

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).

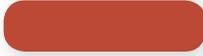
3.2. Présentation de la typologie

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'une 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

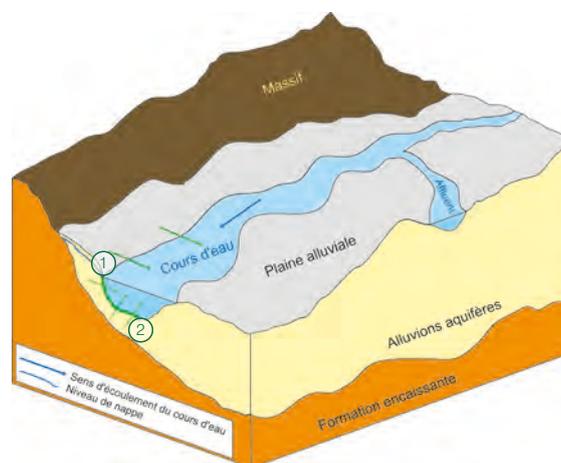
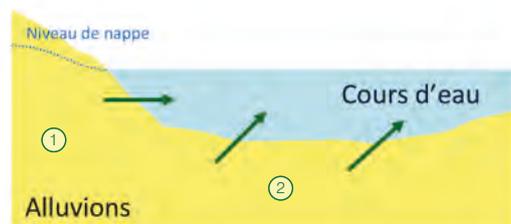


Figure 2. Apport de la nappe au cours d'eau (ou à des eaux superficielles).

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

- ③ apport latéral
- ④ apport par le fond

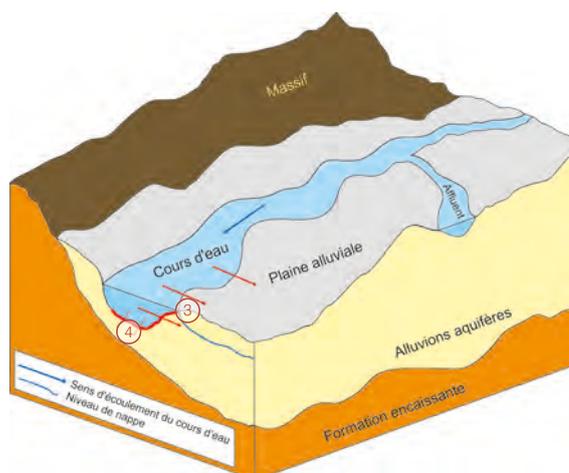


Figure 3. Apport du cours d'eau (ou d'eaux superficielles) à la nappe.

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

- ⑤ pas d'échange

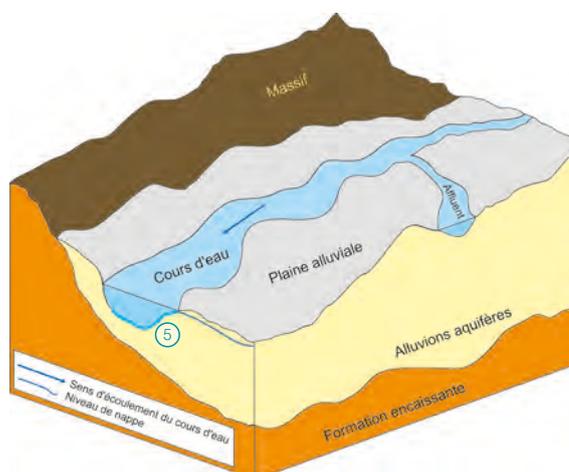


Figure 4. Pas d'échange diagnostiqué entre la nappe et la rivière.

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

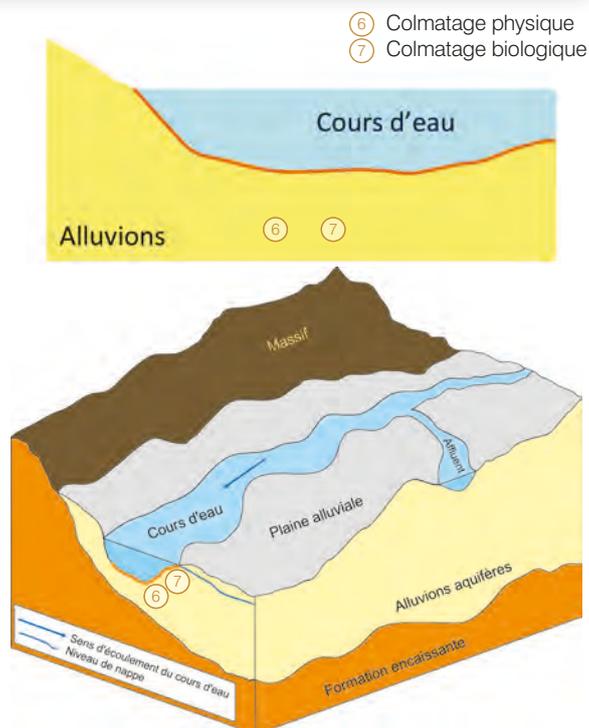


Figure 5. Colmatage physique ou biologique entre la nappe et la rivière.

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

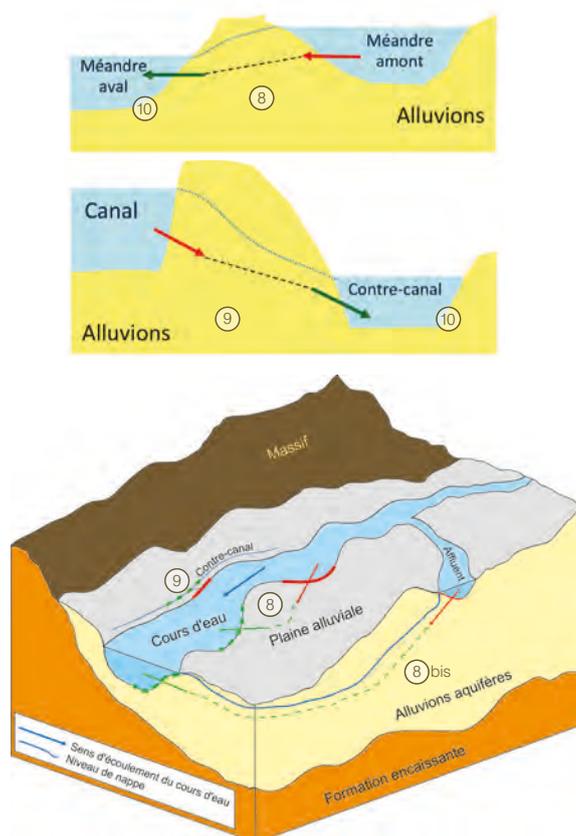


Figure 6. Circulations plus complexes du cheminement de l'eau.

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

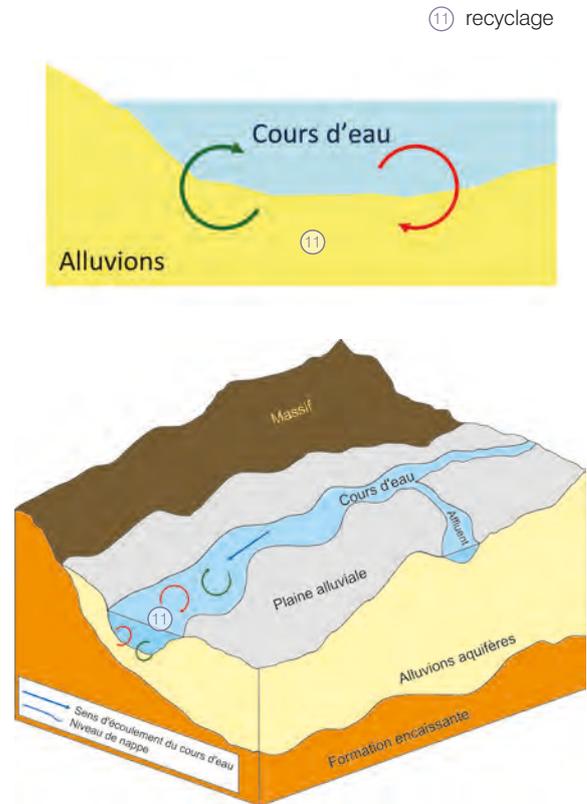


Figure 7. Recyclage d'eau superficielle dans le cours d'eau par exfiltration/infiltration ou échanges hyporhéiques.

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.

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

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).

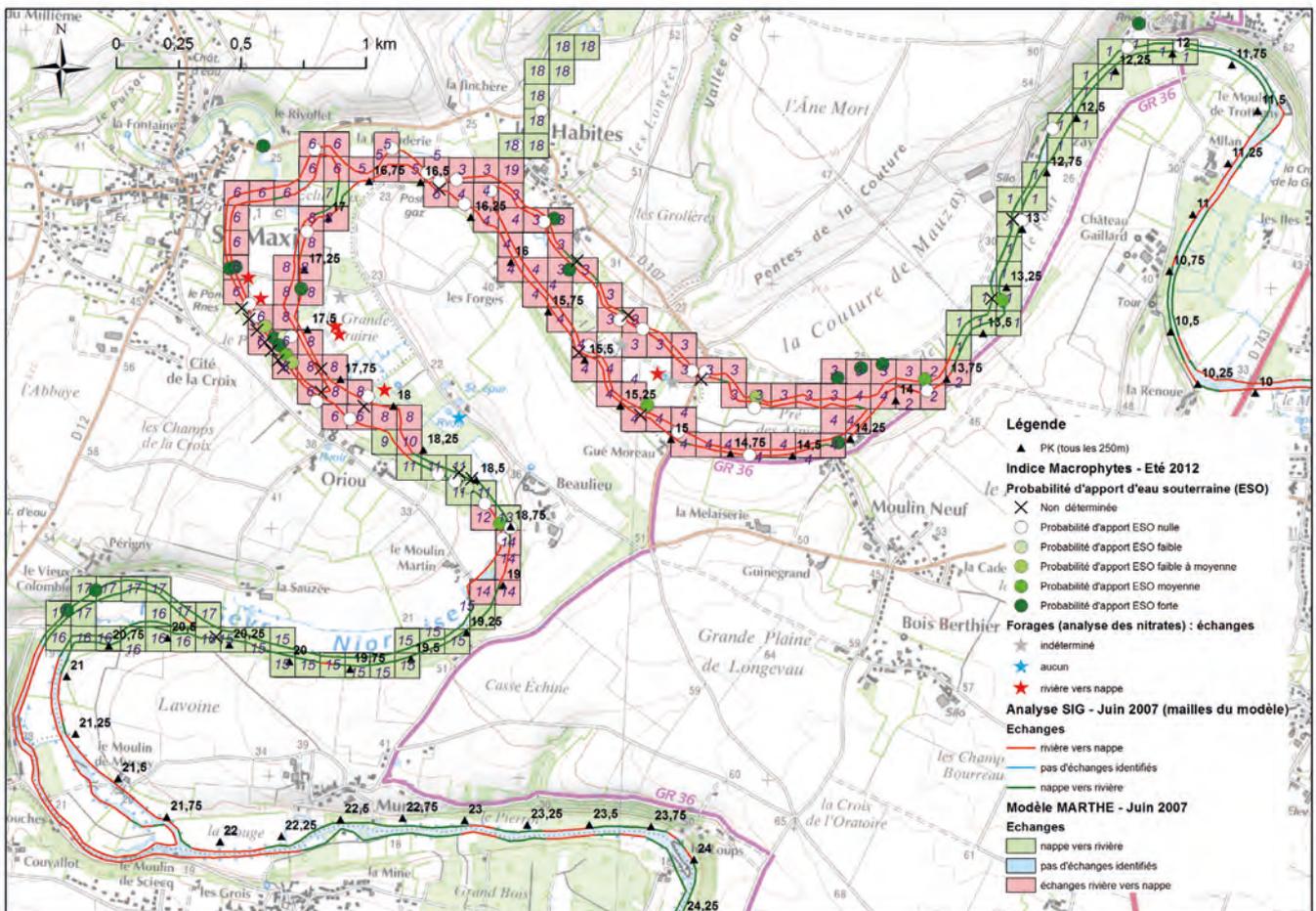


Figure 9. Carte de superposition des résultats de trois diagnostics sur la Sèvre-Niortaise (Fond Scan 25 IGN).

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.

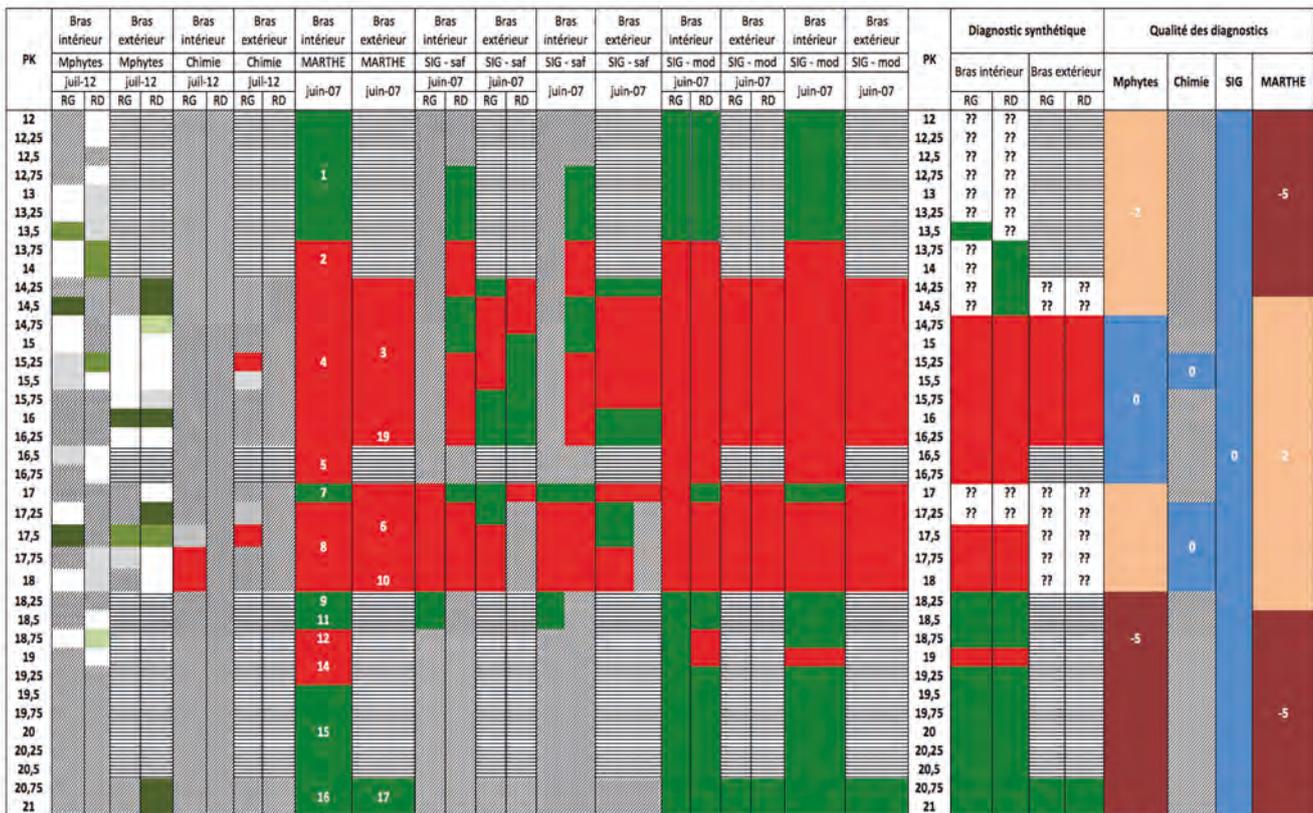


Figure 10. Synthèse croisée des échanges nappe/Sèvre-Niortaise.

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	
[Hatched]	1 seul bras de rivière
[Grey]	Pas de mesures ou de données
Macrophytes	
[Light Green]	Non Indéterminée
[Light Green]	Probabilité apport nappe nulle
[Light Green]	Probabilité apport nappe faible
[Light Green]	Probabilité apport nappe faible à moyenne
[Light Green]	Probabilité apport nappe moyenne
[Light Green]	Probabilité apport nappe forte
Marthe et SIG	
[Red]	Rivière vers nappe
[Green]	Nappe vers rivière
Diagnostic synthétique	
[??]	Forte incertitude
[Red]	Rivière vers nappe
[Green]	Nappe vers rivière
Qualité du diagnostic	
[Blue]	Bonne évaluation
[Orange]	Incertain
[Red]	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.

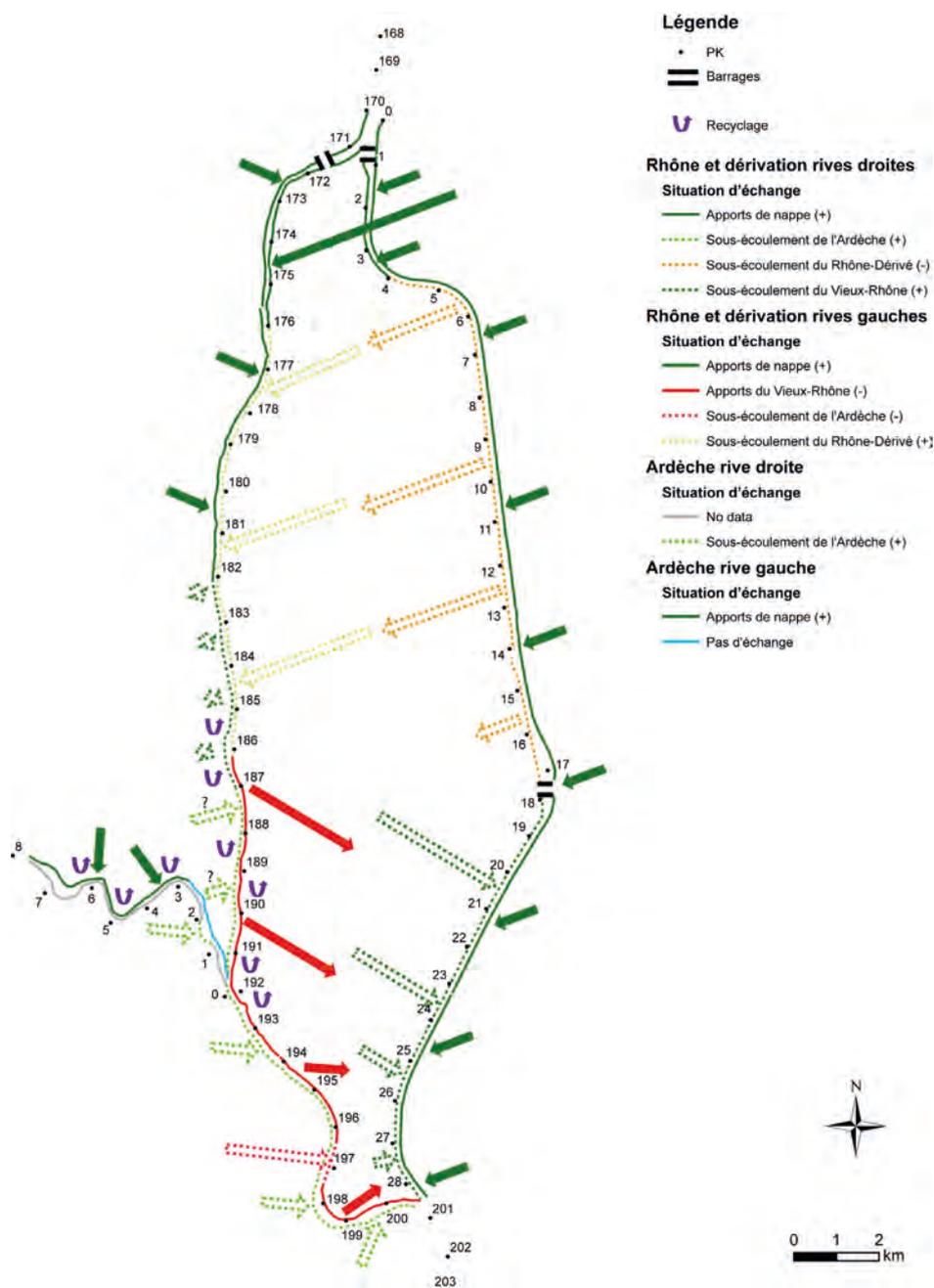


Figure 11. Carte de synthèse des échanges nappes/Rhône à Donzère-Mondragon.

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)