MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, EN CHARGE DES RELATIONS
INTERNATIONALES SUR LE CLIMAT

AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT

Guides et protocoles

Guide technique Interactions nappe/rivière

Des outils pour comprendre et mesurer les échanges

© Bluelife

Zones Ateliers
LTER FRANCE

ARMINES

Avertissement

Ce guide technique est conçu sous la forme d'un document synthétique proposant une démarche (parties A et B : chapitres 1 à 5) et des méthodes (partie C : fiches outils 1 à 8) pour étudier les interactions nappe/rivière en milieux alluvionnaire et sédimentaire. Pour les utilisateurs désireux d'en savoir plus, des références bibliographiques sont proposées dans chaque partie. De plus, les coordonnées (e-mail) de personnes ressources sont indiquées pour permettre à l'utilisateur de poser des questions plus spécifiques à des personnes référentes dans le domaine.

Avant d'entamer la lecture de ce guide, il est nécessaire de bien garder à l'esprit que chaque outil possède ses spécificités et ses contraintes propres (voir le tableau 1, le chapitre 4 et la partie C pour plus de précisions). Il existe un certain nombre de mises en garde à connaître et à garder à l'esprit lors de l'utilisation du guide.

- Chaque outil n'est pas forcément adapté à tous les contextes hydrogéologiques et à toutes les échelles de travail (espace et temps).
- La mise en œuvre de certains outils peut nécessiter l'aide ou l'accompagnement de spécialistes du domaine.
- Les coûts humains et financiers sont donnés à titre indicatif et seulement de manière qualitative. L'objectif est de permettre la comparaison des différents outils proposés. Ces coûts seront variables selon l'ampleur du travail à réaliser.
- Tout comme les coûts, les informations nécessaires à la mise en œuvre des outils sont présentées de manière relative. La quantité d'information et l'effort d'acquisition de données dépendra de l'existant, de l'ampleur de l'étude et de la précision souhaitée.
- La bonne connaissance du territoire d'étude est un préalable indispensable à la mise en œuvre des outils.
- Il est important, lors de l'interprétation des résultats, de bien prendre en compte les incertitudes, notamment pour les méthodes permettant une quantification des échanges. En effet, de fortes imprécisions pèsent sur les volumes et débits estimés qui dépendent fortement de la qualité des données de départ et des paramètres d'entrée. Il conviendra d'utiliser les résultats de quantification des flux échangés comme des ordres de grandeur ou de manière relative.
- Nous conseillons au lecteur de bien maîtriser le contenu de la partie A (chapitres 1 et 2) et le chapitre 4 dans la partie B avant toute action.
- Le terme « rivière » est globalement utilisé de façon générique dans le guide comme synonyme de cours d'eau. Les échanges nappe/rivière peuvent aussi concerner les grands fleuves ou les petits fleuves côtiers.

Guide technique Interactions nappe/rivière

Des outils pour comprendre et mesurer les échanges

Frédéric Paran et Bénédicte Augeard (coordinateurs)

Auteurs et contributeurs

Coordinateurs

Paran Frédéric, UMR 5600 EVS, frederic.paran@mines-stetienne.fr
Augeard Bénédicte, Onema puis Agence française pour la biodiversité*, benedicte.augeard@afbiodiversite.fr

Auteurs

Paran Frédéric, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Étienne, GSE, frederic.paran@mines-stetienne.fr
Graillot Didier, UMR 5600 EVS, didier.graillot@mines-stetienne.fr
Arthaud Florent, UMR 042 Carrtel, florent.arthaud@univ-savoie.fr
Bornette Gudrun, UMR 6249 Chrono-environnement, gudrun.bornette@univ-fcomte.fr
Chatelier Marion, BRGM Nouvelle-Aquitaine - site de Poitiers
Douez Olivier, BRGM - Direction régionale Nouvelle-Aquitaine, o.douez@brgm.fr
Flipo Nicolas, Mines ParisTech, Nicolas.Flipo@mines-paristech.fr
Habets Florence, Mines ParisTech, florence.habets@upmc.fr
Lavastre Véronique, UMR 6524 LMV, veronique.lavastre@univ-st-etienne.fr
Marmonier Pierre, UMR 5023 Lehna, pierre.marmonier@univ-lyon1.fr
Mouhri Amer, Mines ParisTech, amer.mouhri@gmail.com
Piégay Hervé, UMR 5600 EVS, Herve.Piegay@ens-lyon.fr
Piscart Christophe, UMR 6553 Ecobio, christophe.piscart@univ-rennes1.fr
Simon Laurent, UMR 5023 Lehna, laurent.simon@univ-lyon1.fr
Tallec Gaëlle, Irstea, gaelle.tallec@irstea.fr
Vergnes Jean-Pierre, BRGM Orléans, jp.vergnes@brgm.fr
Wawrzyniak Vincent, UMR 5600 EVS, vincent.wawrzyniak@gmail.com
Maugis Pascal, UMR 8212 Mosaic, pascal.maugis@lsce.ipsl.fr
Augeard Bénédicte, AFB, benedicte.augeard@afbiodiversite.fr

**Le 1er janvier 2017, l'Agence des aires marines protégées, l'Atelier technique des espaces naturels, l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques et Parcs nationaux de France regroupent leurs compétences pour créer l'Agence française pour la biodiversité*

Contributeurs et relecteurs

Dujardin F., Lalot E. (UMR 5600 EVS, Mines Saint-Étienne, GSE) **; Bichot F.** (BRGM) **; Thierion C.** (Mines ParisTech) **; Novel M.** (UMR 5023 Lehna) **; Poulet N.** (Onema puis AFB) **; Akopian M.** (AE-SN puis AFB) **; Bigué J.** (Arra) **; Bonneville S., Carroget A., Grivel S., Lequien A.** (MEEM) **; Cadilhac L.** (AE-RMC) **; Clémens A., Roux-Michollet D.** (Zabr-Graie) **; Delporte C.** (CD 46) **; Deruyver S.** (Sage Beauce) **; Dumont E.** (Cete Ile-de-France) **; Duval J., Fermond C.** (SMRD) **; Faton J.M.** (Réserve des Ramières) **; Grimault L., Klerch D.** (Creseb) **; Jacquelet I.** (EDF) **; Janodet S.** (SPL Eau de Grenoble) **; Lambert M.** (SEV) **; Le Bechec G.** (SBVA) **; Lefur S.** (Astee) **; Marchet P.** (AE-AG) **; Naville T.** (SM3A) **; Pellerin F.M.** (FNE / Marais poitevin) **; Pellizzaro H.** (CD 64) **; Raout F.** (Driee Ile-de-France) **; Reynaud A.** (Aquibrie) **; Reynaud S.** (CNR) **; Schott P., Toulet F.** (Aprona) **; Tochon E.** (Antea Group) **; Verley F.** (Dreal Centre)

Remerciements

Nous tenons à remercier les partenaires qui ont financé et soutenu les travaux de recherche préalables à ce guide : l'Onema** pour le projet Naprom (nappes-rivières : observation et modélisation), la zone atelier bassin du Rhône (Zabr) et l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse (AE-RMC) pour le projet « Nappes/Rhône », et le Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine (Piren Seine) qui a contribué aux recherches sur un des sites d'étude.

De manière plus personnelle, nous souhaitons remercier en premier lieu Pascal Maugis qui a été à l'initiative du projet Naprom et qui a grandement contribué à son montage administratif et financier, à son animation et à son développement scientifique et opérationnel.

Nous exprimons un grand merci à tous les auteurs de ce guide qui ont accepté de continuer l'aventure pour le terminer bien après la fin du projet Naprom. Nous souhaitons aussi remercier Véronique Barre et son équipe de l'Onema pour leur travail d'accompagnement à la mise en forme et à l'édition du guide.

Nous tenons à remercier plus particulièrement Véronique Lavastre, Hervé Piégay, Laurent Simon et Vincent Wawrzyniak qui, bien que non impliqués dans le projet Naprom, ont accepté de travailler sur les fiches présentant les outils « géochimique » et « infrarouge thermique ».

Nous tenons également à remercier non seulement les relecteurs qui ont contribué à l'amélioration de ce guide, mais aussi les relecteurs du guide Nappes/Rhône dont certaines suggestions ont été reprises pour construire ce guide. Nous saluons aussi toutes les personnes qui ont contribué au projet en participant régulièrement à son comité de suivi.

Nous souhaitons encore remercier le BRGM d'Orléans, notamment Alexis Guttierez et Damien Salquèbre, ainsi que Joëlle Verney du département GSE de Mines Saint-Étienne pour leur aide à l'organisation du séminaire de présentation du guide Naprom en novembre 2015.

Pour terminer, nous tenons aussi à remercier toutes les personnes, trop nombreuses pour être citées ici, qui ont contribué de près ou de loin au développement du projet et à l'élaboration du guide que ce soit pour leur participation à des réunions, à des visites de terrain, aux comités techniques et pléniers ou pour la mise à disposition d'informations, de contacts, de publications, de rapports, d'études ou de données ou alors pour leurs conseils avisés ou leur aide.

*** Pour les travaux et réflexions menés avant janvier 2017, la référence à l'Onema a été conservée dans cet ouvrage.*

Résumé

Ce guide de caractérisation des échanges nappe/rivière vise à mettre à la disposition des acteurs de l'eau des connaissances et des méthodes développées et mises en œuvre préalablement dans le cadre de travaux de recherche. L'élaboration de ce guide technique fait suite au projet scientifique soutenu par l'Onema appelé Naprom (nappes-rivières : observation et modélisation). Ces travaux font eux-mêmes suite à un précédent projet de la zone atelier bassin du Rhône soutenu par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse intitulé « Nappes/Rhône » qui a permis en octobre 2015 la parution d'un premier guide méthodologique sur les échanges nappe/rivière.

Ce guide propose une démarche pour décrire les sites d'étude, choisir les méthodes ou outils les plus appropriés pour évaluer les échanges entre les rivières et les aquifères superficiels et les mettre en œuvre. Il permet d'évaluer qualitativement et quantitativement les échanges nappe/rivière en tenant compte du degré plus ou moins élevé d'anthropisation (ouvrages, aménagements, projets de restauration, usages de l'eau…) et de contribuer ainsi à la préservation des nappes phréatiques et plus généralement de la ressource en eau et de la biodiversité sur les bassins présentant des enjeux importants.

Ce guide présente les outils et méthodes suivantes : analyse géomatique des niveaux d'eau, modèles hydrodynamiques distribués à base physique, modèles hydrothermiques et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau, image thermique infrarouge, géochimie, végétation aquatique, invertébrés souterrains.

Mots clefs

Échanges nappe/rivière - Écoulements souterrains - Eaux de surface - Eaux souterraines - Hydrologie - Hydrogéologie - Analyse géomatique (SIG) - Modélisation hydrogéologique - Modélisation thermique (hydrodynamique, hydrothermique) - Invertébrés souterrains - Végétation aquatique - Géochimie - Image infrarouge thermique.

Sommaire

Introduction

Partie A : Définir et décrire pour bien choisir les outils 11

Chapitre 1 - Enjeux, échelles de travail et types d'aquifères 12
Chapitre 2 - Données et caractérisation des sites d'étude 16

Partie B : Choisir les outils et interpréter 21

Chapitre 3 - Typologie des échanges nappe/rivière 22
Chapitre 4 - Outils : méthodes de diagnostic 29
Chapitre 5 - Diagnostic synthétique 34

Partie C : Mettre en œuvre les outils 41

Introduction - Organisation et contenu des fiches outils 42
Fiche n°1 - Analyse géomatique des niveaux d'eau 47
Fiche n°2 - Modèles hydrodynamiques distribués à base physique 53
Fiche n°3 - Modèles hydrothermiques à base physique (code Metis) et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Molonari) 65
Fiche n°4 - Image thermique infrarouge (IRT) 71
Fiche n°5 - Géochimie 77
Fiche n°6 - Végétation aquatique 83
Fiche n°7 - Invertébrés souterrains 89
Fiche n°8 - Autres méthodes, autres modèles 95

Abréviations, sigles et acronymes 97

Table des illustrations 99

Introduction

Questions de départ

- Pourquoi ce guide sur les échanges nappe/rivière ?
- À qui est destiné le guide ?
- Comment aider l'utilisateur à bien utiliser le guide ?

Synoptique

- Présenter le contenu et l'organisation du guide
- Donner les clefs pour une bonne utilisation du guide
- Mettre en garde l'utilisateur sur les limites du guide et les prérequis nécessaires à son utilisation

Liens et renvois

- Paran F., Graillot D., Arthaud F., Bodet L., Bornette G., Chatelier M., Douez O., Dujardin F., Flipo N., Guérin R., Habets F., Lalot E., Marmonier P., Mouhri A., Novel M., Piscart C., Rejiba F., Tallec G., Thierion C., Vergnes J.P., Maugis P., Augeard B. (2014) Caractérisation des échanges nappes/rivières à l'échelle du tronçon ou du linéaire par métrique expérimentale ou par modélisation jusqu'à l'échelle régionale. Projet Naprom (Nappes-rivières : observation et modélisation). Armines, Onema, Rapport final, 209p.

En ligne (novembre 2016) :

Rapport : http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/2014_100.pdf
Annexes : http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/2014_100annexes.pdf
Synthèse : http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/2014_100synthese.pdf
Ce rapport est cité régulièrement en référence dans ce guide sous l'abréviation : « Rapport final Naprom ».

Un séminaire de présentation a eu lieu en novembre 2015 à Orléans en ligne : http://www.onema.fr/node/4126

- Paran F., Arthaud F., Novel M., Graillot D., Bornette G., Piscart C., Marmonier P., Lavastre V., Travi Y., Cadilhac L. (2015) Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire – Guide méthodologique. Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse – Eau et connaissance, 178p.

En ligne : http://www.graie.org/zabr/zabrdoc/Guides_methodo/Guide_Echanges_NR_RMC_VF.pdf

Ce guide méthodologique est régulièrement cité en référence dans ce guide sous l'abréviation : « Guide Nappes/Rhône ».

Contexte et objectifs du guide

L'élaboration de ce guide technique fait suite à un projet d'un consortium de chercheurs piloté par Armines et soutenu par l'Onema intitulé Naprom « Nappes-rivières : observation et modélisation » (2011-2015). Ces travaux font eux-mêmes suite à un précédent projet Zabr/AE-RMC intitulé « Nappes/Rhône » (2006-2015) et initié par Laurent Cadilhac qui s'est conclu en octobre 2015 par la parution d'un premier guide méthodologique sur les échanges nappe/rivière (Paran *et al.* 2015).

Si dans l'esprit, les deux guides sont très proches, ils diffèrent par leur contenu et par la façon dont l'information est présentée. D'une part, ce guide élargit le champ d'investigation des échanges nappe/rivière. En plus des milieux alluvionnaires, il propose des outils capables de diagnostiquer les échanges en domaine sédimentaire, incluant les configurations multi-couches, et dans une moindre mesure en domaine karstique. D'autre part, la palette des outils est largement augmentée. En plus de l'analyse géomatique des niveaux d'eau, des invertébrés souterrains, de la végétation aquatique et de la géochimie, ce nouveau guide présente des outils de modélisation hydrodynamique et thermique, des dispositifs locaux d'acquisition de données (Molonari) et un outil fondé sur l'imagerie thermique infrarouge (IRT).

Enfin, l'information proposée dans ce guide est plus concentrée et plus synthétique. Cette forme vise à rendre l'accès à l'information plus facile et à souligner les éléments les plus importants à connaître.

Ce nouveau guide technique s'adresse aux gestionnaires de l'eau et à leurs partenaires techniques et scientifiques qui ont besoin d'appréhender les échanges nappe/rivière pour gérer de façon durable leurs ressources en eau. Il existe en effet de forts besoins en termes de connaissances et d'outils de diagnostic des échanges à l'interface nappe/rivière.

La vocation de ce guide est non seulement de proposer à l'utilisateur une source d'information centralisée, mais aussi de l'aider à se poser les bonnes questions afin de comprendre et mesurer les interactions nappe/rivière. Ainsi, les informations et la démarche proposées ont pour objectif d'aider l'utilisateur à :

- mettre en œuvre et réaliser par lui-même une étude pour caractériser les échanges nappe/rivière ;
- rédiger un cahier des charges pour sous-traiter ce type d'étude.

Du point de vue des scientifiques, ce guide propose un ensemble de méthodes « opérationnelles ». Certaines d'entre elles restent toutefois difficiles d'accès aux acteurs de terrain et lourdes à mettre en œuvre. Elles nécessiteront l'appui de spécialistes du domaine (par ex. modèles hydrodynamiques, détermination des invertébrés souterrains…), d'autres plus accessibles nécessiteraient sans doute la rédaction de didacticiels détaillés facilitant leur prise en main et leur déploiement (par ex. méthode géomatique, végétation aquatique…).

Ce guide est envisagé comme un document évolutif. Nous souhaitons l'enrichir et le mettre à jour au fil du temps pour proposer des éléments nouveau concernant les méthodes et outils, de nouvelles méthodes et outils de diagnostic des échanges nappe/rivière, des méthodes et outils adaptés à d'autres contextes hydrogéologiques que les formations alluviales et sédimentaires. À terme, il serait aussi intéressant de diffuser les retours d'expériences des utilisateurs du guide.

Clefs de lecture du guide

La structuration de ce document est conçue pour aider le lecteur à déterminer dans quelles situations il peut utiliser ce guide et comment il peut l'utiliser. Une telle démarche est schématisée dans la figure 1 page suivante. Elle a vocation à être interdisciplinaire et multi-outils. Si les outils peuvent être utilisés seuls, il est souvent intéressant de combiner plusieurs méthodes afin de :

- confronter les résultats pour construire un diagnostic synthétique ;
- miser sur la complémentarité des résultats pour aboutir à un diagnostic plus complet.

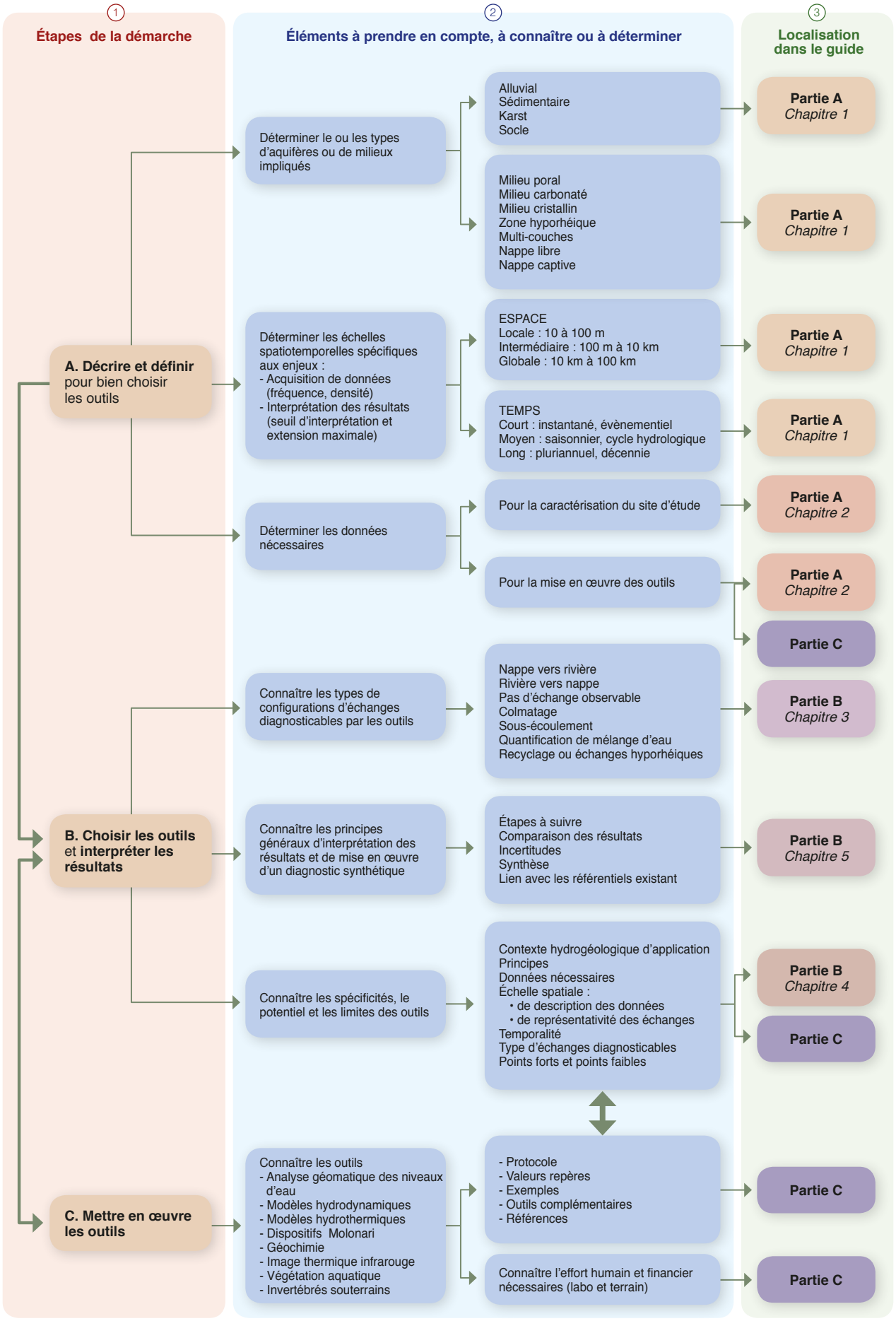


Figure 1. *Clefs de lecture du guide*

La démarche de prise en main du guide que nous proposons se déroule en plusieurs étapes. Elle ne doit pas être suivie de manière rigide et linéaire. Elle doit être envisagée comme un fil rouge qui n'empêche pas une utilisation du guide plus « circulaire » faite d'aller-retour entre les différentes parties et plus particulièrement entre les différents chapitres et les fiches outils (tableau 1 page suivante).

Décrire et définir

La partie A présente les prérequis pour bien choisir les outils. Les chapitres 1 et 2 qui la composent, proposent des clefs pour décrire et définir au mieux les éléments importants du territoire d'étude à connaître en fonction des enjeux et des objectifs poursuivis. Il s'agit ici de :

- bien reconnaître les aquifères et milieux impliqués ;
- bien déterminer les échelles de temps et d'espace spécifiques aux enjeux ;
- faire le point sur les données nécessaires (existantes ou à acquérir) pour bien caractériser le site d'étude et mettre en œuvre les outils sélectionnés.

Choisir les outils et interpréter les résultats

La partie B est centrale. En effet, elle fait le point sur les principales configurations d'échanges diagnosticables à l'aide des outils (chapitre 3) et les principaux éléments à connaître pour choisir le ou les bons outils (chapitre 4). Elle présente aussi les principes généraux d'interprétation des résultats et de mises en œuvre d'un diagnostic synthétique (chapitre 5).

Mettre en œuvre les outils

La partie C regroupe une série de huit fiches contenant toutes les informations essentielles à connaitre sur les outils. Ces informations sont plus complètes que celles présentées brièvement dans le chapitre 4.

Tableau 1. *Présentation synthétique des outils.*
Légende et explication : voir partie C : le chapitre introductif page 42

Outils n°	Contexte hydrogéologique	Échelle d'espace			Échelle de temps		Niveau d'Information nécessaire	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
1. Analyse géomatique des niveaux d'eau	Nappes libres	Ponctuelle	0,5 à 1 km	Tronçon de cours d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Fort	Fort	Moyen	Moyen
2. Modèles hydrodynamiques distribués à base physique (Marthe, Eau-Dyssée)	Nappes libres et captives Aquifère multi-couches	Mailles variables	Maille 30 m à 1000 m	Masse d'eau	Régime transitoire	Horaire à mensuel	Important	Important	Important	Important	Important
3. Modèles hydrothermiques à base physique (Metis) et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Molonari)	**Modèle Metis et Molonari** Nappes libres Zone hyporhéique Aquifères multi-couches	Ponctuelle (**Modèle Metis et Molonari**) Maille (Modèle Metis)	<100 m (**Modèle Metis et Molonari**) Maille de 1 à 10 cm (Modèle Metis)	Locale (**Modèle Metis et Molonari**) Extrapolation au tronçon de cours d'eau	Transitoire ou haute fréquence	Horaire voire infra-horaire	Important	Important	Important	Important	Important
4. Image Infrarouge thermique (IRT)	Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés	Ponctuelle	<100 m	Tronçon de cours d'eau voire masse d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Fort
5. Géochimie	Nappes libres Zone hyporhéique Aquifères multi-couches Milieux carbonatés	Ponctuelle	<100 m	Tronçon de cours d'eau voire masse d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt) Haute fréquence	Horaire voire infra-horaire à mensuel	Moyen	Moyen	Important	Fort	Fort
6. Végétation aquatique	Nappes libres	Transect 2m x 50m	0,1 à 2 km	Tronçon de cours d'eau voire masse d'eau	Intégration annuelle	Instantané	Moyen	Moyen	Faible	Moyen	Faible
7. Invertébrés souterrains	Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés	Ponctuelle	<100 m	Tronçon de cours d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Important

PARTIE A

Définir et décrire pour bien choisir les outils

1 Enjeux, échelles de travail et types d'aquifères 12

2 Données et caractérisation des sites d'étude 16

1 Enjeux, échelles de travail et types d'aquifères

Questions posées

- Quels sont les enjeux concernant les échanges nappe/rivière ?
- A quelles échelles caractériser les échanges nappe/rivière ?
- Quels sont les grands types d'aquifères où s'observent des échanges nappe/rivière ?

Synoptique

- Connaître les enjeux
- Connaître et choisir les échelles de travail (espace et temps)
- Connaître les grands types d'aquifères

Liens et renvois

Chapitre 3. Typologie des échanges nappe/rivière
Chapitre 4. Outils : méthodes de diagnostic
Partie C. Mettre en œuvre les outils

1.1. Enjeux et échelles de travail

Enjeux liés à la directive cadre européenne sur l'eau

Une partie des enjeux liés aux échanges nappe/rivière est définie par la directive cadre européenne sur l'eau (DCE, 2000). Les principales problématiques soulèvent différents besoins (Vernoux, 2013).

Besoin en termes de connaissance. Il s'agit de mieux comprendre les échanges nappe/rivière et de mieux en tenir compte dans la description des masses d'eau (unités hydrographiques utilisées par la DCE).

Besoin en termes de méthodes pour l'évaluation du bon état des masses d'eau (superficielles et souterraines). Ce type d'évaluation doit être fait du point de vue qualitatif et quantitatif. En effet, les échanges nappe/rivière jouent un rôle important pour déterminer :

- l'état des masses d'eau souterraines qui ne doivent pas dégrader les masses d'eau de surface avec lesquelles elles sont connectées ;
- l'état des masses d'eau « cours d'eau » dont l'hydromorphologie doit garantir des échanges avec les eaux souterraines.

Besoin en termes de méthodes pour dimensionner et suivre les opérations de restauration. Ces méthodes doivent permettre de travailler sur des mesures de restauration de masses d'eau souterraines ou des masses d'eau « cours d'eau » dont les échanges nappe/rivière posent problème.

Ces enjeux de la DCE, transcrits en droit français, sont déclinés au niveau des grands bassins versants dans les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) et plus localement, par exemple, dans les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (Sage) et les contrats de milieux.

Ce guide présente dans la Partie C une série de méthodes et outils permettant de mieux appréhender les relations entre masses d'eau souterraines (Meso) et masses d'eau de surface (Mesu).

Exemples d'enjeux opérationnels

La connaissance des relations nappe/rivière répond également à des questions plus locales de gestion de l'eau illustrées par quelques exemples.

Gestion et biodiversité. Par ex. maintien du débit des cours d'eau et tamponnage thermique en période estivale, maintien des zones humides et de leur fonctionnement...

Alimentation en eau potable. Par ex. importance stratégique, périmètres et dispositifs de protection, recherche de nouvelles ressources, meilleure utilisation des ressources, impact des échanges nappe/rivière sur les captages, ressource de secours...

Sécurité et enjeux sanitaires. Par ex. transfert d'eau lors d'une pollution…

Enjeux règlementaires. Par ex. arrêtés cadre de limitation de l'irrigation, lien entre débit d'objectif d'étiage ou de crise et piézométrie des nappes…

Autres enjeux. Par ex. changements globaux, services écosystémiques...

Liens enjeux et échelle de travail

Les quelques exemples d'enjeux listés ci-avant montrent que les échelles d'étude des échanges nappe/rivière peuvent être très variées. Il est important de bien circonscrire ces échelles tant du point de vue spatial que temporel en fonction de ces enjeux.

Échelles spatiales. On distingue trois niveaux :

- local (unité géomorphologique : 10 à 100 m) ;
- intermédiaire (tronçon de rivière ou entité hydrogéologique : 100 m à 10 km) ;
- global (sous-bassin ou bassin versant ou masse d'eau : 10 à 100 km).

Échelles temporelles. On distingue trois temporalités :

- court terme (instantané, événementiel) ;
- moyen terme (saisons, cycle hydrologique annuel) ;
- long terme (décennie, cycle hydrologique pluriannuel).

Certains outils seront plus ou moins adaptés (Partie C et Chapitre 4) en fonction des enjeux ou des objectifs à atteindre. L'échelle de travail sélectionnée conditionnera non seulement l'étendue (par ex. berge, champ captant, tronçon de rivière, bassin versant, entité hydrogéologique, masse d'eau…) et la densité spatiale des données nécessaires, mais aussi le pas de temps de mesure ou d'échantillonnage, la durée d'acquisition de ces données et leur domaine de validité.

Chaque outil possède ainsi ses contraintes propres en termes d'échelles d'espace et de temps du point de vue :

- des données nécessaires pour mettre en œuvre la méthode (l'outil) ;
- de la fenêtre d'interprétation des résultats (seuil d'interprétation et extension maximale d'interprétation).

1.2. Typologies des aquifères concernés par les échanges nappe/rivière

D'une manière générale, l'eau des rivières est en contact avec l'eau contenue dans les formations géologiques qui l'entourent. Il est nécessaire de comprendre la dynamique des écoulements en rivière et des écoulements souterrains régionaux pour appréhender les échanges nappe/rivière. Or, il existe différents types de couches géologiques aquifères.

Aquifères alluviaux

Ils sont constitués de matériaux de nature variée et de granulométrie hétérogène (milieu poral) transportés et déposés par l'eau courante, comme les galets, les graviers, ou les sables. Ils peuvent être liés à des dépôts glaciaires ou fluvioglaciaires (Tirat *et al.* 2006). Ils sont présents le long de presque tous les cours d'eau et de taille variable suivant leur histoire géologique (plusieurs centaines de mètres de profondeur pour la nappe alluviale du Rhin, ou totalement absents pour les cours d'eau qui incisent le substratum). Les aquifères alluviaux sont donc impliqués en premier lieu dans les échanges nappe/rivière. Les plus courants contiennent une nappe libre connectée à un cours d'eau avec une zone hyporhéique (ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côté d'un cours d'eau contenant une certaine quantité d'eau de surface).

Aquifères sédimentaires

La structuration des dépôts qui forment ces aquifères résulte d'une dynamique sédimentaire liée notamment à des variations de niveau de la mer. Ces aquifères sont souvent multiples ou superposés (aquifères multi-couches), séparés par des niveaux d'argiles imperméables, traduisant des conditions de dépôts de plus grande profondeur et de moindre énergie (par ex. le Bassin parisien, le Bassin aquitain) (Roux, 2006). Les cours d'eau peuvent être des exutoires des nappes contenues dans ces aquifères ou contribuer à les alimenter. La connexion de ces nappes avec les cours d'eau se fait souvent via les aquifères alluviaux lorsqu'ils existent.

Aquifères karstiques (aquifères sédimentaires carbonatés dont les vides sont surtout des fissures élargies par la dissolution)

Comme leur nom l'indique, ils sont caractéristiques du karst : « paysage particulier créé par l'eau et dans lequel l'eau circule de façon spécifique ou complexe » (Bakalowicz, 2006) ; par exemple, les plateaux du Jura, du Vercors, du Vaucluse, les Grands Causses, le Périgord ou le Quercy. Dans les régions karstiques, l'eau est souvent absente du sol car les perméabilités sont grandes et l'accumulation se produit dans les profondeurs, puis il y a émergence au niveau de sources. Les rivières peuvent parfois se perdre complètement dans le karst comme c'est le cas pour la Dive du Sud et la Bouleure à Lezay, la Tardoire et le Bandiat.

Aquifères de socles (ou aquifères fissurés ou discontinus)

Ils sont liés à l'altération de roches cristallines plutoniques (granites) ou métamorphiques (schistes) ; par exemples, le Massif central, la Vendée, la Bretagne, les Vosges, les Ardennes, les Maures, l'Estérel ou la Corse (Lachassagne & Wyns, 2006). La productivité de ces aquifères est toujours modeste, elle peut être élevée dans les zones de fracturation importante.

Ce guide présente des méthodes qui permettent de caractériser différents types d'échanges d'eau entre nappe et rivière (voir Chapitre 3) principalement en milieux alluvionnaires et pour partie en milieux sédimentaires. Si le guide est surtout adapté au milieu poral, voire aux zones d'altération du socle, certaines méthodes permettent aussi de travailler sur les milieux karstiques (chapitre 4 et partie C).

1.3. Pour aller plus loin

Références bibliographiques

Bakalowicz M. (2006) *Aquifères karstiques.* In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 1, p. 59-73.

DCE (2000) http://www.developpement-durable.gouv.fr/Directive-cadre-EAU.html

Lachassagne P., Wyns R. (2006) *Aquifères socles.* In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 1, p. 43-51.

Roux J.C. (2006) *Aquifères et eaux souterraines*, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed.

Tirat M., Cottereau C., Mongereau N. (2006) *Vallée du Rhône.* In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 2, p. 658-687.

Vernoux J.F. (2013) *Évaluer l'impact des eaux souterraines sur les eaux de surface et les écosystèmes associés. Mise en œuvre dans le cadre de la DCE.* TMS, 3.

Voir aussi

Rapport final Naprom : p. XIII (Synthèse opérationnelle), p. 1 (Introduction)

Guide Nappes/Rhône : p. 9 (Résumé), p. 15 (Introduction), p. 23 (Chapitre 1)

Données et caractérisation des sites d'étude

2

Questions posées

- Quelles données sont nécessaires pour connaître et décrire le site d'étude ?
- Quelles données sont nécessaires pour appliquer les méthodes de caractérisation des échanges nappe/rivière ?
- Où trouver ces données et comment les obtenir ?

Synoptique

- Connaître les données et informations nécessaires pour bien décrire et connaître son site d'étude
- Connaitre les données nécessaires à la mise en œuvre des outils
- Savoir où trouver les données et les référentiels nécessaires

Liens et renvois

Partie C. Fiches outils

Grilles de description des sites d'étude : http://www.onema.fr/Guide-Interactions-nappe-riviere

Il faut distinguer trois types de données ou d'informations :

- celles qui servent à décrire le site pour comprendre globalement son fonctionnement (chapitre 2.1) ;
- celles qui doivent servir à la mise en œuvre d'une méthode de caractérisation des échanges nappe/rivière sur le linéaire d'étude (chapitre 2.2) ;
- celles qui permettent de relier son étude à des référentiels existants (par ex. entités hydrogéologiques, masses d'eau…) (chapitre 2.2).

2.1. Choix et caractérisation multi-critères des sites d'étude

Choix des sites d'études

On ne choisit pas toujours son site d'étude. En effet, la réponse à une commande ou à un appel d'offre peut définir a priori le site sur lequel il va falloir travailler. Le choix peut être aussi dicté par un incident ou un accident. Il faudra alors mettre en œuvre dans l'urgence un diagnostic pour répondre par exemple à une pollution accidentelle. À l'opposé, il est possible de choisir sciemment un ou plusieurs sites sur lesquels de nombreuses données sont disponibles et où l'on sait qu'il existe des interactions nappe/rivière afin, par exemple, de caractériser les échanges sur un territoire (une nappe, une masse d'eau, un espace de gestion).

Dans tous les cas, il est important de bien identifier le linéaire d'étude des échanges nappe/rivière et de délimiter le site d'étude dans son ensemble qui est souvent plus large car il prend en compte les éléments du paysage, entourant la rivière, qui vont influencer les échanges avec la nappe.

En d'autres termes, il convient de bien circonscrire son site d'étude et les influences extérieures pertinentes. Ce travail peut être fondé sur des objectifs de gestion, la limite des bassins versants ou des aires d'alimentation souterraine, les interactions aux limites du site, les prélèvements d'eau…

Caractérisation des sites d'étude

Dans le cadre du projet Naprom, nous avons élaboré une grille pour l'aide à la description des sites d'étude. Elle contient de nombreux champs. L'utilisateur devra faire le tri afin de ne conserver que ceux jugés pertinents en fonction des outils utilisés, des caractéristiques spécifiques du territoire et des enjeux spécifiques liés aux échanges nappe/rivière (par ex. gestion, biodiversité).

Ces grilles contiennent les champs suivants pour l'aide à la caractérisation des sites :

- onglet « Description du site d'étude » pour lister les spécificités physiques, chimiques et biologiques ;
- onglet « Niveau d'anthropisation » pour caractériser le niveau d'anthropisation du site étudié, c'est-à-dire son degré d'aménagement et l'influence des activités humaines ;
- onglet « Enjeux socio-économiques » pour recenser les spécificités en termes d'enjeux socio-économiques ;
- onglet « État des connaissances » pour lister les spécificités en termes d'enjeux de connaissance à l'échelle locale du site ou régionale.

Contenu des grilles de caractérisation des sites

Voici ci-dessous une liste thématique synthétique des informations potentiellement nécessaires pour :

- décrire son site ;
- mettre en œuvre les méthodes et outils de caractérisation des échanges nappe/rivière ;
- faire le lien avec les référentiels existants.

Cette liste n'est pas exhaustive. En effet, certaines particularités d'un site peuvent conduire à rechercher d'autres informations ou à laisser de côté certaines informations qui y sont présentées.

Onglet « Description du site d'étude ». Cet onglet permet de saisir les spécificités physiques, chimiques et biologiques du site étudié. Sont à renseigner, des informations concernant :

- la localisation du site (appartenances administrative et hydrographique, nom du site, surface…) ;
- l'hydrologie et le climat de site (cours d'eau principal, débits, affluents, masses d'eau superficielles DCE, paramètres climatiques, linéaire de berge…) ;
- la géologie du site (formations en place sur le site, failles…) ;
- la géomorphologie du linéaire étudié (style, sédiments, colmatage, transport solide…) ;

- l'hydrogéologie du site (code masses d'eau souterraine DCE, code entité BDLisa, paramètres hydrogéologiques, niveaux d'alerte, connexions avec un cours d'eau ou une autre entité hydrogéologique, vulnérabilité, hydroécorégions…) ;
- les grandes caractéristiques physico-chimiques du site (fond géochimique, valeurs de référence…) ;
- les grandes caractéristiques paysagères du site (éco-régions codes HER1 et 2).

Onglet « Niveau d'anthropisation ». Cet onglet permet de caractériser le niveau d'anthropisation du site étudié, c'est-à-dire son degré d'aménagement et l'influence des activités humaines :

- aménagement du cours d'eau principal et du site (barrages, ID ROE V2, seuils, obstacles, gravières, contre-canaux, canaux, ouvrages de captage, digues, loisirs nautiques, centrales nucléaires…) ;
- rejets (industriels, agricoles, ménagers) ;
- occupation des sols (à proximité des berges, code CLC…) ;
- problématiques principales (incision du lit, pollution, effet de chasse, recharge artificielle, biodiversité, urbanisation, pompe à chaleur, AEP, déconnexion…).

Onglet « Enjeux socio-économiques ». Cet onglet liste des spécificités en termes d'enjeux socio-économiques du site :

- prélèvements d'eau (souterraine, superficielle, volumes prélevés, usages…) ;
- instruments et documents de gestion (nom, contact, organisme, objectifs, vulnérabilités, risques…).

Onglet « État des connaissances ». Cet onglet liste des spécificités en termes d'enjeux de connaissance à l'échelle locale du site ou régionale :

- instrumentation du site en nappe (niveaux, paramètres mesurés, instruments, nombre de stations de mesures, propriétaires des données et du matériel…) ;
- instrumentation du site en rivière (niveaux, paramètres mesurés, instruments, nombre de stations de mesures, propriétaires des données et du matériel…) ;
- instrumentation du site à l'interface nappe/rivière (niveaux, paramètres mesurés, Instruments, nombre de stations de mesures, propriétaires des données et du matériel…) ;
- mesures hydrométriques en nappe (paramètres mesurés, campagnes, chroniques…) ;
- mesures hydrométriques en rivière (paramètres mesurés, campagnes, chroniques…) ;
- mesures hydrométriques à l'interface nappe/rivière (paramètres mesurés, campagnes, chroniques…) ;
- modèles (type, description…) ;
- mesures physico-chimiques (paramètres mesurés, campagnes, chroniques…) ;
- mesures biologiques (paramètres mesurés, campagnes, chroniques…) ;
- données sociologiques et économiques ;
- autres données.

2.2. Importance, collecte et validation des données

Données nécessaires à la mise en œuvre des outils

Les données nécessaires à la mise en œuvre des outils sont listées pour chacun d'entre eux dans les fiches présentées en partie C de ce guide (fiches outils). Si certaines données sont plutôt faciles à obtenir et à interpréter, d'autres peuvent être d'accès, de manipulation et d'interprétation plus difficiles. Certaines peuvent présenter un coût d'acquisition et/ou de traitement important tant du point de vue financier qu'en investissement en temps humain. Au besoin, il peut être intéressant de contacter les personnes ressources listées en fin de chaque fiche outils pour demander aide et conseils.

Il est aussi important de garder à l'esprit que certaines données nécessaires peuvent être mesurées ou relevées en dehors de l'emprise du site d'étude. C'est souvent le cas pour les données météorologiques ou piézométriques si l'on travaille sur un territoire de petite taille inclus dans une entité hydrogéologique de plus grande taille.

Pour finir, il est important de s'assurer de la qualité des données de départ pour réaliser un diagnostic de qualité. Il convient donc de s'assurer qu'il s'agit de données validées, acquises dans les règles de l'art et qu'on en connait :

- la source (auteur, organisme) ;
- les conditions d'obtention et d'utilisation (données libres d'usage sous réserve de citation du détenteur, données utilisables après convention…) ;
- les références et coordonnées spatio-temporelles (date d'acquisition, coordonnées spatiales, x, y et éventuellement z) ;
- les incertitudes et les marges d'erreurs acceptables.

Où trouver les données déjà existantes ?

S'il existe des sites très bien documentés sur lesquels de nombreux travaux de recherches ou d'études ont déjà été réalisés, sur d'autres au contraire les données existantes seront rares.

La littérature (rapports, études, publications, thèses…), les laboratoires de recherche, les collectivités territoriales, les syndicats et les industriels constituent une source importante de données dans le domaine de l'eau. Nombre de ces organismes ou entités possèdent des bases de données et des documentions accessibles en interne, mais parfois en ligne. Le guide Nappes/Rhône propose une liste des sources de données et d'informations disponibles en ligne via un site web ou un portail dont nous vous livrons quelques exemples.

Sites sur la thématique de l'eau. Par ex. Référentiels nationaux sur l'eau, Sandre ; Système d'information sur l'eau, EauFrance ; Informations sur les outils de gestion, Gest'Eau…

Sites sur la thématique des eaux superficielles. Par ex. Base de données des débits des cours d'eau, Banque Hydro ; Référentiel des obstacles à l'écoulement, ROE ; Hydromorphologie et altérations physiques, Syrah…

Sites sur la thématique des eaux souterraines. Par ex. Base de données eaux souterraines, Ades ; Portail géomatique Infoterre ; Base de données sur les systèmes aquifères, BDLisa…

Sites sur la thématique des végétaux aquatiques et zones humides. Par ex. Systématique des végétaux de France, Tela Botanica ; Conservatoires botaniques, FCBN ; Zones humides, EauFrance…

Sites sur la thématique des invertébrés souterrains. Par ex. Biodiversité européenne, Pascalis…

Sites sur d'autres thématiques. Par ex. Banque nationale de prélèvement en eau, BNPE ; Géoportail, IGN ; MétéoFrance, Changement climatique, Drias…

Données à acquérir

Pour certains sites d'étude, il conviendra d'acquérir soi-même les données sur le terrain, en particulier pour appliquer les méthodes décrites dans les fiches outils car :

- elles n'existent pas ;
- elles sont de mauvaise qualité ;
- on souhaite compléter les données existantes.

Chaque fiche outils présentée dans le guide donne des informations sur les données nécessaires et sur les protocoles d'acquisition. Dans certains cas, le coût important d'acquisition de la donnée peut conduire à ne pas choisir une méthode de diagnostic.

2.3. Pour aller plus loin

Guide Nappes/Rhône : p. 143 (Bases de données et informations consultables)

Rapport final NAPROM : p. 149 (5.1. Approche multi-critère) et p. 185 (5.4.2. Grilles de comparaison des métriques)

PARTIE B

Choisir les outils et interpréter

3 Typologie des échanges nappe/rivière 22
4 Outils : méthodes de diagnostic 29
5 Diagnostic synthétique 34

Typologie des échanges nappe/rivière

3

Questions posées

- Quelles sont les principales configurations d'échange nappe/rivière diagnosticables que le guide permet de mettre en évidence?
- Quels types d'échanges peut-on caractériser et avec quels outils ?

Synoptique

- Connaître les configurations d'échange diagnosticables avec le guide
- Connaître les outils adaptés en fonction des configurations d'échange

Liens et renvois

Chapitre 1. Enjeux, échelles de travail et types d'aquifères
Chapitre 5. Diagnostic synthétique
Partie C. Mettre en œuvre les outils

3.1. Fondements et principales configurations de la typologie

Le fondement de cette typologie a été établi dans le cadre du projet Nappes/Rhône et du guide Nappes/Rhône puis complété suite aux travaux réalisés dans le projet Naprom (Rapport final Naprom). Une telle mise au point méthodologique a conduit à retenir six types principaux de situations d'échanges nappe/rivière en contextes alluvionnaire et sédimentaire. Ces types, présentés ci-après, sont diagnosticables à l'aide des outils et méthodes présentées dans ce guide.

Nappe vers rivière. Il s'agit des transferts d'eau de la nappe vers la rivière (ou vers les eaux de surface). On distingue ici les apports latéraux des apports par le fond (figure 2).

Rivière vers nappe. Il s'agit des transferts d'eau de la rivière (ou des eaux de surface) vers la nappe. On distingue ici aussi les apports latéraux des apports par le fond (figure 3).

Absence d'échanges observables (entre les eaux de surface et les eaux souterraines) (figure 4).

Colmatage. Il peut s'agir d'un colmatage physique et/ou colmatage biologique empêchant (ou réduisant fortement) les échanges nappe/rivière (figure 5).

Circulations plus complexes du cheminement de l'eau. Ces circulations conduisent souvent à des mélanges d'eaux souterraines et superficielles. Certains outils du guide permettent une quantification du mélange et de déterminer le pourcentage d'eau provenant de la nappe alluviale, de la rivière ou des aquifères adjacents (figure 6).

Avertissement

Avant de commencer la lecture de ce chapitre, il convient de garder à l'esprit que :

- les configurations d'échange décrites sont essentiellement adaptées aux contextes d'aquifère alluvial et sédimentaire ;
- les influences des karsts et des massifs cristallins sont peu prises en compte ;
- l'influence des variations saisonnières sur les échanges peut provoquer des inversions au fil des saisons (par ex. assec, étiage, débordement…).

Ces indicateurs de cheminement de l'eau sont présentés en trois sous-types :

- sous-écoulement à l'échelle du méandre, caractérisé par le transit de l'eau à travers la plaine alluviale. L'eau passe du cours d'eau vers la nappe, puis retourne vers le cours d'eau (figure 6) ;
- sous-écoulement à l'échelle des digues, caractérisé par le transit de l'eau à travers les digues. L'eau passe d'un cours d'eau (un canal) vers la digue latérale, puis retourne vers un cours d'eau (ou contre-canal) (figure 6) ;
- recyclage ou échanges hyporhéiques, phénomènes d'infiltration/exfiltration amont/aval dans le cours d'eau au niveau des bancs de sables et de graviers (figure 7).

Exemples de situations particulières. Il s'agit principalement du cas de nappes déconnectées ou surélevées (perchées) par rapport au cours d'eau (par ex. incision du lit) (figure 8).

3.2. Présentation de la typologie

Code couleur pour les échanges nappe/rivière

Chaque type de configuration d'échange est accompagné d'un code couleur (tableau 2). Ce code est utilisé pour faciliter la lecture :

- des tableaux de comparaison (figure 10) des résultats du diagnostic des échanges nappe/rivière fondé sur plusieurs outils ;
- des cartes spatialisant les résultats (Diagnostic synthétique) (figures 9 et 11 pages 37 et 39).

Tableau 2. *Code couleur des principales configurations de la typologie des échanges nappe/rivière.*

Code couleur	Typologie des échanges
	Nappe vers la rivière (latéral et /ou par le fond) - Figure 2
	Rivière vers la nappe (latéral et/ou par le fond) - Figure 3
	Absence d'échange observable (diagnostiqué, détecté) - Figure 4
	Colmatage (physique et/ou biologique) - Figure 5
	Circulations complexes (sous-écoulements, mélange) - Figure 6
	Recyclage ou échanges hyporhéiques - Figure 7

Schémas descriptifs et fonctionnels

Pour illustrer chaque type d'échange, décrire et expliquer leur fonctionnement de façon schématique, une coupe transversale au niveau du cours d'eau et un bloc diagramme à l'échelle d'une plaine alluviale sont proposés (figures 2 à 7).

Les coupes montrent une vue transversale au niveau d'une ou plusieurs berges à l'interface eau souterraine/eau superficielle. Les flèches de couleurs montrent le sens des échanges d'eau. La numérotation permet de localiser le type d'échange sur la coupe. Certains types sont décomposés en sous-types.

Les blocs diagrammes proposent une vue en trois dimension d'une plaine alluviale aquifère parcourue par un cours d'eau et un affluent et cernée par une formation géologique encaissante culminant au niveau d'un massif. La numérotation et les flèches des coupes transversales sont reportées sur les blocs diagrammes.

Pour chaque type d'échange, la description schématique (coupe et bloc diagramme) est complétée par des éléments textuels afin de préciser :

- le ou les outils capables de diagnostiquer le type décrit (**Outils**) ;
- des exemples des conséquences de la prise en compte des échanges nappe/rivière pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité (**Enjeux de gestion**).

Apport de la nappe à la rivière (ou à des eaux superficielles)

Outils

Apport latéral principalement ①
Analyse géomatique des niveaux d'eau

Apport latéral et apport de fond non-distingués ① **et** ②
Modèles hydrodynamiques distribués à base physique (Marthe, Eau-Dyssée)
Géochimie
Végétation aquatique
Invertébrés souterrains

Apport latéral et apport de fond distingués ① **et/ou** ②
Modèles hydrothermiques à base physique et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Metis et Molonari)
IRT

Enjeux de gestion

Apports de nappe aux chenaux actifs d'un cours d'eau
Soutien du débit d'étiage
Tamponnage thermique et maintien d'une faune et d'une flore d'eau froide
En cas de pollution des nappes, risque de dégradation de la qualité des eaux superficielles
En cas de surexploitation de la nappe, risque d'assec sévère, de réchauffement des cours d'eau

Apports de nappe aux zones humides associées à un cours d'eau
Maintien des zones humides lors d'assèchements estivaux prolongés
Maintien d'un faune et d'une flore d'eau froide à forte valeur patrimoniale (tamponnage thermique, limitation désoxygénation, maintien oligotrophie)
En cas de pollution des nappes, risque de dégradation de la qualité de la zone humide
En cas de surexploitation de la nappe, risque d'eutrophisation et de bloom algaux de la zone humide

① apport latéral
② apport par le fond

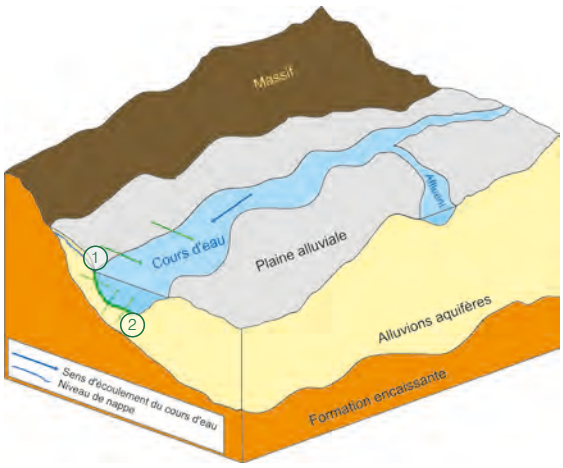


Figure 2. *Apport de la nappe au cours d'eau (ou à des eaux superficielles).*

Apport de la rivière (ou d'eaux superficielles) à la nappe

Outils

Apport latéral principalement ③
Analyse géomatique des niveaux d'eau

Apport latéral et apport de fond non-distingués ③ **et** ④
Modèles hydrodynamiques distribués à base physique (Marthe, Eau-Dyssée)
Géochimie
Invertébrés souterrains

Apport latéral et apport de fond distingués ③ **et/ou** ④
Modèles hydrothermiques à base physique et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Metis et Molonari)

Enjeux de gestion

Ouvrages de captage d'eau
Délimitation de zone de captage potentiellement favorable
Risque de pollution de nappe par les eaux superficielles
Recherche d'une barrière hydraulique (artificielle) pour protéger une nappe de contaminations provenant du cours d'eau principal

Débit de la rivière
Pertes en eau sur certains linéaires de cours d'eau

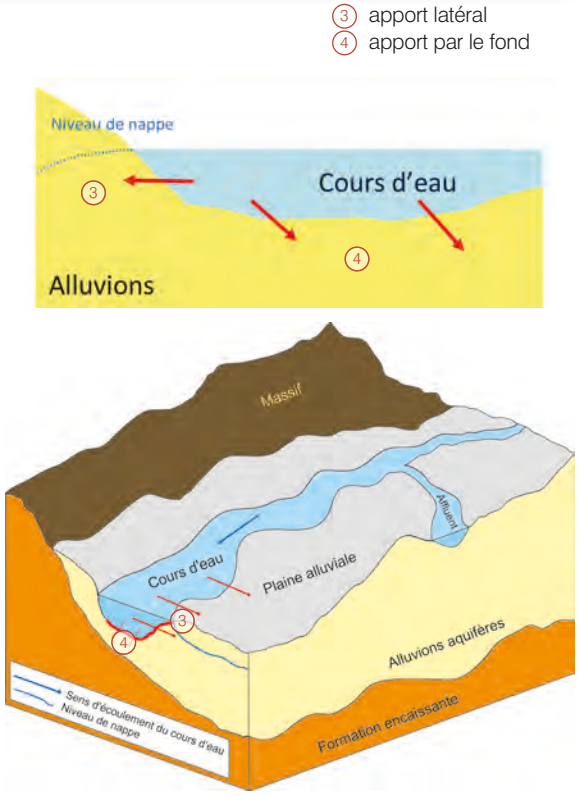


Figure 3. *Apport du cours d'eau (ou d'eaux superficielles) à la nappe.*

Pas d'échange diagnostiqué (observable, détecté) entre la nappe et la rivière

Outils

Pas d'échange ⑤
Analyse géomatique des niveaux d'eaux
Modèles hydrodynamiques distribués à base physique (Marthe, Eau-Dyssée)
Modèles hydrothermiques à base physique et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Metis et Molonari)
Géochimie
Végétation aquatique

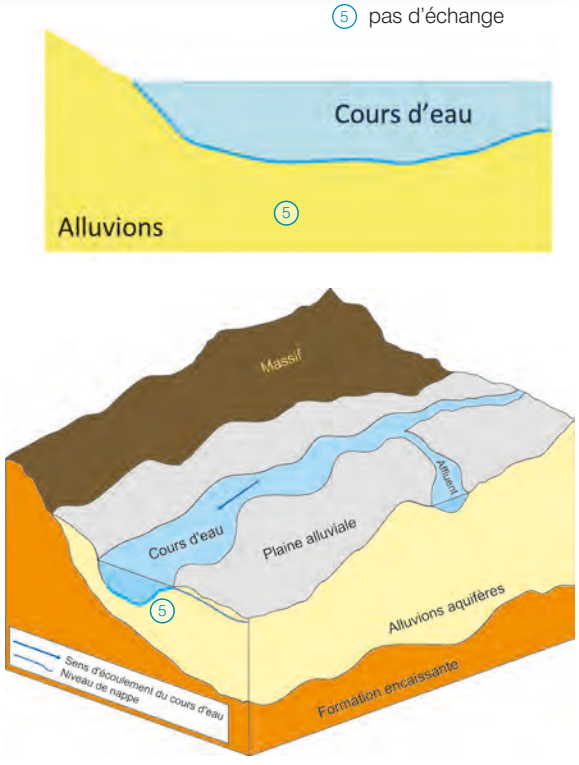


Figure 4. *Pas d'échange diagnostiqué entre la nappe et la rivière.*

Colmatage entre la nappe et la rivière

Outils

Colmatage physique (6)
Dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Molonari)
Géochimie
Végétation aquatique
Invertébrés souterrains

Colmatage biologique (7)
Invertébrés souterrains

Enjeux de gestion

Zone peu favorable à l'implantation de captages pouvant utiliser les ressources souterraines et de surface
Zone peu vulnérable à la pollution (dégradation d'une masse d'eau par l'autre)
Anoxie des sédiments, forme réduite de l'azote et de certains polluants
Si le colmatage est d'origine anthropique, perte de biodiversité et de capacité d'autoépuration, réchauffement excessif du cours d'eau en été par rapport à l'état naturel

(6) Colmatage physique
(7) Colmatage biologique

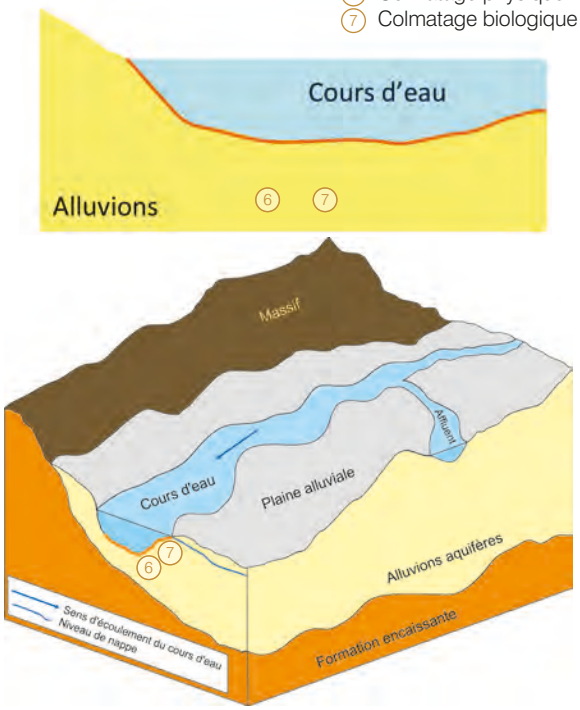


Figure 5. Colmatage physique ou biologique entre la nappe et la rivière.

Circulations complexes du cheminement de l'eau

Outils

Sous-écoulement – méandre (8)
Modèles hydrodynamiques distribués à base physique (Marthe, Eau-Dyssée)
Modèles hydrothermiques à base physique (Metis)
Géochimie
Végétation aquatique
Invertébrés souterrains

Sous-écoulement – digue (9)
Dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Molonari)
Géochimie
Végétation aquatique
Invertébrés souterrains

Le sous-écoulement peut aussi se faire d'un affluent en direction du cours d'eau principal via le milieu souterrain (8bis). Comme pour le cas avec le méandre ce type d'échange se fait à l'échelle de la plaine.

Mélange eau souterraine/eau superficielle quantifiable (10)
Certains outils permettent de déterminer les proportions d'un mélange d'eau superficielle et d'eau souterraine. Ces proportions sont quantifiables avec le dispositif Molonari et la géochimie.

Enjeux de gestion

Sous-écoulement-méandre
Implantation de captages utilisant les ressources souterraines et de surface
Auto-épuration du cours d'eau via les zones humides alluviales

Sous-écoulement-digue
Quantification des pertes d'eau d'un canal

(8) Sous-écoulement d'eau superficielle via le milieu souterrain vers une rivière
(9) Sous-écoulement d'eau superficielle via le milieu souterrain vers un canal
(10) Exemple de quantification de mélange

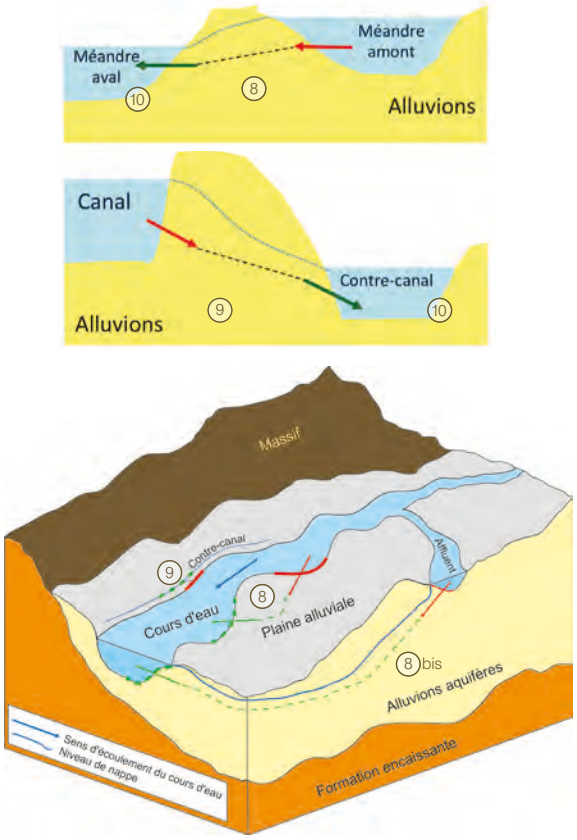


Figure 6. *Circulations plus complexes du cheminement de l'eau.*

Recyclage d'eau superficielle dans le cours d'eau par exfiltration/infiltration ou échanges hyporhéiques

Outils

Recyclage (11)
Dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Molonari)
Invertébrés souterrains

Enjeux de gestion

Fonctionnalité d'autoépuration favorisée
Maintien d'une haute disponibilité en nutriments et du soutien de la productivité de l'écosystème
Apport d'eau froide à l'aval des bancs de graviers des cours d'eau
Risques d'exportation de polluants vers les interstices
Assèchement facilité lors des étiages sévères

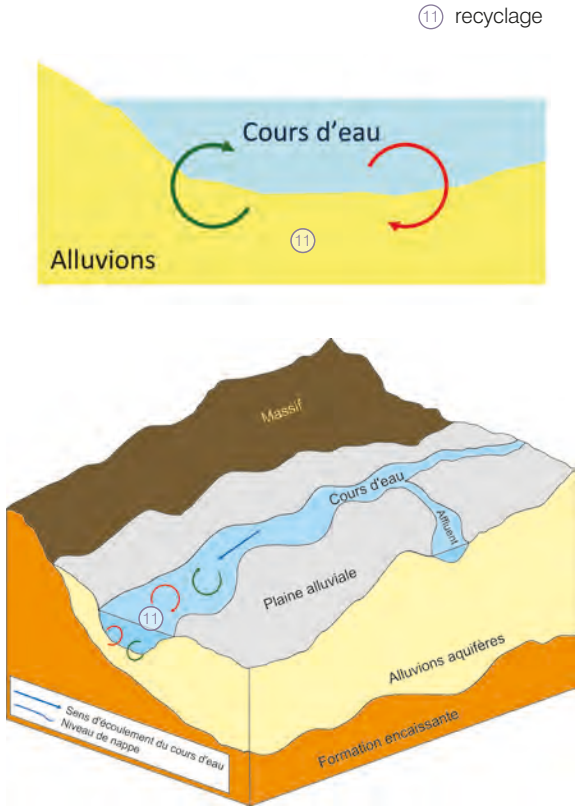


Figure 7. *Recyclage d'eau superficielle dans le cours d'eau par exfiltration/infiltration ou échanges hyporhéiques.*

Dans certains cas, la nappe n'est pas connectée au cours d'eau. La figure 8 montre un exemple de nappe perchée résultant de l'incision du lit d'un cours d'eau et de l'abaissement du niveau de base. Dans ces conditions, le diagnostic des échanges nappe/rivière fondé sur l'analyse géomatique des niveaux d'eau et la végétation aquatique n'est pas pertinent.

Figure 8. *Cas particuliers : incision du lit de la rivière et déconnexion de l'aquifère.*

3.3. Synthèse : quel(s) outil(s) pour quel type d'échange ?

Le tableau 3 propose une vue synthétique du potentiel de diagnostic des types d'échanges (en colonne) de chacun des outils (en ligne) proposés dans ce guide.

3.4. Pour aller plus loin

Guide Nappes/Rhône : p. 40 (Chapitre 2)

Rapport final Naprom: p. 166 (5.4. Protocole de comparaison des métriques)

Tableau 3. *Grille synthétique - configurations d'échanges prises en compte par les outils.*

	Configurations d'échanges											
	Nappe → rivière		Rivière → nappe		Absence d'échange	Colmatage		Indicateurs du cheminement de l'eau				Cas particuliers
Outils n°	Latéral	Fond	Latéral	Fond		Physique	Biologique	Sous-écoulement		Recyclage ou échanges hyporhéiques	Mélange	Nappe déconnectée ou surélevée
								Méandre	Digue			
1. Analyse géomatique des niveaux d'eau	O	N	O	N	O	N	N	N	N	N	N	N
2. Modélisation hydrodynamique…	O^a mais non distingués		O^a mais non distingués		O	N	N	O^c si maillage adapté	N	N	N	O
3.1. Modélisation hydrothermique…	O	O	O	O	O	N	N	O	N	N	N	O
3.2. Dispositif Molonari	O	O	O	O	O	O	N	N	O	O^d si plusieurs Molonari sur le même tronçon	O^e si couplage avec modèle	O
4. Infrarouge thermique (IRT)	O	O	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
5. Géochimie	O^a mais non distingués		O^a mais non distingués		O	O	N	O	O	N	O	O
6. Végétation aquatique	O^a mais non distingués		N	N	O	O^b pour les ZH alluvionnaires	N	O	O	N	N	N
7. Invertébrés souterrains	O^a mais non distingués		O^a mais non distingués		N	O	O	O	O	O	N	O

N = Non (type d'échange non diagnosticable par l'outil considéré)
O = Oui (type d'échange diagnosticable par l'outil considéré)
O^a = Oui, mais échanges latéraux et par le fond non distingués
O^b = Les macrophytes peuvent détecter le colmatage physique seulement à l'échelle des zones humides créées par alluvionnement
O^c = Les modèles à base physique peuvent détecter le sous-écoulement à l'échelle du méandre si le maillage est adapté et la taille du méandre suffisante
O^d = Le recyclage est détectable si plusieurs dispositifs Molonari sont installés sur un même tronçon
O^e = Le mélange est détectable si le dispositif Molonari est couplé avec un modèle à base physique

Outils : méthodes de diagnostic

4

Questions posées

- Quel intérêt de commencer par un pré-diagnostic ?
- Comment choisir la ou les bonnes méthodes de caractérisation des échanges nappe/rivière ?

Synoptique

- Penser à réaliser un pré-diagnostic
- Connaître et comparer les outils de diagnostic présentés dans ce guide

Liens et renvois

Chapitre 2. Données et caractérisation des sites d'étude
Chapitre 3. Typologie des échanges nappe/rivière
Partie C. Mettre en œuvre les outils

4.1. Réaliser un pré-diagnostic

Afin de démarrer l'étude des échanges nappe/rivière sur un territoire donné, il est conseillé de réaliser un pré-diagnostic qui peut être fondé tant :

- sur des informations issues de la bibliographie (par ex. études, rapports, thèses, fiches de synthèses hydrogéologiques, cartes piézométriques, interprétations géologiques et hydrogéologiques…) ;
- sur des visites de terrain ou des pré-campagnes de relevés de terrain (par ex. mesure de paramètres physico-chimiques, mesure de niveaux d'eau, lecture de paysage, détermination de végétaux aquatiques…).

Selon le cas, la méthode géomatique (fiche outils n°1) et l'imagerie thermique infrarouge (IRT) (fiche outils n°4) peuvent en elles-mêmes constituer des méthodes de pré-diagnostic, qui pourront éventuellement être complétées par quelques mesures géochimiques (fiche outils n°5) et quelques déterminations de végétaux aquatiques (fiche outils n°6). Ce pré-diagnostic permet d'identifier des zones qui fonctionnent potentiellement différemment (par ex. changement de géologie) et d'avoir des estimations du sens des échanges.

Une fois ce pré-diagnostic réalisé, des méthodes plus compliquées et plus coûteuses pourront être mises en œuvre si nécessaire pour préciser les échanges aux échelles de temps et d'espace d'intérêt et de les quantifier.

4.2. Panorama des différentes méthodes

Plusieurs méthodes de caractérisation des échanges nappe/rivière sont présentées dans ce guide. La caractérisation des échanges nappe/rivière peut faire appel à une ou plusieurs de ces méthodes en fonction du contexte hydrogéologique, des contraintes territoriales et des enjeux. Il y a donc parfois un fort intérêt à utiliser plusieurs méthodes.

Les tableaux suivants (tableau 4 p. 31 ; tableau 5 p. 32 ; tableau 6 p. 33**)** présentent pour chacune des méthodes :

- leurs principales caractéristiques fondamentales ;
- leur façon d'appréhender les échanges ;
- leurs points forts et points faibles.

Les configurations d'échanges diagnostiquées par ces méthodes ont été présentées au chapitre 3.

Caractéristiques fondamentales

Le tableau 4 synthétise les éléments fondamentaux permettant de décrire et de caractériser chacune des méthodes. Les champs sont au nombre de trois et répondent chacun à des questions spécifiques.

Contexte hydrogéologique. *Dans quels contextes hydrogéologiques la méthode est-elle applicable ?*

Principes de la méthode. *Sur quels principes, concepts, équations, modèle numérique, hypothèses la méthode est-elle fondée ?*

Informations nécessaires. *Quels sont les paramètres (par ex. calage), variables, contraintes, données et observations, conditions initiales et limites… à prendre en compte pour appliquer la méthode ?*

Tableau 4. *Éléments fondamentaux caractéristiques des différentes méthodes.*

Outils n°	Éléments fondamentaux caractéristiques des différentes méthodes		
	Contexte hydrogéologique	**Principes de la méthode**	**Informations nécessaires**
1. Analyse géomatique des niveaux d'eau	Nappes alluviales libres connectées à la rivière (milieu poral)	Calcul de gradients piézométriques - Loi de Darcy TIN	h nappe (cote) h rivière (cote) Carte piézométrique Perméabilités des berges Section d'écoulement
2. Modélisation hydrodynamique distribuée à base physique *	Nappes libres et captives Aquifères multicouches	Modèle hydrogéologique-couplé avec l'IDPR Équation de diffusivité Volumes finis Code de calcul Marthe	Géométrie du milieu, optionnel : épaisseur d'alluvions Paramètres hydrodynamiques : perméabilité (k), transmissivité, coefficient d'échange nappe/rivière, paramètre de Manning (frottement en rivière) Conditions limites : précipitations, évapotranspiration potentielle Conditions initiales et données de calibration et validation : h rivière et nappe (cote), Q rivière (débit)
		Modèle couplé hydrologique/hydrogéologique Équation de diffusivité Différences finies Code Eau-Dyssée	
		Modèle couplé hydrologique/hydrogéologique Équation de diffusivité Différences finies Code CaWaQS ou Eau-Dyssée	
3.1. Modèles hydrothermiques à base physique	Nappes libres et captives Aquifères multicouches	Modèle thermique/hydrogéologique Équation du transport de chaleur couplée à l'équation de diffusivité Éléments finis 2D vertical Code Metis	Géométrie du milieu Paramètres thermo-hydrodynamiques : K, S, conductivité thermique, capacité calorifique etc. Conditions limites : h rivière et nappe (cotes), T rivière et nappe (température) Calibration et validations : profils thermique de la zone humide
3.2. Dispositif Molonari	Nappes libres Zone hyporhéique Aquifères multicouches	Mesures hydrogéophysiques Calcul du gradient hydraulique nappe/rivière Jaugeage différentiel Traçage thermique et éventuellement géochimique Permet d'effectuer des slug tests	Mise en place de piézomètres et des stations d'acquisition de données rivière, nappe, zone humide
4. Infrarouge thermique (IRT)	Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés	Cartographie du rayonnement infrarouge thermique	Images satellites Images photographiques
5. Géochimie	Nappes libres Zone hyporhéique Aquifères multi-couches Milieux carbonatés	Analyses physico-chimiques Analyses isotopiques Contrastes	Analyse d'eau Fonds géochimiques et référentiel
6. Végétation aquatique	Nappes libres	Composition des communautés de macrophytes	Exigences écologiques des espèces (trophie, perturbations, apports de nappe) Contexte biogéographique
7. Invertébrés souterrains	Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés dont karst	Composition des communautés d'invertébrés interstitiels	Exigences écologiques des espèces (stygobies) Contexte biogéographique

* Trois exemples de modèles couplant écoulements de surface et écoulements souterrains sont présentés ici ; d'autres modèles similaires peuvent être envisagés.

Prises en compte des échanges

Le tableau 5 présente la façon dont chacune des méthodes prend en compte les échanges nappe/rivière à travers six champs **(colonnes)** qui répondent à des questions spécifiques.

Type d'échanges pris en compte / **aire d'échange (**colonne **Types).** La méthode permet-elle de diagnostiquer les échanges sur la totalité de l'interface nappe/rivière ou non (échanges latéraux, échanges par le fond…) ? Peut-elle intégrer d'autres types d'échanges (masses d'eau aquifères adjacents…) ? Quelle est la nature de la surface d'échange considérée par la méthode (section plan, surface mouillée…) ?

Sens de l'échange (colonne **Sens).** La méthode permet-elle d'identifier le sens de l'échange (rivière vers nappe ou nappe vers rivière par exemple) ?

Estimation quantitative de l'échange (colonne **Quantification).** La méthode permet-elle de quantifier les flux d'eau échangés (m^3/jour ; l/s…) ?

Caractérisation de l'échange pour chaque rive (colonne **Rive).** La méthode permet-elle de distinguer les situations d'échange sur chacune des rives d'un cours d'eau (diagnostic rive droite et rive gauche) ?

Représentation cartographique de l'échange (colonne **Représentation).** Comment les résultats issus du diagnostic peuvent-ils être représentés sous forme cartographique et notamment sous SIG (points, lignes, surfaces, 3D…) ?

Caractérisation de la zone hyporhéique (colonne **Zone hyporhéique).** La méthode permet-elle de caractériser les échanges en distinguant la zone hyporhéique ?

Tableau 5. *Prise en compte des échanges nappe/rivière par chacun des outils.*

Outils n°	Échanges					
	Types	Sens	Quantification	Rive	Représentation	Zone hyporhéique
1. Analyse géomatique des niveaux d'eau	Latéraux, à travers les berges à l'échelle de tronçon Interface nappe/cours d'eau (section plan)	**Oui**	**Oui** m^3/jour	**Oui**	Linéaire de berge	**Non**
2. Modélisation hydrodynamique distribuée à base physique	Surface mouillée (fond et berges)	**Oui**	**Oui**	**Non**	Surfacique	**Non**
3.1. Modélisation hydrothermique à base physique	Distingue échanges par le fond et par les berges	**Oui**	**Oui**	**Oui**	Ponctuelle	**Oui**
3.2. Dispositif Molonari	Surface mouillée (fond et berges)	**Oui**	**Oui** Si couplé avec modèle	**Non**	Ponctuelle	**Oui**
4. Infrarouge thermique (IRT)	Par le fond ou par les berges Localement, toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	**Non** Uniquement nappe vers cours d'eau	**Non**	**Oui**	Continue (Raster)	**Oui**
5. Géochimie	Intégré à l'échelle des masses d'eau	**Oui**	**Oui**	**Oui**	Ponctuelle Interpolation surfacique	**Oui**
6. Végétation aquatique	Intégré à l'échelle des masses d'eau (cours d'eau, nappe alluviale, aquifère adjacent) Toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	Uniquement nappe vers cours d'eau	**Oui** Semi-quantitatif (4 classes)	**Oui** Si on l'intègre dans le suivi en séparant chaque rive **Non** Si on fait le relevé standard sans a priori	Relevés ponctuels (à l'échelle de la zone humide) Interpolation surfacique	**Non**
7. Invertébrés souterrains	Par le fond ou par les berges Localement, toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	**Oui**	**Non**	**Oui**	Ponctuelle	**Oui**

Points forts et points faibles

Le tableau 6 présente de manière synthétique les avantages et inconvénients de chacune des méthodes pour la caractérisation des échanges nappe/rivière.

Tableau 6. *Points forts et points faibles des outils.*

Outils n°	Points forts	Points faibles
1. Analyse géomatique des niveaux d'eau	Rapide, simple, peu de données, extension spatiale, agrégation spatiale	Milieux alluviaux libres uniquement, existence et précision des données de départ
2. Modélisation hydrodynamique distribuée à base physique	Quantification, multicouche, spatialisation à différentes échelles, concepts physiques, différents pas de temps et résolution spatiale	Temps de calcul, pas de discrimination des berges, propriétés du lit mal connues, niveau de nappe symétrique sur chaque rive, gourmand en données, calibration et validation
3.1. Modélisation hydrothermique à base physique	Prise en compte de la thermie, interprétation de mesures de température ; distinction berge fond ; quantification à haute résolution temporelle et spatiale ; élément clef qui permet le changement d'échelle ; prise en compte de la géométrie du fond de la rivière (hyporhéique + nappe)	Ponctuel, difficile à mettre en œuvre pour un tronçon, gros efforts d'acquisition de données, méthode lourde
3.2. Dispositif Molonari	Mesure directe du sens d'échange à haute fréquence et sur le temps long Permet d'utiliser directement la métrique modèle thermo-hydro couplé	Ponctuel, couteux, nécessite un grand effort d'instrumentation, ainsi qu'une bonne connaissance de l'hydrogéologie et de la pédologie-géologie pour le suivi de l'installation
4. Infrarouge thermique (IRT)	Acquisition rapide Extension spatiale	Apports de nappes uniquement Incertitudes liées à la calibration de la caméra Nécessité d'avoir un contraste de température entre les eaux souterraines et les eaux de surface
5. Géochimie	Origine des eaux, altitude de recharge, temps de renouvellement, âge des eaux	Coûts parfois élevés et suivi lourd, nécessite des eaux à signature chimique contrastée
6. Végétation aquatique	Rapide, peu coûteux, intégration des échanges sur une période annuelle	Présence de végétation, semi-quantitatif, homogénéité de la qualité des eaux
7. Invertébrés souterrains	Echantillonnage rapide, peu coûteux, sites complexes, origine de l'eau (discrimination de différents aquifères)	Pas de quantification, échelle locale, variabilité biogéographique (limite dernière glaciation), compétence en sytématique, traitement en laboratoire long

4.3. Pour aller plus loin

Rapport Naprom : p. 166 (5.4.2. Grilles de comparaison des métriques)

Guide Eau Sout' : p. 16 (Introduction) et p. 55 (chapitre 4)

Diagnostic synthétique 5

Questions posées

- Comment aboutir à un diagnostic synthétique des échanges nappe/rivière quand on a utilisé plusieurs méthodes ?

Synoptique

- Connaître la marche à suivre pour combiner les résultats de plusieurs méthodes
- Prendre en compte les incertitudes
- Établir un diagnostic synthétique

Liens et renvois

Chapitre 3. Typologie des échanges nappe/rivière
Partie C. Mettre en œuvre les outils

5.1. Étapes à suivre

Quand on dispose de plusieurs diagnostics des échanges nappe/rivière sur un même territoire obtenus à l'aide de plusieurs outils, il est souvent intéressant de disposer d'un diagnostic synthétique afin de mettre en avant les points de convergence, mais aussi les points de divergence.

Les étapes conduisant à un diagnostic synthétique sont les suivantes :

- synthèse des résultats obtenus avec chacun des outils ;
- sectorisation spatiale des résultats à l'échelle du point kilométrique (PK) ou du ½ PK pour chaque outil, pour chaque tronçon de rivière étudié à l'aide de la typologie des échanges nappe/rivière (chapitre 3 et figure 10 p. 38) ;
- superposition spatiale des diagnostics par outil sur les tronçons étudiés (figure 9 p. 37) ;
- détermination des incertitudes liées au sens de l'échange diagnostiqué et à sa quantification pour chaque tronçon de rivière (figure 10) ;
- diagnostic synthétique multi-métrique des échanges par tronçon de rivière (figure 10) ;
- représentation cartographique du diagnostic synthétique (figure 11 p. 39).

5.2. Comparer les résultats et tenir compte des incertitudes

À l'heure actuelle, le diagnostic synthétique proposé est réalisé à l'aide d'un tableau de comparaison croisée des résultats, obtenus avec chaque outil impliqué.

Ce tableau est structuré en trois parties :

- dans la partie gauche, on retrouve le diagnostic des échanges par outils. Pour chacun sont indiqués : son intitulé, la date et l'état hydrologique de la nappe et du cours d'eau (basses eaux, moyennes eaux, hautes eaux par exemple). Dans l'idéal tous les diagnostics auront été réalisés à la même date. La sectorisation spatiale en unités fonctionnelles des échanges nappe/rivière est effectuée à l'échelle du ½ PK (ou du PK) à l'aide du code couleur issu de la typologie des échanges (chapitre 3). De plus des informations complémentaires pourront être intégrées (remarques, quantification des flux échangés). Par convention, rappelons que les flux de la rivière vers la nappe sont indiqués avec des valeurs négatives et ceux de la nappe vers la rivière avec des valeurs positives ;
- dans la partie droite est indiquée, pour chacun des outils et pour chaque secteur homogène en termes d'échange, l'incertitude pesant sur le diagnostic. Le tableau 7 p. 36 donne un aperçu de ce que pourrait être l'évaluation des incertitudes concernant l'évaluation du sens de l'échange. Chaque diagnostic pourrait être évalué selon une notation trinaire : bonne évaluation, incertitudes, douteux ;
- la partie centrale est réservée au diagnostic synthétique croisé. Dans le cadre des projets Nappes/Rhône et Naprom ce diagnostic a été réalisé à « dire d'experts », c'est-à-dire après discussion entre les experts des différentes méthodes.

5.3. Un peu d'aide pour trancher

Il est conseillé de ne garder que les diagnostics de meilleure qualité et éliminer ceux qui sont trop incertains.

En cas de doute, il est possible de trancher à l'aide du diagnostic de meilleure qualité. Il est aussi possible de compléter le diagnostic à l'aide d'un nouvel outil.

Un diagnostic devient très pertinent s'il est construit sur la base du diagnostic convergent de plusieurs outils.

En cas de fortes divergences de diagnostics ou de fortes incertitudes, il faudra sans doute réaliser des études complémentaires à l'aide de nouveaux outils.

Tableau 7. *Incertitudes par outil sur le diagnostic des échanges nappe/rivière : exemples.*

Outils n°	Qualité du diagnostic		
	Bonne évaluation	Incertitudes	Douteux
1. Analyse géomatique des niveaux d'eau	Nombreuses mesures de niveaux de nappes Carte piézométrique interpolée à l'aide d'outils géostatistiques Mesures de la ligne d'eau de la rivière synchrone de la piézométrie Profil bathymétrique	Peu de mesures de niveaux de nappe Carte piézométrique interpolée manuellement	Trop de peu de mesures de niveaux de nappe Piézométrie non datée et non nivelée
2. Modélisation hydrodynamique distribuée à base physique	Réseau fortement dense d'observations pour la calibration et l'évaluation (piézomètres, hauteurs d'eau en rivière, débits) Bonne connaissance des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère : porosité, perméabilité, transmissivité Bonne connaissance des paramètres géomorphologiques de la rivière : largeur, altitude du fond de la rivière et/ou du niveau d'eau en rivière Connaissances précises de la topographie du domaine simulé Connaissances des conditions aux limites (débits d'entrée/sortie) et initiales Connaissance des aménagements anthropiques (barrages, seuils, irrigations, canaux, ...) Hypothèses de modélisation adaptées à l'échelle spatiotemporelle	Réseau moyennement dense d'observations Connaissance imparfaite du domaine simulé (paramètres hydrodynamiques, géomorphologiques, topographiques), des conditions aux limites et initiales Aménagement humain difficilement représentable (canal, seuil, irrigation, ...)	Réseau faiblement dense d'observations (fort biais par rapport aux observations) Méconnaissance totale du domaine simulé (paramètres, hydrodynamiques, géomorphologiques, topographiques) Hypothèse de modélisation mal adaptée au domaine et aux objectifs (maillage trop grossier, pas de temps trop faible, ...) Choix d'un type de modèle pas adapté au problème (par ex. modèle 3D à base totalement physique lourd en temps de calcul et en calibration pour un problème régional de plus d'un millier de km²)
3.1. Modélisation hydrothermique à base physique	Réseau de mesure assez dense (calibration) Peu de mesures verticales de la T°C Présence de données des propriétés thermiques et hydrodynamiques du ou des milieux Conditions limites provenant des mesures de terrain	Peu de mesures (pour la calibration) Plusieurs mesures verticales de la T°C Manque de données des propriétés thermiques et hydrodynamiques du ou des milieux Conditions limites issues de la littérature	Très peu ou pas de mesure pour la calibration Plusieurs mesures verticales de la T°C Absence de données des propriétés thermiques et hydrodynamiques du ou des milieux Conditions limites inconnues
3.2. Dispositif Molonari	Rivière connectée Présence d'échanges Bon nivellement. Mesure en continue à haute fréquence	Faible gradient (<0.005) entre la nappe et la rivière Mesures hebdomadaires	Rivière déconnectée Absence d'échange Mauvais nivèlement Mesures ponctuelles
4. Infrarouge thermique (IRT)	Bon contraste thermique entre eau souterraine et eau superficielle Cours d'eau sans stratification thermique Acquisition d'images dans le visible Présence de thermomètre de contrôle dans le cours d'eau	Réflexion des radiations environnantes (par ex. nuages, arbres) Variation de la rugosité de l'eau	Très faible contraste thermique entre eaux souterraines et superficielles Stratification thermique du cours d'eau Pas d'image de contrôle dans le visible Pas de thermomètre de contrôle
5. Géochimie	Fort contraste entre les masses d'eau Suivis continus ou fréquents	Suivi insuffisant (peu de mesures et de prélèvements) Faible contraste entre les masses d'eau	Perturbations liées à l'activité biologique Perturbations liées à l'activité humaine Manque de valeurs de référence
6. Végétation aquatique	Forte densité de site (1 tous les 500m)	Proportion importante d'espèces ubiquistes	Hyper-eutrophisation et pollution anthropique Recouvrement végétal très faible Instabilité hydrologique récente (après une crue)
7. Invertébrés souterrains	Faune diversifiée Absence de colmatage	Faune peu diversifiée Espèces ubiquistes Présence de genres à écologie mal connue	Absence régionale de faune stygobie Instabilité hydrologique récente (après une crue)

5.4. Exemples

Exemple d'approche multi-métrique sur la Sèvre-Niortaise

Trois métriques ont été utilisées dans une étude menée sur un méandre de la Sèvre Niortaise : modèle hydrogéologique à base physique (code Marthe) ; végétation aquatique ; analyse SIG ou analyse géomatique des niveaux d'eau. La figure 9 présente une carte où les résultats de ces trois métriques sont superposés :

Modèle hydrogéologique à base physique (code Marthe)
Mailles du modèle représentées par des carrés (flux nappe vers rivière en vert ; flux rivière vers nappe en rouge) ; chaque maille contient un numéro de tronçon.

Végétation aquatique
Points d'échantillonnage représentés par des cercles (probabilité d'apport d'eau souterraine ou ESO mise en évidence par un dégradé de vert ; plus la couleur est foncée plus la probabilité est forte).

Analyse SIG ou analyse géomatique des niveaux d'eau
Tronçons de berge représentés par des segments (flux nappe vers rivière en vert ; flux rivière vers nappe en rouge).

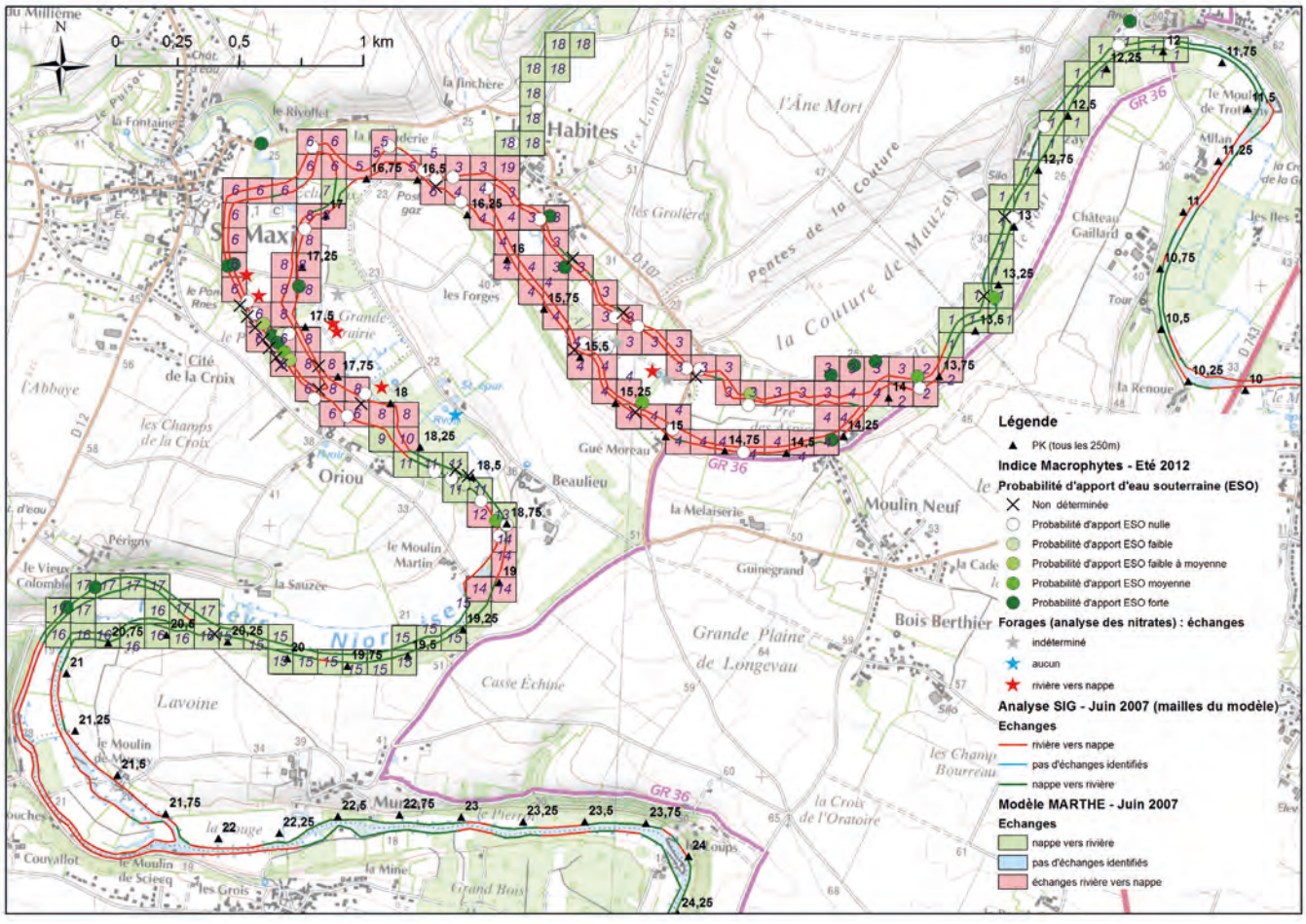


Figure 9. *Carte de superposition des résultats de trois diagnostics sur la Sèvre-Niortaise (Fond Scan 25 IGN).*

La figure 10 présente la synthèse multi-métrique des diagnostics des échanges nappe/Sèvre-Niortaise avec en ligne les PK et en colonne le diagnostic tiré des différentes métriques.

Les résultats sont donnés pour le bras extérieur de la Sèvre-niortaise (à droite dans le sens du flux) et pour le bras intérieur (à gauche). Lorsque les métriques discriminent rive gauche et rive droite les résultats sont détaillés pour chacune d'entre elles. D'une manière générale, les apports de nappe à la rivière sont codés en vert et les apports de rivière à la nappe en rouge.

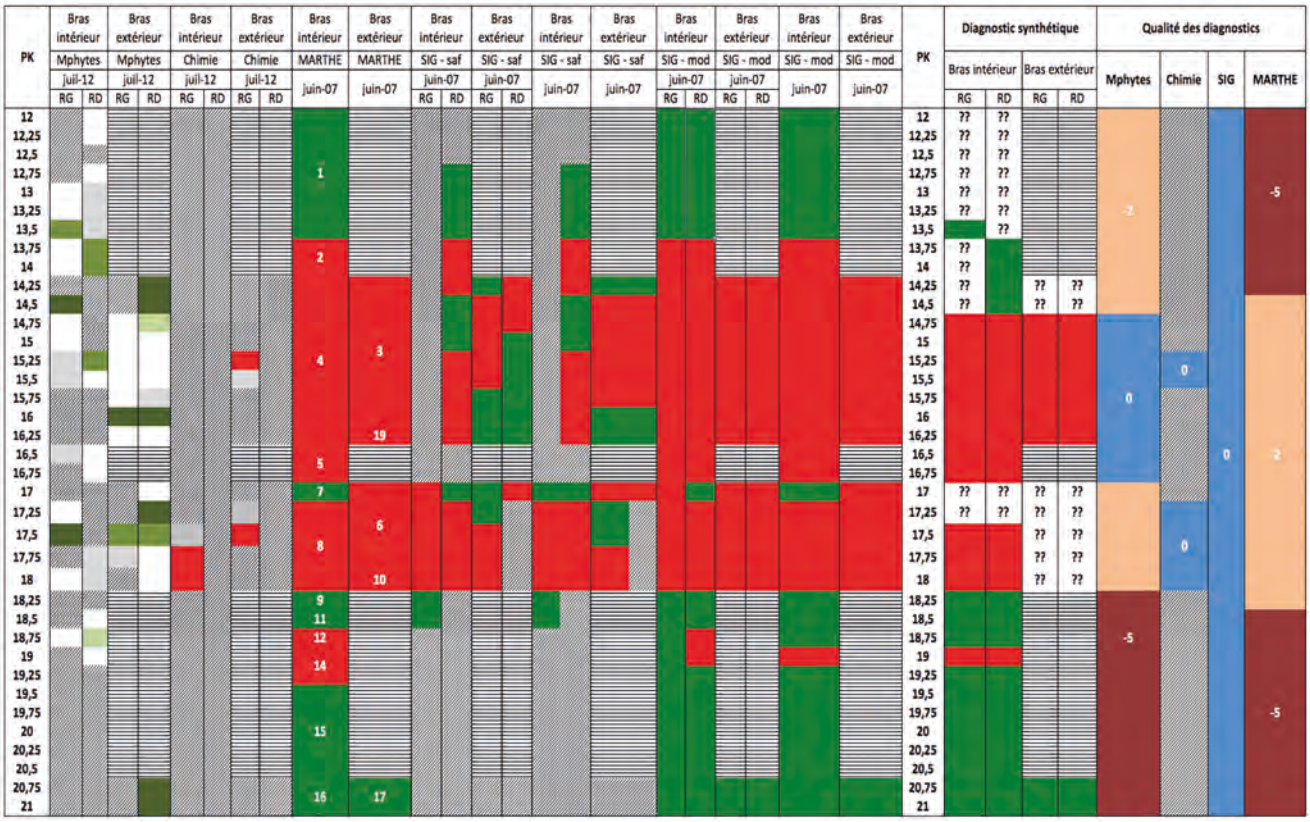


Figure 10. *Synthèse croisée des échanges nappe/Sèvre-Niortaise.*

Colonne 1 (Mphytes)
Probabilité d'apport d'eau souterraine d'après les macrophytes, rive gauche et rive droite.
Colonne 2 (Chimie)
Diagnostic d'après la chimie des eaux souterraines (rive gauche et rive droite).
Colonne 3 (modélisation hydrogéologique Marthe)
Caractérisation des échanges avec le modèle Marthe (bras extérieur et intérieur seulement). La numérotation correspond aux 18 tronçons homogènes inventoriés.
Colonne 4 (**SIG-saf**)
Caractérisation des échanges avec l'analyse SIG à partir de données de modèle dégradées (rive gauche et rive droite).
Colonne 5 (**SIG-saf**)
Caractérisation des échanges avec l'analyse SIG à partir de données de modèle dégradées (agrégation des résultats par maille du modèle Marthe).
Colonne 6 (**SIG-mod**)
Caractérisation des échanges avec l'analyse SIG à partir de données issues du modèle Marthe (rive gauche et rive droite).
Colonne 7 (**SIG-mod**)
Caractérisation des échanges avec l'analyse SIG à partir de données issues du modèle Marthe (agrégation des résultats par maille du modèle Marthe).
Colonne 8 (**Diagnostic synthétique**)
Colonne 9 (Qualité des diagnostics)
Code couleur en cohérence avec le tableau 7 p. 36.

Générale
1 seul bras de rivière
Pas de mesures ou de données

Macrophytes
Non indéterminée
Probabilité apport nappe nulle
Probabilité apport nappe faible
Probabilité apport nappe faible à moyenne
Probabilité apport nappe moyenne
Probabilité apport nappeforte

Marthe et SIG
Rivière vers nappe
Nappe vers rivière

Diagnostic synthétique	
??	Forte incertitude
	Rivière vers nappe
	Nappe vers rivière

Qualité du diagnostic
Bonne évaluation
Incertain
Douteux

Du point de vue du sens des échanges, on observe une bonne convergence des résultats issus de l'analyse SIG et du modèle Marthe. Ceci n'est pas étonnant car l'analyse SIG a été réalisée à partir d'une piézométrie modélisée. Toutefois, ceci montre que l'analyse SIG est fiable pour diagnostiquer le sens des échanges à partir d'une piézométrie donnée. Cela dit, le test avec des données dégradées montre que la méthode est sensible à la densité des piézomètres suivis.

Exemple de diagnostic synthétique sur le Rhône à Donzère-Mondragon

Les échanges nappe/rivière sur le secteur de Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche sont illustrés (figure 11) et expliqués page 40.

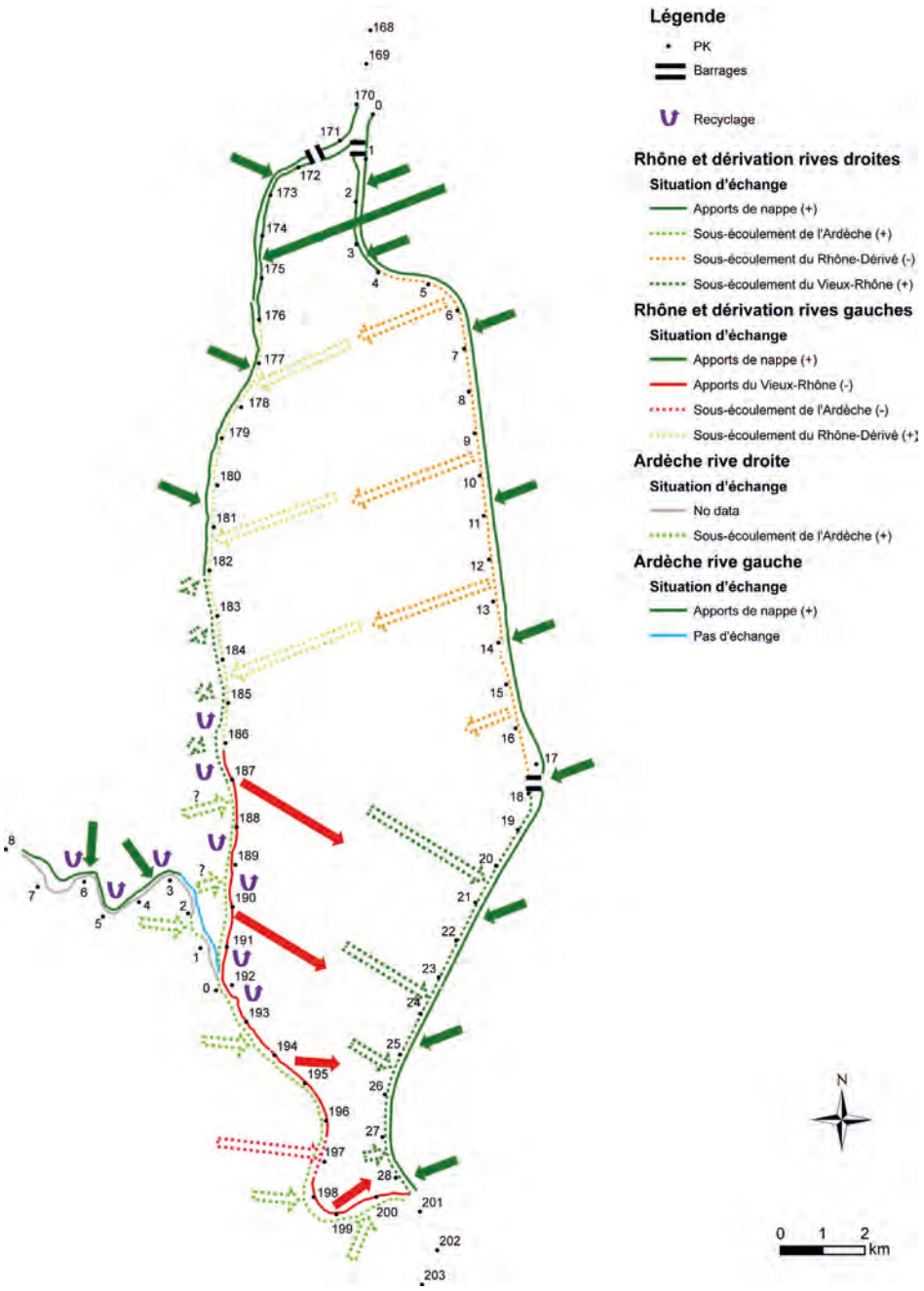


Figure 11. *Carte de synthèse des échanges nappes/Rhône à Donzère-Mondragon.*

Les échanges nappe/rivière sont caractérisés de la façon suivante :

- Ardèche rive droite. PK 8 à 3, apports de nappe à l'Ardèche et recyclage PK 6 à 3 ; PK 3 à 0, pas d'échange (diagnostic entaché d'incertitude) ;
- Ardèche rive gauche. PK 2 à 1, sous-écoulement de l'Ardèche à travers la plaine vers l'Ardèche ;
- Vieux-Rhône rive droite. PK 170 à 182, apport de nappe aux Vieux-Rhône ; PK 182 à 187, sous-écoulement du Vieux-Rhône (diagnostic entaché d'incertitude) et recyclage PK 186 à 189 ; PK 187 à 201, sous-écoulement de l'Ardèche à travers la plaine vers le Vieux-Rhône ;
- Vieux-Rhône rive gauche. PK 170 à 176, apports de nappe du versant drômois (passant sous le canal de dérivation/amenée) au Vieux-Rhône ; PK 176 à 186, sous-écoulement du Rhône (canal de dérivation/amenée) à travers la plaine vers le Vieux-Rhône ; PK 186 à 201, apports du Vieux-Rhône à la nappe ; PK 189 à 193, recyclage ; PK 197, apports possible du sous-écoulement de l'Ardèche (passant sous le Vieux-Rhône) à la nappe ;
- Canal de dérivation rive gauche. PK 0 à 4, apports de nappe du versant drômois (passant sous le canal de dérivation/amenée) au contre-canal ; PK 4 à 17, apports du contre-canal à la nappe ; PK 17 à 28, apports de la nappe au canal de dérivation/fuite ;
- Canal de dérivation rive droite. PK 0 à 28, apports de nappe au contre-canal.

5.5. Pour aller plus loin

Guide Nappes/Rhône : p. 65 (Chapitre 5) et p. 109 (Annexe 6)

Rapport final Naprom : p. 27 (3. Approche multi-site), p. 52 (4. Résultats), p. 166 (5.4.3. Protocole de comparaison des métriques)

PARTIE C

Mettre en œuvre les outils

Introduction Organisation et contenu des fiches outils 42

Fiche n°1 Analyse géomatique des niveaux d'eau 47

Fiche n°2 Modèles hydrodynamiques distribués à base physique .. 53

Fiche n°3 Modèles hydrothermiques à base physique (code Metis) et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (Molonari) 65

Fiche n°4 Image thermique infrarouge (IRT) 71

Fiche n°5 Géochimie 77

Fiche n°6 Végétation aquatique 83

Fiche n°7 Invertébrés souterrains 89

Fiche n°8 Autres méthodes, autres modèles 95

Introduction : organisation et contenu des fiches outils

Questions posées

- Quels sont les outils présentés dans le guide pour caractériser les échanges nappe/rivière ?
- Comment est organisée la description de ces outils dans le guide ?

Synoptique

- Présenter de manière rapide les méthodes décrites dans les fiches outils
- Présenter le contenu et l'organisation des fiches outils
- Connaître la symbolique du bandeau synthétique en en-tête de chaque fiche outils

Liens et renvois

Partie A. Définir et décrire pour bien choisir les outils
Partie B. Choisir les outils et interpréter

Cette dernière partie propose une série de fiches décrivant une sélection d'outils disponibles pour caractériser les échanges nappe/rivière. Ces fiches sont courtes et synthétiques pour faciliter le repérage de l'information. Elles sont toutes organisées sur le même modèle.

1. Fiches outils proposées

Le guide propose huit fiches outils. Les sept premières fiches présentent :

- des méthodes qui ont été développées dans le projet échanges Nappes/Rhône (analyse géomatique des niveaux d'eau, invertébrés souterrains, végétation aquatique, géochimie) et déjà présentées de manière plus complètes dans le guide méthodologique Nappes/Rhône qui a clôturé ce projet (Paran *et al.* 2007, 2008, 2010, 2012 et 2015) ;
- des méthodes utilisées et présentées dans le rapport final Naprom (modélisation hydrogéologique, modélisation hydrothermique, dispositif Molonari) ou développées en parallèle (image thermique infrarouge).

Ces fiches peuvent être classées en deux catégories.

Celles présentant des méthodes quantitatives et qui permettent d'estimer des débits d'échanges :

- fiche outils n°1 - Analyse géomatique des niveaux d'eau ;
- fiche outils n°2 - Modèles hydrodynamiques distribués à base physique (régionaux) ;
- fiche outils n°3 - Modèles hydrothermiques à base physique (locaux) et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau (très local) ;
- fiche outils n°5 - Géochimie.

Celles présentant des méthodes semi-quantitatives ou qualitatives et qui permettent principalement d'identifier le sens et la localisation des échanges :

- fiche outils n°4 - Image thermique infrarouge (IRT, local à régional) ;
- fiche outils n°6 - Végétation aquatique ;
- fiche outils n°7 - Invertébrés souterrains.

La dernière fiche (fiche outils n°8 - Autres méthodes, autres modèles) donne un aperçu rapide d'autres méthodes pouvant être utilisées pour caractériser les échanges nappe/rivière (par ex. méthodes géophysiques, fibre optique, autres types de modèles, analyse du signal, jaugeages différentiels, traçages, reconnaissance physique de terrain…).

2. Organisation et contenu des fiches outils

Les sept premières fiches du guide sont organisées de la même façon. Elles présentent, de manière synthétique, l'essentiel de l'information, pour comprendre le principe de la méthode décrite, son domaine d'application et avoir une première idée des éléments à connaître pour sa mise en œuvre.

Un bandeau synthétique

En début de fiche, un bandeau, accompagné d'une description rapide (contexte hydrogéologique, types d'échanges pris en compte, éléments importants à connaître) permet de considérer rapidement ce qu'il est important de savoir sur chacune des méthodes. Le bandeau repose sur une symbolique (tableau 8 page suivante) qui répond à plusieurs questions concernant les méthodes :

- à quel contexte hydrogéologique sont-elles adaptées (par ex. nappes alluviales, zone hyporhéique, milieux carbonatés, karst…) ? ;

- à quelles échelles d'espace et de temps fournissent-elles un diagnostic pertinent ?

  L'échelle d'espace considère :

  - la nature des données nécessaires (par ex. ponctuelles, transects, mailles),
  - le seuil d'interprétation ou la plus petite unité d'espace à laquelle la méthode peut fournir un diagnostic pertinent,
  - l'aire d'interprétation ou la surface maximale sur laquelle il est pertinent d'appliquer la méthode.

  L'échelle temporelle précise à quel pas de temps le diagnostic (résultats) et l'acquisition de données est possible et/ou pertinent :

  - quelle est la quantité de données et d'informations nécessaires à l'application des méthodes ? ;
  - quels sont les coûts financiers et humains à mobiliser pour mettre en œuvre les méthodes, tant sur le terrain qu'au laboratoire ?

Tableau 8. *Symboles utilisés dans le bandeau synthétique de description de chacune des méthodes.*

Contexte hydrogéologique	Échelle d'espace			Échelle de temps		Informations nécessaires	Couts (€)		Couts (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	Ponctuelle	<100m	Locale	Instantané	Instantané	Faible	Faible		Faible	
Zone hyporhéique	Transects	0,1 à 2km	Tronçon de cours d'eau	Saisonnier	Horaire voire infra-horaire	Moyen	Moyen		Moyen	
Aquifères multi-couches	Mailles	Maille	Masse d'eau	Transitoire ou forte fréquence	Mensuel	Fort	Fort		Fort	
Milieux carbonatés	Mailles variables			Intégration annuelle		Important	Important		Important	

Un descriptif

Suite à ces informations synthétiques, l'information présentée dans les fiches est structurée en quatre grandes parties.

La première partie est principalement méthodologique et présente :

- une description du principe de caractérisation des échanges accompagnée d'au moins une figure pour mieux expliciter un tel principe ou les concepts utilisés ;
- une présentation du protocole de mesure des échanges (éléments à échantillonner et à mesurer ; techniques d'échantillonnage et de mesure) accompagnée d'un encart listant les étapes principales (encarts : L'essentiel du protocole) et d'un encart listant le matériel nécessaire (encarts : Dispositif/matériel) ;
- des éléments d'aide pour l'interprétation des données et des résultats accompagnés d'un encart explicitant les formules de calcul (encarts : Formule de calcul).

La deuxième partie de la fiche propose une série d'exemples :

- de valeurs guides et de valeurs repères pour fixer les idées par rapport aux gammes de valeurs que peuvent prendre des paramètres importants pour la méthode considérée ;
- de résultats d'application de la méthode, généralement tirés du projet Naprom accompagnés d'une figure pour les illustrer. Il s'agit souvent d'une carte spatialisant les résultats.

La troisième partie de la fiche liste une série d'informations importantes à connaître :

- points forts de la méthode ;
- informations et données nécessaires à la mise en œuvre de la méthode ;
- points faibles, conditions d'utilisation et prérequis ;
- méthodes complémentaires à utiliser en parallèle de la méthode pour obtenir des résultats plus consistants et pallier les points faibles.

La quatrième et dernière partie de la fiche propose pour finir :

- des références bibliographiques pour aller plus loin dans la découverte ou la connaissance de la méthode ;
- des personnes ressources à contacter au besoin.

3. Pour aller plus loin

Références bibliographiques

Paran F., Arthaud F., Baillet H., Bornette G., Creuzé des Châtelliers M., Déchomets R., Dole-Olivier M.J., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillot D., Jezequel C., Lafont M., Lalot E., Marmonier P., Novel M., Piscart C., Puijalon S., Rodriguez C., Simon L., Travi Y., Winiarski T. (2007, 2008, 2010, 2012 et 2015) *Évaluation des échanges nappe/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface. Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels.* Rapports finaux et fiches de synthèse phases 1, 2, 3, 4 et 5. Action recherche valorisation Zabr/AE-RMC.

Voir aussi

Rapport final Naprom : p. 5 (2. Approche multi-métrique) et p. 158 (5.3. Approche multi-métrique)

Guide Nappes/Rhône : p. 31 (chapitre 2) + p. 79 à 106 annexes (1, 2, 3 et 4) et p. 149 (Personnes ressources et compétences)

Exemples de résultats :

- guide Nappes/Rhône : p. 65 (chapitre 5) et p. 109 (annexe 6) ;
- rapport final Naprom: p. 27 (3. Approche multi-site) et p. 52 (4. Résultats).

Analyse géomatique des niveaux d'eau

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Couts (€)		Couts (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	Ponctuelle	0,5 à 1km	Tronçon de cours d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Fort	Fort	Moyen	Moyen

Description rapide

Cette méthode consiste à exploiter les observations ponctuelles des niveaux d'eau dans les nappes et dans les rivières pour en déduire les sens des échanges nappe/rivière et estimer les flux d'eau échangés. Cette méthode est adaptée à la caractérisation des échanges nappe/rivière dans un contexte hydrogéologique de nappe alluviale libre superficielle, ou aquifère de versant (milieu poreux) dont la connexion avec le cours d'eau est avérée. La méthode est plus rapide à mettre en œuvre qu'un modèle hydrogéologique. Elle permet de travailler sur des zones d'étude relativement étendues (entités hydrogéologiques) et sur lesquelles on dispose d'un minimum de données (suivi des niveaux d'eau de la nappe et de la rivière en plusieurs points). Elle est capable de caractériser les échanges pour chaque rive d'un cours d'eau (linéaire de berge) ainsi que l'absence d'échange. La qualité de la caractérisation des échanges dépend de la densité spatiale et temporelle des données disponibles et de la vérification de certaines hypothèses (échanges latéraux dominants). Cette méthode peut être utilisée pour produire un pré-diagnostic rapide, avant l'utilisation des autres méthodes présentées dans ce guide.

Principe de caractérisation des échanges

Le principe de la méthode est de caractériser les écoulements de la nappe à proximité des berges de la rivière en faisant l'hypothèse qu'ils représentent l'essentiel des échanges nappe/rivière. On suppose que le niveau de la nappe le long des berges est égal au niveau d'eau dans la rivière (pas de perte de charge) et que les écoulements en nappe sont principalement horizontaux. On considère que les échanges se font à travers une surface d'échange en plan vertical dont l'aire est évaluée avec le linéaire de berge considéré et la hauteur d'eau en rivière. On sait que les flux d'eau dans la nappe sont proportionnels à la pente de sa surface libre (application de la loi de Darcy ; encart : Formule de calcul). Les flux entrants ou sortants de la rivière sont donc estimés à partir de la pente entre la surface libre de la nappe à proximité de la berge et le niveau de la rivière (figure 12 page suivante). La perméabilité des alluvions influence la quantité d'eau échangée.

Formule de calcul

Loi de Darcy

$$Q = K.A.\frac{dH}{dL}$$

Q : débit en m^3/s

A : section d'écoulement (surface d'infiltration ou d'échange) en m^2

K : perméabilité en m/s

$\frac{dH}{dL}$: gradient hydraulique [pente (i)] de charge (dH : variation du niveau piézométrique entre 2 puits ; dL : distance entre 2 puits).

Cette formule peut être utilisée pour calculer un flux (Q) entre la nappe et la rivière.

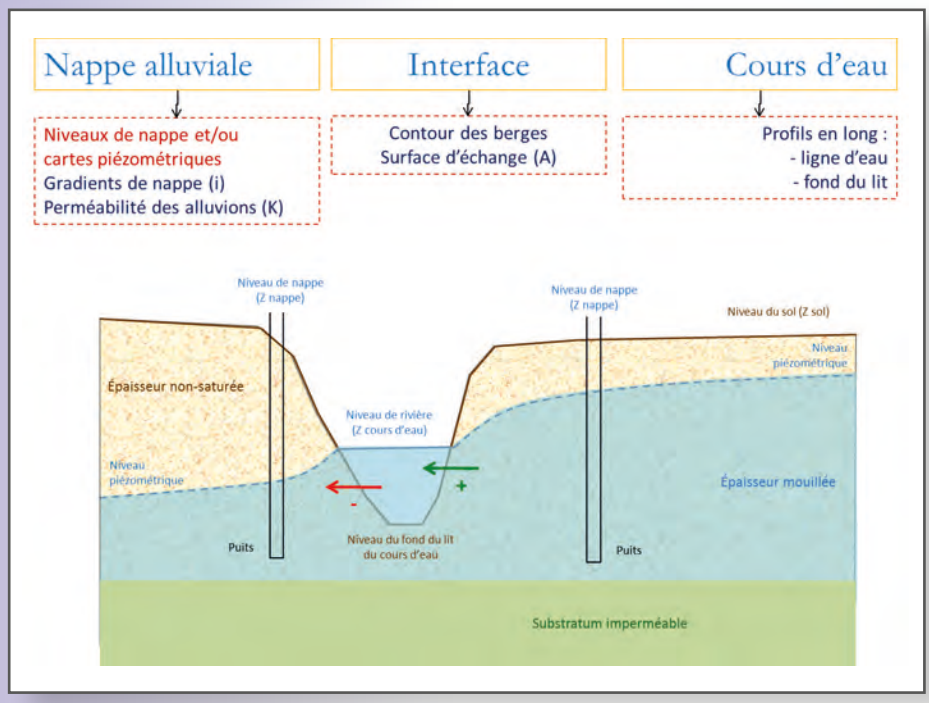


Figure 12. *Principe de caractérisation des échanges avec l'analyse géomatique.*

Il peut y avoir trois configurations :

- ✔ échanges de la nappe vers la rivière (cote de la nappe supérieure à celle du cours d'eau) ;
- ✔ de la rivière vers la nappe (cote du cours d'eau supérieure à celle de la nappe) ;
- ✔ pas d'échange ou équilibre (cotes de la nappe et du cours d'eau similaires ou berge très colmatée).

Pour les aquifères alluviaux importants, on dispose en général de données hydrauliques détaillées sous forme de cartes piézométriques, souvent en basses eaux, moyennes eaux, hautes eaux, ce qui permet de connaître la saisonnalité des interactions nappe/rivière.

Il existe aussi des écoulements de nappe sous les rivières et parfois des nappes déconnectées des rivières. Ces configurations ne sont pas diagnosticables avec la méthode géomatique.

Protocole de mesure des échanges

Partant d'une carte piézométrique, digitalisée ou construite par interpolation, et de données de hauteurs d'eau synchrones en rivière, un maillage Tin (*Triangulated Irregular Network*) permet de restituer le modelé 3D de la surface de la nappe (figure 13). Un Tin contient les informations suivantes :

- ✔ « slope » ou pente (en %), c'est-à-dire le gradient (i) ;
- ✔ « aspect » ou direction de l'écoulement (en degré).

La rive du cours d'eau constitue une limite de la nappe. La surface d'échange, qui correspond par hypothèse à un plan vertical le long des berges, est évaluée à partir de

L'essentiel du protocole

1. Recherche des données existantes, prises de contact et sollicitation des détenteurs d'information
2. Repérage des puits et piézomètres et coordonnées des propriétaires ou des gestionnaires
3. Mesure des niveaux de nappes et nivellement/géolocalisation des puits avec un GPS à précision centimétrique
4. Mesure des niveaux d'eau des cours d'eau (ligne d'eau avec un GPS à précision centimétrique)
5. Digitalisation ou construction des cartes piézométriques par interpolation et digitalisation des linéaires de berge
7. Calcul de l'angle d'écoulement du cours d'eau et calcul de l'angle d'écoulement de la nappe et du gradient hydraulique (Tin)
9. Calcul de l'angle d'échange entre la nappe et le cours d'eau
10. Calcul du débit d'eau échangé avec la loi de Darcy et de l'incertitude

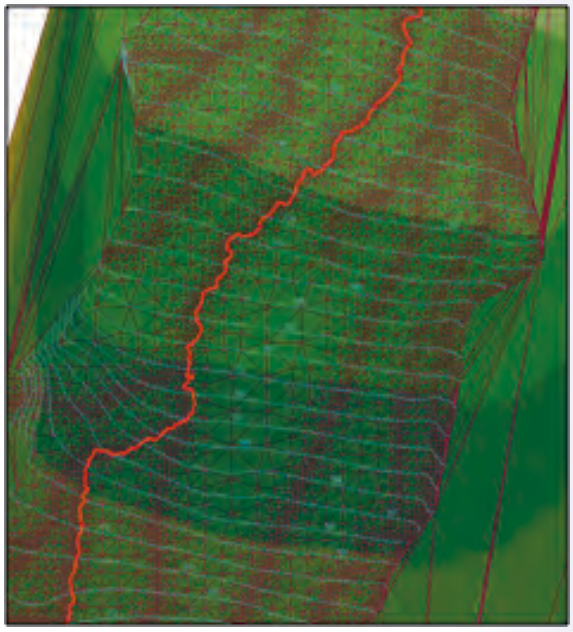


Figure 13. *Tin (Réseau de triangles irréguliers) représentant le modelé du toit de la nappe alluviale de la plaine du Rhin. Ce Tin est construit à partir des niveaux de nappe issus d'un modèle maillé (Plate-forme Eau-Dyssée).*

données bathymétriques et de données de hauteur d'eau. Ces données peuvent être acquises lors de la réalisation d'un profil en long de la rivière en canoë avec un GPS embarqué et une sonde bathymétrique. La perméabilité de l'aquifère peut être estimée à l'aide de valeurs génériques issues de la littérature ou par essai de pompage.

Au final, l'analyse géomatique des niveaux d'eau diagnostique le sens des échanges et quantifie les volumes échangés sur le linéaire de berge étudié en utilisant la loi de Darcy (encart : Formule de calcul). L'approche géomatique (encarts : L'essentiel du protocole et Dispositifs/matériel) montre l'applicabilité et la simplicité de cette loi pour calculer des débits d'échanges nappe/rivière sur les secteurs étudiés.

Dispositifs / matériel

Matériel de mesure
Sonde piézométrique
Sonde bathymétrique
GPS + antenne (Photo 1 et Photo 2)

L'acquisition de chroniques de données nécessite plus de matériel :
- matériel d'enregistrement en continu ;
- sondes enregistreuses ;
- socles des sondes ;
- système de fixation des sondes ;
- ordinateur de terrain.

Logiciels
SIG
GPS

Prise de notes
Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier, gomme

Orientation et informations
Cartes IGN 1/25 000°
Cartes géologiques BRGM 1/50 000°
Boussole
Marteau de géologue
Rapports et études

Outils et petit matériel
Trousse de secours
Caisse à outils

Navigation
Bateau gonflable (Photo 1) + rames
Gonfleur électrique et à pied
Gilets de sauvetage + casques
Moteur électrique + batterie + support
Socle pour GPS et antenne
Bidons et sacs étanches

© J. Jolivet

Photo 1. *GPS monté sur canoë.*

© H. Chapuis

Photo 2. *Mesure GPS sur trépied.*

Interprétation des données et des résultats

Les données nécessaires et essentielles sont de nature ponctuelle du point de vue de leur échelle spatiale (niveaux d'eau en rivière et en nappe). Le niveau de représentativité du diagnostic des échanges nappe/rivière est de l'ordre de 0,5 à 1 km. L'interprétation peut être étendue à l'échelle de l'entité hydrogéologique. Du point de vue temporel, la méthode propose un instantané des échanges. Il est possible d'étudier les variations saisonnières par comparaison de différents instantanés à des dates différentes (si les données sont disponibles).

Si la caractérisation du sens des échanges peut être assez précise lorsque la densité de points de mesure est importante, la quantification des échanges reste soumise à des hypothèses fortes ; en effet, l'écoulement des nappes est rarement horizontal à proximité de la rivière car une partie des échanges se fait verticalement (sous le lit de la rivière). De plus il est très difficile de connaître la perméabilité de l'aquifère concerné (forte variabilité spatiale, lit et berge colmatés). Les estimations des flux échangés donnent des ordres de grandeur, mais gagnent à être précisées par d'autres méthodes comme le dispositif Molonari et la modélisation associée (fiche outils n°3).

Valeurs guides et repères

- Profondeur de nappe : en général moins de 5 m
- Variation de niveau de nappe : moins de 0,5 m (faible), 0,5 à 2 m (moyenne), supérieure à 2 m (forte)
- Perméabilité des alluvions (ou de l'aquifère incisé) : 10^{-2} à 10^{-3} m/s (forte), 10^{-3} à 10^{-4} m/s (moyenne), inférieure à 10^{-4} m/s (faible)

Résultats : exemple sur un méandre de la Sèvre-Niortaise

La figure 14 présente les résultats spatialisés des échanges nappes/Sèvre-Niortaise caractérisés à partir des données issues du modèle Marthe (BRGM) pour juin 2007. Les échanges ont été caractérisés à partir des valeurs contenues dans chaque maille du modèle. Cette figure présente différents éléments :

- un découpage du linéaire du cours d'eau en points kilométriques (PK : triangles noirs). PK 12 à 21 soit 9 km (le diagnostic représenté en amont et en aval de ces PK n'est pas représentatif car situé en dehors de la zone où le modèle est valide) ;
- le diagnostic du sens des échanges à partir de la méthode SIG. En vert foncé les flux d'eau de la nappe vers la rivière et en rouge les flux d'eau de la rivière vers la nappe. On n'observe pas de tronçons sur lesquels aucun échange n'est diagnostiqué ;
- la zone des alluvions est représentée en jaune, le cours de la Sèvre-Niortaise (qui s'écoule d'est en ouest) en bleu et les puits en violet.

La figure 14 montre la sectorisation spatiale des échanges nappe/rivière dans un contexte de fort méandrage, de bande alluviale de faible largeur et de fort impact des champs captant :

- à l'amont (PK 12 à 13,75) la nappe alimente la rivière aussi bien en rive droite qu'en rive gauche ;
- dans la zone centrale (PK 13,75 à 18,25), dans le méandre, c'est au contraire la rivière qui alimente la nappe. Cet effet est lié en partie à l'influence des captages ;
- à l'aval, (PK 18,25 à 21), c'est de nouveau la rivière qui draine l'aquifère.

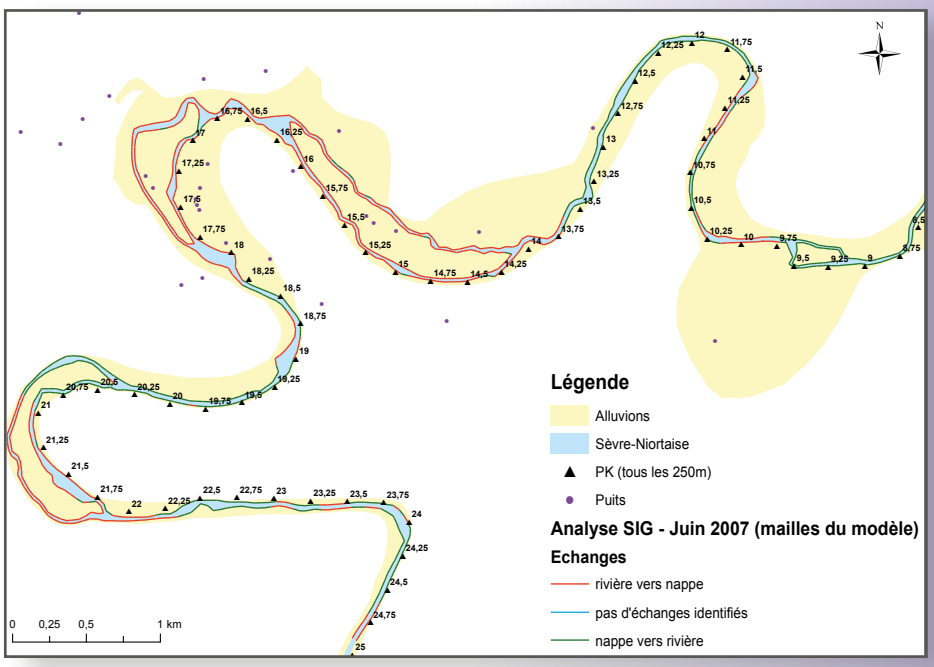


Figure 14. *Caractérisation des échanges nappe/Sèvre-Niortaise par analyse géomatique des niveaux d'eau. L'écoulement de la rivière se fait d'est en ouest.*

Points forts

- Relativement rapide si l'on travaille à partir de données existantes (tableau 9) et simple (souplesse d'utilisation), reproductible
- Peu gourmand en données (*a minima* hauteurs d'eau rivière et nappe)
- Diagnostic de territoire relativement étendus (20 km)
- Bilans à différentes échelles (agrégation spatiale du kilomètre à l'entité hydro-géologique)
- Permet une estimation des débits d'échange (cette estimation reste toutefois indicative par rapport à une quantification effectuée avec un modèle)

Tableau 9. *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour l'analyse géomatique des niveaux d'eau.*

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
TERRAIN		
Reconnaissance	2 jours	2
Nivellement des puits (GPS)	10 puits/jour	2
Relevé de la ligne d'eau d'un cours d'eau (GPS)	15 km de rivière /jour	4
Relevé bathymétrique de la profondeur d'un cours d'eau	6 sections de rivière/jour	3
Relevé piézométrique	25 puits/jour	2
Jaugeage (mesure de débit)	4 sections de rivière/jour	4
TRAITEMENT SIG		
Préparation des données pour l'analyse géomatique	10 jours	1
Analyse géomatique (traitement SIG)	5 jours	1
Calcul des débits	2 jours	1

Informations et données nécessaires

- Niveau (hauteur d'eau) de nappe et de rivière (h : cote ngf)
- Carte piézométrique (idéalement hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux)
- Perméabilités au droit des berges
- Section d'écoulement

Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- Utilisable uniquement pour les nappes libres et superficielles en milieux alluviaux
- Fortement dépendant de l'existence et de la précision des données de départ
- Fortement dépendant du traitement de la piézométrie par un Tin ; des traitements géostatistiques (par ex. krigeage) pourraient améliorer les interpolations
- Ne tient pas réellement compte de l'état de colmatage des berges
- Diagnostic uniquement des transferts horizontaux
- Coûts matériel et logiciel (ces coûts peuvent être réduits si on utilise des données existantes et des logiciels libres)

Méthodes complémentaires

- Géochimie, notamment isotopes (fiche outils n°5)
- Végétation aquatique (fiche outils n° 6)
- Invertébrés souterrains (fiche outils n°7)
- Dispositifs Molonari ou modèle hydrogéologique pour préciser la quantification des échanges (fiches outils n°2 et 3)

Références et liens pour en savoir plus

Lalot E. (2014) *Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières – Application au Rhône.* Thèse de Doctorat. ENSM-SE.

Graillot D., Paran F., Bornette G., Marmonier P., Piscart C., Cadilhac L. (2014) *Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges.* SpringerPlus.2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.

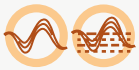
Paran F., Dechomets R., Graillot D. (2008) *Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale.* Géomatique expert, 2008 (64), p. 73-79.

Personnes ressources

Didier Graillot (Hydrogéologue) : UMR CNRS 5600 EVS, École des Mines de Saint-Etienne, GéoSciences et Environnement (GSE), didier.graillot@mines-stetienne.fr

Frédéric Paran (Analyse géomatique) : UMR CNRS 5600 EVS, École des Mines de Saint-Etienne, GéoSciences et Environnement (GSE), frederic.paran@mines-stetienne.fr

Modèles hydrodynamiques distribués à base physique

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Couts (€)		Couts (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/rivière. 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/rivière 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/rivière 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)].

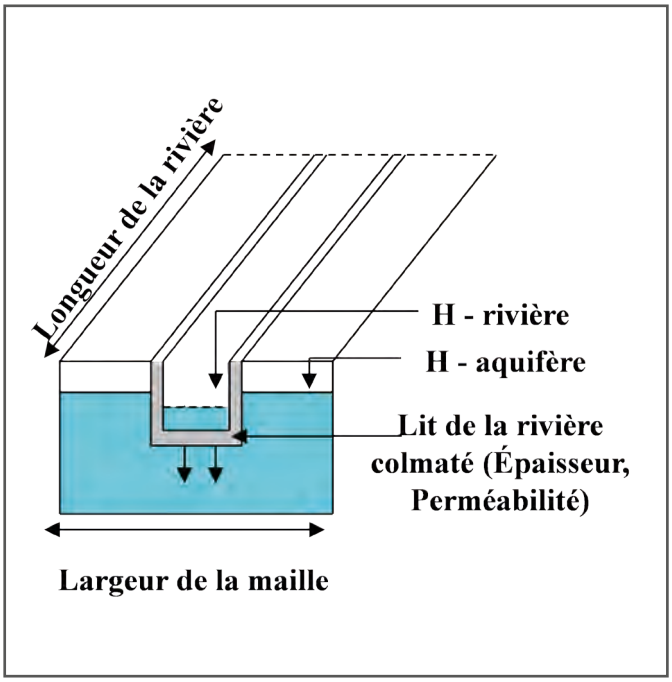


Figure 15. *Géométrie d'un tronçon de rivière (Chatelier et Thiéry, 2011), l'ensemble du lit est ici considéré comme une seule entité semi-perméable.*

Formules de calcul

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

$SURF_{Éch} = L \cdot [l + 2 \cdot (H_R - H_f)]$ **(1)**

$$Q_{Percol} = SURF_{Éch} \cdot \frac{K_R \cdot (H_R - H_f)}{Épais}$$ **(2)**

$$Q_{Éch} = SURF_{Éch} \cdot \frac{K_R \cdot (H_R - H_N)}{Épais}$$ **(3)**

$$Q_{Débo} = (SURF_{Mail} - L \cdot l) \cdot \frac{K_R \cdot (H_N - H_{Topo})}{Épais}$$ **(4)**

Avec :

- L = Longueur du tronçon (m)
- l = 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_f = Cote du lit de la rivière (m)
- H_{Topo}, = Cote de la surface topographique (m)
- $SURF_{Mail}$ = Surface de la maille associée du modèle de nappe (m^2)
- $SURF_{Éch}$ = Surface d'échange (m^2)
- $Q_{Éch}$ = Débit d'échange de la rivière vers la nappe (m^3/s)
- Q_{Percol} = Débit de percolation de la rivière vers la nappe décrochée (m^3/s)
- $Q_{Débo}$ = Débit complémentaire de débordement de la nappe vers la rivière (m^3/s)

Autres formules (variante de l'équation 3)

$Q =$ $C.(H_R - H_N)$ avec C coefficient d'échange le coefficient d'échange nappe/rivière (en m^2/s)

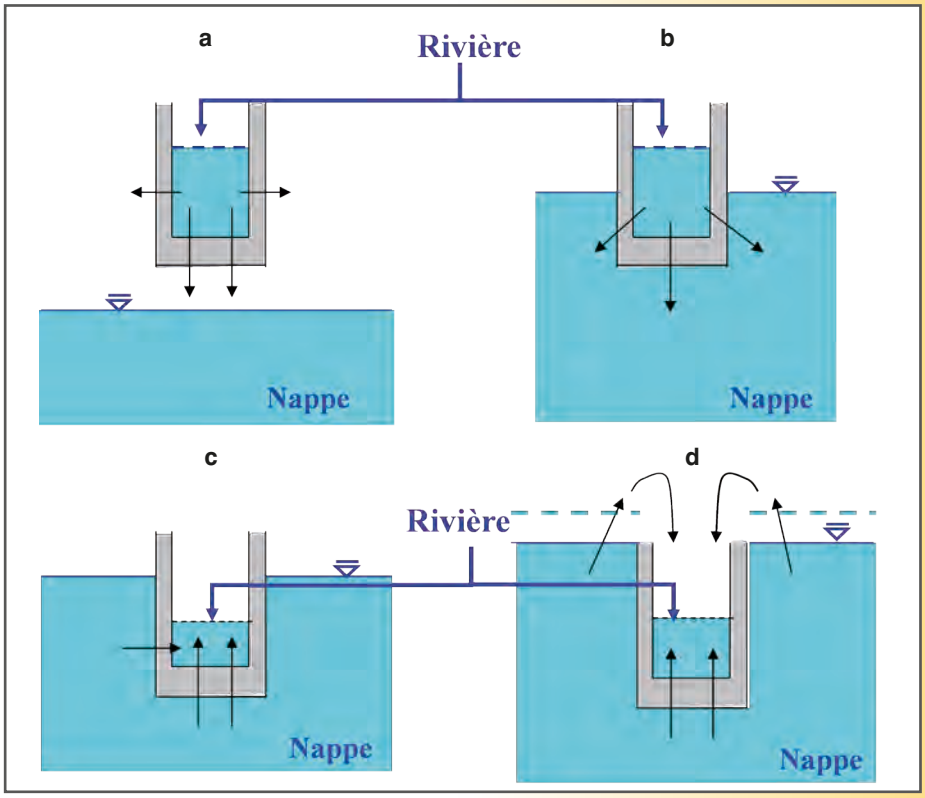


Figure 16. *Différentes configurations d'échanges nappe/rivière (Chatelier et Thiéry, 2011).* **a** *: débit de percolation QPercol ;* **b** *et* **c** *: débit d'échanges QEch ;* **d** *: débit de débordement QDébo.*

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. Barthelemy et Seguin, 2016).

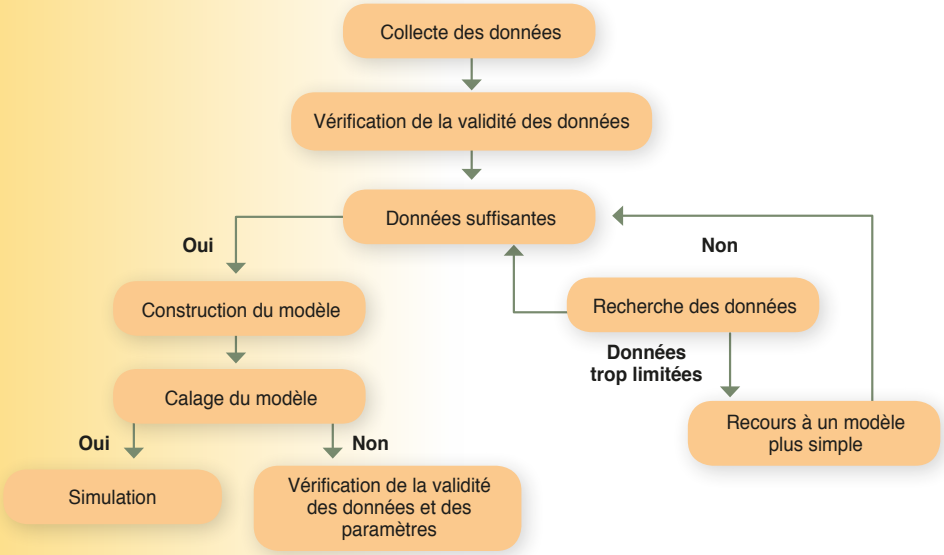


Figure 17. *Les étapes essentielles de la modélisation.*

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)

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

** 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 (Barthélémy 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/rivière utilisé dans le modèle Marthe appliqué au bassin versant de la Sèvre-Niortaise et aux aquifères sous-jacents.

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'emmagasinement 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. *Gammes 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.

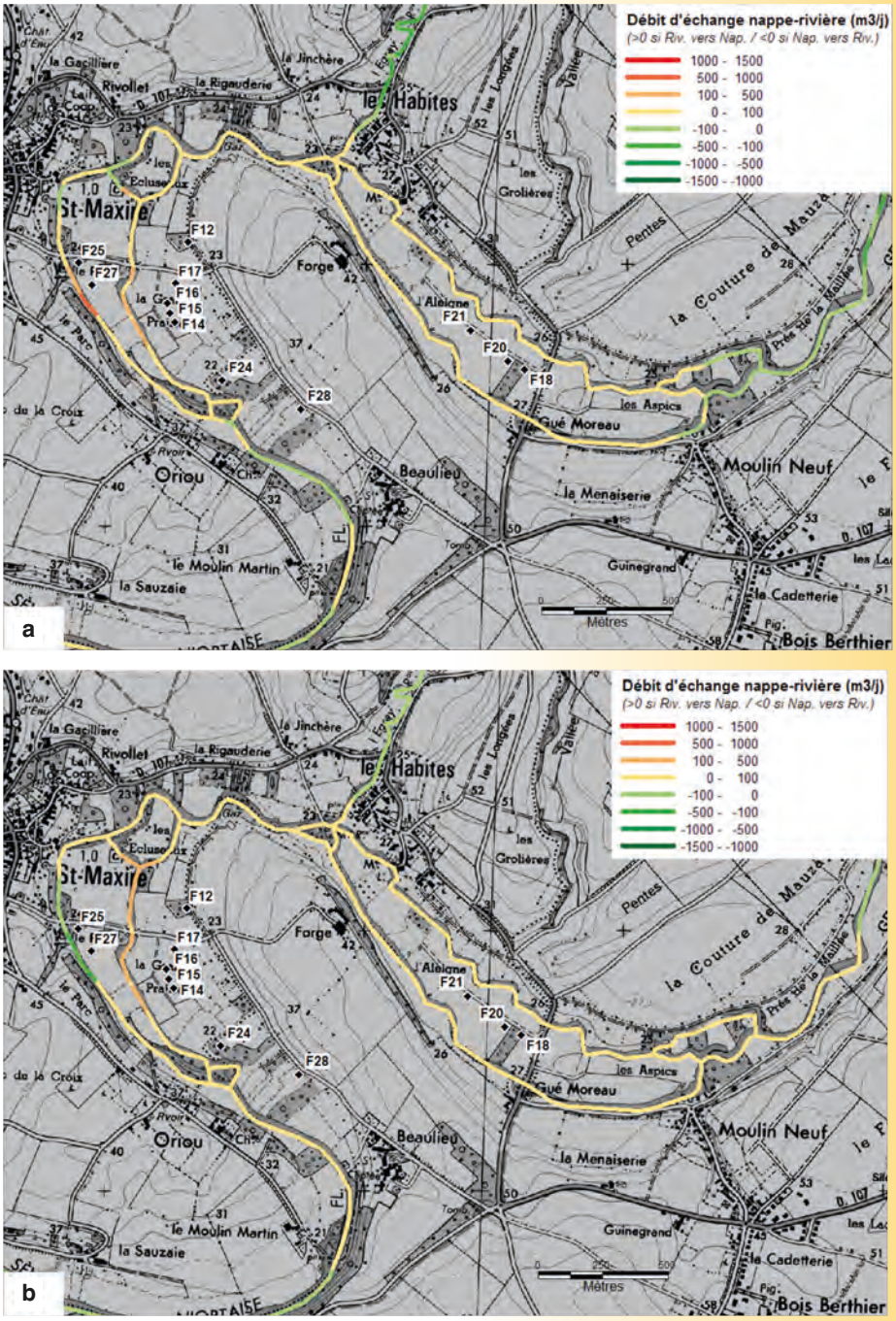


Figure 18. *Année 2006 - Débits d'échange simulés par tronçon ;* **a** *: hautes eaux et* **b** *: basses eaux. Un tronçon intègre l'ensemble du débit simulé au sein d'une maille de 100 m de côté (Chatelier, 2014).*

	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.

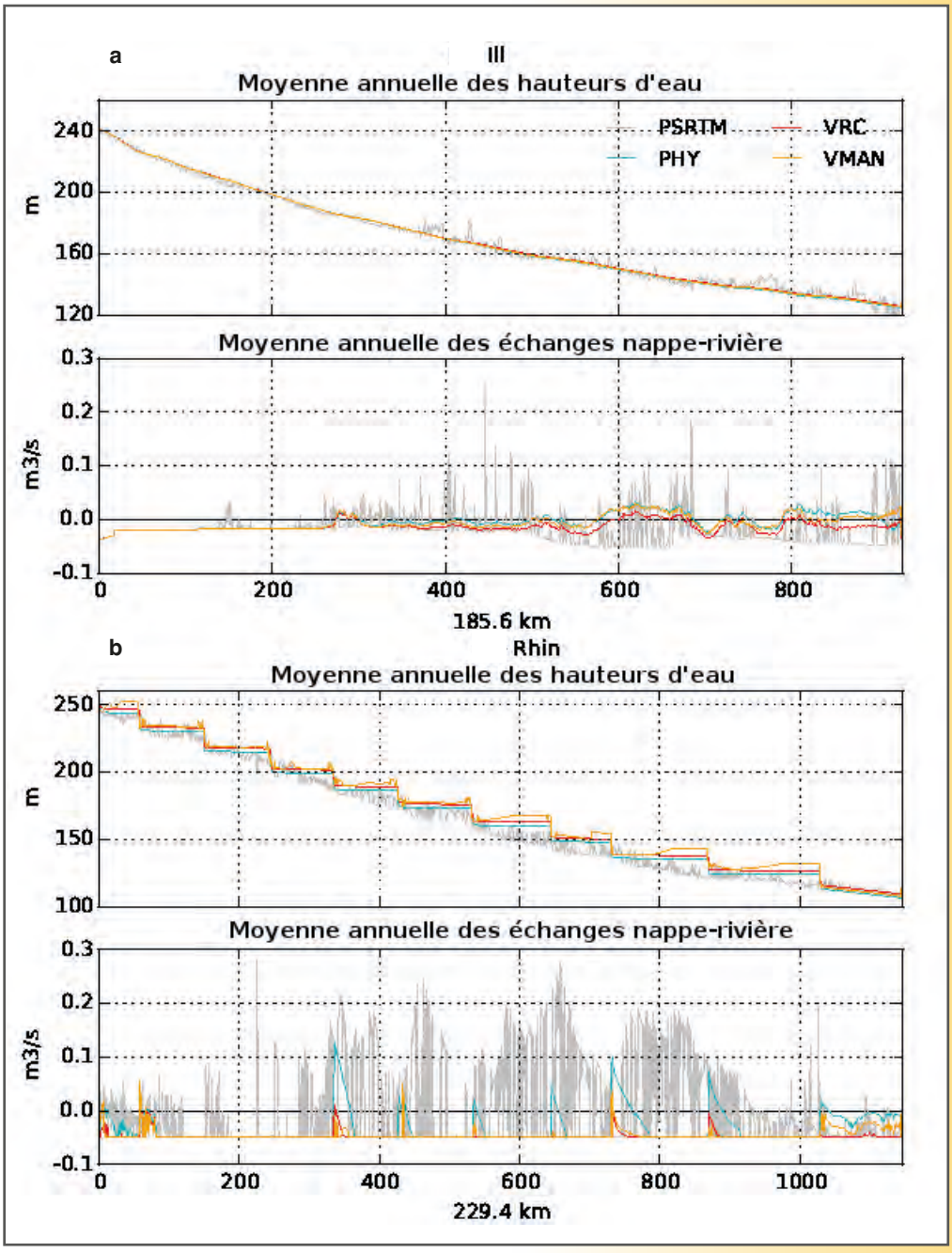


Figure 19. *Exemple de résultats obtenus le long du Rhin dans le fossé rhénan.*

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'emmagasinement 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 Resourses 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 (ENSMP), 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

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

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

Description rapide

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

Principe de caractérisation des échanges

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

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

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

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

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

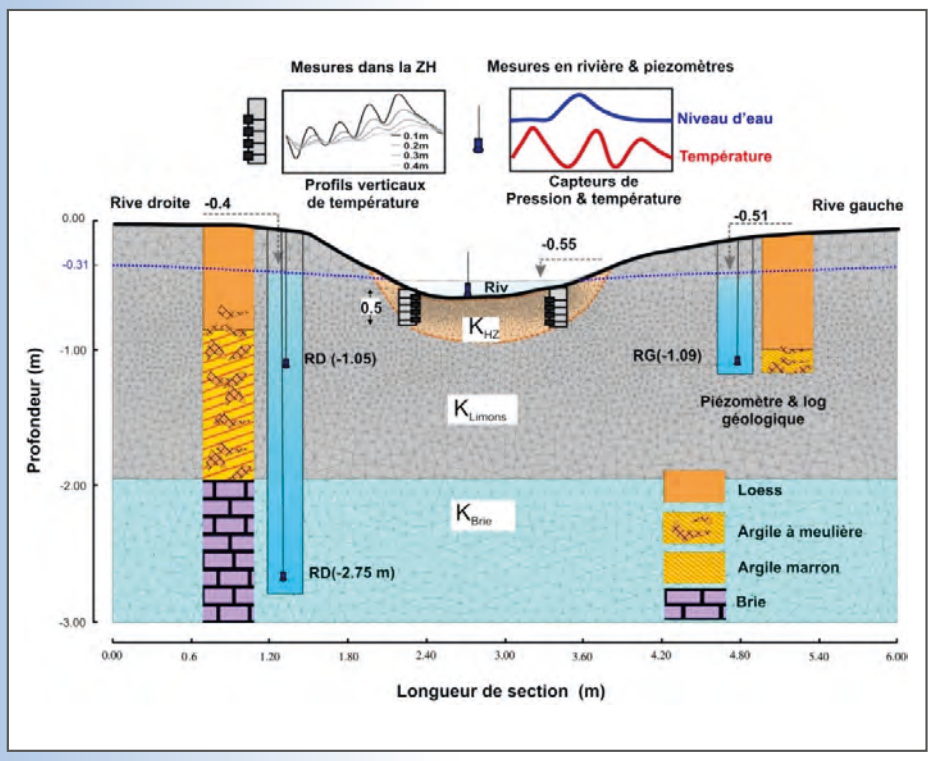


Figure 20. *Exemple de maillage du modèle hydro-thermique 2D vertical à 3 couches. Station Molonari (Mouhri* et al. *2013).*

© F. Paran

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

© N. Flipo

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

© F. Paran

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

L'essentiel du protocole

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

Dispositifs / matériel

Matériel

Carte géologique, sondage, tomographe (pour caractériser le contexte hydrogéologique et choisir la localisation des transects d'observation)
Piézomètres
Sondes enregistreuses de pressions
Sondes enregistreuses de température
Pluviomètre
Pompe

Logiciel

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

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier et gomme

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

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

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

Protocole de mesure des échanges

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

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

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

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

Interprétation des données et des résultats

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

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

Formules de calcul

Charge hydraulique

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

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

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

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

Où μ est la viscosité dynamique [$ML^{-1}T^{-1}$], K la perméabilité intrinsèque [L^{2}], t le temps [T], S_s coefficient d'emmagasinement [L^{-1}], ρ masse volumique du fluide [ML^{3}].

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

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

Où α est la dispersivité intrinsèque [L], Λ la conductivité thermique du milieu [$MLT^{3}\theta^{-1}$], γ la capacité calorifique du milieu [$ML^{-1}T^{2}\theta^{-1}$], γw la capacité calorifique de l'eau [$ML^{-1}T^{2}\theta^{-1}$], T la température [θ] et U la vitesse de Darcy [LT^{-1}].

Bilan des échanges nappe/rivière

Échanges nets et absolus (mm)

$$Qnet = \sum E + \sum I$$

$$Qabs = \sum |E| + \sum |I|$$

Bilans hydriques pour les tronçons amont (mm)

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

Bilans hydriques pour les tronçons avals (mm)

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

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

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

Valeurs guides et repères

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

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

Résultats : exemple du bassin de l'Orgeval

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

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

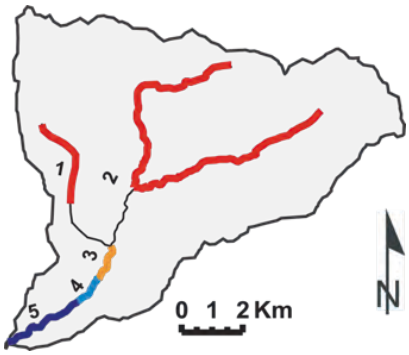


Figure 21. *Carte des échanges nappe/rivière à l'échelle du bassin des Avenelles, obtenue par extrapolation des estimations des débits échangés à l'échelle des sections Molonari : l'exfiltration est dominante sur les tronçons rouges et l'infiltration sur les tronçons bleus (Mouhri* et al. *2014a, b).*

Points forts

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

Informations et données nécessaires

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

Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

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

Méthodes complémentaires

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

© N. Flipo

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

© N. Flipo

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

Références et liens pour en savoir plus

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

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

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

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

Personnes ressources

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

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

Images thermiques infrarouges (IRT)

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Couts (€)		Couts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés	Ponctuelles	<100m	Tronçon de cours d'eau voire masse d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Fort

Formule de calcul

L'émittance énergétique totale émise par un objet (M en $W.m^{-2}$) est fonction de sa température et peut être exprimée par la loi de Stefan-Boltzman :

$$M = \sigma T^4$$

où T est la température absolue en Kelvin et σ la constante de Stefan-Boltzman qui est de $5{,}67.10^{-8}$ $W\ m^{-2}\ K^{-4}$.

Cette loi concerne les corps noirs, objets physiques idéaux qui absorbent toute l'énergie qu'ils reçoivent. Les matériaux réels se comportent différemment des corps noirs. Ils n'émettent qu'une fraction de l'énergie qu'émettrait un corps noir. Cette propriété physique s'appelle l'émissivité ε (ε = émittance énergétique d'un objet à une température donnée/ émittance énergétique d'un corps noir à cette même température)

En imagerie IRT, l'émittance énergétique (M) est mesurée sur une gamme de longueurs d'onde. Elle est utilisée, avec l'émissivité (ε) pour calculer la température de surface de l'objet étudié.

Description rapide

En mesurant le rayonnement dans le spectre électromagnétique de l'infrarouge thermique, la télédétection IRT permet d'obtenir une cartographie de la température de surface des cours d'eau (Torgersen *et al.* 2001) à différentes échelles spatiales (Handcock *et al.* 2006) selon les images utilisées (par ex. images satellites, images aéroportées). À large échelle, cette méthode peut, par exemple, permettre d'identifier les effets thermiques des affluents, des barrages et des centrales nucléaires sur un cours d'eau. À fine échelle, il est possible de distinguer les arrivées phréatiques associées aux bras morts et aux résurgences latérales (Dugdale *et al.* 2013). La télédétection IRT permet de mieux appréhender les structures spatiales de température sous réserve de contrastes thermiques suffisants.

Principe de caractérisation des échanges

Une image infrarouge thermique est un enregistrement de la température de surface. Contrairement aux photographies pour lesquelles la mesure s'effectue dans le spectre électromagnétique du visible, l'acquisition des images thermiques est réalisée dans l'infrarouge thermique (encart : Formule de calcul), souvent dans l'infrarouge moyen ou lointain (figure 22 page suivante). Le rayonnement IRT est mesuré par un capteur thermique à partir du sol ou embarqué par des vecteurs aéroportés (avions et drones) ou satellitaires. La télédétection IRT a ainsi l'avantage de pouvoir spatialiser l'information thermique contrairement aux mesures *in situ* ponctuelles et de permettre de cartographier de manière détaillée la température de surface de l'eau. L'imagerie infrarouge thermique ouvre des possibilités intéressantes pour l'étude des structures thermiques des cours d'eau à plusieurs échelles (Wawrzyniak, 2012).

À l'échelle spatiale la plus large, la télédétection IRT permet d'obtenir des profils longitudinaux de températures de l'eau plus détaillés que ceux obtenus avec des thermomètres *in situ*. L'imagerie IRT permet de travailler sur des linéaires de cours d'eau de plusieurs

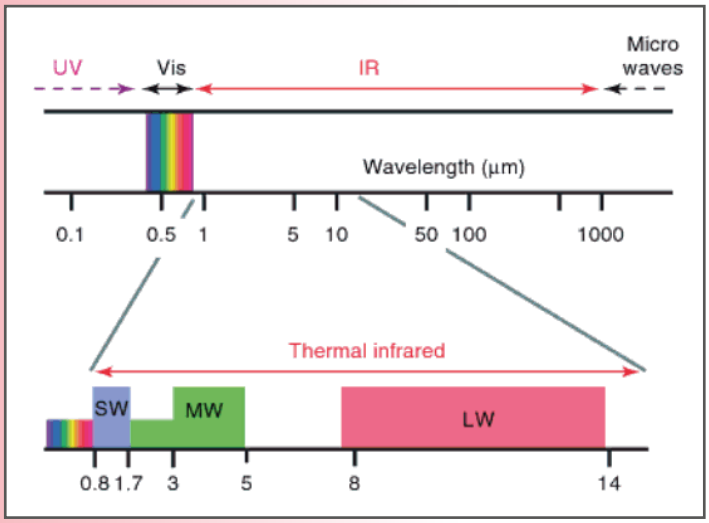


Figure 22. *Infrarouge (IR) et régions spectrales adjacentes. L'infrarouge thermique (IRT entre 0,8-14 µm) est composé de l'IR proche (SW shortwave), moyen (MW mid-wave) et lointain (LW long-wave) (Vollmer et Möllmann, 2010).*

centaines de kilomètres. Contrairement à la télédétection aéroportée, l'imagerie satellitaire rend possible l'étude des variations temporelles saisonnières et inter-annuelles. En effet, l'accès souvent gratuit aux données satellites à faible résolution spatiale, comme c'est le cas pour Landsat, et la fréquence d'acquisition élevée permettent d'aborder des questions en lien avec la saisonnalité ou la variabilité hydrologique.

À une échelle plus locale, l'IRT permet ainsi de détecter les échanges hyporhéiques et de localiser les zones d'arrivées phréatiques dans les rivières ou les bras morts. En été, les eaux souterraines étant généralement plus froides que les rivières, des arrivées phréatiques peuvent créer des zones d'eau plus froide, considérées comme des refuges thermiques pour certaines espèces de poissons.

Protocole de mesure des échanges

Les 100 premiers microns de la surface de l'eau émettent une radiation IRT qu'il est possible de mesurer à l'aide de capteurs. La procédure est la suivante :

- choisir un capteur (encarts : Matériel et protocole) dont la résolution est adaptée au cours d'eau étudié (au moins trois pixels sur la largeur du cours d'eau) ;
- choisir une période de l'année où le contraste thermique entre les eaux souterraines et superficielles est suffisant (environ 5°C) ; pour la localisation des arrivées phréatiques, il est ainsi conseillé de travailler en été en fin de journée lorsque la température de la rivière est particulièrement élevée ;
- faire l'acquisition à l'étiage car un débit trop élevé masquerait les échanges ;
- choisir une période de beau temps (sans nuage, ni brouillard) et sans vent trop fort (pour faciliter le vol) ;
- implanter des thermomètres enregistreurs dans les cours d'eau où la température est homogène spatialement (par ex. zone de seuils où l'eau est bien mélangée) en évitant les zones où il y a stratification thermique ;

L'essentiel du protocole

1. Acquisition des images IRT et installation de thermomètres de référence *in situ*
2. Géoréférencement des images
3. Correction de la mesure de température
4. Identification des zones en eau
5. Création d'un profil longitudinal de température et/ou identification des anomalies thermiques (comparaison de zones et identification des zones plus chaudes ou froides).

Dispositifs / matériel

Matériel

Images satellitaires
Noms de satellites : Landsat 7, Terra, Aqua, Noaa…
Résolution spatiale thermique : 60 à 1000 m en fonction de la sensibilité des capteurs
Fréquence de passage : d'ordre de grandeur hebdomadaire (varie selon les satellites). Toujours à la même heure (par ex. tous les 16 jours pour Landsat 7, vers 10h20GMT pour le Rhône).

Toutes les images satellites ne sont pas forcément exploitables. C'est le cas notamment en cas de couverture nuageuse ou de capteurs défectueux.

Images aéroportées
Hélicoptère, avion, ULM ou drone (photos 8)
Caméra thermique (photo 9)
Résolution : 0,1 à 5 m en fonction de l'altitude de vol et de la matrice de la caméra thermique

Sondes enregistreuses de température de l'eau

Logiciel

SIG
Télédétection

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier et gomme

© plateforme ISIG

Photos 8.
Trois des vecteurs aéroportés utilisés ;
a *: le drone Drelio ;*
b *: l'hélicoptère Robinson R22 et*
c *: le para-moteur.*

© Infratec

Photo 9.
a *: caméras IRT VarioCAM® hr head et* **b** *: hr research.*

- acquérir des photographies ou images dans le visible pour faciliter le géoréférencement et l'interprétation des images thermiques ;
- transformer le format propriétaire des images IRT en un format lisible par les logiciels de télédétection et SIG ;
- géoréférencer des images IRT à l'aide des photographies aériennes ou images dans le visible ;
- corriger la mesure de température : corrections atmosphériques, calibration en utilisant des données de température *in situ*, estimation de l'erreur ;
- sélectionner des pixels du chenal pour établir un profil thermique longitudinal ;
- extraire la température dans différentes zones pour identification des différences thermiques.

Les coûts (hommes/jours) sont précisés dans le tableau 14.

Tableau 14. *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour les images thermiques infrarouges (IRT).*

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Pose des sondes thermiques	10 à 20 sondes / jour	2
Acquisition d'images IRT aéroportées	50 km/heure	1
Géoréférencement des images	20 images / jour	1
Correction de la mesure de T°	0,5 jour	1
Calcul de la T°	0,5 jour	1

Interprétation des données et des résultats

Il est essentiel de valider l'identification des anomalies thermiques, en se servant des images dans le visible. En effet, des objets différents peuvent avoir la même signature thermique. Par ex. une ombre sur un banc de galets peut présenter la même température qu'une arrivée phréatique d'eau froide. Il est ainsi indispensable d'utiliser les images dans le visible ou photographies aériennes pour identifier les entités exondées telles les bancs de galets ou la végétation, et s'assurer que l'anomalie thermique identifiée est bien une zone en eau et non un artefact dû aux conditions d'acquisition des images.

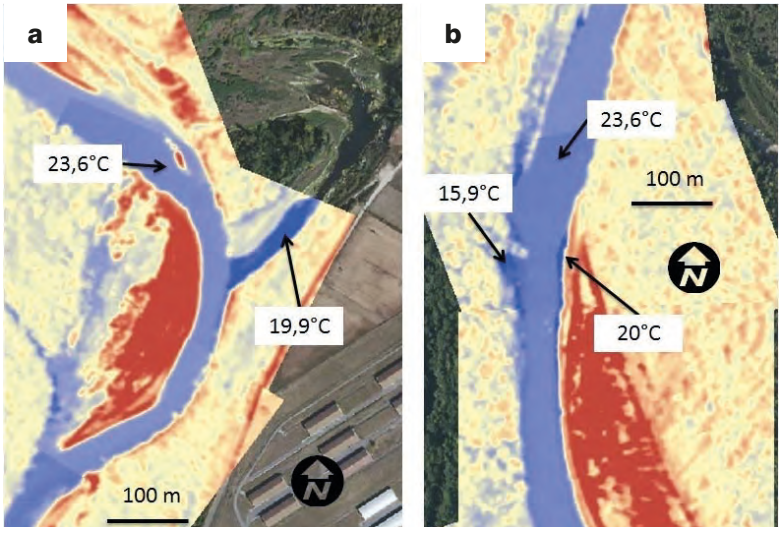
La température des cours d'eau varie au cours du temps. Une image thermique est ainsi une représentation instantanée d'un état transitoire. Il est indispensable de tenir compte des changements temporels de température dans l'interprétation des images (par ex. moment de la journée).

Valeurs guides et repères

- Infrarouge thermique (0,8-14 μm), composé de l'infrarouge thermique moyen (3-5 μm) et de l'infrarouge thermique lointain (8-14 μm)
- Émissivité (ε) : eau 0,98 à 0,99 ; sol minéral sec 0,92 à 0,94 ; végétation verte et en bonne santé 0,96 à 099
- Spectre électromagnétique du visible : 0,4-0,8 μm
- Résolution spatiale des capteurs des satellites : 60 à 1000 m, couverture globale
- Résolution spatiale des images aéroportées : 0,1 à 5 m (varie selon les caméras et l'altitude de vol)
- Emprise au sol des images aéroportées : 50x40 à 2000x1500 m (varie selon les caméras et l'altitude de vol)
- Matrice des images IRT : 640 x 480 pixels (varie selon les caméras)

Résultats : exemple de l'Ain

La figure 23 montre des anomalies thermiques de la température de l'eau de l'Ain en période estivale (Wawrzyniak *et al.*, 2016). Ces zones sont liées aux échanges nappe/rivière. Elles sont froides car elles sont alimentées par des eaux souterraines. Les principaux types d'anomalies observées sont : **a**/les bras morts froids et **b**/ les résurgences. Les bras froids sont d'anciens chenaux abandonnés ou des basses de convexités. Les résurgences sont situées sur les bords du cours d'eau et résultent du drainage de la nappe d'accompagnement.



© IGN BD Ortho® in Wawrzyniak (2015)

Figure 23. *Anomalies thermiques estivales sur l'Ain ;* **a** *: bras mort froid et* **b** *: résurgence latérale. Le fond est une orthophoto de 2012.*

Ces anomalies thermiques présentent une variabilité temporelle liée aux conditions de nappe. Ainsi, le nombre de résurgences apparaît fortement corrélé au niveau de la nappe alors que les bras morts froids montrent une plus grande stabilité temporelle.

Points forts

- Possibilité d'obtenir une cartographie de la température de surface
- Finesse de la résolution spatiale, notamment avec des images aéroportées
- Importance de l'emprise spatiale étudiée
- Rapidité de l'acquisition de données

Informations et données nécessaires

- Images IRT
- Photographies aériennes ou images dans le visible
- Températures de la rivière *in situ* pour calibration

Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- Nécessite une différence importante de température entre les eaux de surface et les eaux souterraines
- Ne détecte que les apports de nappe à la rivière (ou aux bras morts) et les apports hyporhéiques (par le fond du lit)
- Bien tenir compte des différentes sources d'erreurs de l'imagerie IRT des cours d'eau : émissivité de la surface de l'eau, réflexions de radiations environnantes, rugosité de l'eau, stratifications thermiques à la fois aux niveaux microscopiques et macroscopiques
- Privilégier une observation la plus verticale possible (peu d'influence pour des angles inférieurs à 30° / beaucoup pour de angles supérieurs à 70°) pour limiter la réflexion des nuages et des objets terrestres riverains
- Tenir compte des incertitudes liées à la calibration de la caméra thermique (dérive possible pendant les mesures)
- En parallèle de l'acquisition thermique, obtenir une couverture d'images visibles, de même résolution spatiale et couvrant la même surface
- Pour les acquisitions aéroportées, plusieurs facteurs peuvent affecter le vol : conditions aérologiques, législation aérienne (zones protégées, sites sensibles telles les centrales nucléaires)

Méthodes complémentaires

- Analyse géomatique des niveaux d'eau (fiche outils n°1)
- Modèles hydrogéologiques (fiche outils n°2)
- Végétation aquatique (fiche outils n°6)
- Invertébrés souterrains (fiche outils n°7)

Références et liens pour en savoir plus

Dugdale S.J., Bergeron N.E., St-Hilaire A. (2013) *Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river.* Remote Sensing of Environment, 136, p. 358-373.

Handcock R.N., Gillespie A.R., Cherkauer K.A., Kay J.E., Burges S.J., Kampf S.K. (2006) *Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales.* Remote Sensing of Environment, 100, p. 427-440.

Torgersen C.E., Faux R.N., McIntosh B.A., Poage N.J., Norton D.J. (2001) *Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams.* Remote Sensing of Environment, 76(3), p. 386-398.

Vollmer M., Möllmann K.P. (2010). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications.* Wiley-VCH, Weinheim, 593 p.

Wawrzyniak V. (2012) *Étude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemples dans le bassin du Rhône*. Thèse de doctorat de Géographie et d'Aménagement, Université Lyon 3.

Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Grandjean P., Goma R. (2015) *Characterization of thermal refuges along the lower Ain River using thermal infrared remote sensing: implications for conservation and restoration.* IS.Rivers, Integrative Sciences and sustainable development of rivers. Lyon, 22-26 juin 2015

Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Vaudor L., Goma R., Grandjean P. (2016). *Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing.* Remote Sensing of Environment, 175, p. 337-348.

Personnes ressources

Vincent Wawrzyniak (Géographe) : Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 EVS. ENS de Lyon, Plateforme ISIG, vincent.wawrzyniak@gmail.com

Hervé Piégay (Géographe) : Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 EVS. ENS de Lyon, Plateforme ISIG, Herve.Piegay@ens-lyon.fr

Géochimie

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Couts (€)		Couts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
Nappes libres Zone hyporhéique Aquifères multi-couches Milieux carbonatés	Ponctuelle	<100m	Tronçon de cours d'eau voire masse d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt) Haute fréquence	Horaire voire infra-horaire à mensuel	Moyen	Moyen	Important	Fort	Fort

Description rapide

Les méthodes de caractérisation des échanges nappe/rivière fondées sur la géochimie s'appuient sur la différence de signature physique et/ou chimique de chacune des eaux. Ces méthodes sont nombreuses et dépendent de paramètres qui distinguent les eaux de surface des eaux souterraines du site étudié (pH, température, conductivité, concentration en tel ou tel élément). Leur diversité permet d'envisager une caractérisation des échanges nappe/rivière dans tous les contextes hydrogéologiques abordés dans ce guide. Leur coût en temps et en argent dépend fortement du nombre et du type de paramètres mesurés et/ou analysés. La résolution d'interprétation est quant à elle fortement conditionnée par l'effort d'échantillonnage dans le temps et dans l'espace. Ces méthodes sont souvent combinées avec d'autres outils de caractérisation des échanges nappe/rivière évoqués dans ce guide : végétation aquatique (fiche outils n°6), invertébrés souterrains (fiche outils n°7), dispositifs Molonari (fiche outils n°3) ou modèles hydrodynamiques (fiche outils n°2).

Principe de caractérisation des échanges

La géochimie de l'eau est un outil intéressant pour discriminer des eaux d'origines superficielles, interstitielles ou souterraines à condition que des prélèvements et des analyses soient effectués dans chacun de ces trois compartiments et que la composition de l'eau soit différente dans chacun de ces compartiments.

Ces analyses peuvent porter sur des paramètres physico-chimiques classiques tels que (Gourcy et Petelet-Giraud, 2011) : pH, température, conductivité électrique, teneur en oxygène dissous, concentrations en éléments majeurs (par ex. calcium Ca^{2+}, magnésium Mg^{2+}, nitrates NO^{3-}, phosphates PO_4^{2-}), concentrations en éléments traces (par ex. CFC-Chlorofluorocarbone, HAP-Hydrocarbure aromatique polycyclique, phytosanitaires, métaux lourds, polluants émergents…), ou traceurs artificiels (par ex. fluorescéine, éosine).

En étudiant les contrastes des teneurs en éléments chimiques entre les eaux souterraines et de surface, et en ayant une bonne connaissance des propriétés minéralogiques et chimiques des formations géologiques de la zone d'étude, il est possible de déterminer l'origine et le chemin de l'eau et d'estimer quantitativement des mélanges.

Les méthodes isotopiques sont moins fréquemment mises en œuvre. Les outils isotopiques permettent une analyse plus fine de l'origine des eaux et des mélanges entre apports souterrains et eaux superficielles par exemple. Mais cela nécessite une très bonne connaissance des propriétés isotopiques de chacune des masses d'eau en jeu dans le contexte d'étude. La connaissance des propriétés géochimiques des pluies de la zone étudiée est aussi nécessaire dès lors que l'on a recours aux méthodes isotopiques.

Par exemple, les isotopes stables de la molécule d'eau permettent en particulier de déterminer l'origine de la recharge des eaux souterraines en utilisant le gradient d'altitude et les variations saisonnières de la signature isotopique des précipitations. Ceci peut être intéressant pour discriminer des eaux n'ayant pas une même origine. Par exemple, la signature isotopique du fleuve Rhône, marquée par des apports alpins, est très différente de celle des eaux de nappes de versant du corridor rhodanien dont la recharge s'effectue avec des eaux de pluies locales provenant de massif de moindre altitude.

Les isotopes radioactifs (par ex. ^{222}Ra, ^{14}C) quant à eux sont plus spécifiquement utilisés pour estimer le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère ou quantifier des apports d'eau souterraine à l'aide d'équations de mélange (encart : Formule de calcul p. 80).

Protocole de mesure des échanges

- Sélection des paramètres à mesurer en fonction du fond géochimique et des compartiments de l'hydrosystème (par ex. eaux stagnantes, cours d'eau, nappes, zone hyporhéique…) à considérer
- Sélection des sites de mesures *in situ*, d'installation de sondes fixes ou embarquées, de prélèvement d'eau ou d'injection de traceurs artificiels
- Sélection de la période d'échantillonnage ou de mesure selon les conditions hydrologiques. Il est conseillé d'effectuer les mesures physico-chimiques pendant les moyennes eaux. Il est déconseillé d'effectuer les mesures en période de hautes eaux, puisque la dilution des eaux brouille les paramètres physico-chimiques. La période d'étiage rend les apports de nappe plus importants, donc plus visibles chimiquement, mais peut induire en erreur pour l'appréciation de l'intensité des échanges, et même leur direction préférentielle
- Les mesures et l'échantillonnage doivent être effectués avec soin pour éviter toute contamination en utilisant du matériel adapté (encart : Matériel). Pour les prélèvements en nappe, il est nécessaire d'extraire trois fois le volume de l'ouvrage. Dans les cours d'eau, il est conseillé de prélever au milieu de la rivière dans une tranche d'eau intermédiaire. Dans tous les cas, les flacons sont à usage unique et doivent être rincés avec l'eau du milieu avant prélèvement
- Stockage des échantillons dans les conditions adaptées lors du transport et au laboratoire
- Analyse des prélèvements d'eau
- Cartographie et interprétation des résultats

L'essentiel du protocole

1. Choix des paramètres

2. Choix des sites

3. Choix des périodes

4. Mesures et prélèvements

5. Transport et stockage des échantillons

6. Analyse des échantillons

7. Cartographie et interprétation des résultats

***In situ* avec sondes enregistreuses**

L'installation de sondes enregistreuses permet l'acquisition de chroniques de données à forte résolution temporelle : sondes de pressions pour mesurer les niveaux d'eau et/ou certains paramètres physico-chimiques. Elles peuvent être installées de manière fixe dans les eaux souterraines ou superficielles. Elles peuvent être aussi embarquées dans un bateau pour mesurer des profils en long de conductivité ou de température dans les rivières afin de détecter des arrivées phréatiques.

Injection de traceurs

Des traceurs artificiels peuvent être injectés dans des puits, par exemple, afin de déterminer des flux, des aires de recharge ou des vitesses d'écoulement.

Interprétation des données et des résultats

Compte tenu du grand nombre de paramètres potentiellement mesurables, il est difficile de proposer un panorama complet. En conséquence, cette partie propose quelques exemples illustratifs :

- les paramètres physico-chimiques peuvent être analysés via une analyse en composantes principales normée (ACP) - Voir Guide Nappes/Rhône ;
- la température de l'eau de nappe est attendue comme stable et proche de 13°C (à adapter suivant les régions) ;
- si les aquifères sont fortement contaminés par les nitrates, les sites présentant de fortes valeurs pourraient être alimentés par des eaux souterraines ;
- le pH est la variable la moins représentative des échanges nappe/rivière, mais elle permet de détecter des pics de productivité primaire pouvant influencer les autres paramètres ;
- les isotopes stables de l'eau permettent de quantifier les échanges nappe/rivière à l'aide de bilans de masse (encart : Formule de calcul page suivante).

Valeurs guides et repères

- Des valeurs repères sont présentées pour les paramètres physico-chimiques classiques dans les fiches outils n°6 (Végétation aquatique) et n°7 (Invertébrés souterrains)
- Isotopes stables de l'eau : les compositions isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}O$) et de l'hydrogène (δD) des précipitations sont fonction de la latitude, de l'altitude, et de l'origine des masses nuageuses. La figure 24 reporte les valeurs $\delta^{18}O$ attendues pour les précipitations en France. La composition isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène des précipitations moyennes annuelles en France sont liées par la relation mathématique : $\delta D = 8{,}347\ (\pm 0{,}153) * \delta^{18}O + 11{,}662\ (\pm 1{,}08)$ (Millot *et al.* 2010)
- Autres isotopes stables (par ex. $\delta^{13}C$ du carbone inorganique dissous) : ceux-ci ne sont pas utilisés de manière récurrente dans les analyses d'eau, différents facteurs intervenant (échanges avec l'atmosphère, échange avec les roches encaissantes, influence de l'activité organique) il est souvent très difficile d'isoler chacun des signaux et d'obtenir une information exploitable
- Traceurs radioactifs ou radiochronomètres (par ex. carbone 14 (^{14}C), tritium (^{3}H), radon 222 (^{222}Rn)) : les activités mesurées sont converties en âge
- Polluants émergents comme les stéroïdes, substances médicamenteuses (antibiotiques, hormones), nanoparticules, produits de dégradation des détergents : les concentrations de ces substances dans l'eau sont souvent très faibles

Résultats : exemple de la vallée du Rhône

La composition isotopique de l'oxygène ($^{18}O/^{16}O$) de l'eau du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon ($\delta^{18}O = -11{,}30$ ‰ $\pm$ 0,30) est nettement appauvrie en ^{18}O par rapport aux aquifères locaux ($\delta^{18}O$ voisins de – 9 ‰). Il est alors possible de quantifier dans le milieu interstitiel la part d'eau provenant du Rhône et d'eau provenant des nappes phréatiques. Des campagnes de prélèvement et d'analyse des eaux de surface du Rhône, des

Dispositifs / matériel

Matériel de mesure *in situ*

Conductimètre
Thermomètre
Oxymètre
Kit de Hach pour la mesure de l'alcalinité
Flacon (pour faciliter la mesure)

Matériel de prélèvement

Flacon HDPE (Hight Density Poly-Ethylen) de 100ml (Éléments majeurs)

Flacon en verre ambré de 20ml pour les isotopes (éviter les bulles d'air dans le prélèvement)

Puits : pompe pour piézomètre, batterie portative, filtres et unités de filtration, pompe à vide manuelle pour la filtration, bouteille d'échantillonnage

Milieu interstitiel : piézomètre mobile, tête de frappe, masse, pompe péristaltique ou seringue de grande taille, bouteille d'échantillonnage

Matériel d'enregistrement en continu

Sondes enregistreuses
Préleveurs automatiques

Traçages artificiels

Traceurs artificiels
Préleveurs automatiques
Charbons

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier et gomme

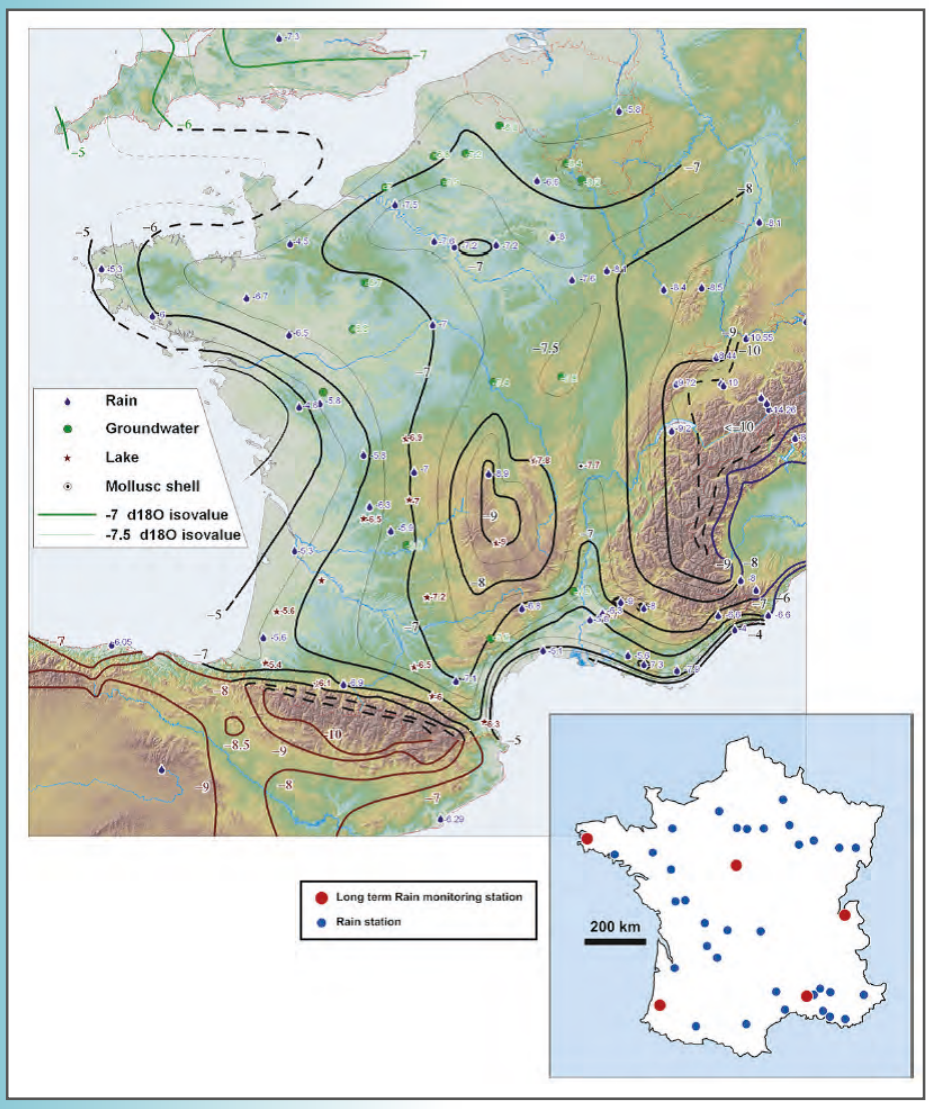


Figure 24. *Courbes d'isovaleurs de la composition isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}O$) annuelle moyenne des précipitations en France (Millot* et al. *2010).*

eaux interstitielles (50 cm de profondeur dans les sédiments) et des nappes phréatiques locales dans le secteur de Brégnier-Cordon ont permis de mettre en évidence différents types de mélanges :

- dans les secteurs où la composition de l'eau de la zone hyporhéique ($\delta^{18}O = -9,5$ ‰ ± 0,5) est voisine de celle de l'aquifère local (figure 25 **a**), un bilan de masse (encart : Formule de calcul) permet de calculer une contribution des eaux de la nappe au milieu interstitiel de plus de 70 % ;
- dans les secteurs où la valeur du $\delta^{18}O$ de la zone hyporhéique (– 11,0 ‰ ± 0,3) est voisine de celle des eaux de surface du Rhône (figure 25 **b**), les échanges d'eau se font majoritairement depuis le fleuve vers le milieu interstitiel (~ 90 % de l'eau interstitielle provient du Rhône).

Formule de calcul : exemple pour les isotopes stables de l'oxygène

Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène, notées respectivement $\delta^{18}O$ et δD, expriment l'abondance relative des deux isotopes des éléments considérés.

Du fait de sa thermodépendance, le $\delta^{18}O$ des eaux des précipitations diminue donc lorsqu'on s'élève en altitude (en moyenne de 0,25‰ par 100m). De ce fait les écoulements d'altitude sont appauvris en ^{18}O par rapport à des écoulements de basse altitude. À leur arrivée dans les piedmonts, les rivières alpines sont ainsi très nettement marquées par rapport à leur environnement de basse altitude.

Ce contraste isotopique permanent peut être utilisé pour connaître la zone d'alimentation d'un aquifère, ou la part d'eau de rivière dans un aquifère local ou inversement, à partir d'une simple équation de mélange.

$\delta^{18}Om = f.\delta^{18}O + (1 - f).\delta^{18}On$

Avec :

$\delta^{18}O$: $\delta^{18}O$ de l'eau de la rivière en amont des échanges supposés

$\delta^{18}Om$: $\delta^{18}O$ de l'eau à l'endroit où mélange nappe/rivière est supposé

$\delta^{18}On$: composition isotopique de l'eau de la nappe

f : fraction d'eau de la rivière dans le mélange.

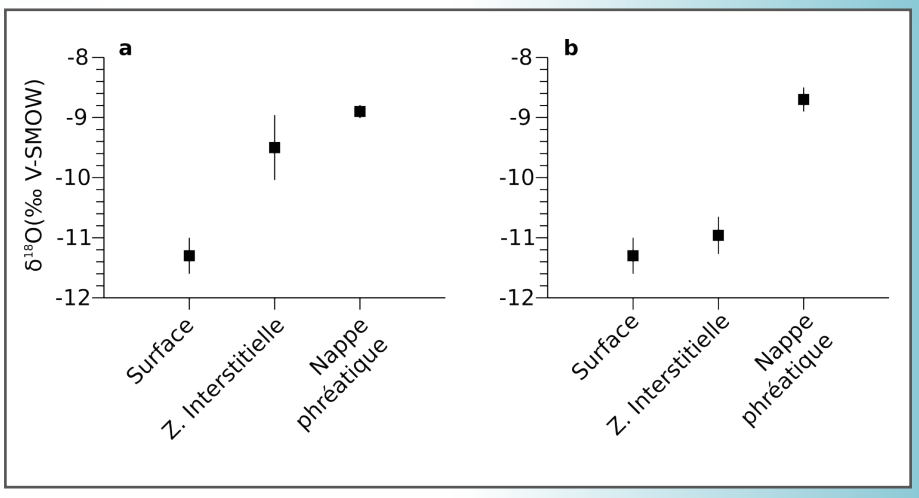


Figure 25. *Composition isotopique de l'oxygène de l'eau de surface du Rhône, des eaux de la zone hyporhéique à 50 cm de profondeur dans les sédiments, et de la nappe phréatique. Haut-Rhône, secteur de Brégnier-Cordon ;* **a** *: secteur dans lequel la zone hyporhéique (Z. Interstitielle), de composition voisine de celle de la nappe, est alimentée majoritairement (> 70%) par la nappe ;* **b** *: secteur dans lequel la zone hyporhéique, de composition voisine de celle du Rhône, est alimentée majoritairement par le fleuve.*

Points forts

Selon les paramètres utilisés la géochimie permet :

- d'identifier l'origine des eaux interstitielles et des apports de nappe ;
- d'identifier des altitudes de recharge, des temps de renouvellement et des apports de nappe (isotopes) ;
- de quantifier des mélanges d'eau (éléments majeurs et isotopes) ;
- de déterminer l'âge de l'eau (isotopes) ;
- d'estimer les échanges nappe/rivière dans les deux sens à différentes périodes de l'année.

Informations et données nécessaires

- Connaissance du fond géochimique naturel, des eaux de pluie et des contaminants d'origine anthropique
- Référentiel : mesure de valeurs de référence pour les différents compartiments de l'hydrosystème étudié

Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- Le coût des analyses peut être élevé et il est nécessaire de faire appel à un laboratoire spécialisé (tableau 15 page suivante)
- L'utilisation des concentrations en éléments majeurs et des propriétés isotopiques pour l'identification et la quantification de mélange est optimale si les différentes masses en jeu ont des signatures chimiques et isotopiques contrastées
- Des données ponctuelles ne sont pas toujours suffisantes pour un diagnostic complet, il est souvent nécessaire de recueillir des chroniques de données et de réaliser un suivi temporel des masses d'eau en présence à différents débits et différentes saisons

Tableau 15. *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la géochimie.*

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Échantillonnage in situ (pH, T°, conductivité, O_2 dissous)	10 échantillons / jour	2
Analyse en laboratoire	50 échantillons / jour (variable selon le type de matériel, le nombre de paramètres, le type d'échantillon…)	1 (prestation possible)
Analyse des données	5 jours	1
Cartographie et synthèses	5 jours	1
Échantillonnage in situ (pH, T°, conductivité, O_2 dissous)	10 échantillons / jour	2

- L'interprétation des résultats est souvent une affaire de spécialistes
- Calage des éléments chimiques impliqués sur la base de valeurs de référence et d'une connaissance spatio-temporelle des signatures des différents systèmes concernés
- L'activité biologique, notamment microbienne, est susceptible de modifier des équilibres ioniques susceptibles de modifier le pH. Certains équilibres ou certaines concentrations en éléments chimiques dissous sont susceptibles d'être modifiés lors de leur transit, notamment dans la zone hyporhéique

Méthodes complémentaires

- Analyse géomatique des niveaux d'eau (fiche outils n°1)
- Dispositif Molonari (fiche outils n°3)
- Végétation aquatique (fiche outils n°6)
- Invertébrés souterrains (fiche outils n°7)

Références et liens pour en savoir plus

Graillot D., Paran F., Bornette G., Marmonier P., Piscart C., Cadilhac L. (2014) *Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges.* SpringerPlus.2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.

Gourcy L., Petelet-Giraud E. (2011) *Utilisation des outils isotopiques pour la délimitation des aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable.* Rapport BRGM/RP-59729-FR, 62 p.

Millot R., Petelet-Giraud E., Guerrot C., Négrel P. (2010) *Multi-isotopic composition (d7Li, d11B, dD, d18O) of rainwaters in France : Origin and spatio-temporal characterization*. Applied Géochemestry, 25, p. 1510-1524.

Personnes ressources

Véronique Lavastre (Géochimie) : UMR CNRS 6524, Magmas et Volcans, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, veronique.lavastre@univ-st-etienne.fr

Laurent Simon (Écologie souterraine) : UMR CNRS 5203 Lehna, Université Claude Bernard Lyon 1, laurent.simon@univ-lyon1.fr

Pierre Marmonier (Écologie souterraine) : UMR CNRS 5203 Lehna, Université Claude Bernard Lyon 1, pierre.marmonier@univ-lyon1.fr

Gudrun Bornette (Écologie végétale) : UMR CNRS 6249, Chronoenvironnement, Université de Franche Comté, Besançon, gudrun.bornette@univ-fcomte.fr

Végétation aquatique

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Couts (€)		Couts (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	Transects 2m x 50m	0,1 à 2km	Tronçon de cours d'eau voire masse d'eau	Intégration annuelle	Instantané	Moyen	Moyen	Faible	Moyen	Faible

Description rapide

Les macrophytes aquatiques désignent les grands végétaux aquatiques (bryophytes, ptéridophytes et angiospermes) et les algues macroscopiques et filamenteuses (Characées), visibles et identifiables à l'œil nu. Ils peuvent être utilisés comme des bioindicateurs, c'est-à-dire « comme des organismes qui, par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologiques, éthologiques ou écologiques, permettent, de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème et de mettre en évidence leurs modifications » (Blandin, 1986). Un apport de nappe vers une rivière modifie les conditions de température, d'oxydation du sédiment et de richesse en éléments nutritifs favorisant ainsi certaines espèces végétales aquatiques par rapport à d'autres.

La méthode fondée sur la végétation aquatique est adaptée pour réaliser la caractérisation rapide des échanges nappe/rivière à l'échelle de la plaine alluviale à l'aide de relevés floristiques associés aux exigences écologiques des espèces. La méthode permet de caractériser les échanges entre les milieux aquatiques de surface (stagnants ou courants) et les nappes et d'identifier l'origine des apports (de la rivière ou de la nappe de versant) dans les cas où les qualités des eaux sont tranchées.

Principe de caractérisation des échanges

La caractérisation des échanges nappe/rivière à l'aide des macrophytes s'appuie sur le diagnostic du fonctionnement des zones humides et cours d'eau de la plaine alluviale et repose sur les exigences écologiques des espèces végétales aquatiques collectées dans ces milieux (figure 26 page suivante). Les groupements végétaux présents peuvent être associés au degré de trophie, c'est-à-dire au niveau de ressources disponibles des écosystèmes et à l'existence d'apports d'eau souterraine.

Le degré de trophie d'un milieu joue un rôle primordial sur la structure et la dynamique des communautés végétales en conditionnant directement leur composition. Pour des niveaux de ressources élevés, les espèces de grande taille et à croissance rapide sont généralement les plus compétitives, et tendent à dominer les peuplements. Lorsque le

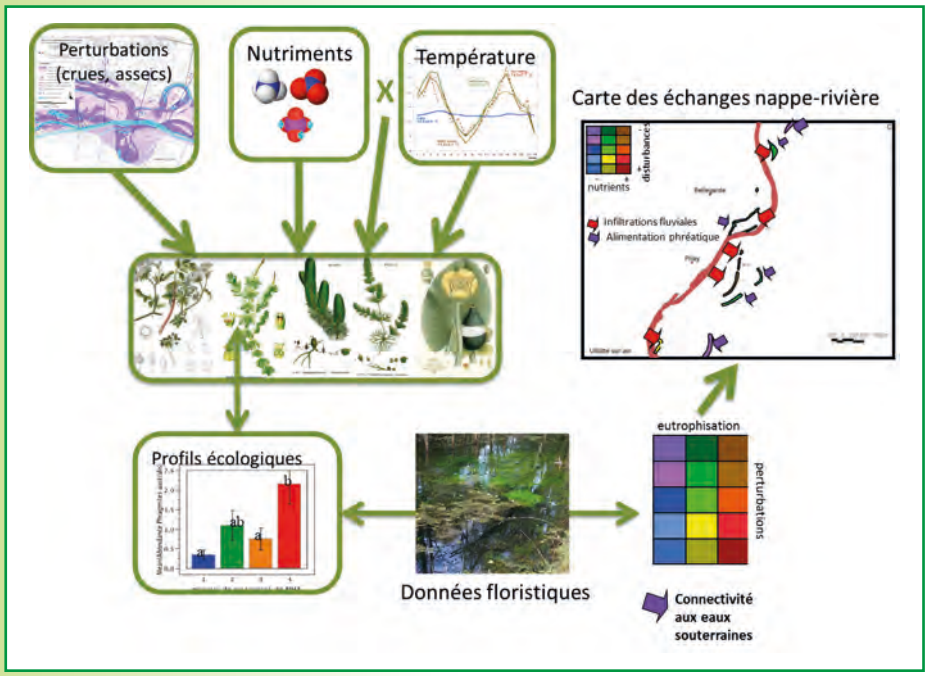


Figure 26. *Schéma de principe du diagnostic fondé sur la végétation aquatique.*

niveau de ressources est faible, les espèces capables de supporter ce stress (croissance lente, conservation des ressources, taille plutôt faible) sont majoritaires. Par conséquent, les espèces aquatiques ne sont pas distribuées de manière aléatoire dans les écosystèmes et l'on peut associer la plupart des espèces à des niveaux de ressources donnés.

Les apports d'eaux souterraines agissent souvent sur la qualité de l'eau dans la zone humide, et de ce fait contribuent à l'organisation des communautés végétales. Si les eaux souterraines sont pauvres en nutriments, elles peuvent maintenir des conditions oligotrophes (pauvres en éléments nutritifs) dans le milieu aquatique. De surcroît, parce qu'elles sont sténothermes (sujettes à de faibles variations de température), les eaux de nappe maintiennent des températures plus froides en été dans la zone humide, limitant la production végétale et notamment la prolifération algale. Elles contribuent aussi à limiter les phénomènes d'anoxie grâce au renouvellement des eaux engendré par le renouvellement permanent de l'eau interstitielle par les apports de la nappe.

Protocole de mesure des échanges

La méthode basée sur la reconnaissance des communautés végétales permet un diagnostic rapide et peu coûteux (tableau 16) et intègre les échanges sur une période de temps annuelle.

- Relevés floristiques à effectuer en été (encart : matériel) sur des transects de deux mètres, perpendiculairement à l'axe d'écoulement, suivant la taille du milieu échantillonné (par ex. bras mort de plusieurs centaines de mètres de longueur). Plusieurs prélèvements peuvent être réalisés à des intervalles réguliers (espacés en général de 50 à 100 m)
- Estimation des abondances des végétaux sur le site grâce au double indice d'abondance de Braun-Blanquet (1932) (tableau 17). Ces indices permettent d'avoir l'abondance relative de chaque espèce sur le transect ainsi que leur mode de répartition

L'essentiel du protocole

1. Relevés floristiques sur des transects
2. Identification des espèces et estimation des abondances
3. Mesures et prélèvements d'eau superficielle pour analyses physico-chimiques
4. Calcul des indices à partir de la végétation et analyse en composantes principales (ACP) des données de physico-chimie
5. Interpolation des indices et cartographie sous SIG.

Dispositifs / matériel

Matériel de mesure

Règle de 2 m
Râteau télescopique

Prise de notes

Fiches de relevé végétation
Bloc note
Crayon(s) papier(s) si vite tombés dans l'eau

Orientation et informations

GPS, Topofil ou cartographie permettant de connaître la distance entre les transects

Navigation

Bateau (+ gonfleur) + rames

Tableau 16. *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la méthode fondée sur la végétation aquatique.*

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Échantillonnage de la végétation	5km / jour	2
Analyse des données	10km / jour	1
Cartographie et synthèses	10km / jour	1

Valeurs des classes des différents indices et formules de calcul

Trophie

Σ pour l'ensemble des espèces du relevé (abondance x affinité de l'espèce pour le trophique) et ce pour chaque niveau trophique. Le niveau trophique du site est la classe trophique qui obtient le score le plus élevé parmi les quatre classes ci-dessous :

- oligotrophe ;
- mésotrophe ;
- eutrophe ;
- hyper-eutrophe.

Affinité pour des milieux thermiquement stables

Σ pour l'ensemble des espèces du relevé (abondance x valeur d'affinité de l'espèce pour des milieux thermiquement stables). Le score obtenu renseigne sur la stabilité thermique probable du site :

- Score = 0 stabilité thermique nulle ;
- 1 à 4 faible ;
- 5 à 9 moyenne ;
- >9 forte.

Probabilité d'apports issus de la nappe de versant

Indice calculé en multipliant l'indice d'affinité pour les milieux oligotrophes (dans le cas d'une nappe oligotrophe) avec indice d'affinité pour des milieux thermiquement stables :

- Score = 0 ou 1, probabilité nulle ;
- 2, faible ;
- 3, moyenne ;
- 4, 6 ou 9, forte.

Pour plus d'information sur les méthodes de calcul et notation des espèces aquatiques voir le guide Nappes/Rhône et le rapport final Naprom

- Identification à l'espèce des végétaux sur le terrain ou prélèvement pour identification en laboratoire grâce à des flores
- Mesures de conductivité, de température et de pH de l'eau *in situ* et prélèvements d'eau pour analyses d'éléments dissous au laboratoire
- Calcul des indices trophiques, d'affinité à une thermie stable, et donc de probabilité d'apports de nappe à partir des relevés floristiques
- Analyse en composantes principales (ACP) des données physico-chimiques
- Interpolation des indices et cartographie sous SIG

Tableau 17. *Les indices de la méthode Braun-Blanquet (1932).*

Abondance relative : recouvrement du transect (%)
1 : < 5%
2 : entre 5 et 25%
3 : entre 25 et 50%
4 : entre 50 et 75%
5 : > 75%

Interprétation des données et des résultats

Cet aspect du travail repose sur le calcul d'indices fondés sur l'affinité des plantes à l'état trophique du milieu et à l'apport d'eau souterraine (Amoros *et al.* 2000) (encart : Formules de calcul) :

- l'état trophique d'un site est obtenu en faisant la somme de chaque abondance relative des espèces estimée sur le terrain multiplié par son code indicateur pour chaque classe de trophie. La classe de trophie ayant la plus grande valeur est retenue ;
- l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux thermiquement stables est obtenu en sommant les valeurs d'affinité des espèces pour ce type de milieu, ce qui traduit une affinité pour les sites alimentés en eaux souterraines ;
- afin de mettre en rapport les informations sur le niveau d'eutrophisation et l'intensité des apports de nappe, un indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant est utilisé. Les valeurs des deux indices précédents sont alors multipliées pour chaque site. Suivant le résultat de cette multiplication, la probabilité d'apport issu de la nappe de versant est établie ;
- les données physico-chimiques, notamment température et conductivité, sont utilisées pour compléter le diagnostic.

Valeurs guides et repères

- Groupes taxonomiques de plantes aquatiques courants utilisés pour le diagnostic des apports de nappe : certaines Characées, *Potamogeton coloratus*, *Berula erecta, Mentha aquatica*, *Myriophyllum verticillatum*, *Groenlandia densa, Juncus articulatus*.
- Nombres d'espèces de végétaux aquatiques utiles au diagnostic de présence d'apport de nappe en France : 93
- Exemples d'espèces indicatrices d'apports de nappe : *Berula erecta*, *Mentha aquatica* (figure 27) *Potamogeton coloratus* (figure 28)
- Exemples d'espèces caractéristiques des niveaux trophiques : oligotrophe (*Potamogeton coloratus*), mésotrophe (*Myriophyllum verticillatum*), eutrophe (*Potamogeton nodosus*), hyper-eutrophe (*Ceratophyllum demersum*)
- Conductivité des eaux superficielles : elle renseigne sur la minéralisation de l'eau ; celle-ci est classiquement beaucoup plus forte dans les eaux souterraines situées en région calcaire, par rapport à celles localisées en zones de socle cristallin
- Température des eaux superficielles : la température de l'eau de nappe est attendue comme stable et proche de 13°C en milieu tempéré. En période printanière et estivale (moment des échantillonnages végétation et physico-chimie des eaux superficielles), de faibles températures sont associées à une alimentation en eau souterraine
- pH des eaux superficielles : le pH est souvent plus élevé en moyenne dans les eaux de rivière, et il permet également de détecter des pics de productivité primaire pouvant influencer les autres paramètres
- Teneurs en éléments dissous des eaux superficielles (par ex. pour les nitrates, ammonium) : lorsque les aquifères sont contaminés par les nitrates, les sites présentant de fortes concentrations en nitrates dans l'eau sont potentiellement (mais pas systématiquement) alimentés par des eaux souterraines

Figure 27. Mentha aquatica *in Montégut (1993).*

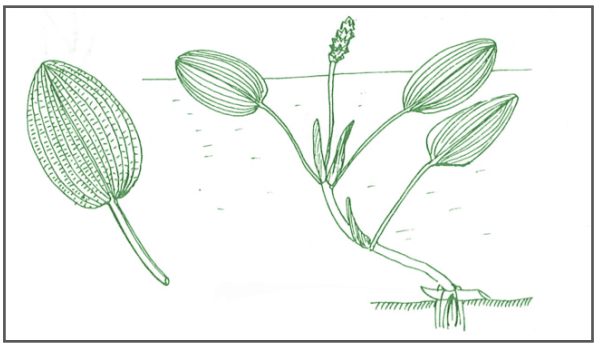


Figure 28. Potamogeton coloratus *in Montégut (1993).*

Résultats : exemple de la vallée du Rhône

La figure 29 propose un exemple de cartographie après interpolation de l'estimation de l'intensité des apports de nappe sur le secteur de Donzère-Mondragon dans la vallée du Rhône. Les relevés floristiques sont marqués par des points noirs. Le diagnostic différencie cinq zones :

- zone 1 - L'alimentation en eaux souterraines du Rhône apparaît importante du fait de la présence en abondance d'espèces témoignant de tels apports ;
- zone 2 - Entre les PK 182 et 194, les apports apparaissent de moindre importance, mais restent présents. L'abondance des espèces associées à des apports d'eaux souterraines devient nulle après le PK 194 ;
- zone 3 - Des apports d'eaux souterraines au canal de dérivation sont également perceptibles même s'ils semblent moins intenses et plus hétérogènes. Ceux-ci sont aussi perceptibles en amont et au centre de l'île, ce qui laisse supposer un passage de l'apport de versant sous le canal dans sa portion amont ;

- zone 4 - Seule une station située sur le Lez indique de forts apports d'eaux souterraines, cela était prévisible, étant donné la nature de ce cours d'eau dont les eaux proviennent directement des nappes de versants ;
- zone 5 - Le sud du secteur semble ne pas recevoir d'apports de nappe car l'indice d'apport phréatique est globalement nul. Dans cette zone cela semble cohérent car ce secteur est potentiellement colmaté.

Points forts

- Permet un diagnostic rapide et peu coûteux en matériel
- Intègre les échanges sur une période de temps annuelle
- Permet de travailler sur une large échelle spatiale

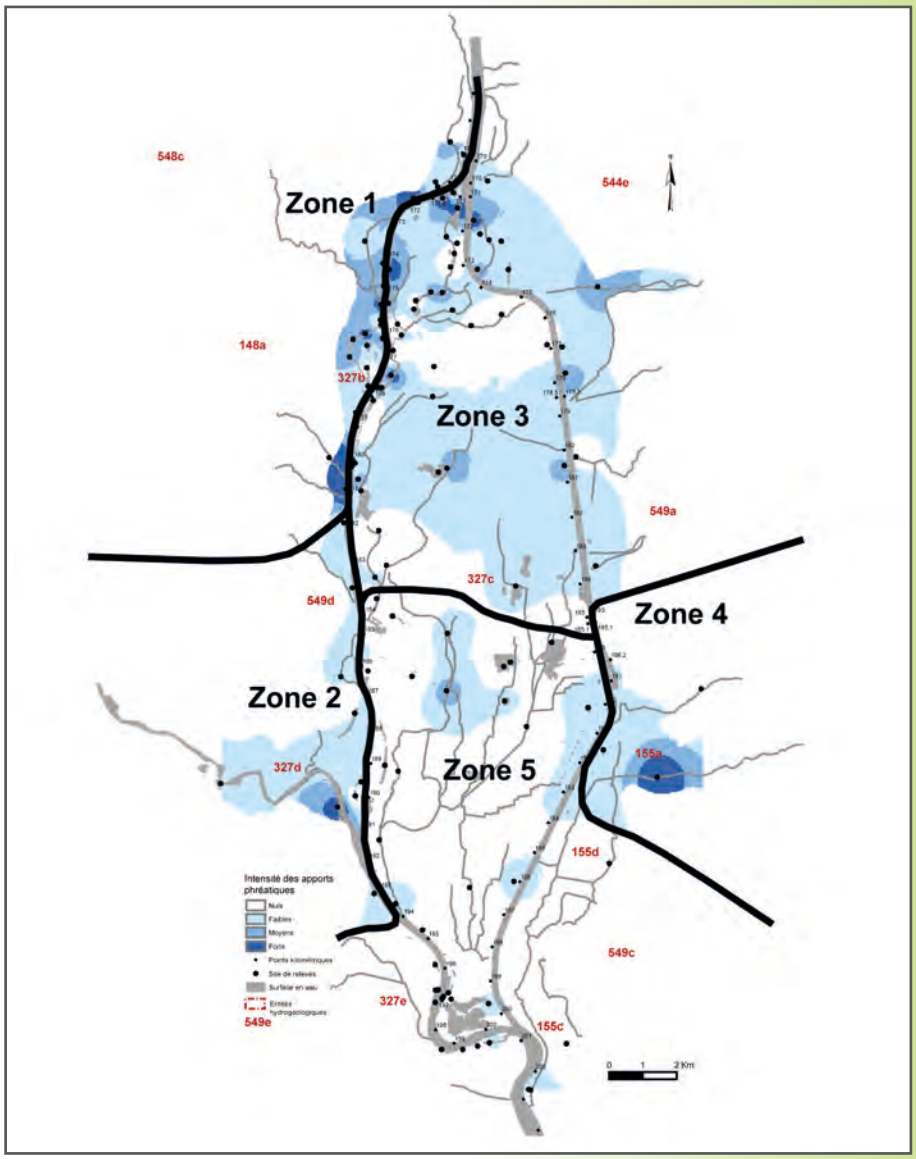


Figure 29. *Estimation de l'intensité des apports phréatiques aux milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon.*

Informations et données nécessaires

- Exigences écologiques des espèces
- Contexte biogéographique
- Inventaire des espèces de végétaux aquatiques
- Physico-chimie des eaux superficielles : O_2 dissous, température, pH, conductivité, éléments dissous (par ex. nitrates, ammonium)

Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- Ne permet pas de détecter les apports de la rivière vers la nappe
- Applicable uniquement dans les milieux pourvus de végétation (deux espèces indicatrices au minimum) hors zone méditerranéenne (l'intégration de nouvelles espèces permettrait de généraliser la méthode à l'échelle nationale, voire européenne)
- Pertinence du diagnostic limitée par la densité de milieux humides alluviaux
- Diagnostic semi-quantitatif
- Difficulté de mise en œuvre dans les contextes de très forte anthropisation (homogénéité de la qualité des eaux)
- Moins bonne efficacité du diagnostic en cas de contraste qualitatif faible entre eaux de nappes et eaux de rivière

Méthodes complémentaires

- Analyse géomatique des niveaux d'eau (fiche outils n°1)
- Géochimie (fiche outils n°5)
- Invertébrés souterrains (fiche outils n°7)

Références et liens pour en savoir plus

Amoros C., Bornette G., Pascal Henry C. (2000) *A vegetation-based method for ecological diagnosis of riverine wetlands.* Environmental Management, Vol. 25, Num. 2, p. 211-227.

Blandin P. (1986) *Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques.* Bull. ecol., 17 (4) : p. 215-307.

Braun-Blanquet J. (1932) Plant sociology (translation by H.S. Conard, G.D. Fuller) 18 + 439 p. Mac Graw-Hill Book Co. Inc. New York.

Montégut J. (1993) *Le milieu aquatique : connaissance, entretien, désherbage.* Association de Coordination Technique Agricole.

Graillot D., Paran F., Bornette G., Marmonier P., Piscart C., Cadilhac L. (2014) *Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges.* SpringerPlus. 2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.

Personnes ressources

Gudrun Bornette (Écologie végétale) : UMR CNRS 6249, Chronoenvironnement, Université de Franche Comté, Besançon, gudrun.bornette@univ-fcomte.fr

Florent Arthaud (Écologie végétale) : UMR Inra 042 US-Carrtel, Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques et les écosystèmes limniques, Université Savoie Mont Blanc, Chambéry, florent.arthaud@univ-savoie.fr

Invertébrés souterrains

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Couts (€)		Couts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés	Ponctuelle	<100m	Tronçons de cours d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Important

Description rapide

Cette méthode est fondée sur le lien entre les échanges hydrologiques rivière/nappe et la composition de la communauté d'invertébrés vivant dans les interstices des sédiments du cours d'eau (ou zone hyporhéique). Une partie de ces invertébrés interstitiels préfèrent vivre dans des habitats riches en oxygène et matière organique et seront donc plus abondants dans les zones d'infiltration d'eau de surface vers la nappe. D'autres préfèrent les habitats très stables et alimentés en eau souterraine, ils seront plus abondants dans des zones d'exfiltration d'eau interstitielle vers la surface. L'échantillonnage de cette faune par pompage permet un diagnostic des échanges nappe/rivière en secteur de nappe libre et de milieux carbonatés (dont karst) à l'échelle de quelques dizaines de mètres autour du point d'échantillonnage.

Principe de caractérisation des échanges

Les échanges nappes alluviale/rivière entre un milieu poreux (alluvions dans lesquels s'écoulent les eaux souterraines) et les cours d'eau se font à travers les interstices des sédiments du fond en aval des ruptures de pente, comme des seuils ou des bancs de sable ou de galets (figure 30 page suivante). Les apports d'eau de nappe induisent une augmentation de l'abondance des invertébrés adaptés à la vie souterraine (aveugles, dépigmentés, appelés stygobies - photo 10 et photo 11) qui peuvent alors être échantillonnés à 50 cm de profondeur à l'intérieur des sédiments.

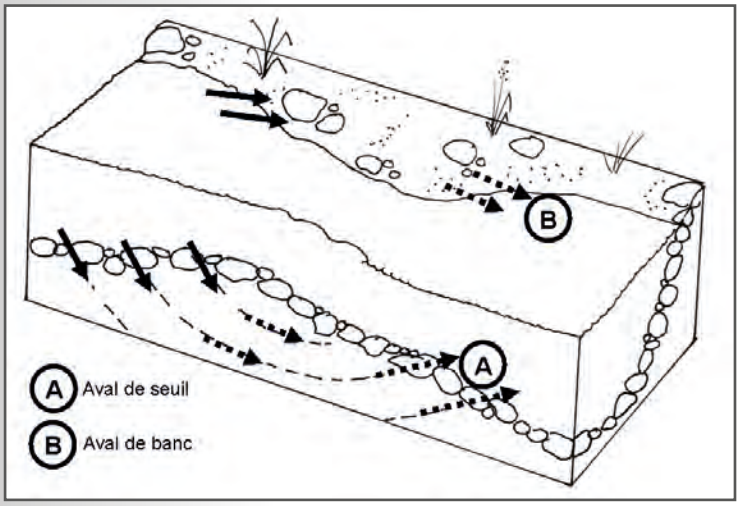
Inversement les échanges de la rivière vers la nappe ont généralement lieu en amont des ruptures de pente (amont de seuil ou de banc) et induisent une diminution du nombre de stygobies au profit des organismes de surface qui accompagnent l'eau superficielle s'infiltrant dans les sédiments. Enfin, l'absence d'échange sera plutôt caractérisée par une forte diminution des deux types d'invertébrés (stygobies et de surface) particulièrement dans le cas d'un colmatage des interstices par des éléments minéraux ou organiques.

© Université Lyon 1, E3S

Photo 10. *Exemple d'invertébré souterrain :* Niphargus rhenorhodanensis.

© Université Lyon 1, E3S

Photo 11. *Exemple d'invertébré souterrain :* Proasellus cavaticus.



© P. Marmonier

Figure 30. *Localisation des zones de remontée potentielle d'eau souterraine vers la surface en aval de seuil et en aval de banc.*

En complément, l'identification à l'espèce des invertébrés stygobies peut potentiellement renseigner sur l'origine de ces eaux remontant dans les sédiments. En effet, certaines espèces sont caractéristiques d'habitats particuliers : milieu hyporhéique de faible profondeur (sous-écoulement de la rivière) ou au contraire d'eau profonde (réseaux karstiques ou nappes phréatiques). Toutefois, toutes les régions françaises ne possèdent pas le même pool d'espèces stygobies : la faune souterraine est plus pauvre en altitude qu'en plaine, plus riche dans le sud-ouest et tout l'est de la France, plus pauvre à l'ouest et au nord du pays. La capacité de discrimination de la communauté hyporhéique doit être replacée dans ce contexte biogéographique.

Protocole de mesure des échanges

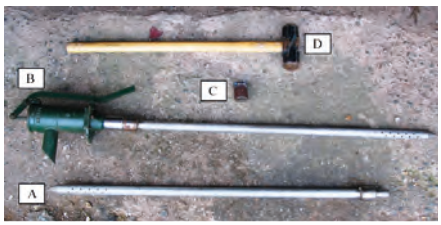
- Sélection des sites d'échantillonnage des invertébrés hyporhéiques sur cartes ou photographies aériennes, en localisant et numérotant les bancs de galets ou les seuils. Repérer les sources latérales
- Échantillonnage à réaliser après une période d'étiage de deux à trois semaines
- Protocole d'échantillonnage : pomper un volume de 10 L d'eau interstitielle à 50 cm sous la surface des sédiments à l'aide d'un piézomètre mobile et d'une pompe manuelle de manière à capturer les organismes hyporhéiques et mesurer quelques caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles (encart : L'essentiel du protocole). Cet échantillonnage se fait avec du matériel adapté (encart : Dispositifs/matériel, Bou et Rouch, 1967)
- Réaliser des échantillons dans des zones de remontée potentielle d'eau souterraine (aval de rupture de pente, seuil ou banc de galets), de manière extensive d'amont en aval du secteur à étudier (classiquement de un à trois points par km)
- Réaliser trois réplicats espacés de un à trois mètres par point échantillonné
- Échantillonnage pouvant être complété par l'étude de la faune de sources (échantillonnée au filet Surber) et de puits (échantillonnée par pompage ou au filet Cvetkov, photos 12 et 13). Ces sources et puits doivent être localisés en bordure de la vallée alluviale ou dans les systèmes karstiques proches, de manière à estimer le pool local d'espèces stygobies présent dans le secteur biogéographique étudié

L'essentiel du protocole

1. Choisir le point d'échantillonnage en bordure du cours d'eau
2. Planter le piézomètre mobile à l'aide de la tête de frappe et de la masse jusqu'à 50 cm de profondeur sous la surface des sédiments
3. Pomper 10 L d'eau interstitielle dans un seau et le filtrer sur un tamis de 100 µm, fixer à l'alcool 96°, ajouter une étiquette
4. Aspirer 100 mL d'eau en faisant attention à éviter les bulles d'air pour les mesures de la conductivité, de température et de la teneur en oxygène dissous de l'eau interstitielle *in situ*
5. Prélèvement d'eau interstitielle et analyse d'éléments dissous en laboratoire

© C. Piscart

Photo 12. *Filets de type Cvetkov nécessaires pour un échantillonnage complémentaire de faune dans des puits dont la profondeur totale (>17m) ou le niveau piézométrique (>8m) ne permettent pas l'utilisation d'une pompe manuelle.*



© P. Marmonier & C. Piscart.

Photo 13. *Équipement nécessaire pour un pompage à l'aide de la méthode Bou-Rouch ;* **a** *: sonde en acier avec crépine ;* **b** *: pompe à piston placée sur la sonde ;* **c** *: tête de frapper ;* **d** *: masse.*

Dispositifs / matériel

Matériel de prélèvement complémentaire en puits ou piézomètres

Pompe manuelle à clapet
Tuyau d'arrosage renforcé (15 m)
Filet phréatobie Cvetkov à maille 100µm (Photo 12)
Seaux (10L de 1 à 5)
Flacons (boites) pour échantillons
Étiquettes + marqueur
Alcool à 96°
Eau de rinçage et d'amorçage de la pompe manuelle
Pissettes

Matériel de prélèvement dans la zone hyporhéique

Piézomètre métallique
Pompe manuelle à clapet de type Bou-Rouch (Photo 13)
Masse et tête de frappe
Clef à chaîne
Pompe péristaltique ou grosse seringue
Filet à maille 100µm
Seaux (10l de 1 à 5)
Flacons (boites) pour échantillons
Étiquettes + marqueur
Alcool à 96°
Eau de rinçage
Pissettes

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier

- Réaliser deux échantillons d'eau (surface et interstitielle) prélevés à l'aide d'une pompe péristaltique ou d'une grosse seringue pour la mesure de la température (°C), la conductivité électrique (µS/cm), la teneur en oxygène dissous (mg/l) et de certains ions pouvant indiquer l'origine de l'eau hyporhéique (classiquement calcium, nitrates, sulfates et chlorures)
- Réaliser trois réplicats de ces mesures
- De même que pour la faune stygobie, il est indispensable de connaitre les caractéristiques physico-chimiques des eaux des aquifères latéraux en analysant l'eau de sources ou de puits situés sur ces aquifères

Interprétation des données et des résultats

Après le tri des organismes au laboratoire et l'identification des grands groupes, une identification plus fine permettra de séparer les organismes de surface des stygobies, particulièrement chez les Mollusques et les Crustacés. Une identification à l'espèce de certains Ordres peut être confiée à des spécialistes et permettra une interprétation plus fine, incluant par exemple l'origine de l'eau.

Le calcul de l'indice d'échange rivière/nappe (encart : Formule de calcul page suivante) est basé sur l'abondance (N) des organismes stygobies classés selon les quatre groupes écologiques auxquels appartiennent les espèces (Marmonier *et al.*1993, Dole-Olivier *et al.* 1993) :

- **N1**, abondance d'organismes ubiquistes vivant à faible profondeur dans les sédiments dans une grande diversité d'habitats souterrains ;
- **N2**, abondance d'organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéiques du fleuve à faible profondeur ;
- **N3**, abondance d'organismes stygobies ubiquistes présents à toutes les profondeurs dans le fleuve, la nappe et les karsts ;
- **N4**, abondance d'organismes phréatobies présents uniquement à forte profondeur dans la nappe alluviale ou espèces strictement karstiques.

Valeurs guides et repères

- Principaux groupes stygobies : Mollusques, Crustacés Amphipodes, Ostracodes, Isopodes, Syncarides et Copépodes
- Taille des invertébrés souterrains : de moins d'un mm (par ex. *Microcharon*) à plus d'1 cm (par ex. *Niphargus* - Photo 10)
- Durée de vie moyenne des invertébrés souterrains : plusieurs mois à plusieurs années (rythme physiologique ralenti)
- Caractéristiques des stygobies : diminution ou disparition des yeux (anophtalmie), perte des pigments (dépigmentation) donnant un aspect blanchâtre aux organismes (Photo 10)
- Nombre d'espèces stygobies en France : plus de 400 espèces dont près de 60 % de Crustacés
- Abondance des stygobies et valeurs de l'indice *IE* : il varie avec la région biogéographique considérée (zone karstique ou non, zone sous influence des dernières glaciations ou non…). En zone riche en stygobies : *IE* fort au-delà de 100, IE intermédiaire de 20 à 100 et *IE* faible inférieur à 20
- Conductivité des eaux souterraines : elle varie avec la nature géologique du substratum et les classes de conductivité doivent être contextualisées : 1) conductivité des eaux interstitielles similaire à la valeur mesurée dans les eaux de surface, 2) intermédiaire entre eau de surface et nappe environnante, 3) proche de la valeur mesurée dans les sources ou les puits de la plaine alluviale ou des systèmes karstiques proches
- Oxygénation des eaux souterraines : trois classes peuvent être considérées : 1) moins de 2 mg/L valeur faible, 2) de 2 à 3 mg/L valeur moyenne, 3) plus de 3 mg/L valeur forte
- Température des eaux souterraines : comme pour la conductivité, les classes de température doivent être contextualisées : 1) température des eaux interstitielles similaire à la valeur mesurée dans les eaux de surface, 2) intermédiaire entre eau de surface et nappe environnante, 3) proche de la valeur mesurée dans les sources ou les puits de la plaine alluviale ou des systèmes karstiques proches

Résultats : exemple de la plaine du Rhin

La richesse de la faune stygobie dans la zone étudiée est probablement liée à une intense recolonisation de la plaine alluviale du Rhin à partir des refuges périglaciaires. Cette faune est écologiquement très diversifiée, allant d'espèces vivant à faible profondeur dans le chenal à des espèces phréatobies caractéristiques des eaux de nappe. Le bilan partiel en termes d'échanges hydrologiques de juillet 2012 est présenté sur la figure 31 page suivante :

- ✔ les sources situées au nord de la zone d'étude sont alimentées par la nappe (flèches vertes). Une grande diversité d'espèces stygobies a été mise en évidence (espèces ubiquistes et caractéristiques d'eau profonde). Les valeurs élevées en chlorures, nitrates et en conductivité par rapport aux autres types de milieux confirment ces arrivées d'eau en provenance de l'aquifère. La rivière NE ne présente que peu ou pas d'échange avec la nappe (croix bleue), son sédiment étant colmaté par des particules fines. Bien qu'une espèce d'eau profonde soit présente dans la source BW, la faible conductivité mesurée semble indiquer plutôt un mélange avec l'eau du Rhin ou du canal de drainage (double flèche verte et orange) ;

Formules de calcul

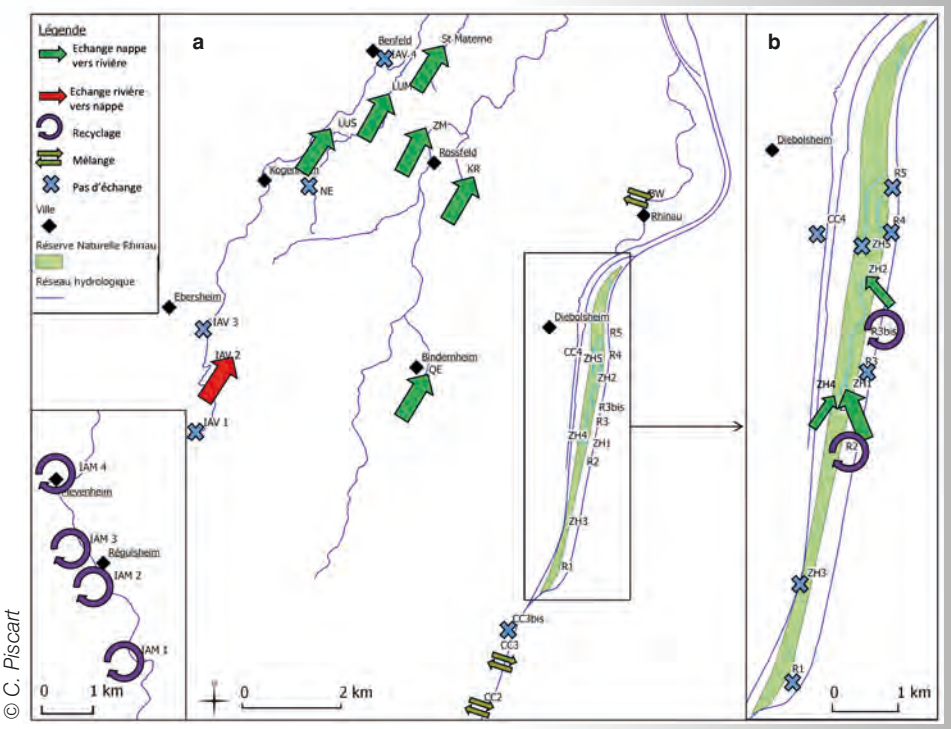
Trophie

Le calcul de l'indice d'échange (*IE*) intègre une pondération des abondances des stygobies par rapport à leurs classes écologiques :

$$IE = N1 + 2.N2 + 5.N3 + 10.N4$$

L'interprétation de l'indice doit être faite en tenant compte (1) de la région biogéographique qui héberge plus ou moins de stygobies, (2) de l'écologie des espèces présentes et (3) de sa cohérence avec les caractéristiques physico-chimiques de l'eau interstitielle au point de prélèvement :

- *IE* fort et eaux interstitielles chargées en éléments minéraux, traduisant un contact long avec le substratum : apports importants d'eau profonde de la nappe ou des karsts latéraux ;
- *IE* intermédiaire : (1) stygobies de classe 3 et eau chargée en ions dissous correspondent à des apports faibles d'eau souterraine profonde ; (2) stygobies de classe 2 et eau peu chargée correspondent à du recyclage de l'eau de surface sur de faibles distances ;
- *IE* faible ou égal à 0 : (1) zone où l'abondance totale de la communauté est forte (nombreux individus vivant en surface) et eau peu chargée et bien oxygénée correspond à de fortes infiltration d'eau de surface vers les sédiments ; (2) zone où l'abondance totale est faible ou nulle et où l'eau est chargée en ions dissous et hypoxique correspond à un secteur aux sédiments colmatés.



© C. Piscart

Figure 31. *Bilan des échanges nappe/rivières sur la plaine alluviale du Rhin pour la métrique invertébrés ;* **a** *: secteur amont de l'Ill et* **b** *: secteur du Rhin court-circuité.*

✔ du point de vue des deux principaux cours d'eau (Ill et Rhin), les échanges y sont très hétérogènes. Les fortes abondances d'organismes récoltés dans une station de l'Ill en aval (en IAV2), pourraient indiquer des exports d'eau de surface vers la nappe (flèche rouge). Sur l'Ill en amont et dans deux stations du Rhin, les fortes densités d'espèces stygobies ubiquistes et de classe 2 traduisant des échanges cycliques sur de courtes distances (flèches arquées violettes).

Points forts

- Offre une source d'information indirecte de l'origine de l'eau (discrimination de différents aquifères) et de sa dynamique (les stygobies intègrent une grande diversité de caractéristiques environnementales)
- Intègre les échanges nappe/rivière sur des durées de l'ordre de plusieurs semaines. En dehors des périodes de crue, les stygobies étant peu mobiles, ils rendent bien compte des échanges moyens au niveau d'une station de prélèvement
- Traduit les effets des changements saisonniers des niveaux relatifs des nappes et du cours d'eau
- Échantillonnage rapide (tableau 18 page suivante) et peu couteux

Informations et données nécessaires

- Exigences écologiques des invertébrés souterrains
- Inventaire des invertébrés souterrains
- Physico-chimie des eaux souterraines : O_2 dissous, température, pH, conductivité, éléments dissous (par ex. nitrates, chlorures, sulfates, calcium ou magnésium pour les zones karstiques)

Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- Lourdeur du tri au laboratoire (tableau 18) qui conduit à des diagnostics ponctuels à l'échelle de la station, donc discontinus sur la longueur des chenaux
- Difficulté d'identification des organismes (réalisée par des spécialistes)
- Connaissance parfois limitée de leur écologie qui ne permet pas toujours de préciser l'origine des eaux souterraines
- Pas de quantification des échanges, échelle locale
- Variabilité biogéographique (présence de systèmes karstiques, altitude, influence des dernières glaciations)

Méthodes complémentaires

- Analyse géomatique des niveaux d'eau (fiche outils n°1)
- Végétation aquatique (fiche outils n° 6)
- Géochimie, notamment isotopes (fiche outils n°5)

Tableau 18. *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la méthode fondée sur les invertébrés souterrains.*

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Échantillonnage des invertébrés souterrains	10 échant. / jour	2
Tri	1 échant. / jour	1
Identification (une affaire de spécialistes de groupes taxonomiques)	1 échant. / 2 jours	1 par groupe
Analyse de données	10	1

Références et liens pour en savoir plus

Bou C., Rouch R. (1967) *Un nouveau champ de recherches sur la faune aquatique souterraine.* C R Acad Sci 265, p. 369-370.

Dole-Olivier M.J., Creuzé des Châtelliers M., Marmonier P. (1993) *Repeated gradients in subterranean landscape - Example of the stygofauna in the alluvial floodplain of the Rhône river* (France). Arch. Hydrobiol., 127, 4, p. 451-471.

Graillot D., Paran F., Bornette G., Marmonier P., Piscart C., Cadilhac L. (2014) *Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges*. SpringerPlus.2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.

Marmonier P. Vervier P., Gibert J., Dole-Olivier M.J. (1993) *Biodiversity in ground waters.* Trends in ecology and evolution 8, p. 392-395.

Personnes ressources

Pierre Marmonier (Écologie souterraine) : UMR CNRS 5203 Lehna, Université Claude Bernard Lyon 1, pierre.marmonier@univ-lyon1.fr

Christophe Piscart (Écologie souterraine) : UMR CNRS 6553 Ecobio, Université de Rennes 1, christophe.piscart@univ-rennes1.fr

Autres méthodes, autres modèles

Autres méthodes

D'autres approches de caractérisation des échanges nappe/rivière n'ont pas été mobilisées dans le cadre du projet Naprom sur lequel s'appuie le guide. Elles sont en cours de développement ou ont déjà fait l'objet d'application opérationnelle.

Voici quelques exemples (voir Flipo *et al.* 2013 et Vernoux *et al.* 2010 pour plus de détails) :

- les mesures thermiques à l'aide de fibres optiques disposées au fond du lit du cours d'eau (Mamer & Lowry, 2013) ;
- la télédétection satellitaire pour caractériser les structures thermiques longitudinales et temporelles d'un grand continuum fluvial (Wawrzyniak, 2012) ;
- les jaugeages différentiels pour déterminer l'évolution amont-aval du débit du cours d'eau (De La Vaissière, 2006) ;
- les traçages pour détecter les chemins de l'eau dans le sous-sol (Petelet-Giraud *et al.* 2007 ; De La Vaissière, 2006) ;
- la reconnaissance physique de terrain du niveau de colmatage des berges et du lit (par ex. carottage, sondage à la pelle mécanique…) ;
- des méthodes géophysiques (par ex. radar ou résistivité électrique pour détecter la position des couches géologiques, voire la position de la nappe phréatique) ;
- méthodes développées pour les relations karst/rivière (Ré-Bahuaud *et al.* 2015). Certains outils présentés dans ce guide peuvent être utilisés pour étudier les relations karst/rivière, par exemple, la géochimie (ions majeurs et isotopes), l'écologie souterraine, l'imagerie infrarouge thermique. D'autres outils peuvent aussi être mobilisés, par exemple, les jaugeages différentiels, les traçages artificiels, la géologie (stratigraphie, tectonique, spéléologie) ;
- …

Autres modèles

Le deuxième outil présenté dans ce guide s'appuie sur la modélisation hydrogéologique et hydrologique. Il existe beaucoup d'autres types de modèles simulant les écoulements d'eau dans un bassin versant que ceux utilisés pour illustrer ce guide.

Sans chercher à faire une liste exhaustive d'approches, on peut citer :

- d'autres méthodes de résolutions des équations dont la méthode des éléments finis (Lalot, 2014), ou la méthode des éléments analytiques (Gaur, 2009) ;
- d'autres conceptualisations des écoulements dans le bassin versant (modèles globaux comme Gardenia BRGM) ;
- modèles statistiques ou semi-physiques, par analyse du signal (Lalot, 2014) ou réseaux de neurones (Johannet *et al.* 2012) ;
- ...

Références et liens pour en savoir plus

De La Vaissière R. (2006). *Étude de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné. Apports de la géochimie et des isotopes dans le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence (Drôme, Sud-Est de la France)*. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre. Université d'Avignon et des pays de Vaucluse.

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

Gaur S. (2009) *Groundwater Simulation-Optimization Modeling using Analytic Element. Method and PSO.* Thèse de doctorat, Indian institute of technology, Delhi.

Johannet A., Taver V., Kong A., Siou L. (2012) *Les réseaux de neurones artificiels pour la modélisation hydrodynamique des aquifères karstiques.* Karstologia n°60, p. 45-59.

Lalot E. (2014) *Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières – Application au Rhône.* Thèse de Doctorat. ENSM-SE.

Mamer E.A., Lowry C.S. (2013) *Locating and quantifying spatially distributed groundwater/surface water interactions using temperature signals with paired fiber-optic cables*, Water Resour. Res., 49, 7670–7680, doi:10.1002/2013WR014235.

Petelet-Giraud E., Brenot A., Arnaud L., Branellec M., Braibant G. (2007) *Étude des relations nappe-rivière en Haute-Normandie, bassin de l'Austreberthe. Approche couplée par modélisation hydrologique et géochimie isotopique*. Rapport final. Rapport RGM/RP-55983-FR, 56 p.

Ré-Bahuaud J., Graillot D., Paran F., Chapuis H., Marmonier P, Creuzé des Châtelliers M., Olivier M.J., Jacquy M., Lawniczak M., Novel M., Jolivet J., Johannet A., Savary M., Salze D., Vayssade B. (2015) *Caractérisation des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines en domaine karstique. Exemple d'un affluent du Rhône, la Cèze (30). Rapport provisoire année 2 (2015)*. Zabr, AE-RMC, UMR 5600 EVS, UMR 5023 Lehna, UMR 7300 Espace, EMA LGEI.

Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E. (2010) *Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE*, rapport BRGM/RP-5 704 4-FR, 207 p.

Wawrzyniak V. (2012) *Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemples dans le bassin du Rhône*. Thèse de doctorat de Géographie et d'Aménagement, Université Lyon 3.

Abréviations, sigles et acronymes

ACP : Analyse en composantes principales

Ades : Banque nationale d'accès aux données sur les eaux souterraines

AE-AG : Agence de l'eau Adour Garonne

AEP : Alimentation eau potable

AE-RMC : Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse

AE-SN : Agence de l'Eau Seine Normandie

Antea : Bureau d'études environnement

Aprona : Association pour la protection de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace

Armines : Association pour la recherche et le développement des méthodes et processus industriels

Arra : Association rivière Rhône-Alpes

Astee : Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement

Banque Hydro : Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations

BD Lisa : Base de données sur les limites des systèmes aquifères

BD Ortho : Base de données orthophotographies (IGN)

BNPE : Banque national sur les prélèvements en eau

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

Carrtel : Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques et écosystèmes limniques

CD : Conseil départemental

Cete : Centre d'étude technique de l'équipement

CFC : Chlorofluorocarbures

CLC : Corine land cover

CNR : Compagnie nationale du Rhône

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

Creseb : Centre de ressources et d'expertise scientifique sur l'eau en Bretagne

DCE : Directive cadre européenne sur l'eau

Dreal : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

Drias : Les futurs du climat, projections climatiques pour l'adaptation de nos sociétés

Driee : Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie

Eau-Dyssée : Projet de modélisation intégrée de l'hydrosystème qui s'appuie sur le couplage de modèles existants

Ecobio : Unité mixte de recherche écosystèmes, biodiversité, évolution

EDF : Électricité de France

EMP : École des mines de Paris

EMSE : École des mines de Saint-Etienne

ENS : École normale supérieure

ETP : Évapotranspiration potentielle

EVS : Unité mixte de recherche environnement ville et société

FCBN : Fédération des conservatoires botaniques nationaux

Feflow : *Finite element subsurface Flow system*

FNE : Association France nature environnement

GMT : *Greenwich mean time*

GPS : *Global positioning system* (système de géolocalisation mondial)

GSE : Géosciences et environnement

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique

HDPE : *Hight density poly-ethylen*

HER : Hydro-écorégion

IDPR : Indice de développement et de persistance des réseaux

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

Inra : Institut national de la recherche agronomique

IR : Infrarouge

Irstea : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

IRT : Infrarouge thermique

Isba-Trip : *Interaction sol biosphere atmosphere - Total runoff integrating pathways*

Isig : Imagerie et systèmes d'information géographique (plateforme UMR EVS 5600)

Lehna : Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés

LMV : Laboratoire magmas et volcans

LW : *Long-wave*

Marthe : Modélisation d'aquifères par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour le calcul hydrodynamique des écoulements

MEEM : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Meso : Masses d'eau souterraines

Mesu : Masses d'eau de surface

Metis (code) : Modélisation de l'écoulement et du transport de masse et d'énergie en milieu aquifère

Metis (UMR) : Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols

MNT : Modèle numérique de terrain

Modcou : Modèle hydrogéologique couplé (écoulement surface/souterrain)

Modflow : *Modular finite-difference flow model*

Molonari : Monitoring local des échanges nappe/rivière

Mosaic : Modélisation des surfaces et interfaces continentales

MW : *Mid-wave*

Naprom : « Nappes-rivières : observation et modélisation »

Noaa : *National oceanic and atmospheric administration*

Onema : Office national de l'eau et des milieux aquatiques

Pascalis : *Protocols for the assessment and conservation of aquatic life in the subsurface*

Piren Seine : Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine

PK : Point Kilométrique (sur le Rhône le PK0 est fixé à Lyon)

ROE : Référentiel des obstacles à l'écoulement

Sage : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux

Sandre : Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau

SBVA : Syndicat de la basse vallée de l'Ain

Sdage : Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux

SEV : Syndicat des eaux du Vivier

SIG : Système d'information géographique

SM3A : Syndicat mixte d'aménagement de l'Arve et de ses abords

SMRD : Syndicat mixte de la rivière Drôme

SPL : Société publique locale

SW : *Short-wave*

Syrah : Système relationnel d'audit de l'hydro-morphologie

Tin : *Triangulated irregular network* (Réseau de triangles irréguliers)

ULM : Ultra-léger motorisé

UMR : Unité mixte de recherche

Zabr-Graie : Zone atelier bassin du Rhône - Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les infrastructures et l'eau

ZH : Zone humide

Tables des illustrations

Tableaux

Tableau 1 : *Présentation synthétique des outils* (Légende et explication : voir partie C, chapitre introductif) 10
Tableau 2 : *Code couleur des principales configurations de la typologie des échanges nappe/rivière*.....23
Tableau 3 : *Grille synthétique - configurations d'échanges prises en compte par les outils*.....28
Tableau 4 : *Éléments fondamentaux caractéristiques des différentes méthodes* 31
Tableau 5 : *Prise en compte des échanges nappe/rivière par chacun des outils* 32
Tableau 6 : *Points forts et points faibles des outils* 33
Tableau 7 : *Incertitudes par outil sur le diagnostic des échanges nappe/rivière : exemples*.....36
Tableau 8 : *Symboles utilisés dans le bandeau synthétique de description de chacune des méthodes* 44
Tableau 9 : *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour l'analyse géomatique des niveaux d'eau*.....51
Tableau 10 : *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la modélisation hydrodynamique*.....56
Tableau 11 : *Gammes de valeurs attribuées aux paramètres de calage sur Échiré (Chatelier, 2014)*.....57
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)* 60
Tableau 13 : *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour les dispositifs Molonari* 68
Tableau 14 : *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour les images thermiques infrarouges (IRT)*. 73
Tableau 15 : *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la géochimie*.....82
Tableau 16 : *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la méthode fondée sur la végétation aquatique*.....85
Tableau 17 : *Les indices de la méthode Braun-Blanquet (1932)* 85
Tableau 18 : *Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la méthode fondée sur les invertébrés souterrains*.....94

Figures

Figure 1 : *Clefs de lecture du guide* 8
Figure 2 : *Apport de la nappe au cours d'eau (ou à des eaux superficielles)* 24
Figure 3 : *Apport du cours d'eau (ou d'eaux superficielles) à la nappe* 25
Figure 4 : *Pas d'échange diagnostiqué entre la nappe et la rivière* 25
Figure 5 : *Colmatage physique ou biologique entre la nappe et la rivière* 26
Figure 6 : *Circulations plus complexes du cheminement de l'eau* 26
Figure 7 : *Recyclage d'eau superficielle dans le cours d'eau par exfiltration/infiltration ou échanges hyporhéiques* ...27
Figure 8 : *Cas particuliers : incision du lit de la rivière et déconnexion de l'aquifère* 27
Figure 9 : *Carte de superposition des résultats de trois diagnostics sur la Sèvre-Niortaise (Fond Scan 25 IGN)* 37
Figure 10 : *Synthèse croisée des échanges nappe/Sèvre-Niortaise* 38
Figure 11 : *Carte de synthèse des échanges nappes/Rhône à Donzère-Mondragon* 39
Figure 12 : *Principe de caractérisation des échanges avec l'analyse géomatique*.....48
Figure 13 : *Tin (Réseau de triangles irréguliers) représentant le modelé du toit de la nappe alluviale de la plaine du Rhin. Ce Tin est construit à partir des niveaux de nappe issus d'un modèle maillé (Plate-forme Eau-Dyssée)*.....49

Figure 14 : *Caractérisation des échanges nappe/Sèvre-Niortaise par analyse géomatique des niveaux d'eau. L'écoulement de la rivière se fait d'est en ouest*....51
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*....54
Figure 16 : *Différentes configurations d'échanges nappe/rivière (Chatelier et Thiéry, 2011). a : QPercol ; b : et c : QEch ; d : QDébo* 55
Figure 17 : *Les étapes essentielles de la modélisation* 56
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)*....59
Figure 19 : *Exemple de résultats obtenus le long du Rhin dans le fossé rhénan* 61
Figure 20 : *Exemple de maillage du modèle hydro-thermique 2D vertical à 3 couches. Station Molonari (Mouhri* et al. *2013*)....66
Figure 21 : *Carte des échanges nappe/rivière à l'échelle du bassin des Avenelles, obtenue par extrapolation des estimations des débits échangés à l'échelle des sections Molonari : l'exfiltration est dominante sur les tronçons rouges et l'infiltration sur les tronçons bleus (Mouhri* et al. *2014a, b)* 69
Figure 22 : *Infrarouge (IR) et régions spectrales adjacentes. L'infrarouge thermique (IRT entre 0,8-14 µm) est composé de l'IR proche (SW shortwave), moyen (MW mid-wave) et lointain (LW long-wave) (Vollmer et Möllmann, 2010)* 72
Figure 23 : *Anomalies thermiques estivales sur l'Ain : bras mort froid ; a : et résurgence latérale ; b : Le fond est une orthophoto de 2012 (© IGN BD Ortho® in Wawrzyniak (2015))* 74
Figure 24 : *Courbes d'isovaleurs de la composition isotopique de l'oxygène (δ ^{18}O) annuelle moyenne des précipitations en France (Millot* et al. *2010)* 80
Figure 25 : *Composition isotopique de l'oxygène de l'eau de surface du Rhône, des eaux de la zone hyporhéique à 50 cm de profondeur dans les sédiments, et de la nappe phréatique. Haut-Rhône, secteur de Brégnier-Cordon ; a : secteur dans lequel la zone hyporhéique (Z. Interstitielle), de composition voisine de celle de la nappe, est alimentée majoritairement (> 70%) par la nappe ; b : secteur dans lequel la zone hyporhéique, de composition voisine de celle du Rhône, est alimentée majoritairement par le fleuve* 81
Figure 26 : *Schéma de principe du diagnostic fondé sur la végétation aquatique*....84
Figure 27 : *Mentha aquatica in Montégut (1993)* 86
Figure 28 : *Potamogeton coloratus in Montégut (1993)* 86
Figure 29 : *Estimation de l'intensité des apports phréatiques aux milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon*....87
Figure 30 : *Localisation des zones de remontée potentielle d'eau souterraine vers la surface en aval de seuil et en aval de banc (© P. Marmonier)* 90
Figure 31 : *Bilan des échanges nappe/rivières sur la plaine alluviale du Rhin pour la métrique invertébrés ; a : secteur amont de l'Ille et b : secteur du Rhin court-circuité (© C. Piscart)* 93

Photos

Photo 1 : *GPS monté sur canoë (© J. Jolivet)* 49
Photo 2 : *Mesure GPS sur trépied (© H. Chapuis)* 49
Photo 3 : *Dispositif Molonari sur un petit cours d'eau du bassin versant de l'Orgeval (© F. Paran)*....66
Photo 4 : *Dispositif Molonari sur une rivière plus large du bassin versant de l'Orgeval (© N. Flipo)*....66
Photo 5 : *Sonde de pression/température sur son socle pour extraction de données (© F. Paran*) 66
Photo 6 : *Sonde hyporhéique à quatre capteurs verticaux de température (© N. Flipo)* 70
Photo 7 : *Sonde hyporhéique à quatre capteurs verticaux de température connectés à leur datalogger (© N. Flipo)* ...70
Photos 8 : *Trois des vecteurs aéroportés utilisés ; a : le drone Drelio ; b : l'hélicoptère Robinson R22 et c : le para-moteur* (© plateforme ISIG) 73
Photo 9 : *a : Caméras IRT VarioCAM® hr head et b : hr research (© Infratec)*....73

Photo 10 : *Exemple d'invertébré souterrain : Niphargus rhenorhodanensis (© Université Lyon 1, E3S)* 89
Photo 11 : *Exemple d'invertébré souterrain : Proasellus cavaticus (© Université Lyon 1, E3S)*.....89
Photo 12 : *Filets de type Cvetkov nécessaires pour un échantillonnage complémentaire de faune dans des puits dont la profondeur totale (>17m) ou le niveau piézométrique (>8m) ne permettent pas l'utilisation d'une pompe manuelle (© C. Piscart)* 91
Photo 13 : *Équipement nécessaire pour un pompage à l'aide de la méthode Bou-Rouch ; a : sonde en acier avec crépine ; b : pompe à piston placée sur la sonde ; c : tête de frapper ; d : masse (© P. Marmonier & C. Piscart)* 91

Ce guide est téléchargeable (en intégralité ou par partie) ainsi que des grilles de description :

www.onema.fr/Guide-Interactions-nappe-riviere

Citation : Paran F., Augeard B. (coordinateurs), 2017. Guide technique Interactions nappe/rivière : des outils pour comprendre et mesurer les échanges. Agence française pour la biodiversité, collection *Guides et protocoles*, 102 pages

ISBN : 978-2-37785-003-7

Edition : Véronique Barre, Béatrice Gentil-Salasc

Iconographie : Bluelife

© AFB, avril 2017

La démarche et les outils présentés dans ce guide permettent de diagnostiquer qualitativement et quantitativement les échanges nappe/rivière en tenant compte du degré plus ou moins élevé d'anthropisation. De tels diagnostics contribueront à la préservation de la ressource en eau, des nappes phréatiques et de la biodiversité aquatique sur les bassins versants à enjeux importants. Ils sont issus de travaux de recherche et applicables en contexte alluvionnaire et sédimentaire.

Le guide propose une démarche (parties A et B) qui aidera le lecteur à choisir les outils adaptés à son terrain et à ses enjeux et à en interpréter les résultats. Les outils (partie C) sont présentés sous forme de fiches techniques donnant un accès rapide à l'information nécessaire pour les comprendre et les mettre en œuvre : principe, données nécessaires, protocole de mesure, interprétation, exemple de résultats, valeurs guides, points forts et points faibles... Les outils proposés sont les suivants : analyse géomatique des niveaux d'eau, modèles hydrodynamiques distribués à base physique, modèles hydrothermiques à base physique et dispositifs de mesure de température et d'écoulements d'eau, image thermique infrarouge, géochimie, végétation aquatique, invertébrés souterrains.

Ce guide s'adresse avant tout aux gestionnaires de l'eau qui, pour gérer de façon durable leurs ressources en eau, doivent s'intéresser aux interactions nappe/rivière. Les informations et la démarche proposées ont donc pour objectif principal d'aider l'utilisateur à mettre en œuvre et réaliser par lui-même une étude pour caractériser les échanges nappe/rivière ou à rédiger le cahier des charges pour la sous-traiter.

AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT

Zones Ateliers
LTER FRANCE

ARMINES

http://www.afbiodiversite.fr/