B., 2004. Delineating and quantifying ground water discharge zones using streambed temperatures. *Ground Water*, 42(2), p.243–257.
- Constantz, J., 2008. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. *Water Resources Research*, 44(December), p.1–20.
- Cooper, H. H. and Jacob, C. E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, *Trans. Am. Geophys. Union*, 27(4), 526–534.
- Coplen TB, 1993. Uses of environmental isotopes. In *Regional groundwater quality*, ed. W.M. Alley, pp 227-254. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Cornut J., Elger A., Lambrigt D., Marmonier P. and Chauvet E., 2010. Early stages of leaf decomposition are mediated by aquatic fungi in the hyporheic zone of woodland streams. *Freshwat. Biol.*, 55, 2541-2556.
- Cox, M.H., Su, G.W. & Constantz, J., 2007. Heat, Chloride, and Specific Conductance as Ground Water Tracers near Streams. *Ground Water*, 45, p.187–195.
- Cox, W.B., Stephens, D.B., 1988. Field study of ephemeral stream-aquifer interaction. , *Proceedings of the FOCUS Conference on Southwestern Ground Water Issues*. National Water Well Association, Dublin OH, pp. 337-358.
- Cuthbert, M. et al., 2010. Impacts of river-bed gas on the hydraulic and thermal dynamics of the hyporheic zone. *Advances in Water Resources*.
- D' Haese, C.M.F., Putti, M., Paniconi, C., Verhoest, N.E.C., 2007. Assessment of adaptive and heuristic time stepping for variably saturated flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53(7): 1173-1193.
- Dahm C.N., Trotter E.H. and Sedell J.R., 1987. Role of anaerobic zones and processes in stream ecosystem productivity. In: Averett R.C. and McKnight D.M. (eds.), *Chemical quality of water and the hydrologic cycle*, Lewis Publishers, Chelsea, 157-178.
- Dahm CN, Grimm NB, Marmonier P, Valett HM, Vervier P. 1998. Nutrient dynamics at the interface between surface waters and groundwaters. *Freshw Biol*;40: 427–51.
- Dahm CN, Grimm NB, Marmonier P, Valett HM, Vervier P. Nutrient dynamics at the interface between surface waters and groundwaters. *Freshw Biol* 1998;40: 427–51.
- Darcy, H. P. G. 856. *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*, Victon Dalmont, Paris, 1.
- David, C., Habets, F., Maidment, D.R., 2010. Rapid applied to the SIM-France model. Submitted to *Journal*

of Hydrological Processes (revision phase).

- de Marsily, G., Ledoux, E., Levassor, A., Poitrinal, D., Salem, A., 1978. Modelling of large multilayered aquifer systems : Theory and applications. *Journal of Hydrology* 36, 1–34.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Van Deursen, W.P.A., 2000. Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. *Hydrological Processes*(14): 1981-1992.
- Dent, C.L., Henry, J.C., 1999. Modelling nutrient-periphyton dynamics in streams with surface-subsurface exchange. *Ecological Modelling*, 122(1-2): 97.
- Deschesnes, J., Villeneuve, J.-P., Ledoux, E., Girard, G., 1985. Modeling the Hydrologic Cycle : The MC Model. Part I - Principles and Description. *Nordic Hydrology* 16, 257–272.
- Domenico A, Schwartz FW (1998) *Physical and chemical hydrology*, 2nd edn. Wiley, New York.
- Dorigi, J. & Collier, M., *Measuring Stream Dynamics with Fiber Optics*.
- Drahota, P. et al., 2012. Natural attenuation of arsenic in soils near a highly contaminated historical mine waste dump. *Science of The Total Environment*, 414(0), p.546–555.
- Duque, C., Calvache, M.L. & Engesgaard, P., 2010. Investigating river-aquifer relations using water temperature in an anthropized environment (Motril-Salobreña aquifer). *Journal of Hydrology*, 381(1-2), p.121–133.
- Ebel, B.A., Loague, K., 2006. Physics-based hydrologic-response simulation: Seeing through the fog of equifinality. *Hydrological Processes* 20: 2887–2900.
- Ebel, B.A., Loague, K., 2008. Rapid simulated hydrologic response within the variably saturated near surface. *Hydrological Processes* 22: 464–471.
- Ebel, B.A., Mirus, B.B., Heppner, C.S., VanderKwaak, J.E., Loague, K., 2009. First-order exchange coefficient coupling for simulating surface water-groundwater interactions: parameter sensitivity and consistency with a physics-based approach. *Hydrological Processes*, 23(13): 1949-1959.
- Elliott AH, Brooks NH. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: theory. *Water Resour Res* 1997;33:123–36.
- Elliott AH, Brooks NH. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: theory. *Water Resour Res* 1997;33:123–36.
- Engman, E.T., Rogowski, A.S., 1974. A partial area model for storm flow synthesis. *Water Resources Research* 10: 464–472.
- Essaid, H. et al., 2008. Using heat to characterize streambed water flux variability in four stream reaches.
- Fanelli, Rosemary M. & Lautz, Laura K., 2008. Patterns of Water, Heat, and Solute Flux through Streambeds around Small Dams. *Ground Water*, 46, p.671–687.
- Fausch, K.D. et al., 2002. Landscapes to Riverscapes□: Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes. *BioScience*, 52(6).
- Ferguson, G., Beltrami, H. & Woodbury, A.D., 2006. Perturbation of ground surface temperature reconstructions by groundwater flow. *Geophys. Res. Lett*, 33, p.L13708.
- Ferguson, Grant, 2007. Heterogeneity and Thermal Modeling of Ground Water. *Ground Water*, 45, p.485–490.
- Fleckenstein, J.H. et al., 2010. Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources*, 33(11), p.1291–1295.
- Fleming, S.W. et al., 2002. Practical applications of spectral analysis to hydrologic time series. *Hydrological Processes*, 16, p.565–574.
- Flipo, N., 2005. Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières: Application au bassin du Grand Morin. Doctorat Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives, CIG- Centre d'informatique géologique, ENSMP.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Théry, S., Ledoux, E., 2007a. Modeling nitrate fluxes at the catchment scale

using the integrated tool CAWAQS. . *Science of the Total Environment*, 375: 69-79.

- Flipo, N., Poulin, M., Even, S., Ledoux, E., 2005. Hydrological part of CAWAQS (CAatchment WATER Quality Simulator) : fitting on a small sedimentary basin. , *Proceedings of the SIL, Lahti. Verh. Internat. Verein. Limnol.* , pp. 768-772.
- Foulquier, A. et al., 2009. Thermal influence of urban groundwater recharge from stormwater infiltration basins. *Hydrological Processes*, 23, p.1701–1713.
- Francis, B.A., Francis, L.K., Cardenas, M.B., 2010. Water table dynamics and groundwater–surface water interaction during filling and draining of a large fluvial island due to dam-induced river stage fluctuations. *Water Resources Research*, 46: W07513.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. 1979. *Groundwater*, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River.
- Freeze, R., 1971. Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resources Research* 7 (2), 347–366.
- Freeze, R.A., 1972. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 1. Base flow contributions to channel flow. *Water Resources Research*, 8(3): 609-623.
- Georgakakos, K.P., Rajaram, H., Li, S.G., 1988. On Improved Operational Hydrologic Forecasting of Streamflows," IIHR Report No. 325, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, 162.
- Gillespie, J.B., Perry, C.A., 1988. Channel infiltration from floodflows along the Pawnee River and its tributaries, west-central Kansas. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 88-4055, 30 p. .
- Girard, G., Ledoux, E., Villeneuve, J.-P., 1980. An integrated rainfall, surface and underground runoff model. *La Houille Blanche* 4/5, 315–320.
- Giudici, M. & Vassena, C., 2007. Spectral Analysis of the Balance Equation of Ground Water Hydrology. *Transport in Porous Media*, 72, p.171–178.
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H., Blenkinsop, S., Therrien, R., Orban, P., Dassargues, A., 2009. Large scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology* 373 (1-2), 122–138.
- Gomez, E. et al., 2003. Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche*, No. 3/2003.
- Goodrich, D.C. et al., 1997. Linearity of basin response as a function of scale in a semiarid watershed. *Water Resources Research*, 33(12): 2951-2965.
- Gordon, R.P. et al., 2011. Automated calculation of vertical pore-water flux from field temperature time series using the VFLUX method and computer program. *Journal of Hydrology*.
- Gordon, R.P. et al., 2012. Automated calculation of vertical pore-water flux from field temperature time series using the VFLUX method and computer program. *Journal of Hydrology*, 420–421(0), p.142–158.
- Govindaraju, R.S., Kavvas, M.L., 1991. Dynamics of moving boundary overland flows over infiltrating surfaces at hillslopes. *Water Resources Research*, 27 1885–1898.
- Graham, D.N., Refsgaard, A., 2001. MIKE SHE: A Distributed, Physically based Modelling System for Surface Water/Groundwater Interactions, MODFLOW 2001 and other modelling Odysseys Conference, Colorado.
- Grassi, M.E. et al., 2007. Estimation of ethanol mass delivery to groundwater from silicone polymer mats. *Environmental science & technology*, 41(15), p.5453–5459.
- Greswell, R. et al., 2009. The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), p.416–425.
- Gunduz, O., Aral, M.M., 2005. River Networks and Groundwater Flow: Simultaneous Solution of a Coupled

System. *Journal of Hydrology*, 301(1-4): 216-234.

- Gurrieri, J.T., Furniss, G., 2004. Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods. *J. Hydrol.* 297, 187–208.
- Habets, F. et al., 1999b. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin. *Journal of Geophysical Research*, 104(D24): 31145-31172.
- Habets, F. et al., 2010. Multi-model simulation of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France). *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 4(1): 99-117.
- Habets, F., Flipo, N., Saleh, F., Philippe, E., Queyrel, W., Goblet, P., Ledoux, E., Monteil, C., Viennot, P., David, C., Bacchi, A., Blanchoud, H., Moreau-Guigon, E., Launay, M., Ripoche, D., Mary, B., Jayet, P.-A., Martin, E., Morel, T., Tournebize, J., 2011. Les progrès de la modélisation intégrée. Rapport PIREN Seine 2010.
- Hammond, G.E., Valocchi, A.J., Lichtner, P.C., 2005. Application of Jacobianfree Newton-Krylov with physics-based preconditioning to biogeochemical transport. *Advances in Water Resources* 28: 359–376.
- Hanrahan, T.P., 2008. Effects of river discharge on hyporheic exchange flows in salmon spawning areas of a large gravel-bed river. *Hydrological Processes*, 22, p.127–141.
- Harrington, G.A., Cook, P.G., Herczeg, A.L., 2002. Spatial and temporal variability of ground water recharge in central Australia: A tracer approach. *Ground Water* 40(5): 518-528.
- Harvey FE and Lee DL, 2000. Discussion on "The effects of bag type and meter size on seepage meter measurements" by SA Isiorho and JH Meyer, May-June 1999 issue, v 37, no 3:411-413. *Ground Water* 38(3):326-327.
- Hatch, C.E. et al., 2006. Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development. *Water Resources Research*, 42(10), p.10410.
- Hatch, C.E. et al., 2010. Spatial and temporal variations in streambed hydraulic conductivity quantified with time-series thermal methods. *Journal of Hydrology*, 389(3-4), p.276–288.
- Hayashi, Masaki, et Donald O. Rosenberry. 2002. « Effects of Ground Water Exchange on the Hydrology and Ecology of Surface Water ». *Ground Water* 40 (3): 309–316. doi:10.1111/j.1745-6584.2002.tb02659.x.
- Hazen, A. 1892. Some Physical Properties of Sands and Gravels, Mass. State Board of Health, 24th Annual Report, 539–556.
- Hem JD. 1989. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd edition. U.S.Geological Survey, Water-Supply Paper 2254, 263 pp.
- Hendricks, S., 1999. Relationships between hydraulic parameters in a small stream under varying flow and seasonal conditions. *Hydrological Processes*, 13, p.1497–1510.
- Heppner, C.S., 2007. A dam problem: characterizing the upstream hydrologic and geomorphologic impacts of dams, Stanford University, Stanford.
- Heppner, C.S., Loague, K., 2008. A dam problem: simulated upstream impacts for the Searsville Watershed. *Journal of Ecohydrology* 1: 408-424.
- Hewlett JD and Hibbert AR, 1963. Moisture and energy considerations within a sloping soil mass during drainage. *J. Geophys. Res.* 64, 1081-1087.
- Hinkle, S. et al., 2001. Linking hyporheic flow and nitrogen cycling near the Willamette River—a large river in Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 244(3-4), p.157–180.
- Hino M and Hasebe M, 1984. Identification and prediction of nonlinear hydrological systems by the filter-separation autoregressive (AR) method: extension to hourly hydrologic data. *Journal of Hydrology* 68: 181-210.
- Hodge, R.A., Freeze, R.A., 1977. Groundwater flow systems and slope stability. *Canadian Geotechnical Journal*, 14: 466-476.

- Horton RE, 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. Transactions of the American Geophysical Union 14:446-460.
- Howard KW, Lloyd JV. 1983. Major ion characterisation of coastal saline groundwaters. Ground Water. 21, 429-437.
- Hunt, R.J., Walker, J.F., Westenbroek, S., Doherty, J., 2008. Hydrologic climate change from a deterministic view: Using GSFLOW to simulate climate change in a northern temperate climate, 2nd USGS Modeling Conference. U.S. Geological Survey., Orange Beach, Ala.
- Hussein, M., Schwartz, F.W., 2003. Modelling of flow and contaminant transport in coupled stream-aquifer systems Journal of Contaminant Hydrology 65(1-2
- Hvorslev, M. J. 1951. Time lag and soil permeability in ground-water observations, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Exper. Sta. Bull, 36, 1-50.
- Hynes, H. B. N. 1983. Groundwater and stream ecology, Hydrobiologia, 100, 93-99.
- Hyun, Y. et al., 2011. Characterizing streambed water fluxes using temperature and head data on multiple spatial scales in Munsan stream, South Korea. Journal of Hydrology, 402(3-4), p.377-387.
- Iribar A., Sánchez-Pérez J.M., Lyautey E. and Garabétian F., 2008. Differentiated free-living and sediment-attached bacterial community structure inside and outside denitrification hotspots in the river-groundwater interface. Hydrobiologia, 598, 109-121.
- Jensen, J.K. & Engesgaard, Peter, 2011. Nonuniform Groundwater Discharge across a Streambed: Heat as a Tracer. Vadose Zone Journal, 10(1), p.98.
- Jobson, H.E., Harbaugh, A.W., 1999. Modifications to the diffusion analogy surface water flow model (Daflow) for coupling to the modular finite-difference groundwater flow model (Modflow). . United States Geological Survey, Open File Report 99-217.
- Jolly, I.D., Rassam, D.W., 2009 A review of modelling of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid floodplains, 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia.
- Jones JP, Sudicky EA, McLaren RG. Application of a fully-integrated surface-subsurface flow model at the watershed-scale: a case study. Water Resour Res 2008;44 -
- Jones, J.E., Woodward, C.S., 2001. Newton-Krylov-multigrid solvers for large-scale, highly heterogeneous, variably saturated flow problems. . Advances in Water Resources, 24: 763-774.
- Jones, J.P., Sudicky, E.A., Brookfield, A.E., Park, Y.J., 2006. An assessment of the tracer-based approach to quantifying groundwater contributions to streamflow. Water Resources Research 42(W02407.1-W02407).
- Jorgeson, J.D., 1999. Peak flow analysis using a two dimensional watershed model with radar precipitation data, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Julien, P.Y., Saghafian, B., 1991. CASC2D Users Manual, Civil Engineering report, Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523. .
- Julien, P.Y., Saghafian, B., Ogden, F.L., 1995. Raster-Based Hydrologic Modeling of Spatially-Variied Surface Runoff. Water Resources Bulletin, 31(3): 523-536.
- Kalbus, E. et al., 2006. Measuring methods for groundwater-surface water interactions: a review. Hydrology and Earth System Sciences, 10(6), p.873-887.
- Kalbus, E. et al., 2007. New methodology to investigate potential contaminant mass fluxes at the stream-aquifer interface by combining integral pumping tests and streambed temperatures. Environmental Pollution, 148(3), p.808-816.
- Karaman, S. 1935. Die fauna unterirdischen gewässer Jugoslawiens. Verh. int. Ver. Limnol. 7: 46-73.
- Kauark-Leite, L., 1990. Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole. Ph.D. thesis, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées.
- Keery, J. et al., 2007. Temporal and spatial variability of groundwater-surface water fluxes: Development and application of an analytical method using temperature time series. Journal of Hydrology, 336(1-

2), p.1–16.

- Kendall C, Coplen TB. 1985. Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination. *Analytical Chemistry* 57: 1437-1440.
- Kim, K.-Y. et al., 2008. Multi-depth monitoring of electrical conductivity and temperature of groundwater at a multilayered coastal aquifer: Jeju Island, Korea. *Hydrological Processes*, 22, p.3724–3733.
- Kjellin J., Hallin S. and Worman A., 2007. Spatial variations in denitrification activity in wetland sediments explained by hydrology and denitrifying community structure. *Water Res.*, 41, 4710-4720.
- Kljin, F and Witte, JP. 1999. Eco-hydrology: groundwater flow and site factors in plant ecology. *Hydrogeology Journal*. 7, 65-77.
- Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K., Maidment, D.R., 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4): 325.
- Knoll, D.A., Keyes, D.E., 2004. Jacobian-free Newton-Krylov methods: a survey of approaches and applications. *Journal of Computational Physics* 193: 357–397.
- Knust, A.E. & Warwick, J.J., 2009. Using a fluctuating tracer to estimate hyporheic exchange in restored and unrestored reaches of the Truckee River, Nevada, USA. *Hydrological Processes*, 23, p.1119–1130.
- Kojiri, T., Tokai, A., Kinai, Y., 1998. Assessment of river basin environment through simulation with water quality and quantity. *Annuals of Disaster Prevention Research Institute*, 41(2): 119-134.
- Kollet SJ, Maxwell RM. Integrated surface-groundwater flow modeling: a free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Adv Water Resour* 2006;29:945–58.
- Kollet SJ, Maxwell RM. Integrated surface-groundwater flow modeling: a free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Adv Water Resour* 2006;29:945–58.
- Kollet, J., Maxwell, R., 2006. Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advances in Water Resources*, 29: 945-958.
- Korkmaz, S., Ledoux, E., Önder, H., 2009. Application of the coupled model to the Somme river basin. *Journal of Hydrology*, 366(1-4): 21.
- Koster, R.D., Suarez, M.J., Ducharme, A., Praveen, K., Stieglitz, M., 2000. A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 1: Model structure. *Journal of Geophysical Research* 105(D20): 24809-24822.
- Kouwen, N., 1988. WATFLOOD: A Micro-Computer based Flood Forecasting System based on Real-Time Weather Radar. *Canadian Water Resources Journal*, 13(1): 62-77.
- Krause, S. et al., 2009. Nitrate concentration changes at the groundwater-surface water interface of a small Cumbrian river. *Hydrological Processes*, 23, p.2195–2211.
- Kumar, A., Kanwar, R.S. & Hallberg, G.R., 1994. Modelling spatial variability of saturated hydraulic conductivity using Fourier series analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 39, p.143–156.
- Landon, M. K., Rus, D. L., & Harvey, F. E. 200). Comparison of Instream Methods for Measuring Hydraulic Conductivity in Sandy Streambeds. *Ground Water*, 39(6), 870-885. doi:10.1111/j.1745-6584.2001.tb02475.
- Lane, J.W. et al., 2005. FIBER-OPTIC DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING □: A NEW TOOL FOR ASSESSMENT AND MONITORING OF HYDROLOGIC PROCESSES Field Studies. *Field Studies*, (2005), p.1–9.
- Langevin, C.D., Swain, E.D., Wolfert, M.A., 2005. Simulation of integrated surface-water/ground-water flow and salinity for a coastal wetland and adjacent estuary. *Journal of Hydrology* 314(1-4): 212-234.
- Lautz LK. 2010. Impacts of nonideal field conditions on vertical water velocity v_e from streambed temperature time series. *Water Resour Res*;46.

- Lautz LK. 2010. Impacts of nonideal field conditions on vertical water velocity e from streambed temperature time series. *Water Resour Res*;46.
- Lautz, L. K. & Fanelli, R. M., 2008. Seasonal biogeochemical hotspots in the streambed around restoration structures. *Biogeochemistry*, 91, p.85–104.
- Lautz, Laura K., Kranes, N.T. & Siegel, D.I., 2010. Heat tracing of heterogeneous hyporheic exchange adjacent to in-stream geomorphic features. *Hydrological Processes*, 24, p.3074–3086.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., Saindon, L.G., 1983. Precipitation-runoff modeling system user's manual. . Water Resources Investigation Report, US Geological Survey. .
- Ledoux, E. et al., 2007. Agriculture and Groundwater Nitrate Contamination in the Seine Basin. The STICS-MODCOU modelling chain. . *Science of the Total Environment* 375(33-47).
- Ledoux, E., Girard, G., De Marsily, G., Villeneuve, J.P., Deschenes, J. , 1989. Spatially distributed modeling: conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In: Morel-Seytoux HJ, editor. *Unsaturated flow in hydrologic modeling, theory and practice*. NATO ASI Ser. C/Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic: 435-454.
- Ledoux, E., Girard, G., Villeneuve, J.P., 1984. Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*: 101-110.
- Lee, D. R. and Cherry, J. A. 1978. A Field Exercise on Groundwater Flow Using Seepage Meters and Mini-Piezometers, *J. Geol. Educ.*, 26–10.
- Lefebvre S., Marmonier P., Pinay G., Bour O., Aquilina L. and Baudry J., 2005. Nutrient dynamics in interstitial habitats of low-order rural streams with different bedrock geology. *Arch. Hydrobiol.*, 164, 169-191.
- Lefebvre, E., Flipo, N., de Fouquet, C., Poulin, M., 2010. Geostatistics for assessing the efficiency of distributed physically-based water quality model. Application to nitrates in the Seine River. *Hydrological Processes* (Accepted).
- Lemieux, J.-M., Sudicky, E.A., Peltier, W.R., Tarasov, L., 2008. Dynamics of groundwater recharge and seepage over the Canadian landscape during the Wisconsinian glaciation. *Journal of Geophysical Research*, 113: F01011.
- Li, Q. et al., 2009. COMSOL Multiphysics: A Novel Approach to Ground Water Modeling. *Ground Water*, 47, p.480–487.
- Li, Q., Unger, A., Sudicky, E., Kassenaar, D., Wexler, E., Shikaze, S., 2008. Simulating the multi-seasonal response of a large-scale watershed with a 3D physically-based hydrologic model. *Journal of Hydrology* 357 (3-4), 317–336.
- Liang, D., Falconer, R.A., Lin, B., 2007. Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model. *Journal of Hydrology*, 337(1-2): 147.
- Libelo, E. L. and MacIntyre, W. G. 1994. Effects Of Surface-Water Movement On Seepage-Meter Measurements Of Flow Thru The Sediment-Water Interface, *Hydrogeol. J.*, 2, 49–54.
- Lienert, C., Short, S.A., Gunten, H.R., 1994. Uranium infiltration from a river to shallow groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(24): 5455.
- Linsley RK, Kohler MA, Paulhus JLH, Wallace JS, 1958. *Hydrology for engineers*. McGraw Hill, New York.
- Lischeid, G. et al., 2010. Assessing coupling between lakes and layered aquifers in a complex Pleistocene landscape based on water level dynamics. *Advances in Water Resources*, 33(11), p.1331–1339.
- Loague, K. et al., 2006. Physics-based hydrologic-response simulation: foundation for hydroecology and hydrogeomorphology. *Hydrological Processes*, 20: 1231–1237.
- Loague, K., Corwin, D.L., 2007. Scale issues. In *The Handbook of Groundwater Engineering*, Delleur JW (ed.). CRC Press; 25D1–25D21. .

- Loague, K., VanderKwaak, J.E., 2002. Simulating hydrologic response for the R-5 catchment: comparison of two models and the impact of the roads. *Hydrological Processes*, 16: 1015–1032.
- Loague, K., VanderKwaak, J.E., 2004. Physics-based hydrologic response simulation: Platinum bridge, 1958 Edsel, or useful tool. *Hydrological Processes* 18: 2949–2956.
- Loheide II, S.P. & Gorelick, S.M., 2006. Quantifying stream-aquifer interactions through the analysis of remotely sensed thermographic profiles and in situ temperature histories. *Environmental science & technology*, 40(10), p.3336–3341.
- Loheide, S.P. et al., 2009. A framework for understanding the hydroecology of impacted wet meadows in the Sierra Nevada and Cascade Ranges, California, USA. *Hydrogeology Journal*, 17(1), p.229–246.
- Loheide, Steven P. & Booth, E.G., 2011. Effects of changing channel morphology on vegetation, groundwater, and soil moisture regimes in groundwater-dependent ecosystems. *Geomorphology*, 126, p.364–376.
- López Correa, M. et al., 2012. Preboreal onset of cold-water coral growth beyond the Arctic Circle revealed by coupled radiocarbon and U-series dating and neodymium isotopes. *Quaternary Science Reviews*, 34(0), p.24–43.
- Lowell J.L., Gordon N., Engstrom D., Stanford J.A., Holben W.E. and Gannon J.E., 2009. Habitat heterogeneity and associated microbial community structure in a small-scale floodplain hyporheic flow path. *Microb. Ecol.*, 58, 611–620.
- Lowry, C.S., Walker, J.F., et al., 2007. Identifying spatial/variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor. *Water Resources Research*, 43(10), p.10408.
- Lowry, Christopher S., Walker, John F., et al., 2007. Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor. *Water Resources Research*, 43(10).
- Maillet E, 1905. *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Librairie Sci. Hermann Paris, 218pp.
- Maréchal, J.C., Etcheverry, D., 2003. The use of 3H and 18O tracers to characterize water inflows in Alpine tunnels. *Appl. Geochem.* 18, 339–351.
- Marie, J.R., Hollett, K.J., 1996. Determination of hydraulic characteristics and yield of aquifers underlying Vekol Valley, Arizona, using several classical and current methods. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2453.
- Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., Barlow, P.M., 2008. GSFLOW - Coupled ground-water and surface-water flow model based on the integration of the precipitation-runoff modeling system (PRMS) and the modular ground-water flow model (MODFLOW-2005). U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6(D1)(240).
- Marmonier, P et al., in press.. The role of organisms in hyporheic processes: gaps in current knowledge , needs for future research and applications . *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*.
- McCallum, J.L., Cook, P.G., Berhane, D., Rumpf, C. & McMahon, G. a., 2011. Quantifying groundwater flows to streams using differential flow gaugings and water chemistry. *Journal of Hydrology*, 416-417, p.118–132.
- McLaren, R.G. et al., 2000. Flow and transport in fractured tuff at Yucca Mountain: numerical experiments on fast preferential flow mechanisms. *Journal of Contaminant Hydrology* 43: 211–238.
- Merrit, L.M., Konikow, L.F., 2000. Documentation of a computer program to simulate lake-aquifer interaction using the MODFLOW ground-water flow model and the MOC3D solute transport model. United States Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 00-4167.
- Michaud, J.D., Sorooshian, S., 1994b. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semi arid watershed. *Water Resources Research* 30(3): 593–606.
- Mirus, B. B., Loague, K., VanderKwaak, J. E., Kampf, S. K., Burges, S. J., 2009. A hypothetical reality of Tarrawarra-like hydrologic response. *Hydrological Processes* 23, 1093–1103.
- Mirus, B.B., Ebel, B.A., Loague, K., Wemple, B.C., 2007. Simulated effect of a forest road on near-surface

hydrologic response: *redux*. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 126–142.

- Miyakoshi, A. et al., 2007. Evaluation of change in subsurface thermal environment due to groundwater flow in the Tokyo Lowland, Japan. *International Journal of Earth Sciences*, 97, p.401–411.
- Moffett, K.B. et al., 2008. Processes Controlling the Thermal Regime of Saltmarsh Channel Beds. *Environmental Science & Technology*, 42, p.671–676.
- Monteil, C. et al., 2010. Assessing the contribution of the main aquifer units of the Loire Basin to river discharge during low flow, *Proceedings of XVIII International Conference on Water Resources*, Barcelona.
- Monteil, C., 2011. Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage., Mines-ParisTech, Thèse de doctorat.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., 1991. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research* 27: 1177–1191.
- Morita, M., Yen, B.C., 2002. Modeling of conjunctive two dimensional surface-three dimensional subsurface flows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(2): 184-200.
- Mutiti, S. & Levy, J., 2010. Using temperature modeling to investigate the temporal variability of riverbed hydraulic conductivity during storm events. *Journal of Hydrology*, 388(3-4), p.321–334.
- Nathan RJ and McMahan TA, 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis. *Water Resources Research*. 26(7):1465-1473.
- Nearing, M.A. et al., 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61(2-3): 131-154.
- Neuman, S. P. 1975. Analysis of Pumping Test Data from Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response, *Water Resour. Res.*, 11(2), 329–342.
- Noto, L.V., Ivanov, V.Y., Bras, R.L., Vivoni, E.R., 2008. Effects of initialization on response of a fully-distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 352(1-2): 107.
- Nunes, J.P., de Lima, J.L.M.P., Singh, V.P., de Lima, M.I.P., Vieira, G.N., 2006a. Numerical modelling of surface runoff and erosion due to moving rainstorms at the drainage basin scale. *Journal of Hydrology*, 330(3-4): 709-720.
- Nunes, J.P., Vieira, G., Seixas, J., Gonçalves, P., Carvalhais, N., 2005. Evaluating the MEFIDIS model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events. *Catena* 61(2-3): 210-228.
- Nunes, J.P., Vieira, G.N., Seixas, J., 2006b. MEFIDIS - A Physically-based, Spatially-Distributed Runoff and Erosion Model for Extreme Rainfall Events. In: Singh VP, Frevert DK (Eds.), *Watershed Models*. CRC press, Boca Raton: . 291-314.
- Olesen, K.W., Refsgaard, A., Havnø, K., 2000. Restoring River Ecology, A Complex Challenge, *International Conference on New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life*, Capri, Italy.
- Orghidan, T., 1959. Ein neuer lebensraum des unterirdischen wassres der hyporheischen biotope. *Archiv für Hydrobiologie*, 55, 392-414.
- Orghidan, T., 1959. Ein neuer lebensraum des unterirdischen wassres der hyporheischen biotope. *Archiv für Hydrobiologie*, 55, 392-414.
- Osman, Y.Z., Bruen, M.P., 2002. Modelling stream-aquifer seepage in an alluvial aquifer: an improved loosing-stream package for MODFLOW. *Journal of Hydrology*, 264(1-4): 69.
- Osterkamp, W.R., Lane, L.J., Savard, C.S., 1994. Recharge estimates using a geomorphic/distributed-parameter simulation approach, Amargosa River basin. *Water Resources Bulletin*, 30(3): 493-507.
- Packman, A. I. and Bencala, K. E. 2000. Modeling methods in the study of surface-subsurface hydrologic interactions, in: *Streams and Ground Waters*, edited by: Jones, J. B. and Mulholland, P. J., Academic Press, 45–80.
- Packman, A. I. and Bencala, K. E.: Modeling methods in the study of surface-subsurface hydrologic

interactions, in: *Streams and Ground Waters*, edited by: Jones, J. B. and Mulholland, P. J., Academic Press, 45–80, 2000.

- Panday S, Huyakorn PS. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *AdvWater Resour* 2004;27:361–82.
- Panday S, Huyakorn PS. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *AdvWater Resour* 2004;27:361–82.
- Panday, S., Huyakorn, P.S., 2004. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, 27(4): 361.
- Park, J., Kojiri, T., Ikebuchi, S., Oishi, S., 2000. GIS based hydrological comparison and run-off simulation of a river basin. *Fresh Perspectives on Hydrology and Water Resources in Southeast Asia and the Pacific*: 143-156.
- Park, Y.J., Sudicky, E.A., Panday, S., Sykes, J.F., Guvanasen, V., 2008. Application of implicit sub-time stepping to simulate flow and transport in fractured porous media. *Advances in Water Resources*, 31(7): 995.
- Pearce, A.J., Stewart, M.K., Sklash, M.G., 1986. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 1. where does the water come from? *Water Resources Research*, 22(8): 1263-1272.
- Petalas CP, Diamantis IB, 1999. Origin and distribution of saline groundwater in the upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northeastern Greece. *Hydrogeology* 7:305-316.
- Petalas CP, Diamantis IB, 1999. Origin and distribution of saline groundwater in the upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northeastern Greece. *Hydrogeology* 7:305-316.
- Peters, N.E., Ratcliffe, E.B., 1998. Tracing Hydrologic Pathways Using Chloride at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA *Water, Air, & Soil Pollution*, 105(1-2): 263-275.
- Plummer, L.N., Bexfield, L.M., Anderholm, S.K., Sanford, W.E., Busenberg, E., 2004. Hydrochemical tracers in the Middle Rio Grande Basin, USA: 1. Conceptualization of groundwater flow. *Hydrogeology Journal*, 12(4): 359-388.
- Ponce, V.M., Pandey, R.P., Kumar, S., 1999. Groundwater recharge by channel infiltration in El Barbon Basin, Baja California, Mexico. *Journal of Hydrology* 214(1-4): 1-7.
- Prudic, D.E., Konikow, L.F., Banta, E.R., 2004. A new streamflow-routing (SFR1) package to simulate stream–aquifer interaction with Modflow 2000. United States Geological Survey, Open File Report 2004-1042.
- Qu, Y., Duffy, C.J., 2007. A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation. *Water Resources Research* 43(8, W08419.1-W08419).
- Querner, E.P., 1997. Description and application of the combined surface and groundwater flow model MOGROW. *Journal of Hydrology*, 192(1-4): 158–188.
- Rademacher, L.K., Clark, J.F., Hudson, G.B., 2002. Temporal changes in stable isotope composition of spring waters: implications for recent changes in climate and atmospheric circulation. *Geology* 30, 139–142.
- Ran, Q., Heppner, C.H., VanderKwaak, J.E., Loague, K., 2007. Further testing of the Integrated Hydrology Model (InHM): Multiple-species sediment transport. *Hydrological Processes* 21: 1522–1531.
- Rau, G.C. et al., 2010. Analytical methods that use natural heat as a tracer to quantify surface water–groundwater exchange, evaluated using field temperature records. *Hydrogeology Journal*, 18(5), p.1093–1110.
- Refsgaard, J.C. et al., 1998. An integrated model for the Danubian Lowland - methodology and applications. *Water Resources Management*, 12: 433-465.
- Refsgaard, J.C., 2001. Discussion of model validation in relation to the regional and global scale. In: *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science*. eds. Anderson M.G. and Bates, P.D., John Wiley and Sons. 461-483.

- Refsgaard, J.C., Storm, B., 1995. MIKE SHE, in *Computer Models of Watershed Hydrology*, edited by V. P. Singh, pp. 809-846, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, USA. 809-846.
- Richar S., D., 2009. Thermal remote sensing of stream temperature and groundwater discharge: applications to hydrogeology and water resources policy in the State of Wisconsin. University of Wisconsin - Madison.
- Rivoire E. Bornette G., 2006. Programme LIFE Nature "Conservation des habitats créés par la dynamique de la rivière d'Ain. Action F3. restauration des zones humides fluviales de la basse vallée de l'Ain. Analyse de l'état après restauration. Syndicat de la Basse Vallée de l'Ain, octobre 2006, 67 p.
- Ross, B.B., N., C.D., O., S.V., 1979. A finite element model of overland and channel flow for assessing the hydrological impact of land-use change. *Journal of Hydrology*, 41: 10–30.
- Ruehl, C. et al., 2006. Differential gauging and tracer tests resolve seepage fluxes in a strongly-losing stream. *Journal of Hydrology*, 330(1-2), p.235–248.
- Rühaak, W. et al., 2008. 3D finite volume groundwater and heat transport modeling with non-orthogonal grids, using a coordinate transformation method. *Advances in Water Resources*, 31(3), p.513–524.
- Rutledge AJ, Daniel III CC, 1994. Testing an automated method to estimate ground-water recharge from stream flow record. *Ground Water* 32(2):180-189.
- Saleh, F. et al., 2011. Modeling the impact of in-stream water level fluctuations on stream-aquifer interactions at the regional scale. *Journal of Hydrology*, 400(3-4): 490-500.
- Sanford, W.E., Plummer, L.N., McAda, D.P., Bexfield, L.M., Anderholm, S.K., 2004. Hydrochemical tracers in the Middle Rio Grande Basin, USA: 2. Calibration of a groundwater-flow model. 12(4): 389-407.
- Scanlon, B. R., Healy, R.W., and Cook, P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, *Hydrogeol. J.*, 10(1), 18–39.
- Schlichter, C. S. 1905. *Field Measurements of the Rate of Movement of Underground Waters.*, U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 140.
- Schmidt, C. M. Bayer-Raich, and M. Schirmer, 2006: Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 3, 1419–1446, 2003.
- Schmidt, C., 2009. Water and contaminant fluxes at the stream-groundwater-interface.
- Schmidt, C., Bayer-Raich, M. & Schirmer, M., 2006. Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4), p.1419–1446.
- Schornberg C, Schmidt C, Kalbus E, Fleckenstein JH. 2010. Simulating the effects of geologic heterogeneity and transient boundary conditions on streambed temperatures—implications for temperature-based waterflux calculations. *Adv Water Resour*;33
- Schornberg, C. et al., 2010. Simulating the effects of geologic heterogeneity and transient boundary conditions on streambed temperatures — Implications for temperature-based water flux calculations. *Advances in Water Resources*, 33(11), p.1309–1319.
- Schoups, G. et al., 2005. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California., *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, pp. 15352–15356.
- Schwoerbel, J. 1961. Ueber die Lebensbedingungen und die Besiedlung des hyporheischen Lebensraumes, *Archiv fuer Hydrobiologie, Suppl.* 25, 182–214.
- Selker, J.S. et al., 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resour. Res.*, 42(12), p.8.
- Semmens, D.J. et al., 2008. KINEROS2 and the AGWA modeling framework. *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*, Cambridge University Press, Cambridge: 41–48.
- Shepherd, R. G. 1989. Correlations of Permeability and Grain-Size, *Ground Water*, 27(5), 633–638.

- Slater, L.D. et al., 2010. Use of electrical imaging and distributed temperature sensing methods to characterize surface water–groundwater exchange regulating uranium transport at the Hanford 300 Area, Washington. *Water Resources Research*, 46(10), p.1–13.
- Smerdon, B.D., Medoza, C.A., Devito, K.J., 2007. Simulations of fully coupled lake groundwater exchange in a subhumid climate with an integrated hydrologic model. *Water Resources Research* 43: W01416.
- Smith, J.W.N. et al., 2008. Groundwater–surface water interactions, nutrient fluxes and ecological response in river corridors: Translating science into effective environmental management. *Hydrological Processes*, 22, p.151–157.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Unkrich, C.L., 1995. KINEROS - a kinematic runoff and erosion model. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado: 697–732.
- Smith, R.E., Hebbert, R.H.B., 1983. Mathematical simulation of interdependent surface and subsurface hydrologic response. *Water Resources Research*, 19: 987–1001.
- Smith, R.E., Woolhiser, D.A., 1971. Overland flow on an infiltrating surface. *Water Resources Research*, 7(4): 899-913.
- Sokrut, N., 2001. A distributed coupled model of surface and subsurface dynamics as a tool for catchment management. Licentiate Thesis, Royal Institute of
- Sophocleous M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeol J*;10:52–6.
- Sorman, A.U., Abdulrazzak, M.J., Morel-Seytoux, H.J., 1997. Groundwater recharge estimation from ephemeral streams. Case study: Wadi Tabalah, Saudi Arabia. *Hydrological Processes*, 11(12): 1607-1619.
- Spanoudaki, K., Stamou, A.I., Nanou-Giannarou, A., 2009. Development and verification of a 3-D integrated surface water-groundwater model. *Journal of Hydrology*, 375(3-4): 410.
- Sparks, T., 2004 Integrated modelling of 2-D surface water and groundwater flow with contaminant transport, Proceedings of XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea.
- Squillace, P.J., 1996. Observed and simulated movement of bank-storage water. *Ground Water* 34(1): 121-134.
- Stachelhaus, S.L., Moran, S.B. & Kelly, R.P., 2012. An evaluation of the efficacy of radium isotopes as tracers of submarine groundwater discharge to southern Rhode Island’s coastal ponds. *Marine Chemistry*, 130–131(0), p.49–61.
- Stephens, D.B., 1988. Field study of ephemeral stream infiltration and recharge. National Technical Information Service, Springfield VA. 22161.
- Storey, R. G., Howard, K. W. F., and Williams, D. D. 2003. Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and the seasonal changes in a gaining stream: A three-dimensiona groundwater flow model, *Water Resour. Res.*, 39(2), 1034 doi:10.1029/2002WR001367.
- Sudicky, E.A. et al., 2005 On the challenge of integrated surface-subsurface flow and transport modelling at multiple catchment scales, Salt Lake City Annual Meeting, Salt Lake City, pp. 28.
- Sudicky, E.A., Jones, J.P., Park, Y.-J., Brookfield, A.E., Colautti, D., 2008. Simulating complex flow and transport dynamics in an integrated surfacesubsurface modeling framework. . *Geosciences Journal* 12: 107–122.
- Swain, E.D., Wexler, E.J., 1996. A Coupled Surface-Water and Ground-Water flow Model (MODBRANCH) for Simulation of Stream-Aquifer Interaction: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A6. .
- Tamura, N., Kojiri, T., 2002. Water quantity and turbidity simulation with distributed runoff model in the Yellow River basin. *Flood Defence*. Science press, New York, 2: 1699-1705.
- Tao, T., Kouwen, N., 1989. Remote Sensing and Fully Distributed Modeling for Flood Forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(6): 809-823.

- Technology, Department of Land and Water Resources Engineering, Stockholm, Sweden. .
- Terzaghi, K. 1925. *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, Deuticke, Wien.
- Theis, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 16, 519–524.
- Thierion, C. et al., 2010. Modelling the coupled surface water and ground water system of the upper Rhine graben, proceedings of XVIII International Conference on Water Resources, Barcelona
- Thompson, J.R., Sørensen, H.R., Gavin, H., Refsgaard, A., 2004. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England. *Journal of Hydrology*, 293(1-4): 151.
- Todd, D. K. and Mays, L. W. 2005. *Groundwater Hydrology*, Wiley, Hoboken.
- Tokai, A., Kojiri, T., Yoshikawa, H., 2002. Case study of basin wide environmental quality assessment based on the distributed runoff model., 6th Water Resources Symposium, Japan, pp. 229-234.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Rodhe, A., Leibundgut, C., 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems to identify model parameters and structure. *Journal of Hydrological Science* 44(5): 279–299.
- Vandenbohede, A., Louwyck, A. & Lebbe, L., 2008. Conservative Solute Versus Heat Transport in Porous Media During Push-pull Tests. *Transport in Porous Media*, 76, p.265–287.
- VanderKwaak JE, Loague K. Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. *Water Resour Res* 2001;37:999–1013
- VanderKwaak JE, Loague K. Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. *Water Resour Res* 2001;37:999–1013.
- VanderKwaak, J.E., 1999. Numerical Simulation of Flow and Chemical Transport in Integrated Surface-Subsurface Hydrologic Systems, University of Waterloo, Ontario, Canada. .
- VanderKwaak, J.E., Loague, K., 2001. Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. *Water Resources Research*, 37(4): 999-1013.
- VanderKwaak, J.E., Sudicky, E.A., 2000. Application of a physically-based numerical model of surface and subsurface water flow and solute transport. , *Calibration and Reliability in Groundwater Modelling*, IAHS Publication No. 265, ModelCARE 99. IAHS, Zurich, pp. 515–523.
- Verdoya, M., Chiozzi, P. & Pasquale, V., 2007. Thermal log analysis for recognition of ground surface temperature change and water movements. *Climate of the Past Discussions*, 3(1), p.95–120.
- Vervier P., Bonvallet-Garey S., Sauvage S., Maurice V. and Sánchez-Pérez J.M., 2009. Influence of the hyporheic zone on the phosphorus dynamics of a large gravel bed river, Garonne river, France. *Hydrol. Process.*, 23, 1801-1812.
- Vogt, Tobias, Hoehn, E., et al., 2010. Fluctuations of electrical conductivity as a natural tracer for bank filtration in a losing stream. *Advances in Water Resources*, 33(11), p.1296–1308.
- Vogt, Tobias, Schneider, Philipp, Hahn-Woernle, Lisa, et al., 2010. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), p.154–164.
- Von Gunten, H.R., Waber, U.E., Krähenbühl, U., 1988. The reactor accident at chernobyl: A possibility to test colloid-controlled transport of radionuclides in a shallow aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2(3): 237.
- Waber, U.E., Lienert, C., Von G, H.R., 1990. Colloid-related infiltration of trace metals from a river to shallow groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 6(3): 251.
- Waichler, S.R., Wigmosta, M.S., 2004. Application of hydrograph shape and channel infiltration models to an arid watershed. *Journal of Hydrological Engineering* 9(5): 433-439.
- Ward, A.S., Gooseff, M.N. & Singha, K., 2010. Characterizing hyporheic transport processes — Interpretation of electrical geophysical data in coupled stream–hyporheic zone systems during solute

tracer studies. *Advances in Water Resources*, 33(11), p.1320–1330.

- Weill, S., Mouche, E., Patin, J., 2009. A generalized Richards equation for surface/subsurface flow modelling. *Journal of Hydrology* 366 (1-4), 9–20.
- Weng, P.h., Giraud, F., Fleury, P., Chevallier, C., 2003. Characterising and modeling groundwater discharge in an agricultural wetland on the French Atlantic coast. *Hydrology and Earth System Sciences* 7: 33–42.
- Werner, A.D., Gallagher, M.R., Weeks, S.W., 2006. Regional-scale, fully coupled modelling of stream-aquifer interaction in a tropical catchment. *Journal of Hydrology*, 328(3-4): 497.
- Westhoff, M.C., Bogaard, T. a. & Savenije, H.H.G., 2011. Quantifying spatial and temporal discharge dynamics of an event in a first order stream, using distributed temperature sensing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(6), p.1945–1957.
- Westhoff, M.C., Bogaard, T.A. & Savenije, H.H.G., 2010. Quantifying the effect of in-stream rock clasts on the retardation of heat along a stream. *Advances in Water Resources*, 33(11), p.1417–1425.
- Wheater, H.S., Butler, A.P., Stewart, E.J., Hamilton, G.S., 1991. A multivariate spatial - temporal model of rainfall in south west Saudi Arabia. I. Spacial rainfall characteristics and model formulations. *Journal of Hydrology*, 125: 175–199.
- Whitaker, M.P.L., 2000. Estimating bank storage and evapotranspiration using soil physical and hydrological techniques in a gaining reach of the San Pedro River, Arizona., University of Arizona.
- Wigmosta, M.S., Burges, S.J., 1997. An adaptive modeling and monitoring approach to describe the hydrologic behavior of small catchments. *Journal of Hydrology*, 202: 48–77.
- Wigmosta, M.S., Vail, L.W., Lettenmaier, D.P., 1994. A distributed hydrology–vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30: 1665–1679.
- Wilkinson, P.L., Anderson, M.G., Lloyd, D.M., 2002. An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(1285–1297).
- Winter TC. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeol J*;7:28–45.
- Winter, T.C., 1998. Relation of streams, lakes, and wetlands to Research groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7(1): 28-45.
- Woessner, W. W. 2000. Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling a hydrogeologic thought, *Ground Water*, 38(3), 423–429.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., Goodrich, D.C., 1990a. KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77. .
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., Goodrich, D.C., 1990b. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77: 130.
- Wroblicky, G. J., Campana, M. E., Valett, H. M., and Dahm, C. N. 1998. Seasonal variation in surface-subsurface water exchange and lateral hyporheic area of two stream-aquifer systems, *Water Resour. Res.*, 34(3), 317–328.
- Yatheendradas, S. et al., 2008. Understanding uncertainty in distributed flash flood forecasting for semi arid regions. *Water Resources Research* , in press, doi:10.1029/2007WR005940.
- Yeh, G.T., Huang, G.B., 2003. A Numerical Model to Simulate Water Flow in Watershed Systems of 1-D Stream-River Network, 2-D Overland Regime, and 3-D Subsurface Media (WASH123D: Version 1.5), Technical Report. Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Central Florida, Orlando, Florida.