

Modèles hydrodynamiques distribués à base physique

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
										
Nappes libres et captives Aquifères multi-couches	Mailles variables	Maille 30m à 1000m	Masse d'eau	Régime transitoire	Horaire à mensuel	Important	Important	Important	Important	Important

Description rapide

Cette approche s'appuie sur la modélisation couplée des flux d'eau dans les nappes et dans les rivières. Les écoulements dans chacun de ces compartiments sont régis par des lois physiques différentes qui doivent être couplées. Les données observées (débit, hauteur d'eau en rivière, hauteur de nappe) peuvent être utilisées pour caler des paramètres du modèle.

Il existe plusieurs types de modèles à base physique intégrant les échanges nappe/rievière. La plupart découpent l'espace en mailles pour résoudre les équations. On peut citer par exemple, les modèles Marthe (Modélisation d'aquifères par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour le calcul hydrodynamique des écoulements ; Thiéry, 2006), Modflow (Harbaugh, 2005), Feflow (DHI-WASY GmbH), ou la plateforme Modcou/Eau-Dyssée (Thierion *et al.* 2012 ; Flipo *et al.* 2012 ; Flipo, 2013 ; Pryet *et al.* 2015), voire des approches à plus grande échelle couvrant toute la France comme Isba-Trip (Vergnes *et al.* 2012 et 2014). Ces modèles peuvent caractériser les échanges nappe/rievière spatialement à différentes périodes de l'année à des pas de temps qui sont fonction des données disponibles et des temps de calcul (typiquement horaires, journaliers ou mensuels). Ils permettent de quantifier les échanges sur toute la surface mouillée (fond et berge distingués ou non).

Il est possible de réaliser des modèles simplifiés quand on dispose de peu de données. Il est aussi envisageable d'utiliser des modèles pour travailler à petite échelle sur une zone problématique et suffisamment équipée (mesures sur piézomètres, niveau d'eau en rivières).

■ Principe de caractérisation des échanges

Le principe de la méthode est de développer :

- ✓ une modélisation des écoulements dans l'aquifère incisé par la rivière étudiée, ce qui nécessite une connaissance préalable de la géologie, de la topographie, du climat et des propriétés hydrodynamiques des couches aquifères concernées (propriétés qui peuvent être estimées en se servant de mesures de terrain) ;
- ✓ une modélisation des écoulements en rivière qui s'appuie sur la mesure des débits, mais également des hauteurs d'eau en plusieurs points du linéaire et nécessite des connaissances sur le lit de la rivière.

La simulation spécifique des échanges aux interfaces nappe/riverie peut être réalisée par deux approches distinctes :

- ✓ un modèle de conductance, pour lequel l'interface elle-même a une valeur de conductivité hydraulique spécifique ; le flux d'eau échangé à l'interface est alors calculé comme étant le produit de la conductivité par la différence de niveau entre la rivière et la nappe (ou de pression suivant les formulations) ; cette approche est la plus répandue ;
- ✓ un calcul assurant la continuité du champ de pression et des flux aux interfaces ; ce calcul peut parfois être itératif.

Dans le modèle de conductance, le réseau hydrographique est découpé en tronçons de rivière correspondant aux mailles du modèle souterrain (figure 15). Selon la hauteur relative de la rivière par rapport au niveau piézométrique de l'aquifère simulé dans la maille, un débit est échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère ou inversement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé par les surfaces, épaisseurs et perméabilités du lit ou des berges du cours d'eau (parfois confondus en une seule entité). Dans l'exemple de la figure 16 page suivante (Modèle Marthe), trois situations sont possibles en présence d'un lit bien défini et peu perméable :

- ✓ lorsque le niveau d'eau de l'aquifère est inférieur à la base du lit de la rivière, le débit d'échange vers l'aquifère est un terme de percolation à travers la zone non-saturée qui dépend de la conductivité du lit de la rivière et peut donc varier spatialement (figure 16 a) [encart : Formules de calcul, équation (2)] ;
- ✓ lorsque le niveau d'eau de l'aquifère est situé au-dessus de la base du lit de la rivière, le débit d'échange est le produit de la surface d'échange par la perméabilité et par la différence de hauteur entre la surface de la rivière et celle de l'aquifère, divisée par l'épaisseur du lit (figure 16 b et c) [encart : Formules de calcul, équation (3)] ;
- ✓ lorsque le niveau d'eau de l'aquifère est supérieur à la cote du sol et à la cote de la rivière, le débit d'échange de la nappe vers la rivière est augmenté d'un terme complémentaire de débordement de la nappe, appliqué à la surface complémentaire de la maille du domaine souterrain (figure 16 d) [encart : formules de calcul, équation (4)].

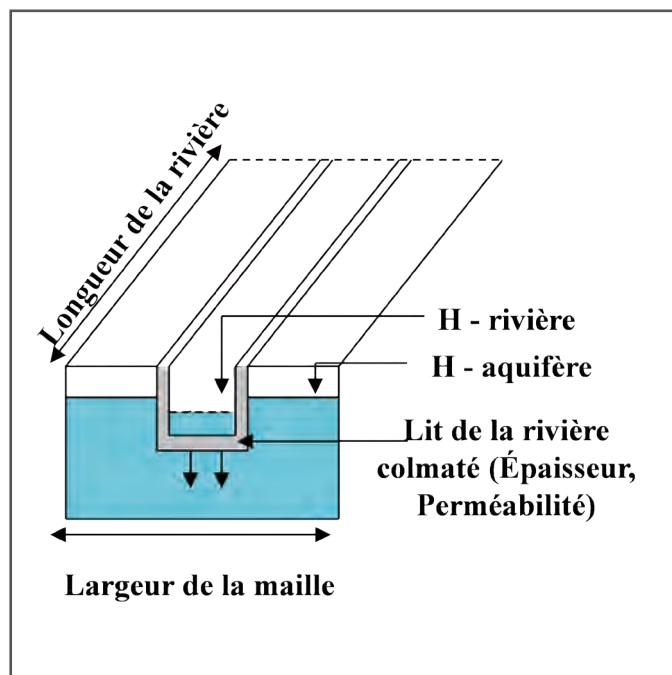


Figure 15. Géométrie d'un tronçon de rivière (Chatelier et Thiéry, 2011), l'ensemble du lit est ici considéré comme une seule entité semi-perméable.

Formules de calcul

Calcul des interactions nappe/rivière (exemple du modèle Marthe)

$$\text{SURF}_{\text{Ech}} = L \cdot [I + 2 \cdot (H_R - H_I)]$$

(1)

$$Q_{\text{Percol}} = \frac{\text{SURF}_{\text{Ech}} \cdot K_R \cdot (H_R - H_I)}{\text{Épais}}$$

(2)

$$Q_{\text{Ech}} = \frac{\text{SURF}_{\text{Ech}} \cdot K_R \cdot (H_R - H_N)}{\text{Épais}}$$

(3)

$$Q_{\text{Débo}} = \frac{(\text{SURF}_{\text{Mail}} - L \cdot I) \cdot K_R \cdot (H_N - H_{\text{Topo}})}{\text{Épais}}$$

(4)

Avec :

L = Longueur du tronçon (m)

I = Largeur du tronçon (m)

K_R = Perméabilité du lit et des berges (m/s)

Épais = Épaisseur du lit (et des berges) (m)

H_R = Cote absolue de la surface libre de la rivière (m)

H_N = Charge hydraulique (niveau piézométrique) de la nappe sous-jacente (m)

H_I = Cote du lit de la rivière (m)

H_{Topo} = Cote de la surface topographique (m)

$\text{SURF}_{\text{Mail}}$ = Surface de la maille associée du modèle de nappe (m²)

SURF_{Ech} = Surface d'échange (m²)

Q_{Ech} = Débit d'échange de la rivière vers la nappe (m³/s)

Q_{Percol} = Débit de percolation de la rivière vers la nappe décrochée (m³/s)

$Q_{\text{Débo}}$ = Débit complémentaire de débordement de la nappe vers la rivière (m³/s)

Autres formules (variante de l'équation 3)

$Q = C \cdot (H_R - H_N)$ avec C coefficient d'échange le coefficient d'échange nappe/rivière (en m²/s)

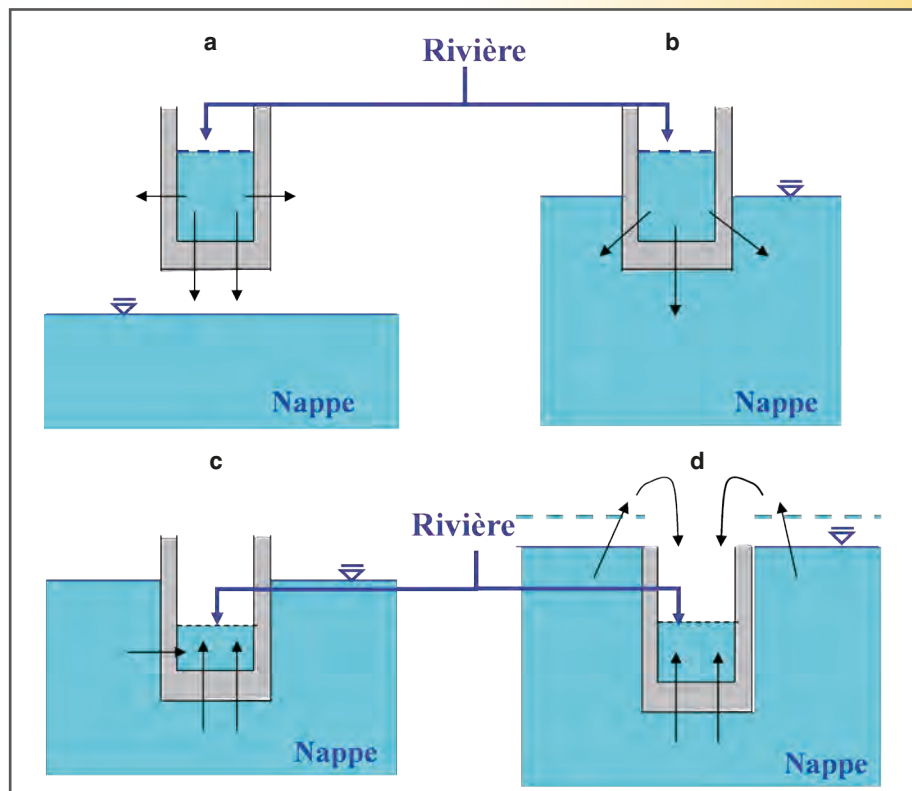


Figure 16. Différentes configurations d'échanges nappe/rivière (Chatelier et Thiéry, 2011).
a : débit de percolation Q_{Percol} ; b et c : débit d'échanges Q_{Ech} ; d : débit de débordement $Q_{\text{Débo}}$.

Dans les cas où les échanges vont de la rivière vers la nappe, les volumes échangés sont bien sûr limités par le débit disponible en rivière. Cela nécessite des précautions lorsque les modules physiques pour estimer les débits et les niveaux piézométriques ne partagent pas le même pas de temps (Thierion *et al.* 2012), ce qui est notamment le cas lors de couplage avec un modèle hydraulique.

Il apparaît donc que, dans le cas général, le débit d'échange dépend en premier lieu des variations d'eau dans la rivière qu'il est important de connaître. La valeur de la conductance de l'interface est en général calée avec la modélisation.

Protocole de mesure des échanges

Compte tenu de la complexité du travail à réaliser, seul l'essentiel du protocole est présenté dans cette fiche (Figure 17 page suivante).

- Recueil de données
- Validation des données
- Interprétation des données permettant de construire un modèle conceptuel
- Construction du modèle (modèle géologique si besoin, puis modèle hydrogéologique couplé au modèle hydrologique)
- Calibration du modèle couplé hydrologie-hydrogéologique
- Validation du modèle
- Simulations

Pour une description plus complète du protocole, le lecteur est invité à se reporter à des guides spécialisés (par ex. Barthélemy et Seguin, 2016).

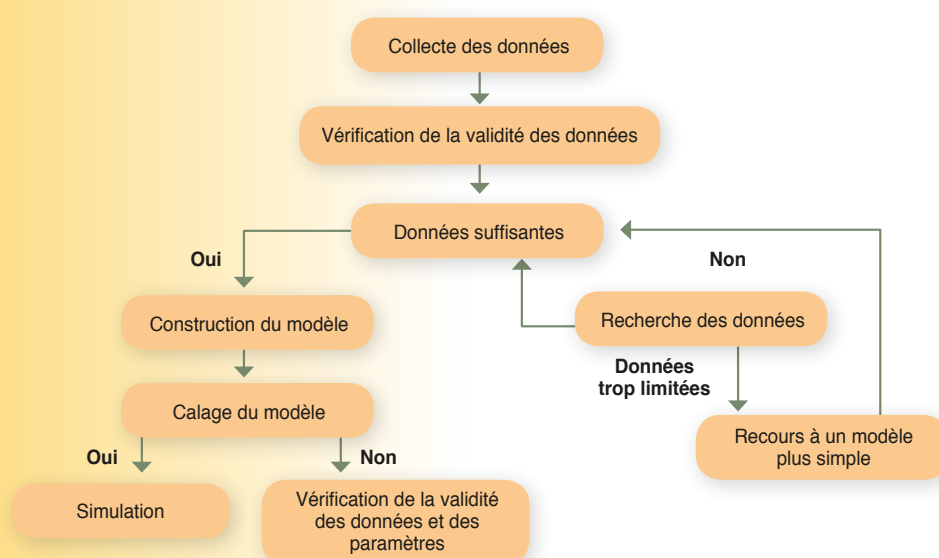


Figure 17. Les étapes essentielles de la modélisation.

Les coûts hommes/jours mis en œuvre sont précisés dans le tableau 10.

Tableau 10. Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la modélisation hydrodynamique.

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Instrumentation	6 à 18 mois	Au moins 2 (technicien, hydrogéologue)
Collecte et analyse des données		
Construction du modèle	9 à 18 mois	À adapter suivant le type de modèle et l'ampleur du travail
Calibration du modèle		
Validation du modèle		
Simulation		

* Ces coûts sont donnés à titre indicatif, car très dépendants de la taille et de la complexité du système à modéliser : de quelques jours pour modéliser l'impact d'un petit champ captant, à plusieurs années pour un système aquifère multicouche d'extension régionale (Barthélemy et Seguin, 2016).

■ Interprétation des données et des résultats

Le modèle fournit des données de hauteur et flux d'eau dans les nappes et la rivière. L'interprétation de ces données et des résultats est une affaire de spécialistes. Il faut savoir que les quantifications de flux sont généralement à considérer comme des ordres de grandeur. À titre d'information, l'encart « Formules de calcul » présente un exemple de mode de calcul des échanges nappe/ri vière utilisé dans le modèle Marthe appliqué au bassin versant de la Sèvre-Niortaise et aux aquifères sous-jacents.

Dispositifs / matériel

Matériel de terrain

Pas de matériel terrain spécifique mais nécessite des données de débit, de hauteurs d'eau en nappe, des résultats d'essai de pompage pour connaître les propriétés du sol

Matériel de labo

Ordinateur de bureau avec puissance et mémoire suffisante, voire serveur de calcul

Logiciel

Modèle d'écoulement d'eau dans le sol couplé à un réseau de surface (volumes finis, différences finies, éléments finis, 2D ou 3D, gratuits ou non)

■ Valeurs guides et repères : exemple de la Sèvre-Niortaise

Cette partie donne un exemple de dimensionnement et de temps de calcul du modèle de nappes utilisé pour modéliser le méandre de la Sèvre-Niortaise à Échiré (Deux-Sèvres). Le modèle final utilisé dans le cadre de ce travail est issu d'une extraction du modèle régional des nappes du Jurassique de Poitou-Charentes (extension de 20 000 km² à maille kilométrique comporte huit couches dont quatre aquifères et plus de 3 000 km de linéaire de rivières). Les caractéristiques du modèle adapté sur le secteur d'Échiré sont les suivantes :

- ✓ 3 300 km² d'extension, huit couches dont trois aquifères jusqu'à 400 m de profondeur, environ 610 km de linéaire de rivière. Le maillage principal est d'1 km² et sur la zone d'intérêt (champ captant) les mailles sont subdivisées en sous-mailles (gigogne de 1 ha). Cette zone raffinée s'étend sur 18 ha. À noter ici, que les conditions en limites (hauteurs des nappes) sur le pourtour du modèle sont issues du modèle global ;
- ✓ 102 pas de temps de calcul entre 2000 et 2007, 910 chroniques de prélèvement, 1 de lâchers de barrage ;
- ✓ 1 à 2 h de temps de calcul, environ 1 Go pour la taille des fichiers de résultats ;
- ✓ Calage sur une quarantaine de chroniques de piézomètres et sur une cinquantaine de chroniques de débits en rivière ;
- ✓ paramètres en entrée dans le modèle du méandre du champ captant d'Échiré (tableau 11) : les valeurs de perméabilités des couches géologiques du Dogger, du Toarcien et de l'Infra-Toarcien connaissent une forte amplitude de variation. Ce paramétrage correspond à la présence de failles, très conductrices, traversant les matrices calcaires ou marneuses moins transmissives. Les coefficients d'emménagement sont faibles pour retranscrire la forte réactivité du système hydrogéologique (diffusivité importante du système en lien avec le caractère fracturé et karstifié du milieu).

Le modèle utilisé est extrait d'un modèle régional de grande ampleur, dont le développement a duré plusieurs années. Suivant la taille de la zone d'étude et en fonction de la complexité de la zone (nombre de nappes à simuler, de cours d'eau à prendre en compte...), le nombre de mailles et les temps de calcul peuvent être réduits.

Tableau 11. Gammas de valeurs attribuées aux paramètres de calage sur Échiré (Chatelier, 2014).

Perméabilité (m.s ⁻¹)	
Alluvions	2,5.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻³
Calcaire du Dogger	1,7.10 ⁻⁴ - 1.10 ⁻²
Socle	1.10 ⁻⁹ - 1.10 ⁻⁷
Emmagasinement libre (%) / spécifique captif (m ⁻¹)	
Alluvions	0,1 - 4 / -
Calcaire du Dogger	0,1 - 10 / 1.10 ⁻⁷ - 5.10 ⁻⁶
Socle	5 / 5.10 ⁻⁷
Épaisseur des dépôts de fond de lit de rivière (m)	
	0,2 - 1
Perméabilité des dépôts de fond de lit de rivière (m.s ⁻¹)	
	5.10 ⁻⁹ - 2.10 ⁻⁵

* Ces valeurs sont susceptibles de varier très fortement d'un site et d'une échelle à l'autre, voire au sein d'un même site.

■ Valeurs guides et repères : exemple de la nappe alluviale du fossé rhénan supérieur

La nappe alluviale du fossé rhénan supérieur (Rhin) modélisée s'étend sur 4 655 km² et est couverte par un dense réseau de rivières prenant souvent leurs sources dans les Vosges ou la Montagne noire. Le modèle complet couvre un domaine de 13 900 km² :

- ✓ le domaine aquifère de 4 655 km² est représenté par un total de 34 180 mailles de 200 à 1 600 m de côté, les mailles situées sur les rivières ayant toutes la résolution la plus fine (200 m) ;
- ✓ le pas de temps de calcul des écoulements en rivière est de 30 minutes alors que les écoulements en nappe sont estimés au pas de temps journalier. Le modèle a été évalué sur une période de 18 ans ;
- ✓ 446 points de prélèvements sont gérés par le modèle, avec des valeurs au pas de temps généralement mensuel ;
- ✓ le temps de calcul est d'environ 20 min par an et le volume des fichiers de résultats détaillés est d'environ 500 Mo ;
- ✓ les paramètres hydrodynamiques du modèle (porosité, perméabilité) ont été estimés par un modèle inverse en se basant sur les données de plus de 100 piézomètres. Plusieurs valeurs du coefficient d'échange nappe/ rivière et du débit de perte maximale (lié à la perméabilité du lit) ont été testées, mais sont difficiles à discriminer sur la base de comparaison aux débits et à la piézométrie observés ;
- ✓ un effort particulier a été mené pour améliorer la représentation des hauteurs d'eau en rivière, afin d'améliorer la dynamique des échanges nappe/ rivière.

Le développement de cette modélisation s'est déroulé principalement lors d'une thèse et d'un post-doc (plus de 4 ans), et a bénéficié des travaux préalables menés sur la modélisation du domaine.

■ Résultats : exemple de la Sèvre-Niortaise

La figure 18 montre le résultat de simulations d'échanges nappe/ rivière effectuée sur un méandre de la Sèvre-Niortaise avec le modèle Marthe pour l'année 2006 en hautes eaux et basses eaux.

On observe que, quels que soient les régimes hydrodynamiques de la nappe et du fleuve (hautes eaux /basses eaux), le bras intérieur du méandre de la Sèvre-Niortaise entre Moulin Neuf (79) et Oriou (79) présente toujours une configuration de soutien de la rivière à la nappe. A contrario, les échanges nappe/ rivière s'inversent entre hautes et basses eaux dans certains secteurs comme à l'aval d'Oriou ou à l'amont de Moulin-Neuf.

À titre de comparaison, trois années de climatologies contrastées sont présentées (tableau 12 p. 60) : l'année 2001 qui se caractérise par un hiver et un printemps très humides, l'année 2005 qui se caractérise par une sécheresse exceptionnelle et l'année 2006 représentative d'une année moyenne. Les débits d'échange simulés sont majoritairement compris entre -5 et +5 m³/j/mètre linéaire avec une prédominance des faibles débits de soutien du fleuve à la nappe compris entre 0 et 1 m³/j/mètre linéaire. La distribution des débits d'échange varie peu, que ce soit entre les hautes et les basses eaux, ou d'une année à l'autre.

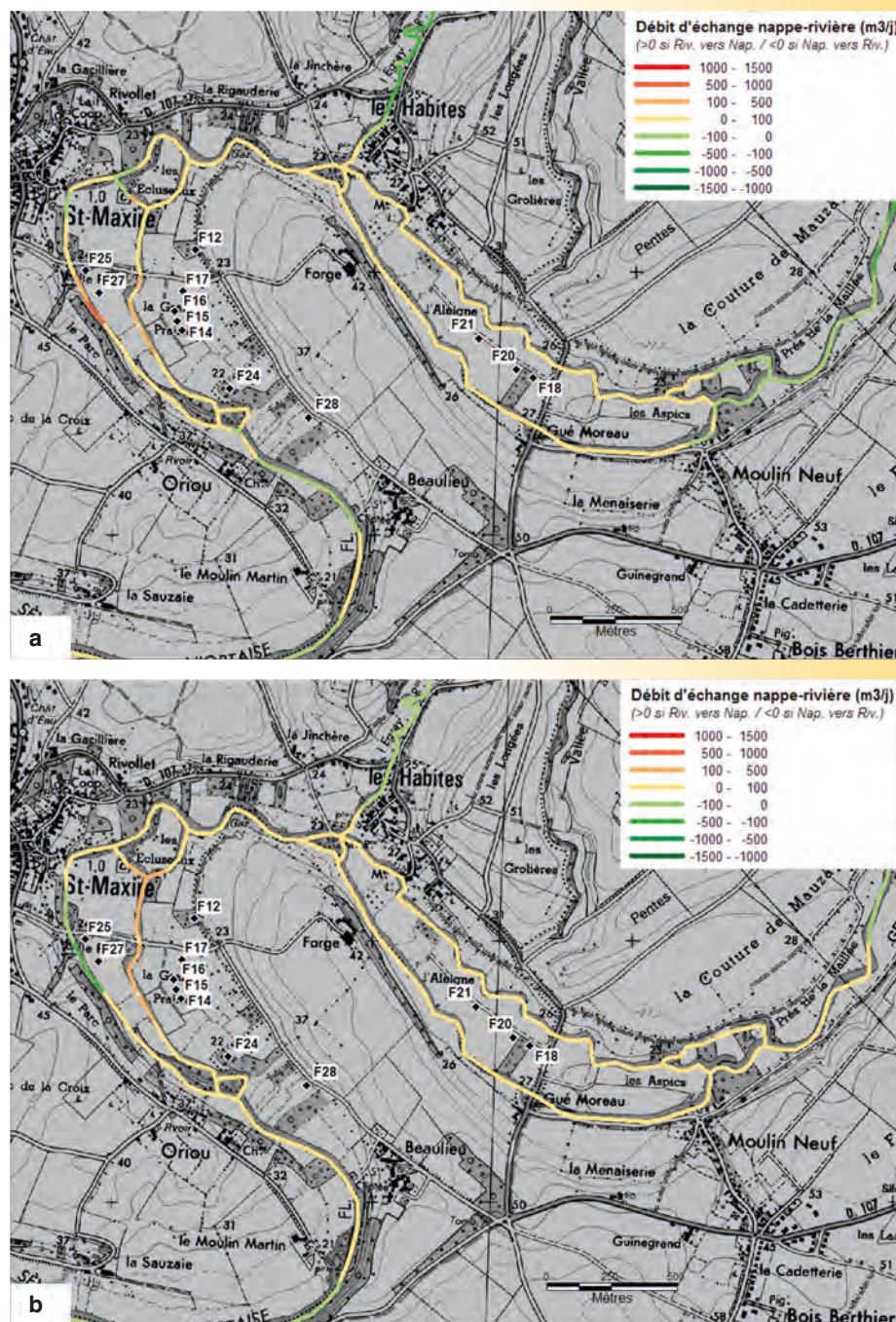


Figure 18. Année 2006 - Débits d'échange simulés par tronçon ; **a** : hautes eaux et **b** : basses eaux. Un tronçon intègre l'ensemble du débit simulé au sein d'une maille de 100 m de côté (Chatelier, 2014).

	2001		2005		2006	
	HE	BE	HE	BE	HE	BE
Nappe vers rivière	44	34	32	29	37	33
Rivière vers nappe	56	66	68	71	63	67

Tableau 12. Pourcentage du linéaire de fleuve affecté par des échanges de la nappe vers la rivière (drainage) ou des échanges de la rivière vers la nappe (soutien de nappe).

HE : Hautes eaux, BE : Basses eaux (Chatelier, 2014).

Dans ce cas de figure, le régime global est favorable à la nappe. Il comporte toutefois localement des tendances inverses et varie modérément suivant le régime hydrologique.

Résultats : exemple du fossé rhénan supérieur

La figure 19 présente plusieurs estimations de la moyenne annuelle des hauteurs d'eau et des échanges nappe/rivière sur un tronçon du Rhin marqué par la présence de barrages au fil de l'eau. On constate qu'il est nécessaire de disposer de bonnes informations sur la cote des rivières pour être capable d'estimer des relations nappe/rivière cohérentes, les courbes en gris étant obtenues à partir de cotes établies à partir d'un modèle numérique de terrain. Les trois autres courbes en couleur montrent une forte cohérence, le Rhin alimentant la nappe sur l'ensemble de son parcours (flux négatif) sauf à proximité des barrages (flux positifs). Cependant, la dynamique des échanges évoluent plus lentement si on considère une hauteur d'eau en rivière constante (en vert) plutôt qu'un niveau variable (en jaune et rouge).

Points forts

- ▶ Modélisation fondée sur des concepts physiques couplant dynamiquement les systèmes de surface et souterrain et prenant en compte les caractéristiques principales de la réalité de terrain (reconstitution de la géométrie des aquifères et des cours d'eau, paramétrisation du fonctionnement hydrodynamique, calage sur les chroniques observées...)
- ▶ Quantification des flux et bilans hydrodynamiques à différentes échelles de temps
- ▶ Possibilité de travailler sur des aquifères multicouches constitués d'aquifères libres et d'aquifères captifs, voire de représenter la zone non-saturée
- ▶ Possibilité de coupler dynamiquement des processus différents (hydrodynamique, thermodynamique, transport de traceurs ou d'espèces dissoutes)
- ▶ Spatialisation à différentes échelles et un travail à différents pas de temps et différentes résolutions spatiales
- ▶ Simulations prédictives et sur des conditions hydrologiques ou sur des conditions d'exploitation non comprises dans l'historique du système (prospective). C'est utile notamment pour les questions d'impact de l'exploitation des eaux souterraines sur les échanges.

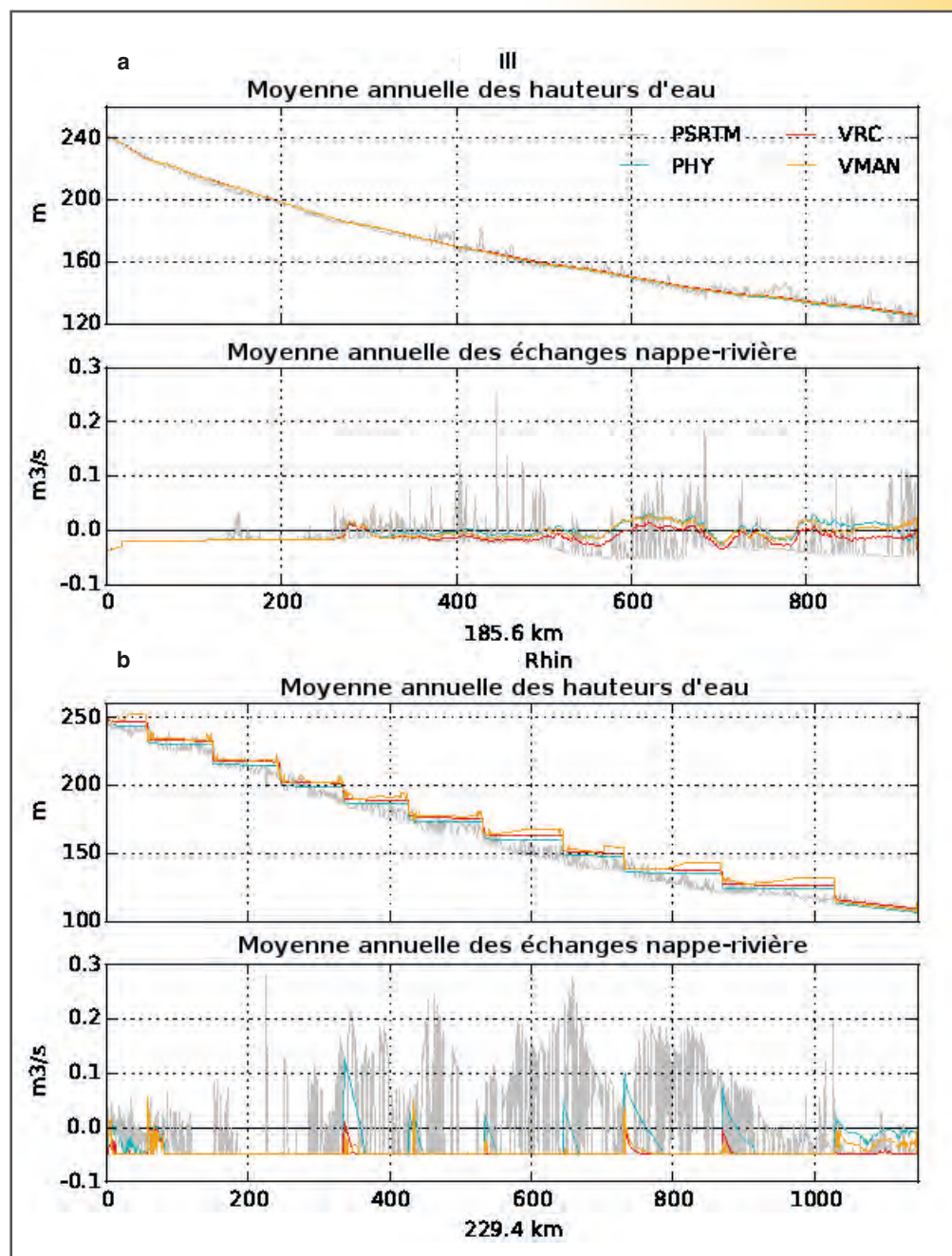


Figure 19. Exemple de résultats obtenus le long du Rhin dans le fossé rhénan.

a : moyenne des hauteurs d'eau simulées (le Rhin est marqué par la présence de barrages sur son parcours) ;
b : moyenne des échanges nappes rivières simulées. Les courbes grises sont obtenues avec des informations sur la cote du lit de la rivière issues directement d'un modèle numérique de terrain (MNT), alors que les courbes en couleurs correspondent à des simulations avec des cotes du lit de la rivière corrigées et différentes estimations des relations hauteurs-débits (en couleur). L'échelle en abscisse correspond au nombre de maille de 200 m de côté (Vergnes et Habets, in Prep).

■ Informations et données nécessaires

De nombreuses données et informations sont nécessaires pour l'approche par modélisation à base physique. Ainsi, pour la modélisation hydrodynamique distribuée, il faut des connaissances sur :

- ✓ la géométrie du milieu (profondeur des toits et murs de chaque couche modélisée et surface topographique) ;
- ✓ les paramètres hydrodynamiques (perméabilité (k) ou transmissivité (T), coefficients d'emménagement libre et captif (S)) ;
- ✓ les paramètres d'échange nappe/rivière (géométrie de la rivière (longueur, largeur), épaisseur et perméabilité de la surface de contact (lit de rivière), pente et coefficient de Manning (frottement en rivière)) ;
- ✓ les chroniques de forçage (précipitations, ETP (pour le calcul de la recharge et du ruissellement), prélèvements, lâchers de barrage, rejets de stations d'épuration...) ;
- ✓ les conditions initiales et données pour la calibration et la validation des paramètres (hauteur de nappe [Hn], hauteurs [Hr] et débits de rivière [Q]).

■ Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- ▶ Travail préparatoire très important : très gourmand en données parfois partiellement disponibles ; la construction, la calibration et la validation du modèle sont très longues (plusieurs années pour un modèle régional)
- ▶ Temps de calcul qui peut être très important
- ▶ Pas de discrimination des échanges pour chaque berge ni de distinction entre le lit et les berges avec les modèles à grande échelle
- ▶ Les propriétés hydrodynamiques du fond du lit sont souvent mal connues
- ▶ Résultats et interprétations conditionnés par la robustesse du jeu de données initial (cotes piézométriques, hauteur d'eau dans la rivière, perméabilité et épaisseur des dépôts de fond de rivière, cote de fond de rivière)
- ▶ Difficultés à prendre en compte les obstacles à l'écoulement dans un objectif de prédiction
- ▶ Sans données détaillées sur la rivière et sans couplage avec un modèle d'écoulement en rivière suffisamment fin, il est difficile de caractériser de façon précise les zones d'échanges : les bilans s'effectuent plutôt à l'échelle du tronçon de cours d'eau
- ▶ La plupart des modèles ne prennent pas en compte l'impact des variations de surface d'échange (inondations, lit majeur/mineur...)

■ Méthodes complémentaires

- ▶ Géochimie (fiche outils n°5)
- ▶ Végétation aquatique (fiche outils n°6)
- ▶ Invertébrés souterrains (fiche outils n°7)
- ▶ Géophysique (fiche outils n°8)
- ▶ Autres types de modèles, non centrés sur les processus physiques (fiche outils n°8)

Références et liens pour en savoir plus

Barthélemy Y., Seguin J.J. (2016) *Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations*. Rapport final. BRGM/RP-62549-FR, 140 p.

Chatelier M. (2014) *Étude par modélisation hydrodynamique des relations nappes/rivières autour du champ captant de Saint Maxire-Échiré (79). Phase 3 : Amélioration du calage en régime transitoire*. BRGM/RP-60308-FR, 52 p.

Chatelier M., Subra P., Grosset Y. (2012) *Étude par modélisation hydrodynamique des relations nappes/rivières autour du champ captant de Saint Maxire-Échiré (79). Phase 2 : mesures complémentaires et calage en régime transitoire*. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-61859-FR, 78 p.

Chatelier M., Thiéry D. (2011) *Étude par modélisation hydrodynamique des relations nappes/rivières autour du champ captant de Saint Maxire-Échiré. Phase 1 : adaptation du modèle régional et calage en régime permanent*. BRGM/RP-60308-FR, 69 p.

Douez O. (2015) *Actualisation 2008-2011 du modèle maillé des aquifères du Jurassique*. Rapport BRGM/RP-64816-FR – Rapport final, 161 p.

Flipo N. (2013) *Modélisation des Hydrosystèmes Continentaux pour une Gestion Durable de la Ressource en Eau*. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI

http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/87/94/49/PDF/flipo2013_hdr.pdf

Flipo N., Monteil C., Poulin M., de Fouquet C., Krimissa M. (2012) *Hybrid fitting of a hydrosystem model: long term insight into the Beauce aquifer functioning (France)*. Water Resources Research 48:W05509.

Flipo N., Saleh F., Mouhri A. 2013. *État de l'Art sur la Modélisation des échanges nappe/rivière*. Rapport annuel d'activité. PIREN Seine.

http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1096

Harbaugh A.W. (2005) *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.

Pryet A., Labarthe B., Saleh F., Akopian M., Flipo N. (2015) *Reporting of stream-aquifer flow distribution at the regional scale with a distributed process-based model*. Water Resources Management 29, p. 139-159.

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, p. 68-83.

Thiéry D. (2006) *Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0. Rapport final*. BRGM/RP 54652-FR, 83 p.

Vergnes J.P., Decharme B., Alkama R., Martin E., Habets F., Douville H. (2012) *A simple Groundwater Scheme for Hydrological and Climate Application: Development and Off-line Evaluation over France*. J. Hydromet, 13, 4, p. 1149–1171.

Vergnes J.P., Decharme B., Habets F. (2014) *Impact of groundwater capillary rises as lower boundary conditions for soil moisture in the ISBA land surface model*. JGRA, Volume 119, Issue 19, pages 11,065–11,086 DOI: 10.1002/2014JD02157.

Vergnes J.P., Habets F. (In prep) *Impact of the river water level on the simulation of stream-aquifer exchanges on the Upper Rhine graben aquifer*.

Personnes ressources

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

Florence Habets (Hydrométéorologue) : UMR CNRS 7619 Metis, Université Pierre et Marie Curie, florence.habets@upmc.fr

Marion Chatelier (Hydrogéologue) : BRGM Nouvelle-Aquitaine - site de Poitiers

Olivier Douez (Hydrogéologue) : BRGM Nouvelle-Aquitaine - site de Poitiers, o.douez@brgm.fr

Francis Bichot (Hydrogéologue) : BRGM Nouvelle-Aquitaine - site de Poitiers