

# État de l'Art sur la Modélisation des échanges nappe-rivière

Nicolas Flipo<sup>1,\*</sup>, Firas Saleh<sup>1</sup>, Amer Mouhri<sup>1</sup>, Baptiste Labarthe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Géosciences, Mines ParisTech, UMR 7619 Sisyphe, 35 rue Saint-Honoré, 77 305 Fontainebleau

\* Nicolas.Flipo@mines-paristech.fr

## 1 Introduction

Les eaux surfaciques et souterraines ont fait historiquement l'objet d'études séparées (Brunke and Gonser, 1997; Dawson, 2008; Kalbus et al., 2006). L'émergence d'une vision systémique du cycle de l'eau a fait émerger le concept d'hydrosystème (Dacharry, 1993; Dooge, 1968; Kurtulus et al., 2011; Flipo et al., 2012). L'hydrosystème constitue un continuum hydrique dans lequel sont regroupés, eu égard aux ordres de grandeur significativement différents des temps de transfert de l'eau (Blöschl and Sivapalan, 1995), des composantes de stockage dans lesquelles les eaux s'écoulent lentement (e.g., les aquifères), et des composantes conductives où de grandes quantités d'eau s'écoulent rapidement (e.g., les eaux de surface). Les hydrosystèmes continentaux peuvent donc être conceptualisés par différents compartiments présentant des cinétiques et phénoménologies distinctes. Les deux compartiments principaux sont le domaine de surface et le domaine souterrain qui sont reliés par des interfaces constituées de cascades d'objets emboîtés (Fig. 1). Par exemple l'interface nappe-rivière est souvent constituée, à l'échelle régionale, par une plaine alluviale, alors qu'à l'échelle de la plaine alluviale, cette interface est constituée par la zone riparienne, au sein de laquelle l'interface nappe-rivière est constituée par la zone hyporhéique (ZH), et ainsi de suite jusqu'à l'interface eau-benthos (Flipo, 2012).

Les flux entre compartiments de l'hydrosystème se trouvent donc connectés via des interfaces communes dont la représentation varie en fonction de l'échelle d'analyse. Elles n'en demeurent pas moins très structurantes pour la modélisation des flux : une interface nappe-rivière demeurant une interface nappe-rivière quelle que soit l'échelle. Cette vision de l'hydrosystème structuré autour de ses interfaces est, de plus, en accord avec les classifications hydro-bio-géologiques actuelles des paysages (Bertrand et al., 2012; Dahl et al., 2007).

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). Ce rapport a pour objectif de développer un cadre conceptuel de modélisation de ces interfaces à différentes échelles et de faire le point sur les techniques de modélisation ad hoc.

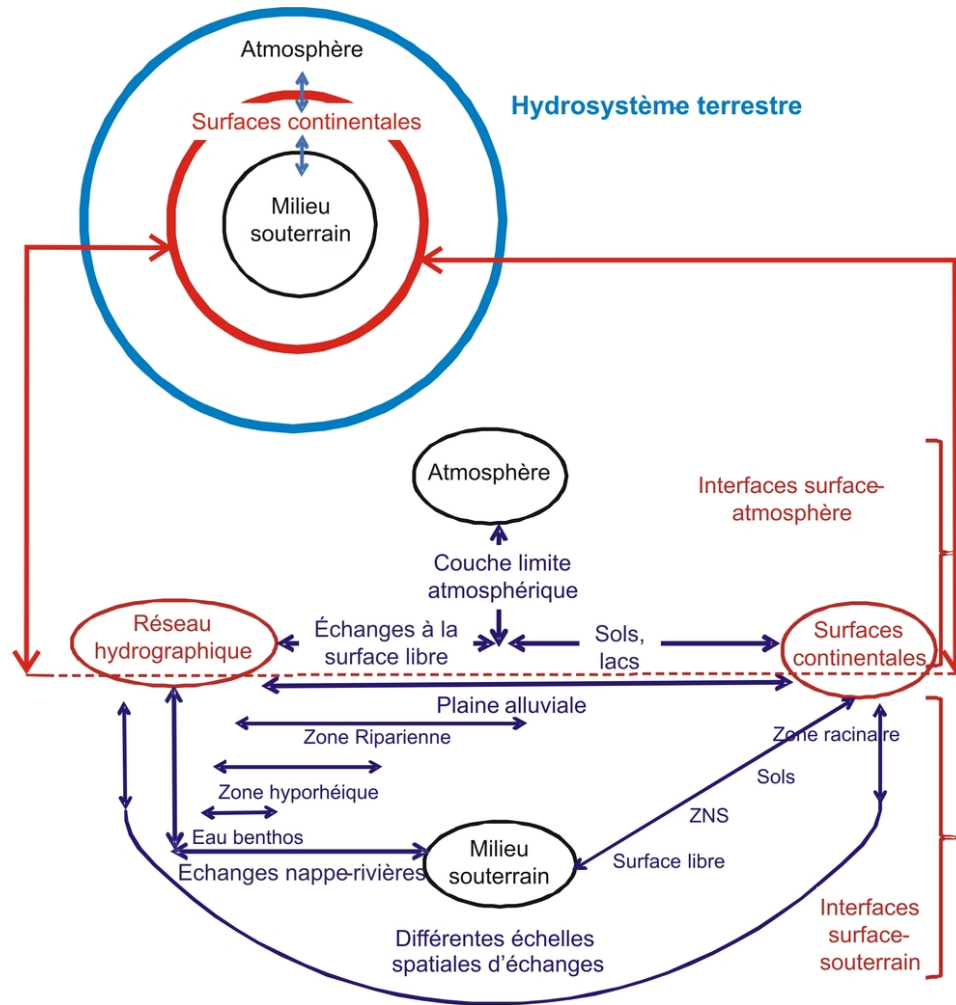


FIGURE 1 – Décomposition de l'hydrosystème autour des interfaces continentales constituées d'objets emboîtés. D'après Flipo (2012)

## 2 Conceptualisation des interfaces nappe-rivière à différentes échelles

Si l'interface "sol" a fait l'objet de nombreux travaux en termes expérimentaux et de modélisation pour arriver à un projet de modélisation et d'observation satellitaire du cycle de l'eau dans les enveloppes continentales avec une résolution spatiale de  $1\text{km} \times 1\text{km}$  (Beven and Cloke, 2012; Wood et al., 2011, 2012), il n'en va pas de même des interfaces nappe-rivière qui ne sont apparues que récemment comme étant des éléments clé du fonctionnement hydro-bio-géochimique des hydrosystèmes continentaux présentant une très forte variabilité spatio-temporelle des processus (Brunke and Gonser, 1997; Krause et al., 2009b). Son étude par la communauté hydro-écologique a permis de repenser le cycle de l'eau passant de la notion de rivière comme drain étanche qui collecte l'eau de pluie et la conduit directement à la mer à une vision moins restrictive et plus complexe, intégrant toutes les dimensions des hydrosystèmes. La dimension verticale s'illustre alors par le fait qu'avant de rejoindre la mer, une molécule d'eau de pluie peut, de multiples fois, sur des distances variant du centimètre à la centaine de kilomètres, et pour des durées allant de quelques secondes à plusieurs années, être échangée entre la rivière et sa nappe (Datry et al., 2008). Ainsi ces interfaces nécessitent d'être étudiées de manière plus approfondie afin de mieux caractériser le fonctionnement hydrogéologique des bassins (Hayashi and Rosenberry, 2002). Cependant le problème se pose très différemment suivant les échelles spatiales d'analyse. Afin de clarifier la lecture de ce rapport, La nomenclature suivante a été adoptée (légèrement adaptée de Blöschl and Sivapalan (1995) pour la composante régionale) :

- Échelle 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 - 100 m). Cette échelle concerne surtout le lit de la rivière, ou zone hyporhéique (cf. section 2.2, p.5).
- Échelle intermédiaire : un lac ou un tronçon de rivière (1 km - 10 km)
- Échelle régionale : la quantification des échanges nappe-rivière est placée dans le contexte hydro(géo)logique global de l'hydrosystème ( $> 1\ 000\ \text{km}^2$ ).

### 2.1 Un problème multi-échelle structuré autour de l'échelle intermédiaire - La rivière

Ellis et al. (2007) ont étudié la pertinence des plans d'échantillonnage et de modélisation spatio-temporels de cette interface depuis l'échelle intermédiaire à de longues échelles temporelles jusqu'à l'échelle locale dans le lit de la rivière pour des pas de temps de l'ordre de la seconde. Ils en concluent que la distribution des échanges nappe-rivière est soumise à des facteurs multi-échelle qui influencent à la fois l'épaisseur de la zone hyporhéique (échelle locale) et les écoulements souterrains au travers du lit de la rivière (échelle intermédiaire).

Une revue bibliographique du fonctionnement des interfaces nappe-rivière, avec une attention particulière portée sur leur modélisation à l'aide de modèles mécanistes distribués (Tab. 1), montre que les écoulements souterrains dans le champ proche de la rivière sont, en premier lieu, contrôlés par les écoulements régionaux dans les systèmes aquifères (Malard et al., 2002). En effet, pour la composante souterraine du cycle de l'eau, ce sont les écoulements régionaux vers les plaines alluviales et leurs rivières qui déterminent la quantité d'eau qui va circuler dans l'interface nappe-rivière (Cardenas and Wilson, 2007a; Frei et al., 2009; Kalbus et al., 2009; Rushton, 2007; Storey

TABLE 1 – Modélisations des échanges nappe-rivière à base physique

Auteurs	Modèle	Éch	Représé	Résolution	$\Delta t$	Échelle	Étude
				$\Delta x$			
Brunner et al. (2009a,b)	HGS	condu	2D verti lat	[1-100]m* $\leq$ [0.05]m	perm	loc-int	hypo
Brunner et al. (2010)	HGS, MODFLOW	condu	2D verti lat	[1-10]m*[0.1-10]m	perm	loc-int	hypo
Cardenas et al. (2004)	MODFLOW	condu	3D	0.25m*0.25m*0.04m	perm	loc	hypo
Cardenas and Wilson (2007a,b)	CFD-ACE + COMSOL	conti	2D verti lon	0.01m*0.01m <sup>†</sup>	perm	loc	hypo
Cardenas (2009b)	COMSOL	conti	2D hori	NS <sup>‡</sup>	perm	loc	hypo
Chen and Chen (2003)	MODFLOW	condu	3D	[3-6]m*[3-6]m*[6.7-7.6]m	minutes	loc-int	réel
Discacciati et al. (2002)	×	conti	3D	[0.5-5]m*[0.5-5]m*[0.3-1.5]m <sup>†</sup>	perm	loc	hypo
Ebel et al. (2009)	INHM	condu	3D	[1-20]m*[1-20]m*[0.05-0.25]m	adapt	loc-int	réel
Engeler et al. (2011)	FLORIS+SPRING	condu	3D	[1-50]m*[1-50]m*[1.6-40]m	900s	int	réel
Fleckenstein et al. (2006)	MODFLOW	condu	3D	200m*100m*[5-40]m	3h	int	réel
Frei et al. (2009)	PARFLOW	condu	3D	20m*50m*0.5m	minutes	int	hypo
Frei et al. (2010)	HGS	condu	3D	0.1m*0.1m*0.1m	adapt	loc	hypo
Goosseff et al. (2006)	MODFLOW	condu	2D verti lon	0.20m*[0.3-0.5]m	perm	loc	hypo
Hester and Doyle (2008)	HEC-RAS+MODFLOW	condu	2D verti lon	3m*[0.1-0.25]m	perm	loc	hypo
Irvine et al. (2012)	HGS	condu	3D	0.5m*[0.5-2.6]m*[0.03-0.7]m	perm	loc	hypo
Kalbus et al. (2009)	HEATFLOW	condu	2D verti lon	1m*[0.05-0.2]m	perm	loc	hypo
Kasahara and Wondzell (2003)	MODFLOW	condu	3D	[0.3-0.5]m*[0.3-0.5]m*[0.15-0.3]m	perm	loc-int	réel
Kasahara and Hill (2006)	MODFLOW	condu	3D	[0.6-3.5]m*[0.2-0.5]m*0.15m	perm	loc	réel
Koch et al. (2011)	MODFLOW	condu	3D	NS <sup>‡</sup>	1h	int	réel
Krause and Bronstert (2007)	WASIM+MODFLOW	condu	2D hori	[25-50]m*[25-50]m	1h	int	réel
Krause et al. (2007)	WASIM+MODFLOW	condu	2D hori	[25-250]m*[25-250]m	1h	int-rég	réel
Lautz and Siegel (2006)	MODFLOW	condu	3D	0.5m*0.5m*[0.6-2]m	perm	loc-int	réel
Marzadri et al. (2010)	×	condu	3D	[0.19-1.88]m*[0.06-0.5]m*[0.1]m	perm	loc-int	hypo
Marzadri et al. (2011)	×	condu	3D	NS <sup>‡</sup>	perm	loc	hypo
Miglio et al. (2003)	×	conti	3D	[0.2-0.5]m*[0.2*0.5]m*[0.05-0.15]m <sup>†</sup>	600s	loc	hypo
Munz et al. (2011)	MODFLOW	condu	3D	0.5m*0.5m*[0.1-2.48]m	1h <sup>†</sup>	loc	réel
Osman and Bruen (2002)	MODFLOW	condu	2D verti lat	NS <sup>‡</sup>	perm	loc	hypo
Peyrard et al. (2008)	COMSOL	continuité	2D hori	[10-40]m*[10-40]m	adapt	int	réel
Revelli et al. (2008)	×	condu	2D hori	NS <sup>‡</sup>	perm	int	hypo
Rushton (2007)	×	condu	2D verti lat	20m*0.2m	perm	loc-int	hypo
Saleh et al. (2011)	EauDyssée	condu	pseudo 3D	[1-4]km*[1-4]km*[ ]m	1 j	rég	réel
Saenger et al. (2005)	HEC-RAS+MODFLOW	condu	verti lon	0.1m*0.02m	perm	loc	réel
Sawyer and Cardenas (2009)	FLUENT + COMSOL	conti	2D verti lon	0.01m*0.005m <sup>†</sup>	perm	loc	labo
Storey et al. (2003)	MODFLOW	condu	3D	[1-8]m*[1-8]m*[0.25-0.42]m	perm	loc	réel
Sulis et al. (2010)	CATHY, PARFLOW	3D	3D	[1-80]m*[1-80]m*[0.0125-0.5]m	adapt	loc-int	hypo
Tonina and Buffington (2007)	FLUENT	conti	3D	0.03m*0.03m*0.03m	perm	loc	labo
Urquiza et al. (2008)	×	conti	2D verti lon	1m*1m	perm	loc	hypo
Wondzell et al. (2009)	MODFLOW	condu	3D	[0.125-2]m*[0.125-2]m*[0.16-0.4]m	perm	loc	réel

Éch : représentation des échanges conti : continuité ; condu : conductance ; BC : Conditions limites

Représé : représentation spatiale : verti : verticale ;  $\Delta t$  : temporelle (perm : permanent ; adapt : pas de temps adaptatif)

Résolution :  $\Delta x$  : spatiale ;  $\Delta t$  : temporelle (perm : permanent ; adapt : pas de temps adaptatif)

† Dimensions non spécifiées mais estimées à partir des informations contenues dans le papier

‡ Extension totale du modèle : Cardenas (2009b) : 80m\*45m ; Koch et al. (2011) : 1.7km\*200m\*0.5m ; Marzadri et al. (2011) : 16.9m\*2.6m\*1.6m ;

‡ Extension totale du modèle : Revelli et al. (2008) : [0.22-4.4]km\*[0.19-3.8]km ; Osman and Bruen (2002) : 360m\*21m

Échelle : loc : locale ; int : intermédiaire ; régio : régionale

Étude : hypo : cas synthétique ; labo : expérience de laboratoire ; réel : étude de terrain

et al., 2003). À cette échelle le réseau hydrographique constitue essentiellement un réseau de drainage des eaux vers lequel les eaux souterraines s'écoulent pour lui fournir son débit d'étiage (Ellis et al., 2007; Pinder and Jones, 1969; Tóth, 1963). Ces grandes hétérogénéités structurales peuvent aussi engendrer localement des zones privilégiées de réinfiltration des eaux de la rivière vers la nappe (Boano et al., 2010; Cardenas, 2009b,a; Fleckenstein et al., 2006), qui peuvent être prépondérantes dans l'alimentation du milieu local (Krause and Bronstert, 2007; Krause et al., 2007).

En second lieu, dans la plaine alluviale et dans le champ proche de la rivière, la distribution spatiale de la perméabilité du lit de la rivière et du milieu poreux sous-jacent contrôlent la dynamique des échanges nappe-rivière (Calver, 2001; Fleckenstein et al., 2006; Frei et al., 2009; Gene-reux et al., 2008; Hester and Doyle, 2008; Kalbus et al., 2009; Kaser et al., 2009; Rosenberry and Pitlick, 2009). Viennent ensuite la morphologie et la topographie du fond de la rivière (Cardenas et al., 2004; Gooseff and McGlynn, 2005; Frei et al., 2010; Harvey and Bencala, 1993; Kasahara and Wondzell, 2003; Kasahara and Hill, 2006; Sawyer and Cardenas, 2009; Sawyer et al., 2011; Storey et al., 2003; Tonina and Buffington, 2007), ainsi que la profondeur de l'aquifère alluvial (Koch et al., 2011; Marzadri et al., 2010; Whiting and Pomeranets, 1997), et le régime hydraulique de la rivière (Cardenas and Wilson, 2007c; Munz et al., 2011; Saenger et al., 2005).

Il est donc important d'étudier les échanges nappe-rivière dans une double perspective régionale et locale, en estimant tout d'abord les flux d'eaux souterraines alimentant les interfaces nappe-rivière, puis en essayant de quantifier la distribution spatiale le long du réseau hydrographique en prenant en compte les circulations plus locales au sein de la ZH (Schmidt et al., 2006), qui sont contrôlées par la perméabilité du lit d'une part et la morphologie du fond de la rivière d'autre part (mouilles et seuils naturels ou non). La clé de voûte de ces analyses à deux échelles opposées étant le corridor fluvial.

## 2.2 L'interface nappe-rivière à l'échelle locale - La Zone Hyporhéique

Les interfaces nappe-rivière sont des zones de mélange des eaux superficielles et souterraines (Sophocleous, 2002). À l'échelle locale, l'interface nappe-rivière est définie comme la zone hyporhéique (ZH) qui est un écotone<sup>1</sup> dont l'extension varie dans l'espace et dans le temps. Cet écotone est, par définition, localisé à l'interface entre deux écosystèmes aux caractéristiques très différentes (Brunke and Gonser, 1997) : les rivières et les aquifères, qui renvoient aux deux composantes très distinctes des hydrosystèmes. Au sens large, la ZH est "the saturated transition zone between surface water and groundwater bodies that derives its specific physical (e.g. water temperature) and biogeochemical (e.g. steep chemical gradients) characteristics from active mixing of surface and groundwater to provide a habitat and refugia for obligate and facultative species"<sup>2</sup> (Krause et al. (2009a), p. 2103). White (1993) mentionne aussi que la ZH est localisée sous la rivière et dans le champ latéral proche (les berges). Ainsi Malard et al. (2002) ont identifié cinq configurations génériques de ZH qui dépendent de la structure du milieu de subsurface, ainsi que de la position d'un substratum imperméable ou semi-perméable :

1. Un écotone est la zone de transition écologique entre deux écosystèmes.

2. La zone saturée de transition entre les eaux de surface et les masses d'eau souterraine, dont les propriétés physiques et biogéochimiques spécifiques dérivent du mélange actif des eaux surfaciques et souterraines pour fournir un habitat à des espèces endémiques ou non

1. Pas de ZH (Fig. 2a) : le cours d'eau coule directement sur un substratum imperméable. A noter cependant qu'une zone hyporhéique pérenne peut se développer dans les zones de forte courbure du cours d'eau (Boano et al., 2009; Cardenas, 2009b; Mouhri et al., 2012b; Revelli et al., 2008)
2. Pas d'aquifère (Fig. 2b) : Une ZH, liée à l'infiltration des eaux de surface dans le substratum et/ou les berges de la rivière, peut exister. Le substratum imperméable est situé à proximité des sédiments de la rivière
3. Existence d'une ZH dans un système nappe-rivière connecté (Fig. 2c) : la ZH est créée par advection des eaux de la rivière et de l'aquifère. Le substratum imperméable est situé sous l'aquifère
4. Existence d'une ZH dans un système nappe-rivière déconnecté (présence d'un milieu poreux distinct entre la rivière et l'aquifère. Ce milieu poreux ne serait pas saturé si le fond de la rivière était imperméable) :
  - (a) La ZH est créée par infiltration des eaux de la rivière sous la rivière (par d'écoulements latéraux). La zone de mélange des eaux de surface est souterraine est localisée au niveau du toit de l'aquifère à une certaine distance du fond de la rivière (Fig. 2d)
  - (b) Une ZH perchée est engendrée seulement par les eaux de la rivière sous le lit de la rivière. Soit le milieu poreux sous la rivière est très épais soit ses propriétés de conduction de l'eau ne sont pas suffisantes pour leur permettre d'atteindre le toit de l'aquifère (Fig. 2e).

L'extension spatiale de la ZH est très variable et couvre plusieurs ordres de grandeur depuis le centimètre jusqu'à plusieurs centaines de mètres en fonction de l'intensité des échanges latéraux avec l'aquifère de bordure (Brunke and Gonser, 1997; Woessner, 2000; Wroblicky et al., 1998). Même au sein d'une configuration spécifique, l'extension spatiale et la nature de la ZH sont susceptibles de varier au cours du temps en fonction de l'évolution du contexte hydrogéologique. Ainsi Conant (2004); Storey et al. (2003) indiquent que l'extension spatiale de la ZH est modifiée par les écoulements régionaux au sein du système aquifère, alors que Wroblicky et al. (1998) rapportent que l'intensité même des échanges nappe-rivière, déduits des différences de charges entre la rivière et l'aquifère, rétro-agit sur l'extension spatiale de la ZH.

Les investigations à l'échelle locale s'appuient sur des travaux expérimentaux et nécessitent un lourd investissement expérimental mettant en œuvre une instrumentation de sites représentatifs, de l'acquisition et de l'analyse de données afin de comprendre les écoulements tri-dimensionnels qui s'y développent (Peyrard et al., 2008). Par définition elles se limitent à des zones restreintes et ne permettent que rarement d'analyser les processus à l'échelle intermédiaire (Baxter and Hauer, 2000; Mouhri et al., 2012b) comme l'indiquent le petit nombre de modélisations des interfaces nappe-rivière à l'échelle intermédiaire (Tab. 1).

### **2.3 Les interfaces nappe-rivière à l'échelle régionale - Les plaines alluviales**

Comme indiqué par Mouhri et al. (2012a, 2013a), la dynamique des échanges à l'interface nappe-rivière est complexe et dépend principalement de facteurs géomorphologiques, hydrogéologiques et climatiques (Sophocleous, 2002; Winter, 1998). D'un point de vue conceptuel, les

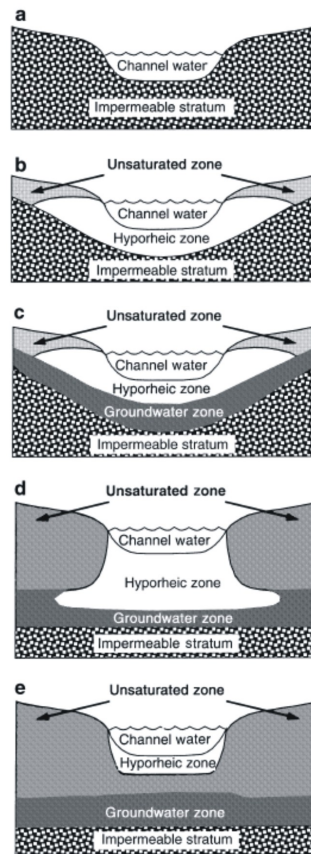


FIGURE 2 – Différentes configurations de la ZH. D'après Malard et al. (2002).

échanges nappe-rivière sont contraints par deux facteurs principaux : Le gradient hydraulique et la structure géologique du milieu. Le gradient hydraulique définit les chemins d'écoulement (Winter, 1998), et la structure géologique les propriétés hydrodynamiques du milieu (White, 1993; Dahm. et al., 2003). Ces deux facteurs sont fondamentaux pour les hydrogéologues qui en dérivent des vitesses d'écoulement et des temps de transfert. A l'échelle régionale, et par conséquent à l'échelle des hydrosystèmes continentaux comme les bassins sédimentaires, l'estimation des échanges nappe-rivière nécessite de combiner l'étude de différents processus qui ont des temps ou périodes de temps caractéristiques s'étalant sur plusieurs ordres de grandeur (Blöschl and Sivapalan, 1995; Flipo et al., 2012; Massei et al., 2010; Massei and Fournier, 2012) : horaire-journalier pour les écoulements en rivière, annuel-décennal pour la pluie efficace, décennal-siècle pour les écoulements souterrains. La compréhension de ces processus à différentes échelles spatio-temporelles nécessite d'utiliser des modèles comme interpolateur spatio-temporel, ainsi que de définir des lois de changement d'échelle (Saleh et al., 2011, 2012).

L'utilisation des modèles mécanistes distribués couplant les processus de surface et souterrains couvre une large gamme d'échelles. Cependant une analyse approfondie montre que seulement 18 publications<sup>3</sup> (soit seulement 8.6 % de l'ensemble des publications consultées) concernent de grands bassins versants (> 10 000 km<sup>2</sup>) (Abu-El-Sha's and Rihani, 2007; Andersen et al., 2001; Bauer et al., 2006; Boukerma, 1987; Christiaens et al., 1995; Etchevers et al., 2001; Golaz-Cavazzi et al., 2001; Gomez et al., 2003; Habets et al., 1999; Hanson et al., 2010; Henriksen et al., 2008; Kolditz et al., 2012; Ledoux et al., 2007; Lemieux and Sudicky, 2010; Monteil, 2011; Park et al., 2009; Saleh et al., 2011; Scibek et al., 2007). Hormis Monteil (2011); Saleh et al. (2011), aucune d'elles ne s'intéresse à la quantification des échanges nappe-rivière à cette échelle. De plus, parmi des modèles dédiés à cette problématique, aucune application n'a été menée pour des extensions spatiales de cette ampleur (Tab. 2).

À 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 (Saleh, 2010). En outre, des problèmes d'équifinalité (Beven, 1989; Beven et al., 2011; Ebel and Loague, 2006; Klemes, 1983; Polus et al., 2011), de conditions initiales (Noto et al., 2008), ou de capacité de calcul (Jolly and Rassam, 2009), 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, 2006; Wondzell et al., 2009). C'est pourquoi des approches alternatives sont nécessaires pour compléter la gamme d'application de modèle (Werner et al., 2006). Toutefois, ni un modèle trop simple, ni un modèle trop complexe ne sont susceptibles d'apporter des réponses fiables (Hill, 2006; Smith et al., 2004; Wondzell et al., 2009). À cela s'ajoute la complexité des échanges nappe-rivière qui peuvent être pour un même tronçon de rivière, positifs dans certains secteurs et négatifs dans d'autres (Bencala et al., 2011). Tous ces facteurs confirment la nécessité de définir une méthodologie de changement d'échelle afin d'améliorer les simulations des échanges nappe-rivière à l'échelle régionale, comme mentionné par Mouhri et al. (2013b).

3. Parmi ces 18 publications, 8 ont été réalisées avec MODCOU ou EauDyssée.



TABLE 2 – Autres modèles mécanistes distribués aux échelles intermédiaires et régionales – Compléments à la Tab. ??, p.??.

Référence	Surf	Subsurf	Échanges		Résolution Numérique	Extension Spatiale	Période Simulée
			Nappe-rivière	conductance			
Bitteli et al. (2010)	Onde diffusive 2D DF	Richards 3D DF	conductance	découplée	3ha	1 an	
Dawson (2008)	Navier-Stokes 1D EF	Richards 2D EF	continuité	découplée	section verticale	30 min	
Gunduz and Aral (2005)	Saint-Venant 1D DF	Diffusivité 2D EF	Darcy 2D-latéral	couplée	1 800 km <sup>2</sup>	3 mois	
Hussein and Schwartz (2003)	Onde Cinématique 1D DF	Diffusivité 3D DF	continuité	découplée	256 km <sup>2</sup>	siècle	
Kim et al. (2012)	Saint-Venant 2D VF	Diffusivité 3D EF	conductance	découplée	64 km <sup>2</sup>	200 h	
Liang et al. (2007)	Navier-Stokes 2D	Boussinesq 2D	Darcy 2D-latéral	couplée	8 - 40 ha	2-3 min	
Peyrard et al. (2008)	Saint-Venant 2D EF	Boussinesq 2D EF	continuité	couplée	36 km <sup>2</sup>	5 ans	
Qu and Duffy (2007)	Onde diffusive 2D VF	Richards 2D VF	conductance	couplée	0.2 ha	1 mois	
Spanoudaki et al. (2009)	Navier-Stokes 3D DF	Richards 3D DF	conductance	couplée	2.5 ha - 25 km <sup>2</sup>	30 h	
Shen and Phanikumar (2010)	Onde diffusive 2D VF	Diffusivité pseudo 3D DF	conductance	découplée	12 ha - 1169 km <sup>2</sup>	5 h - 7 a	
Singh and Bhallamudi (1998)	Saint-Venant 1D DF	Richards 2D DF	continuité	découplée	0.6 m <sup>2</sup>	15 min	
Yuan et al. (2008)	Navier-Stokes 2D DF	Boussinesq 2D DF	continuité latérale	couplée	160 km <sup>2</sup>	30 min	

DE : Différences Finies ; EF : Éléments finis mixtes ; VF : Volumes finis  
couplée/découplée : le système d'équations numériques est résolu simultanément/séquentiellement

### 3 Modélisation des interfaces nappe-rivière : coupler les eaux de surface et souterraines

La simulation des échanges aux interfaces surface/subsurface (Ebel et al., 2009; Kollet and Maxwell, 2006; LaBolle et al., 2003; Furman, 2008), principalement le sol et l'interface nappe-rivière, est réalisée par deux approches distinctes (Tab. 2 & 1), quel que soit le nombre de dimensions simulées de l'espace :

- par un modèle résistif ou de conductance<sup>4</sup>, pour lequel l'interface elle-même a une valeur de conductivité. Le flux d'eau échangé à l'interface est alors calculé comme étant le produit de la conductivité par la différence de charge ou de pression suivant les formulations. Cette approche, qui est la plus répandue, est utilisée par les modèles mécanistes distribués les plus anciens et aussi nombre de récents ;
- par un calcul assurant la continuité du champ de pression et des flux aux interfaces. Ce calcul peut parfois être itératif. Cette approche engendre parfois une discontinuité de la vitesse de l'eau tangentielle au fond de la rivière (Discacciati et al., 2002; Miglio et al., 2003; Urquiza et al., 2008).

Le modèle résistif est le plus utilisé. Des formulations plus ou moins simples de la valeur de la conductance existent pour le cas de la déconnexion entre la rivière et l'aquifère (Osman and Bruen, 2002). Par contre Engeler et al. (2011) indiquent que ce coefficient est dépendant de la température. De plus, des doutes demeurent quant à la validité de la relation du premier ordre en cas de crue à l'échelle régionale lorsque les surfaces d'échange entre la nappe et la rivière augmentent du fait du débordement des rivières dans leurs lits majeurs (Engeler et al., 2011). Irvine et al. (2012) sont aussi favorables au modèle résistif à la condition de bien décrire les hétérogénéités du fond dont la distribution spatiale est difficile à établir (Genereux et al., 2008).

Pour la méthode de couplage par continuité, le calcul de continuité de la pression à l'interface nappe-rivière peut être effectué itérativement ou séquentiellement, l'approche itérative étant supposée plus précise (Sulis et al., 2010). Par contre, la méthode itérative, même si formellement plus esthétique, 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. Afin d'éviter la lourdeur des calculs liés à une approche itérative, de récents développements numériques permettent de résoudre un seul système matriciel couplant les équations de surface et souterraine. Cette approche, dite couplée (Tab. 2 & 1), peut être utilisée quel que soit le modèle d'échange nappe-rivière choisi. En revanche, elle nécessite bien souvent de paralléliser le code de calcul afin de pouvoir simuler un système réel.

D'un point de vue conceptuel, (Delfs et al., 2012; Ebel et al., 2009; Liggett et al., 2012; Németh and Solo-Gabriele, 2003) recommandent plutôt l'utilisation du modèle résistif qui permet de mieux comprendre les mécanismes en œuvre, et se révèle, dans le cas de milieux très conducteurs, équivalent au modèle de continuité. De plus, du fait de l'hypothèse, couramment émise, de verticalité des échanges nappe-rivière à l'échelle régionale (Krause et al., 2012; Sophocleous, 2002), le modèle résistif semble être un cadre favorable pour déterminer des lois de changement d'échelle (Boano et al., 2009; Engdahl et al., 2010). Cette hypothèse de verticalité des flux ne fait cependant pas l'unanimité puisque Rushton (2007), sur la base d'expériences numériques, indique que le mo-

4. Il s'agit en fait d'un coefficient d'échange du premier ordre (first order exchange coefficient).

dèle résistif, tel qu'il est mis en œuvre à l'échelle régionale, devrait se baser, pour l'estimation des valeurs de conductance des mailles rivières, sur la valeur de la perméabilité horizontale de l'aquifère et non pas verticale. Il semble cependant possible d'établir une équivalence entre son modèle et le modèle résistif plus classique qui considère la perméabilité verticale en reliant perméabilités verticale et horizontale par un coefficient d'anisotropie.

#### 4 Modélisation des interfaces nappe-rivière à l'échelle régionale

Peu de modèles mécanistes distribués d'hydrosystème ont été appliqués à des bassins de plusieurs dizaines de kilomètres carrés (section 2.3, p.6), et à cette échelle, les interfaces nappe-rivière sont modélisées à l'aide du modèle résistif. Ainsi, ce modèle a été mis en œuvre sur les deux hydrosystèmes de la Loire Monteil (2011) et de la Seine Gomez et al. (2003); Viennot (2007); Saleh (2010). Le modèle résistif ou de conductance, appliqué à l'échelle régionale avec des mailles de côté variant de 100 m à 1 km, formule implicitement une hypothèse de verticalité des échanges nappe-rivière. La différence de charges entre l'aquifère et la rivière est alors considérée comme le "moteur" de l'écoulement. Cette approche repose donc sur le fait que les échanges sub-horizontaux via les berges de la rivière sont calculés, à l'échelle de l'aquifère, par le biais de la simulation du champ de charges dans l'aquifère, duquel résulte une charge souterraine "théorique" sous ou au dessus de la rivière. Le gradient de charge entre cette charge souterraine théorique et la charge en rivière définit du point de vue du modèle le "moteur" de l'écoulement (Graillot et al., 2012).

Pour que les échanges soient correctement simulés dans ce cadre théorique, il faut, non seulement calibrer la conductance de l'interface nappe-rivière, mais aussi estimer les niveaux d'eau en rivière. Afin d'estimer les niveaux d'eau en rivière à l'échelle régionale, un modèle numérique de terrain<sup>5</sup> peut permettre de renseigner la cote de drainage des eaux souterraines par la surface au niveau des rivières (Flipo, 2005; Gomez et al., 2003; Thierion et al., 2012), éventuellement enrichie par d'autres informations provenant des services de navigation (Monteil, 2011). Suivant cette procédure, la cote de drainage de la rivière est une condition limite qui ne varie pas au court du temps. Néanmoins, elle permet au modèle d'estimer spatialement des échanges nappe-rivière à l'échelle d'aquifères régionaux (Monteil, 2011). Le choix peut aussi être fait de simuler les fluctuations des niveaux d'eau en rivière pour chaque maille rivière. Le niveau d'eau en rivière devient alors une variable d'état du modèle et non plus une condition limite. Cependant, la simulation des niveaux d'eau dans un réseau hydrographique de plusieurs milliers de kilomètre est une tâche ardue qui nécessite une puissance de calcul conséquente pour résoudre les équations classiques de l'hydraulique à surface libre, et une quantité d'informations bathymétriques impossible à collecter à cette échelle (Saleh, 2010). De plus, si l'utilisation d'un modèle numérique de terrain afin de reconstituer ces données bathymétriques permet de bien restituer les débits, il n'en va pas de même pour les niveaux d'eau (Saleh et al., 2013). C'est pourquoi, à l'échelle régionale, l'utilisation de courbes de tarage semble appropriée à la simulation des niveaux d'eau en rivière (Saleh et al., 2011). Cette approche, couplée au modèle de conductance au sein de la plate-forme de simulation des hydrosystèmes, EauDyssée, a d'ailleurs permis d'estimer les échanges nappe-rivière à l'échelle de 14 000 km de réseau hydrographique du bassin de Paris (Flipo et al., 2013).

---

5. modèle numérique de terrain

## 5 conclusion

La modélisation de l'hydrodynamique des interfaces nappe-rivières est un problème ardu qui nécessite de prendre en compte son caractère multi-dimensionnel. Cependant le concept d'interfaces emboîtées offre un cadre conceptuel intéressant permettant d'identifier la rivière comme le point d'accroche entre les échelles locale, permettant de caractériser les processus de mélange des eaux de surface et des eaux souterraines, et régionale, qui correspond à l'échelle de gestion des Masses d'eau.

Si l'interface nappe rivière peut être modélisée à ces deux échelles par des approches distinctes (modèle de conductance aux échelles intermédiaire et régionale, calcul de continuité aux échelles locale et intermédiaire), le principal enjeu des années à venir sera de trouver les méthodologies de changement d'échelle permettant de passer des émergences tridimensionnelles locales aux propriétés macroscopiques régissant les flux à l'échelle régionale. Une des pistes de réflexion est la mise en cohérence de ces cadres formels via la notion d'interfaces emboîtées, permettant, d'une part, de circonscrire géographiquement les objets à traiter, et d'autre part, d'affiner les modélisations en leur sein. Un des grands défis des années à venir sera donc d'inventer des structures de modélisation multi-échelle permettant d'intégrer la multi-dimensionnalité des processus à la racine de leur architecture.

## Références

- Abu-El-Sha's, W., Rihani, J., 2007. Application of the high performance computing techniques of parflow simulator to model groundwater flow at Azraq basin. *Water Resources Management* 21, 409–425.
- Andersen, J., Refsgaard, J., Jensen, K., 2001. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin - model construction and validation. *Journal of Hydrology* 247, 200–214.
- Aral, M., Gunduz, O., 2003. Scale effects in large scale watershed modeling. In : Singh, V., Yadava, R. (Eds.), *International Conference on Water and Environment*. Allied Publishers, India, pp. 37–51.
- Aral, M., Gunduz, O., 2006. *Watershed Models*. Taylor & Francis, Ch. Large-Scale Hybrid Watershed Modeling, pp. 75–95.
- Bauer, P., Gumbricht, T., Kinzelbach, W., 2006. A regional coupled surface water/groundwater model of the Okavango Delta, Botswana. *Water Resour. Res.* 42, W04403.
- Baxter, C., Hauer, F. R., 2000. Geomorphology, hyporheic exchange, and selection of spawning habitat by bull trout (*salvelinus confluentus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57-7, 1470–1481.
- Bencala, K., Gooseff, M., Kimball, B., 2011. Rethinking hyporheic flow and transient storage to advance understanding of stream-catchment connections. *Water Resour. Res.* 47, W00H03.

- Bertrand, G., Goldscheider, N., Gobat, J.-M., Hunkeler, D., 2012. Review : From multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems. *Hydrogeology Journal* 20, 5–25.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology. The case of physically-based model. *Journal of Hydrology* 105, 157–172.
- Beven, K., Cloke, H., 2012. Comment on "Hyperresolution global land surface modeling : Meeting a grand challenge for monitoring earth's terrestrial water" by Eric F. Wood et al. *Water Resour. Res.* 48, W01801.
- Beven, K., Smith, P., Wood, A., 2011. On the colour and spin of epistemic error (and what we might do about it). *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 3123–3133.
- Bittelli, M., Tomei, F., Pistocchi, A., Flury, M., Boll, J., Brooks, E., Antolini, G., 2010. Development and testing of a physically based, three-dimensional model of surface and subsurface hydrology. *Advances in Water Resources* 33, 106–122.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling : A review. *Hydrological Processes* 9, 251–290.
- Boano, F., Camporeale, C., Revelli, R., 2010. A linear model for coupled surface-subsurface flow in meandering stream. *Water Resour. Res.* 46, W07535.
- Boano, F., Revelli, R., Ridolfi, L., Jul. 2009. Quantifying the impact of groundwater discharge on the surface-subsurface exchange. *Hydrological Processes* 23, 2108–2116.
- Boukerma, B., 1987. Modélisation des écoulements superficiels et souterrains dans le sud-ouest de la France : approche du bilan hydrique. Ph.D. thesis, ENSMP.
- Brunke, M., Gonser, T., 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37 (1), 1–33.
- Brunner, P., Cook, P., Simmons, C., 2009a. Hydrogeologic controls on disconnection between surface water and groundwater. *Water Resour. Res.* 45, W01422.
- Brunner, P., Simmons, C., Cook, P., 2009b. Spatial and temporal aspects of the transition from connection to disconnection between rivers, lakes and groundwater. *Journal of Hydrology* 376, 159–169.
- Brunner, P., Simmons, C., Cook, P., Therrien, R., 2010. Modeling surface water-groundwater interaction with MODFLOW : Some considerations. *Ground Water* 48 (2), 174–180.
- Calver, A., 2001. Riverbed permeabilities : Information from pooled data. *Ground Water* 39 (4), 546–553.
- Cardenas, M., 2009a. A model for lateral hyporheic flow based on valley slope and channel sinuosity. *Water Resour. Res.* 45, W01501.

- Cardenas, M., 2009b. Stream-aquifer interactions and hyporheic exchange in gaining and losing sinuous streams. *Water Resour. Res.* 45, W06469.
- Cardenas, M., Wilson, J., 2007a. Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments. *Water Resour. Res.* 43, W08412.
- Cardenas, M., Wilson, J., 2007b. Exchange across a sediment-water interface with ambient groundwater discharge. *Journal of Hydrology* 346, 69–80.
- Cardenas, M., Wilson, J., 2007c. Hydrodynamics of coupled flow above and below a sediment-water interface with triangular bedforms. *Advances in Water Resources* 30, 301–313.
- Cardenas, M., Wilson, J., Zlotnik, V., 2004. Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange. *Water Resour. Res.* 40, W08307.
- Chen, X., Chen, X., 2003. Sensitivity analysis and determination of streambed leakance and aquifer hydraulic properties. *Journal of Hydrology* 284, 270–284.
- Christiaens, K., Vanclooster, M., Mallants, D., Xevi, E., Feyen, J., 1995. Modelling of the water and nutrient cycle at the catchment scale using the european hydrological system SHE 2 : Nitrogen balance. *Water* 81, 98.
- Conant, B., 2004. Delineating and quantifying ground water discharge zones using streambed temperatures. *Ground Water* 42 (2), 243–257.
- Dacharry, M., 1993. Encyclopedie. *AXIS*.
- Dahl, M., Nilsson, B., Langhoff, J., Refsgaard, J., 2007. Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater-surface water interaction. *Journal of Hydrology* 344 (1-2), 1–16.
- Dahm., C., Baker, M., Moore, D., Thibault, J., Jul. 2003. Coupled biogeochemical and hydrological responses of streams and rivers to drought. *Freshwater Biology* 48 (7), 1219–1231.
- Datry, T., Dole-Olivier, M., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J., Lafont, M., Breil, P., juin 2008. La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries - E A T* 54, 3–18.
- Dawson, C., 2008. A continuous/discontinuous Galerkin framework for modeling coupled subsurface and surface water flow. *Computers and Geosciences* 12, 451–472.
- Delfs, J.-O., Blumensaat, F., Wang, W., Krebs, P., Kolditz, O., 2012. Coupling hydrogeological with surface runoff model in a Poltava case study in Western Ukraine. *Environ Earth Sci* 65, 1439–1457.
- Discacciati, M., Miglio, E., Quarteroni, A., 2002. Mathematical and numerical models for coupling surface and groundwater flows. *Applied Numerical Mathematics* 43, 57–74.
- Dooge, J., 1968. The hydrologic cycle as a closed system. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin* 13 (1), 58–68.

- Ebel, B., Loague, K., 2006. Physics-based hydrologic-response simulation : Seeing through the fog of equifinality. *Hydrol. Process.* 20, 2887–2900.
- Ebel, B. A., Mirus, B. B., Heppner, C. S., VanderKwaak, J. E., Loague, K., 2009. First-order exchange coefficient coupling for simulating surface groundwater interactions : parameter sensitivity and consistency with a physics-based approach. *Hydrological Processes* 23, 1949–1959.
- Ellis, P., Mackay, R., Rivett, M., 2007. Quantifying urban river-aquifer fluid exchange processes : A multi-scale problem. *Journal of Contaminant Hydrology* 91 (1-2), 58–80.
- Engdahl, N., Volger, E., Weissmann, G., 2010. Evaluation of aquifer heterogeneity effects on river flow loss using a transition probability framework. *Water Resour. Res.* 46, W01506.
- Engeler, I., Hendricks Franssen, H., Müller, R., Stauffer, F., Feb. 2011. The importance of coupled modelling of variably saturated groundwater flow-heat transport for assessing river-aquifer interactions. *Journal of Hydrology* 397 (3-4), 295–305.
- Etchevers, P., Golaz, C., Habets, F., 2001. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994. *Journal of Hydrology* 244, 60–85.
- Fleckenstein, J., Niswonger, R., Fogg, G., 2006. River-aquifer interactions, geologic heterogeneity, and low-flow management. *Ground Water* 44 (6), 837–852.
- Flipo, N., 2005. Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin. Ph.D. thesis, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Flipo, N., 2012. Introduction aux travaux de l'axe " interfaces nappe-rivière ". Tech. rep., PIREN Seine.
- Flipo, N., Labarthe, B., Saleh, F., Pryet, A., Goblet, P., Viennot, P., Abasq, L., 2013. Relations eaux souterraines réseau hydrographique sur le bassin Seine Normandie : quantification des flux hydriques. Tech. Rep. R130218NFLI, ARMINES-MINES ParisTech.
- Flipo, N., Monteil, C., Poulin, M., de Fouquet, C., Krimissa, M., 2012. Hybrid fitting of a hydro-system model : long term insight into the beauce aquifer functioning (France). *Water Resour. Res.* 48, W05509.
- Frei, S., Fleckenstein, J., Kollet, S., Maxwell, R., 2009. Patterns and dynamics of river-aquifer exchange with variably-saturated flow using a fully-coupled model. *Journal of Hydrology* 375, 383–393.
- Frei, S., Lischeid, G., Fleckenstein, J., Nov. 2010. Effects of micro-topography on surface-subsurface exchange and runoff generation in a virtual riparian wetland - a modeling study. *Advances in Water Resources* 33 (11), 1388–1401.
- Furman, A., 2008. Modeling coupled surface-subsurface flow processes : A review. *Vadose Zone J.* 7 (2), 741–756.

- Genereux, D. P., Leahy, S., Mitsova, H., Kennedy, C. D., Corbett, D. R., 2008. Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in west bear creek, north carolina, usa. *Journal of Hydrology* 358, 332–353.
- Golaz-Cavazzi, C., Etchevers, P., Habets, F., Ledoux, E., Noilhan, J., 2001. Comparison of two hydrological simulations of the Rhonr basin. *Physics and Chemistry of the Earth* 26, 461–466.
- Gomez, E., Ledoux, E., Viennot, P., Mignolet, C., Benoît, M., Bornerand, C., Schott, C., Mary, B., Billen, G., Ducharne, A., Brunstein, D., 2003. Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique : Application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche* 3-2003, 38–45.
- Gooseff, M., Anderson, J., Wondzell, S., LaNier, J., Haggerty, R., 2006. A modelling study of hyporheic exchange pattern and the sequence, size, and spacing of stream bedforms in mountain stream networks, Oregon, USA. *Hydrological Processes* 20, 2443–2457.
- Gooseff, M., McGlynn, B., Aug. 2005. A stream tracer technique employing ionic tracers and specific conductance data applied to the maimai catchment, new zealand. *Hydrological Processes* 19, 2491–2506.
- Graillet, D., Paran, F., Lalot, E., Marmonier, P., Bornette, G., Piscart, C., Arthaud, F., Flipo, N., Mouhri, A., Habets, F., Thierion, C., Rejiba, F., Bodet, L., Guérin, R., Tallec, G., Chatelier, M., Douez, O., Maugis, P., 2012. Caractérisation des échanges nappes/rivières à l'échelle du tronçon ou du linéaire par métrique expérimentale ou par modélisation jusqu'à l'échelle régionale. Tech. rep., ARMINES & ONEMA.
- Gunduz, O., Aral, M., 2005. River networks and groundwater flow : a simultaneous solution of a coupled system. *Journal of Hydrology* 301, 216–234.
- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlé, C., Vidal-Madjar, D., 1999. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area Part I : Model and database. *Journal of Hydrology* 217, 75–96.
- Hanson, R., Schmid, W., Faunt, C., Lockwood, B., 2010. Simulation and analysis of conjunctive use with MODFLOW's farm process. *Ground Water* 48 (5), 674–689.
- Harvey, J., Bencala, K., 1993. The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments. *Water Resour. Res.* 29 (1), 89–98.
- Hayashi, M., Rosenberry, D., 2002. Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Ground Water* 40 (3), 309–316.
- Henriksen, H., Trolborg, L., Hojberg, A., Refsgaard, J., 2008. Assessment of exploitable groundwater resources of Denmark by use of ensemble resource indicators and a numerical groundwater-surface water model. *Journal of Hydrology* 348, 224–240.
- Hester, E., Doyle, M., 2008. In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange. *Water Resour. Res.* 44, W03417.



- Hill, M., 2006. The practical use of simplicity in developing ground water models. *Ground Water* 44, 775–781.
- Hussein, M., Schwartz, F., 2003. Modeling of flow and contaminant transport in coupled stream-aquifer systems. *J. Contaminant hydrology* 65, 41–64.
- Irvine, D., Brunner, P., Hendricks Franssen, H.-J., Simmons, G., 2012. Heterogeneous or homogeneous ? implications of simplifying heterogeneous streambeds in models of losing streams. *Journal of Hydrology* 424-425, 16–23.
- Jolly, I., Rassam, D., 2009. A review of modelling of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid floodplains. In : 18<sup>th</sup> World IMACS / MODSIM Congress.
- Jones, J., Sudicky, E., Brookfield, A., Park, Y.-J., 2006. An assessment of the tracer-based approach to quantifying groundwater contributions to streamflow. *Water Resour. Res.* 42, W02407.
- Jones, J., Sudicky, E., McLaren, R., 2008. Application of a fully-integrated surface-subsurface flow model at the watershed-scale : A case study. *Water Resour. Res.* 44, W03407.
- Kalbus, E., Reinstof, F., Schirner, M., 2006. Measuring methods for groundwater - surface water interactions : a review. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 873–887.
- Kalbus, E., Schmidt, C., Molson, J., Reinstorf, F., Schirner, M., 2009. Influence of aquifer and streambed heterogeneity on the distribution of groundwater discharge. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 69–77.
- Kasahara, T., Hill, A., 2006. Hyporheic exchange flows induced by constructed riffles and steps in lowland streams in southern Ontario, Canada. *Hydrological Processes* 20, 4287–4305.
- Kasahara, T., Wondzell, S., 2003. Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams. *Water Resour. Res.* 39 (1), 1005.
- Kaser, D., Binley, A., Heathwaite, A., Krause, S., 2009. Spatio-temporal variations of hyporheic flow in a riffle-step-pool sequence. *Hydrological Processes* 23 (15), 2138–2149.
- Kim, J., Warnock, A., Ivanov, V., Katopodes, N., 2012. Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow. *Advances in Water Resources* 37, 104–126.
- Klemes, V., 1983. Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of Hydrology* 65, 1–23.
- Koch, J., McKnight, D., Neupauer, R., 2011. Simulating unsteady flow, anabranching, and hyporheic dynamics in a glacial meltwater stream using a coupled surface water routing and groundwater flow model. *Water Resour. Res.* 47, W05530.
- Kolditz, O., Bauer, S., Beyer, C., Böttcher, N., Dietrich, P., Görke, U.-J., Kalbacher, T., Park, C.-H., Sauer, U., Schütze, C., Shao, H., Singh, A., Taron, J., Wang, W., Watanabe, N., 2012. A systematic benchmarking approach for geologic CO<sub>2</sub> injection and storage. *Environ Earth Sci* In Press, xxx.

- Kollet, S. J., Maxwell, R. M., 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.
- Krause, S., Blume, T., Cassidy, N., 2012. Investigating patterns and controls of groundwater upwelling in a lowland river by combining fibre-optic distributed temperature sensing with observations of vertical head gradients. *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (1), 1775–1792.
- Krause, S., Bronstert, A., 2007. The impact of groundwater-surface water interactions on the water balance of a mesoscale lowland river catchment in northeastern Germany. *Hydrological Processes* 21, 169–184.
- Krause, S., Bronstert, A., Zehe, E., 2007. Groundwater-surface water interactions in a North German lowland floodplain - Implications for the river discharge dynamics and riparian water balance. *Journal of Hydrology* 347, 404–417.
- Krause, S., Hannah, D., Fleckenstein, J., 2009a. Hyporheic hydrology : interactions at the groundwater-surface water interface. *Hydrological Processes* 23, 2103–2107.
- Krause, S., Heathwaite, L., Binley, A., Keenan, P., Jul. 2009b. Nitrate concentration changes at the groundwater-surface water interface of a small cumbrian river. *Hydrological Processes* 23, 2195–2211.
- Kurtulus, B., Flipo, N., Goblet, P., Vilain, G., Tournebize, J., Tallec, G., 2011. Hydraulic head interpolation in an aquifer unit using ANFIS and ordinary kriging. In : *Studies in computational intelligence*. Vol. 343 of 978-3-642-20205-6. Springer, pp. 265–273.
- LaBolle, E., Ahmed, A., Fogg, G., 2003. Review of the integrated groundwater and surface-water model (IGSM). *Ground Water* 41(2), 238–46.
- Lautz, L., Siegel, D., 2006. Modeling surface and ground water mixing in the using MODFLOW and MT3D. *Advances in Water Resources* 29, 1618–1633.
- Ledoux, E., Gomez, E., Monget, J., Viavattene, C., Viennot, P., Ducharne, A., Benoit, M., Mignolet, C., Schott, C., Mary, B., 2007. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Sci Total Environ* 375, 33–47.
- Lemieux, J., Sudicky, E., 2010. Simulation of groundwater age evolution during the Wisconsinian glaciation over the Canadian landscape. *Environmental Fluid Mechanics* 10, 91–102.
- Liang, D., Falconer, R., Lin, B., 2007. Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model. *Journal of Hydrology* 337, 147–158.
- Liggett, J., Werner, A., Simmons, C., 2012. Influence of the first-order exchange coefficient on simulation of coupled surface-subsurface flow. *Journal of Hydrology* 414-415, 503–515.
- Loague, K., Heppner, C., Mirus, B., Ebel, B., Ran, Q., Carr, A., Beville, S., VanderKwaak, J., 2006. Physics-based hydrologic-response simulation : foundation for hydroecology and hydrogeomorphology. *Hydrological Processes* 20, 1231–1237.

- Malard, F., Tockner, K., Dole-Olivier, M.-J., Ward, J. V., 2002. A landscape perspective of surface-subsurface hydrological exchanges in river corridors. *Freshwater Biology* 47, 621–640.
- Marzadri, A., Tonina, D., Bellin, A., 2011. A semianalytical three-dimensional process-based model for hyporheic nitrogen dynamics in gravel bed rivers. *Water Resour. Res.* 47, W11518.
- Marzadri, A., Tonina, D., Bellin, A., Vignoli, G., Tubino, M., 2010. Semianalytical analysis of hyporheic flow induced by alternate bars. *Water Resour. Res.* 46, W07531.
- Massei, N., Fournier, M., 2012. Assessing the expression of large-scale climatic fluctuations in the hydrological variability of daily Seine river flow (France) between 1950 and 2008 using Hilbert-Huang Transform. *Journal of Hydrology* 448-449, 119–128.
- Massei, N., Laignel, B., Deloffre, J., Mesquita, J., Motelay, A., Lafite, R., Durand, A., 2010. Long-term hydrological changes of the seine river flow (france) and their relation to the north atlantic oscillation over the period 1950-2008. *International Journal of Climatology* 30 (14), 2146–2154.
- Miglio, E., Quarteroni, A., Saleri, F., 2003. Coupling of free surface and groundwater flows. *Computers & Fluids* 32, 73–83.
- Monteil, C., 2011. Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin-versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Ph.D. thesis, MINES-ParisTech.
- Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., de Fouquet, C., Bodet, L., Goblet, P., Kurtulus, B., Ansart, P., Tallec, G., Durand, V., Jost, A., 2013a. Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in sedimentary basin. *Journal of Hydrology* submitted.
- Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., de Fouquet, C., Tallec, G., Bodet, L., Durand, V., Jost, A., Guérin, R., Ansart, P., 2012a. Stratégie d'échantillonnage des échanges nappe-rivière du bassin agricole de l'orgeval. Tech. rep., PIREN Seine.
- Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Goblet, P., Bodet, L., Tallec, G., Ansart, P., Jost, A., Durand, V., de Fouquet, C., 2013b. Investigations hydro-géophysiques et premières modeésitions thermiques de la vallée des avenelles à l'interface cours d'eau-nappe. Tech. rep., PIREN Seine.
- Mouhri, A., Flipo, N., Saleh, F., 2012b. Etat de l'art sur les méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe-rivière. Tech. rep., PIREN Seine.
- Munz, M., Krause, S., Tecklenburg, C., Binley, A., Nov. 2011. Reducing monitoring gaps at the aquifer-river interface by modelling groundwater-surface water exchange flow patterns. *Hydrological Processes* 25, 3547–3562.
- Nemeth, M., Solo-Gabriele, H., 2003. Evaluation of the use of reach transmissivity to quantify exchange between groundwater and surface water. *Journal of Hydrology* 274, 145–159.
- Noto, L., Ivanov, V., Bras, R., Vivoni, E., 2008. Effects of initialization on response of a fully-distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology* 352, 107–125.

- Osman, Y., Bruen, M., 2002. Modelling stream-aquifer seepage in an alluvial aquifer : an improved loosing-stream package for MODFLOW. *Journal of Hydrology* 264, 69–86.
- Panday, S., Huyakorn, P. S., 2004. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources* 27, 361–382.
- Park, Y.-J., Sudicky, E., Panday, S., Matanga, G., 2009. Implicit subtime stepping for solving nonlinear flow equations in an integrated surface-subsurface system. *Vadose Zone Journal* 8, 825–836.
- Peyrard, D., Sauvage, S., Vervier, P., Sanchez-Perez, J., Quintard, M., 2008. A coupled vertically integrated model to describe lateral exchanges between surface and subsurface in large alluvial floodplains with a fully penetrating river. *Hydrological Processes* 22, 4257–4273.
- Pinder, G., Jones, J., 1969. Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total run-off. *Water Resour. Res.* 5 (2), 438–445.
- Polus, E., Flipo, N., de Fouquet, C., Poulin, M., 2011. Geostatistics for assessing the efficiency of distributed physically-based water quality model. Application to nitrates in the Seine River. *Hydrological Processes* 25 (2), 217–233.
- Qu, Y., Duffy, C., 2007. A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation. *Water Resour. Res.* 43, W08419.
- Revelli, R., Boano, F., Camporeale, C., Ridolfi, L., 2008. Intra-meander hyporheic flow in alluvial rivers. *Water Resour. Res.* 44, W12428.
- Rosenberry, D., Pitlick, J., 2009. Local-scale variability of seepage and hydraulic conductivity in a shallow gravel-bed river. *Hydrological Processes* 23, 3306–3318.
- Rushton, K., 2007. Representation in regional models of saturated river-aquifer interaction for gaining/losing rivers. *Journal of Hydrology* 334, 262–281.
- Saenger, N., Kitanidis, P., Street, R., 2005. A numerical study of surface-subsurface exchange processes at a riffle-pool pair in the Lahn River, Germany. *Water Resour. Res.* 41, W12424.
- Saleh, F., 2010. Apport de la modélisation hydraulique pour une meilleure simulation des tirants d'eau et des échanges nappe-rivière à l'échelle régionale. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Saleh, F., Ducharme, A., Flipo, N., Oudin, L., Ledoux, E., 2013. Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1d saint-venant hydraulic model at regional scale. *Journal of Hydrology* 476, 169–177.
- Saleh, F., Flipo, N., de Fouquet, C., 2012. Influence de la méthode d'estimation des niveaux d'eau dans un réseau hydrographique sur la quantification des échanges nappe-rivière. Tech. rep., PIREN Seine.

- Saleh, F., Flipo, N., Habets, F., Ducharne, A., Oudin, L., Viennot, P., Ledoux, E., 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.
- Sawyer, A., Cardenas, M., 2009. Hyporheic flow and residence time distributions in heterogeneous cross-bedded sediment. *Water Resour. Res.* 45, W08406.
- Sawyer, A., Cardenas, M., Buttle, J., 2011. Hyporheic exchange due to channel-spanning logs. *Water Resour. Res.* 47, W08502.
- Schmidt, C., Bayer-Raich, M., Schirmer, M., Jul. 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* 3 (4), 1419–1446.
- Scibek, J., Allen, D., Cannon, A., Whitfield, P., 2007. Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. *Journal of Hydrology* 333, 165–181.
- Shen, C., Phanikumar, M., 2010. A process-based, distributed hydrologic model based on a large-scale method for surface-subsurface coupling. *Advances in Water Resources* 33, 1524–1541.
- Singh, V., Bhallamudi, S., 1998. Conjunctive surface-subsurface modeling of overland flow. *Advances in Water Resources* 21, 567–579.
- Smith, M., Seo, D.-J., Koren, V., Reed, S., Zhang, Z., Duan, Q., Moreta, F., Cong, S., 2004. The distributed model intercomparison project (DMIP) : motivation and experiment design. *Journal of Hydrology* 298, 4–26.
- Sophocleous, M., Apr. 2002. Interactions between groundwater and surface water : the state of the science. *Hydrogeology Journal* 10 (2), 348.
- Spanoudaki, K., Stamou, A., Nanou-Giannarou, A., 2009. Development and verification of a 3-D integrated surface water-groundwater model. *Journal of Hydrology* 375, 410–427.
- Storey, R. G., Howard, K., Williams, D., 2003. Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream : A three-dimensional groundwater flow model. *Water Resour. Res.* 39-2, 1034.
- Sulis, M., Meyerhoff, S., Paniconi, C., Maxwell, R., Putti, M., Kollet, S., 2010. A comparison of two physics-based numerical models for simulating surface water-groundwater interactions. *Advances in Water Resources* 33, 456–467.
- Thierion, C., Longuevergne, L., Habets, F., Ledoux, E., Ackerer, P., Majdalani, S., Leblois, E., Lecluse, S., Martin, E., Queguiner, S., Viennot, P., 2012. Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem. *Journal of Hydrology* 424-425, 68–83.
- Tonina, D., Buffington, J. M., 2007. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology : laboratory experiments and three-dimensional modelling. *Water Resour. Res.* 43, W01421.

- Tóth, J., 1963. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. *Journal of Geophysical Research* 68 (16), 4795–4812.
- Urquiza, J., N'Dri, D., Garon, A., Delfour, M., 2008. Coupling stokes and darcy equations. *Applied Numerical Mathematics* 58, 525–538.
- VanderKwaak, J. E., Loague, K., 2001. Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. *Water Resour. Res.* 37, 999–1013.
- Viennot, P., 2007. Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine. représentation différentiée des aquifères du Tertiaire / intégration des prélèvements anthropiques. Tech. Rep. R071128PVIE, Centre de Géosciences, Mines ParisTech.
- Werner, A., Gallagher, M., Weeks, S., 2006. Regional-scale, fully coupled modelling of stream-aquifer interaction in a tropical catchment. *Journal of Hydrology* 328, 497–510.
- White, D. S., 1993. Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *Journal of the North American Benthological Society* Vol. 12, No. 1, 61–69.
- Whiting, P., Pomeranets, M., 1997. A numerical study of bank storage and its contribution to streamflow. *Journal of Hydrology* 202, 121–136.
- Winter, T., 1998. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* 7, 28–45.
- Woessner, W. W., 2000. Stream and fluvial plain ground water interactions : Rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water* 38 (3), 423–429.
- Wondzell, S., LaNier, J., Haggerty, R., 2009. Evaluation of alternative groundwater flow models for simulating hyporheic exchange in a small mountain stream. *Journal of Hydrology* 364, 142–151.
- Wood, E., Roundy, J., Troy, T., van Beek, L., Bierkens, M., Blyth, E., de Roo, A., Döll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., van de Giesen, N., Houser, P., Jaffé, P., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., Whitehead, P., 2011. Hyperresolution global land surface modeling : Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resour. Res.* 47, W05301.
- Wood, E., Roundy, J., Troy, T., van Beek, L., Bierkens, M., Blyth, E., de Roo, A., Döll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., van de Giesen, N., Houser, P., Jaffé, P., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., Whitehead, P., 2012. Reply to comment by Keith J. Beven and Hannah L. Cloke on "Hyperresolution global land surface modeling : Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water". *Water Resour. Res.* 48, W01802.
- Wroblecky, G., Campana, M., Valett, H., Dahm, C., 1998. Seasonal variation in surface-subsurface water exchange and lateral hyporheic area of two stream-aquifer systems. *Water Resour. Res.* 34-3, 317–328.

Yuan, D., Lin, B., Falconer, R., 2008. Simulating moving boundary using a linked groundwater and surface water flow model. *Journal of Hydrology* 349, 524–535.