



Caractérisation des échanges nappes/rivières de l'échelle du tronçon à l'échelle régionale par métrique expérimentale ou modélisation

NAPROM (*NAPPes-Rivières : Observation et Modélisation*)
Rapport final (2011-2014)

D. Graillot, F. Paran, F. Dujardin, E. Lalot : ENSM-SE, GSE, EVS, UMR CNRS 5600

P. Marmonier, G. Bornette, M. Novel : LEHNA, UMR CNRS 5023

C. Piscart : ECOBIO, UMR CNRS 6653

F. Arthaud : CARRTEL, UMR CNRS042

N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes : Mines ParisTech, Géosciences

F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin : Sisyphe, UMR CNRS 7619

G. Tallec : Irstea, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés

M. Chatelier, O. Douez : BRGM

P. Maugis : LSCE, UMR CNRS 8212

B. Augeard : Correspondant Onema (DAST)

Juillet 2014

Dans le cadre de :
Gestion quantitative des ressources en eau

En partenariat avec :
BRGM et Irstea

Fiche signalétique du document

Destinataire du document : ONEMA

Coordonnées complètes : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), Direction Générale, "Le Nadar"
Hall C, 5, square Félix Nadar, 94300 Vincennes

Interlocuteur : Bénédicte Augeard

Date : Juillet 2014

Caractérisation des échanges nappes/rivières
de l'échelle du tronçon à l'échelle régionale
par métrique expérimentale ou modélisation
2011-2014

Statut du rapport :	Version provisoire	☐
	Version intermédiaire	☐
	Version de travail	☐
	Version finale	☒

Auteurs :

- UMR 5600 – ENSM-SE – GSE (Didier Graillot, Frédéric Paron, Eric Lalot, Florence Dujardin)
- UMR 5023 – LEHNA – Ecologie souterraine (Pierre Marmonier, Mathilde Novel)
- UMR 5023 – LEHNA – Ecologie végétale (Gudrun Bornette).
- UMR 6653 – ECOBIO (Christophe Piscart)
- UMR 042 CARRTEL (Florent Arthaud)
- Mines ParisTech – Géosciences (Nicolas Flipo, Amer Mouhri, Jean-Pierre Vergnes)
- UMR 7619 – Sisyphe GEOPHY (Fayçal Rejiba, Ludovic Bodet, Roger Guérin)
- UMR 7619 – Sisyphe HYDRO (Florence Habets, Charlotte Thierion)
- IRSTEA – UR Hydrosystèmes et Bioprocédés (Gaëlle Tallec)
- BRGM (Marion Chatelier, Olivier Douez)
- UMR 8212 – LSCE (Pascal Maugis)

Financements complémentaires : aucun

Nombres d'exemplaires édités : 0

Diffusion : ONEMA

Nombres de volumes : 2

Nombres de pages du rapport hors annexes : 209

Nombres d'illustrations hors annexes : 147 (103 figures et 44 tableaux)

Nombre d'annexes : 6

Recueil de cartes : aucun

Mots clefs : écoulements souterrains, eaux de surface, échanges nappes/rivières, hydrologie, hydrogéologie, analyse spatiale, invertébrés souterrains, végétation aquatique, isotopes, modèles

Liste des acronymes

AE : Agence de l'Eau
AEP : Approvisionnement en Eau Potable
ANFIS : Artificial Neuro Fuzzy Interence System
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
BDRHF : Base de Données sur le Référentiel Hydrogéologique Français
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BVRE : bassin versant expérimental et représentatif
CARRTEL : Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques
CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique
CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CIENPPA : Commission Interministérielle d'Étude de la Nappe Phréatique de la Plaine d'Alsace
CLC : CORINE Land Cover
CNR : Compagnie Nationale du Rhône
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
DAST : Direction de l'Action Scientifique et Technique
DCE : Directive Cadre dur l'Eau
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRIEE : Direction Régionale et Interdépartementales de l'Environnement et de l'Énergie
EC2CO : Écosphère Continentale et Côtière
ECOBIO : Écosystèmes, biodiversité, évolution
ENSM-SE : École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne
EVS : Environnement Ville et Société
FIRE : Fédération Île-de-France de Recherche sur l'Environnement
FRAPNA : Fédération Rhône Alpes de Protection de la Nature
GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique
GSE : Géo-Sciences et Environnement
IGN : Institut Géographique National
LEHNA : Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
LR : Languedoc Roussillon
MARTHE : Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulement
MNT : Modèle Numérique de Terrain
NAPROM : NAPpes-Rivières : Observation et Modélisation
ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
PACA : Provence Alpes Côte d'Azur
PLGN : Plan Loire Grandeur Nature
PIREN-Seine : Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'ENvironnement de la Seine
RA : Rhône-Alpes
RMC : Rhône-Méditerranée et Corse
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SIERM : Système d'Information sur l'Eau Rhin-Meuse
SIG : Système d'Information Géographique
SOERE : Systèmes d'Observatoire et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission
Syrah : Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau
TDR : Time Domain Reflectometry
TIN : Triangulated Irregular Network
UMR : Unité Mixte de Recherche
UR : Unité de Recherche
ZABR : Zone Atelier Bassin du Rhône
ZAL : Zone Atelier Loire

Les auteurs

Didier GRAILLOT
Directeur de recherche
grailot@emse.fr

Frédéric PARAN
Ingénieur de recherche
paran@emse.fr

Éric LALOT
Doctorant
lalot@emse.fr

Florence DUJARDIN
Ingénieur de recherche
dujardin@emse.fr

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE)
Centre SPIN
CNRS UMR 5600 EVS
Département Géosciences et Environnement (GSE)
158 cours Claude Fauriel
42023 Saint-Étienne cedex 2

Pierre MARMONIER
Professeur
pierre.marmonier@univ-lyon1.fr

Guðrun BORNETTE
Directeur de recherche CNRS
guðrun.bornette@univ-lyon1.fr

Mathilde NOVEL
Post-doctorante
Mathilde.Novel@univ-lyon1.fr

Université Claude Bernard Lyon 1
CNRS UMR 5023 - LEHNA
Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
Bâtiment Forel
69622 VILLEURBANNE cedex FRANCE

Nicolas FLIPO
Enseignant Chercheur
Nicolas.Flipo@mines-paristech.fr

Amer MOUHRI
Post-doctorant
amer.mouhri@mines-paristech.fr

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMP)
Centre de Géosciences – Systèmes hydrologiques et Réservoirs
35 rue Saint-Honoré
77305 Fontainebleau

Jean-Pierre VERGNES
Post-Doctorant
jean-pierre.vergnes@mines-paristech.fr

Florent ARTHAUD
Maître de conférences
Florent.Arthaud@univ-savoie.fr

Université de Savoie/INRA
UMR 042 Carrtel
Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes
Limniques
CISM, bât. Belledonne 217
73376 Le Bourget-du-Lac Cedex

Christophe PISCART
Chargé de recherche CNRS
christophe.piscart@univ-rennes1.fr

Université de Rennes 1
UMR CNRS 6553 - ECOBIO
Campus de Beaulieu - Bat 14A
263 Avenue du général Leclerc
35042 RENNES Cedex

Florence HABETS
Chargé de recherche
florence.habets@mines-paristech.fr

Charlotte THIERION
Doctorante
charlotte.thierion@mines-paristech.fr

Fayçal REJIBA
Maître de conférences
faycal.rejiba@upmc.fr

Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
UMR 7619 Sisyphe
4 place Jussieu
75252 Paris Cedex 05

Ludovic BODET
Maître de conférences
ludovic.bodet@upmc.fr

Roger GUERIN
Professeur
roger.querin@upmc.fr

Gaëlle TALLEC
Ingénieur de recherche
gaelle.taltec@irstea.fr

Irstea
UR Hydrosystèmes et Bioprocédés
1 rue Pierre-Gilles de Gennes
92761 Antony Cedex

Marion CHATELIER
Ingénieur
M.Chatelier@brgm.fr

BRGM Service géologique régional
Poitou-Charentes
5 rue de la Goélette
86280 SAINT-BENOIT

Olivier DOUEZ
Ingénieur
o.douez@brgm.fr

Les correspondants

ONEMA - DAST: Bénédicte AUGÉARD (benedicte.augeard@onema.fr) depuis 2013 et Pascal MAUGIS jusqu'en 2012

Partenaires : BRGM, Irstea

Droits d'usage	Accès libre
Couverture géographique	Fleuve Loire (Plaine du Forez), Fleuve Rhône (Plaine du Tricastin), Fleuve Rhin (Plaine de l'Ill), Fleuve côtier Sèvre-Niortaise, Orgeval (Bassin de la Seine)
Niveau géographique	National
Niveau de lecture	Professionnels, experts
Nature de la ressource	Document, Fiches de synthèse

**Caractérisation des échanges nappes/rivières de l'échelle du tronçon à l'échelle régionale
par métrique expérimentale ou modélisation**

*D. Graillot, F. Paran, E. Lalot, F. Dujardin, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, M. Novel, F. Arthaud,
N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin,
G. Talleg, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis, B. Augéard*

Table des matières synthétique

<i>Fiche signalétique du document</i>	<i>I</i>
<i>Liste des acronymes</i>	<i>III</i>
<i>Les auteurs</i>	<i>V</i>
<i>Les correspondants</i>	<i>VII</i>
<i>Table des matières synthétique</i>	<i>IX</i>
<i>Résumé</i>	<i>XI</i>
<i>Abstract</i>	<i>XII</i>
<i>Synthèse pour l'opérationnel du projet NAPROM (2011-2014)</i>	<i>XIII</i>
1. Introduction	1
1.1. Contexte et objectifs.....	1
1.2. Description du projet recherche	2
1.3. Structuration du rapport	3
2. Approche multi-métrique : méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières	5
2.1. Analyse géométrique SIG de caractérisation des échanges nappes (alluviales)/rivières [ENSM-SE]	5
2.2. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques [UMR 5023].....	8
2.3. Principes de la méthode de diagnostic des échanges nappes/rivière à l'aide des macrophytes [UMR 5023]	10
2.4. Modèle hydrodynamique du champ captant de Saint-Maxire/Échiré sur le bassin de la Sèvre-Niortaise [BRGM].....	14
2.5. Géophysique, Métrique MOLONARI et Modèle METIS sur le bassin de l'Orgeval [Mines ParisTech + Sisyphe Geophy + Irstea]	19
2.6. Modélisation hydrogéologique couplée surface-souterrain avec la plate-forme Eau-Dyssée sur le bassin du Rhin supérieur [Sisyphe Hydro].....	21

3. Approche multi-site : présentations des cinq sites sélectionnés	27
3.1. Rhône aval (Donzère-Mondragon) [ENSM-SE + UMR 5023]	27
3.2. Sèvre-Niortaise (Champ captant de Saint-Maxire/Échiré) [BRGM]	32
3.3. Rhin supérieur (Plaine de l'Il) [Sisyphe Hydro + UMR 5023]	38
3.4. Loire amont (Plaine du Forez – Écozone) [ENSM-SE + UMR 5023]	40
3.5. Seine (Orgeval) [Mines ParisTech + Sisyphe Geophy + Irstea]	45
3.6. Détenteurs de données et de modèles sur les sites sélectionnés	49
4. Résultats – premiers diagnostics des échanges nappes/rivières	52
4.1. Sèvre-Niortaise – Champ captant de Saint-Maxire/Echiré	52
4.2. Rhône – Donzère-Mondragon / Plaine du Tricastin	92
4.3. Rhin – Plaine de l'Il	96
4.4. Loire amont – Plaine du Forez	125
4.5. Orgeval	128
5. Eléments pour l'élaboration du guide méthodologique	149
5.1. Approche multi-critère : grille de caractérisation des sites et mise au point d'un corpus de métadonnées	149
5.2. Préfiguration d'un glossaire thématique sur les échanges nappes/rivières	150
5.3. Approches multi-métrique : fiches synthétiques de chaque métrique	158
5.4. Protocole de comparaison des métriques	166
6. Conclusion et perspectives	181
6.1. Synthèse du projet	181
6.2. Perspectives : construction et test du guide technique	182
7. Références bibliographiques	183
7.1. Par Site	183
7.2. Métriques hydrologiques	190
7.3. Métriques Biologiques	195
8. Liste des figures et tableaux	197
8.1. Liste des figures	197
8.2. Liste des tableaux	200
9. Table des matières complète	203
10. Sommaire des annexes	209

***Caractérisation des échanges nappes/rivières de l'échelle du tronçon à l'échelle régionale
par métrique expérimentale ou modélisation***

*D. Graillot, F. Paran, E. Lalot, F. Dujardin, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, M. Novel, F. Arthaud,
N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin,
G. Tallec, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis, B. Augeard*

Résumé

Cette action de recherche s'inscrit dans la continuité de projets développés depuis plusieurs années par les partenaires impliqués dans cette action et dans le cadre des zones ateliers (ZABR, PIREN Seine, ZAL) ou en collaboration avec les agences de l'eau (Rhône-Méditerranée et Corse, Seine Normandie,...) sur le thème des échanges hydrologiques entre les rivières et les nappes en relation. L'objectif est de travailler dans différentes configurations géomorphologiques et hydro(géo)logiques pour être en mesure de préconiser à l'échelle nationale des recommandations méthodologiques pour caractériser ces échanges. On cherchera à déterminer des mécanismes transposables en matière d'échanges nappes/rivières sur des typologies de cours d'eau/faciès géologiques identifiées et retenues pour leur représentativité.

En 2011-2012, le travail a consisté à caractériser plusieurs sites qui ont servi ensuite de test pour l'évaluation des échanges entre les nappes et les rivières. Ces sites incluent les grands fleuves des bassins versants du Rhône, de la Loire, du Rhin mais aussi un petit fleuve côtier (la Sèvre-Niortaise) et un sous-affluent de la Seine (Orgeval) qui sont pourvus d'un bassin versant de taille réduite, de plaines alluviales plus petites et de débits plus faibles. Un corpus de métadonnées, régime hydrologique, ouvrages et aménagements, usages de l'eau, altitudes, régime climatique, ou encore sensibilité des milieux, a permis de caractériser chacun des sites test.

En 2012-2014, les échanges nappe/rivière ont été décrits sur chacun des sites en utilisant différentes méthodes ou métriques : l'analyse géométrique SIG des niveaux de nappes (tous les sites), la caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques (Rhône, Rhin, Orgeval), le diagnostic des échanges nappes/rivière à l'aide des macrophytes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise), la modélisation hydrogéologique couplée surface-souterrain (Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval), la géophysique (Orgeval), la chimie des eaux dont les isotopes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise), les méthodes utilisant les données de température (Orgeval, Rhône) et la modélisation hydrothermique (Orgeval). Les méthodes fournissent des informations à des échelles spatiales et temporelles spécifiques, ce qui peut rendre difficile la comparaison des résultats. Une méthode d'analyse croisée est proposée.

Le travail prévu en année 2015 va permettre de réaliser la première mouture d'un guide méthodologique à destination des gestionnaires pour l'évaluation des échanges nappes/rivière dans différents contextes.

MOTS CLÉS (THÉMATIQUE ET GÉOGRAPHIQUE)

Écoulements souterrains, Eaux de surface, Échanges nappes/rivière, Hydrologie, Hydrogéologie, Analyse spatiale, Invertébrés souterrains, Végétation aquatique, Isotopes, Modèles, Loire, Rhône, Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval

Characterization of the hydraulic exchanges between groundwaters and rivers at different spatial scales (river section to regional scale) by experimental metrics or modeling

D. Graillot, F. Paran, E. Lalot, F. Dujardin, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, M. Novel, F. Arthaud, N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin, G. Tallec, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis, B. Augeard

Abstract

This research is linked with different projects which have already been developed for several years by the partners involved in this action and within the framework of French Long Term Environmental Research Observatory (ZABR, PIREN Seine, ZAL) or in association with French water agencies (Rhône-Méditerranée et Corse, Seine-Normandie) on the hydrological theme of the exchanges between rivers and groundwater. The objective is to compare various geomorphological and hydrogeological configurations and to provide methodological recommendations for characterizing these exchanges. We shall try to determine transposable mechanisms about exchanges between groundwater and river, based on identified typologies of rivers and geological configurations, chosen for their representativeness.

In 2011-2012, the work consisted in characterizing several study areas which would serve as tests for the evaluation of the exchanges between groundwater and rivers. It was eventually opted for big river watersheds like Rhône, Loire and Rhine, a small coastal river: Sèvre-Niortaise, and a Seine tributary: Orgeval. The two latter are characterized by smaller watersheds and alluvial plains and lower flows. A set of metadata characterizing each study sites (water regimes, hydraulic works, water uses, elevation, climatic regimes, or the susceptibility of the aquatic media) was generated.

In 2012-2014, the exchanges between groundwater and rivers in each study area were described using the following methods (or metrics): GIS geometric analysis of groundwater levels (all sites), analysis of subterranean invertebrate communities to determine the origin of groundwater (Rhône, Rhin, Orgeval), analysis of aquatic macrophytes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise), development of a coupled surface/ground-water model (Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval), use of geophysical techniques (Orgeval), water chemistry including isotopes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise), temperature measurements (Orgeval and Rhône) and hydrothermal modeling (Orgeval). Each method provides data at a specific spatial and temporal scale, which makes the comparison of the results difficult. A method of cross-analysis of the results is presented.

The main objective in 2015 is to prepare a first version of a methodological guide for water managers on the evaluation of groundwater/surface water exchanges in various contexts.

Key words (thematic and geographical area)

Groundwater flows, Surface waters, Groundwater/river exchanges, Hydrology, Hydrogeology, Spatial analysis, Subterranean invertebrates, Macrophytes, Isotopic analysis, Models, Loire, Rhône, Rhine, Sèvre-Niortaise, Orgeval

***Caractérisation des échanges nappes/rivières de l'échelle du tronçon à l'échelle régionale
par métrique expérimentale ou modélisation***

*D. Graillot, F. Paran, E. Lalot, F. Dujardin, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, M. Novel, F. Arthaud,
N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin,
G. Tallec, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis, B. Augeard*

Synthèse pour l'opérationnel du projet NAPROM (2011-2014)

° Contexte général

Le projet de recherche intitulé NAPROM (NAPpes-Rivières : Observation et Modélisation), lancé par l'Onema en 2011 est animé par Armines. La finalité scientifique est de proposer une synthèse interdisciplinaire des méthodes et outils pour l'identification, la caractérisation et l'évaluation, tant qualitative que quantitative des échanges entre les rivières et les aquifères superficiels qui les jalonnent, en tenant compte de leur degré plus ou moins élevé d'anthropisation (ouvrages, aménagement, projets de restauration, usages de l'eau). A terme (2015), ces travaux permettront de préparer un guide méthodologique pour évaluer qualitativement et quantitativement les échanges nappes/rivières 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.

° Choix des sites et méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières testées

La première partie de ce projet a permis d'identifier des **sites représentatifs où se produisent les interactions entre les fleuves (ou rivières) et leurs nappes associées**. Cette représentativité a été établie selon plusieurs critères : i) l'existence d'enjeux socio-économiques et techniques (préservation de la ressource pour l'AEP, l'irrigation, l'alimentation en eau industrielle, la restauration des cours d'eau et de leurs annexes fluviales), ii) le caractère anthropisé de ces sites (aménagements hydrauliques, canaux de dérivation, bras morts, annexes fluviales), iii) une connaissance préalable du fonctionnement de l'hydrogéosystème (instrumentation, historique de mesures hydrologiques et/ou de prélèvements biologiques, modèles de simulation).

Les sites initialement pressentis sur les bassins versants du Rhône aval, du Rhin supérieur, de la Loire amont, de l'Orgeval (Seine) et de la Sèvre-Niortaise ont pu être finalement validés et constituent un terrain d'étude pertinent de ces interactions entre les nappes et les rivières. Sans explorer, loin s'en faut, toutes les configurations, ces sites sont cependant représentatifs d'une certaine diversité sur le plan des enjeux, des configurations hydrogéologiques et du type de connaissances mobilisables. Leur nombre résulte d'un compromis entre le nombre de sites disposant déjà d'un corpus de connaissance significatif, le volume du projet et la profondeur d'investigation voulue.

Sur le plan des enjeux, on dispose de sites faisant l'objet de programmes de restauration des milieux aquatiques au sens de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau ou DCE (qualité des masses d'eau souterraines, influence des eaux de surface sur les eaux souterraines et réciproquement), de SAGE ou de contrats de rivière. C'est le cas pour le site de Donzère-Mondragon sur le Rhône (Enjeux qualité DCE), de l'Il sur le Rhin (irrigation et eau potable), de l'Orgeval sur la Seine (SAGE, PNR 2 Morin), de l'Écozone du Forez en bordure de Loire (DCE, Natura 2000, irrigation, Plan de gestion Écozone) et du champ captant de Saint-Maxire/Échiré sur la Sèvre-Niortaise (Eau potable). On dispose donc de sites où les enjeux concernent l'AEP, la restauration des milieux aquatiques, l'industrie. Concernant les usages de l'eau, certains sites sont plus sensibles aux activités d'origine agricole (Orgeval, Rhin supérieur, Loire amont, Sèvre-Niortaise) et d'autres davantage soumis aux prélèvements pour l'AEP (Sèvre-Niortaise, Donzère-Mondragon). La Sèvre-Niortaise, par exemple, est soumise à de forts enjeux à la fois qualitatifs (problématiques nitrates et pesticides en nappe et rivière) et quantitatifs (prélèvements). Ces deux enjeux ont des conséquences sur l'AEP et la restauration des milieux naturels.

Sur le plan de l'anthropisation, le site de Donzère-Mondragon comporte de nombreux ouvrages hydrauliques (barrages, canaux d'amenée ou de dérivation, contre-canaux, centrale nucléaire). La Sèvre-Niortaise est elle aussi fortement anthropisée, même si cela est moins spectaculaire que sur Donzère-Mondragon, avec un taux d'étagement supérieur à 70 % à cause des seuils. A l'exception du site de l'Orgeval fortement drainé, les autres sites présentent un plus faible niveau d'anthropisation mais les conflits d'usage de l'eau y sont présents et marqués.

Sur le plan des régimes hydrologiques et des configurations hydrogéologiques, on distinguera les sites où les échanges de la nappe vers la rivière sont a priori dominants (Donzère-Mondragon, Ill amont, Loire) alors que sur l'Orgeval le réseau hydrographique a tendance à alimenter la nappe (même s'il semble exister une différenciation amont-aval du phénomène). Les deux cas de figure existent a priori pour la Sèvre-Niortaise, les échanges étant fortement conditionnés par les pompages. Les variations saisonnières de ces tendances demeurent toutefois à préciser. Les configurations géomorphologiques et les régimes hydrologiques des cours d'eau ne sont pas les mêmes pour tous les sites. La Loire supérieure a un régime fluvial plutôt turbulent avec processus d'enfoncement alors que le Rhin et le Rhône ont des régimes fluviaux relativement plus réguliers. La Sèvre-Niortaise et l'Orgeval ont des débits bien plus faibles avec des modules respectivement de l'ordre de 7 et 0,3m³/s. Les sites choisis sur le Rhône et la Loire correspondent à des nappes essentiellement alluviales relativement peu épaisses (inférieures ou égales à 15m) alors que celui de l'Ill présentent une nappe alluviale plus profonde (jusqu'à 250m d'épaisseur). Ces nappes sont libres (semi-captives par endroit pour le Rhône). La configuration hydrogéologique sur l'Orgeval et la Sèvre-Niortaise est un peu plus compliquée car l'aquifère est multi-couches avec des niveaux captifs.

Sur le plan de la connaissance de ces sites, les équipes impliquées en ont une maîtrise qui repose sur plusieurs dimensions ou métriques : hydrologique, hydrogéologique incluant l'hydrochimie et biologique. Sur l'ensemble des sites retenus il existe des données sur les hauteurs d'eau en rivière et en nappe et des modèles hydrogéologiques préexistants ou en cours de construction avec des approches différentes en matière d'évaluation des échanges nappes/rièrre :

- sur la Sèvre-Niortaise : évaluation quantitative à partir du modèle BRGM (MARTHE) et du suivi nitrates ;
- sur Donzère-Mondragon : évaluation quantitative par modélisation géomatique, par modélisation aux différences finies (MARTHE) et par analyse isotopique, évaluation qualitative par indice biologique (macrophytes et invertébrés souterrains) ;
- sur l'Ill : évaluation quantitative à partir de la plateforme Eau-Dyssée (intégrant le modèle hydrogéologique MODCOU ;
- sur l'Orgeval : évaluation quantitative à partir de la plateforme Eau-Dyssée, géophysique, dispositif MOLONARI et modèle METIS ;
- sur la Loire : évaluation quantitative par modélisation géomatique.

La dimension biologique, invertébrés souterrains et végétation aquatique, qui dans un certain nombre de cas a permis de mieux cerner certains phénomènes (zone hyporhéique non colmatée, conditions climatiques, pollutions des eaux) peut se révéler un indicateur qualitatif pertinent des échanges nappes/rièrre (sens, direction), était initialement davantage présente sur le site de Donzère-Mondragon. Les données sur les prélèvements d'invertébrés souterrains existent sur l'Ill mais doivent être complétées. Sur les autres sites, ces données n'existaient pas. La dimension hydrogéochimique existe sur l'ensemble des sites. Les données isotopiques qui peuvent se révéler pertinentes pour identifier l'origine des eaux et leur altitude de recharge existent sur le site de Donzère-Mondragon.

L'ensemble de ces informations est détaillé, structuré et quantifié quand cela est possible dans les grilles de caractérisation de ces sites. Ces grilles de caractérisation ont été conçues pour déterminer les éléments indispensables et utiles pour l'évaluation des échanges nappes/rièrre à l'échelle souhaitée (tronçon kilométrique ou pluri-kilométrique entre 2 affluents). L'élaboration de ces grilles a constitué l'axe de travail principal depuis le début de l'action de recherche et a permis d'aboutir à un ensemble cohérent de métadonnées pour l'évaluation des échanges. Ces métadonnées serviront à construire le guide méthodologique pour évaluer les échanges nappes/rièrre dans la suite du programme.

Les échanges nappe/rivière ont été décrits sur chacun des sites en utilisant différentes méthodes ou métriques : l'analyse géométrique SIG des niveaux de nappes (tous les sites), la caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques (Rhône, Rhin, Orgeval), le diagnostic des échanges nappe/rivière à l'aide des macrophytes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise), la modélisation hydrogéologique couplée surface-souterrain (Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval), la géophysique (Orgeval), la chimie des eaux dont les isotopes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise), les méthodes utilisant les données de température (Orgeval, Rhône) et la modélisation hydrothermique (Orgeval). Les principes et données nécessaires pour chaque métrique sont indiqués dans la Grille synthétique 1 ; les points forts et points faibles des métriques dans la Grille synthétique 2.

Eléments fondamentaux des différentes méthodes						
Métriques	Contexte hydrogéol.	Principes	Informations nécessaires	Echelle spatiale (description des données)	Echelle spatiale (représentativité des échanges)	Temporalité
Analyse géomatique	Nappe libre connectée 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	Ponctuelle (puits ou piézomètre)	0,5 à 1 km	- Variations saisonnières (si données disponibles) - Instantané sous hypothèse de régime permanent
Invertébrés souterrains	- Nappe libre - Milieu carbonaté dont karst	Composition des communautés d'invertébrés interstitiels	- Exigences écologiques des espèces (stygoxies) - Contexte biogéographique	Ponctuelle (3 réplicats 1m ² sur moins de 100m)	<100 m	- Variations saisonnières - Peu sensible aux fluctuations journalières
Macrophytes	Nappe libre	Composition des communautés de macrophytes	- Exigences écologiques des espèces (trophie, perturbations, apports de nappe) - Contexte biogéographique	Transect (2 m de large tous les 50 m)	0,1 à 2 km (dépend de la densité d'échantillonnage)	Intégration annuelle sur un relevé estival
Chimie eau sup.	Nappe libre	Analyse multivariée des paramètres physico-chimiques des annexes fluviales	- valeurs pour la rivière/fleuve au minimum - valeurs pour la nappe	Ponctuelle	0,1 à 2 km (dépend de la densité d'échantillonnage)	- Saisonnier (nécessite plusieurs dates d'échantillonnage)
Modélisation distribuée à base physique	- Nappe libre - Aquifère multicouche	- Modèle hydrogéologique-IDPR - Code de calcul MARTHE - Equation de diffusivité - volumes finis	- Géométrie du milieu, optionnel : épaisseur d'alluvions - Paramètres hydrodynamiques : perméabilité (k), Transmissivité, coefficient d'échange nappes/rivières, paramètre de Manning (frottement en rivière) - Conditions limites : précipitations, ETP - Conditions initiales et données de calibration et validation : h rivière et nappe (cote), Q rivière (débit)	Maille 100x100 m	Maille 100x100 m	- Régime transitoire - Pas de temps pluriannuel, mensuel et journalier
		- Modèle couplé hydrologique / hydrogéologique - Code Eau-Dyssée - Equation de diffusivité - Différence finie		Maille 200x200 m	Maille 200x200 m	
		- Modèle couplé hydrologique / hydrogéologique - Code CaWaQS ou Eau-Dyssée - Equation de diffusivité - Différence finie		Maille 31,25x31,25 m	Maille 31,25x31,25 m	
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	Nappe libre	- Modèle thermique/hydrogéologique - Code METIS - Equation du transport de chaleur couplée à l'équation de diffusivité - Eléments finis - 2D vertical	- 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	Mailles variables 1 à 10 cm	Section de rivière	- Evénement hydrologique jusqu'à pluriannuelle - Pas de temps horaire
Dispositif MOLONARI	- Nappe libre - Aquifère multicouche	- Mesures hydrogéophysiques - Calcul du gradient hydraulique nappes/rivières - 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	Ponctuelle	Section de rivière	- Evénement hydrologique jusqu'à pluriannuelle - Pas de temps horaire

Grille synthétique 1 : Caractérisation et description des métriques (éléments fondamentaux)

Métriques	Points forts	Points faibles
Analyse géomatique	Rapide, simple, peu de données, extension spatiale, agrégation spatiale	Milieux alluviaux libres uniquement, existence et précision des données de départ
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
Macrophytes	Rapide, peu coûteux, intégration des échanges sur une période annuelle	Présence de végétation, semi-quantitatif, homogénéité de la qualité des eaux
Chimie eau sup.	Peu coûteux	Nécessité d'échantillonner plusieurs fois, données pas toujours fiable (pics liés à productivité primaire, sondes mal calibré, échantillons mal conservés)
Modélisation 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
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	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
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.

Grille synthétique 2 : Points forts et points faibles des métriques

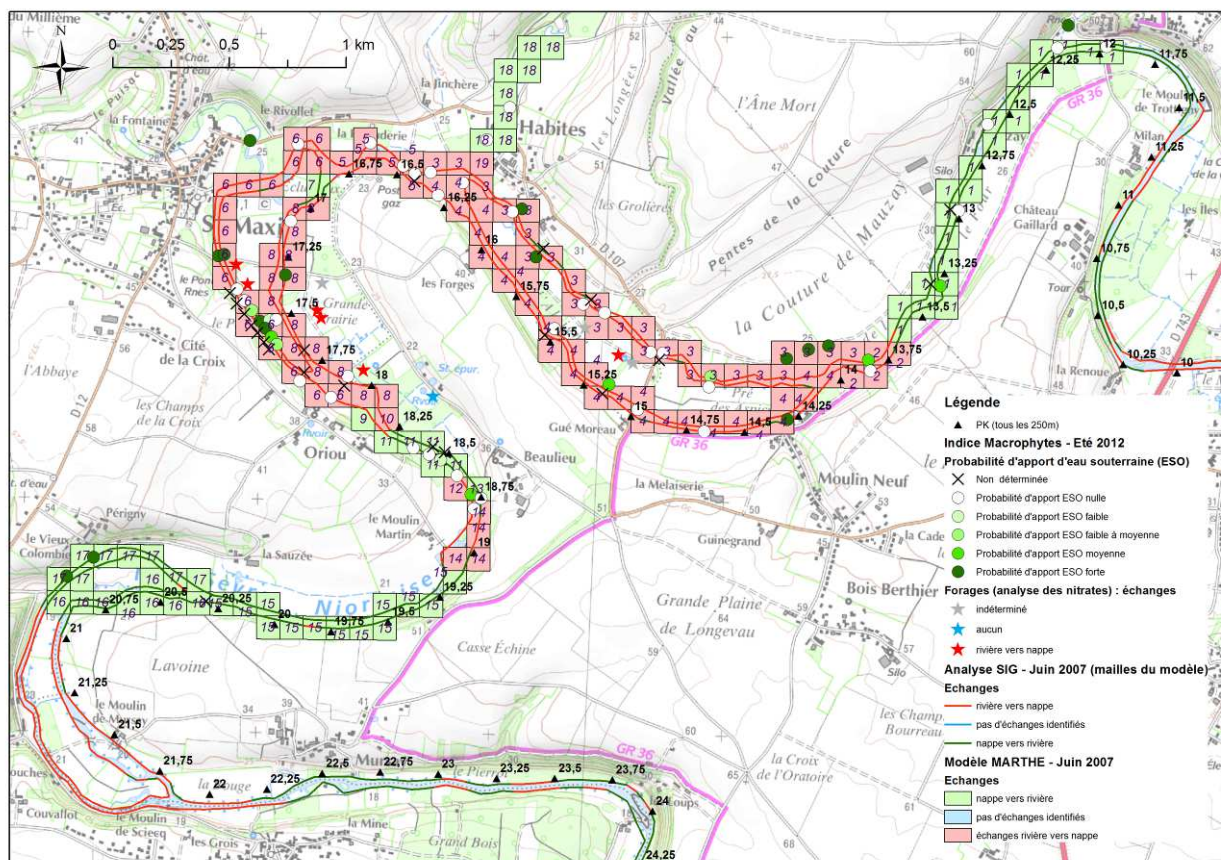
° Ce qu'il faut retenir des travaux sur le site de la Sèvre-Niortaise à Saint-Maxire/Echiré

Métriques testées : analyse géomatique, modélisation distribuée à base physique (MARTHE), chimie des eaux superficielles et souterraines, macrophytes

Résultats sur les échanges nappe/ri vière (Diagnostic synthétique 1) : les résultats de la simulation du modèle MARTHE indiquent que : (i) les apports du fleuve à la nappe sont prédominants et affectent entre 60 et 70 % du linéaire fluvial ; (ii) le sens des échanges est globalement indépendant des caractéristiques climatiques annuelles et de l'état hydrodynamique de la nappe. Le diagnostic d'intensité des apports d'eau souterraine par les macrophytes montre globalement des apports de la nappe à la Sèvre-Niortaise nuls à faibles même si localement, certaines stations témoignent d'apports de forte intensité (ce qui n'est pas reproduit par le modèle, les apports étant sans doute trop ponctuels). La chimie des eaux a été mesurée très ponctuellement et n'a pas pu être utilisée pour le diagnostic des échanges nappes/ri vières le long des tronçons. L'analyse géomatique quant à elle a été utilisée pour faire un test méthodologique : elle montre des résultats similaires à ceux du modèle MARTHE dont elle utilise les données en entrée, mais les échanges peuvent être inversés lorsqu'on diminue la densité de points piézométriques utilisés en entrée.

Résultats sur l'utilisation des métriques :

- La modélisation MARTHE a mis en évidence l'importance de bien connaître la hauteur d'eau en rivière, en particulier sur des linéaires influencés par des seuils.
- La réalisation du diagnostic macrophyte a rencontré trois problèmes : 1) des espèces hors liste ; 2) un couvert végétal faible ; 3) des milieux aquatiques hyper-eutrophes (y compris la nappe).
- La métrique « chimie de l'eau » requiert une collecte importante de données pour être intégrée dans l'analyse.
- L'analyse géomatique est très sensible à la densité des données d'entrée, en particulier dans les zones où les différences de niveaux entre nappe et rivière sont très faibles comme dans un méandre.
- Les débits d'échanges calculés avec l'analyse SIG ont une nette tendance à surestimer les flux échangés par rapport au modèle MARTHE, cela est lié aux hypothèses sur les surfaces d'échange et la perméabilité.



Diagnostic synthétique 1 : Echanges nappes/rivières de la Sèvre-Niortaise à Saint-Maxire/Echiré – Superposition des métriques

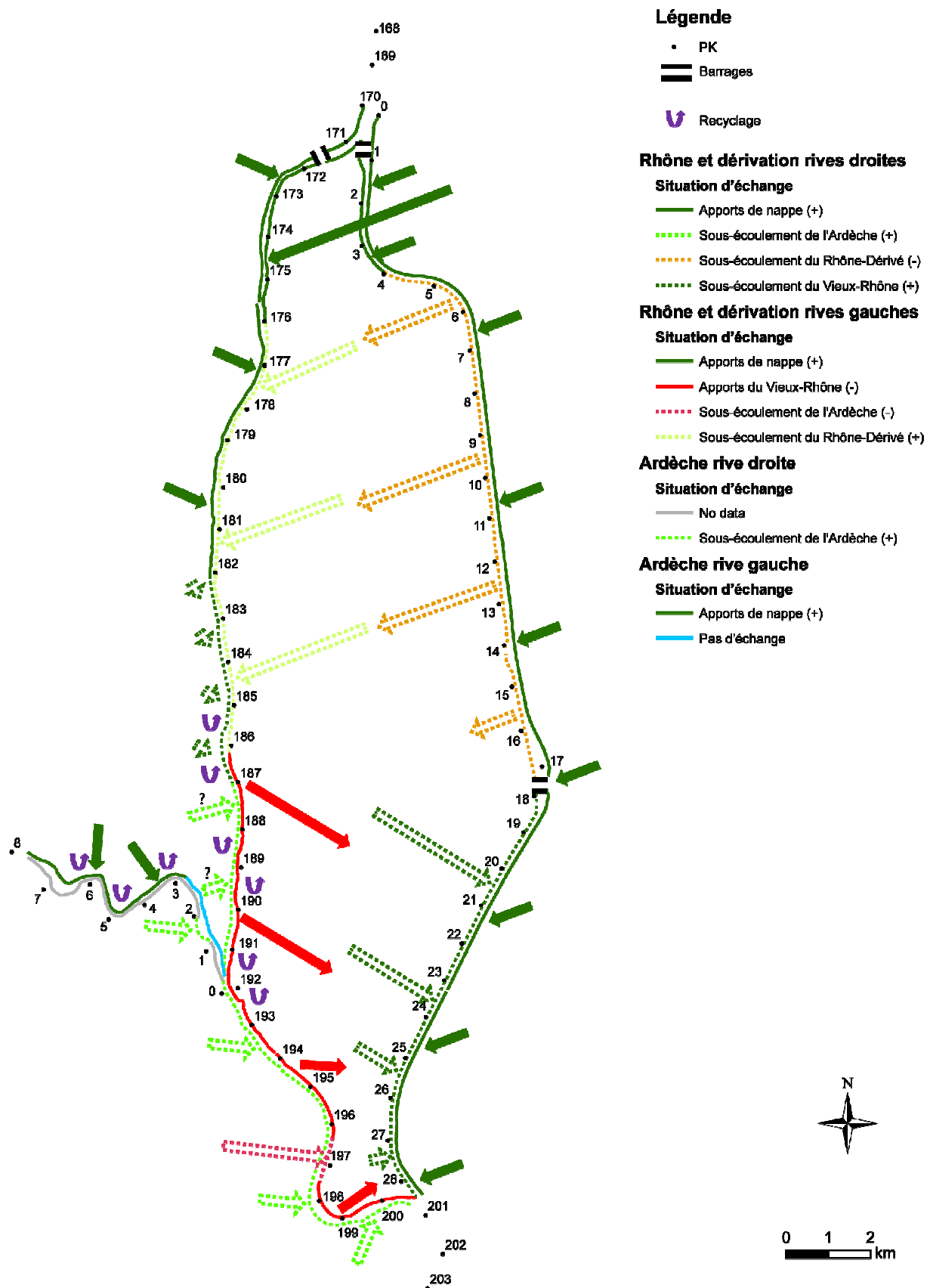
° Ce qu'il faut retenir des travaux sur le site du Rhône à Donzère-Mondragon

Métriques testées : Analyse géomatique, invertébrés souterrains, macrophytes, chimie des eaux superficielles, isotopes

Résultats sur les échanges nappes/rivières (Diagnostic synthétique 2) :

Les échanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche 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 / recyclage PK 189 à 193 / 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.



Diagnostic synthétique 2 : Echanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère-Mondragon et pour la confluence Rhône/Ardèche - Synthèse

Résultats sur l'utilisation des métriques :

- globalement ce site est celui qui a bénéficié du plus grand nombre de méthodes ; les résultats sont convergents pour la plupart des méthodes à quelques exceptions près, ce qui a permis d'établir un diagnostic synthétique de manière relativement aisée ;
- la méthode fondée sur l'analyse SIG met en avant une variabilité saisonnière dans le sens et l'intensité des échanges (analyse effectuée sur des piézométries basses-eaux et moyennes-eau) ; elle met aussi en avant des changements dans le temps des directions générales des écoulements souterrains (analyse effectuée sur des piézométries récentes et passées) ;
- les analyses isotopiques permettent de discriminer facilement les eaux locales des eaux du fleuve Rhône ;
- la plupart des sites hébergent une faune stygobie importante et intéressante ; la métrique de faune stygobies testée à différentes périodes montre que les apports de nappe fluctuent fortement dans le temps, avec des diminutions notables à l'étiage ; le phénomène de recyclage est diagnostiqué à plusieurs reprises et apporte une information complémentaire aux métriques géomatiques et géochimiques ;
- la diversité de la végétation aquatique est aussi intéressante ; le diagnostic fondé sur cet outil met bien en avant les apports de nappe diffus sur de courts linéaires de berge, les secteurs influencés par des sous-écoulements liés au fleuve Rhône notamment sous le canal de dérivation, un secteur particulier où l'écoulement de l'aquifère passe sous le fleuve Rhône.

° Ce qu'il faut retenir des travaux sur le site du Rhin

Métriques testées : analyse géomatique, modélisation distribuée à base physique (Plateforme Eau-Dyssée), invertébrés souterrains, macrophytes, chimie des eaux superficielles

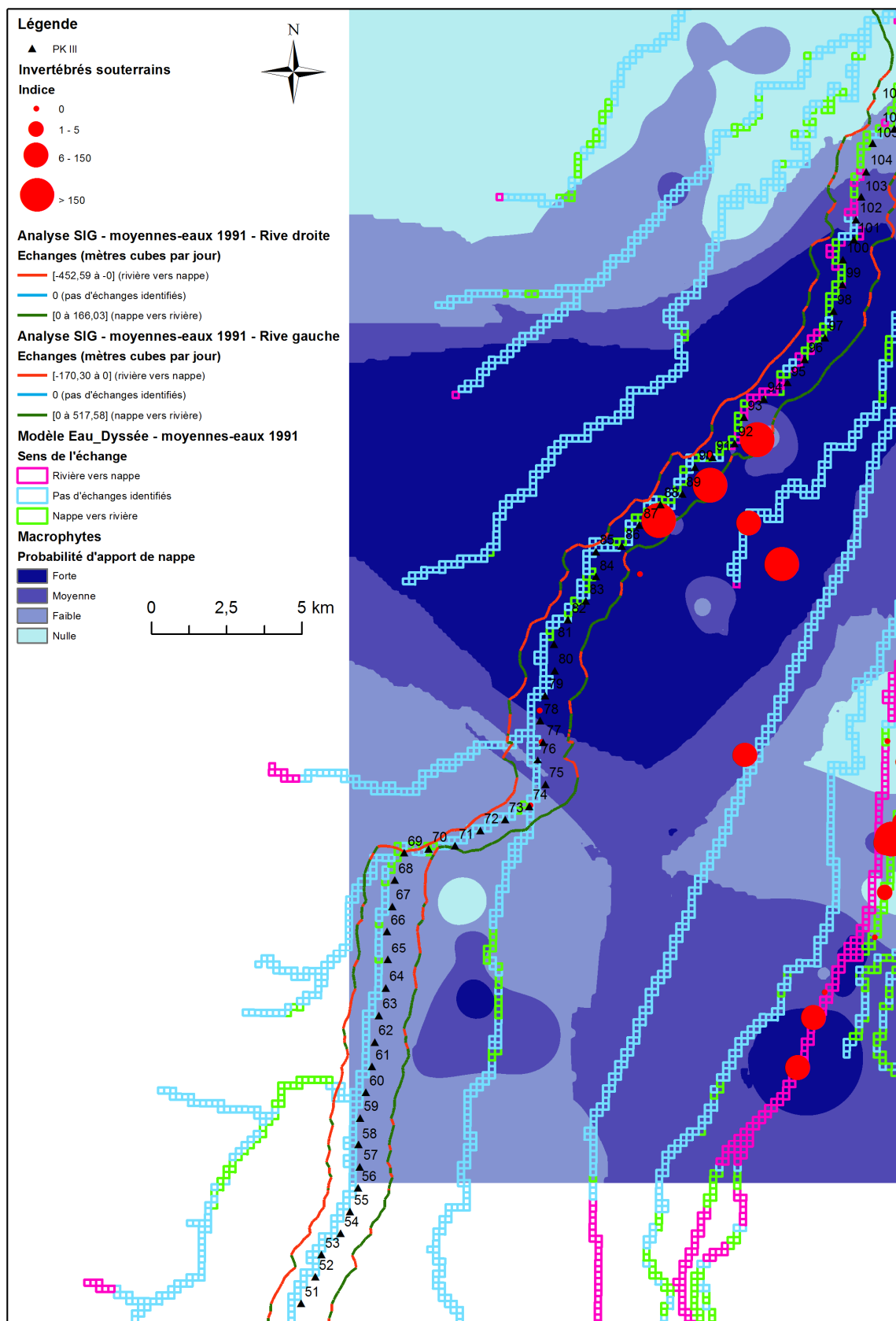
Résultats sur les échanges nappes/rivières (Diagnostic synthétique 3) : les différentes métriques ne sont pas toutes concordantes quant au sens et à l'intensité des échanges nappes/rivières sur le site étudié. On observe une forte divergence de diagnostic sur la partie amont de l'III entre le modèle Eau-Dyssée et l'analyse SIG. En revanche, les résultats du diagnostic réalisé avec les macrophytes d'après la bibliographie sont plutôt en phase avec le modèle dans la partie centrale de l'III, mais s'opposent au diagnostic SIG. De même, la sectorisation des échanges nappes/rivières obtenue à partir des invertébrés souterrains est également assez proches des résultats obtenus avec les macrophytes (même si les localisations des échantillonnages ne permettent pas toujours une comparaison). Enfin, les caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles échantillonnées sur le secteur confirment les hypothèses d'échange formulées à partir de la faune interstitielle

Les simulations issues du modèle Eau-Dyssée montrent que les apports phréatiques vers la rivière se font essentiellement dans la partie nord de l'aquifère ainsi qu'à l'amont des cours d'eau ; le Rhin alimenterait la nappe sur la majeure partie de son cours, cette alimentation est complétée par celle de l'III amont sur quelques tronçons dans la zone sud.

Les différences observées entre la métrique SIG et les autres métriques s'explique en partie par le manque de données disponibles (piézométrie, hauteur d'eau en rivière). Pour la même raison, les écarts dans la quantification des échanges sont importants entre la méthode SIG et le travail de modélisation. Ce dernier donne des valeurs beaucoup plus élevées que celle du SIG, la différence étant d'un ordre de grandeur d'un facteur 1000.

Résultats sur l'utilisation des métriques : les résultats de la modélisation montrent que la précision de la topographie utilisée pour déterminer l'altitude des rivières joue un rôle prépondérant sur le sens et la quantité des échanges nappes/rivières. Les données MNT satellitaires sont utiles mais présentent un bruit dans le signal qui peut être corrigé. Les hauteurs d'eau variables quant à elles influent surtout sur l'intensité des échanges.

Le travail sur les macrophytes sur la plaine d'Alsace démontre que la méthode peut fonctionner à partir de données issues de la bibliographie. La bibliographie permet ainsi d'avoir des données facilement utilisables et peu coûteuses, et a priori sur des secteurs d'étude plus diversifiés, par d'autres moyens que des campagnes de terrain.



Diagnostic synthétique 3 : Echanges nappes/rivières de la plaine de l'Ill (ex : zone centrale) – Superposition des métriques

° **Ce qu'il faut retenir des travaux sur le site sur la Loire**

Métrie testée : analyse géomatique

Résultats sur les échanges nappes/rivières : que ce soit en basses-eaux ou en hautes-eaux, on observe grâce à l'analyse géomatique que sur cette zone c'est la nappe qui alimente principalement le fleuve. En basses-eaux, on note l'influence du barrage et du seuil qui en relevant artificiellement le niveau du fleuve provoque une inversion des échanges, et donc une alimentation de la nappe par le fleuve. Inversement, l'effacement éventuel du seuil se traduirait par une moindre recharge de la nappe. Cette tendance se retrouve de manière moins marquée en hautes-eaux où l'effet du seuil est gommé.

Pour la rive gauche, si l'on compare les deux situations hydrologiques (hautes-eaux et basses-eaux), on observe que le débit d'alimentation de la nappe par le fleuve varie assez peu. Au contraire, le débit de drainage de la nappe par le fleuve varie presque du simple au double. Pour la rive droite, on observe le phénomène inverse.

Résultats sur l'utilisation des métriques : l'analyse géomatique permet de mettre en évidence des différences de comportement d'une saison à l'autre et d'une rive à l'autre. Il est dommage de ne pas avoir d'autres métriques comparatives pour mettre en perspective ces résultats.

° **Ce qu'il faut retenir des travaux sur le site sur l'Orgeval (affluent de la Seine)**

Métrie testée : analyse géomatique, modélisation distribuée à base physique (Plate-forme Eau-Dyssée), modélisation distribuée à base physique et hydrothermique (METIS), dispositif MOLONARI, invertébrés souterrains

Résultats sur les échanges nappes/rivières : la métrie géophysique a permis : (i) de définir et de caractériser la structure géologique (hétérogénéités) des grandes unités structurales et de la ZH ; (ii) de caractériser la connectivité ou le type de contact entre le cours d'eau et le substratum géologique ; (iii) de sélectionner les 5 points d'intérêt pour l'implantation du dispositif MOLONARI.

La métrie MOLONARI, première caractérisation des échanges nappe/rivière réalisée grâce à la mesure directe des niveaux d'eau de la rivière et de la nappe, montre clairement l'existence d'un gradient amont aval le long de la transition entre formations géologiques. La rivière draine la nappe de Brie en amont et s'infiltre pour alimenter l'aquifère de Champigny en aval du bassin. La variabilité spatiale des échanges est contrôlée par le type de contact entre le cours d'eau et le substrat géologique, tandis que la variabilité temporelle est soumise aux forçages météorologiques.

La métrie METIS, modélisation 2D de flux d'eau et de température d'une section de rivière a permis de fournir une quantification des échanges nappes/rivières à l'échelle locale de la station MOLONARI. Le sens des échanges simulés sont cohérents avec les gradients hydrauliques mesurés entre la rivière et les piézomètres de bordure. L'extrapolation de ces résultats à l'échelle du petit bassin versant permet d'établir que le bilan hydrologique est déficitaire ce qui s'explique par les importantes infiltrations de la rivière vers l'aquifère du Champigny (-48 mm/an soit -14%). Le modèle Eau-Dyssée qui simule les flux d'eau à des échelles plus larges a été testé dans la partie aval du bassin et les intensités de flux échangés estimées sont cohérentes entre les modèles METIS et Eau-Dyssée. Les sens des échanges peuvent être localement différents.

La métrie invertébrés souterrains, testée pour la première fois dans le bassin parisien, s'avère être moins pertinente sur les petits cours d'eau agricoles à sédiments fins. L'habitabilité des sédiments devient alors une limite à la structuration des communautés interstitielles et à l'usage même de la méthode. Toutefois et malgré ces limites, les résultats indiquent que trois piézomètres sont en contact avec une nappe hébergeant des stygobies.

Enfin, la métrie de l'analyse géomatique est utilisée et contrairement aux essais de quantification réalisés sur la Sèvre-Niortaise et l'Ille, pour l'Orgeval les débits d'échanges de l'analyse SIG et du modèle sont ici du même ordre de grandeur.

Résultats sur l'utilisation des métriques : sur le site de l'Orgeval, les données faunistiques restent difficiles à interpréter, à cause de la très faible richesse des peuplements en organismes stygobies et des limites méthodologiques liées à l'échantillonnage de rivières ayant une importante charge de fond sableux-limoneux.

La métrique MOLONARI associée à la métrique METIS permet de quantifier les échanges nappes/rivières nets pour établir des bilans hydriques à l'échelle du petit bassin versant et les échanges absolus (quantité échangée au total) pour estimer le potentiel épuratoire de la zone hyporhéique via des réactions biogéochimiques.

° Méthode de croisement des métriques

Les différentes étapes du protocole de comparaison des métriques sont les suivantes :

- diagnostic par métriques impliquées sur le site à étudier
- sectorisation spatiale des échanges à l'échelle du point kilométrique pour chaque métrique, pour chaque tronçon de rivière étudié à l'aide de la typologie des échanges nappes/rivières
- superposition spatiale des diagnostics par métrique sur les tronçons étudiés
- détermination des incertitudes liées au sens de l'échange diagnostiqué et à sa quantification pour chaque tronçon de rivière (un tableau est proposé dans le texte)
- diagnostic synthétique multi-métrique des échanges par tronçon de rivière
- représentation cartographique du diagnostic synthétique

° Pour en savoir plus

Travaux sur le Rhône :

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.

<https://hal.inria.fr/GSE-ENSMSE/tel-00993370v1>

Arthaud F., Baillet H., Bornette G., Déchomets R., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillot D., Jezequel C., Lafont M., Lalot E., Marmonier P., Novel M., Paran F., Piscart C., Puijalon S., Rodriguez C., Simon L., Travi Y. (2007, 2008, 2010 et 2012) - Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapports finaux phases 1, 2, 3 et 4 Action recherche valorisation ZABR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE). Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), CEMAGREF Lyon.

<http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>

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

<http://www.esrifrance.fr/sig2008/ensm.htm>

Travaux sur la Loire :

D. Graillot, F. Paran, E. Lalot, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, F. Arthaud, N. Flipo, A. Mouhri, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin, G. Tallec, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis (2012 et 2013) Caractérisation des échanges nappes/rivières à l'échelle du tronçon ou du linéaire par métrique expérimentale ou par modélisation jusqu'à l'échelle régionale. NAPROM (NAPPes-Rivières : Observation et Modélisation). ONEMA, ARMINES Rapport années 1 et 2.

Travaux sur le Rhin :

Thierion, C. (2011) Modélisation du fonctionnement de l'aquifère alluvial du fossé rhénan supérieur et vulnérabilité sous l'impact du changement climatique. Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

MEDDE (2012) Hydrologie souterraine vallée du Rhin. Rapport du projet Explore 2070 préparé par Armines et le BRGM, 55p.

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Modelisation_de_la_Vallee_du_Rhin.pdf

Travaux sur le bassin de l'Orgeval :

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Durand, V., Tallec, G., Kurtulus B., de Fouquet, C., Jost, A., Bodet L. 2012. Stratégie d'échantillonnage des échanges nappe/rivière du bassin agricole de l'Orgeval rapport PIREN-Seine, 27p.

http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1041

Mouhri A ; Saleh, F., Flipo, N. 2012. Etat de l'art sur les méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe/-rivière, rapport PIREN-Seine, 30p.

http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1040

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Patrick, G., Bodet L., Tallec, G., Ansart, P., Jost, A., Durand, V., de Fouquet, C., 2013. Investigations hydro-géophysiques et premières modélisations thermiques de la vallée des Avenelles à l'interface cours d'eau-nappe. Rapport PIREN-Seine, 19 p.

http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1097

Flipo, N., Saleh, F., Mouhri, A., Labarthe, B., 2013. État de l'Art sur la Modélisation des échanges nappe/rivière. Rapport PIREN-Seine, 22 p.

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

Travaux sur la Sèvre Niortaise :

BRGM (2010) Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE. Rapport final BRGM/RP-57044-FR

<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57044-FR.pdf>

Caractérisation des échanges nappes/rivières à l'échelle du tronçon ou du linéaire par métrique expérimentale ou par modélisation jusqu'à l'échelle régionale

D. Graillot, F. Paran, E. Lalot, F. Dujardin, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, M. Novel, F. Arthaud, N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin, G. Tallec, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis, B. Augeard

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs

Ce rapport présente les principaux résultats du projet de recherche NAPROM (NAPpes-Rivières : Observation et Modélisation) lancé en 2011 par l'ONEMA, animé par ARMINES et qui regroupe des chercheurs de huit établissements de recherche.

Ce projet fait suite à différents travaux développés depuis plusieurs années par les partenaires impliqués, dans le cadre de zones ateliers (celle du bassin du Rhône la ZABR, celle de la Loire la ZAL et le PIREN Seine) ou en collaboration avec les agences de l'eau (Agence Rhône Méditerranée et Corse et Agence Seine Normandie notamment) sur le thème des échanges hydrologiques entre les rivières et les nappes en relation. Dans le cas du Rhône et de la Loire, ces travaux ont été développés en relation avec les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), le Plan Loire et le Plan Rhône. Plusieurs approches méthodologiques utilisées sur ces bassins ont vocation à être génériques et a priori transférables au niveau national.

Dans le cadre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) et de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA), il existe toujours une forte attente opérationnelle des Agences de l'Eau et des DREAL sur le sujet des échanges entre nappes et rivières ; d'une part pour améliorer la gestion qualitativement et quantitativement la ressource à travers, par exemple, les autorisations de prélèvement ou l'analyse des études d'impacts d'ouvrages (création ou effacement) et d'autre part pour assurer le rapportage pour la DCE (description de l'état des masses d'eau et connaissance des pressions).

La finalité scientifique du projet NAPROM est de proposer une synthèse interdisciplinaire des méthodes et outils pour l'identification, la caractérisation et l'évaluation, tant qualitative que quantitative des échanges entre les rivières et les aquifères superficiels qui les jalonnent en tenant compte de leur degré plus ou moins élevé d'anthropisation (ouvrages, aménagements, projets de restauration, usages de l'eau). A terme, les résultats permettront de rédiger un guide méthodologique pour évaluer qualitativement et quantitativement les échanges nappes/rivières 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.

Dans un objectif de gestion coordonnée de la ressource en eau tant superficielle que souterraine, et plus généralement de préservation de la ressource en eau et de la biodiversité, ce projet a vocation à proposer des méthodes pour :

- estimer la contribution des eaux souterraines au débit des rivières et d'identifier leur origine ;
- inversement, connaître la recharge des nappes par les rivières ;
- identifier les tronçons les plus directement sous dépendance majoritaire d'apports souterrains et les plus vulnérables à une pollution ;
- identifier les zones où, a contrario, les nappes sont potentiellement exposées à une pollution provenant de la rivière ;
- identifier les fractions du linéaire où, sans pour autant avoir d'impact quantitatif significatif, les échanges modifient significativement la composition chimique et donc la qualité de l'eau

Sur le plan opérationnel les résultats obtenus doivent fournir des éléments d'informations appréciables pour l'évaluation de l'état des masses d'eau, la préservation quantitative et qualitative de la ressource en eau (ex : AEP, dimensionnement des captages, réalimentation de nappe, ...) et l'alimentation des milieux aquatiques superficiels par les eaux souterraines (ex : maintien de débit et tamponnage thermique des eaux de surface, limitation de l'assèchement estival, maintien de milieux oligotrophes...). Les éléments acquis doivent apporter également des indications utiles pour la poursuite de programmes de restauration des milieux aquatiques.

1.2. Description du projet recherche

Le projet NAPROM (NAPPes-Rivières : Observation et Modélisation), initié par l'Onema en 2011 a duré trois ans. Les tâches effectuées chaque année sont brièvement rappelées ci-dessous ; le détail de chaque tâche est présenté dans les annexes (annexe 1).

1.2.1. Année 1 - Tâches 2011/2012 (A1 à I1)

- A1. Caractérisation et choix multicritère de sites test sur les bassins versants Rhône, Seine, Loire, Rhin (régime hydrologique, ouvrages, aménagements, usages, altitudes, climat, sensibilité des milieux....)
- B1. Identification des secteurs présentant un enjeu en matière de connaissance des échanges nappe/rivière
- C1. Recensement des modèles de nappe disponibles sur l'ensemble des bassins sélectionnés et concernant les secteurs retenus
- D1. Recensement et contact avec les acteurs détenteurs de données et de modèles
- E1. Préparation des données (hydrologiques, hydrogéologiques, biologiques, géochimiques) en vue du traitement géomatique pour l'évaluation quantitative des échanges (débits hautes-eaux et basses eaux)
- F1. Analyse des résultats des modélisations locales ou régionales existantes
- G1. Identification des données manquantes, plan d'instrumentation et d'échantillonnage complémentaire pour l'étude des mécanismes d'échange à l'échelle locale
- H1. Préparation des données pour l'évaluation des variations saisonnières des échanges nappes/rivières : conséquences en hautes-eaux et basses-eaux
- I1. Adaptation du modèle du BRGM sur la Sèvre-Niortaise qui présente l'avantage de pouvoir étudier un contexte hydrogéologique différent incluant les cours d'eau, les relations nappes/rivières autour d'un important champ captant AEP situé dans un méandre.

1.2.2. Année 2 -Tâches 2012/2013 (T1 à T7)

- T1. Recueil des données en vue de l'analyse géomatique des échanges sur les 5 sites
- T2. Développement et évolution des modèles hydrodynamiques sur l'Orgeval, l'III et la Sèvre-Niortaise
- T3. Acquisition de données hydrogéophysiques (thermie, pression, images Infra Rouge Thermique, radar géologique (GPR), TDEM, ERT)
- T4. Diagnostics biologique et physico-chimique des sites pour l'évaluation des échanges (Orgeval, Sèvre-Niortaise pour la partie végétation, plaine de l'III, compléments sur Donzère pour les invertébrés souterrains)

- T5. Test de méthodes d'analyse ou de traitement prospectives (inversion du signal thermique, corrélation températures sur le site de l'Orgeval et données d'imagerie infra-rouge sur le Rhône)
- T6. Élaboration d'un protocole de comparaison des différentes métriques sous forme de « plan d'expérience »
- T7. Rapport scientifique intermédiaire année 2 - juin 2013

1.2.3. Année 3 - Tâches 2013/2014 (T8 à T14)

- T8. Comparaisons des métriques pour chaque site et inter-sites
- T9. Traitement cartographique des métriques et préconisations méthodologiques pour une utilisation efficace des métriques
- T10. Établir les modalités d'intégration des cartes dans une Géodatabase structurée
- T11. Écriture des règles d'utilisation et de développement des métriques
- T12. Écriture des règles de traitements SIG et de comparaison entre métriques (superpositions de cartes, cartes de synthèse multi-métrique)
- T13. Organisation des règles selon un graphe de cheminement ou arbre de décision cohérent avec la structure du guide méthodologique
- T14. Rapport scientifique final année 3 - juin 2014

1.3. Structuration du rapport

La première partie (§ 2.) du rapport présente chacune des méthodes de l'approche multi-métrique mise en œuvre pour caractériser les échanges nappes/rivières. Dans cette partie on distingue d'une part les méthodes existantes ayant pour objectif d'évaluer les échanges nappes/rivières (§ 2.1. à 2.3.) et d'autre part les modèles en cours de construction pour lesquels l'objectif est de les appliquer sur certains sites d'étude déjà choisis (§ 2.4. à 2.6.). Les méthodes existantes qui ont été identifiées pour évaluer les échanges nappes/rivières concernent la modélisation hydrodynamique selon différentes méthodes de discrétisation (modèles du type différences finie), l'analyse géométrique des cartes piézométriques à partir de SIG et l'utilisation d'indicateurs biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes).

La deuxième partie (§ 3) décrit les caractéristiques de chacun des cinq sites d'étude retenus. Ces sites sont situés sur les bassins versants du Rhône aval, du Rhin supérieur, de la Loire amont, de l'Orgeval (sous bassin de la Seine) et de la Sèvre-Niortaise. Sur ces sites, différentes méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières ont été appliquées (modèles, indicateurs biologiques et physico-chimiques, monitoring local). L'analyse géométrique a été appliquée sur l'ensemble des sites.

Les résultats obtenus (diagnostics de caractérisation des échanges nappes/rivières) pour chacun des sites et pour chacune des métriques impliquées sont présentés au § 4, et complétés par un diagnostic issu du croisement des métriques.

La dernière partie du rapport (§ 5.) présente les autres éléments, autres les méthodes et les résultats présentés précédemment, qui seront nécessaires à la construction du guide technique et au futur utilisateur :

- une grille multi-critère de caractérisation des sites et corpus de métadonnées (§ 5.1.) ;
- un glossaire thématique sur les échanges nappes/rivières (§ 5.2.) ;

- des fiches synthétiques décrivant la façon dont chaque méthode appréhende les échanges nappes/rivières (§ 5.3.) ; ces fiches permettent de faire ressortir les forces et faiblesses respectives des différentes méthodes d'évaluation ;

- un protocole de comparaison pour un diagnostic synthétique des échanges nappes/rivière (§ 5.4.) ; cette partie présente la typologie des échanges nappes/rivières retenue, des grilles de comparaison des métriques et une ébauche de plan du guide.

Enfin, la dernière partie (§ 6.) fait le bilan du travail réalisé lors des 3 années du projet NAPROM et rappelle les tâches à effectuer la dernière phase de travail (2015) pour la production du guide technique sur les échanges nappes/rivières.

Les annexes sont proposées dans un document séparé. Elles contiennent :

- Les principales étapes du projet NAPROM (Annexe 1)
- Les grilles de caractérisation de chaque site complètes (Annexe 2)
- Les comptes-rendus de réunions et de visites de terrain des années 1 et 2 du projet (Annexe 3)
- Les 3 fiches actions du projet NAPROM et la présentation des équipes (Annexe 4)
- Les éléments de valorisation scientifique (Publications, communications) (Annexe 5)
- La présentation des partenaires, des compétences mobilisées et de leurs contributions (Annexe 6)

2. Approche multi-métrique : méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières

Cette partie présente les six méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières testées dans le cadre du projet NAPROM : une analyse géomatique des hauteurs de nappe et des hauteurs d'eau dans la rivière, deux méthodes basées sur la biologie (invertébrés souterrains et macrophytes), deux méthodes de modélisation hydrodynamiques (Marthe et Eau-Dyssée) et une méthode mêlant géophysique, données de pressions et température et modélisation. Chacune des méthodes est appliquée sur plusieurs sites expérimentaux. Ces sites sont présentés dans la partie 3 et les résultats de l'application des méthodes dans la partie 4.

2.1. Analyse géométrique SIG de caractérisation des échanges nappes (alluviales)/rivières [ENSM-SE]

2.1.1. Fondements de la méthode

Cette métrique fondée sur une analyse géométrique sous SIG a été élaborée dans le cadre du projet ZABR/Agence de l'Eau RMC « Échanges nappes/Rhône » (Bornette et al., 2007, 2008, 2010 ; Paran et al., 2008). La voie envisagée pour identifier et quantifier les échanges nappes/Rhône repose donc sur une métrique mobilisant les méthodes de l'hydrogéologie quantitative. L'objectif de ce travail consiste à mettre en œuvre une méthode simple, peu coûteuse en temps, reproductible, adaptable aux différentes contraintes qu'impose un territoire aussi vaste : le fleuve Rhône du lac Léman à la mer Méditerranée. L'étendue du terrain d'étude pose les contraintes suivantes :

- les données disponibles sont fragmentées et hétérogènes dans le temps et dans l'espace ; bien que nombreuses, elles sont éparées, lacunaires, parfois anciennes, souvent empreintes d'incertitudes, généralement asynchrones, de sources variées et parfois confidentielles ;
- les configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges résultent d'une histoire géologique complexe ; elles sont donc diverses et peuvent mettre en jeu différents types d'aquifères (alluviaux, cristallins fissurés, massifs calcaires karstifiés ou non...) et des contextes variés ;
- les aménagements anthropiques sont nombreux ; qu'il s'agisse de centrales nucléaires, de barrages hydroélectriques, de canaux de dérivation, d'écluses, de contre-canaux, de pompages en nappes pour l'eau potable, l'agriculture ou l'industrie, ces ouvrages influencent les échanges nappes/Rhône.

Face à de telles contraintes et sur un territoire aussi vaste, la modélisation globale des échanges nappes/rivières, bien qu'envisageable, reste difficile. L'utilisation de modèles locaux, quant à elle, est coûteuse en temps de travail et n'est possible que si les données existent ou sont disponibles. Les chercheurs impliqués dans le projet ZABR se sont donc orientés pour les applications sur le Rhône vers une méthode permettant de tirer le meilleur parti des données existantes (avant d'en acquérir de nouvelles) et une mise en œuvre fondée sur les outils SIG d'analyse spatiale, moins lourde que les modèles mathématiques.

L'idée est donc de s'appuyer sur le fait que les flux d'eau en nappe alluviale sont en général proportionnels à la pente de cette nappe (on néglige les écoulements verticaux) et d'utiliser la géométrie de la nappe à proximité du cours d'eau pour en déduire les échanges nappes/rivières.

2.1.2. Données hydrogéologiques et spatialisation des échanges nappes/rivière

Cette méthode fondée sur les SIG et les outils d'analyse spatiale est une méthode géométrique fondée sur le calcul d'angles. Si elle rend possible l'estimation des échanges au niveau des berges d'un cours d'eau, les phénomènes d'infiltration ou d'exfiltration par le fond de la rivière et les variations de perméabilité des berges sont difficiles à prendre en compte.

2.1.2.1. La rive : détermination de son orientation par analyse spatiale

Dans cette approche, on ne prend en compte que la rive droite ou gauche du cours d'eau, qui constitue la limite de la surface piézométrique de la nappe. Pour les nappes alluviales importantes en relation avec des rivières, l'interface avec le cours d'eau peut s'étendre sur plusieurs kilomètres, et elle est souvent assez sinueuse. Cette sinuosité d'une part et la piézométrie de la nappe d'autre part ne permettent pas d'évaluer les échanges ni localement ni de manière globale de manière simple.

Il est conseillé de discrétiser la polygline représentant la rive en segments unitaires (entre vertex), puis de faire l'évaluation des échanges sur chaque segment unitaire (de l'ordre de 100 à 200 m de longueur). Pour cela il faut évaluer l'orientation de chaque segment de la rive, déterminer l'orientation du flux de la nappe, calculer le débit d'échange, puis « l'angle d'échange » (ce dernier permet de déterminer le sens de l'échange).

2.1.2.2. L'aquifère : calcul du flux et évaluation des débits

Pour les aquifères alluviaux importants on dispose en général de données détaillées sous forme de cartes piézométriques, souvent en basses-eaux, moyennes-eaux, hautes-eaux. Dans le cas du Rhône, on s'intéresse, par exemple, en priorité aux situations de basses-eaux, qui correspondent aux épisodes du système présentant les enjeux à optimiser. Par ailleurs, en milieu poreux, cas des aquifères alluviaux, l'écoulement de l'eau est exprimé par la Loi de Darcy (De Marsily, 1981) :

$$q = K.A.i,$$

q : Débit en m^3/s ,
 K : Coefficient de perméabilité en m/s ,
 A : Section d'écoulement en m^2 ,
 $i = \frac{dH}{dL}$: Gradient piézométrique

Le débit d'échange nappes/rivières est calculé en appliquant cette formule à la nappe le long du cours d'eau. Les différents paramètres sont estimés de la façon suivante :

- *Estimation de i* : La surface de la nappe (ou surface piézométrique) permet de définir la pente de la nappe (c'est-à-dire le gradient $i = dH/dL$) en tout point et donc les directions d'écoulement. Partant de l'ensemble des données piézométriques digitalisées des aquifères recensés (hauteurs de nappes aux points de mesure disponibles ou cartes piézométriques), un TIN (Triangulated Irregular Network) permet de restituer le modelé 3D de la surface de la nappe.

- *Estimation de A* : La rive du cours d'eau constitue une limite de la nappe. Pour le paramètre A , pour l'étude sur le Rhône, faute d'avoir des données plus précises, nous avons estimé une section d'échange A unitaire calculée à partir de la profondeur estimée du cours d'eau (données bathymétriques, données de niveau d'eau). Cette surface d'échange pourrait être aussi estimée à partir de l'épaisseur des alluvions ou seulement l'épaisseur mouillée des alluvions. Il est actuellement difficile avec cette méthode de prendre en compte les écoulements verticaux sous la rivière. Si, ultérieurement, on dispose d'une méthode rigoureuse pour évaluer la grandeur A , il suffira d'appliquer le coefficient multiplicateur ad-hoc pour ajuster les valeurs du débit d'échange.

- *Estimation de K* : En utilisant une carte des perméabilités (K), il est possible d'estimer les écoulements suivant les directions des segments du TIN.

2.1.2.3. Echange nappe/rivière : détermination du sens et représentation

Le sens de l'échange est déterminé à l'aide de « l'angle d'échange » calculé par soustraction de l'angle d'écoulement de l'aquifère et de l'angle d'écoulement du cours d'eau. Par convention, dans la méthode géomatique on affecte un signe (+ ou -) au débit d'échange calculé en fonction du sens de l'échange : on exprimera ainsi par des valeurs positives les quantités d'eau échangées dans le sens nappe vers rivière et par de valeurs négatives celles en sens inverse. De plus nous représentons généralement : en vert les secteurs où la rivière draine la nappe ; en rouge les secteurs où la rivière alimente la nappe. Les secteurs où l'écoulement de la nappe et la rivière sont quasiment parallèles présentent des échanges latéraux faibles à nuls, souvent représentés en bleu.

2.1.3. Préparation des données pour traitement SIG

Les données nécessaires pour la caractérisation géométrique des échanges nappes/rivières sur tous les secteurs (Saint-Maxire/Échiré, Orgeval et Rhin-III) ont été transmises à l'ENSM-SE qui détient déjà les données sur les sites du Rhône et de la Loire-Amont.

Rappelons que les données utiles pour la caractérisation géomatique des échanges nappes/rivière sont les suivantes :

- carte piézométrique datée et/ou relevés de niveau de puits géoréférencés (m NGF)
- hauteurs d'eau dans la rivière synchrone avec la piézométrie (m NGF)

Il est intéressant de disposer des niveaux d'eau en rivière et en nappe pour des périodes hydrologiques caractéristiques (basses eaux, moyennes eaux, hautes eaux, crues) afin de considérer les effets des variations saisonnières.

- champs de perméabilités spatialisées (issus de calibration de modèle ou d'essais par pompage) (m/s)
- niveaux du fond de la rivière (talweg) (m NGF)
- largeurs de la rivière ou profils bathymétriques (m)
- Scan 25 IGN pour une digitalisation des berges du cours d'eau adaptée au modèle TIN

2.1.4. Bilan

La méthode présentée n'est utilisable que dans un contexte hydrogéologique où la Loi de Darcy 2D est applicable, c'est-à-dire dans des formations poreuses sous hypothèse de Dupuit (en négligeant la variabilité verticale des vitesses). Il conviendra donc d'élaborer d'autres méthodes d'analyses pour les différents contextes hydrogéologiques (ex : aquifères de socles non assimilables à un milieu poreux, aquifères karstiques...). Bien que reposant sur un jeu de données minimal, la précision des résultats est conditionnée par :

- la connaissance des impacts anthropiques sur les différents objets hydrologiques, notamment la nappe (ex : pompages, barrages...);
- l'existence et la qualité des données de départ.

Malgré les limites exposées ci-avant, cette méthode présente les avantages suivants :

- elle limite l'effet observateur (utilisateur) potentiellement existant lors de calculs manuels ;
- elle peut être systématisée et automatisée ;
- elle est reproductible secteur après secteur sous réserve d'obtention des données nécessaires ;

- elle est souple d'utilisation car des données acquises ultérieurement peuvent être intégrées dans la base de données pour le calcul des débits (ex : champ de perméabilité, surface d'échange utile). Elle permet aussi un travail actualisé à partir d'hypothèses sur les données quand celles-ci sont manquantes ;
- elle permet, si les données existent, une représentation linéaire des échanges latéraux sur l'ensemble des berges comparable de la réalité de terrain ;
- elle permet de réaliser des bilans à différentes échelles par agrégation des valeurs de débits sur les segments de berge. Ceci sera très pratique pour travailler à des échelles compatibles avec les résultats obtenus dans les métriques biologiques et géochimiques par exemple.

2.2. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques [UMR 5023]

L'un des principaux résultats issus des recherches menées au cours des années 1980 et 90 sur le milieu interstitiel des grands fleuves, est le rôle majeur joué par les échanges entre eaux de surface et eau souterraine, sur la distribution et la composition des communautés interstitielles (ou hyporhéiques), aussi bien au niveau du chenal actif du cours d'eau que de la plaine alluviale. C'est donc tout naturellement que nous avons souhaité tester l'utilisation des communautés souterraines, en particulier les invertébrés, pour reconstituer, cartographier et évaluer les échanges entre les cours d'eau et leur nappe. Afin de caractériser la structuration spatiale de la faune hyporhéique à l'échelle du secteur d'étude, nous utilisons deux approches complémentaires liées à la présence d'espèces stygobies (individus adaptés au milieu souterrain) :

- l'utilisation de l'ensemble des espèces stygobies pour caractériser la direction et l'intensité des échanges : l'abondance (c'est-à-dire le nombre d'individus) des stygobies est utilisée pour mettre en évidence l'arrivée des eaux de nappe ;
- la recherche d'espèces caractéristiques des différents aquifères (espèces vivant dans les nappes profondes ou dans les interstices du chenal des cours d'eau) permet d'émettre des hypothèses quant à l'origine des arrivées d'eau souterraine.

Un certain nombre de paramètres physico-chimiques sont également mesurés et peuvent apporter des compléments de diagnostic : température, conductivité électrique, pH, oxygène dissous (ces quatre paramètres pris en surface et en interstitiel sur le terrain), nitrates et chlorures (mesurés en laboratoire). Ces données ponctuelles sont à prendre en compte avec prudence, car une seule mesure a été effectuée en même temps que l'échantillonnage des invertébrés souterrains.

2.2.1. Utilisation des espèces stygobies pour caractériser la direction et l'intensité des échanges

Cette première approche est basée sur le fait que la présence d'espèces stygobies est liée à une arrivée plus ou moins récente d'eau souterraine. De la même façon, la proportion de ces espèces au sein de peuplements (constitués à la fois d'espèces stygobies et d'organismes vivants à la surface des sédiments) sera corrélée à l'intensité et au sens des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Dans un premier temps, cette approche été basée sur l'hypothèse que des fortes arrivées d'eaux souterraines vont apporter un plus grand nombre d'espèces stygobies tout en limitant la pénétration d'espèces de surface alors que de faibles arrivées d'eaux souterraines favorisent la pénétration d'espèces de surface dans les interstices et limiteront la présence d'espèces stygobies. Cette approche faunistique simple était résumée sous la forme d'un indice d'échange des eaux prenant en compte la fréquence des espèces stygobies dans les peuplements par rapport à l'ensemble des invertébrés (stygobie ou de surface), la valeur de l'indice variant en fonction du sens et de l'intensité des échanges. Des études récentes, en amont du Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon, ont comparé l'efficacité de cette approche avec des résultats d'analyses isotopiques des eaux basées sur les isotopes stables de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) et de l'hydrogène

(D/H). Les résultats montrent clairement que l'abondance des individus stygobie (c'est-à-dire le nombre total d'invertébrés stygobies) semble plus efficace que la richesse en stygobie (c'est-à-dire le nombre total d'espèces) pour mettre en évidence l'arrivée des eaux souterraines, surtout dans les secteurs où l'on retrouve un mélange d'eau de surface et d'eau souterraine important.

2.2.2. Recherche d'espèces caractéristiques des différents aquifères

La deuxième approche, complémentaire à la précédente est basée sur le fait que les espèces stygobies possèdent de fortes préférences environnementales et une relativement faible capacité de dispersion des individus dans l'environnement. Ainsi, on observe des cortèges faunistiques différents entre les types d'habitats (karst, nappe en relation avec le fleuve et milieu hyporhéique des cours d'eaux). Ce phénomène s'explique en partie par la présence de certaines espèces strictement inféodées au karst et à la nappe alluviale profonde, ou au milieu hyporhéique des cours d'eau en fonction de leur affinité pour des milieux stables d'un point de vue physico-chimique (nappes alluviales profondes), instables (milieux hyporhéiques) ou intermédiaires, liés à des espaces disponibles de grandes tailles et des circulations rapides (karsts). Par exemple sur la chute de Brégnier-Cordon, la localisation des espèces indicatrices des nappes profondes a clairement mis en évidence des arrivées d'eaux souterraines profondes dans le secteur du Mont Cordon. De même, on retrouve une spécificité du cortège faunistique sur les versants côté Ardèche au niveau de la chute de Donzère-Mondragon. La mise en évidence de ces cortèges d'espèces peut ainsi renseigner sur l'origine physique des eaux (nappes profondes, karsts) ainsi que leur origine géographique avec, dans le cas de la chute de Donzère-Mondragon, une signature faunistique différente entre les versant Ardéchois et Drômois.

2.2.3. Matériel et méthodes : Pompages dans la zone hyporhéique

Les échantillons de faune sont récoltés dans la zone hyporhéique du cours d'eau, c'est-à-dire, à l'interface entre la nappe et le cours d'eau lui-même (généralement à 50 cm de profondeur). Trois échantillons de 10 litres par pompage Bou-Rouch (pompe vissée à un tube crépiné) sont effectués à chaque station prospectée (les trois points étant distants de quelques mètres chacun). Chaque prélèvement faunistique est ensuite tamisé à 100µm et conservé dans l'alcool à 96°, avant d'être trié et identifié en laboratoire.

Le calcul de l'indice d'échange rivières/nappes est basé sur l'abondance des organismes stygobies en intégrant les traits écologiques des espèces. En effet, les organismes souterrains peuvent être répartis en quatre classes écologiques :

- Classe 1 : organismes vivant à faible profondeur dans les sédiments et présents dans une grande diversité d'habitats souterrains (sources, rivières, karst), ils sont considérés comme ubiquistes (exemple : *Niphargopsis casparyi*) et leur abondance est notée N1

- Classe 2 : organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéique du fleuve à faible profondeur (exemple : *Fabaeformiscandona wegeli*), dont l'abondance est notée N2

- Classe 3 : organismes stygobies ubiquistes présents dans le milieu hyporhéique à toutes les profondeurs, dans le fleuve, la nappe riveraine et les karsts (exemples : *Proasellus slavus*, *Bythiospeum sp.*), dont l'abondance est notée N3

- Classe 4 : organismes phréatobies présents uniquement en profondeur dans la nappe (exemples : *Bathynella sp.*, *Bogidiella albertimaghi*), dont l'abondance est notée N4.

Le calcul de l'indice intègre une pondération des abondances des stygobies par rapport à leurs classes écologiques :

$$\text{Indice d'échange} = N1 + 2 \times N2 + 5 \times N3 + 10 \times N4$$

La physico-chimie de l'eau est mesurée à l'aide d'une sonde multi-paramètres, en surface directement dans le cours d'eau, et en interstitiel dans l'eau pompée lentement à l'aide de la pompe Bou-Rouch. Un échantillon d'eau est récupéré puis filtré (filtre Whatman® GF/F 0,7µm) afin d'être analysé au laboratoire (dosages des nutriments).

2.3. Principes de la méthode de diagnostic des échanges nappes/rivière à l'aide des macrophytes [UMR 5023]

2.3.1. Principe général

Les macrophytes aquatiques désignent les grands végétaux aquatiques (bryophytes, ptéridophytes et spermatophytes) et les algues filamenteuses, visibles et le plus souvent identifiables à l'œil nu.

Les macrophytes peuvent être utilisés comme des bio-indicateurs, i.e. "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 ou d'un éco-complexe et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées" (Blandin, 1986).

La caractérisation des échanges nappes/rivière à l'aide des macrophytes a été initialement testée pour le diagnostic du fonctionnement des zones humides (annexes alluviales comme les bras morts) situées à proximité de la rivière ; elle repose sur les exigences écologiques des espèces végétales aquatiques collectées dans ces zones humides.

Les groupements végétaux présents dans une zone humide 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 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, même dans un contexte environnemental a priori défavorable. De surcroît, parce qu'elles sont sténothermes (sujettes à de faibles variations de température) et fraîches, elles maintiennent des températures plus froides dans la zone humide en été, 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.

La méthode basée sur la reconnaissance des communautés végétales permet donc un diagnostic rapide et peu coûteux sur les apports de nappe. Elle intègre les échanges sur une période de temps annuelle. Les contraintes sont qu'elle s'applique seulement dans les zones avec au minimum deux espèces et permet de caractériser uniquement les échanges de la nappe vers la rivière.

2.3.2. Campagne de terrain

La méthode utilisée pour les relevés floristiques correspondent à des transects de 2 mètres, perpendiculairement à l'axe d'écoulement, suivant la taille du milieu échantillonné (ex : bras mort de

plusieurs centaines de mètres de longueur), plusieurs prélèvements peuvent être réalisés, à des intervalles réguliers (espacés en général de 25m).

Les différentes espèces végétales sont identifiées sur le terrain ou prélevées et déterminées en laboratoire grâce à des flores, leurs abondances étant estimées sur le site grâce au double indice d'abondance de Braun-Blanquet (1932) (Tableau 1). Ces indices permettent d'avoir l'abondance relative de chaque espèce sur le transect ainsi que leur mode de répartition.

abondance relative	mode de répartition des espèces
1 : recouvrement < 5% du transect	1 : individus isolés
2 : entre 5 et 25 %	2 : petites touffes très espacées
3 : entre 25 et 50 %	3 : touffes moyennes, espacées
4 : entre 50 et 75 %	4 : grandes plaques discontinues
5 : > 75 %	5 : peuplement continu

Tableau 1 : Les indices de la méthode de Braun-Blanquet (1932)

2.3.3. Méthode de calcul des indices d'état trophique

L'état trophique d'un site est obtenu grâce à la multiplication de l'abondance relative (nombre total des individus d'une espèce par rapport au nombre total des individus de toutes les espèces présentes, par unité de surface ou de volume) de chaque espèce estimée sur le terrain (Tableau 1) par son code indicateur pour chaque classe de trophie (Tableau 2) : Oligo, Méso, Eu et Hyper-eutrophe notés respectivement O, M, E et HE.

Ces produits sont ensuite additionnés puis la somme est exprimée en pourcentage. L'état trophique présentant le pourcentage le plus élevé est considéré comme le plus représentatif pour le relevé. Lorsque ce pourcentage est identique ou très proche pour deux classes de trophie, les deux résultats sont gardés. Par contre, si celui-ci est identique pour trois classes différentes, alors le résultat est considéré comme non significatif et n'est pas pris en compte.

	Relevé n°11		Niveau de trophie					Niveau de trophie calculé			
espèces	abondance		O	M	E	HE		O	M	E	HE
<i>Berula erecta</i>	2	x	3	3	0,5	0,5	=	6	6	1	1
<i>Callitriche platycarpa</i>	3	x	0,5	2	2	2	=	1,5	6	6	6
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1	x	0,5	0,5	2	3	=	0,5	0,5	2	3
<i>Elodea nuttallii</i>	1	x	0	2	2	2	=	0	2	2	2
<i>Fontinalis antipyretica</i>	1	x	0,5	2	2	0	=	0,5	2	2	0
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1	x	0,5	2	3	3	=	0,5	2	3	3
<i>Nasturtium officinale</i>	1	x	1	1	1	0	=	1	1	1	0
<i>Potamogeton pectinatus</i>	2	x	0,5	2	3	3	=	1	4	6	6
<i>Sagittarium emersum</i>	1	x	3	3	2	0,5	=	3	3	2	0,5
							Total	14	26,5	25	21,5
							%	16	30	29	25

Tableau 2 : Exemple de calcul de l'indice de trophie sur la Sèvre-Niortaise pour la station n°11 (ruisseau de la Maillée). Cette station est mésotrophe à eutrophe

2.3.4. Méthode de calcul de l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques

L'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques est obtenu en sommant les valeurs d'affinité des espèces pour les milieux thermiquement stables, ce qui traduit une affinité pour les sites alimentés en eaux souterraines (Tableau 3).

espèces	Relevé n°11	Alimentation en eaux souterraines	
	abondance	oui	non
<i>Berula erecta</i>	2	2	0
<i>Callitriche platycarpa</i>	3	1	0
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1	0	1
<i>Elodea nuttallii</i>	1	0	0
<i>Fontinalis antipyretica</i>	1	1	0
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1	0	0
<i>Nasturtium officinale</i>	1	2	0
<i>Potamogeton pectinatus</i>	2	0	1
<i>Sparganium emersum</i>	1	2	0
Total		8	2
calcul de l'indice		8 - 2 = 6	
		apports de moyenne intensité	

Tableau 3 : Calcul de l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques pour la Sèvre-Niortaise au niveau de la station n°11-Ruisseau de la Maillé

L'intensité des apports phréatiques peut ensuite être définie selon quatre classes :

- nul, si la somme des oui moins la somme des non est négative ou égale à zéro,
- faible, si la somme des oui moins la somme des non est comprise entre zéro et quatre,
- moyen, si la somme des oui moins la somme des non est comprise entre cinq et neuf,
- fort, si la somme des oui moins la somme des non est strictement supérieure à neuf.

2.3.5. Indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant

Afin de mettre en rapport les informations sur le niveau d'eutrophisation et l'intensité des apports phréatiques, un indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant est utilisé (Tableau 4).

trophie	apport phréatique
hyper-eutrophe = 0	nul = 0
eutrophe = 1	faible = 1
mésotrophe = 2	moyen = 2
oligotrophe = 3	fort = 3

Tableau 4 : Codage des indices de trophie et d'apport phréatique

Les valeurs des deux indices sont alors multipliées pour chaque site. Suivant le résultat de cette multiplication, la probabilité d'apport issu de la nappe de versant est établie :

- nulle, lorsque le résultat est 0 ou 1,
- faible, lorsque le résultat est 2,
- moyenne, lorsque le résultat est 3,
- forte, lorsque le résultat est 4, 6 ou 9.

2.3.6. Calcul du niveau relatif de perturbations par les crues

Le niveau de perturbations par les crues peut apporter indirectement des informations sur le fonctionnement du site, et sur la nature des eaux souterraines qui vont l'alimenter. En effet, dans un contexte de niveau de perturbations élevées, les crues sont susceptibles de curer régulièrement le fond de la zone humide ou du cours d'eau, maintenant une connectivité élevée avec les eaux phréatiques. Les crues sont également susceptibles de déposer des sédiments fins après chaque événement, et donc de provoquer une déconnexion des apports d'eaux souterraines. Selon les sites, l'effet des crues les échanges nappes/rivières est donc variables. Il est par conséquent nécessaire de bien connaître de telles dynamiques pour bien caractériser les échanges sur les secteurs étudiés.

espèces	site 16 abondance	perturbation par les crues					perturbation par les crues			
		au cune	faible	moyenne	forte		au cune	faible	moyenne	forte
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1	X	1	1	1	=	1	1	1	1
<i>Elodea nuttallii</i>	3	X	0	0	2	=	0	0	6	6
<i>Lemna minor</i>	2	X	0	0	0	=	0	0	0	0
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1	X	1	2	2	=	1	2	2	3
<i>Polygonum hydropiper</i>	1	X	0,5	2	2	=	0,5	2	2	3
<i>Potamogeton nodosus</i>	1	X	0	2	2	=	0	2	2	3
<i>Potamogeton pectinatus</i>	1	X	0	0	0,5	=	0	0	0,5	3
							total	2,5	7	13,5
							total / Σabondance	0,25	0,7	1,35

Tableau 5 : Calcul du niveau relatif de perturbations et du processus ou non d'alluvionnement sur un site situé sur le secteur de Donzère-Mondragon (L'indice nous indique que cette station est soumise à de forte perturbation par les crues)

Dans les deux situations, si ces événements sont fréquents, cela indique que l'altitude relative de la zone étudiée est proche de celle du fleuve (situation d'exhaussement ou de très légère incision) et que la nappe d'accompagnement du fleuve (généralement eutrophe) est susceptible d'alimenter la zone humide. Cela permet alors d'identifier les zones géographiques dans lesquelles il est possible de constater des situations d'alimentation par une nappe alluviale eutrophisée.

Le niveau relatif des perturbations par les crues se calcule de la même manière que l'indice trophique d'un site. Il est obtenu grâce à la multiplication de l'abondance relative de chaque espèce estimée sur le terrain (Tableau 1) par son code indicateur pour chaque classe de perturbation (Tableau 5). La somme de ces produits est ensuite additionnée puis divisée par la somme des abondances. Le niveau de perturbation présentant la valeur la plus élevée est alors représentatif pour le relevé. Si cette valeur est identique pour deux ou trois classes différentes, alors le résultat est considéré comme non significatif et il n'est pas pris en compte.

2.4. Modèle hydrodynamique du champ captant de Saint-Maxire/Échiré sur le bassin de la Sèvre-Niortaise [BRGM]

2.4.1. Le logiciel MARTHE utilisé pour la modélisation

Le code de calcul retenu dans le cadre de la modélisation des échanges nappes/rivières du site sur la Sèvre-Niortaise est MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements). Ce code, développé par le BRGM, utilise, pour résoudre l'équation de diffusivité des écoulements de nappe, la méthode des volumes finis, et permet le calcul des écoulements de fluides et de transferts de masse et d'énergie en milieux poreux bidimensionnels (plan ou coupe verticale) et tridimensionnels [Thiéry D. (2006)]. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone saturée et/ou non-saturée, écoulements multiphasiques, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction entre cours d'eau et nappes, etc.) en régime permanent ou transitoire. Il permet aussi de simuler des drains souterrains ainsi que les échanges entre un réseau hydrographique et les nappes sous-jacentes. Les différentes fonctionnalités et leur mise en œuvre sont décrites par Thiéry D. (1990a et 1990b, 1993, 1994, 1995a et 1995b, 2004), Thiéry D. et Golaz C. (2002), Thiéry D. et al. (2002).

Le modèle tridimensionnel se présente sous la forme de grilles de calcul superposées avec un maillage parallélépipédique régulier ou irrégulier. Les cellules sont connectées, le « motif de base » étant constitué par une cellule en relation avec les six mailles voisines (nord, sud, est, ouest, haut et bas). Dans chaque maille des valeurs sont entrées (cote des toits et des murs des couches, paramètres hydrodynamiques, conditions aux limites dont les flux d'infiltration ou les flux rejoignant les cours d'eau, le débit de prélèvement dû à aux pompages en nappe...) ou sont calculées par le modèle (charge piézométrique).

Le modèle hydrodynamique est ici couplé avec le réseau hydrographique. Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents (Figure 1). Chaque tronçon de rivière ne peut avoir qu'un seul tronçon aval et jusqu'à trois tronçons amont. Un tronçon est décrit par sa géométrie (longueur, largeur, et altitude du lit), par ses propriétés physiques (rugosité du lit, pente du lit, épaisseur et perméabilité du lit et des berges), par ses termes source (pompages ou injections) et par son état (hauteur d'eau dans la rivière) (Figure 2).

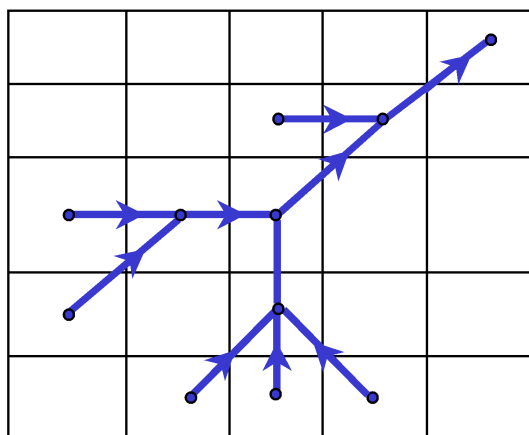


Figure 1 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (à gauche)

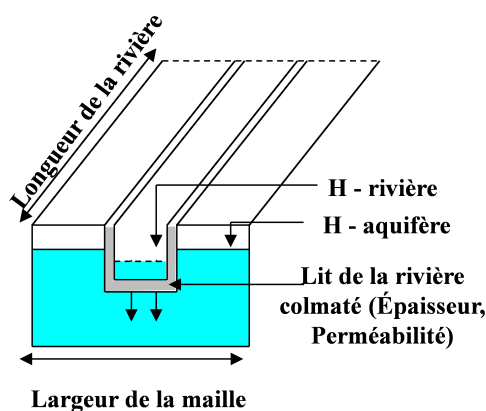


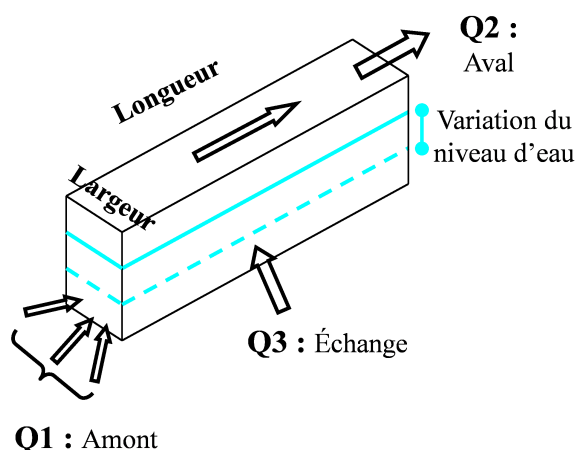
Figure 2 : Géométrie d'un tronçon de rivière (à droite)

2.4.1.1. Bilan des débits dans un tronçon de rivière

Comme le montre la Figure 3, le débit dans un tronçon de rivière résulte de l'équilibre de tous les termes de débits : amont (Q_{AM}), aval (Q_{AV}), échanges avec l'aquifère (Q_{ECH}), ruissellement (Q_{RUIS}), termes sources (Q_{INJ}) et, lorsque le routage est pris en compte, terme de stockage (STO). L'équation d'écoulement s'écrit comme suit :

$$Q_{AV} = Q_{AM} + Q_{ECH} + Q_{RUIS} + Q_{INJ} - \frac{dSTO}{dt} \quad (1)$$

où « dt » est la durée du pas de temps. Dans le cas d'une section rectangulaire, le terme de stockage STO est le produit de la largeur du tronçon par la hauteur d'eau dans la rivière (HRL).



$$\Sigma Q1 + Q3 - Q2 = \text{Diff-Stock} (Q)$$

Figure 3 : Bilan des débits dans un tronçon de rivière

La hauteur d'eau HRL dans le tronçon est reliée au débit aval du tronçon Q_{AV} par la formule de Manning-Strickler :

$$Q_{AV} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \sqrt{\text{Pente}} \quad (2)$$

où :

A = Section du tronçon

R = Rayon hydraulique = (Largeur.HRL) / (Largeur+2HRL) (3)

n = Coefficient de Manning-Strickler

Pente = Pente du lit du cours d'eau

HRL = Hauteur de l'eau au-dessus du lit

En combinant les équations (1) et (2) on obtient une équation qui donne le débit en aval du tronçon en fonction du débit du tronçon aval et des débits des tronçons amont. Le débit dans tout le réseau hydrographique est alors obtenu par un processus itératif en utilisant l'ordre de Strahler de chaque tronçon de manière optimale. Ce schéma de routage s'est avéré très efficace et a été comparé avec succès à une solution quasi-analytique de propagation d'onde de crue dans un canal, ainsi qu'avec des données observées de propagation de crue en Haute-Loire. Comme la méthode de calcul suppose qu'en chaque tronçon la surface libre a la même pente que le lit, l'approximation est d'autant meilleure que la pente lit

de la rivière n'est pas trop petite et que les variations de hauteur dans la rivière ne sont pas trop rapides, ce qui est généralement le cas dans les systèmes naturels.

2.4.1.2. Interactions entre rivière et aquifère

Selon la position relative de la hauteur d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé, d'une manière non linéaire, par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité (Figure 4).

Trois situations sont possibles :

- Lorsque le niveau dans l'aquifère est inférieur à la base du lit de la rivière, le débit d'échange vers l'aquifère est un terme de percolation indépendant de ce niveau [Équation (5)]
- Lorsque le niveau dans 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, qui intègre les berges de la rivière, multiplié par la différence entre la hauteur dans la rivière et le niveau dans l'aquifère, divisé par l'épaisseur du lit [Équation (6)]
- Lorsque la charge hydraulique de l'aquifère est supérieure à la cote du sol et aussi supérieure 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 [Équation (7)]

Il apparaît donc que, dans le cas général, le débit d'échange dépend des variations d'eau dans la rivière. Considérant un niveau donné dans l'aquifère, le débit d'échange de la rivière vers la nappe est plus élevé quand le débit de la rivière, et donc la hauteur d'eau dans la rivière, sont plus élevés. Le modèle peut donc être vérifié ou calibré à partir d'observations de variations de hauteur dans la rivière quand elles sont disponibles.

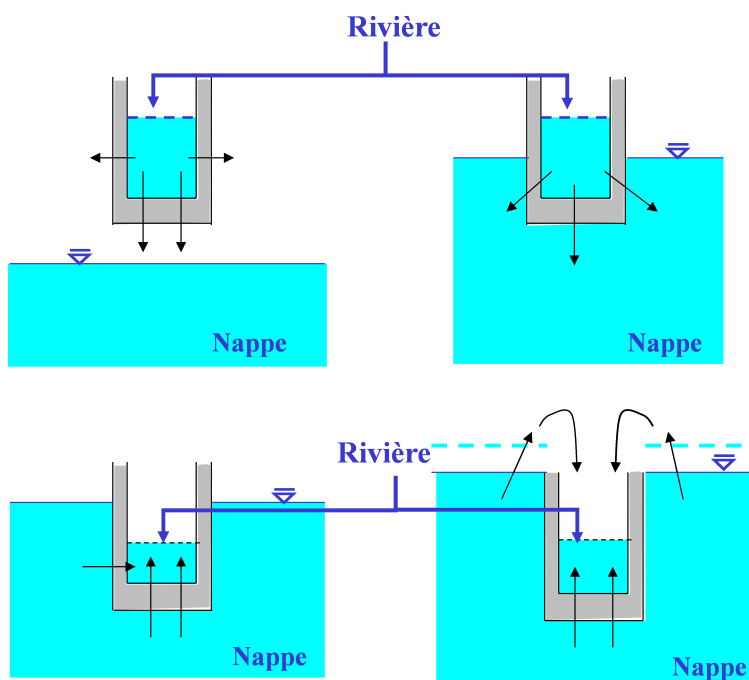


Figure 4 : Différentes configurations d'échanges nappe - rivière

$$SURF_{\text{Éch}} = L \cdot [l + 2 \cdot (H_R - H_f)] \quad (4)$$

$$Q_{\text{Percol}} = SURF_{\text{Éch}} \cdot K_R \cdot \frac{(H_R - H_f)}{\text{Épais}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{Éch}} = SURF_{\text{Éch}} \cdot K_R \cdot \frac{(H_R - H_N)}{\text{Épais}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{Débo}} = (SURF_{\text{Mail}} - L \cdot l) \cdot K_R \cdot \frac{(H_N - H_{\text{Topo}})}{\text{Épais}} \quad (7)$$

Avec :

L = Longueur du tronçon

l = Largeur du tronçon

KR = Perméabilité du lit et des berges

Épais = Épaisseur du lit (et des berges)

HR = Cote absolue de la surface libre de la rivière

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

Hf = Cote du lit de la rivière

HTopo = Cote de la surface topographique

SURFMail = Surface de la maille associée du modèle de nappe

SURFÉch = Surface d'échange

QÉch = Débit d'échange de la rivière vers la nappe

QPercol = Débit de percolation de la rivière vers la nappe décrochée

QDébo = Débit complémentaire de débordement de la nappe vers la rivière

2.4.1. Application de MARTHE au champ captant de Saint-Maxire/Echiré

Le modèle de Saint-Maxire/Echiré prend pour base le modèle hydrodynamique régional des aquifères du Jurassique en Poitou-Charentes. Ce dernier a été développé par le BRGM dans un projet réalisé pour le compte de la Région Poitou-Charentes [Putot E. et Bichot F. (2007)]. Il englobe les zones d'extension des nappes du Dogger et de l'Infra-Toarcien entre une ligne Loudun/Châtellerauld au nord et une limite La Rochelle/Angoulême au sud. Ces limites correspondent à de grandes failles. Les limites occidentales et orientales correspondent respectivement au socle armoricain et au socle du Massif Central. Les contextes géologiques et hydrogéologiques ont été décrits en détail dans les rapports des deux premières phases du projet. Le lecteur pourra se référer aux rapports BRGM/RP-51881-FR [Touchard F. et al. (2002)] et RP-52713-FR [Touchard F. et al. (2004)] ainsi qu'à la synthèse hydrogéologique par bassin versant de la région [Bichot F. et al. (2005)]. La géométrie du modèle est décrite en détail dans le rapport de la phase trois du projet (rapport BRGM/RP-54294-FR - [Touchard F. et al. (2005)]). Les principales caractéristiques du modèle sont rappelées ci-après. Dès le départ ce modèle a été construit avec des mailles carrées de 1km de côté. Ce premier modèle finalisé en 2007 (IT_DOG_V1-2007), intégrait 5 couches depuis le socle (couche de base) à la surface. Sa géométrie a été réalisée à partir de l'interprétation d'environ 1 000 forages. Adapté en 2010 puis en 2011, le modèle comporte in fine 96 340 mailles, 8 couches de calcul et couvre 19 280km². Pour plus d'informations sur les adaptations successives, le lecteur est invité à consulter les rapports BRGM/RP-58297 [Domez et al., 2010] et BRGM/RP-59288 [Domez et al., 2011]). Le modèle régional est calé en transitoire, au pas de temps mensuel de 2000 à 2007. Quatre-vingt-sept chroniques piézométriques du réseau régional (Région Poitou-Charentes) ont été utilisées pour valider le calage.

La version adaptée au champ captant présente une extension spatiale réduite à un domaine de 3300 km². Autour du champ captant, le maillage de 1 km² est localement raffiné en sous-maillages d'un hectare (Figure 5). Cet emboîtement de discrétisation spatiale croissante est qualifié de « gigogne ».

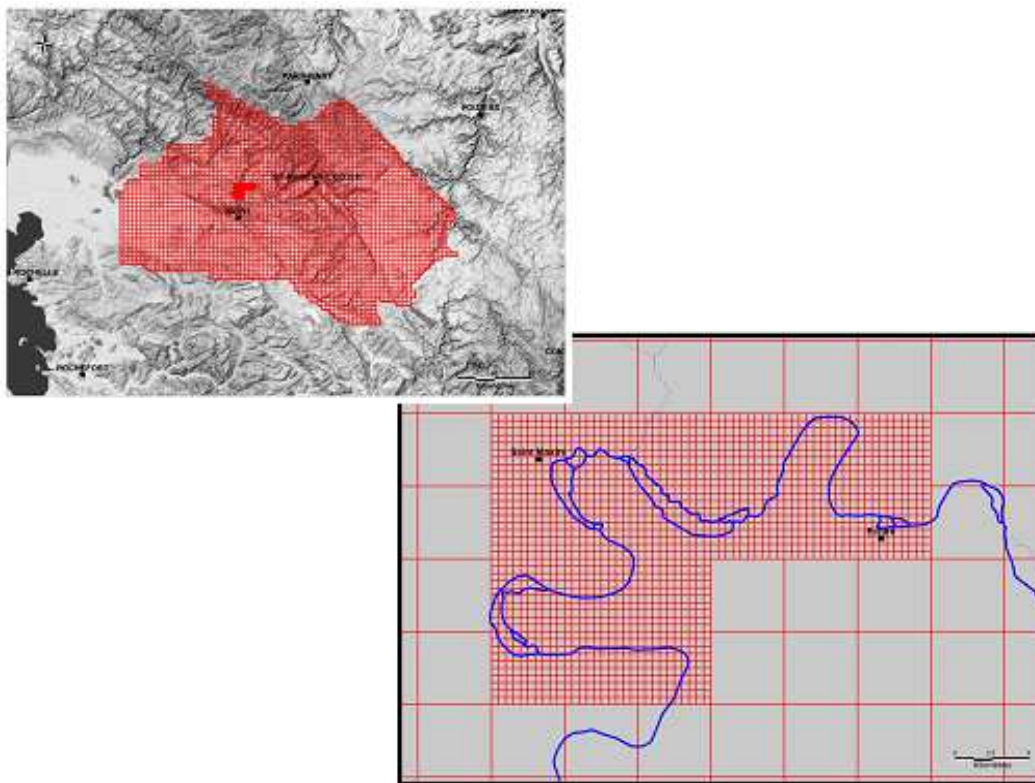


Figure 5 : Extension et raffinement spatial du modèle hydrodynamique

Le travail d'adaptation se focalise sur le secteur du gigogne, i.e. sur la zone de maillage raffinée considérant que la paramétrisation du reste du modèle reste inchangée. En conséquence, cette adaptation conduit à la synthèse de données spatialisées et de données temporelles. Au droit du gigogne :

1) Le modèle comprend 8 couches traduisant l'empilement des séries du Jurassique sur le socle et la présence des formations quaternaires (alluvions, grèzes) sur les pentes et le lit de la Sèvre-Niortaise. Les formations quaternaires sont implémentées dans la couche 1. Les cotes de substratum et la puissance des couches géologiques sont précisées sur la base d'une vingtaine de coupes géologiques. Le rejeu engendré par les principales failles est ainsi pris en compte. Sous recouvrement, l'épaisseur moyenne des formations est fixée à 8 mètres pour l'Aalénien-Toarcien, de 31 mètres pour l'Infra-Toarcien et de 50 mètres pour le socle. La série du jurassique moyen, le plus souvent à l'affleurement, montre une puissance de 1 à 45 mètres.

2) La recharge de la nappe est estimée par zone, au pas de temps mensuel, à partir d'un bilan classique fournissant la pluie efficace qui correspond à la lame d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. En croisant pluviométrie et la réserve utile locale des sols, le secteur est subdivisé en zone de pluie efficace homogène. La partition de cette pluie efficace entre ruissellement et infiltration est ensuite effectuée en croisant ces zones de sol avec l'Indice de Persistance et de Ruissellement des Réseaux (IDPR). Chaque maille du gigogne est alors caractérisé par une valeur de flux d'infiltration et de flux de ruissellement.

3) Chaque prélèvement (eau souterraine et eau superficielle) est individualisé et affecté à une maille du gigogne. Les chroniques de prélèvement individualisées sont précisées entre 2000 et 2007.

	Valeur retenue sur le gigogne	Source
Longueur de tronçon (m)	10 à 200	Traitement BD Carthage
Largeur de tronçon (m)	7 à 35	Mesure de terrain, traitement d'images satellites
Côte moyenne du fond de rivière (m)	-	MNT 50 m et carte IGN 1/25000
Épaisseur du lit de rivière (cm)	5 à 15	-
Perméabilité du lit de rivière (m/s)	10^{-3} à 10^{-6}	-

Tableau 6 : Paramètres du réseau hydrographique implémentés dans le modèle sur le secteur du gigogne

Le modèle intègre la totalité du bassin versant de la Sèvre-Niortaise en amont du champ captant. Le réseau palmé du fleuve et de ses affluents est représenté dans une couche de « surface » en connexion avec la première couche géologique. La taille des mailles rivière est identique à celle définie pour les mailles aquifères sous-jacentes. Outre l'introduction de la structure du réseau, chaque maille du gigogne traversée par un cours d'eau est associée à une valeur pour les paramètres présentés dans le Tableau 6.

Les échanges entre la nappe et les cours d'eau se font dans les deux sens. L'intensité de ces échanges est une fonction des niveaux d'eau entre la nappe et la rivière régulée par l'épaisseur des dépôts semi-perméable de fond de rivière et la perméabilité de ces dépôts. De fait, les flux calculés sont fortement dépendants des paramètres descriptifs des dépôts de fond de rivière et des niveaux d'eau. Concernant la Sèvre-Niortaise, ces caractéristiques sont actuellement définies grossièrement (cote fond de rivière imposée suivant le MNT) voire inconnues (épaisseurs et perméabilités des dépôts, niveau d'eau). Les valeurs présentées restent des paramètres de calage.

2.5. Géophysique, Métrique MOLONARI et Modèle METIS sur le bassin de l'Orgeval [Mines ParisTech + Sisyph Geophy + Irstea]

2.5.1. Géophysique

Sur le bassin de l'Orgeval, la caractérisation de la structure et des écoulements de l'aquifère superficiel des calcaires de Brie a été réalisée en utilisant les données piézométriques pour comprendre les écoulements régionaux et la prospection géophysique. Cette prospection comprend des sondages TDEM (sondages électromagnétiques dans le domaine temporel), des sondages électriques et des tomographies de résistivité électrique (ERT) ; Elle a permis d'améliorer la description de la géologie de surface, des deux aquifères sous-jacents (calcaires de Brie et calcaires du Champigny), de la couche d'argile qui les sépare et de localiser les connectivités potentielles avec les cours d'eau (Mouhri et al., 2011a, b). Dans la suite de ces travaux, de nouvelles campagnes de tomographie de résistivité électrique (ERT) ont été menées : i) pour caractériser finement (résolution de ~0.125 m) la structure de la zone hyporhéique (ZH) ; ii) pour identifier le contact avec le Champigny à l'aval du bassin et donc le dernier point d'implantation du dispositif expérimental MOLONARI (cf. 2.5.2). Le dispositif Wenner-Schlumberger de 48 ou 96 électrodes a été choisi pour réaliser les tomographies ERT. L'espacement entre les électrodes varie entre 0,25m, pour la caractérisation de la ZH) et 4 m pour la caractérisation de la structure géologique régionale. L'inversion est effectuée en utilisant RES2DINV commercial logiciel (Loke et Barker, 1996).

Les données de carottages (16 piézomètres, réalisés dans le cadre du programme PIREN-Seine) ont permis de valider les interprétations géophysiques (Mouhri et al., 2013).

2.5.2. Métrique pression-température des Avenelles (Métrique MOLONARI)

La caractérisation de la structure géologique et des contacts entre les cours d'eau et les différentes unités aquifères et aquitards par la géophysique a permis de sélectionner cinq sections de rivière représentatives des différents types de contact entre la rivière et le substrat géologique. Des dispositifs MOLONARI (MOnitoring Local des échanges NAppe-Rivière) ont été implantés au droit de ces stations (Mouhri et al., 2011a, b, 2012, 2013) pour mesurer la pression et la température de l'eau à différentes profondeurs le long du transect. Les dispositifs MOLONARI (Figure 6 ; Figure 24), couplés aux infrastructures du réseau de mesure du GIS ORACLE, permettent de suivre l'évolution à long terme des flux échangés entre les différents compartiments du système depuis l'échelle de la ZH, jusqu'à celle du bassin. Plus précisément, il a pour objectifs :

- de caractériser la variabilité spatio-temporelle des échanges nappes/rivières,
- 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,
- de fournir un premier support pour la modélisation biogéochimique spatialisée à l'échelle du bassin.

Sur le plan expérimental, le corridor de la vallée des Avenelles sur le bassin de l'Orgeval a été sélectionné pour l'implantation des dispositifs MOLONARI. Ainsi, les cinq sites sélectionnés représentent différents types de connectivité (validées par carottage) entre le cours eau et les aquifères. Le dispositif de mesure multi-échelle est déployé sur une longueur de 6km de réseau hydrographique.

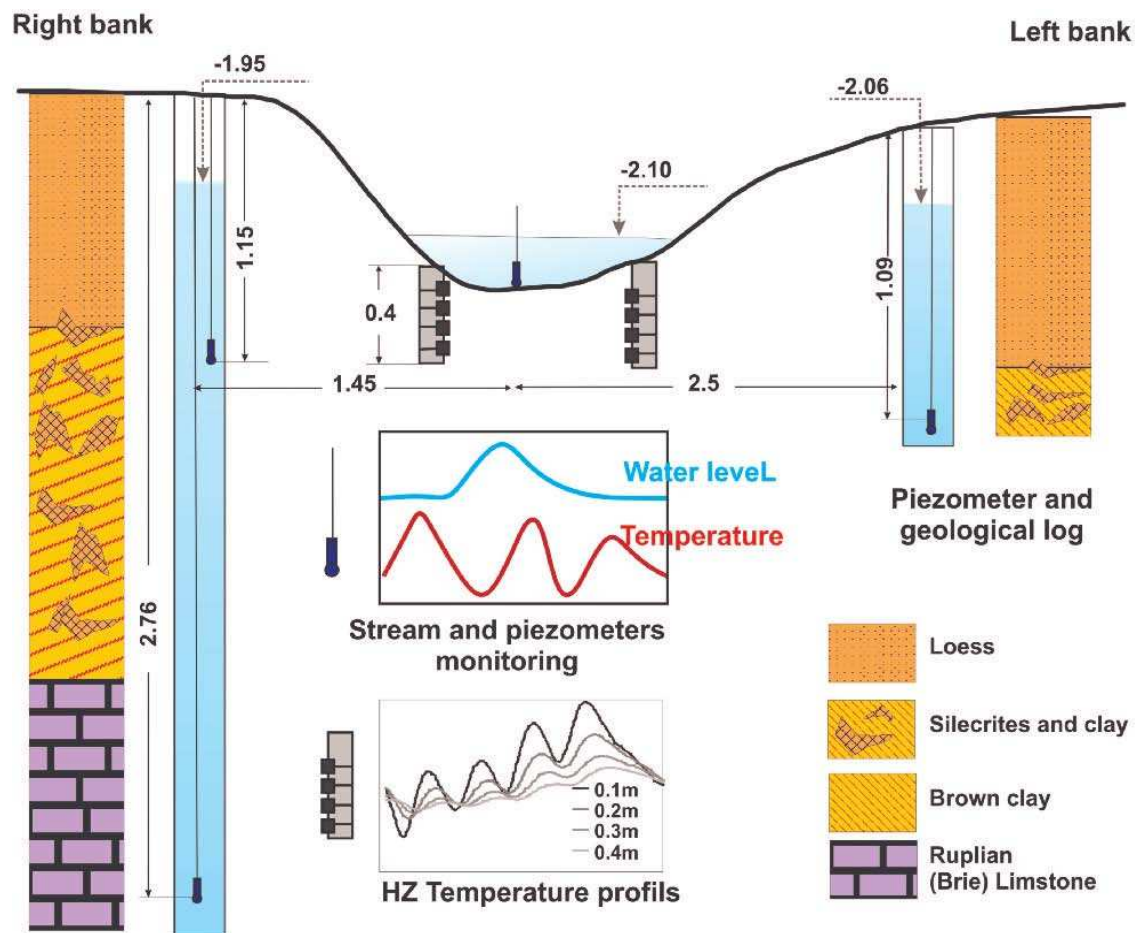


Figure 6 : Station de MOnitoring Local des échanges NAppe-Rivière (MOLONARI) sur la base de mesures hydro-géophysiques (température, pression). D'après Mouhri et al. (2013)

2.5.3. Modélisation des flux d'eau et du transfert thermique dans la zone hyporhéique

Le code de simulation METIS, qui représente en 2D les écoulements verticaux et le transfert de chaleur en milieu poreux (Goblet 2010), est utilisé pour interpréter les données expérimentales et pour tester l'hypothèse de verticalité des flux (Krause et al. 2012) entre la rivière et l'aquifère à l'échelle de la ZH. 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 deux équations (2 & 3). La charge hydraulique est exprimée par :

$$h = \frac{P}{\rho_0 g} + z \quad (1)$$

Où h est la charge piézométrique [L], P est la pression du fluide [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$], ρ_0 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].

Les écoulements souterrains transitoires sont décrits par l'équation de diffusivité :

$$\nabla \left[\frac{k \rho g}{\mu} \nabla h \right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

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

Le transfert thermique transitoire prend en compte l'advection, la dispersion cinématique, et la conduction, s'écrit :

$$\nabla [(\alpha \gamma_w \|U\| + \Lambda) \nabla T - \gamma_w U T] = \gamma \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

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

2.6. Modélisation hydrogéologique couplée surface-souterrain avec la plate-forme Eau-Dyssée sur le bassin du Rhin supérieur [Sisyphé Hydro]

2.6.1. Description générale du modèle

Une modélisation hydrogéologique couplée surface-souterrain a été développée sur le bassin du Rhin Supérieur entre Bâle et Lauterbourg (Thierion, 2011; Thierion et al., 2012). Cette modélisation s'appuie sur la plate-forme de modélisation Eau-Dyssée intégrant une version modifiée du modèle hydrogéologique MODCOU développé à l'école des Mines. Il s'agit d'un projet de modélisation intégrée de l'hydrosystème qui s'appuie sur le couplage de modèles existants afin de les rendre plus efficaces et d'obtenir des résolutions spatiales plus fines via une gestion des couplages qui n'entrave pas l'évolution indépendante des modèles. Eau-Dyssée est utilisée pour modéliser les principales composantes du cycle continental de l'eau, en particulier le rôle des écoulements de surface et souterrains sur les relations pluie-débit à l'échelle régionale.

Dans cette étude, l'infiltration et le ruissellement de surface utilisés au sein de la plate-forme Eau-Dyssée sont issus d'une simulation du modèle de surface Interactions-Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA) forcé par les réanalyses atmosphériques SAFRAN sur la plaine du Rhin. Ces composantes de surface ont été fournies dans le cadre d'une collaboration avec Météo France.

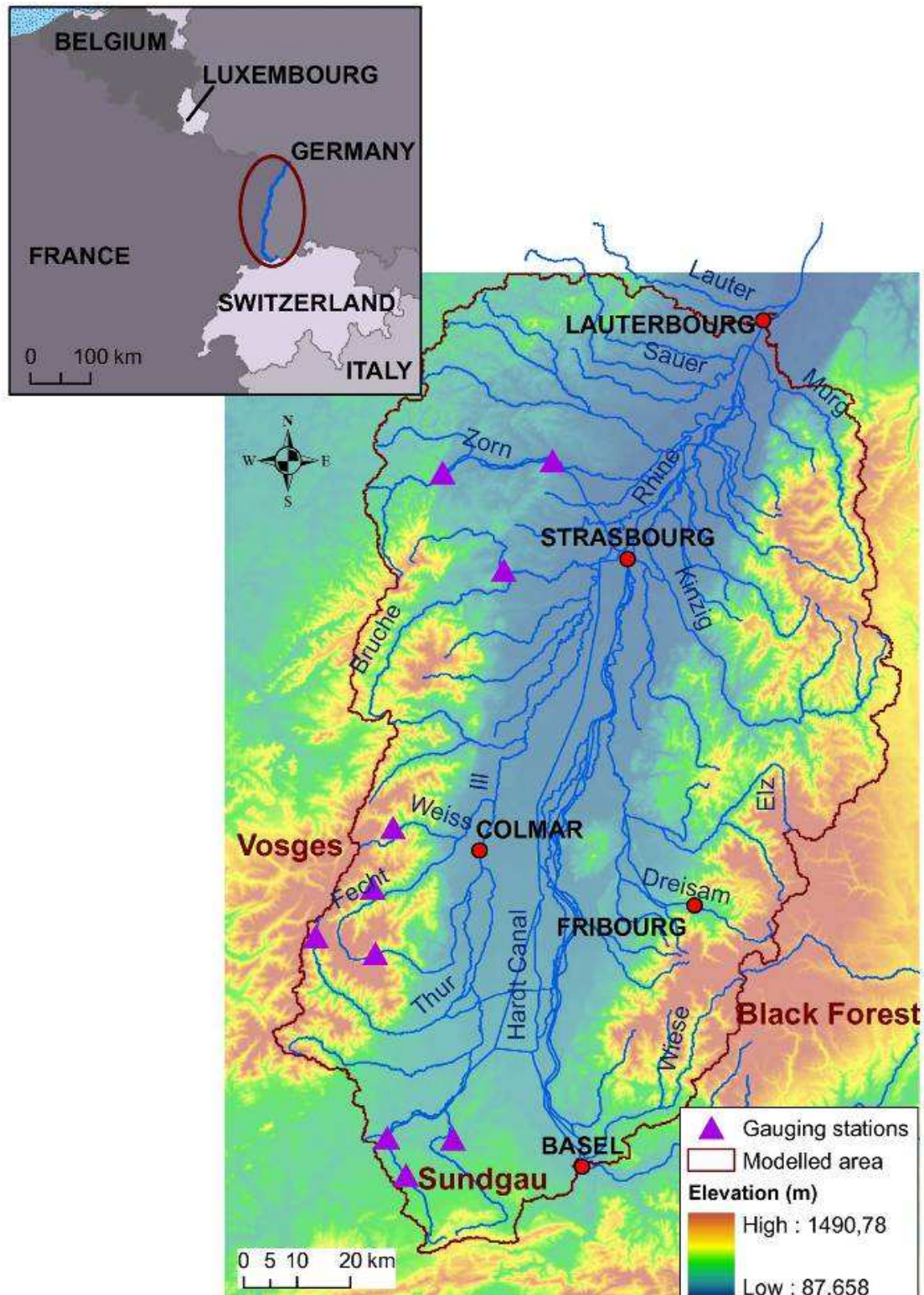


Figure 7 : Extension du domaine modélisé sur le bassin du Rhin Supérieur

La modélisation des écoulements souterrains est assurée par le module SAM (Simulation des Aquifères Multicouches). Il s'agit d'un modèle spatialement distribué, qui utilise une discrétisation du domaine d'étude en mailles carrées. Dans notre cas les mailles ont des tailles variant de 200 à 1600 m de côté (Figure 7 et Figure 8). Les mailles les plus petites correspondent aux mailles du réseau hydrographique. Le

module souterrain permet de simuler les écoulements en nappe, et de calculer des niveaux piézométriques en chaque maille. Il est basé sur une approximation de Dupuit (déplacement de l'eau horizontal en tout point) et utilise une représentation 2D de l'aquifère, c'est-à-dire que les variations d'épaisseur mouillée sont considérées comme négligeables devant l'épaisseur mouillée totale de l'aquifère. Cette hypothèse est valable dans les zones où l'épaisseur mouillée est importante, et dans des conditions où les battements de nappe restent faibles devant celle-ci. L'équation de diffusivité, exprimée en transmissivité, est résolue grâce à une méthode de différences finies.

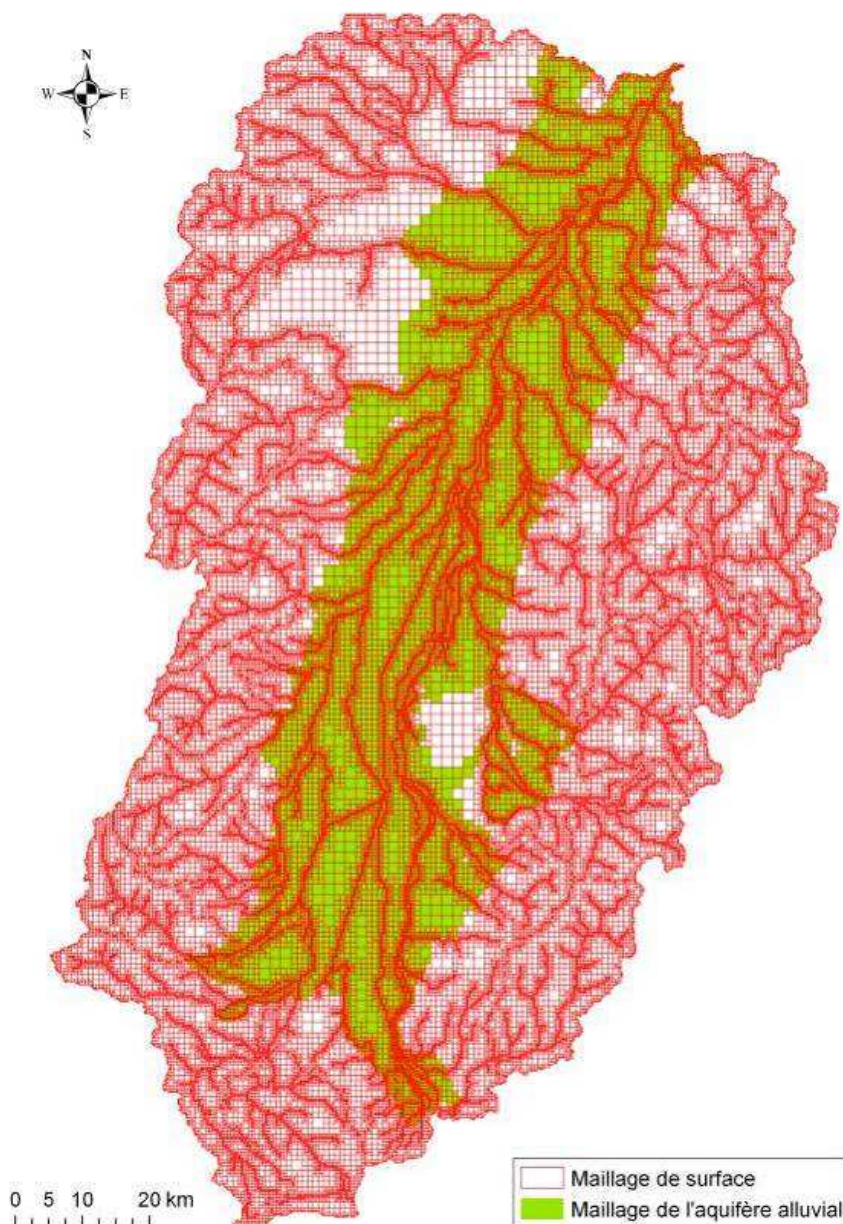


Figure 8 : Extension du maillage du modèle MODCOU du bassin du Rhin Supérieur

Le modèle de routage RAPID (David et al., 2011) assure le transfert et la propagation du ruissellement de surface et de la contribution de la nappe au flux de surface dans le réseau hydrographique (Figure 8). Ce routage est basé sur la méthode de Muskingum et permet d'avoir accès au débit simulé sur chaque maille du domaine.

2.6.2. Prise en compte des échanges nappes/rivières

Les interactions surface-souterrain sont prises en compte dans le modèle à la fois au niveau du réseau hydrographique et hors de celui-ci. Le long du réseau hydrographique, des échanges entre les rivières et la nappe ont lieu dans les deux sens, en fonction des niveaux d'eau dans la rivière et dans la nappe. Deux situations peuvent se présenter. Si la nappe et la rivière sont connectées, les échanges sont fonction des caractéristiques hydrodynamiques du lit de la rivière et peuvent se produire dans les deux sens ; la nappe alimente la rivière si son niveau est supérieur à celui de la rivière, et la rivière alimente la nappe si l'inverse se produit. En revanche, si la nappe est totalement déconnectée de la rivière, l'écoulement s'effectue uniquement de la rivière vers la nappe et dépend en plus des caractéristiques du matériau sous le lit de la rivière.

La modélisation de ces échanges nécessite en théorie une connaissance détaillée des caractéristiques géomorphologiques de la rivière. Or, ceci est impossible dans la plupart des modélisations hydrogéologiques actuelles du fait de la grande taille des mailles employées qui excèdent généralement les dimensions de la rivière. Une méthode couramment employée consiste à utiliser un paramètre s'apparentant à la transmissivité du matériau constituant le lit de la rivière. L'hypothèse sous-jacente est de considérer le lit de la rivière comme un matériau semi-perméable dans lequel l'écoulement s'effectue selon la loi de Darcy.

Le débit d'échange (nappe vers rivière) s'écrit alors en fonction du gradient hydraulique entre la rivière et la nappe :

$$Q_{ech} = \min(Q_{lim}; Q_{dis}; T_p (H_{riv} - H_{nap}))$$

avec Q_{lim} le débit maximum d'infiltration sur une maille rivière, Q_{dis} le débit disponible, T_p le coefficient d'échange nappe/riverière (en m^2/s), H_{riv} la cote de l'eau en rivière et H_{nap} la cote de l'eau en nappe. Q_{lim} correspond au débit d'infiltration imposé de la rivière vers la nappe lorsque la nappe est déconnectée de la rivière.

Dans notre cas T_p a été pris égal à $0,05 m^2/s$ sur l'ensemble des mailles rivière, et Q_{lim} égal à $50 l/s$ partout. Ce coefficient n'est pas calé mais quantifié à partir de valeurs plausibles. Ces paramètres sont également constants au cours du temps. Le fait de fixer des valeurs constantes avec un ordre de grandeur plausible permet de réaliser les simulations sans calibration, étant donné que cette calibration serait forcément indirecte compte-tenu de l'absence d'observation de ces flux. Cependant, un ensemble de tests de sensibilité à ces valeurs a été réalisé et les résultats de cet ensemble de simulation ont été analysés (Thierion, 2011).

En dehors du réseau hydrographique, le modèle permet de prendre en compte des débordements de nappe dans le cas où le niveau piézométrique dépasse la cote du sol. Le débit extrait de la nappe est alors égal à :

$$T_p (H_{sol} - H_{nap})$$

avec H_{sol} la cote du sol.

Les échanges nappes/rivières simulés sont donc fortement contraints par les valeurs d'altitudes utilisées dans le modèle. Il reste néanmoins difficile d'estimer la cote de l'eau à partir d'un modèle numérique de terrain avec une résolution de l'ordre de la centaine de mètres. La prise en compte des variations temporelles du niveau de l'eau est un paramètre important qui peut jouer sur la variabilité spatio-temporelle des échanges nappe/riverière. Au sein de la plate-forme Eau-Dyssée, le module QtoZ permet la conversion du débit simulé par RAPID en niveau de rivière. Trois méthodes sont disponibles pour le calcul du niveau d'eau dans chaque maille rivière.

La première méthode consiste à fixer une hauteur imposée en rivière. Ainsi, dans la version de base du modèle développée sur le bassin du Rhin Supérieur (Thierion, 2011), les cotes en rivières ont été estimées à partir de données d'altitudes issues du projet Monit (LUBW, 2006), excepté sur le cours du Rhin où des cotes variables ont été considérées en se basant sur la méthodologie de Saleh (Saleh et al., 2011).

La seconde méthode utilise l'équation de Manning pour convertir le débit simulé par RAPID en hauteur d'eau en rivière. En faisant l'hypothèse d'une section rectangulaire de la rivière, et en considérant que la profondeur de plein bord est petite par rapport à la largeur de la rivière, on peut réécrire l'équation de Manning de la manière suivante :

$$H_{riv} = Z_{fond} + \left[\frac{Q_n}{W_s^{0.5}} \right]^{\frac{3}{5}}$$

Avec H_{riv} l'altitude du niveau de la rivière, Z_{fond} l'altitude du fond de la rivière, Q le débit de la rivière, n le coefficient de Manning, W_s la largeur de la rivière et s la pente du lit le long de l'écoulement. À partir de cette relation, le module QtoZ permet d'estimer une hauteur de rivière variable à partir du débit simulé par RAPID, pour peu que l'on connaisse les caractéristiques géométriques et morphologiques de la rivière.

Enfin, la dernière méthode se base sur l'utilisation de courbes de tarage hauteur-débit pour déterminer la variabilité de la hauteur en rivière sur chaque maille.

La caractérisation des échanges nappe/rivière en termes de quantité et de variabilité spatio-temporelle dépend fortement des choix réalisés pour représenter les variations de hauteurs d'eau en rivière. L'un des objectifs de l'étude est de quantifier l'influence que peut avoir le choix du formalisme adopté pour représenter ces hauteurs en rivière sur la simulation des échanges nappe/rivière.

3. Approche multi-site : présentations des cinq sites sélectionnés

Les sites d'étude présentés dans cette partie ont été sélectionnés selon des critères (spécificité des enjeux, diversité des configurations hydrogéologiques, diversité des méthodes d'investigation, existence d'échanges,...) visant à estimer leur pertinence par rapport à la problématique « échanges nappe/rivière ». De plus, une visite de terrain est prévue pour chaque site pour mieux les prendre en main collectivement (les comptes-rendus de visites de terrain et de réunions sont consultables en annexe 3). Au final cinq sites ont été retenus [les équipes intervenants sur ces sites sont identifiées entre crochets] :

- Rhône aval (Donzère-Mondragon) / Grand Fleuve [ENSM-SE + UMR 5023]
- Sèvre-Niortaise (Champ captant de Saint-Maxire/Échiré) / Fleuve Côtier [BRGM]
- Rhin supérieur (Plaine de l'III) / Grand fleuve [Sisyph Hydro + UMR 5023]
- Loire amont (Plaine du Forez – Écozone) / Grand fleuve [ENSM-SE + UMR 5023]
- Orgeval / Affluent de la Seine [Mines ParisTech et Sisyph Geophy et Irstea]

3.1. Rhône aval (Donzère-Mondragon) [ENSM-SE + UMR 5023]

3.1.1. Localisation géographique

Localisé à environ 170km au sud de Lyon et à une centaine de kilomètres au nord d'Arles (25km au sud de Montélimar et à 33km au nord d'Orange), l'aménagement Compagnie Nationale du Rhône (CNR) de Donzère-Mondragon est situé principalement dans la plaine du Tricastin. Ce territoire s'étend sur une trentaine de kilomètres du nord au sud et sur une quinzaine de kilomètres d'est en ouest (Figure 9). Les localités principales bordant le Rhône et le canal de dérivation sont : Viviers, Saint-Montant et Donzère au nord ; Saint-Alexandre, Mondragon, Vénéjan, Mornas et Saint-Étienne-des-Sorts au sud ; Pierrelatte, Lapalud et Lamotte-du-Rhône au centre de la plaine ; Bourg-Saint-Andéol, Saint-Marcel d'Ardèche, Saint-Just et Pont-Saint-Espirit (au niveau de la confluence Rhône-Ardèche) en rive droite du Rhône ; Les Granges Gontardes, la Garde Adhémar, Saint-Paul-Trois-Châteaux et Bollène en rive gauche du Canal de dérivation.

Par sa grande superficie et sa localisation géographique ce secteur est complexe du point de vue du découpage administratif éclaté. En effet, il est à cheval sur trois régions et quatre départements : Rhône-Alpes (RA) : Ardèche (07) au nord-ouest en rive droite du Rhône et Drôme (26) au nord-est en rive gauche du Rhône ; Languedoc-Roussillon (LR) : Gard (30) au sud-ouest est rive droite du Rhône ; Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) : Vaucluse (84) au sud-est en rive gauche du Rhône.

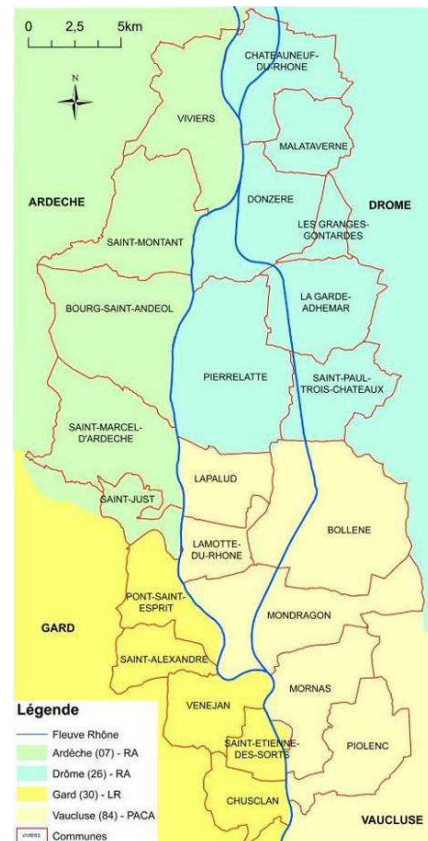


Figure 9 : Découpage administratif de l'aménagement de Donzère-Mondragon (source BDCarthage)

3.1.2. Aménagements CNR du secteur de Donzère-Mondragon

Le chantier pour la mise en place des ouvrages hydrauliques du secteur de Donzère-Mondragon était considéré à l'époque comme un des plus gros d'Europe. Le commencement des études date de 1942. L'achèvement des travaux et la mise en service a eu lieu sur la période 1952-1954 (Delattre, 1955).

Cet aménagement n'était pas le premier sur le secteur. De la fin du 18^e au milieu de 20^e siècle les aménagements ont été les suivants (Poinsart, 1992 ; Sogreah, 1999) : ouvrages de défense contre les crues (digues insubmersibles) ; chenalisation du fleuve et ouvrages d'amélioration des conditions de navigabilité (digues submersibles, barrages au niveau des bras secondaires, digues basses de resserrement du lit et premiers épis).

A l'amont de Bourg-Saint-Andéol les aménagements sont denses en raison du lit tressé qui rendait la navigation difficile. La fin des travaux de chenalisation pour la navigation est marquée par les aménagements Girardon, c'est-à-dire : des barrages de tous les bras et chenaux annexes, un prolongement des digues basses et la construction des épis éponymes.

Les aménagements réalisés de 1781 à 1947 ont eu plusieurs conséquences : diminution de la surface en eau du Rhône et de ses annexes, assèchement des lônes (bras morts) et disparition des îles ; délimitation de la largeur du chenal, stabilisation des sinuosités et limitation de la divagation horizontale ; et déficit sédimentaire (Poinsart, 1992).

En 1947, la largeur du chenal est comprise entre 150 et 259 m (moyenne : 160 m). Le choix de ce site par la CNR a été guidé par sa forte pente (la plus forte du bas-Rhône) et donc par sa forte rentabilité potentielle. Un tel aménagement a conduit à supprimer les derniers hauts-fonds qui rendaient la navigation délicate au niveau de passages rétrécis (courant violent). Le tracé de la dérivation a été choisi en fonction de différents critères : faible présence de limons (non-utilisables pour les remblais) ; secteurs présentant un risque moindre de submersion ; présence d'un piton de grès (10 à 12 m de la surface) pour ancrer l'usine Blondel (production d'hydroélectricité) ; présence de hameaux et d'un futur terrain d'aviation à épargner (raison de la courbe du canal de dérivation au nord).

L'aménagement CNR de Donzère-Mondragon a nécessité la construction de quatre barrages (un barrage de retenue, deux barrages de garde, un barrage usine – production d'hydroélectricité) dont l'un court-circuite le Rhône sur une longueur de 31 km, le creusement d'un canal de dérivation d'une longueur de 28 km constitué d'un canal d'amenée (amont usine Blondel) et d'un canal de fuite (aval usine Blondel). Il a aussi été nécessaire de construire des siphons, des déversoirs, des contre-canaux, des digues avec ou sans revêtement, des écluses, des ponts et des prises d'eau pour l'irrigation. Ces ouvrages servent d'une part au bon fonctionnement de l'usine hydroélectrique mais aussi au maintien du niveau phréatique et des connexions routières, ferroviaires et hydrologiques. A cette époque (années 1950), l'eau était encore considérée comme une entité à contraindre en fonction des usages de l'homme et des activités industrielles. Ce n'est qu'en 1964 que les usages récréatifs seront reconnus par la législation. Les « usages biologiques » et la notion d'eau patrimoine commun ne furent reconnus véritablement qu'avec la loi sur l'eau de 1992.

3.1.3. Un climat méditerranéen soumis aux épisodes cévenols

Le territoire étudié est soumis à un climat méditerranéen qui se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides, ainsi que par un ensoleillement annuel important. Mais ce type de climat est aussi caractérisé par des épisodes climatiques extrêmes.

Les précipitations annuelles moyennes sont relativement abondantes (924 mm pour Montélimar, 750 mm pour Pierrelatte et 722 mm pour Orange) mais leurs distributions saisonnières sont très contrastées avec des minima en juillet (47 mm pour Montélimar et 36 mm pour Orange) et des maxima en octobre (138 mm pour Montélimar et 107 mm pour Orange). Les pluies automnales représentent environ 35% des précipitations annuelles et peuvent être très violentes avec des épisodes orageux de type cévenol, c'est-à-dire des précipitations orageuses particulièrement intenses. Les précipitations méditerranéennes se

caractérisent aussi par leur faible fréquences (80 jours de pluies >1mm par an en moyenne à Montélimar et 69 jours pour Orange). Les données proviennent du site internet de Météo France.

3.1.4. Débits du Rhône

La Banque Hydro (<http://hydro.eaufrance.fr>) ne propose pas de synthèse pour les débits du Rhône des stations de mesure situées sur le secteur de Donzère- Mondragon (Viviers, bassin versant de 70 900km², PK 166,5 ; Bourg-Saint-Andéol, bassin versant de 72 000km²). Le Tableau 7 une synthèse des débits recueillis dans la littérature consultée (CNRa, 1999 ; CNRb, 1999 ; Sogreah, 1999).

	Débit à Donzère m ³ /s	Station de Vivier m ³ /s	Vieux-Rhône m ³ /s	Dérivation m ³ /s
Débit minimum observé	370	-	-	-
Étiage de 10 jours	590	-	-	-
Débit réservé	-	-	60	-
Débit dérivé usuel	-	-	-	1980
Débit semi-permanent (+6mois/an)	1400	-	-	-
Débit moyen annuel	1625	-	1500	-
Plus hautes-eaux navigables	3950	-	-	-
Crue quinquennale (Q5)	-	55 00	-	-
Crue décennale (Q10)	-	6100	6000	-
Crue cinquantennale (Q50)	-	7550	-	-
Crue centennale (Q100)	10000	9530	7900	-
Crue millénaire (Q1000)	12500	10100	-	-
Débit minimum observé	370	-	-	-

Tableau 7 : Débit du Rhône sur le secteur de Donzère-Mondragon (CNRa, 1999 ; CNRb, 1999 ; Sogreah, 1999)

Henry (1955) précise que le débit dépassé cinq mois par an, en année moyenne, est de l'ordre de 1 500 m³/s et le débit dépassé un mois de l'ordre de 3 000 m³/s. Le plus fort débit connu est d'environ 8 500 m³/s (tous les 200 à 500 ans). Du PK (Point Kilométrique) 161 à 170,5 la vitesse moyenne est de l'ordre de 2,53 m/s pour 3 000 m³/s.

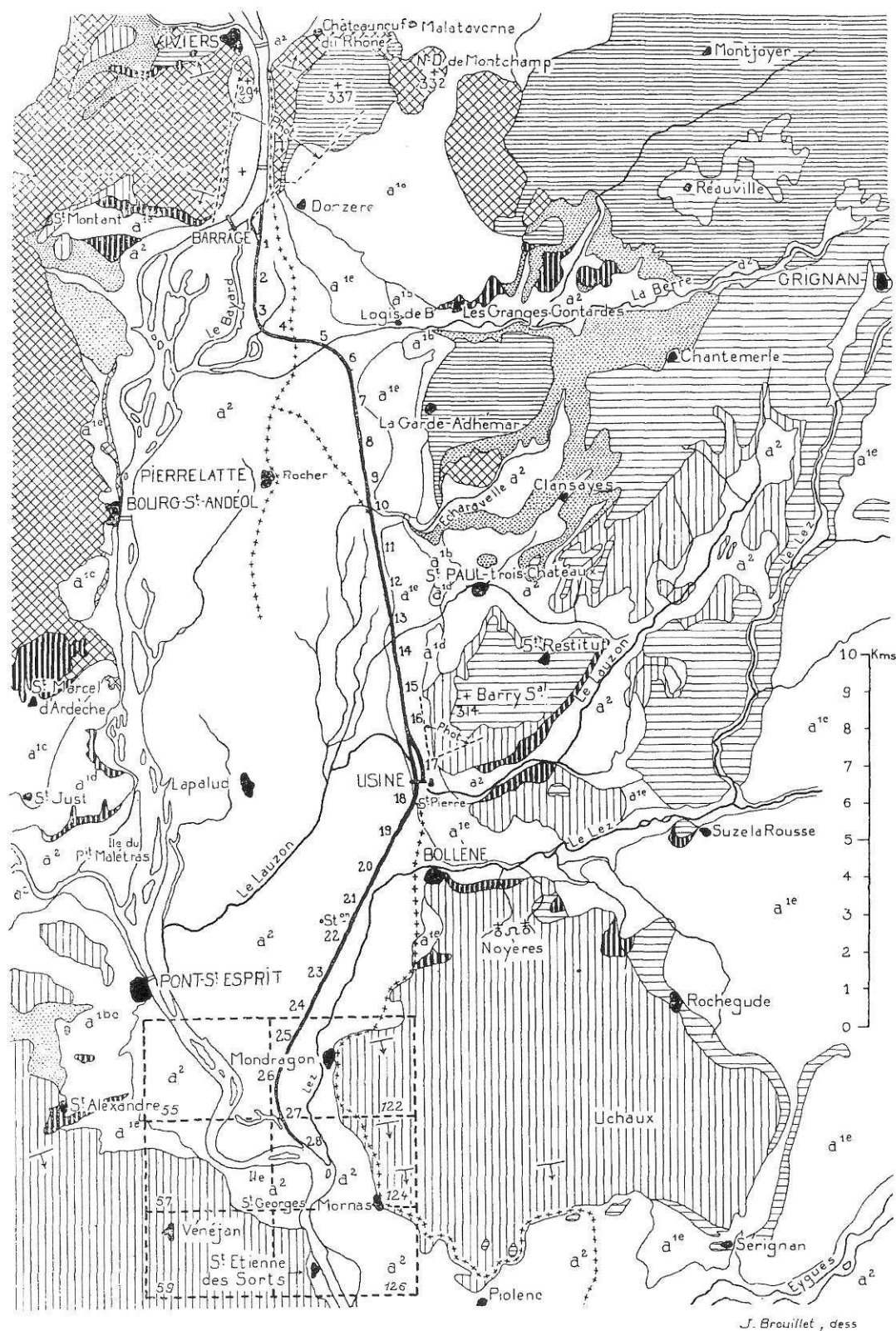
A l'étiage les valeurs caractéristiques sont les suivantes :

- débit moyen minimal sur 3 jours consécutifs (VCN3) : 530 m³/s (fréquence biennale), 450 m³/s (fréquence quinquennale sèche)
- débit moyen minimal sur 10 jours consécutifs (VCN10) : 580 m³/s (fréquence biennale), 480 m³/s (fréquence quinquennale sèche)
- débit mensuel minimal d'une année hydrologique (QMNA) : 740 m³/s (fréquence de retour biennale), 590 m³/s (fréquence de retour quinquennale)

3.1.5. Géologie

Le secteur de Donzère-Mondragon est situé entre 2 défilés du Rhône : le premier, au nord dans les calcaires urgoniens entre Viviers et Saint-Montant en rive droite et entre Chateauneuf-du-Rhône et Donzère en rive gauche ; le second, au sud dans les grès cénomaniens (Crétacé supérieur) entre Saint-Alexandre et Saint-Étienne-des-Sorts en rive droite et entre Mondragon et Mornas en rive gauche. La plaine du Tricastin a une largeur de 5 à 6 km pour une longueur de 25 km, soit une superficie d'environ 120 km².

La plaine alluviale est une cuvette d'origine tectonique creusée par le Rhône dans les calcaires et les grès crétacés qui a été remblayée au Pliocène par les marnes bleues imperméables d'origine marine (Plaisancien), puis par des alluvions sablo-graveleuses. La pente de la plaine est de 1‰ et son altitude varie de 45 à 50 m (50 à 55 m au nord ; 35 à 45 m au sud ; au niveau de la confluence avec l'Ardèche l'altitude est de 37 m). L'ancien tracé du Rhône à l'Anté-Pliocène passe à 5 km à l'est du défilé de Donzère au droit du tracé actuel de l'autoroute A7 (Poinsart, 1992). La carte géologique (Jacob, 1955) montre que les formations géologiques superficielles de cette plaine sont des alluvions actuelles (Figure 10). Celles-ci sont recouvertes de limons.



Légende : Calcaires urgoniens. Marnes gargasiennes et grès verts albiens. Crétacé supérieur
 Formations éocènes et oligocènes. Mollasses miocènes. Argiles et autres dépôts pliocènes.
 NB. Les alluvions quaternaires, laissées en blanc, sont affectées, dans leur ordre d'ancienneté, des notations : a², a¹, a³, etc..

Figure 10 : Géologie du secteur de Donzère-Mondragon (Jacob, 1955)

Les terrasses latérales (alluvions anciennes), ou terrasses quaternaires (Würm ancien, Riss, Mindel, cônes de déjections) sont constituées d'éléments plus grossiers et mieux lavés que les alluvions actuelles. On les trouve en rive gauche de Donzère jusqu'à Bollène et en rive droite de Saint-Marcel d'Ardèche jusqu'à Saint-Alexandre et au niveau de Saint-Montant. Le substratum, quant à lui, est constitué selon les secteurs de grès ou de calcaires ou de marnes argileuses (Pliocène).

Les alluvions récentes sont recouvertes de limons et reposent sur des marnes plaisanciennes sauf dans la zone de Lapalud où le substratum sous-alluvial comprend des formations aquifères crétacées.

3.1.6. Hydrogéologie : la nappe alluviale de la plaine du Tricastin

Sur le secteur, la nappe d'alluvions sablo-graveleuses est de bonne perméabilité. Elle est parfois surmontée d'une couche de limons argileux formant un toit presque imperméable. Les épontes de la nappe alluviales sont des limons et des marnes plaisanciennes.

Selon Maire (1955), la nappe alluviale est globalement captive entre limons et marnes. Cette nappe alluviale avait les caractéristiques suivantes avant aménagement : débit : 50 l/s/km ; vitesse : 150 m/an ; perméabilité moyenne de la couche d'alluvions : 2 mm/s ($2 \cdot 10^{-3}$ m/s). La perméabilité horizontale est plus forte que la perméabilité verticale. Les valeurs locales de perméabilité peuvent être 15 fois plus fortes à 200 fois plus faibles par rapport à la moyenne ; gradient piézométrique : 2 à 3‰.

Cette nappe a été particulièrement étudiée avant aménagement car elle était peu connue. Deux méthodes d'investigation ont été employées : 1) épuisement de fouilles rectangulaires et 2) procédés électriques. Les caractéristiques de la nappe données ci-dessus ont été calculées à l'aide de la Loi de Darcy et des équations de conservation.

D'une manière générale, l'écoulement de la nappe se fait dans le sens montagne-plaine de manière oblique, la base de l'écoulement étant le niveau du Rhône. En cas de crue du Rhône, on observe un inversement temporaire des écoulements dans le sens Rhône-Plaine sur une zone marginale de faible largeur. Les zones où la nappe est la mieux alimentée sont les débouchés de vallées alluviales profondes.

Aujourd'hui, la majeure partie de la nappe alluviale est fixée entre 2 frontières :

- le contre-canal en rive droite du canal de dérivation ;
- le cours du Rhône.

Ses fluctuations journalières sont tamponnées par des limites stables et on observe peu de changement dans le sens d'écoulement et le gradient (Guégan, 1972).

La nappe alluviale est généralement captive sous des limons. Elle est constituée d'un mélange de galets, cailloutis, graviers et sables. Elle présente des horizons ultra-perméables favorisant des cheminements préférentiels (passages de sédiments grossiers). Son épaisseur est d'environ 10 m entre Pierrelatte et Lapalud. L'épaisseur atteint 30 m à Donzère et 20 m au niveau de la confluence entre le canal de fuite et le Rhône. Le toit des alluvions est plus grossier que leur partie inférieure. La perméabilité est donc plus élevée en surface qu'en profondeur. Le substratum est pratiquement horizontal (pente 1‰). D'après ses caractéristiques, l'aquifère alluvial peut être considéré comme homogène et isotrope (Guégan, 1972).

Le battement de la nappe est d'environ 2 m au niveau du site du CEA pour atteindre 3 à 4 m plus à l'aval au niveau du drainage du canal de fuite. Selon Guégan (1972) le niveau piézométrique moyen est identique de 1960 à 1972. Entre une période très sèche (Juillet 1968, hauteur de précipitations : 3 mm) et une période très humide (septembre 1969, hauteur de précipitation : 149 mm) le niveau de la nappe varie de 1 à 0,5 m. Les variations de niveau sont peu marquées car les limites stables jouent un rôle tampon de 1956 à 1969. Sur cette période le sens d'écoulement et les gradients restent stables. En dehors de ces 2 périodes, Guégan (1972) a dressé des cartes piézométriques pour juillet 1956, mars 1956, avril 1958, septembre 1959, février 1959 et juillet 1969.

3.1.7. Point sur les invertébrés

Le secteur de Donzère-Mondragon n'a que peu été étudié au cours des dernières décennies. Dans ce secteur, 19 points d'échantillonnage de la faune interstitielle, distribués uniquement sur le Rhône court-circuité, ont été recensés dans la littérature (Creuzé des Châtelliers, 1991, Plénet et al. 1996). L'examen des résultats obtenus lors de ces études montre la présence de trois espèces stygobies (Plénet et al. 1996) : *Niphargus* sp., *Proasellus walteri* et *Pseudocandona zschokkei* au niveau du village de Saint-Montant et de *Niphargus* sp. (Creuzé des Châtelliers, 1991) sur trois sites situés à l'aval immédiat de la confluence entre le Rhône court-circuité et la rivière Ardèche.

Dans le cadre du projet ZABR, deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en mai, période de débit moyen pour le Rhône d'environ 1500m³/s à Viviers, et à l'étiage en août 2008 avec des débits du Rhône à Viviers d'environ 800m³/s sur le secteur. En mai, nous avons échantillonné 45 sites en milieu hyporhéique. Les sites comprenaient l'ensemble des masses d'eau et les principaux affluents et étaient répartis de la façon suivante : 9 sites sur le Rhône, 8 sites dans les contre-canaux, 8 sites dans les affluents en rive droite ; 17 sites dans les affluents rive gauche (dans la plaine de Pierrelatte et à l'extérieur). Cet échantillonnage du milieu hyporhéique a été complété par l'échantillonnage de 14 puits et de 5 sources afin de rechercher des espèces caractéristiques des différentes masses d'eau. Lors de cette première campagne un échantillon de 10 litres (par pompage Bou-Rouch) a été effectué à chaque station. En août 2008, une deuxième campagne d'échantillonnage a été initiée en se focalisant uniquement sur le Rhône, les contre-canaux et les principaux affluents. Au cours de cette campagne, nous avons ré-échantillonné les 8 stations du Rhône, les 8 stations des contre-canaux et les principaux affluents en rives gauche (3 sites) et en rive droite (3 sites). A ces 22 stations, nous avons ajouté une station supplémentaire sur le contre-canal gauche en aval de Donzère. Lors de cette seconde campagne, trois échantillons de 10 litres ont été réalisés à chaque station par pompage Bou-Rouch.

3.2. Sèvre-Niortaise (Champ captant de Saint-Maxire/Échiré) [BRGM]

Le champ captant de Saint-Maxire/Échiré se situe dans un méandre de la Sèvre-Niortaise, fleuve d'étendue régionale, où la nappe principale est contenue dans les alluvions quaternaires en connexion hydrogéologique avec les calcaires sous-jacents du Jurassique. Les échanges nappes/rivières sont ici avérés mais non quantifiés. Pour préciser ces échanges, les données cumulées depuis 1995 au droit du champ captant fournissent une base solide pour une modélisation hydrodynamique des flux nappes/rivières.

Le champ captant de Saint-Maxire/Échiré ayant fait l'objet d'une synthèse BRGM, le lecteur est invité à consulter le rapport BRGM/RP-56352 [Domez O., 2008] pour une description détaillée du contexte géologique, hydrogéologique et hydrologique.

Sur ce site il y a un important champ captant AEP, produisant en moyenne 3 millions de mètres cubes par an (soit 0,1 m³/s), implanté dans la boucle de ce méandre. La nappe majoritairement sollicitée est contenue dans les calcaires du Jurassique moyen (Dogger) en connexion hydraulique avec les alluvions sus-jacentes. Les échanges nappes/rivières sont ici avérés mais n'ont jamais été quantifiés. Dans un contexte aisément transposable à d'autres champs captant (nappe en relation avec un fleuve de faible débit et d'étendue régionale), les enjeux locaux sont doubles :

- *Qualitatifs* : la nappe du Dogger sollicitée par 90% des forages du champ est fortement impactée par les activités agricoles avec des teneurs en nitrates allant de 80 à 100 mg/L en nappe. En revanche, la teneur en nitrates des eaux captées diffère de cette dernière gamme et s'échelonne de 10 à 90 mg/L. Cette variabilité à l'exhaure est imputable aux apports de la Sèvre-Niortaise, apports qui varient en fonction du régime d'exploitation des forages, de leur distance au fleuve et de l'état dynamique de la nappe et de la rivière (étiage/recharge) (Domez, 2008).

- *Quantitatifs* : les prélèvements en nappe (AEP) influencent directement les niveaux d'eau de la Sèvre-Niortaise. Cet impact potentiel est minimisé par les lâchers du barrage de la Touche Poupard en amont du méandre.

Ce site présente l'intérêt de disposer d'un jeu de données géologiques et hydrogéologiques contribuant à la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du secteur. A ces données est associé depuis 1996 un suivi hydrochimique aux puits de pompage dont les résultats appuient l'existence d'échanges entre le fleuve et la nappe. En parallèle, le secteur est couvert par le modèle hydrodynamique régional des aquifères du Jurassique. Ce modèle opérationnel, couplant les écoulements en nappes et en rivières, a, entre autres vocations, de simuler des scénarii de gestion et notamment d'évaluer l'impact des prélèvements agricoles sur le débit des rivières (Domez, 2010 ; Domez, 2011).

L'existence de ces métriques et outils, la singularité du contexte hydraulique du site au regard des sites partenaires (fleuve de faible débit et d'étendue régionale) et les enjeux de gestion inhérents aux échanges nappe - rivière répondent aux prérequis fixés pour le projet NAPROM.

3.2.1. Situation géographique

Le champ captant, localisé dans le département des Deux-Sèvres, se situe à environ 5 kilomètres au nord de Niort. Il est implanté au cœur d'un méandre de la Sèvre-Niortaise sur les communes de Saint-Maxire et Échiré. Le bassin d'alimentation du champ captant occupe une surface de 240 km² au sein du bassin versant de la Sèvre-Niortaise amont d'une superficie totale de 1000 km². D'une altitude d'environ +20 m NGF au droit des captages, les hauteurs peuvent atteindre +200 m NGF à la source de l'Egray, affluent principal de la Sèvre-Niortaise au droit du champ captant. En sus des cours d'eau pérennes, un réseau de vallées sèches atteint la Sèvre-Niortaise (Figure 11).

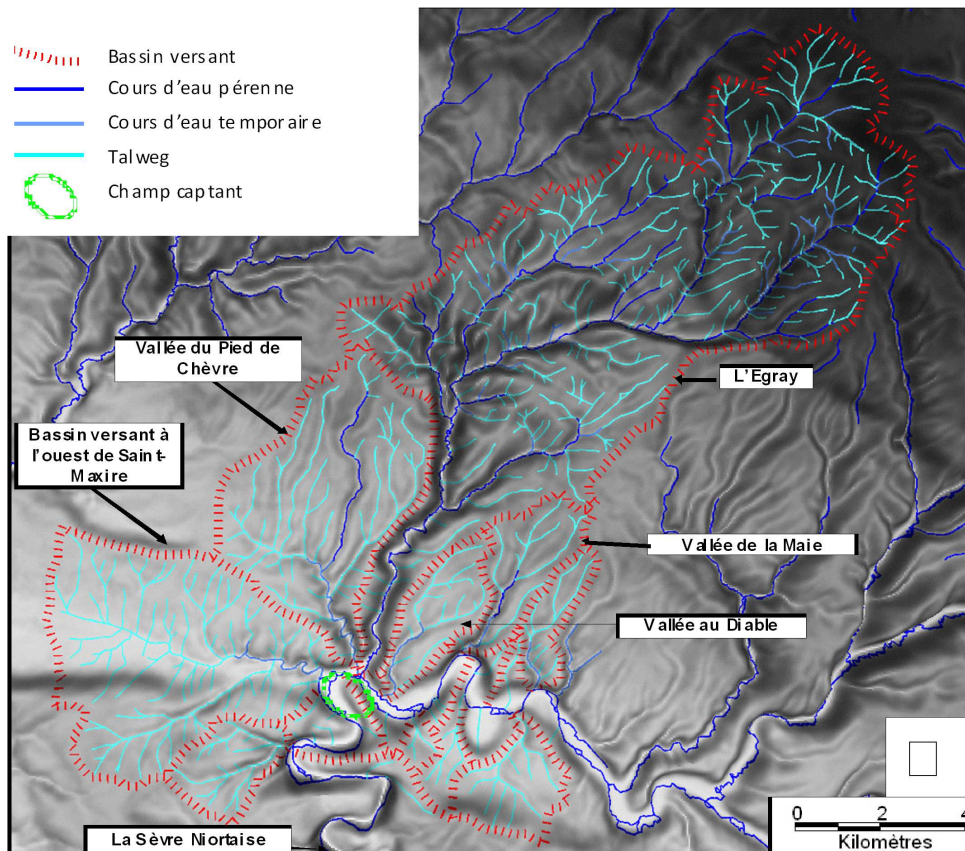


Figure 11 : Réseau hydrographique et vallées sèches

3.2.2. Climatologie

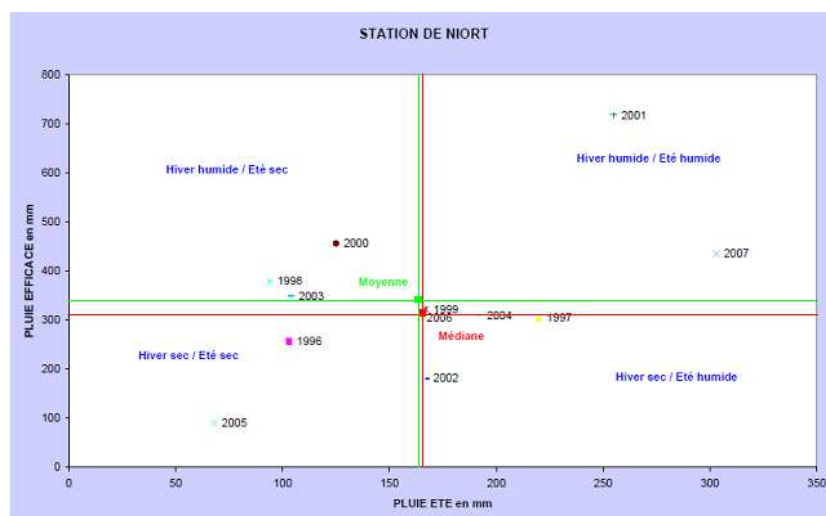


Figure 12 : Caractérisation des années climatiques à partir de la station météorologique de Niort

De par sa proximité avec l'océan Atlantique, le bassin versant de la Sèvre-Niortaise est marqué par un climat de type océanique. La pluviométrie moyenne annuelle est de 760 mm, les mois les plus secs étant juin, juillet et août. Les variations inter-annuelles peuvent être importantes comme en témoigne la Figure 12 reportant la pluviométrie cumulée des mois de juin à septembre en fonction de la pluie efficace.

3.2.3. Débits de la Sèvre-Niortaise

A l'amont de Saint-Maxire, le bassin versant de la Sèvre-Niortaise est estimé à environ 1000 km² et le module du fleuve est de 7,07 m³/s. A l'étiage, en période estivale, les débits de la Sèvre-Niortaise sont soutenus par les lâchers du barrage de la Touche Poupard 28 km en amont (15 millions de m³ stockés). La boucle du méandre est jalonnée de nombreux obstacles à l'écoulement générant un taux d'étagement important, de l'ordre de 70 %.

Le régime hydrologique de la Sèvre-Niortaise est de type pluvio-océanique caractérisé par des hautes eaux hivernales et des basses eaux estivales. La station hydrométrique la plus proche du champ captant est située à Château Salbart à 4 km en amont de Saint-Maxire. Les débits caractéristiques issus de la banque HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>) sont reportés dans le Tableau 8.

Module	Fréquence	Débit (m ³ /s)
Étiage		7,07 [5,67 ; 8,47]
VCN3	Quinquennale sèche	0,47 [0,3 ; 0,64]
VCN10	Quinquennale sèche	0,55 [0,36 ; 0,74]
QMNA	Quinquennale sèche	0,85 [0,62 ; 1,1]
Crues		
QJ	Quinquennale	84 [70 ; 120]
QJ	Décennale	100 [84 ; 150]
Débit journalier maximal		132

Tableau 8 : Débits caractéristiques de la Sèvre-Niortaise à la station de Château Salbart. Le bassin versant de la Sèvre-Niortaise est ici de 565 km²

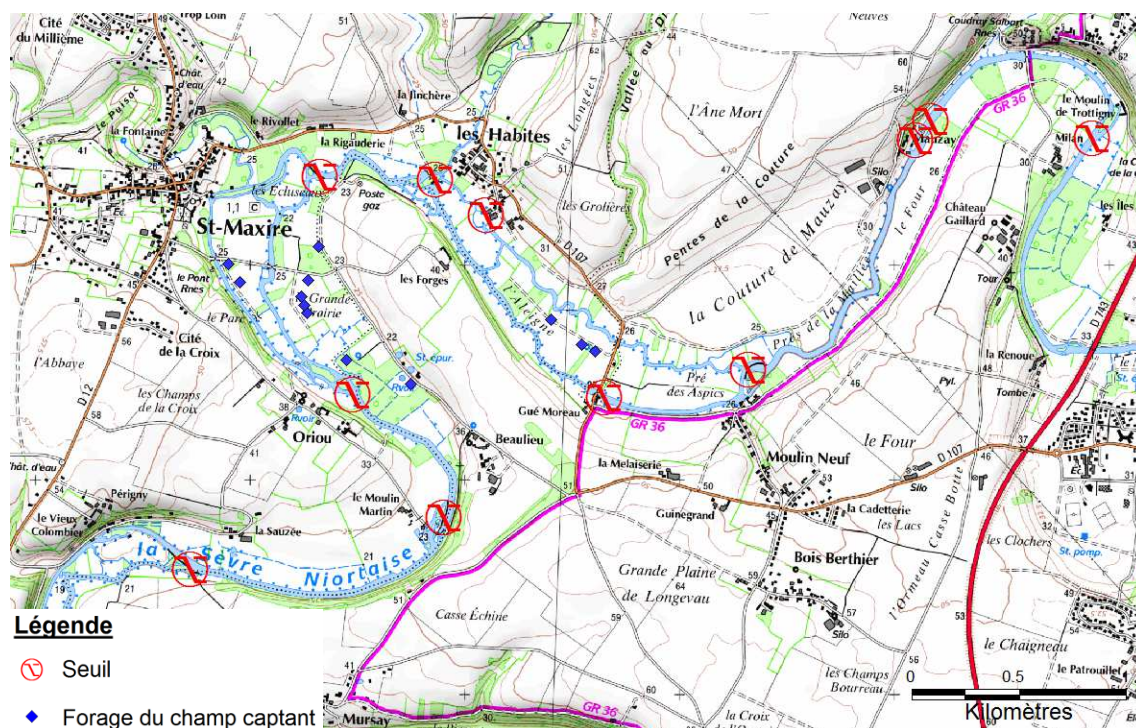


Figure 13 : Obstacles à l'écoulement recensés auprès de l'ONEMA

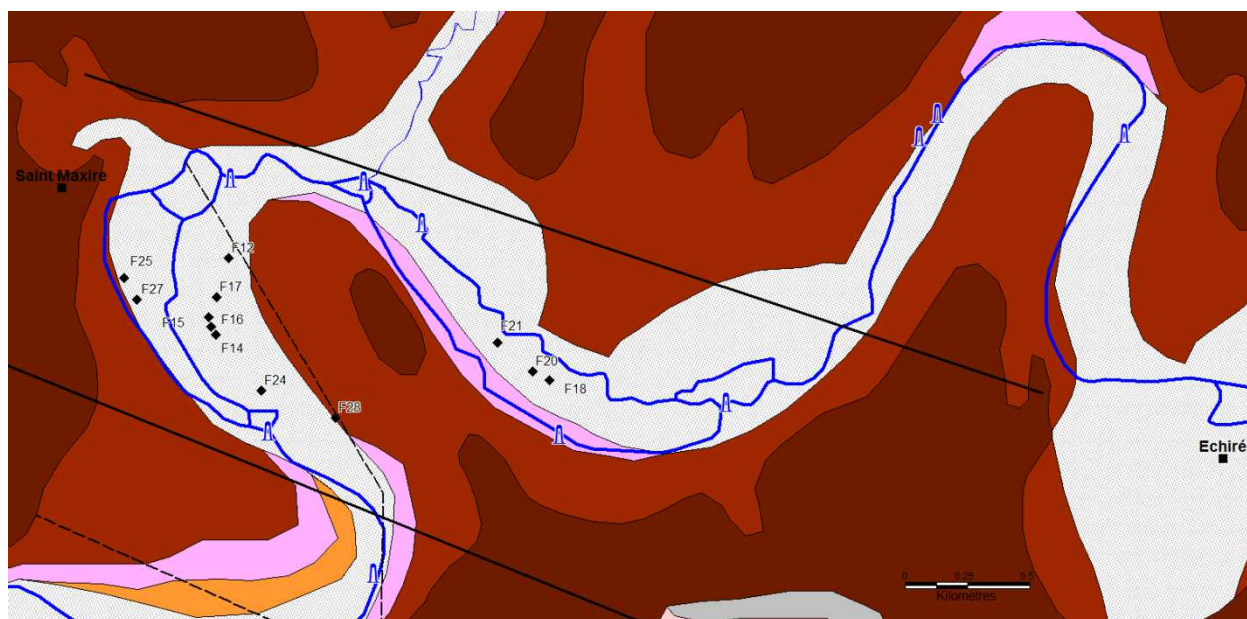
A l'étiage, les débits de la Sèvre-Niortaise sont soutenus par les lâchers du barrage de la Touche Poupard. La CAEDS (Compagnie d'Aménagement des Eaux des Deux Sèvres), gestionnaire du barrage, délivre un volume moyen annuel de 5 millions de mètre cubes répartis entre juin et septembre. Le débit objectif d'étiage (DOE) devant être respecté une année sur cinq pour la station de la Tiffardière (Niort) au sud du champ captant est de $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le méandre de la Sèvre-Niortaise et sa proximité sont jalonnés de 12 déversoirs à parois verticales recensés auprès de l'ONEMA, parfois associés à des vannes levantes, et de plusieurs autres seuils annexes non répertoriés (Figure 13). Entre le moulin de Trotigny en amont de Château Salbart et Moulin Martin en sortie de méandre, la hauteur de chute cumulée (hauteur de chute cumulée calculée sur la base des hauteurs de chute d'étiage fournies ONEMA Deux Sèvres) est au minimum de 6,7 m soit un taux d'étagement (Rapport entre la somme des chutes artificielles et la dénivellation naturelle) approximatif de 70 %.

3.2.4. Contexte hydrogéologique

L'aquifère supra-toarcien et l'aquifère infra-toarcien constituent les principaux réservoirs du secteur. L'aquifère supra-toarcien ou du Dogger est constitué des calcaires d'âge bajocien à bathonien fracturés et karstifiés. Dans l'axe de la vallée de la Sèvre-Niortaise, ces formations sont surmontées par des alluvions graveleuses perméables. Ces deux faciès, en continuité hydrologique, constituent alors un même ensemble aquifère. La nappe généralement libre devient captive lorsque les altérites sablo-argileuses et/ou les dépôts éoliens quaternaires sont suffisamment développées. Une transmissivité de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ constitue une moyenne caractéristique de ces formations. Isolé de l'aquifère du Dogger par les marnes toarciennes, l'aquifère infra-toarcien est constitué par les formations calcaires du Lias moyen et inférieur dolomitiques. La transmissivité de l'aquifère est généralement comprise entre 10^{-1} et $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Le secteur est affecté par des failles d'orientation régionale sud armoricaine, i.e. NW-SE. Ces accidents ont rejoué postérieurement au Jurassique affectant la totalité de la série sédimentaire ; ils sont recoupés par des failles mineures (Figure 14).



Geologie

Quaternaire fluvial :

Alluvions récentes



Secondaire :

Callovien



Bathonien



Bajocien



Toarcien



Pliensbachien



Sinemurien supérieur
(Caillebotine)



Sinemuro-Hettangien



**Jurassique
moyen**

**Jurassique
inférieur**

Accidents structuraux

— Faille majeure

- - - Faille mineure

Champ captant

◆ Forage d'exploitation

Hydrographie

— Cours principal de la Sèvre Niortaise

⏏ Obstacle à l'écoulement

Figure 14 : Contexte géologique, hydrographique et anthropique autour du méandre de la Sèvre-Niortaise à Saint-Maxire

Sur le bassin d'alimentation du champ captant, 70% de la surface est occupée par des activités de production céréalière et d'élevage. Ces activités génèrent une pression qualitative importante sur les ressources en eau, qu'elles soient superficielles ou souterraines. A proximité du champ captant, les concentrations respectives en nitrates pour la Sèvre-Niortaise et dans l'Egray fluctuent entre 10 mg/l et 47 mg/l et entre 3 et 40 mg/l (Figure 15 et Figure 16). Les concentrations objectifs fixées par le SAGE sont couramment dépassés (65 à 73% des mesures pour la Sèvre-Niortaise). Les valeurs mesurées répondent à un cycle saisonnier avec des teneurs plus faibles à l'étiage. En nappe, le qualitomètre de La Couture situé à 1 km à l'Est de Saint-Maxire témoigne de valeurs comprises entre 60 et 100 mg/l, i.e. toujours supérieures à la norme de potabilité, aux objectifs SAGE et parfois proches de la limite d'autorisation d'exploitation. A titre d'exemple de contamination phytosanitaire, le déséthylatrazine est détecté à chaque échantillonnage à des concentrations pouvant dépasser les normes de 0,1 µg/l. Le plus souvent captive ou semi-captive sous les marnes toarciennes, la nappe infra-toarcienne est généralement peu impactée par les nitrates et les produits phytosanitaires. Une pollution de cette ressource par les eaux supra-toarciennes peut être observée à proximité de faille mettant en relation les deux aquifères.

Dans ce contexte, les pompages du champ captant assurent une production horaire d'environ 500 m³/h soit une production annuelle pour l'ensemble du champ captant de 2,8 millions de m³/an. Le champ captant comprend 12 forages parmi lesquels deux captent la nappe infra-toarcienne (F12 et F16) et les dix autres l'aquifère du Dogger (Figure 17). Ces forages sont regroupés par secteur :

- Le Pont : F25 et F27,
- La Grande Prairie : F12, F14, F15, F16, F17, F27,
- Bas de Beaulieu : F28,
- L'Aleigne : F18, F20, F21.

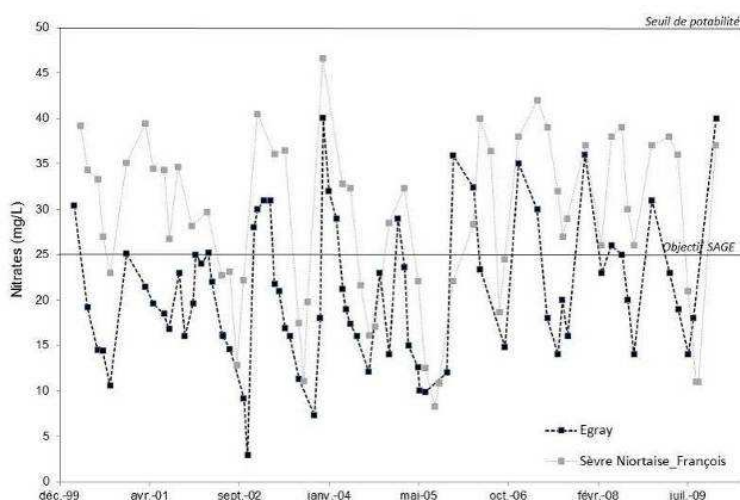


Figure 15 : Concentrations en nitrates mesurées dans les eaux de la Sèvre-Niortaise et de l'Egray (2000-2009)

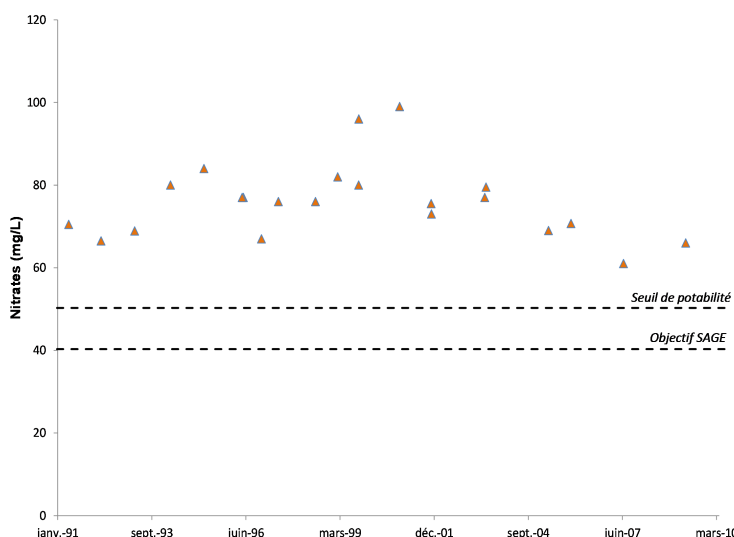


Figure 16 : Concentrations en nitrates mesurées dans la nappe du Dogger

La distance entre la Sèvre-Niortaise et chaque forage varie de 50 à 250 mètres.

Concernant l'aquifère du Dogger, les mesures au micro-moulinet effectuées par GEOAQUITAINE en 1991 informent que les zones productives se situent entre 3 mètres et 8 mètres de profondeur, soit au droit de la zone de contact entre les alluvions et le toit de cet aquifère. Pour pallier des problèmes de venues d'eau des alluvions, l'intégralité de cette formation est tubée. Toutefois, la continuité hydrologique existant entre ces deux réservoirs, l'eau des alluvions reste mobilisable lors des pompages. Pour certains forages (F25 et F27), la productivité de la nappe alluvionnaire est faible.

cours d'eau s'écoulant depuis les Vosges entre le Sud de la plaine et le Nord de Strasbourg, si bien que le Rhin n'a pas d'affluent de rive gauche entre ces deux points. Il a par contre plusieurs affluents de rive droite assez importants qui s'écoulent depuis le massif de la Forêt Noire du Nord au Sud de la plaine.

Dans la partie de la plaine située au Sud de Colmar, le réseau hydrographique est constitué des cours d'eau vosgiens vers la bordure Ouest, et d'un réseau important de canaux dans toute la partie centrale (plaine de la Hardt).

Entre Colmar et Strasbourg le réseau hydrographique est surtout constitué de très nombreux cours d'eau phréatiques liés à la résurgence de la nappe alluviale du Rhin.

Au Nord de Strasbourg on trouve plusieurs affluents importants du Rhin (la Zorn, la Moder, la Sauer, la Lauter).

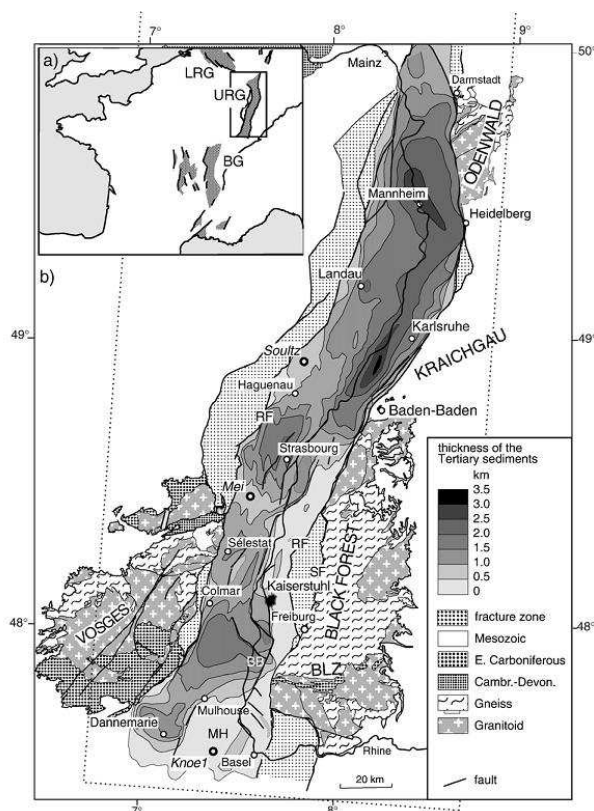


Figure 18 (à gauche) : Contexte géologique du bassin (d'après Rotstein et al., 2006)

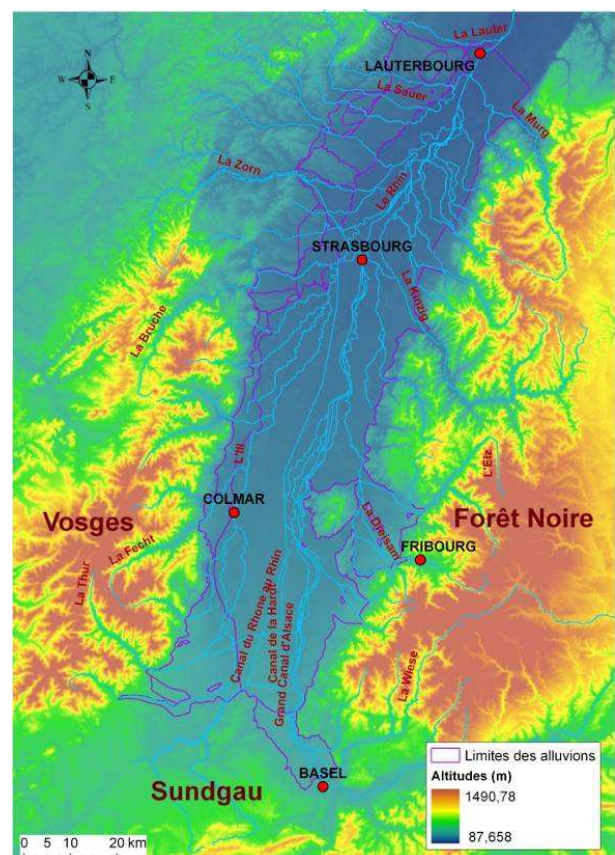


Figure 19 (à droite) : Contexte topographie du bassin

Le régime hydrologique de l'Ill est pluvio-océanique, avec des crues se produisant en hiver, de décembre à février. Ce régime est cependant fortement perturbé par divers aménagements tels que des barrages dans la partie amont du cours de l'Ill dans la plaine, et par une forte régulation de ses débits dans la partie aval. En effet en période de crue les excédents sont dirigés vers le Rhin en amont de Strasbourg, et en période d'étiage une prise d'eau sur le Rhin au même niveau permet de soutenir les débits, si bien que le débit de l'Ill à Strasbourg est peu variable au cours de l'année hydrologique. Le débit moyen de l'Ill à Colmar est de 20 m³/s environ et le débit de la crue décennale est de l'ordre de 200 m³/s. Les débordements de l'Ill au niveau de sa plaine d'inondation fonctionnelle dans le Grand Ried d'Alsace (situé entre l'Ill et le Rhin de Sélestat à Strasbourg environ) ont lieu pour des débits dépassant 100 m³/s environ. Le débit moyen de l'Ill à Strasbourg est proche de 60 m³/s.

Le régime hydrologique du Rhin dans cette partie de son bassin est toujours fortement marqué par la composante nivale sur son bassin alpin, et les crues du fleuve ont lieu généralement en mai-juin, avec des étiages tardifs en hiver, période où les précipitations sur le bassin amont sont stockées sous forme de couverture neigeuse. Le débit moyen du Rhin à Bâle est de 1040 m³/s, et il atteint 1280 m³/s à Lauterbourg.

3.3.4. Faune aquatique souterraine (stygie) de la vallée du Rhin en Alsace: État des connaissances

Dès les années 1930, les eaux souterraines de la vallée du Rhin en Alsace ont fait l'objet d'explorations, aussi bien au niveau de puits que de sources dans la nappe alluviale ou de bras morts. La faune aquatique souterraine (espèces dites « stygies », strictement inféodées aux eaux souterraines) a ainsi fait l'objet d'études descriptives qui ont permis de récolter et publier de nouvelles espèces et de documenter la biodiversité sur cette zone, carrefour entre l'Europe du nord, les régions alpines et le bassin Saône-Rhône (Hertzog 1933, 1936a, 1936b, 1938). Depuis cette période pionnière, les recherches sur la faune stygie de cette région ont été beaucoup plus rares et sporadiques (Creuzé des Châtelliers et al., 1992).

Si on cumule les données bibliographiques acquises depuis cette période 1930, on recense un total de près de 41 espèces dans la région. Les taxons les plus diversifiés appartiennent au groupe des crustacés avec, les amphipodes (12 espèces), les copépodes (9 espèces) et les ostracodes (9 espèces). Parmi ces 41 espèces, on observe une large gamme d'exigences écologiques, allant d'espèces de subsurface plus tolérantes aux variations des paramètres environnementaux (ex., *Niphargopsis casparyi*, *Cavernocypris subterranea*) à des organismes colonisant plus spécifiquement les nappes profondes (ex., *Mixtacandona laisi*, *Bathynella natans*, *Bogidiella albertimagni*). Cette diversité écologique des espèces présentes laisse présager d'une application satisfaisante de l'indice d'identification des arrivées et des circulations d'eau souterraine. Même si les communautés les plus proches du chenal du fleuve ont été impactées par la pollution de Rhin suite à l'incendie des usines Sandoz de 1986, des études menées au début des années 1990 (Creuzé des Châtelliers et al., 1992) avaient déjà observées un début rétablissement des communautés en place.

3.4. Loire amont (Plaine du Forez – Écozone) [ENSM-SE + UMR 5023]

3.4.1. Situation géographique

Située en région Rhône-Alpes dans le département de la Loire, à l'est du Massif Central, la Plaine du Forez est un bassin entièrement fermé, traversé du sud au nord par le fleuve Loire. Elle fait partie du bassin hydrogéographique Loire-Bretagne et constitue l'hydroécorégion sédimentaire du Forez. Ce bassin d'effondrement est encadré à l'ouest et à l'est par les massifs cristallins du Forez (horst granitique dont l'altitude moyenne est comprise entre 1200 et 1600 mètres) et du Lyonnais (vaste plateau constitué de granites hercyniens et de terrains métamorphiques formant une barrière moins haute que les Monts du Forez à une altitude comprise entre 500 et 900 mètres) et délimité au nord par le seuil de Neulise et au sud par le seuil du Perthuiset (Gorges de la Loire et Monts du Velay). Cette plaine est remblayée, au cours du tertiaire, par des formations argilo-sableuses localement gréseuses ou carbonatées de l'oligo-miocène (Le Griel, 1984). Elle s'étire sur une bande d'une largeur maximale de 20 kilomètres et de 40 kilomètres de long et couvre une surface d'environ 760 kilomètres carrés à une altitude moyenne de 360 mètres.

Au cœur de la Plaine du Forez, entre Saint-Étienne, ville-porte du Parc Naturel Régional du Pilat, et Roanne, l'Écozone du Forez s'étend sur environ 160 hectares le long du fleuve Loire, hors Domaine Public Fluvial. Ce projet s'inscrit sur le territoire de six communes : Chalain-le-Comtal, Chambéon, Feurs, Magneux-Haute-Rive, Marclopt, Saint-Laurent-la-Conche. À l'intérieur de ce projet est situé l'Écopôle du Forez, qui s'étend sur 55 hectares, toujours hors Domaine Public Fluvial. C'est un ancien site d'exploitation de granulats, situé

dans l'espace de liberté du fleuve, réhabilité de façon écologique par la FRAPNA Loire (Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature) avec l'aide de ses partenaires (Figure 20).

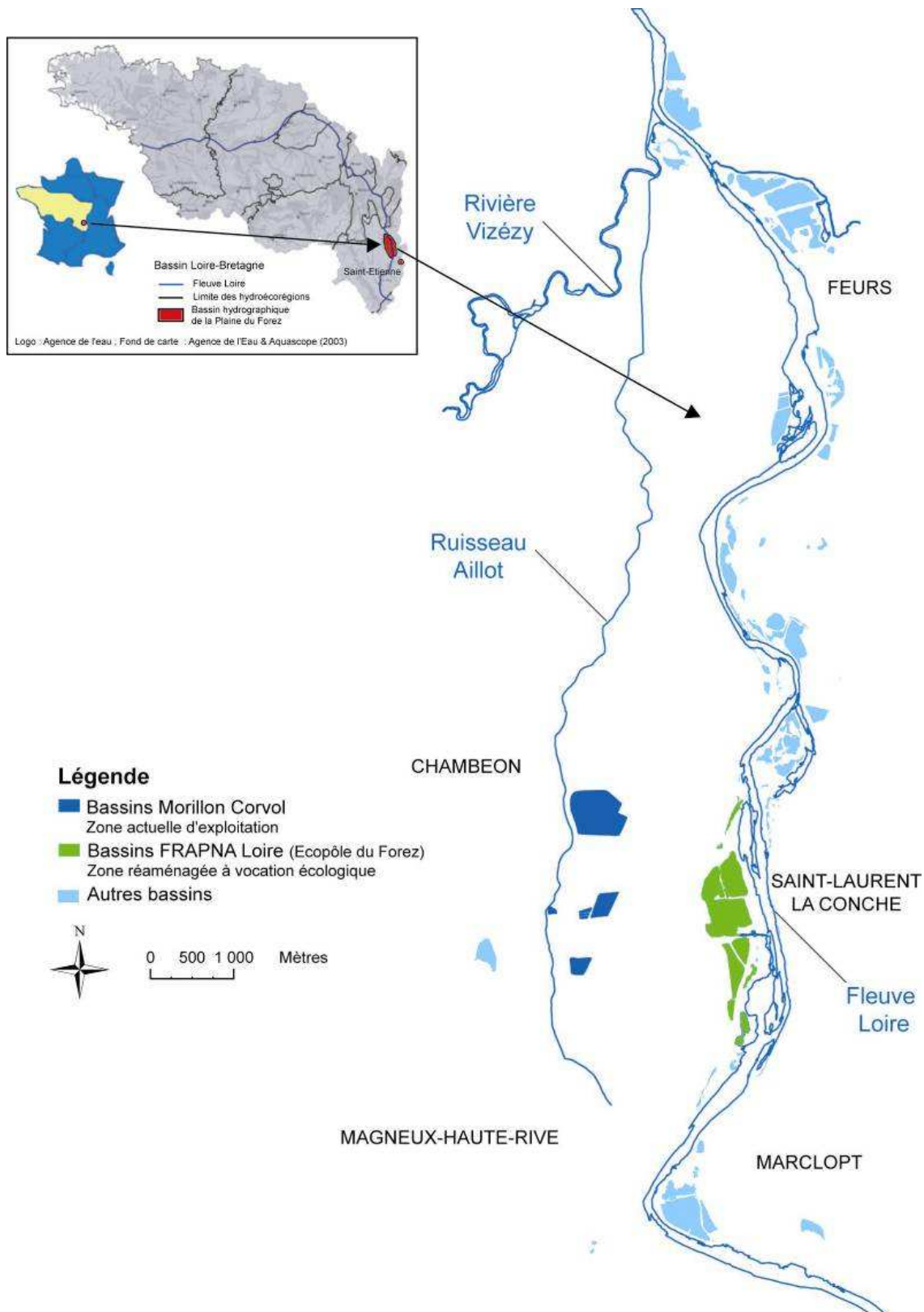


Figure 20 : Situation géographique de l'Écozone du Forez (en vert)

3.4.2. Description générale (Cesame, 1996 & 2003 ; Ulmer, 1997 ; Mimoun, 2004)

La Plaine du Forez résulte de l'effondrement de certaines portions de socle qui n'ont pu résister à la violence des forces tectoniques au début du tertiaire, en l'occurrence le plissement alpin ou surrection alpine ayant engendré entre autres les Monts du Forez. Ce fossé s'est empli peu à peu de sédiments pour la plupart lacustres (marnes vertes ou lauzes), auxquels est venu s'ajouter un comblement quaternaire d'origine fluviale. La situation hydrographique et hydrologique de la Plaine du Forez est étroitement liée à la présence du fleuve Loire et aux reliefs alimentant le bassin versant. La dynamique de ce fleuve, considérée ici sous l'aspect des crues, est d'une importance capitale pour le bon fonctionnement et la pérennité de l'écosystème. Outre le fleuve Loire et ses affluents (Lignon, Coise, Mare), le réseau hydrographique de la Plaine du Forez présente plusieurs autres composantes non négligeables au niveau des flux et des échanges hydrologiques : les étangs, les nappes phréatiques, les gravières, les digues et le canal du Forez.

Dans la plaine du Forez, là où le substratum argileux ou marneux imperméable est proche de la surface, se trouvent de nombreux étangs créés par l'homme à partir du 13^e siècle. Actuellement, répartis en trois plaques principales (Arthun, Feurs et Mornant), subsistent 200 à 300 étangs couvrant environ 1000 à 1500 hectares. Les principales réserves d'eau souterraine, quant à elles, considérées sous l'aspect hydrogéologique, sont situées dans les formations alluviales quaternaires. L'alimentation des nappes phréatiques ainsi constituées se fait par infiltration, par apports des versants et par les crues du fleuve, la Loire occupant une position drainante pour l'ensemble du système. C'est un fleuve très irrégulier, car ses débits sont étroitement liés à la pluviométrie. Il existe, de plus, une opposition marquée entre les affluents des deux rives de la Loire, correspondant à une différence d'ampleur des reliefs qui l'encadrent. La rive gauche reçoit des rivières dont les bassins versants se situent sur les pentes est des Monts du Forez (Lignon, Aix, Mare), à régime pluvio-nival, rentrant parfois en crues violentes. A droite, les affluents provenant des Monts du Lyonnais sont plus modestes et leurs crues moins puissantes en raison de la moindre altitude du bassin versant (Loire, Coise). Le régime de la Loire est très contrasté, marqué par des étiages sévères qui peuvent être opposés à de rapides montées des eaux. Les crues sont brutales et irrégulières dans le cours supérieur du fleuve. Cette instabilité est due à l'influence des précipitations méditerranéennes sur le haut bassin versant (crues de type cévenol), à laquelle vient s'ajouter la perturbation occasionnée par des flux océaniques. Les milieux annexes sont constitués de gourds (bras morts) connectés ou non au fleuve, de bras secondaires et de tressages avec de multiples chenaux et îlots. Il est important de noter que la Plaine du Forez correspond à la première zone de ralentissement des écoulements et donc d'expansion des crues, ce qui permet de souligner le rôle tampon des zones humides.

3.4.3. Cadre géologique

La carte géologique (Figure 21) de Montbrison au 1/50 000^e permet de préciser les différentes formations présentes sur le site :

- le substratum, d'âge tertiaire, est représenté par une formation de marnes vertes parfois très indurées où des passées sableuses peuvent être observées. Il se situe entre 6,5 et 7,5 mètres sous la cote du terrain naturel et peut atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur comme le montrent les carottages effectués sur le site d'étude (Duclos, 1967).

- en rive gauche du fleuve Loire, le substratum est recouvert par les alluvions récentes des Chambons de la Loire notées Fz1 sur la carte géologique. Formées de sables, graviers, galets et de limons fertiles, elles correspondent à des apports antérieurs aux endiguements du fleuve. Leur épaisseur ne dépasse pas 8 mètres. La limite avec les formations oligo-miocène suit grossièrement le tracé du ruisseau l'Aillot entre le village de Magneux-Haute-Rive et Chambéon. Ces formations renferment une nappe alluviale libre. Les alluvions récentes et actuelles du fleuve notées Fz2 correspondent aux dépôts les plus récents. Elles sont constituées de matériaux de nature granitique ou basaltique dont la granulométrie va jusqu'à 150 à 200

millimètres. D'une épaisseur variant de 2 à 4 mètres, elles forment une bande de 150 mètres de large de part et d'autre de l'axe du fleuve.

- en rive droite du fleuve Loire, les alluvions anciennes (FY) formées de sables, de graviers, d'argiles en forte teneur forment une terrasse de 10 mètres de hauteur reposant sur les marnes vertes. En limite est, ces alluvions sont recouvertes par des formations superficielles colluviales (K) provenant de la désagrégation des massifs cristallins.

3.4.4. Cadre géomorphologique

Au cours du plio-quaternaire, le fleuve Loire, dès l'entrée dans la plaine du Forez, s'est successivement encaissé dans les formations tertiaires puis dans ses propres alluvions pour former des terrasses étagées. Aujourd'hui, le lit mineur sur-creuse le substratum en certains endroits, tandis qu'à d'autres il divague en empruntant les nombreuses gravières (Aquascope & Sogreah, 1996).

Des coupes géomorphologiques interprétatives ouest-est passant par Magneux-Haute-Rive et Chambéon (Figure 22) montrent, à l'ouest, des formations oligo-miocènes correspondant au troisième étage des sables quartzeux notées g-m3 sur la carte géologique ; ces dernières, faiblement vallonnées entre 360 et 370 mètres d'altitude laissent la place aux basses terrasses de la Loire à 338 mètres. Les villages de Chambéon, Magneux-Haute-Rive et Chalain-le-Comtal sont situés à leur extrémité orientale. Ces terrasses dominant de 5 à 6 mètres le lit mineur du fleuve alors qu'elles sont recouvertes en rive droite par la terminaison occidentale du Glacis de Feurs, formations colluviales provenant de la désagrégation des massifs cristallins. En rive gauche, ces basses terrasses se développent à partir de l'ancien méandre de Magneux-Haute-Rive sur plus de deux kilomètres de large. Elles constituent le cadre géographique de notre étude. En rive droite, au niveau de la boucle de Marclopt, cette basse terrasse alluviale est dominée par la terminaison occidentale du Glacis de Feurs. Au droit de Saint-Laurent-la-Conche, l'épaisseur des formations colluviales dépasse les dix mètres.

Ainsi, la plaine alluviale s'étend à partir de l'ancien méandre de Magneux-Haute-Rive sur plus de deux kilomètres de large en rive gauche de la Loire et apparaît en rive droite dans la seule boucle de Marclopt. Cette formation est composée d'une couverture limoneuse ou argilo-sableuse d'épaisseur métrique recouvrant 3 à 6 mètres d'alluvions grossières reposant sur les marnes vertes. Les levés topographiques de la zone d'étude permettent de distinguer deux unités :

- entre le fleuve et les levées de terre, une zone dont l'altitude est inférieure à 5 mètres par rapport au fleuve. Cette zone, fortement touchée par les exploitations de granulat, s'inscrit entièrement dans la zone de débordement à fort courant de la Loire définie lors de la crue de 1846.

- la plaine alluviale proprement dite, dont la limite vers l'ouest se situe en bordure du ruisseau l'Aillot. Certaines divagations de la Loire sont encore visibles près de Magneux-Haute-Rive. D'une altitude voisine de 5 mètres par rapport au fleuve, elle correspond à la zone d'inondation maximale de la Loire.

3.4.5. La nappe alluviale et l'aquifère

Les principales réserves en eau de la région sont contenues dans les formations alluviales de la Plaine du Forez. Les alluvions de la Loire forment un aquifère, limité en profondeur par le substratum imperméable représenté par les marnes vertes, dans lequel circule une nappe libre. La perméabilité des alluvions varie de 10^{-3} m/s à 10^{-4} m/s pour les secteurs colmatés.

Cette nappe libre est alimentée par une nappe de versant, de faible puissance, qui circule de façon hétérogène à la faveur des niveaux plus sableux contenus dans les formations sablo-argileuses oligo-miocènes. La partie supérieure de cette nappe est captée par la rivière Lignon, située à l'est de la zone d'étude. Le sens d'écoulement suit la pente du terrain, soit une direction sud-ouest/nord-est.

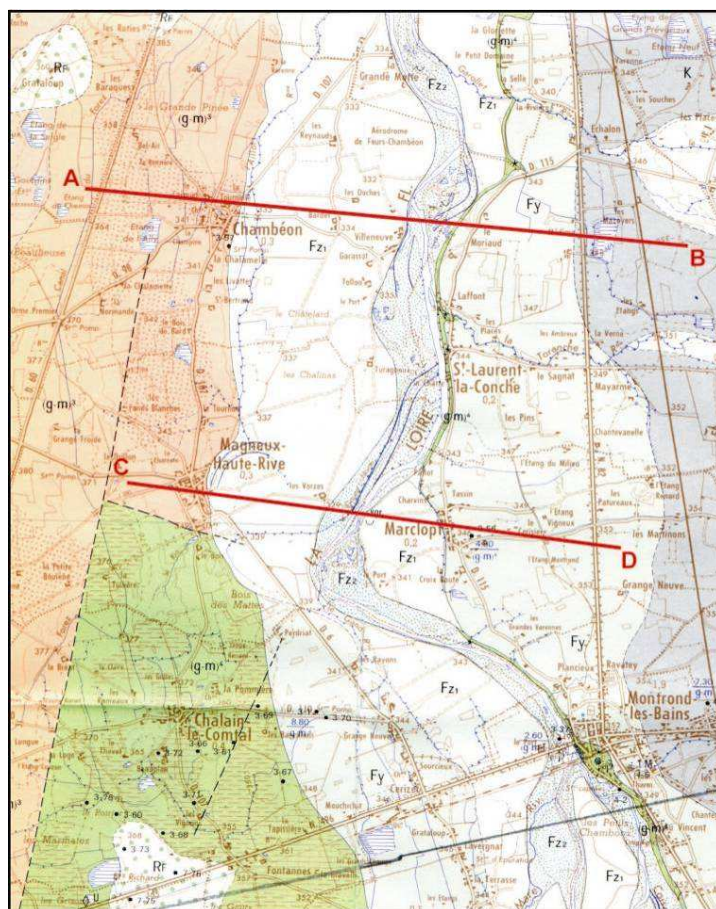


Figure 21 : Carte géologique du site d'étude [D'après la carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Montbrison, d'après Mimoun (2004). Les deux traits rouges localisent les coupes géologiques et géomorphologiques interprétatives de la plaine du Forez. La légende de la carte est donnée Figure 22]

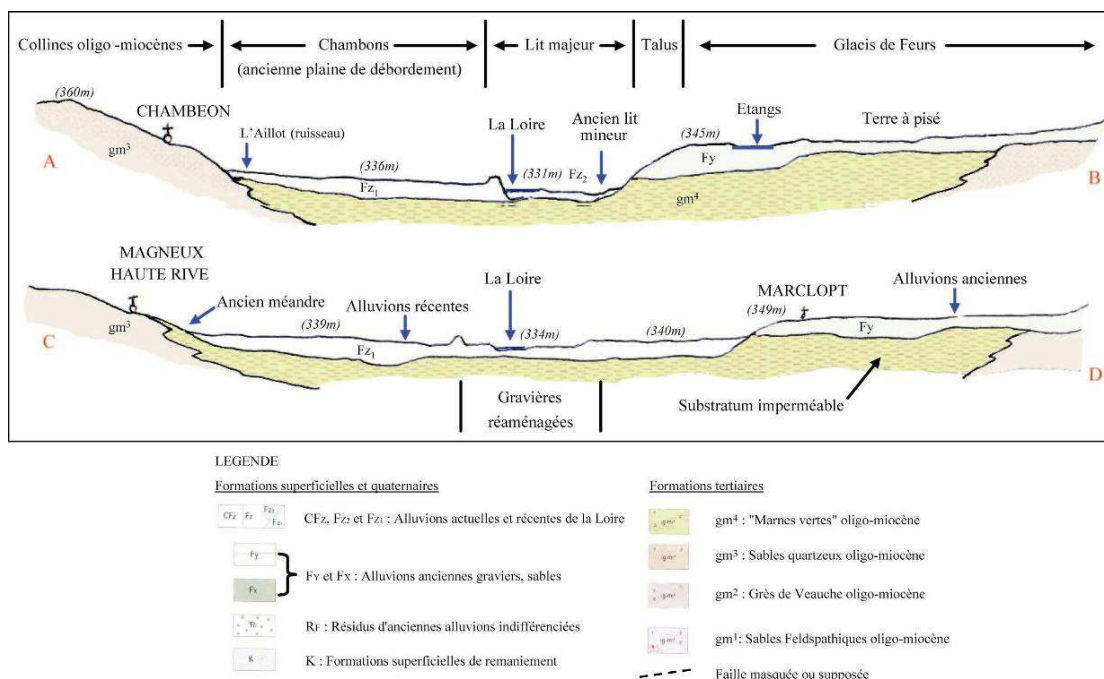


Figure 22 : Coupes géologiques et géomorphologiques interprétatives du secteur d'étude. D'après Le Griel (1975) modifié d'après Mimoun (2004)

Entre Magneux-Haute-Rive et Chambéon, l'apport du versant pour 4 kilomètres de linéaire est estimé à 32 ± 16 l/s (Cpgf-Horizon, 1979). Cette nappe est limitée en aval par le ruisseau de l'Aillot dont le bassin versant couvre une surface totale d'environ 22 kilomètres carrés. La carte piézométrique au 1/10 000^e, réalisée par Cpgf-Horizon (1978) à partir d'une campagne de mesures réalisée dans 63 puits, montre des directions d'écoulement depuis l'Aillot vers la Loire selon un axe sud-ouest/nord-est. La cote piézométrique en bordure de Loire passe de 336 mètres à l'amont à 325 mètres à l'aval, soit un gradient piézométrique moyen de l'ordre de 0,1%. D'après les données de reconnaissance géophysique, cette nappe peut être localement en charge sous les formations argileuses superficielles. La carte piézométrique réalisée dans l'étude géomorphologique (Sogreah & Aquascope, 1996) n'apporte pas de renseignements supplémentaires. Le fleuve Loire draine nettement sa nappe alluviale : elle représente donc le niveau de base.

3.4.6. Cadre hydrographique et hydrologique

La Loire traverse le département du sud au nord. Une opposition marquée apparaît entre les affluents des deux rives, due principalement à une différence d'ampleur entre les reliefs ouest et est. En rive gauche, les affluents issus des Monts du Forez (Le Lignon, le Vizezy) ont un régime pluvio-nival soutenu et présentent parfois de violentes crues. En rive droite, les bassins versants des affluents issus des Monts du Lyonnais (Coise, Toranche, Loise) sont plus modestes. Dans la plaine, ces débits dépendent aussi du fonctionnement du barrage hydroélectrique de Grangent (mis en eau en 1957 et situé à environ 20 kilomètres en amont du site) qui tend à réguler le régime hydrique naturel du fleuve. Les petites crues de faible amplitude sont généralement écrêtées, à la différence des fortes crues. Au niveau du site, le turbinage du barrage provoque des variations journalières de niveaux d'eau proches de 0,5 mètre. Les principaux débits caractéristiques de la Loire dans la plaine du Forez sont : débit moyen d'étiage de 5 à 12 m³/s au mois d'août ; moyenne mensuelle annuelle pour la période de référence (1985-1995) : 49 m³/s ; débit instantané de moins de 5 m³/s à plus de 200 m³/s suite aux lâchers du barrage ; crues quinquennales 1000 m³/s ; crues décennales 1700 m³/s ; crues centennales 4900 m³/s. Dans ce contexte, le barrage et les nappes ont un rôle de soutien d'étiage faible à nul.

3.5. Seine (Orgeval) [Mines ParisTech + Sisyphe Geophy + Irstea]

3.5.1. Problématique des échanges nappes/rivières

Le bassin de l'Orgeval représente un contexte unique pour l'étude du cycle de l'eau, et pour l'étude de la transformation pluie-débit du fait de la disponibilité de longues chroniques hydrologiques. De nombreuses études portant sur l'hydrologie de surface ont été menées sur ce bassin (Cormary et Galea, 1972 ; Blavoux et Mudry, 1989 ; Roussel, 1995 ; Paret, 2001 ; Babovic et Keijzer, 2002). Cependant, si les écoulements de surface sont aujourd'hui mieux connus grâce à ces travaux, le rôle des écoulements souterrains dans la relation pluie-débit est encore mal compris, et notamment la relation eaux souterraines-eaux de surface. Exceptés quelques travaux sur le fonctionnement hydrogéologique des petits sous-bassins (Canipelle, 1964) et les études par traceurs chimiques et isotopiques (Filiz, 1973 ; Blavoux, 1978 ; Ferry, 1989), ce n'est que très récemment que des travaux de caractérisation de l'hydrogéologie du bassin ont débuté (Flipo et al., 2009 ; Kurtulus et al., 2011 ; Kurtulus et Flipo, 2012 ; Mouhri et al., 2011, 2012, 2013). Or la composante souterraine du cycle de l'eau joue un rôle majeur dans les échanges nappes/rivières qui affectent à leur tour les bilans hydrologiques à l'échelle du bassin (Hayashi et Rosenberry, 2002). Cette relation nappes/rivières varie spatialement en fonction du contexte géomorphologique, et temporellement, en fonction des conditions hydrologiques (niveau d'eau dans la nappe et dans la rivière). Si les travaux récemment menés dans le cadre du PIREN Seine et de la FIRE ont permis d'aboutir à une meilleure compréhension du fonctionnement du bassin amont, les questions suivantes demeurent :

- Si le réseau hydrographique semble alimenté par la formation aquifère des calcaires de Brie à l'amont du système, qu'en est-il de la relation nappe/rivière dans le secteur aval du système (cheminement sur le semi perméable constitué des Marnes vertes, et surtout avec la seconde formation aquifère des calcaires de Champigny) ?

- Quels sont les flux d'eau (et indirectement de polluants) échangés temporellement entre les nappes et les cours d'eau étudiés ?

Répondre à ces deux questions est aujourd'hui un enjeu capital et nécessaire pour aboutir à une compréhension approfondie et véritable du fonctionnement hydrologique du bassin qui servira ensuite de support à la modélisation biogéochimique spatialisée. De nombreuses actions de recherche menées sur le bassin ont besoin de cette modélisation comme par exemple l'étude de la dénitrification et de la production de gaz à effet de serre associés, ou encore le transfert des pesticides ainsi que des recherches menées sur les zones humides en lien avec l'ingénierie écologique.

3.5.2. L'Orgeval : Situation géographique et climat

Le site expérimental de l'Orgeval (104 km²) fait partie de l'Observatoire ORACLE (1800 km²) délimité par les bassins versant du Grand et du Petit Morin à 70 km à l'est de Paris (Figure 23). Le bassin expérimental de l'Orgeval est affecté par un climat océanique tempéré avec une pluviométrie moyenne annuelle de 700 mm. Il est représentatif, à la fois des pratiques agricoles sur le bassin de la Seine (type grandes cultures) et aussi de la géomorphologie des bassins incisés propres à l'hydrosystème Seine sur sa zone centrale où les formations tertiaires de l'Oligocène (aquifère de Brie) et de l'Eocène (calcaires du Champigny) sont affleurantes dans les vallées incisées.

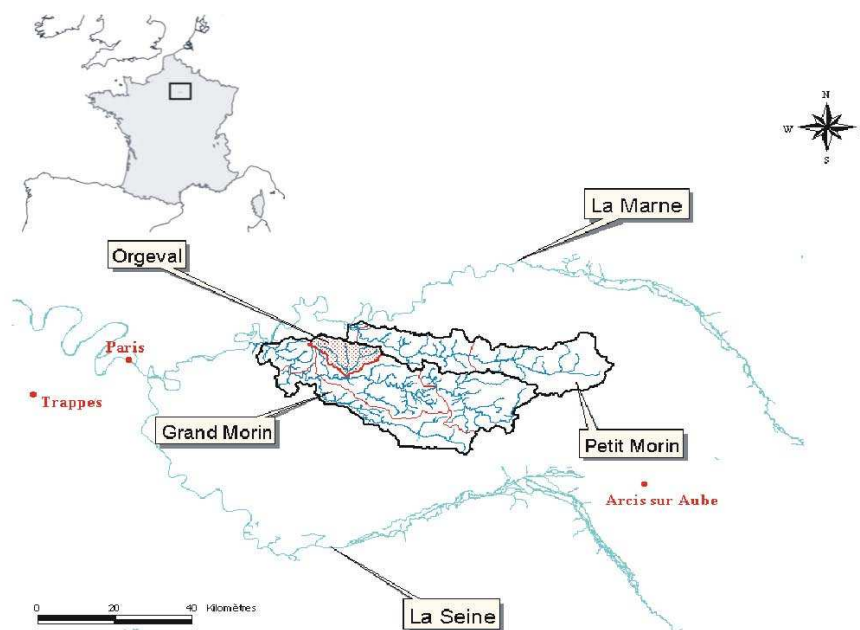


Figure 23 : Situation géographique

3.5.3. L'Orgeval : un contexte géomorphologique représentatif de la zone centrale du bassin de la Seine

Sur le plan hydrogéologique, le bassin de l'Orgeval est influencé par un système aquifère multicouches (Figure 24 et Figure 25), composé de deux principales formations géologiques (Flipo et al., 2007) : l'Oligocène (formation de Brie) et l'Eocène (calcaire de Champigny). Ces deux unités aquifères sont séparées par un aquitard argileux constitué d'argiles vertes de Romainville et de marnes supra-gypseuses.

Le bassin est recouvert de dépôts éoliens quaternaires, essentiellement constitués de limons et de lentilles de sables peu perméables.

L'Oligocène est constitué d'une alternance de blocs de meulière, d'argiles (Argiles à meulières) et du banc des calcaires de Brie. Ce dernier se situe uniquement dans la partie basale (avec une épaisseur de 1 à 2 m) de cette formation (Thiry et Simon-Coinçon, 1996 ; Bricon et Cavelier, 1961). Les faciès de la formation de Brie correspondent au profil vertical d'altération du calcaire en faveur d'une silicification de celui-ci (Ménillet, 1981 ; Thiry et Simon-Coinçon, 1996 ; Mouhri et al., 2012). La partie supérieure est composée essentiellement d'un horizon limono-argileux contenant des morceaux hétérométriques de calcaires résiduels, et des masses silicifiées dispersées. La partie inférieure est composée de calcaires d'origine lacustre (calcaire de Brie) présentant de nombreuses figures de dissolution micro-karstiques. Entre les deux, s'intercalent des argiles à meulières (Lorenz et Obert, 1989), qui sont aussi observées au niveau des flancs de vallées en pente, sous forme de débris de meulières coulés ou soliflués avec leur matrice argileuse, et au niveau des colluvions de fond de vallée sous forme d'accumulation des produits de lessivage du bassin versant (matrice limoneuse fine avec inclusion de meulières). La nappe des calcaires de Brie est constituée des calcaires et des meulières de Brie, auxquels se superposent quelques résidus sableux (Butte de Doue) et des formations superficielles (limons des plateaux). L'ensemble, hétérogène et peu épais (6 à 10m de hauteur mouillée), constitue une nappe libre superficielle (Mouhri et al., 2012), très sensible aux variations de précipitation, dont le mur est constitué d'argiles vertes quasiment imperméables (Canipelle, 1964 ; Mégnier, 1970).

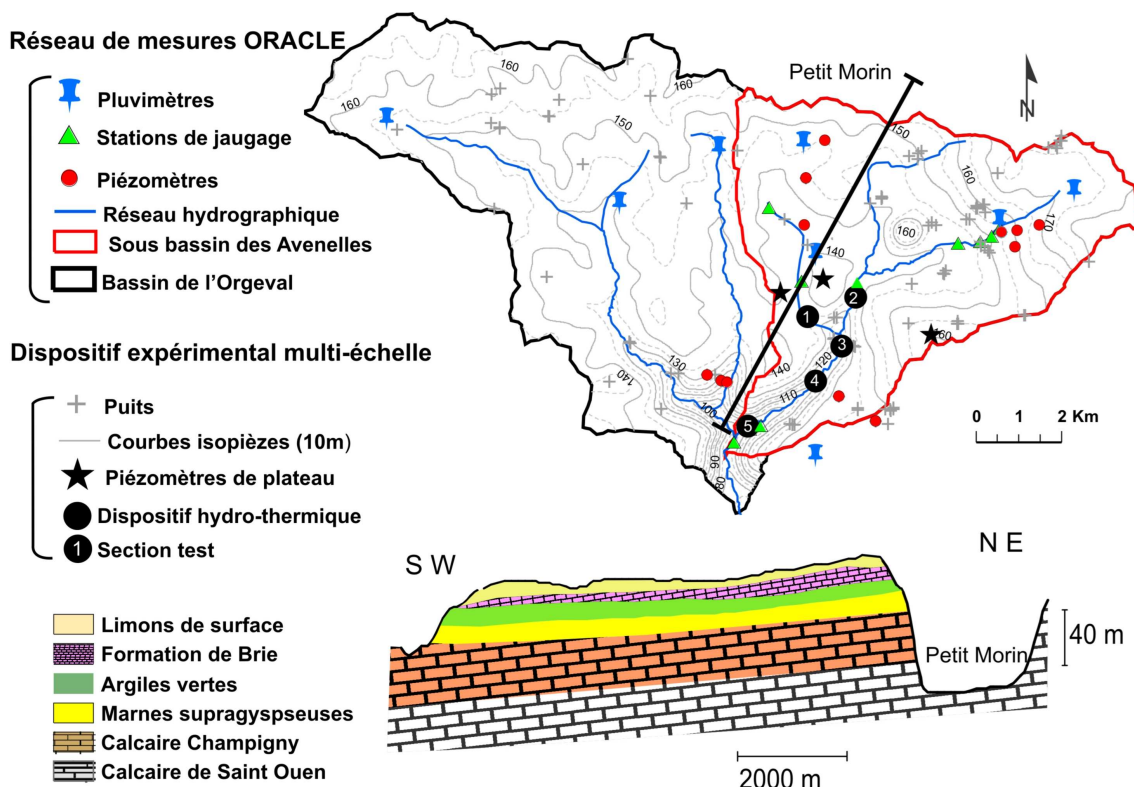


Figure 24 : Dispositif expérimental (MOLONARI) multi-échelle imbriqué dans le réseau de mesure ORACLE du bassin de l'Orgeval (extrait de Mouhri et al., 2013a)

L'Eocène supérieur et moyen sont composés, de haut en bas, par les marnes supra-gypseuses (peu perméables), le calcaire de Champigny (Bartonien) et le calcaire marneux de Saint Ouen. L'aquifère de Champigny comprend ces deux formations qui sont séparées par une transition marneuse. Ces formations constituent un aquifère de perméabilité de fissures, coiffé sur les plateaux par le manteau des argiles vertes. Cette nappe est partiellement libre, bien que coiffée d'une couche argileuse. Elle est alimentée par

les flancs de vallée, et, localement, par des zones poreuses et des gouffres (Campinchi et Morisseau, 1983). La puissance de l'aquifère de Champigny peut atteindre une soixantaine de mètres avec une épaisseur mouillée de 30 à 50 m. Le niveau piézométrique moyen se situe à environ 15 m sous les marnes supra-gypseuses (Lorenz et Obert, 1989).

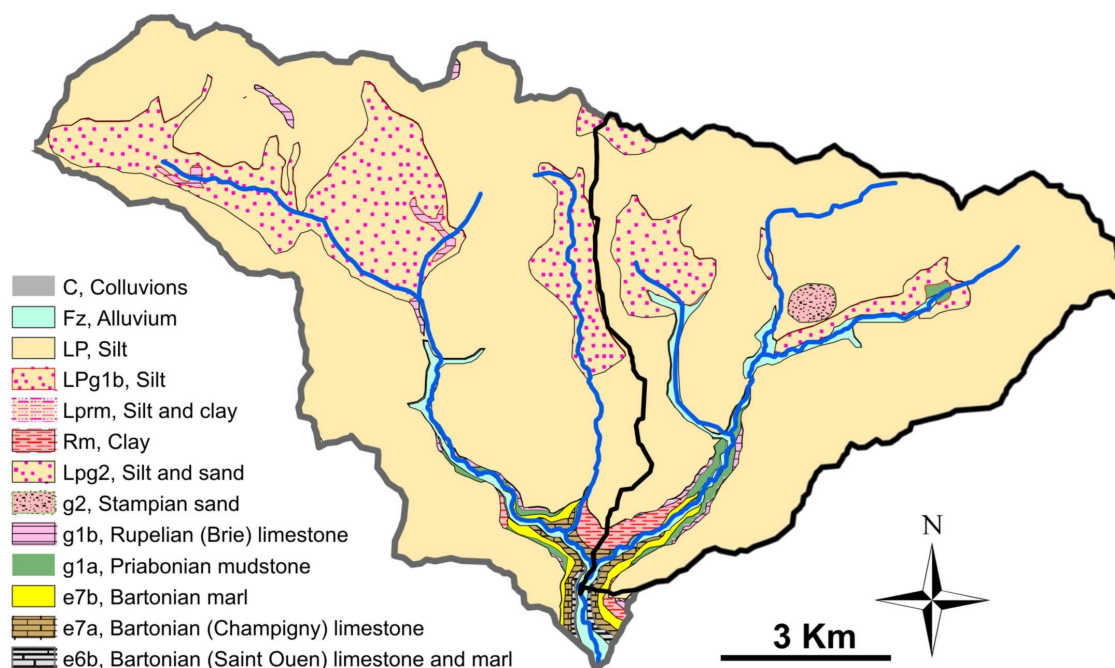


Figure 25 : Carte géologique du bassin de l'Orgeval

3.5.4. Les données disponibles

L'ensemble des compartiments hydrologiques et hydriques d'ORACLE sont suivis via un réseau de mesure complet (Tableau 9, Figure 24) : stations limnimétriques à l'exutoire de chaque sous-bassin et dans le réseau de drainage, stations piézométriques, stations pluviométriques réparties sur l'ensemble d'ORACLE et stations d'humidité des sols en surface et en profondeur. Ce dispositif est doublé d'un réseau de mesure de la qualité des eaux de surface, de pluie et de la nappe (Tableau 9).

Equipements	Types de mesure	Nombre de stations	Fréquence de mesure	Période d'observation
Stations Limnimétriques	Hauteur d'eau / Jaugeage ponctuel	11	Continue	Depuis 1962
Pluviomètres	Lame d'eau pluviomètre à augets basculeurs	19	Continue	Depuis 1962
Piézomètres	Hauteur d'eau	11	Continue et journalière	Depuis 1989
Qualité	NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , PO ₄ , Cl, COD, CID et conductivité T° min and max, radiations totales, T° du sol à - 50 cm et - 100 cm, Humidité min, max et moyenne	11	Journalière	Depuis 1975 pour certaines stations
Station Météorologique	Humidité volumique du sol à différentes profondeurs, sur 3 sites de mesure sur le BV	1 station + 2 à proximité de l'observatoire	Continue	Depuis 1962
Humidité du sol	Carte des cultures du bassin et Plan d'occupation des sols	3 profils (de 5 cm à 155 cm)	Continue	Depuis 1988 sur 1 site, depuis 2006 sur 2 autres sites
Carte des cultures		Bassin versant des Avenelles	Annuelle	Depuis 1998
Cartes	carte pédologique et géologique, MNT 25 m, MNT 50 m, supports SIG ...			

Tableau 9 : Données de base d'ORACLE pour les 2 Morin qui incluent l'Orgeval

Un réseau de mesure dit « de base » est maintenu en permanence, afin de ne pas interrompre les chroniques. La longueur et la continuité de certaines chroniques sur le long terme sont nécessaires pour i) appréhender correctement le fonctionnement des hydrosystèmes, ii) détecter des tendances ou des changements dans les comportements, iii) évaluer les impacts de modifications d'origines anthropiques, de couvert végétal ou liées aux aménagements hydro-agricoles et ce, jusqu'aux changements climatiques. Ces données de base sont acquises principalement par la DRIEE Île-de-France, MétéoFrance et l'Irstea (Tableau 9).

3.6. Détenteurs de données et de modèles sur les sites sélectionnés

Actuellement, l'accès aux données sur les différents sites étudiés ne fait pas l'objet d'un conventionnement particulier dans le cadre de ce travail. Pour le Rhône, le conventionnement actuel avec la CNR est suffisant. Les informations concernant les données et les modèles sont tirées des grilles de caractérisation.

3.6.1. Rhône aval : Donzère-Mondragon

Les données utilisées pour le volet hydrologique de l'étude de la chute CNR de Donzère-Mondragon proviennent de différentes sources. Il peut s'agir de données issues de la bibliographie, issues de bases de données accessibles en ligne ou transmises directement par nos partenaires.

Les données mobilisées sont les suivantes :

- Découpage administratif, réseau hydrographique : BD Carthage (IGN)

Ces données sont téléchargeables sous formes de shapefiles sur le site du SANDRE (<http://sandre.eaufrance.fr/>).

- Entités aquifères : BD masse d'eau (AE-RMC) et BD rhf (AE-RMC)

Ces données nous ont été transmises par l'AE-RMC sous forme de shapefile. Elles ont été complétées par les synthèses hydrogéologiques départementales et régionales numérisées et téléchargeables sur les sites web de la DIREN-RA (<http://www.rhone-alpes.ecologie.gouv.fr/>).

- Débits du Rhône et niveaux : Banque hydro (MEDD) / données CNR

Les données de la banque hydro sont consultables sur à l'adresse suivante : <http://www.hydro.eaufrance.fr/>. Les données CNR nous ont été transmises directement dans des fichiers Excel. La précision des données de débits est de 20%.

- Piézométries récentes post-aménagement : Étude ANTEA pour AREVA (2008-2009)

Ces données nous ont été transmises sous deux formats différents :

. D'une part sous forme d'extrait numérisé de rapport pour la carte piézométrie de mars 2009. Il a donc fallu géoréférencer et digitaliser cette carte afin de la rendre exploitable sous SIG. Ce traitement induit une perte de précision.

. D'autre part sous forme de shapefile de points contenant des relevés piézométriques dans des puits. La carte piézométrie de juin 2008 a été construite à partir de ces points à l'aide des outils d'interpolation d'ArcGIS.

Dans les deux cas, les cartes piézométriques sont construites à partir de relevés dans des puits nivelés au GPS.

- Piézométries anciennes post-aménagement : Thèse Guégan (1972)

Ces données sont issues du mémoire de thèse de Guégan (1972). Elles ont été numérisées, géoréférencées et digitalisées pour être exploitables sous SIG. La précision de ces piézométries anciennes (1968 et 1969) est sans doute moindre que pour les récentes. Cela est dû au traitement et aux techniques de nivellement plus anciennes, ou à l'absence de nivellement.

- Caractéristiques, historique de la chute de Donzère-Mondragon : Numéro spécial de la Houille Blanche (1955)

- Niveau du talweg du Rhône : Étude globale du Rhône (EPTB Territoire Rhône, CNR), données CNR
Ces données nous ont été transmises par la CNR sous forme de tableau Excel.

- Prélèvements d'eau : SIERM

Ces données sont téléchargeables sous forme de shapefile sur le site du SIERM (<http://sierm.eaurmc.fr/>). La précision de ces données dépend de l'existence et de la fiabilité des déclarations par les usagers des prélèvements d'eau.

L'ensemble de ces données s'avère indispensable pour la caractérisation des échanges nappes/Rhône.

3.6.2. Sèvre-Niortaise

Dans le cadre du projet Re-Resources, animé par la région Poitou Charente, le syndicat des Eaux du Centre Ouest et le BRGM détiennent des données sur le champ captant de Saint-Maxire/Échiré :

- Caractéristiques du champ captant (nombre de puits, débits d'exhaure, type d'aquifère)
- Données de forage
- Données hydromorphologiques
- Données hydrogéologiques
- Teneurs en nitrates

3.6.3. Rhin supérieur

3.6.3.1. Hydrométrie

L'APRONA (L'observatoire de la nappe d'Alsace) est un des détenteurs de données principaux sur ce secteur. Sa mission principale est la protection de la nappe d'Alsace (Volets qualité et quantité). Pour cela, l'APRONA a initié et développé plusieurs études hydrogéologiques et qualité de l'eau (notamment nitrates, chlorures : présence de vignes, grandes cultures types maïs, anciennes mines de potasse) sur la Plaine et en particulier sur l'Ill domaniale (de Colmar à Strasbourg).

Ces études sont référencées sur le site web de l'APRONA : <http://www.aprona.net/>

Il est possible de télécharger des cartes hydrogéologiques, piézométriques (basses eaux : sept. 91 ; moyennes eaux mai 2009 ; dans l'attente d'une piézométrie hautes eaux) et qualité.

Un suivi piézométrique de la nappe est réalisé (195 piézomètres). L'optimisation sur 169 piézomètres a permis de réaliser le modèle hydrodynamique régional d'Alsace. Ceci concerne la partie française de l'Alsace. Le côté allemand est équipé avec plus de piézomètres que le côté français, notamment au bord du Rhin.

Une carte de moyennes-eaux a été réalisée en mai 2009 par LLUBW. Une carte de profondeur de la nappe sur l'Ill domaniale est également disponible. Une modélisation nitrates à mailles de 100 m + 3 couches transféré a été réalisée (MoNIT).

Une carte des échanges nappe/rivières est disponible sur le secteur (infiltration/drainage).

Il y a actuellement besoin d'un meilleur MNT (actuellement à 50 m avec une précision verticale de 15 cm) pour mieux mettre en évidence l'existence de chenaux préférentiels d'écoulement souterrains et d'autres zones humides.

Une extension des travaux est prévue sur l'ensemble de la plaine d'Alsace.

Les données disponibles du réseau de piézomètres et des forages (niveaux d'eau et qualité) sont disponibles sur la base de données ADES.

3.6.3.2. Invertébrés souterrains

Des données originales ont été acquises par le laboratoire UMR-CNRS Université Lyon 1 n° 5023 sur le secteur de Rhinau ainsi que sur la plaine alluviale située entre le Rhin et l'III (Rhinau-Kappel). En septembre 1988, un total de 36 stations ont été prélevées à 50 cm de profondeur dans les alluvions (dont 11 échantillonnées également à -1 m). En mai 1996, une seconde campagne d'échantillonnage a permis de prospector les 11 stations de la plaine alluviale du Rhin (à -50 cm et -1 m).

3.6.4. Loire amont

Les données sont issues de travaux de thèse et d'études cités dans la partie présentant le secteur de l'Écozone (§ 3.4) et dans les références bibliographiques. Il y a notamment la FRAPNA Loire, la Direction départementale des territoires (DDT) et des bureaux d'étude locaux.

3.6.5. Seine (Orgeval)

Les données disponibles sont présentées aux paragraphes § 3.5.4., § 2.5. et § 4.5.

4. Résultats – premiers diagnostics des échanges nappes/rivières

Cette partie présente les résultats de l'application des métriques présentées dans la partie 2 sur les cinq sites (Sèvre-Niortaise, Rhône, Loire, Rhin-Ill et Orgeval). Pour chaque site, une sous-partie présente de manière synthétique les résultats obtenus. Cette synthèse est présentée sous forme de tableau découpant la rivière en tronçon.

4.1. Sèvre-Niortaise – Champ captant de Saint-Maxire/Echiré

4.1.1. Modèle hydrologique/hydrogéologique MARTHE

4.1.1.1. Etat des connaissances sur les relations nappes/rivières dans le méandre

- En condition d'écoulement naturel

En 1991, le bureau d'étude GEOAQUITAINE donnait une première appréciation des échanges nappes/rivières dans le méandre sur la base de piézométries hautes et basses eaux :

- la Sèvre-Niortaise drainerait la nappe du Dogger sur les parties nord, ouest et sud du méandre.
- la Sèvre-Niortaise alimenterait la nappe sur le bras oriental du méandre.

Dans le cadre de la première année de convention ONEMA-BRGM, les résultats du calage en régime permanent du modèle hydrodynamique régional adapté au cas local du champ captant corroboraient, en grande partie, ces résultats pour des conditions de hautes eaux (Figure 26) (Chatelier, 2011).

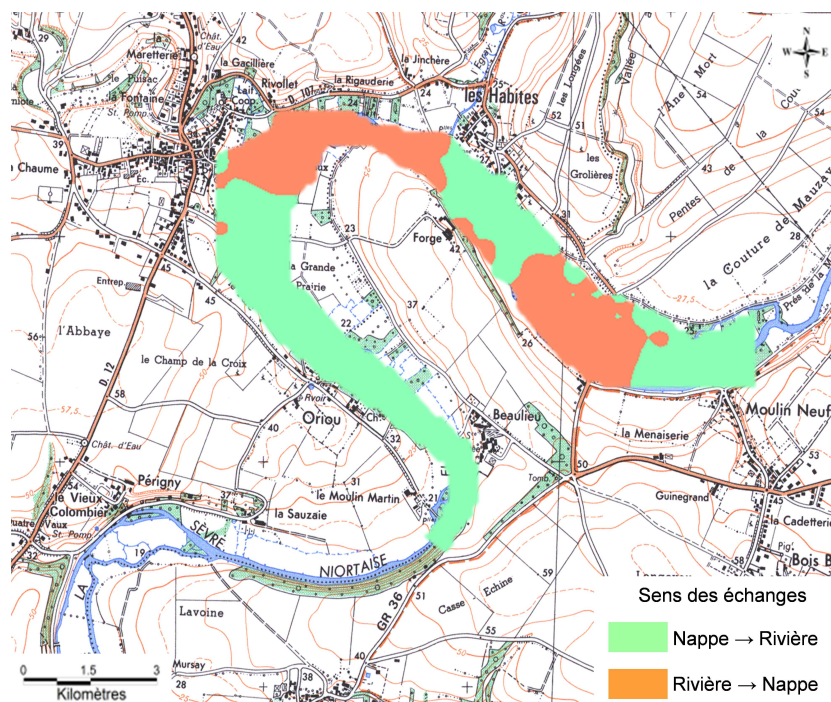


Figure 26 : Relations nappe/fleuve pour un régime de hautes-eaux en condition d'écoulement naturel (résultats obtenus par un calage en régime permanent du modèle hydrodynamique local)

- **En condition de pompage**

Les pompages du champ captant assurent une production horaire d'environ 500 m³/h soit une production annuelle pour l'ensemble du champ captant de 2,8 millions de mètres cubes. Le champ captant comprend douze forages parmi lesquels deux captent la nappe infra-toarcienne (F12 et F16) et les dix autres l'aquifère du Dogger (Figure 27). La distance entre la Sèvre-Niortaise et chaque forage varie de 50 à 250 mètres.

En conditions de pompage, les échanges nappe/rivière au droit du méandre sont étudiés par Douez (2008). L'auteur confronte les teneurs en nitrates caractéristiques des deux aquifères (Dogger et Infra-Toarcien) et de la Sèvre-Niortaise aux teneurs mesurées dans les eaux pompées. Il conclut à une participation variable de la Sèvre-Niortaise au débit d'exhaure fonction : 1) de la distance entre le forage et le fleuve ; 2) du régime d'exploitation du forage.

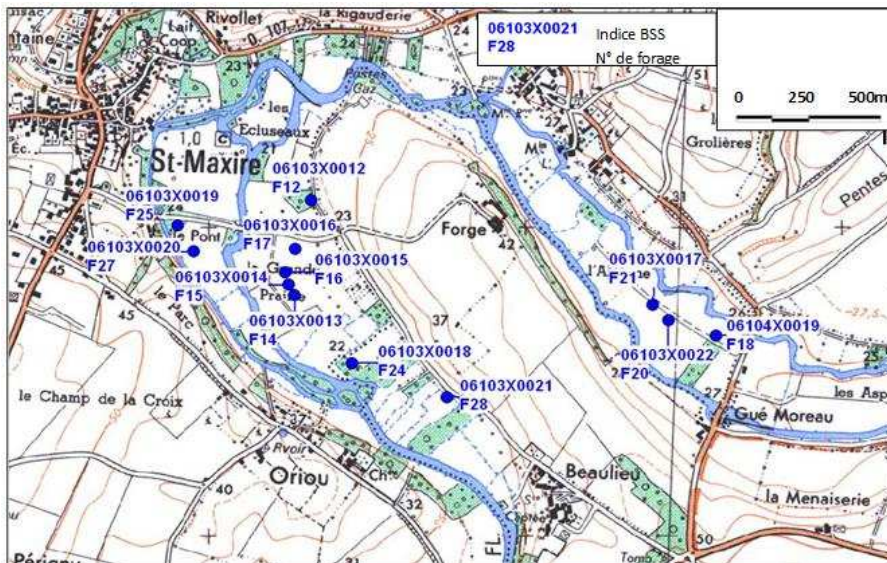


Figure 27 : Localisation des forages du champ captant de Saint-Maxire-Echiré

4.1.1.2. Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire

Le modèle de Saint-Maxire/Echiré prend pour base le modèle hydrodynamique régional des aquifères du Jurassique en Poitou-Charentes (Duez, 2011). La version présentée réduit l'extension spatiale initiale à un domaine de 3300 km². Autour du champ captant, le maillage initial de 1 km² est localement raffiné dans un maillage gigogne à mailles de 100 mètres de côté.

En année 1 du projet, le travail d'adaptation du modèle régional au cas local du champ captant s'est focalisé sur la définition, à l'hectare, de la géométrie des couches géologiques, des prélèvements d'eau, de la recharge et des caractéristiques hydro-morphologiques de la Sèvre-Niortaise (Chatelier, 2012a).

En année 2 du projet le travail a porté sur le calage des chroniques piézométriques et des chroniques de débit de la Sèvre-Niortaise en régime transitoire (Chatelier, 2012b). Lors de l'année 2, les cotes de la ligne d'eau du fleuve n'étaient pas imposées, elles étaient corrélées au débit du fleuve par une relation de Manning-Strickler. Cette relation dans un contexte de fort taux d'étagement n'étant pas appropriée, les hauteurs simulées étaient bien inférieures à celles mesurées sur le terrain, biaisant par la même occasion les débits d'échange entre le fleuve et la nappe.

Lors de la troisième année le travail a visé à améliorer l'impact d'une ligne d'eau artificiellement surélevée par les nombreux obstacles à l'écoulement sur les échanges nappe-fleuve. En prenant en compte cette nouvelle contrainte, la paramétrisation du modèle s'est attachée à retranscrire les chroniques piézométriques de la nappe du Dogger, nappe en continuité hydraulique avec la Sèvre-Niortaise. Les chroniques piézométriques disponibles à l'Infra-toarcien n'ont pas fait l'objet du calage, la nappe captive infra-toarcienne n'étant pas au contact direct du fleuve dans la boucle du méandre.

Les résultats sont précédés d'un rappel du principe de fonctionnement du modèle utilisé, de la présentation des paramètres d'entrée du modèle intégrant notamment les mesures complémentaires ayant servi à calibrer les paramètres affectés à la Sèvre-Niortaise et enfin de la présentation des paramètres de validation du modèle.

4.1.1.2.1. Rappels

Le code de calcul retenu dans le cadre de cette modélisation est MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements). Ce code, développé par le BRGM, utilise la méthode des volumes finis, et permet le calcul des écoulements de fluides et de transferts de masse et d'énergie en milieux poreux bidimensionnels (plan ou coupe verticale) et tridimensionnel (Thiéry, 2006). Les différentes fonctionnalités et leur mise en œuvre sont décrites par Thiéry (1990a et 1990b, 1993, 1994, 1995a et 1995b, 2004, 2007, 2009, 2010a, 2010b, 2010c), Thiéry et Golaz (2002), Thiéry et al. (2002).

Le modèle hydrodynamique est ici couplé avec le réseau hydrographique. Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents. Selon la position relative de la hauteur d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère ou inversement depuis l'aquifère vers la rivière. Pour le modèle de Saint-Maxire-Echiré, les paramètres descriptifs d'un tronçon de rivière (largeur, longueur, perméabilité du lit etc.) ainsi que les modalités d'échanges entre nappe et rivière sont décrits dans Chatelier (2012a).

4.1.1.2.2. Période de simulation et paramètres de validation

La modélisation en régime transitoire est réalisée au pas de temps mensuel de janvier 2000 à décembre 2007. Les chroniques de référence utilisées en nappe sont disponibles de juillet 2005 à décembre 2007 et sont obtenues par relevé manuel par l'exploitant du niveau piézométrique dans chacun des 10 puits de pompage au Dogger (Figure 28), à raison d'un relevé tous les 15 jours.

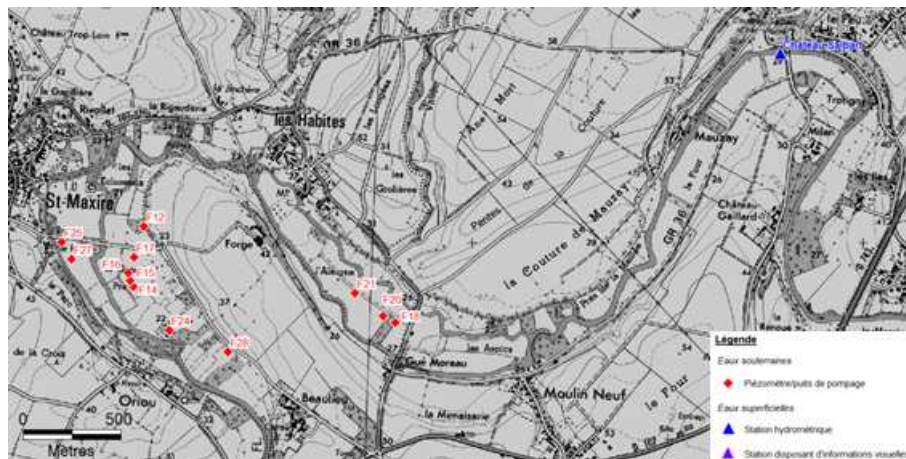


Figure 28 : Localisation des piézomètres et des stations de débit utilisés pour le calage en régime transitoire

4.1.1.2.3. caractéristiques climatiques des années simulées

La période 2000-2007 présente une grande variabilité climatique (Figure 29). L'année 2005 se caractérise par une sécheresse exceptionnelle a contrario de 2001 qui a été exceptionnellement humide. Pour ces deux années, la périodicité de retour est au-delà de 10 ans. Les années 2002 et 2003 peuvent être considérées comme proches de la quinquennale sèche. Ces deux années présentent toutefois des typologies différenciées. Alors que 2003 a été de pluviométrie normale en ce qui concerne la période hiver/printemps et sèche en été, l'année 2002 a été très sèche durant la période de recharge des nappes mais pluvieuse

pendant l'été. L'année 2007 est, elle, proche de la quinquennale humide. L'année 2006 apparaît comme une année moyenne.

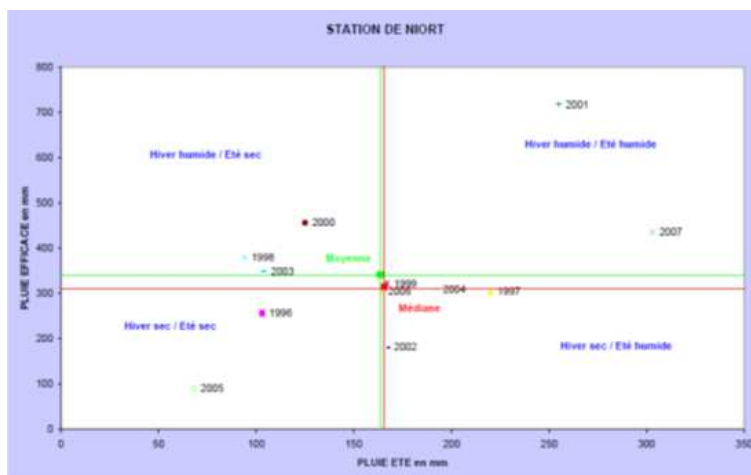


Figure 29 : Caractérisation des années climatiques à partir des données MétéoFrance de la station de Niort. En abscisse, la hauteur de pluie tombée sur les mois de juin/juillet/août/septembre. En ordonnée, la hauteur de pluie efficace entre le mois de septembre de l'année précédente et le mois de mai de l'année considérée.

4.1.1.2.4. Conditions limites

En bordure du modèle, la charge hydraulique est imposée à chaque pas de temps sur chacune des huit couches. La valeur de la charge hydraulique imposée est égale à celle simulée par le modèle hydrodynamique régional des nappes du Jurassique en Poitou-Charentes au pas de temps mensuel entre 2000 et 2007 (Doez, 2011).

4.1.1.2.5. Paramètres d'entrée

- **Géométrie des couches géologiques**

Le modèle compte 8 couches géologiques dont la géométrie est décrite dans Chatelier (2012a).

- **Recharge et ruissellement**

Les données météorologiques Pluie-Evapotranspiration Potentielle (ETP) collectées pour l'élaboration du modèle régional couvrent la période 2000-2007 au pas de temps décadaire (données MétéoFrance). La recharge des nappes est estimée par zone de sol, au pas de temps mensuel, à partir d'un bilan par la méthode Thornthwaite fournissant la pluie efficace. L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR, Putot et Bichot, 2007), développé par le BRGM dans le cadre d'études de vulnérabilité des nappes, est utilisé ici pour évaluer le fractionnement de cette pluie efficace entre ruissellement et infiltration. Toutes les mailles affleurantes du modèle sont considérées comme mailles de recharge. Le détail du calcul de la zonation de la recharge et du ruissellement comme la projection de cette zonation est consultable dans Chatelier (2012a).

- **Prélèvements**

Les prélèvements ont été affinés sur l'emprise du maillage gigogne réalisé dans le cadre de ce travail. Hors de cette emprise, les volumes attribués restent ceux implémentés dans la version régionale du modèle. Leur description (origine, répartition etc.) est consultable dans Doeux (2011).

Prélèvement AEP

Douze captages sont dédiés à l'alimentation en eau potable (forages du champ captant de Saint-Maxire) et représentent 99 % du volume prélevé annuellement en nappe. Les deux forages à l'Infra-Toarcien

participent à hauteur de 9 % du volume annuel prélevé dans la couche correspondante du modèle. Les dix autres captages captent l'aquifère du Dogger.

Les volumes prélevés pour l'AEP ont été implémentés dans le modèle au pas de temps mensuel. Les données ont été fournies par le syndicat des eaux du Centre Ouest et la Lyonnaise des Eaux, au pas de temps mensuel de 2000 à 2003 et bi-mensuel de 2004 à 2007. En 2005, les fichiers des mois de septembre à novembre sont manquants. Les prélèvements mensuels ont été évalués, par ouvrage, en soustrayant les prélèvements cumulés sur les mois sans lacune au volume annuel 2005 fourni par la CAEDS.

Prélèvements agricoles

Sur le secteur du gigogne, aucun prélèvement à vocation agricole n'est recensé en nappe.

En bordure de Sèvre, sept prises d'eau superficielle servent à l'irrigation pour un volume annuel moyen inférieur ou égal à 1 million de mètres cubes entre 2000 et 2007. Les volumes annuels et les volumes étiage sont fournis par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. La ventilation mensuelle se base sur les travaux de Mondain (2008).

Prélèvements industriels

Deux captages sont dédiés aux prélèvements pour usage industriel (Laiterie d'Echiré). Ils sont tous deux déclarés au Dogger (couche 5) et le volume annuel prélevé entre 2000 et 2007 n'excède pas 37 000 m³. Les données de prélèvements sont fournies par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne sous forme d'un volume annuel et d'un volume étiage. Considérant que les prélèvements sont bien répartis sur l'année, les volumes mensuels sont obtenus en divisant le volume considéré par le nombre de mois concernés par une période (étiage/non étiage).

• **Le réseau hydrographique**

Obstacles à l'écoulement

Les obstacles à l'écoulement influent sur les hauteurs d'eau de la Sèvre-Niortaise en modifiant de manière artificielle la pente de la ligne d'eau. Ils modifient aussi la dynamique de dépôt sédimentaire en amont (colmatage) et en aval (érosion). Les échanges nappes/rivière étant contrôlés par le différentiel de hauteur d'eau entre la nappe et la rivière et la perméabilité du lit de rivière, la prise en compte de l'effet de ces ouvrages apparaît comme nécessaire pour un travail à l'échelle hectométrique.

Cependant, cette prise en compte se révèle délicate :

- Les obstacles ne barrent pas le cours total de la Sèvre-Niortaise, un canal de dérivation y est le plus souvent associé. Cette hétérogénéité de morphologie du cours d'eau ne peut être implémentée à l'échelle hectométrique du modèle.

- le fonctionnement des vannes levantes au niveau des moulins reste inconnu,

- aucune chronique de hauteur d'eau n'est recensée sur le méandre et la cote topographique des ouvrages reste inconnue.

Si la surélévation artificielle de la ligne d'eau du fleuve est appréhendée en imposant cotes de ligne d'eau sur le méandre (voir ci-dessous), l'effet des obstacles sur la dynamique sédimentaire n'est pas intégré au regard du manque de données et de l'échelle de travail (maille hectométrique).

Paramètres du réseau hydrographique

Le Tableau 10 distingue les paramètres ayant fait l'objet de mesures de terrain ou d'informations bibliographiques de ceux restant inconnus.

En 2012, le bras externe de la Sèvre-Niortaise au droit de l'Aleigne a fait l'objet de jaugeage afin de déterminer le pourcentage de dérivation à affecter, en période d'étiage, à chacun des bras de la Sèvre-

Niortaise. En raison de problèmes techniques, la fiabilité des mesures de débitmétrie est insuffisante pour que les résultats soient retenus. Le pourcentage de dérivation comme l'épaisseur des dépôts de fond de rivière et leur perméabilité restent des paramètres de calage du modèle.

Paramètre	Mesuré/Connu	Méthode	Source
Longueur de tronçon	X	Traitement MapInfo	BD CARTHO®
Largeur de tronçon	X	Télémètre / imagerie satellite	Mesure <i>in situ</i> 2011 / Géoportail
Hauteur d'eau	X	Sondage manuel à l'étiage	Mesure <i>in situ</i> 2012
Cote de la ligne d'eau	X	Sondage manuel à l'étiage	Calculée à partir des mesures <i>in situ</i> 2012
Cote de fond de rivière	X	Sondage manuel à l'étiage	Calculée à partir des mesures <i>in situ</i> 2012
Epaisseur des dépôts de fond de rivière	-	-	-
Perméabilité des dépôts de fond de rivière	-	-	-

Tableau 10 : Etat des connaissances concernant les paramètres du réseau hydrographique

Les paramètres d'entrée du modèle sont constitués par :

1) La longueur et la largeur du cours d'eau

La longueur de chaque tronçon par maille du gigogne est issue d'un traitement du linéaire sous MapInfo des données de la BD CARTHO®. Dans les mailles gigognes de 100 m, les longueurs renseignées varient de 10 à 200 mètres.

La largeur de chaque tronçon est renseignée sur la base d'un croisement entre des mesures de terrain de 2011 (télémètre Leica Disto Basic) et l'imagerie satellite issue du Géoportail. Les valeurs renseignées varient de 7 à 35 mètres.

2) La cote de la ligne d'eau de la Sèvre-Niortaise

Lors du calage en régime transitoire, les cotes de la ligne d'eau de la Sèvre-Niortaise sont imposées selon quatre modalités annuelles présentées dans le Tableau 11.

La différence entre hauteur d'eau imposée en année 3 et hauteur d'eau restituée par le modèle en année 2 atteint, selon les tronçons, près de 4 m. La Figure 30 retranscrit, à titre d'exemple, cette différence pour l'année 2006 selon les 4 modalités décrites précédemment.

Les valeurs de cotes comme leur variabilité annuelle restent une approximation grossière de la réalité que seuls des suivis interannuels de hauteurs d'eau couplés à des relevés topographiques des cotes de seuils et de berges permettraient d'améliorer.

3) La cote de fond de lit de rivière

La cote de fond de rivière est estimée en soustrayant à la cote topographique de la berge déterminée à partir de la carte IGN au 1/25000, le cumul de la hauteur de berge et de la profondeur d'eau mesurée à l'étiage en juillet 2012 (Chatelier, 2012b).

4) L'épaisseur et la perméabilité des dépôts de fond de rivière

En l'absence de données, l'épaisseur des dépôts de fond de rivière et leur perméabilité restent des paramètres de calage du modèle.

Régime	Mois concernés	Cote de la Ligne d'eau	Commentaire
Débordement	Janvier, février	Cote topographique	Etat de débordement de la Sèvre-Niortaise régulièrement observée sur le méandre sur ces mois. Valeurs non imposées lors des hivers 2002 et 2005 en raison de conditions plus sèches.
Recharge	Novembre, décembre, mars, avril, mai	Cote topographique – 10 cm	Calcul arbitraire en l'absence d'informations
Etiage	Juin, juillet, octobre	Cote calculée à l'étiage 2012*	
Etiage et assec	Août, septembre	Cote calculée à l'étiage 2012*, cote du fond de rivière pour le bras extérieur du secteur du Pont	Un assec du bras extérieur du secteur du Pont est régulièrement observé entre août et septembre

* Les cotes de la ligne d'eau à l'étiage sont obtenues en soustrayant la hauteur de berge mesurée en juillet 2012 à la cote topographique fournie au 1/25000 (IGN).

Tableau 11 : Cotes de ligne établies mensuellement lors du calage en régime transitoire

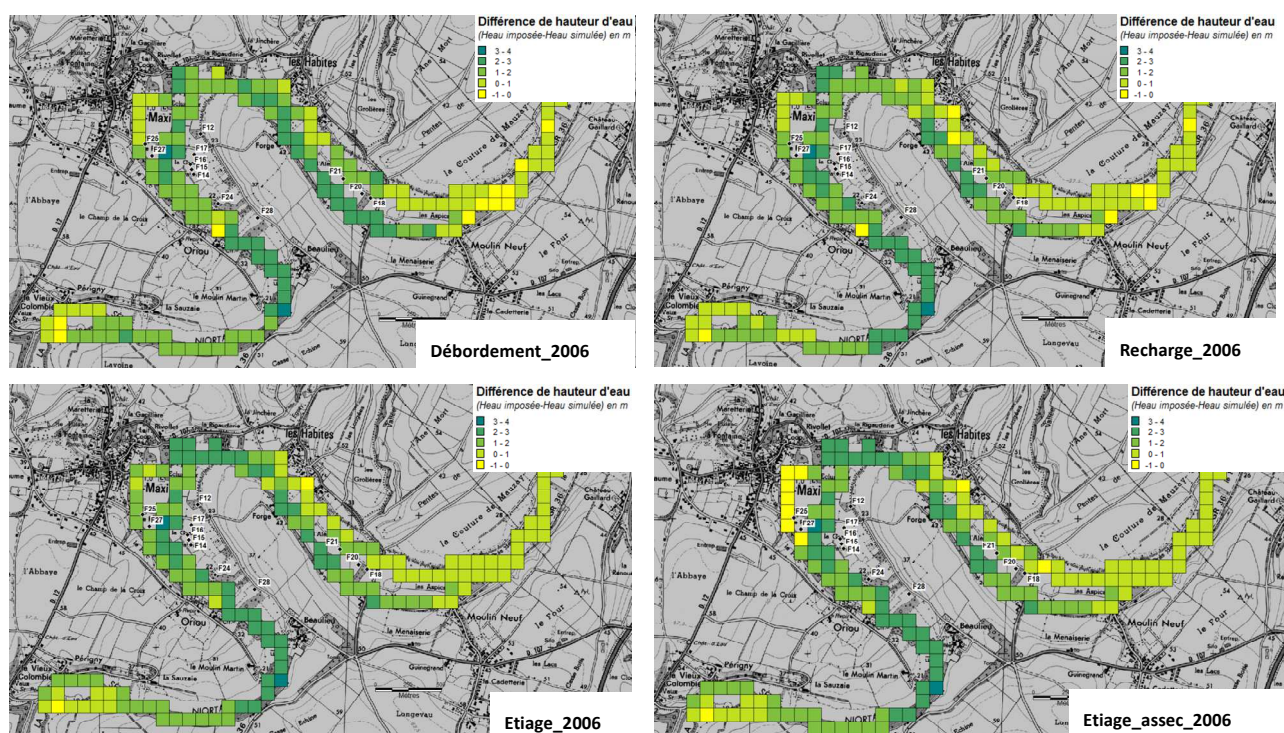


Figure 30 : Ecart de hauteur d'eau du fleuve entre l'année 3 et l'année 2 du projet NAPROM

4.1.1.2.6. Appréciation du calage

Le calage du modèle sur les chroniques piézométriques des forages du champ captant est réalisé manuellement, c'est-à-dire sans l'aide d'une inversion numérique. L'appréciation du calage est tout d'abord visuelle puis cherche à minimiser l'écart entre (i) la moyenne des valeurs simulées (moyenne calculée sur l'ensemble de la chronique) et la moyenne des valeurs observées (moyenne calculée sur l'ensemble de la chronique) par ouvrage souterrain.

• Restitution des chroniques piézométriques

La distribution des écarts entre les cotes piézométriques observée et simulée indique que 75 % des valeurs sont situées entre -1 et +1 m sans qu'une tendance générale (sur-estimation ou sous-estimation) du calage ne soit perceptible (Figure 31a). Ce résultat médiocre est principalement le fait des résultats obtenus sur les ouvrages F18 et F28 (Tableau 12, Tableau 14). Lorsque ces ouvrages sont soustraits au bilan, 66 % des écarts sont inférieurs, en valeur absolue à 50 cm et 41 % sont inférieurs, en valeur absolue, à 25 cm (Figure 31b). De fait, à l'exception des ouvrages F18 et F28, le calage des chroniques piézométriques est acceptable au regard i) des incertitudes sur les valeurs observées (nivellement, état hydrodynamique du champ

captant) , ii) de la différence de nature des données (ponctuelle observée/ simulée mensuelle) et iii) de l'incertitude inhérente aux cotes de ligne d'eau imposées (absence de nivellement des berges et des obstacles à l'écoulement, manque de flexibilité des cotes en lien avec les caractéristique climatique annuelle). Les difficultés de calage rencontrées sur les chroniques des ouvrages F18 et F28 sont probablement le fait d'hétérogénéités locales des propriétés hydrodynamiques des alluvions et des calcaires (F18, Tableau 12) ou d'une incertitude concernant la cote de la ligne d'eau imposée (F28, Tableau 14).

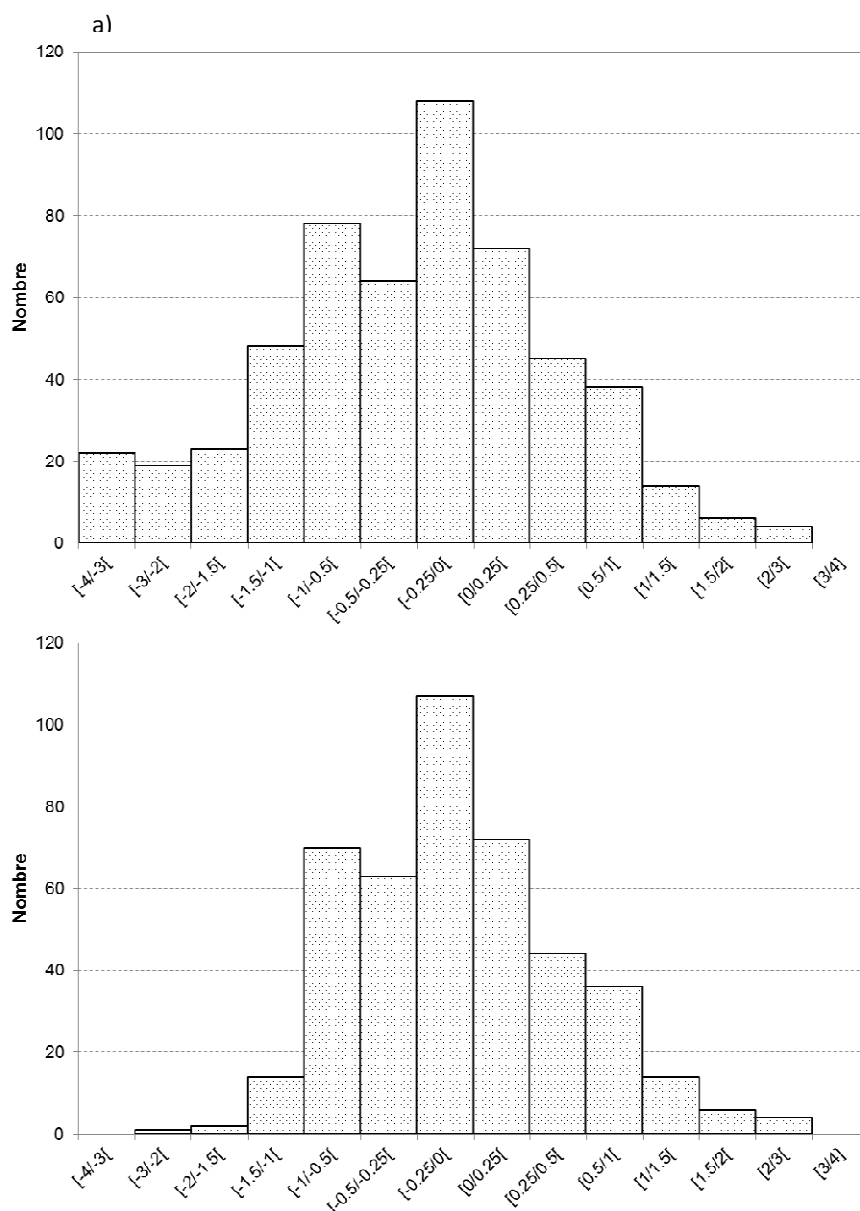


Figure 31 : Distribution des écarts entre cote piézométrique observée et cote piézométrique simulée entre juin 2005 et décembre 2007 : a) tous ouvrages confondus, b) en excluant F18 et F28. Les écarts sont exprimés en mètre et sont calculés entre la valeur ponctuelle mesurée un mois donné et la valeur mensuelle simulée.

Pour renforcer cette analyse globale, le détail du calage de chaque ouvrage est reporté du Tableau 12 au Tableau 15 assorti de commentaires.

On retiendra que le calage est globalement correct avec une bonne restitution générale des amplitudes de variations des cotes piézométriques et de leur valeurs mais que :

- lors de l'étiage sévère de 2005, les niveaux en nappe tendent à être surestimés pour les ouvrages de la Grande Prairie (à l'exception de F15) et de Beaulieu. Ce résultat peut être le fait d'apports trop importants de la Sèvre-Niortaise à la nappe en lien avec une surestimation des cotes de ligne d'eau du fleuve. Cette dernière surestimation serait la conséquence d'incertitudes sur les cotes de la ligne d'eau du fleuve lors d'une période où les lâchers de la Touche Poupard ont été partiellement interrompus. Notons cependant que cette comparaison souffre des lacunes de données observées entre septembre et décembre 2005.

- les ouvrages du secteur de Beaulieu témoignent d'une surestimation des niveaux piézométriques. Cette surestimation est inhérente aux cotes de ligne d'eau du fleuve imposées à proximité. Celles-ci sont à priori surestimées et maintiennent, de fait, un niveau de nappe élevée dans la plaine de Beaulieu.

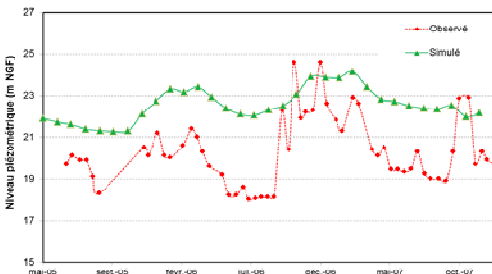
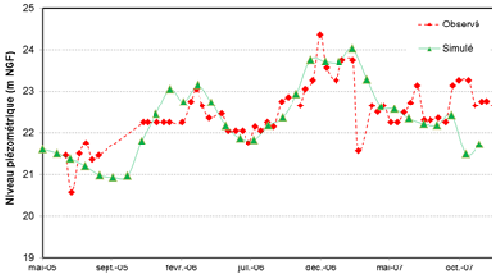
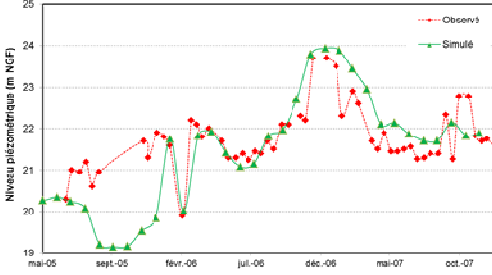
Secteur / Piézomètre.	Représentation graphique du calage	Moyenne des niveaux simulés entre juin 2005 et décembre 2007	Moyenne des niveaux mesurés entre juin 2005 et décembre 2007	Commentaires
Aleigne / F18		22,59	20,23	Mauvaise restitution des niveaux d'eau dans un secteur peu productif. Probable hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques des alluvions et/ou des calcaires sur ce secteur.
Aleigne / F20		22,35	22,47	Bonne restitution globale. Sous-estimation des basses eaux 2007 avec des écarts de l'ordre du mètre cinquante.
Aleigne / F21		21,54	21,74	Forte sous-estimation des niveaux lors de l'automne-hiver 2005. Légère surestimation des niveaux de janvier à septembre 2007 avec des écarts compris entre 30 et 80 cm.

Tableau 12 : Chroniques piézométriques observées/simulées : secteur de l'Aleigne

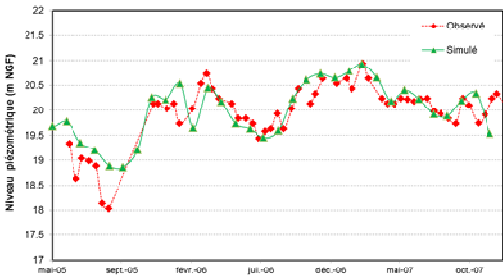
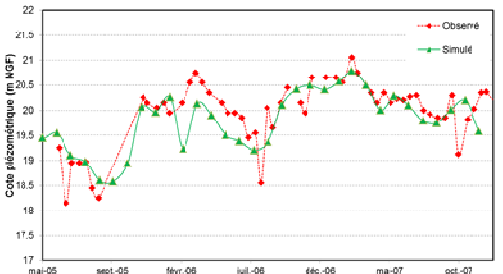
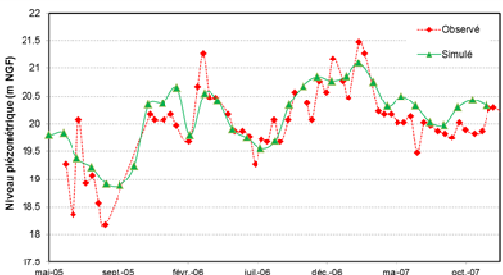
Secteur / Piézomètre	Représentation graphique du calage	Moyenne des niveaux simulés entre juin 2005 et décembre 2007	Moyenne des niveaux mesurés entre juin 2005 et décembre 2007	Commentaires
Grande Prairie / F14		20,01	19,98	Bonne restitution globale. Surestimation du niveau piézométrique lors des basses-eaux 2005 qui correspondent à un étiage particulièrement sévère.
Grande Prairie / F15		19,81	19,99	Bonne restitution globale. Sous estimations des niveaux piézométriques de février à juin 2006 avec des écarts de l'ordre de 40 cm.
Grande Prairie / F17		20,13	20,01	Bonne restitution globale. Surestimation du niveau piézométrique lors des basses-eaux 2005 qui correspondent à un étiage particulièrement sévère.

Tableau 13 : Chroniques piézométriques observées/simulées : Secteur de la Grande Prairie

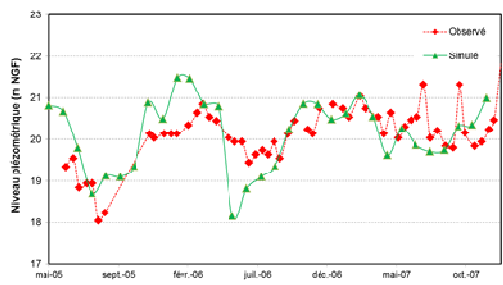
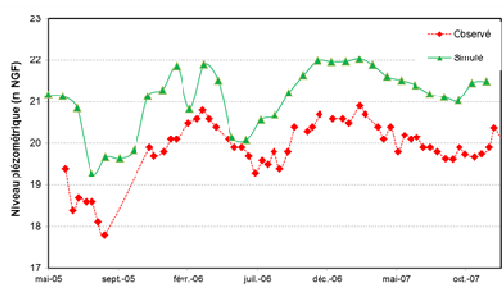
Secteur / Piézomètres	Représentation graphique du calage	Moyenne des niveaux simulés entre juin 2005 et décembre 2007	Moyenne des niveaux mesurés entre juin 2005 et décembre 2007	Commentaires
Grande Prairie / F24		20,37	20,08	Amplitude de variation des niveaux d'eau trop importante. Sous-estimation des niveaux aux basses eaux 2006 et surestimation des niveaux aux basses-eaux 2005 et hautes-eaux 2005/2006.
Beaulieu / F28		21,19	19,88	Surestimation globale des niveaux piézométriques simulés. L'écart absolu moyen est de 1,4 m. Le niveau piézométrique est dépendant de la cote de la ligne d'eau du fleuve. Cette cote étant fixée arbitrairement, elle est probablement erronée et responsable de l'erreur de calage, erreur non observée lorsque le niveau d'eau dans la rivière n'est pas imposé.

Tableau 14 : Chroniques piézométriques observées/simulées : Secteur de la Grande Prairie et de Beaulieu

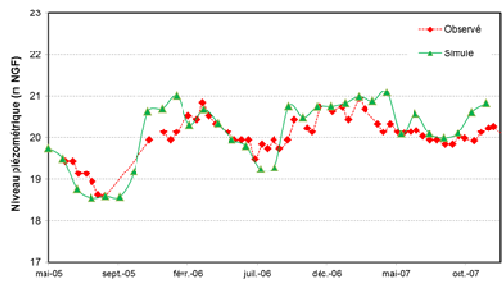
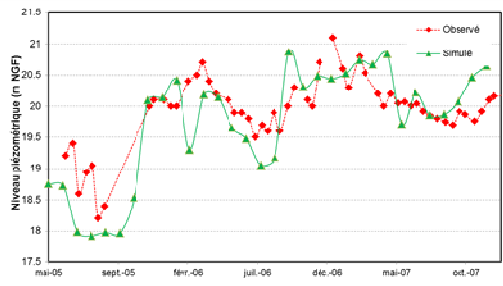
Secteur / Piézomètre	Représentation graphique du calage	Moyenne des niveaux simulés entre juin 2005 et décembre 2007	Moyenne des niveaux mesurés entre juin 2005 et décembre 2007	Commentaires
Le Pont / F25		20,17	20,03	Bonne restitution globale. Sous-estimation des niveaux lors de l'étiage 2006 et surestimation lors de l'étiage 2007.
Le Pont / F27		19,83	19,92	

Tableau 15 : Chroniques piézométriques observées/simulées : Secteur du Pont

4.1.1.2.7. Résultats du calage

Si le calage présenté ne constitue pas une restitution optimum, les hauteurs d'eau imposées sont globalement le reflet d'une réalité mesurée, a contrario des hauteurs d'eau en rivière simulée lors de l'année 2. Les hauteurs d'eau en rivière régulant les échanges entre la nappe et le fleuve, les résultats se doivent, dans un premier temps, d'être présentés à des fins méthodologiques. Dans un second temps, il s'agit de comparer les débits d'échanges obtenus dans cette configuration à ceux résultant d'une paramétrisation sans cotes de ligne d'eau imposées (année 2).

- Restitution des paramètres de calibration**

Perméabilité (m/s)	
Alluvions	$2,5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$
Dogger	$1,7 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$
Toarcien	$1 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-2}$
Infra-toarcien	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$
Socle	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$
Emmagasinement libre (%) / spécifique captif (m ⁻¹)	
Alluvions	0,1 - 4 / -
Dogger	0,1 - 10 / $1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$
Toarcien	0,1 / $1 \cdot 10^{-7}$
Infra-Toarcien	5 / $1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-7}$
Socle	5 / $5 \cdot 10^{-7}$
Epaisseur des dépôts de fond de lit de rivière (m)	0,2-1
Perméabilité des dépôts de fond de lit de rivière (m/s)	$5 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-5}$

Tableau 16 : Gammes de valeur attribuées aux paramètres de calage sur le gigogne

Le Tableau 16 reporte les gammes de valeurs employées sur le méandre pour obtenir le calage présenté.

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).

- Echanges nappe/rivière : sens et intensité**

A titre de comparaison, trois années de climatologie contrastée sont retenues : l'année 2001 qui se caractérise par un hiver et un printemps très humide, l'année 2005 qui se caractérise par une sécheresse exceptionnelle et l'année 2006 représentative d'une année moyenne. Pour chaque année, les débits d'échange nappe rivière simulés sont regardés pour les mois de février, représentatifs des hautes eaux, et les mois d'août, représentatifs des basses eaux.

Quelle que soit l'année considérée, le méandre se caractérise par l'existence de deux modalités d'échanges : le drainage de la nappe par le fleuve vs. le soutien de la nappe par le fleuve.

Le Tableau 17 indique que la répartition des modalités d'échange varie peu en fonction de l'état hydrodynamique du système (étiage/recharge) et des caractéristiques climatiques annuelles. En dehors des hautes eaux exceptionnelles de 2001, les apports du fleuve à la nappe modélisés sont prédominants et affectent, le plus souvent, entre 60 % et 70 % du linéaire de Château Salbart à Périgny. Le linéaire affecté par des échanges du fleuve vers la nappe augmente sensiblement entre les hautes et les basses-eaux. Ce

processus résulte des hauteurs d'eau en rivière maintenus artificiellement en période de vidange ou d'étiage de la nappe par l'action conjointe des lâchers de la Touche Poupard et de la présence de seuils. En 2001, lorsque la recharge de la nappe atteint son maximum, la part du linéaire affecté par des échanges du fleuve vers la nappe tend à diminuer au profit du drainage de la nappe par le fleuve.

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

Tableau 17 : 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

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 (Figure 32 et Figure 33). 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.

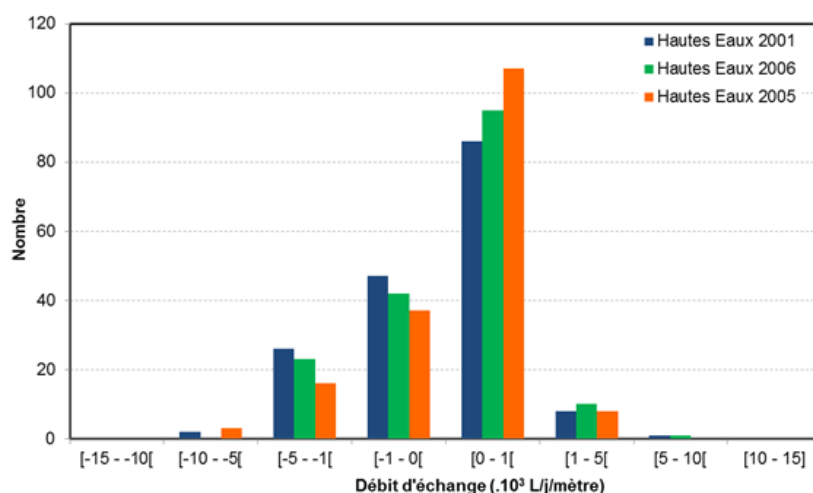


Figure 32 : Répartition des débits simulés dans le méandre et rapportés au mètre linéaire de fleuve – Hautes-Eaux. En négatif, les débits d'échange de la nappe vers le fleuve et en positif les débits d'échange du fleuve vers la nappe.

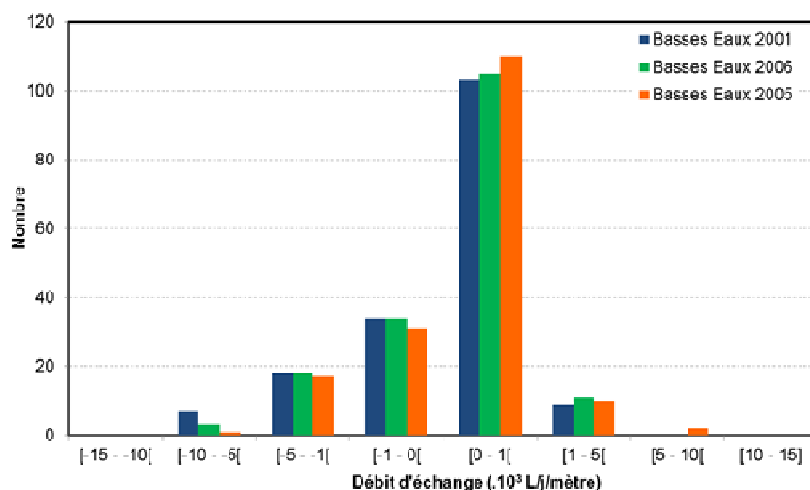


Figure 33 : Répartition des débits simulés dans le méandre et rapportés au mètre linéaire de fleuve – Basses-Eaux. En négatif, les débits d'échange de la nappe vers le fleuve et en positif les débits d'échange du fleuve vers la nappe.

Les figures suivantes (Figure 34, Figure 35, Figure 36) informent sur la répartition géographique des débits d'échanges dans la boucle du méandre.

Quelle que soit l'année considérée et le régime hydrodynamique de la nappe ou hydraulique du fleuve (hautes-eaux /basses-eaux), le bras intérieur de la Sèvre-Niortaise entre Moulin Neuf et Oriou présente toujours une configuration de soutien de la rivière à la nappe. A contrario, le drainage annuel de la nappe par le fleuve est observée entre Château Salbart et le Pré de la Maillée.

Les secteurs sur lesquels le sens des échanges simulés varie en fonction des caractéristiques climatiques de l'année, de l'état de recharge de la nappe et de la Sèvre-Niortaise se situent :

- a) entre le Pré de la Maillée et Moulin Neuf, à l'est du méandre,
- b) sur le bras extérieur de la Sèvre-Niortaise à hauteur de l'Aleigne,
- c) à hauteur du bourg de Saint-Maxire,
- d) sur le bras extérieur de la Sèvre-Niortaise à hauteur de F25 et F27,
- e) entre Oriou et Beaulieu.

Sur ces secteurs, le drainage de la nappe par la rivière est simulé lorsque les niveaux de nappe sont au plus haut, c'est-à-dire en hautes-eaux i) quelle que soit l'année (Oriou-Beaulieu), ii) pour une année moyenne à humide (2001) (Pré de la Maillée-Moulin Neuf, Saint-Maxire), iii) uniquement en année humide (Aleigne). En basses-eaux, le sens des échanges s'inverse et les échanges se font alors du fleuve vers la nappe.

Plus rarement, le drainage de la nappe par la rivière s'observe en basses-eaux lorsque l'été est particulièrement humide (secteur Oriou-Beaulieu) ou en année moyenne (secteur du Pont, F25, F27). Concernant ce dernier secteur, le drainage de la nappe n'est pas observée lors des basses eaux 2001 alors la cote piézométrique est plus élevée qu'en 2006. Ce résultat provient de l'arbitrage sur les cotes de ligne d'eau imposées : en 2001, la cote de la Sèvre-Niortaise imposée en basses-eaux est plus élevée qu'en 2006, restant ainsi au-dessus de la cote piézométrique simulée. Rappelons qu'en l'absence de mesures, ce choix est arbitraire et peut être à l'origine de biais sur le sens et l'intensité des échanges d'eau entre nappe et rivière.

Rapportés au tronçon fluvial modélisé, les débits d'échange varie peu dans le temps et sont généralement compris dans la gamme -100 et + 100 m³/j (Figure 34 à Figure 37). Les secteurs de la Grande Prairie et du Pont font exception : le flux d'échange est plus important que sur le reste du méandre à hauteur des ouvrages F14, F15, F17, F24, F25 et F27 et l'amplitude des variations de flux est importante (Figure 37). Ce comportement corrobore le fonctionnement soumis par Douez, 2008 laissant supposer que la Sèvre-Niortaise participe à l'alimentation des forages et que cette participation varie temporellement en fonction de l'état de recharge de la nappe, du fleuve et du débit de production des ouvrages AEP. Cette dernière hypothèse pourrait être vérifiée au travers d'une simulation où les prélèvements en nappe sont supprimés.

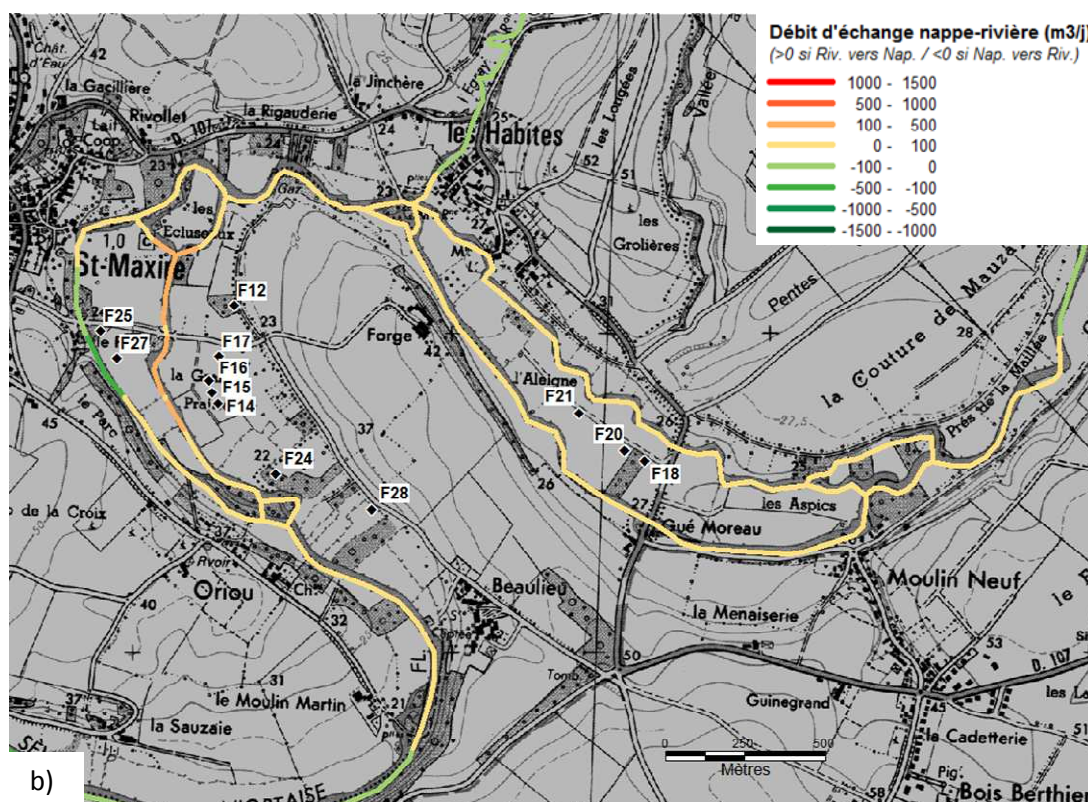
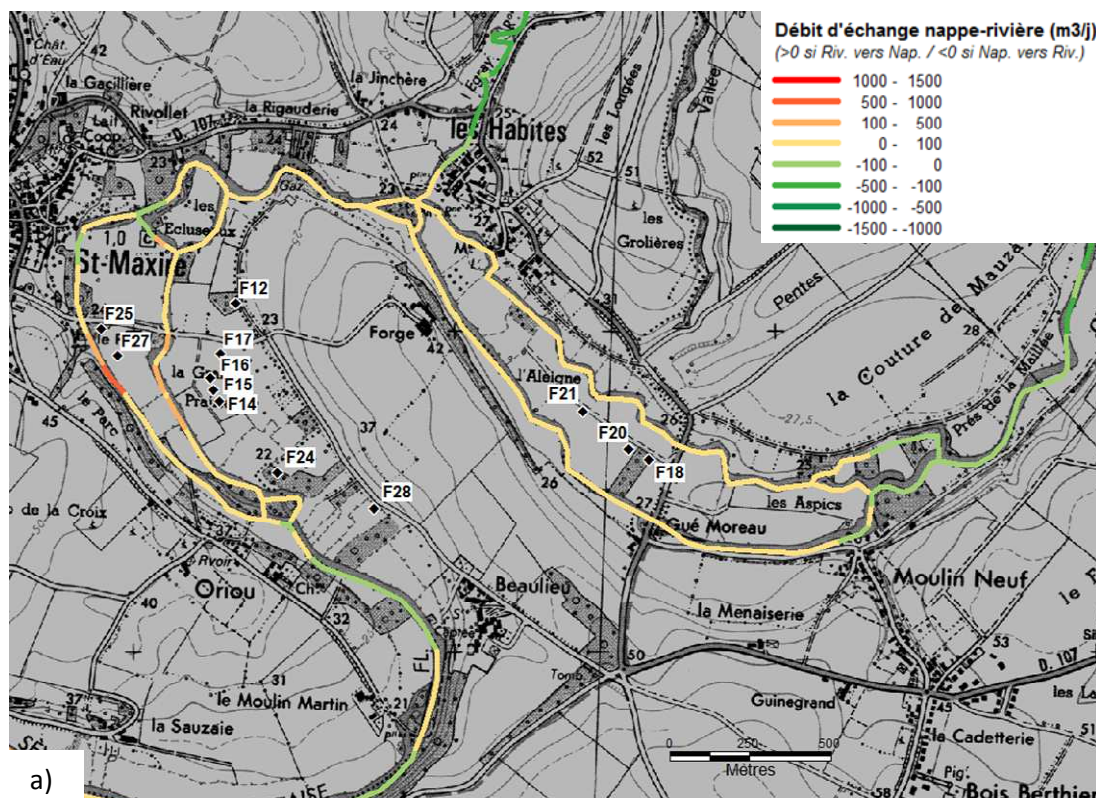


Figure 34 : Année 2006 - Débits d'échange simulés par tronçon en a) hautes-eaux et b) basses-eaux. Un tronçon intègre l'ensemble du débit simulé au sein d'une maille de 100 m de côté

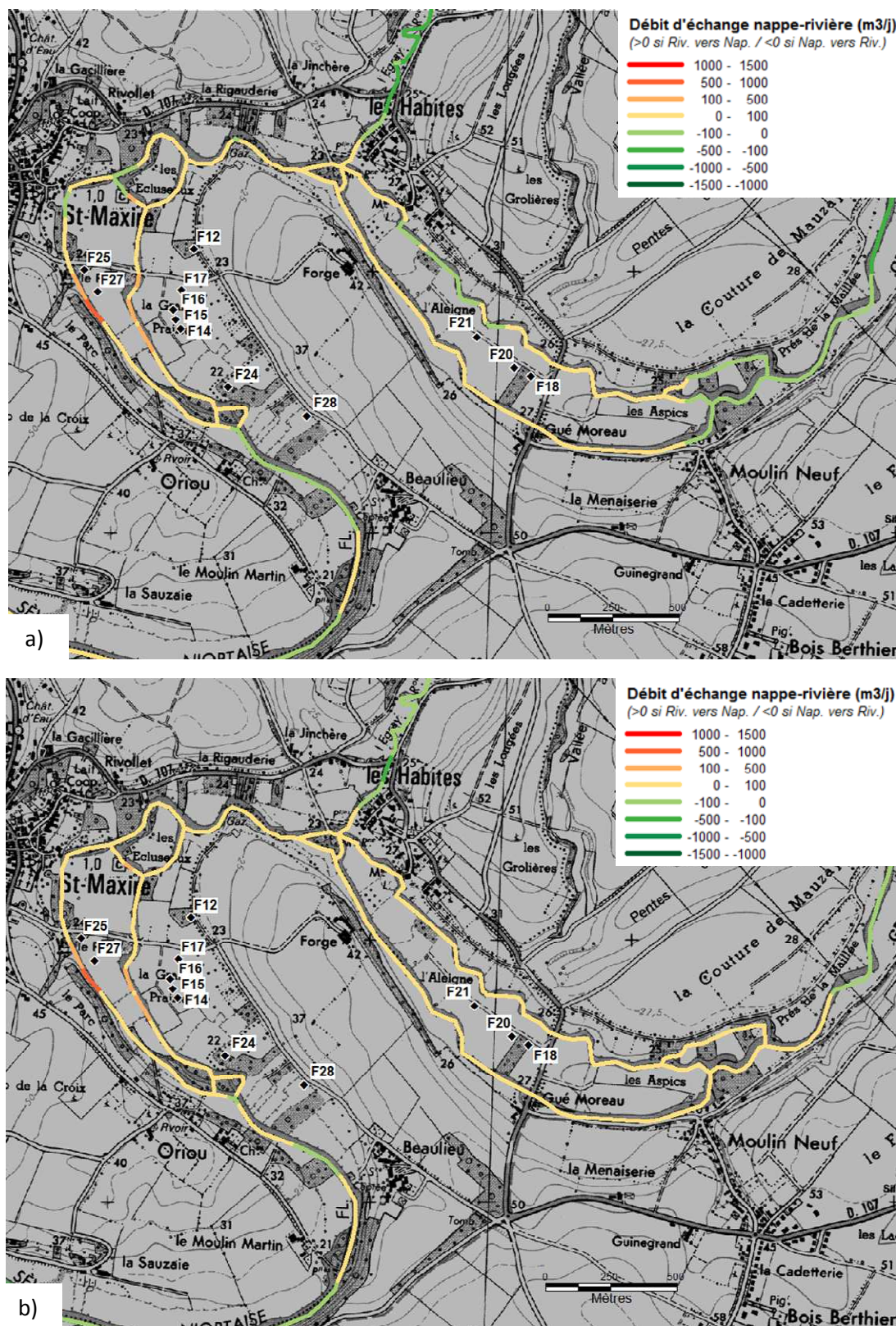


Figure 35 : Année 2001 - Débits d'échange simulés par tronçon en a) hautes-eaux et b) basses-eaux. Un tronçon intègre l'ensemble du débit simulé au sein d'une maille de 100 m de côté.

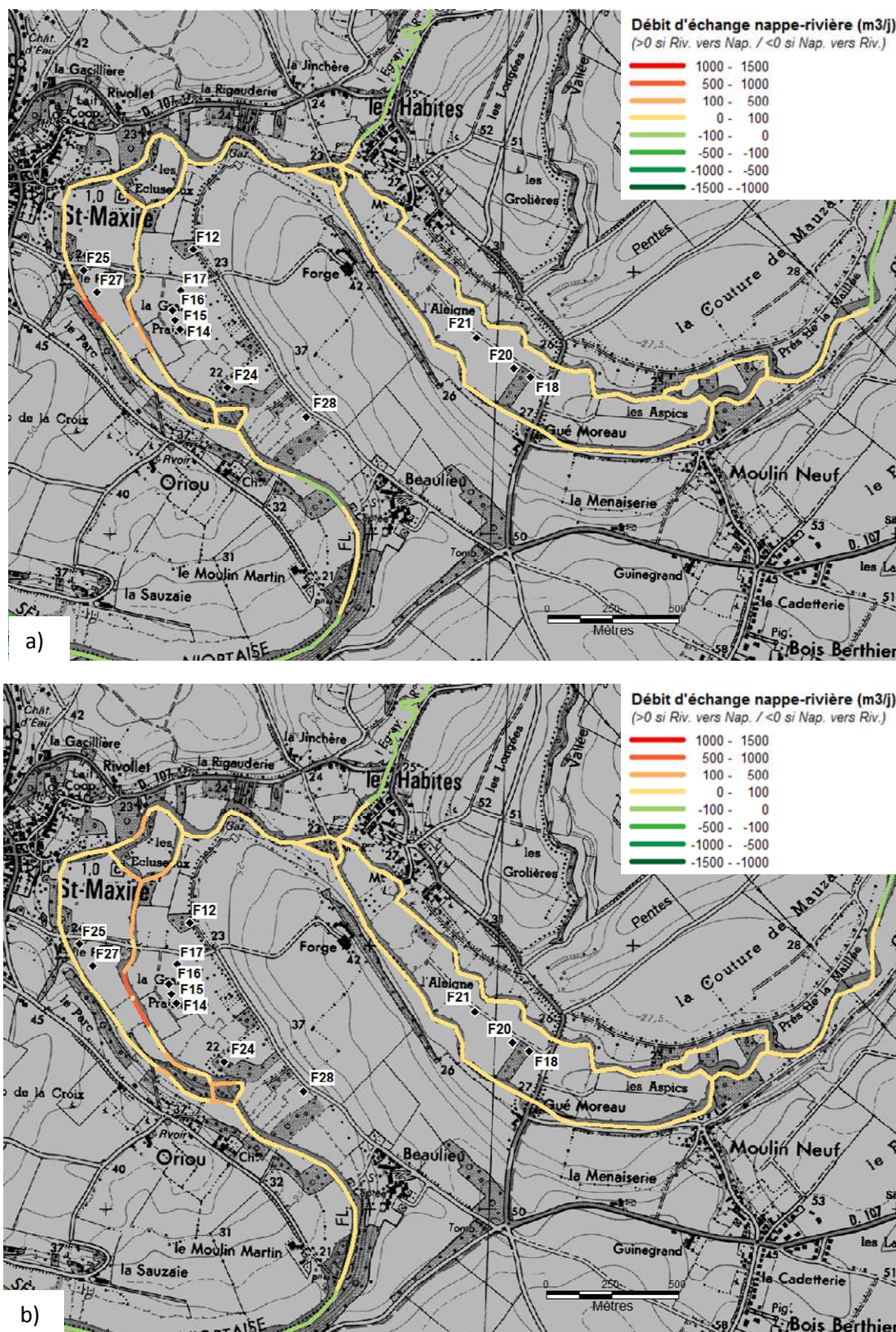


Figure 36 : Année 2005 - Débits d'échange simulés par tronçon en a) hautes-eaux et b) basses-eaux. Un tronçon intègre l'ensemble du débit simulé au sein d'une maille de 100 m de côté.

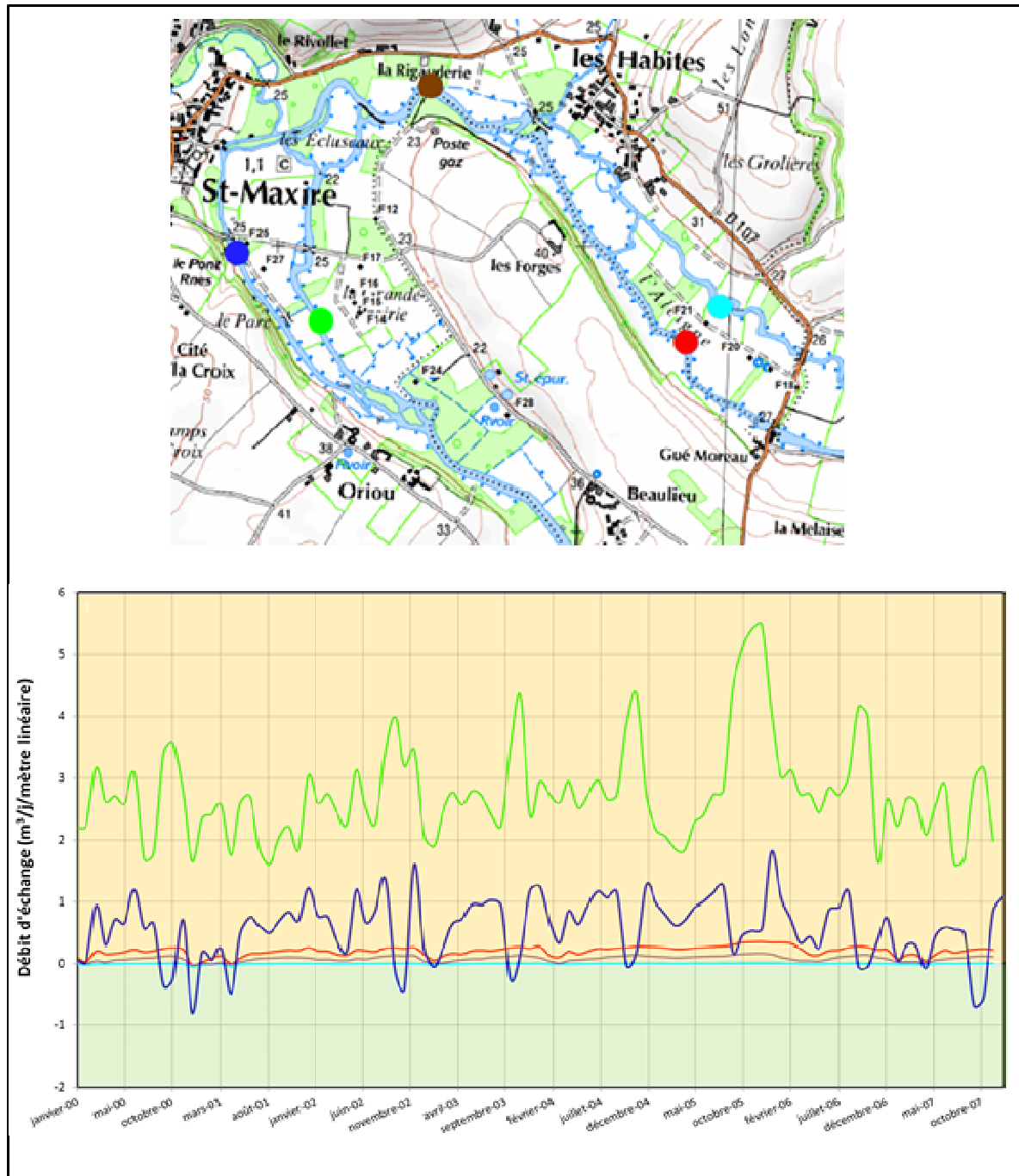


Figure 37 : Variabilité temporelle des flux d'échanges simulés en différents points de méandre de Saint-Maxire entre 2000 et 2007 (pour l'échelle de couleurs, se référer aux points sur la carte).

4.1.1.3. Comparaison des résultats de simulation en imposant un débit ou une hauteur d'eau dans la rivière

Pour rappel, la paramétrisation réalisée en année 2 fait appel à un jeu de données sans cotes de ligne de fleuve imposées. Dans ce cas, la hauteur d'eau dans la rivière est fonction du débit et calculée selon la relation de Manning-Strickler. La paramétrisation réalisée en année 3 fait appel à un jeu de données où la cote de fleuve est imposée selon 4 modalités (hautes-eaux, débordement, étiage, assec).

4.1.1.3.1. Comparaison des sens d'échange entre nappe et fleuve

En année 3, la paramétrisation du modèle qui impose une cote d'eau à la rivière engendre un linéaire majoritairement affecté par des échanges d'eau du fleuve vers la nappe et ce, quelles que soient les caractéristiques climatiques annuelles et l'état hydrodynamique du système nappe/fleuve. Ce comportement diffère de celui établi en année 2. Lors de ce précédent calage avec un débit imposé à la rivière, le pourcentage de linéaire affecté par l'une ou l'autre des modalités d'échange étaient fonction des caractéristiques climatiques de l'année et de l'état hydrodynamique de l'ensemble nappe/fleuve : 1) en hautes-eaux, plus de 70 % du linéaire témoignait d'un processus de drainage, cette proportion diminuant les années sèches, 2) en basses-eaux, le processus de drainage diminuait au profit du soutien de la nappe par le fleuve. Cette différence de comportement entre années 2 et 3 est clairement mise en évidence sur la Figure 38 qui reporte les tronçons où le sens des échanges s'inverse pour une année moyenne telle que 2006. Cette année est choisie à titre d'exemple, le comportement étant similaire entre 2000 et 2007.

En conséquence, dans le méandre, l'imposition d'une ligne d'eau en année 3, plus haute que celle simulée par le modèle en année 2, génère une inversion du flux sur la quasi-totalité du linéaire. Seul le bras extérieur de la Sèvre-Niortaise, à hauteur de l'Aleigne ne montre pas ou peu d'inversion de flux, celui-ci étant déjà, lors de la paramétrisation en année 2, orienté du fleuve vers la nappe.

4.1.1.3.2. Variation des flux d'échange

En s'appuyant sur l'année climatiquement moyenne de 2006, la Figure 39 synthétise le rapport entre les débits simulés en année 2 et ceux simulés en année 3. Les résultats des années 2001 et 2005 étant comparables à ceux de 2006, les cartographies des années 2001 et 2005 ne sont pas présentées.

Les cartographies hautes-eaux et basses eaux 2006 montrent que les débits simulés en année 3, c'est-à-dire lorsque la ligne d'eau est surélevée et imposée, sont globalement inférieurs à ceux simulés en année 2. La majeure partie du linéaire témoignant de cette différence est affectée par des rapports inférieurs à 0,2, soit des débits simulés en année 3 moins de 5 fois inférieurs à ceux de l'année 2. Au droit de l'Aleigne, du Bourg Saint-Maxire et d'Oriou-Beaulieu, l'influence de la paramétrisation de l'année 3 est plus prononcée avec des débits 15 à 30 fois inférieurs à ceux de l'année 2.

Dans le méandre, deux secteurs se singularisent par une augmentation de la valeur absolue des débits d'échange : Le Pont-La Grande Prairie et l'Aleigne. A proximité de ces secteurs, les débits d'échange simulés en année 3 sont 20 à 70 fois supérieurs à ceux simulés en année 2. Dans ces secteurs où la nappe est déprimée par les pompages, le gradient de charge tend à augmenter en réponse à une cote de ligne d'eau haute imposée en rivière.

Rappelons que si la surélévation de la ligne d'eau est susceptible de modifier les débits d'échange en diminuant ou en augmentant le gradient de charge nappe-rivière, l'intensité des échanges est aussi fonction des modifications d'épaisseur de colmatage et de perméabilité des dépôts de lit de rivière appliquées pour les besoins du calage. D'autre part, selon les secteurs et toujours pour les besoins du calage, les perméabilités des assises géologiques ont été ajustées modifiant la charge simulée en nappe sur le pourtour du méandre et donc incidemment le gradient de charge nappe-rivière.

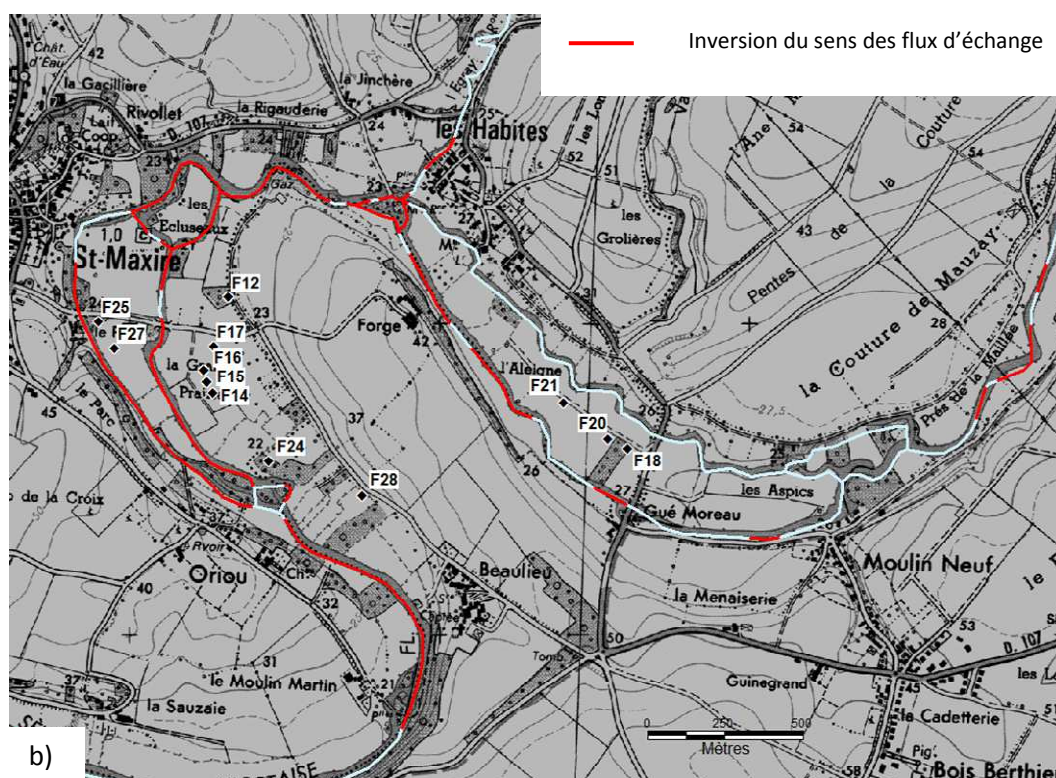
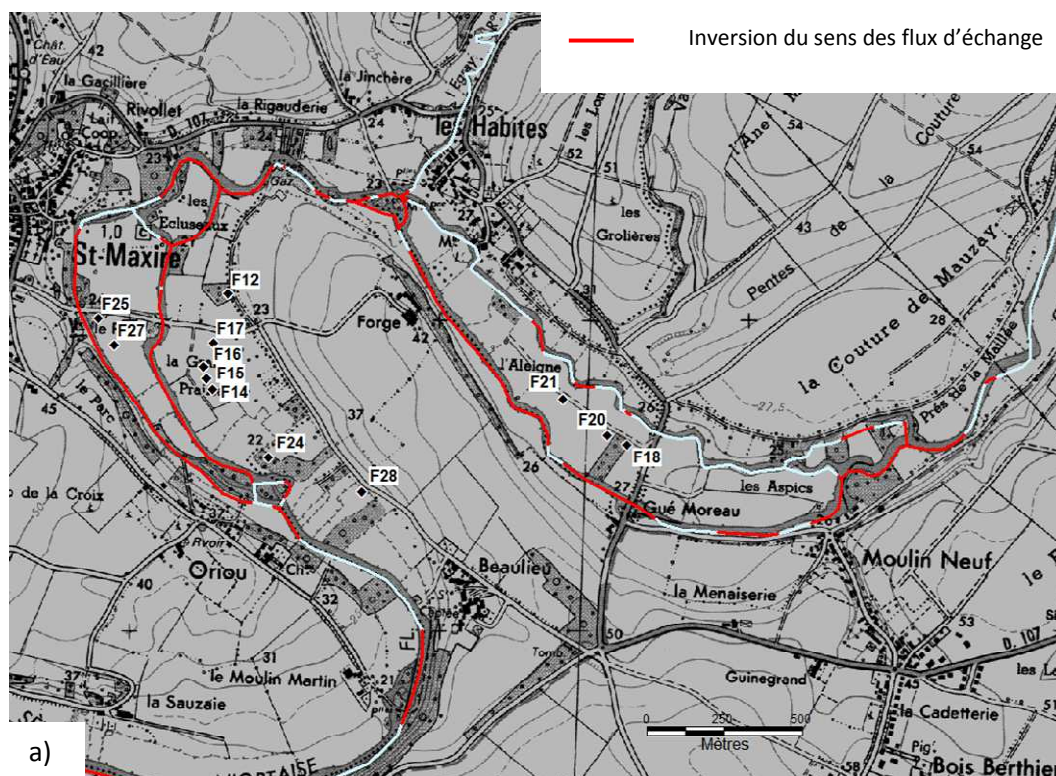


Figure 38 : Linéaire de la Sèvre-Niortaise affecté par une inversion du sens des échanges nappe/rivière entre la paramétrisation de l'année 3 et celle de l'année 2, a) en hautes-eaux 2006, b) en basses-eaux 2006.

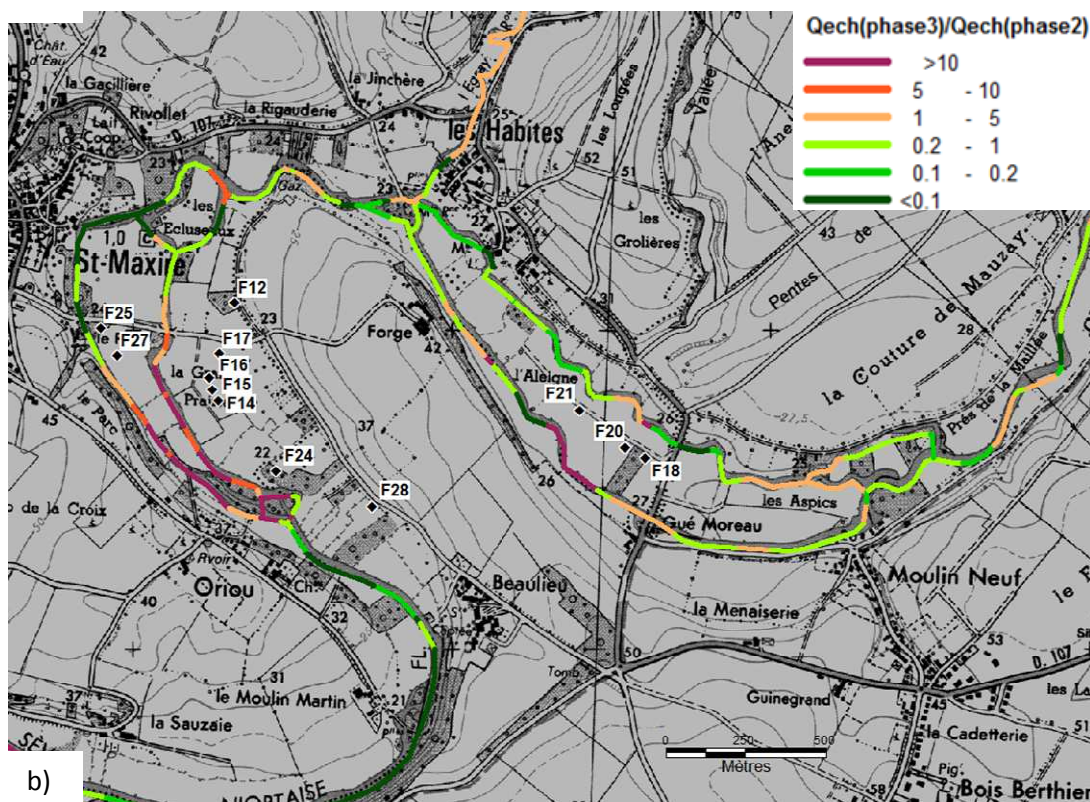
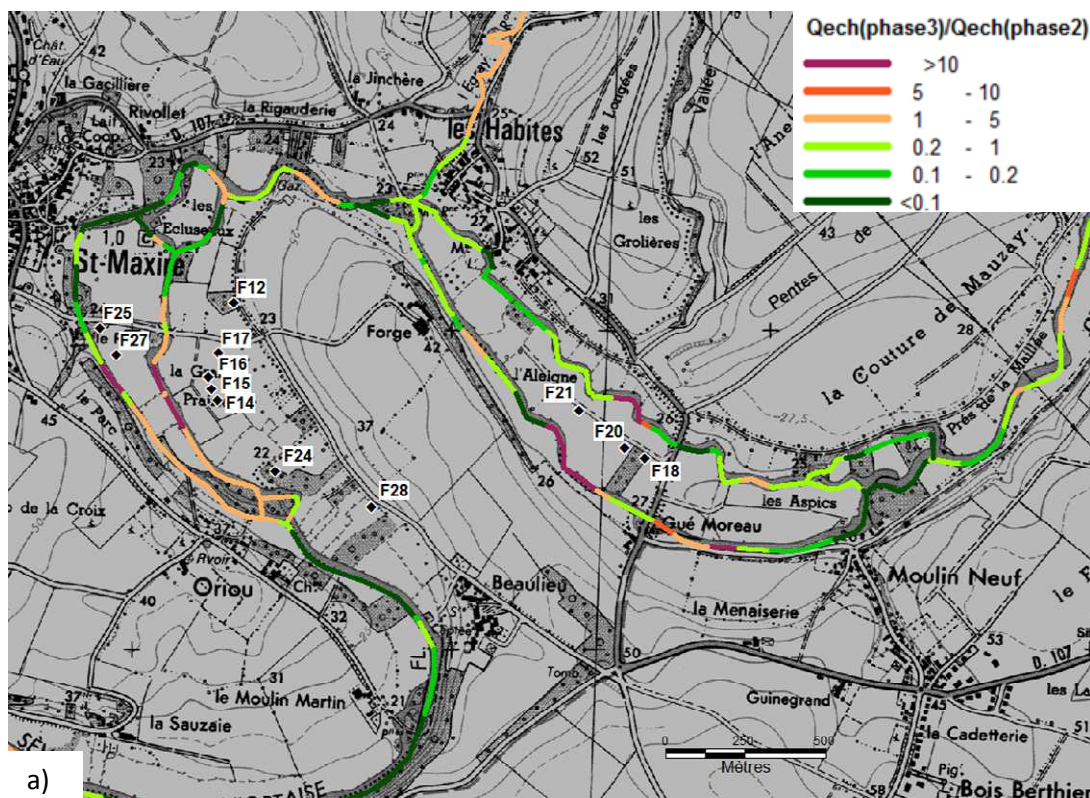


Figure 39 : Rapports des débits simulés entre l'année 3 et l'année 2. Année 2006, a) hautes-eaux, b) basses-eaux. Le rapport fait intervenir des valeurs absolues de débit.

4.1.1.4. Conclusion

Au terme de ce projet visant à la modélisation du fonctionnement couplé nappe/rivière dans le méandre de la Sèvre-Niortaise à Saint-Maxire (79) plusieurs paramétrisations du modèle ont été testées. La prise en compte d'une ligne d'eau en rivière artificiellement surélevée par les seuils qui jalonnent le cours de la Sèvre-Niortaise semble la plus pertinente.

Le calage en régime transitoire est entrepris de 2000 à 2007, période qui se caractérise par des années climatiquement contrastées. Ces contrastes climatiques permettent d'approcher la variabilité saisonnière des échanges nappe-rivière pour différents contextes de recharge et d'étiage. La relation de Manning Strickler initialement utilisée (en année 2) pour le calcul des cotes de ligne d'eau (Chatelier, 2012b) est évincée au profit de l'imposition des cotes de lignes d'eau selon 4 modalités annuelles : recharge, débordement du fleuve, étiage, étiage avec assec. En l'absence de mesures, la distribution de ces modalités lors d'une année est arbitrairement basée sur des observations visuelles et la connaissance du site.

La restitution des chroniques piézométriques est jugée satisfaisante. La simulation indique que les apports du fleuve à la nappe sont prédominants et affectent entre 60 et 70 % du linéaire fluviale. Ce résultat est globalement indépendant des caractéristiques climatiques annuelles et de l'état hydrodynamique de la nappe. Certains secteurs montrent cependant une inversion du sens des échanges entre les hautes et les basses-eaux. Ainsi, entre le Pré de la Maillée et Moulin neuf, au droit de l'Aleigne, à hauteur du bourg de Saint-Maxire et entre Oriou et Beaulieu, le fleuve draine la nappe en hautes-eaux tandis que la nappe est alimentée par le fleuve en basses-eaux. Les débits d'échange simulés sont majoritairement inférieurs à $1 \text{ m}^3/\text{j}/\text{mètre}$ linéaire variant peu temporellement. Les secteurs fluviaux de la Grande Prairie et du Pont font exception, caractérisés par des flux d'échange dont l'amplitude de variation est importante et dont la valeur atteint $5 \text{ m}^3/\text{j}/\text{mètre}$ linéaire. Ce résultat est attribué à l'influence des pompes sur le débit soutiré au fleuve.

Le calcul du flux d'échange étant dépendant de la différence de hauteur d'eau entre la nappe et le fleuve, le sens et l'intensité des échanges simulés sont intimement liés à la paramétrisation du modèle. En l'absence de mesures de hauteurs d'eau in situ, rappelons que ces résultats sont provisoires et présentés à des fins méthodologiques. Cette limite explique pourquoi un bilan des pertes et gains sur le méandre n'est pas présenté; les enjeux quantitatifs sur ce secteur sont trop importants pour s'avancer sur des chiffres erronés.

Afin d'améliorer l'évaluation des échanges nappe-fleuve sur le méandre, les préconisations s'orienteraient vers l'acquisition de données complémentaires au travers d'un suivi pluriannuel des hauteurs d'eau du fleuve et la réalisation de piézomètres éloignés des ouvrages de production.

A des fins méthodologiques, l'évaluation de la sensibilité du modèle aux paramètres impliqués dans le calcul des débits d'échanges (cote de la ligne d'eau, épaisseur des dépôts de fond de lit de rivière, la perméabilité des dépôts de fond de lit de rivière) mériterait d'être envisagée.

4.1.2. *Macrophytes et physico-chimie*

4.1.2.1. Campagne de terrain

Le recensement des peuplements de végétaux aquatiques le long de la Sèvre-Niortaise s'est effectué sur un linéaire d'une dizaine de kilomètres en juillet et août 2012. L'échantillonnage comprend 82 points de relevés répartis le long du fleuve, à partir du lieu-dit de Château Salbart jusqu'au moulin de Périgny (Figure 40). L'échantillonnage est hétérogène : plus dense aux endroits avec une forte variabilité d'espèces végétales, plus lâche sur les secteurs peu ou pas accessibles. Les relevés ont été effectués en condition d'écoulement influencé par les pompes du champ captant.

Sur chacune des stations, les espèces végétales ont été prélevées et identifiées sur un transect d'une longueur de 2 mètres selon un axe perpendiculaire à l'écoulement. Leur abondance a été déterminée en

utilisant le double indice d'abondance de Braun-Blanquet (1932), indice renseignant sur l'abondance relative de chacune des espèces et sur leur mode de répartition (Tableau 18).

Cet indice a ensuite servi de base pour la détermination des indices de trophie et de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux souterraines. Le tableau des exigences des espèces végétales utilisé à ces fins est reporté dans le Tableau 19. Dans ce tableau sont surlignées les espèces les plus couramment rencontrées sur le site de Saint-Maxire-Echiré.

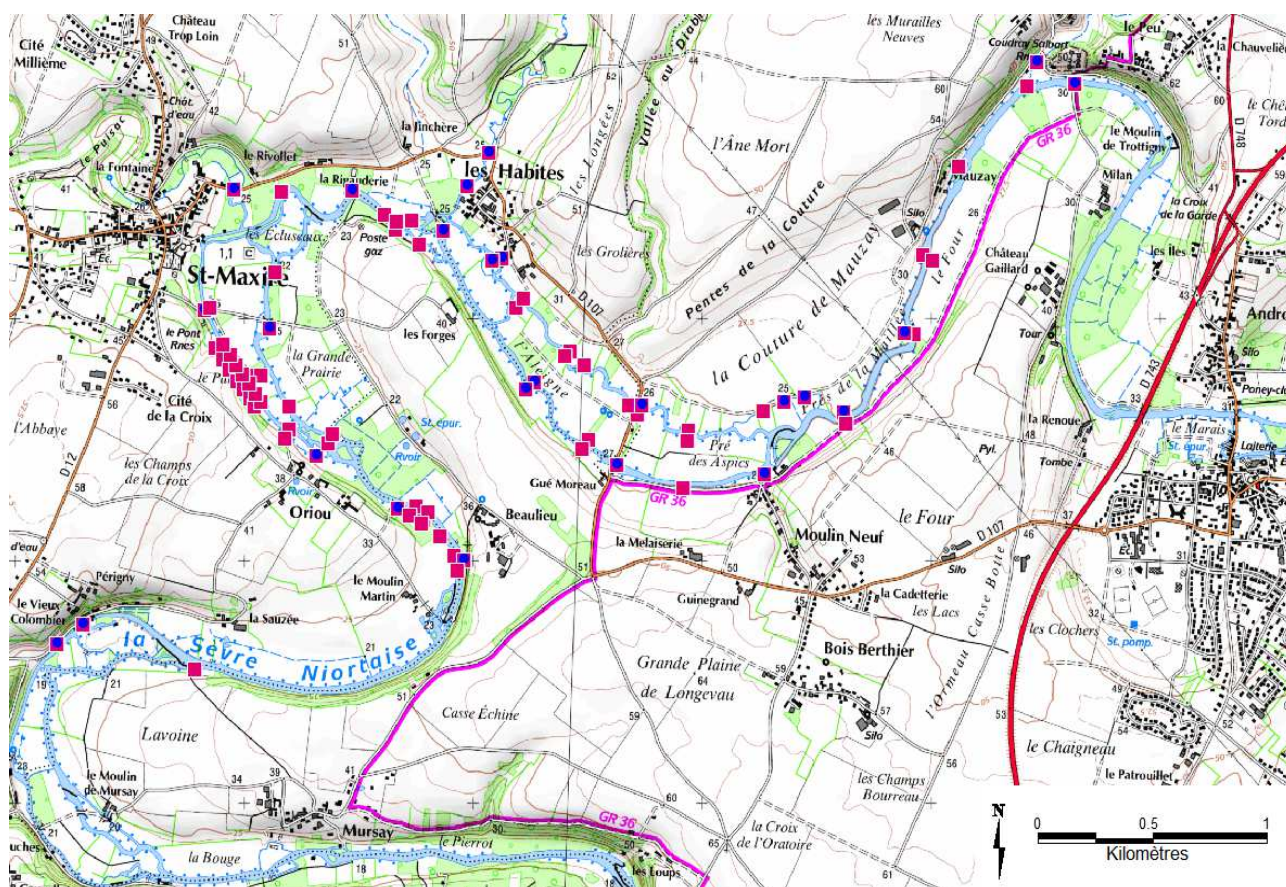


Figure 40 : Localisation des stations de relevé macrophytes (carrés rouges) et de mesures de la chimie de l'eau (disques bleus)

Abondance relative	Mode de répartition
1 : recouvrement < 5% du transect	1 : individus isolés
2 : entre 5 et 25%	2 : petites touffes très espacées
3 : entre 25 et 50%	3 : touffes moyennes, espacées
4 : entre 50 et 75%	4 : grandes plaques discontinues
5 : > 75%	5 : peuplement continu

Tableau 18 : Indice de Braun-Blanquet (1932)

4.1.2.2. Indicateurs biologiques : les macrophytes

Au long du méandre de Saint-Maxire-Echiré, les stations où la présence de macrophytes indicateurs d'apports souterrains est avérée alternent avec les stations où ces espèces disparaissent. Les principales espèces indicatrices d'apports souterrains recensés sont : *Veronica anagallis*, *Berula erecta*, *Mentha aquatica*, *Myosotis scorpioides*, *Sparganium emersum*, *Nasturtium officinale* ou encore *Callitriche Platycarpa* (Figure 41, Tableau 19). A contrario, les principales espèces caractéristiques de secteurs où les apports de la nappe à la rivière sont nuls, où le courant est faible et le lit de rivière bien souvent colmaté, sont *Lemna minor*, *Nuphar lutea* ou encore *Ceratophyllum demersum* (Figure 41, Tableau 19).

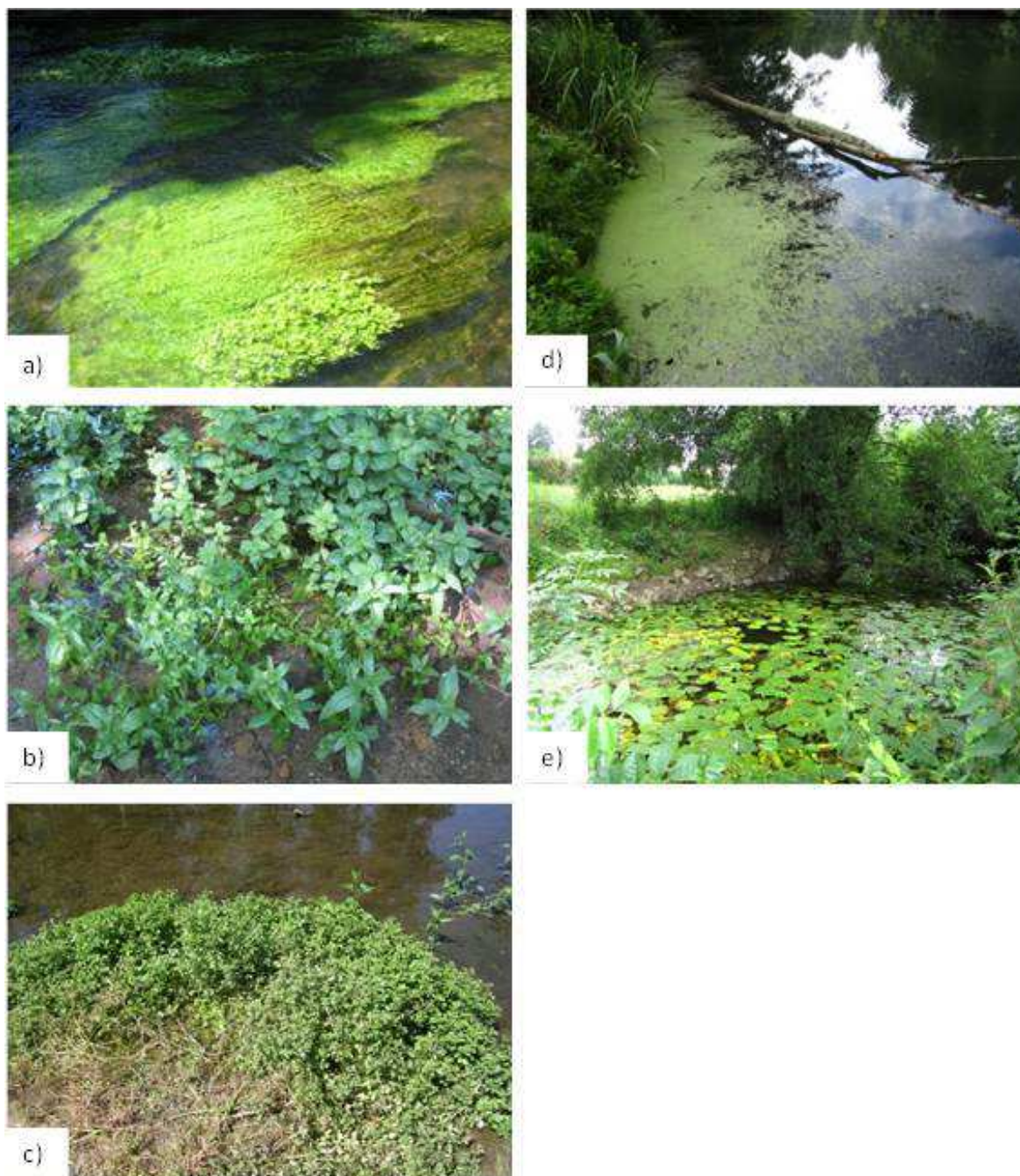


Figure 41 : Peuplements de macrophytes recensés dans le méandre de Saint-Maxire/Echiré : de a) *Callitriche platycarpa* (premier plan) et *Berula erecta* (arrière-plan), b) *Mentha aquatica*, c) *Nasturtium officinale*, d) *Lemna minor* (amont du méandre), e) *Nuphar lutea*.

Espèces	Niveau de trophie				Alimentation en eaux souterraines	
	oligotrophe	mésotrophe	eutrophe	hyper-eutrophe	O	N
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	0.5	3	2	0	0	0
<i>Azolla filiculoides</i>	0	0	2	2	1	0
<i>Baldellia ranunculoides</i>	2	0	0	0	1	0
<i>Berula erecta</i>	3	3	0.5	0.5	2	0
<i>Bidens tripartita</i>	0	0	2	2	0	0
<i>Callitriche platycarpa</i>	0.5	2	2	2	1	0
<i>Carex acutiformis</i>	1	2	3	1	0	0
<i>Carex elata</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Carex pseudocyperus</i>	0	2	3	3	0	0
<i>Carex sp.</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0.5	0.5	2	3	0	1
<i>Chara globularis</i>	0	0	2	0	1	0
<i>Chara hispida</i>	2	0	0	0	1	0
<i>Chara major</i>	0.5	3	0.5	0	2	0
<i>Chara vulgaris</i>	1	3	2	0	1	0
<i>Chara sp</i>	1	1	1	0	2	0
<i>Cladium mariscus</i>	3	2	0	0	1	0
<i>Eleocharis acicularis</i>	2	3	0.5	0.5	1	0
<i>Elodea canadensis</i>	0.5	2	2	2	1	0
<i>Elodea nuttallii</i>	0	2	2	2	0	0
<i>Equisetum fluviatile</i>	2	2	0	0	0	0
<i>Fontinalis antipyretica</i>	0.5	2	2	0	1	0
<i>Galium palustre</i>	2	3	1	1	2	0
<i>Glyceria fluitans</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Groelandia densa</i>	2	3	0	0	2	0
<i>Hippuris vulgaris</i>	3	2	0.5	0	2	0
<i>Hottonia palustris</i>	0	0	0	0	1	0
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	0	0	2	2	1	0
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	2	0	0	0	1	0
<i>Iris pseudacorus</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Juncus articulatus</i>	3	3	2	0	2	0
<i>Juncus subnodulosus</i>	2	0	0	0	1	0
<i>Lemna gibba</i>	0	0	3	3	0	0
<i>Lemna minor</i>	0.5	0.5	2	3	0	1
<i>Lemna trisulca</i>	0	2	2	2	1	0
<i>Ludwigia palustris</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Luronium natans</i>	2	2	0	0	1	0
<i>Lycopus europaeus</i>	1	1	1	0	0	0
<i>Lysimachia nummularia</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Lysimachia vulgaris</i>	0	0	0	0	2	0
<i>Lythrum salicaria</i>	2	3	2	0.5	0	0
<i>Mentha aquatica</i>	3	3	2	0.5	2	0
<i>Menyanthes trifoliata</i>	2	2	0	0	0	0
<i>Myosotis scorpioides</i>	3	3	2	0.5	2	0
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0.5	2	3	3	0	0
<i>Myriophyllum verticillatum</i>	0	0	0	0	1	0
<i>Najas marina</i>	0	0.5	2	2	0	1

<i>Najas minor</i>	0	0.5	2	2	0	0
<i>Nasturtium officinale</i>	1	1	1	0	1	0
<i>Nuphar lutea</i>	0.5	2	2	3	0	0
<i>Nymphaea alba</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Nymphoides peltata</i>	0	0	2	2	0	0
<i>Oenanthe fistulosa</i>	2	0	0	0	0	0
<i>Oenanthe fluviatilis</i>	0	2	2	0	0	0
<i>Peucedanum palustre</i>	2	0	0	0	0	0
<i>Phalaris arundinacea</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Phragmites australis</i>	1	2	2	3	0	0
<i>Polygonum amphibium</i>	0	0	2	1	0	0
<i>Polygonum hydropiper</i>	1	1	1	0.5	0	0
<i>Potamogeton coloratus</i>	3	2	2	0	2	0
<i>Potamogeton compressus</i>	0	0	2	0	1	0
<i>Potamogeton crispus</i>	0	0	2	1	0	0
<i>Potamogeton lucens</i>	0	1	1	1	1	0
<i>Potamogeton natans</i>	2	3	0.5	0.5	2	0
<i>Potamogeton nodosus</i>	0	0.5	2	3	0	1
<i>Potamogeton pectinatus</i>	0.5	2	3	3	0	1
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	0	0	2	2	1	0
<i>Potamogeton pusillus</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Ranunculus circinatus</i>	1	1	1	0	1	0
<i>Ranunculus fluitans</i>	0	2	2	2	0	0
<i>Ranunculus ophioglossifolius</i>	2	0	0	0	0	0
<i>Ranunculus trichophyllus</i>	1	1	1	0	2	0
<i>Riccia fluitans</i>	0	0	2	0	0	0
<i>Rorippa amphibia</i>	0	2	3	1	0	0
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	0	2	2	0	0	0
<i>Samolus valerandi</i>	2	0	0	0	1	0
<i>Scirpus lacustris</i>	2	3	2	0	0	0
<i>Scutellaria galericulata</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Sparganium emersum</i>	3	3	2	0.5	2	0
<i>Sparganium erectum</i>	0	1	1	1	0	0
<i>Sparganium minimum</i>	2	2	0	0	1	0
<i>Spirodela polyrrhiza</i>	0	0	2	2	0	0
<i>Stratiotes aloides</i>	0	0	2	2	0	0
<i>Thelypteris palustris</i>	2	0	0	0	1	0
<i>Trapa natans</i>	0	0	2	2	0	0
<i>Typha latifolia</i>	0	2	2	0	0	0
<i>Utricularia minor</i>	2	0	0	0	0	0
<i>Utricularia vulgaris</i>	0	0	2	0	0	0
<i>Vallisneria spiralis</i>	0	0	2	1	0	0
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	3	2	1	1	2	0
<i>Veronica beccabunga</i>	1	1	1	0	0	0
<i>Wolffia arrhiza</i>	0	0	2	2	0	0
<i>Zanichellia palustris</i>	0	2	2	0	1	0

Tableau 19 : Table des exigences des espèces végétales (Baillet, 2009)

La Figure 42 reporte le **niveau d'eutrophisation** déterminé sur la base des exigences des macrophytes recensés dans le cours de la Sèvre-Niortaise et de l'Egray. De façon générale, on observe :

- Au sortir des sources du Dogger alimentant la Sèvre-Niortaise (la source de Moulin Neuf, la source de Château Salbart, la source des Habites et la source du bourg de Saint-Maxire), des espèces témoignant d'un milieu **mésotrophe à oligotrophe**.

- A l'ouest du méandre, en aval du bourg de Saint-Maxire et en amont du lieu-dit d'Oriou, un secteur où le milieu affiche un état **mésotrophe à oligotrophe**. Cette caractéristique se retrouve aussi sur le bras extérieur du méandre, à hauteur de Moulin Neuf, et plus ponctuellement sur certains transects.

- Au nord du méandre ainsi qu'à l'aplomb et au sud du lieu-dit Oriou, le long du bras oriental du méandre ainsi qu'entre Château Salbart et Moulin Neuf à l'est, le milieu affiche un état **eutrophe à hyper-eutrophe**.

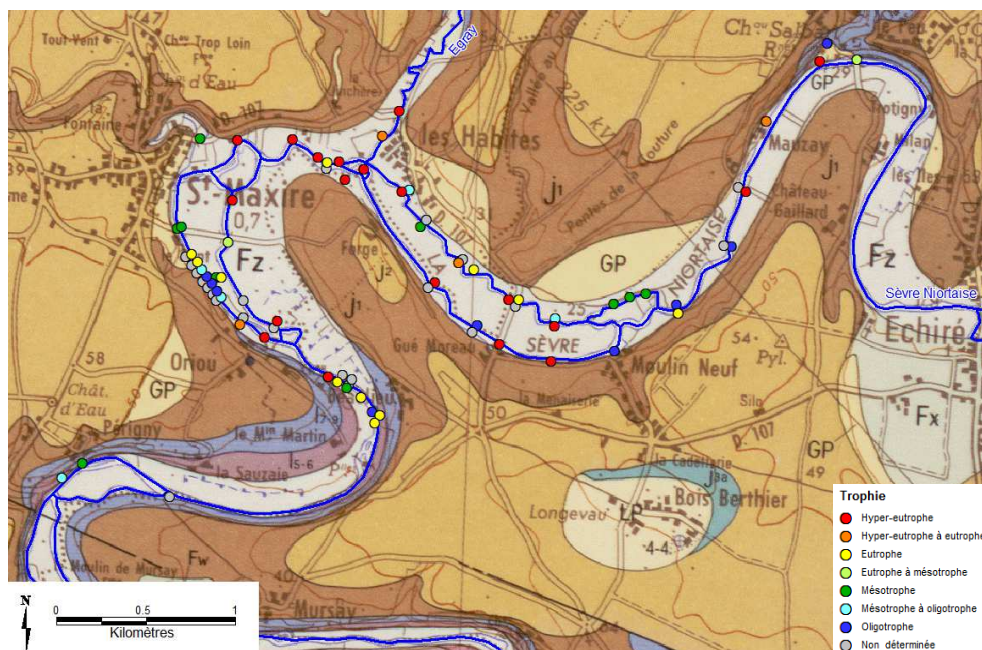


Figure 42 : Niveau de d'eutrophisation du milieu aquatique déterminée sur la Sèvre-Niortaise et l'Egray en fonction de l'exigence des macrophytes composant le peuplement aquatique

Le diagnostic **d'intensité des apports d'eau souterraine** à la Sèvre-Niortaise (Figure 43) est basé sur l'abondance des espèces associées aux apports d'eau souterraine, i.e. aux espèces se développant préférentiellement dans les eaux fraîches et sténothermes. On observe que :

- dans sa globalité, en dehors des zones de sources, le site présenterait des apports de la nappe à la Sèvre-Niortaise nuls à faibles du fait de la faible abondance des espèces végétales reportées dans le Tableau 19 ;

- l'absence d'apport est clairement diagnostiquée au nord du méandre ; les apports faibles seraient détectés principalement au sud de Saint-Maxire et dans le bras oriental du méandre ; les apports moyens se concentrent à hauteur de Moulin Neuf ; aucune station ne témoigne d'apports de forte intensité.

La carte des **probabilités d'apport en eau souterraine** au fleuve Sèvre-Niortaise (Figure 44) résulte du croisement de l'indice de trophie et de la fréquence des espèces signant des apports en eau souterraine. Cette carte indique que :

- la probabilité d'apport est globalement nulle sur le bras oriental et dans la boucle du méandre ; il en serait de même : 1) entre Château Salbart et l'amont de Moulin Neuf et 2) à l'aplomb et au sud d'Oriou sur la fin du méandre ; dans ces secteurs, le milieu est de type eutrophe à hyper-eutrophe et la densité des

macrophytes suffisamment faible pour que l'intensité des apports phréatiques soit classée comme nulle à faible ;

- seuls deux secteurs se distinguent par une probabilité forte : le bras externe du méandre à l'aplomb de Moulin Neuf et les bras principal et annexe de la Sèvre-Niortaise au sud du bourg de Saint-Maxire ; ces secteurs se singularisent par un état mésotrophe à oligotrophe et une densité de macrophytes favorisées par les apports phréatiques plus importants.

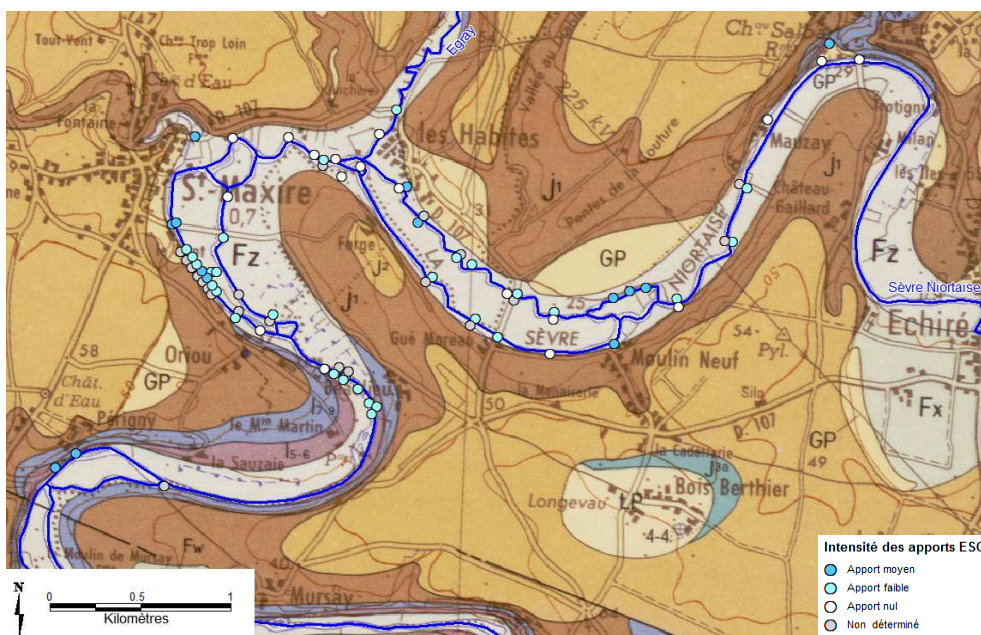


Figure 43 : Intensité des apports d'eaux souterraines (ESO) diagnostiqué à l'aide des espèces végétale

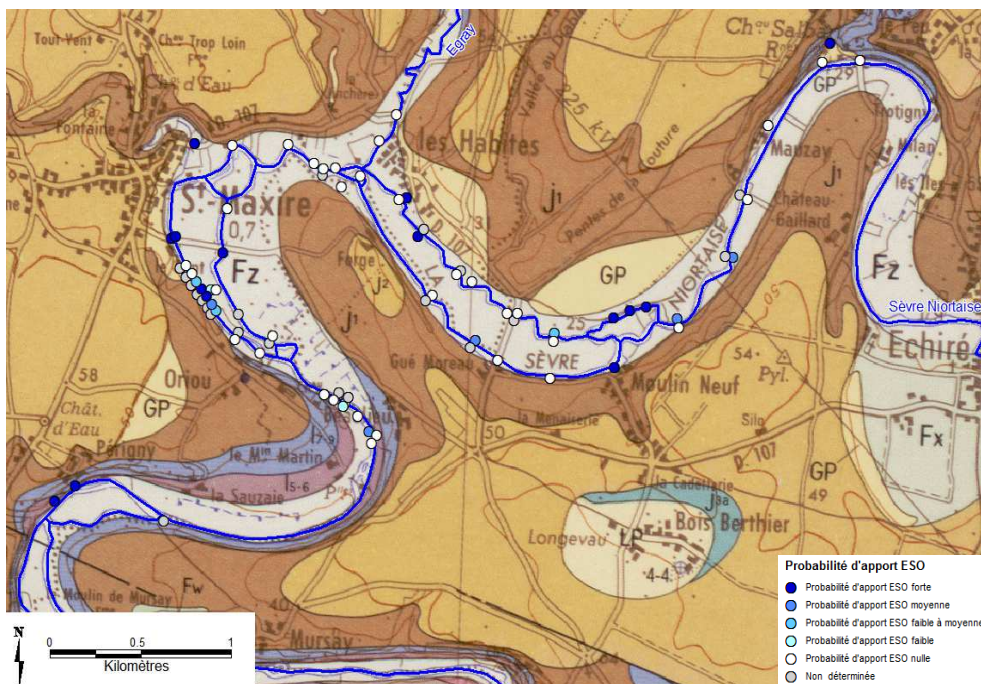


Figure 44 : Probabilité des apports de nappe diagnostiquée par la méthode des macrophytes le long du méandre de la Sèvre-Niortaise

4.1.2.3. Mesures physico-chimiques in situ

Les figures suivantes (Figure 45, Figure 46, Figure 47) présentent respectivement les résultats d'analyse de température, conductivité électrique et pH obtenus le long du méandre.

A proximité des sources (source de Château Salbart, source de Moulin Neuf, source des Habites, source du bourg de Saint-Maxire), la température de l'eau est comprise entre 13,3 et 13,8°C. Ces mêmes stations présentent une conductivité comprises entre 649 et 679 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un pH entre 7,2 et 7,6.

La température des eaux de l'Egray, à proximité des Habites, est de 15°C. Leur conductivité et de l'ordre de 585 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et le pH de 8,1.

Dans le cours de la Sèvre-Niortaise, la température est majoritairement comprise entre 18,6 et 20,7°C, la conductivité entre 505 et 596 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et le pH entre 8,1 et 8,4.

Quelques stations se distinguent de par leur conductivité légèrement plus élevée, de l'ordre de 602 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au niveau du bras droit de la Sèvre-Niortaise à hauteur de Moulin Neuf.

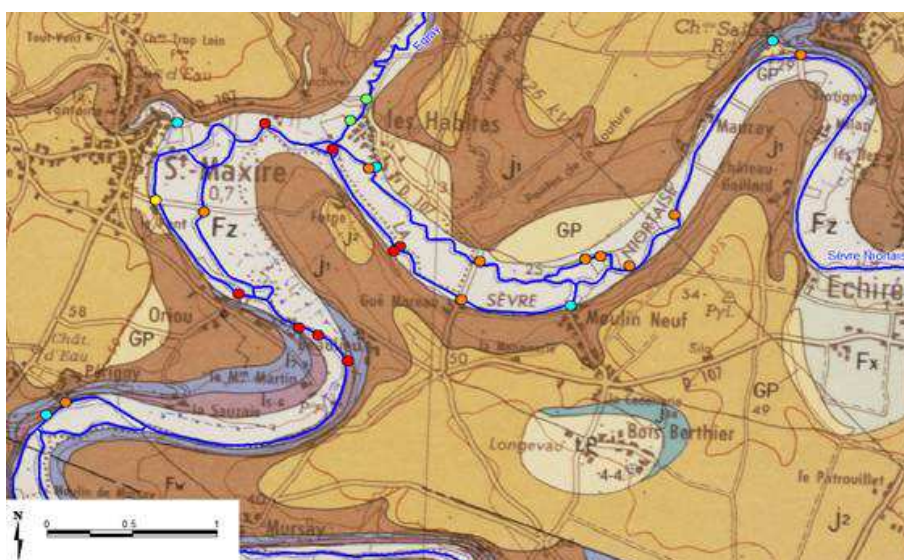


Figure 45 : Température des eaux superficielles dans le méandre de Saint-Maxire-Echiré.

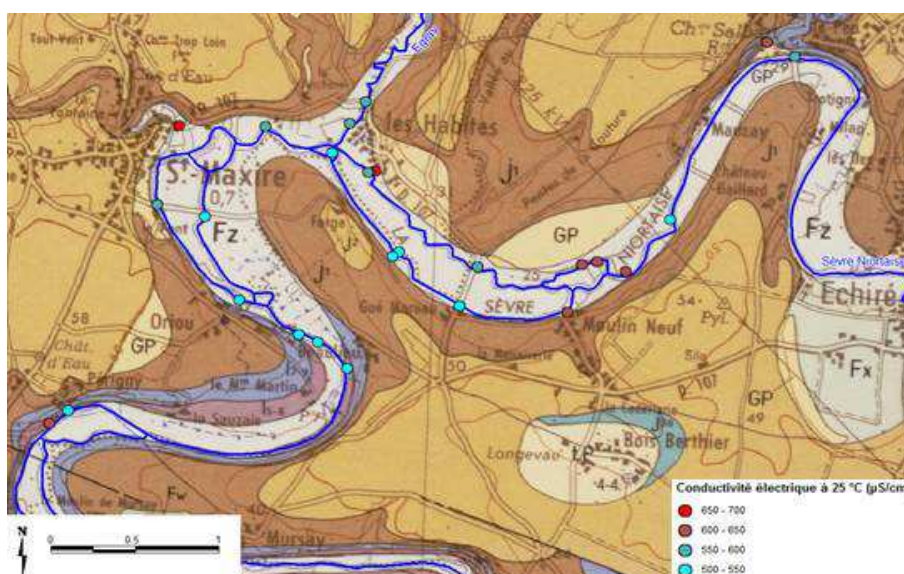


Figure 46 : Conductivité électrique des eaux superficielles dans le méandre de Saint-Maxire-Echiré

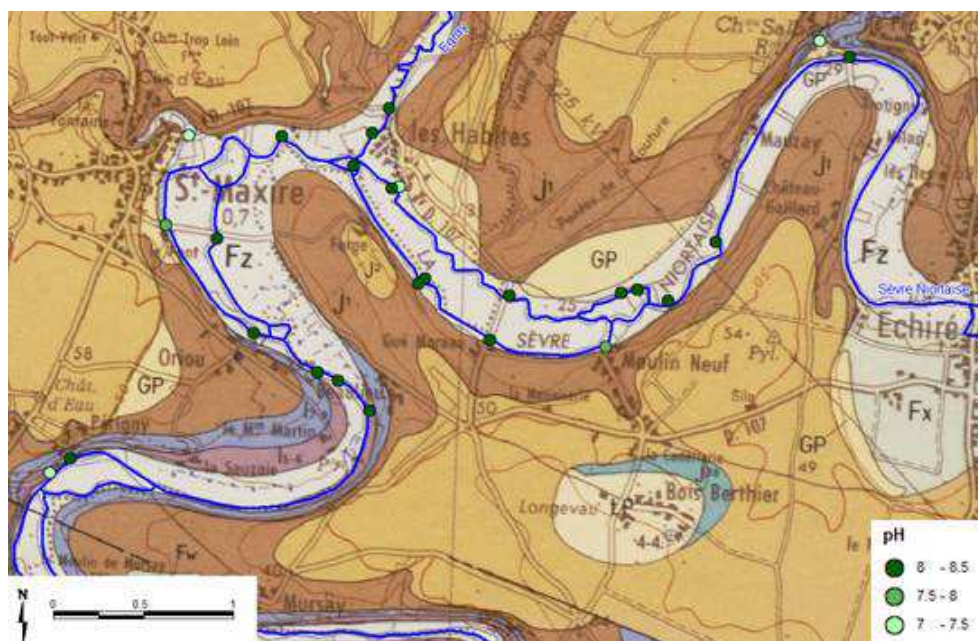


Figure 47 : pH des eaux superficielles sans le méandre de Saint-Maxire-Echiré

4.1.3. Comparaison des résultats des métriques biologique et physico-chimique

Les résultats issus de l'inventaire macrophytes sont comparés aux indices physico-chimiques recensés le long de la Sèvre, de l'Egray et au sortir des sources. Cette analyse souffre cependant de la faible densité de stations physico-chimiques ainsi que du manque de répétitions temporelles des mesures.

A l'aval immédiat des sources alimentant la Sèvre-Niortaise (Château Salbart, Moulin Neuf, les Habites, Saint-Maxire le bourg) le niveau trophique déterminé par les indicateurs biologiques est mésotrophe à oligotrophe et l'intensité des apports classée moyenne. Ces indices peuvent être mis en relation avec les caractéristiques physico-chimiques de la nappe du Dogger :

- Les teneurs en ammonium et en phosphates caractéristiques de cette nappe sont celles d'un milieu oligotrophe tel que défini par Bornette et al. (2007) (N-NH_4^+ et $\text{P-PO}_4^{3-} < 40 \mu\text{g/l}$). Les teneurs en nitrates étant importantes, le phosphore est considéré comme la ressource limitante, l'azote agissant sur les communautés végétales principalement au travers de son action phytotoxique sous sa forme ammoniacale (Onaindia et al., 1996 ; Britto et al., 2001).

- La température de l'eau mesurée est comprise entre 12 et 14°C, i.e. comparable à celle de la nappe. Cette température fraîche et probablement tamponnée permet le développement de peuplements tels que *Veronica anagallis*, *Berula Erecta* ou encore *Mentha aquatica*.

Il y a donc, sur ces secteurs, une bonne correspondance entre le diagnostic végétal traduisant les apports souterrains et les caractéristiques physico-chimiques du milieu (signature de la nappe). L'aval des sources se singularise d'autre part par des valeurs de conductivité électrique et de pH comparables à celles de la nappe (Tableau 20).

Nitrate mg/L	Phosphate mg/L	Température °C	Conductivité à 25 °C μS/cm	pH
76 ± 9	0.03 ± 0.03	13 ± 0.7	671 ± 30	7.3 ± 0.1

Tableau 20 : Paramètre physico-chimiques moyens caractéristiques de la nappe du Dogger (données du forage 06104X0008/P intégrées sur 16 ans, source ADES)

Dans le nord du méandre où les indicateurs biologiques (typologie eutrophe à hypereutrophe et intensité des apports nulle) et hydrogéologiques (piézométrie) convergent en faveur de l'absence d'apports souterrains, les indices biologiques peuvent être associés à une signature physico-chimique plus proche de celle des eaux superficielles non influencées par des apports phréatiques :

- Les eaux de la Sèvre-Niortaise présentent des teneurs en ammonium et en phosphates respectivement comprises entre le seuil de détection de 0,05mg/l et 0,19mg/l et le seuil de détection de 0,05 mg/l et 0,6 mg/l, soit, de présenter des teneurs confirmant le caractère eutrophe à hyper-eutrophe mis en avant par le diagnostic végétal (N-NH_4^+ et $\text{P-PO}_4^{3-} > 80 \mu\text{g/L}$ d'après Bornette et al. (2007)). Ces caractéristiques sont soumis à des cycles saisonniers.

- A l'été, la température mesurée est élevée (20°C) et susceptible de connaître une forte variabilité (analyse chronologique des stations RCO-RCS AELB). Cette caractéristique ne favorise pas le développement d'espèces nécessitant des eaux fraîches et sténothermes.

Ce secteur se caractérise d'autre part par une conductivité électrique inférieure à 590 $\mu\text{S/cm}$ et un pH de l'ordre de 8.

Sur la base de ces différents secteurs de modalités d'apport connues et contrastées, les entités eau souterraine (ESO) d'une part et eau superficielle (ESU) d'autre part, présentent, a priori, des contrastes de signature physico-chimique. Il semble donc possible de distinguer les secteurs d'apports souterrains de ceux sans apports sur la base des mesures de température et de conductivité effectuées (Le pH n'est pas retenu comme critère discriminant. Il s'agit plus d'un indicateur de la qualité locale de l'eau, indicateur influencé par les réactions biologiques, que d'un indicateur du degré de mélange entre eau souterraine et eau de surface). Afin de valider cette hypothèse, les figures suivantes (Figure 48, Figure 49, Figure 50) reportent la conductivité in situ en fonction de la température in situ pour chaque indice biologique.

Ces figures démontrent que la corrélation entre les indices physico-chimiques et les indices biologiques est faible voire inexistante. Seule la température semble discriminante vis-à-vis de l'indice de trophie, les stations eutrophes ou hyper-eutrophes présentant des températures supérieures à 19,5°C. Cette ségrégation n'apparaît cependant plus pour l'indice d'intensité des apports et l'indice, plus intégrateur, de la probabilité d'apports en eau souterraine. L'absence de corrélation mise en avant peut résulter de différents biais :

- le faible nombre de stations de mesures physico-chimiques, notamment sur les secteurs à forte probabilité d'apport (bras droit de la Sèvre-Niortaise au sud de Saint-Maxire) ;

- un manque de sensibilité des paramètres physico-chimiques dans un contexte où les indices biologiques statuent sur une intensité d'apport globalement faible tout au long du méandre ;

- l'absence d'informations sur les caractéristiques physico-chimiques de la nappe alluvionnaire ; bien qu'en continuité hydrogéologique avec la nappe du Dogger, elle peut présenter une signature physico-chimique qui lui est propre et différente de celle enregistrée sur les sources, résurgence de l'aquifère du Dogger ;

- l'évolution temporelle du sens et de l'intensité des échanges, les mesures physico-chimiques présentées donnant un instantané à l'été alors que les indices biologiques intègrent les échanges nappe/rivière sur le long terme.

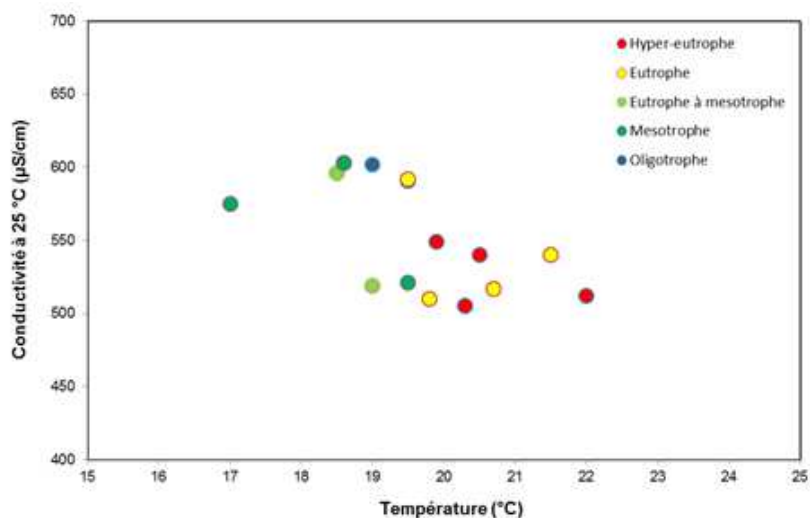


Figure 48 : Report des caractères physico-chimiques en fonction de l'indice de trophie

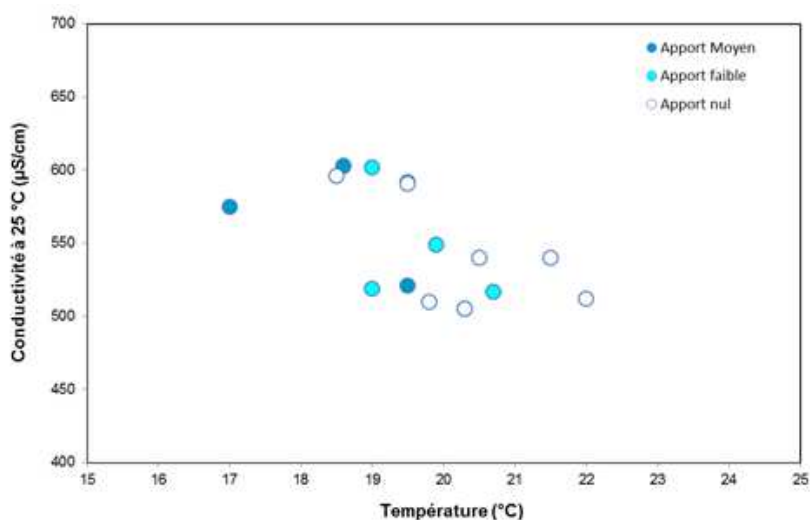


Figure 49 : Report des caractères physico-chimiques en fonction de l'indice d'intensité d'apport

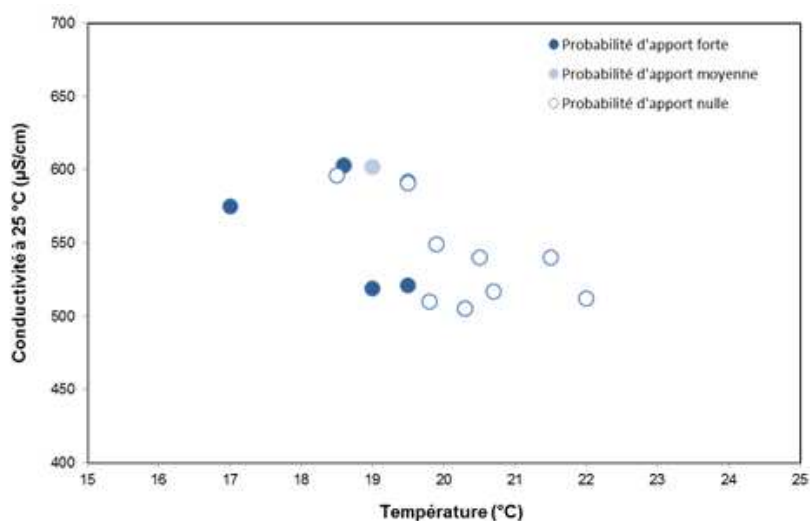


Figure 50 : Report des caractères physico-chimiques en fonction de l'indice de probabilité d'apport en eau souterraine

4.1.4. Analyse géomatique

4.1.4.1. Méthodologie choisie et données d'entrée

Pour ce travail de caractérisation des échanges nappes/Sèvre-Niortaise, nous avons choisi de tester l'impact de la densité des données d'entrée sur les résultats de l'analyse géomatique. Pour cela, les données utilisées sont celles issues des travaux de modélisation fondés sur le modèle MARTHE prises avec un maillage plus ou moins fin, en plus des Scan 25 de l'IGN utilisés pour la topographie. Les données sont donc les suivantes :

- Cartes IGN au 1/25 000^e (Scan 25) utilisées par digitaliser les contours de berge de la Sèvre-Niortaise ;

- Cotes du fond du lit de la rivière (m ngf)
- Largeurs du lit de la rivière (m)
- Epaisseurs du fond du lit de la rivière (m ngf)
- Perméabilités du lit de la rivière (m/s)
- Niveaux d'eau de la rivière en juin 2007 en basses-eaux moyennes (m ngf)
- Niveaux d'eau de la nappe des alluvions en juin 2007 en basses-eaux moyennes (m ngf)
- Perméabilités des alluvions (m/s)
- Epaisseurs des alluvions (m)

Pour les données issues du modèle MARTHE, nous disposons d'une valeur par maille pour les données listées ci-dessus, à l'exception des Scan 25.

4.1.4.2. Première caractérisation des échanges nappe/river

4.1.4.2.1. A partir des données issues du modèle MARTHE

La Figure 51 présente les premiers résultats spatialisés des échanges nappes/Sèvre-Niortaise caractérisés à partir des données issues du modèle MARTHE. Les échanges ont été caractérisés à partir des valeurs contenues dans chaque maille du modèle. Cette carte présente :

- 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 en bleu et les puits en violet.

On retrouve sans surprise les sens d'échanges nappes/river obtenus en modélisation. Plus particulièrement, la spatialisation des échanges est la suivante :

- au niveau des berges des « îles » en rive gauche on observe :

- . flux d'eau de la nappe vers la rivière : ponctuellement (PK 14,25 ; 15 ; 17) et sur un linéaire plus conséquent (PK 20,5 à 21)

- . flux d'eau de la rivière vers la nappe : ponctuellement (PK 20,5) et sur un linéaire plus conséquent (PK 14,25 à 16,25 ; PK 17 à 17,75)

- au niveau des berges des « îles » rive droite on observe :

- . flux d'eau de la nappe vers la rivière : PK 17 ; PK 20,5 à 21

- . flux d'eau de la rivière vers la nappe : PK 14,25 à 16,25 ; PK 17 à 17,75

- en rive droite :

. flux d'eau de la nappe vers la rivière : ponctuellement (PK 15,5 ; 15,75) et sur un linéaire plus conséquent (PK 12 à 13,75 ; PK 18,25 à 18,5 ; PK 19,25 à 21)

. flux d'eau de la rivière vers la nappe : sur la grande majorité des tronçons PK 13,75 à 18,25 et PK 18,75 à 19

- en rive gauche :

. flux d'eau de la nappe vers la rivière : ponctuellement (PK 14,5 ; 15 ; 17) et sur un linéaire plus conséquent (PK 12 à 13,75 ; PK 18,25 à 18,75 ; PK 19 à 21)

. flux d'eau de la rivière vers la nappe : ponctuellement (PK 19 ; 19,75) et sur un linéaire plus conséquent (PK 13,75 à 18,25)

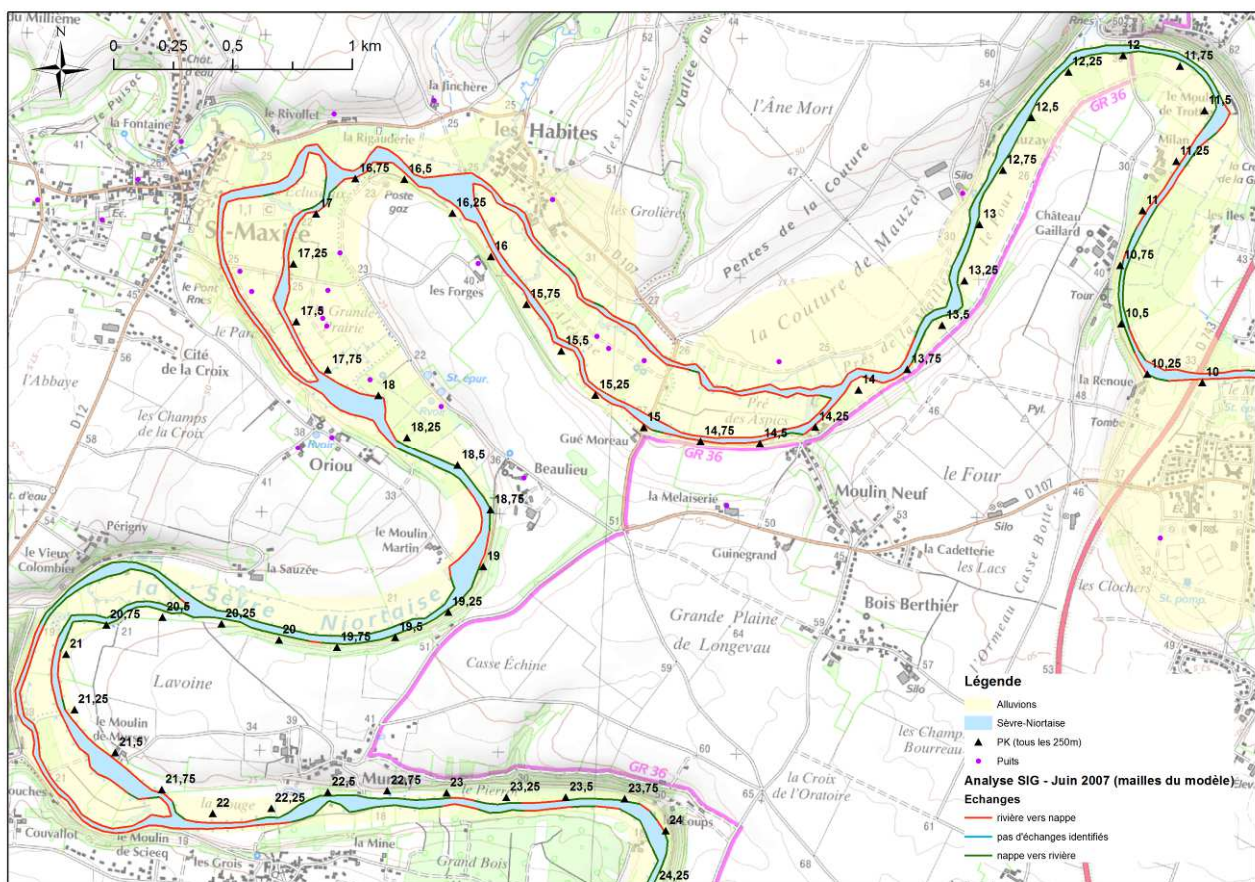


Figure 51 : Caractérisation des échanges nappe/Sèvre-Niortaise par analyse SIG (données issues du modèle MARTHE)

4.1.4.2.2. A partir des données dégradées

La Figure 52 présente les premiers résultats spatialisés des échanges nappes/Sèvre-Niortaise caractérisés à partir des données issues du modèle MARTHE. Ces données ont été dégradées. Nous n'avons au final utilisé que les valeurs des mailles au niveau de points de mesures (puits). Cette carte présente :

- un découpage du linéaire du cours d'eau en points kilométriques (PK : triangles noirs) : PK 12,75 à 18,5 soit 5,75 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 en bleu et les puits en violet.

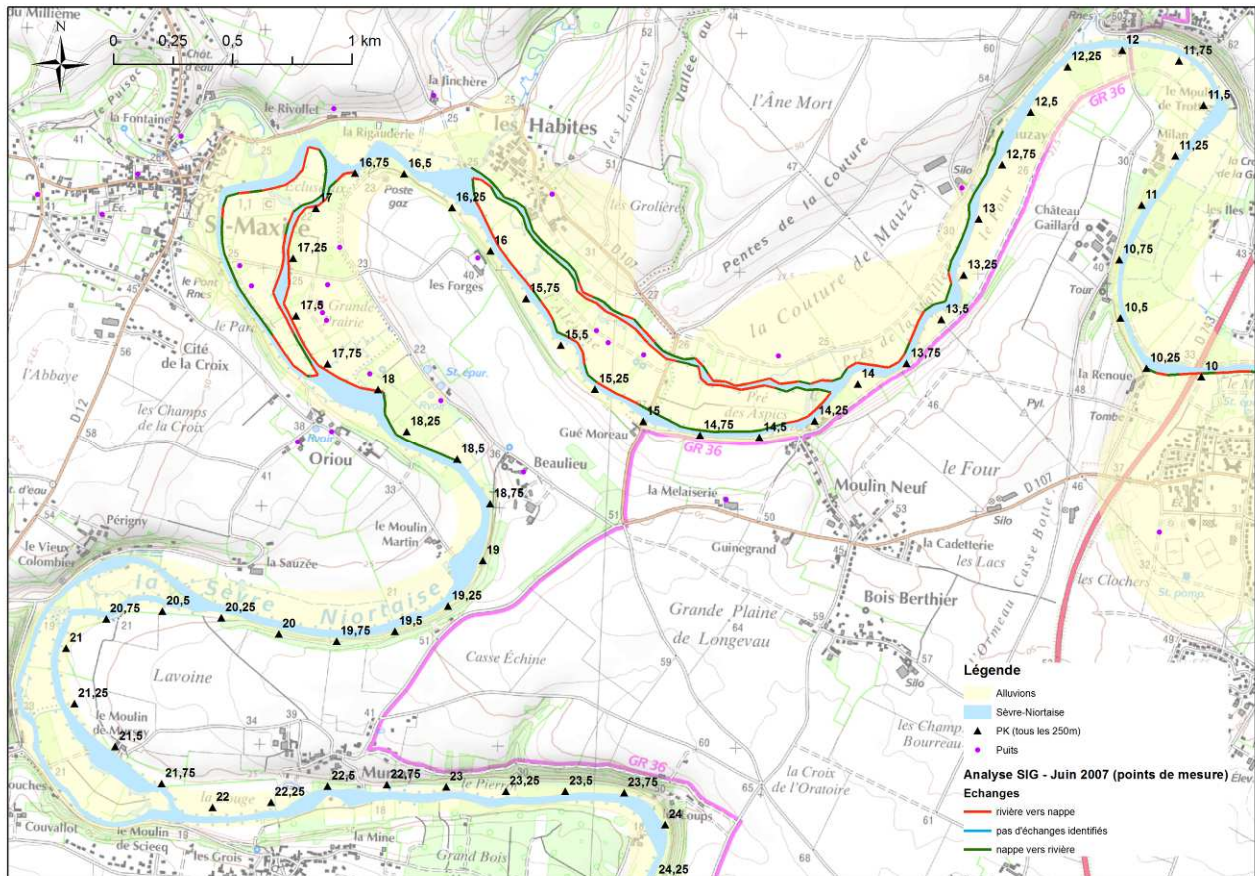


Figure 52 : Caractérisation des échanges nappe/Sèvre-Niortaise par analyse SIG (données dégradées)

La spatialisation des échanges couvre un linéaire de berge moins important compte-tenu de la dégradation des données. Les échanges observés sont plus contrastés qu'avec les données complètes. Les secteurs sur lesquels on note des échanges nappe vers rivières sont plus longs qu'avec les données complètes. La sectorisation est la suivante :

- au niveau des berges des « îles » en rive gauche on observe :

. flux d'eau de la nappe vers la rivière : ponctuellement (PK 15) et sur un linéaire plus conséquent (PK 14,25 à 14,5 ; PK 15,75 à 16,25 ; PK 17 à 17)

. flux d'eau de la rivière vers la nappe : ponctuellement (PK 16,25 ; 17,25) et sur un linéaire plus conséquent (PK 14,5 à 15,75 ; PK 16,75 à 17 ; PK 17,5 à 17,75)

- au niveau des berges des « îles » rive droite on observe :

. flux d'eau de la nappe vers la rivière : ponctuellement (PK 15,25 ; 15,5 ; 15,75 ; 16,25 ; 17,25 ; 17,75) et sur un linéaire plus conséquent (PK 14,5 à 15 ; PK 16,75 à 17)

. flux d'eau de la rivière vers la nappe : ponctuellement (PK 14,25 ; 15,25 ; 15,5 ; 17,25 ; 17,75) et sur un linéaire plus conséquent (PK 15,75 à 16,25 ; PK 17 à 17,5)

- en rive droite :

. flux d'eau de la nappe vers la rivière : ponctuellement (PK 13,75 ; 14 ; 14,25) et sur un linéaire plus conséquent (PK 12,75 à 13,5 ; PK 15 à 16,25)

. flux d'eau de la rivière vers la nappe : ponctuellement (PK 13,25 ; 13,5 ; 15 ; 15,25 ; 15,5) et sur un linéaire plus conséquent (PK 14 à 14,75)

- en rive gauche :

. flux d'eau de la nappe vers la rivière : ponctuellement (Pk 17) et sur un linéaire plus conséquent (PK 18 à 18,5)

. flux d'eau de la rivière vers la nappe : ponctuellement (PK 16,75) et sur un linéaire plus conséquent (PK 17 à 18).

On voit donc que la densité de données piézométriques utilisées dans l'analyse géomatique a une importance capitale dans le résultat obtenu sur les échanges : l'extrapolation à partir d'un nombre réduit de points peut limiter la représentativité de la surface de la nappe obtenue.

4.1.5. Synthèse

4.1.5.1. Modèle MARTHE

Les résultats de cette simulation indiquent que (i) les apports du fleuve à la nappe sont prédominants et affectent entre 60 et 70 % du linéaire fluviale, (ii) le sens des échanges est globalement indépendant des caractéristiques climatiques annuelles et de l'état hydrodynamique de la nappe.

Concernant l'intensité des échanges nappe-fleuve, les résultats de cette simulation indiquent que (i) les débits d'échange simulés sont majoritairement inférieurs à $1\text{m}^3/\text{j}/\text{mètre}$ linéaire et varient peu temporellement, (ii) localement et en réponse aux pompages AEP, l'amplitude de variation des flux d'échange comme leur intensité augmentent. Les débits d'échanges sont globalement inférieurs à ceux restitués par la simulation de l'année 2 à l'exception des secteurs situés au droit des pompages AEP pour lesquels les débits d'échanges restitués en phase 3 sont 20 à 70 fois supérieurs à ceux restitués en année 2. Cette différence est inhérente à un gradient de charge hydraulique nappe/ri vière plus important dans les secteurs dépressionnaires (en pompage) de la nappe du fait d'une cote de ligne d'eau en rivière imposée et maintenue haute.

Les échanges caractérisés à partir du modèle MARTHE se répartissent de la façon suivante sur les tronçons de berge :

- Bras extérieur (à droite dans le sens de l'écoulement de la Sèvre-Niortaise)
 - . Nappe vers rivière : PK 12 à 13,5 ; PK 18,25 à 18,5 ; PK 19,5 à 21
 - . Rivière vers nappe : PK 13,75 à 18 ; PK 18,75 à 19,25
- Bras intérieure (à gauche dans le sens de l'écoulement de la Sèvre-Niortaise)
 - . Nappe vers rivière : PK 12 à 13,5 ; PK 17 ; PK 18,25 à 18,5 ; PK 19,5 à 21
 - . Rivière vers nappe : PK 13,75 à 16,75 ; PK 17,25 à 18 ; PK 18,75 à 19,25

4.1.5.2. Macrophytes et physico-chimie des eaux superficielles

Les relevés macrophytes et analyse d'eau ont été réalisés de juin à août 2012 en condition d'écoulement influencé par les pompages du champ captant. Seul le diagnostic macrophyte est présenté dans cette synthèse car l'analyse fondée sur la physico-chimie souffre de la faible densité de stations ainsi que du manque de répétitions temporelles des mesures.

Le diagnostic d'intensité des apports d'eau souterraine montre globalement des apports de la nappe à la Sèvre-Niortaise nuls à faibles même si certaines stations témoignent d'apports de forte intensité. Deux secteurs se distinguent par une probabilité forte : le bras externe du méandre à l'aplomb de Moulin Neuf (PK 14 à 14,5) et les bras principaux et annexes de la Sèvre-Niortaise au sud du bourg de Saint-Maxire (PK 17,25 à 17,5).

4.1.5.3. Analyse géomatique

La spatialisation des échanges est globalement la suivante du PK 12 au PK 21:

- **au niveau des berges des « îles » en rive droite on observe :**
 - . flux d'eau de la nappe vers la rivière : PK 17 et PK 20,75 à 21
 - . flux d'eau de la rivière vers la nappe : PK 14,25 à 16,25 ; PK 17,25 à 18
- **au niveau des berges des « îles » rive gauche on observe :**
 - . flux d'eau de la nappe vers la rivière : PK 20,75 à 21
 - . flux d'eau de la rivière vers la nappe : PK 14,25 à 16,25 ; PK 17 à 18
- **en rive droite :**
 - . flux d'eau de la nappe vers la rivière : PK 12 à 13,5 ; PK 18,25 à 18,5 ; PK 19,25 à 21
 - . flux d'eau de la rivière vers la nappe : PK 13,75 à 18 ; PK 18,75 à 19
- **en rive gauche :**
 - . flux d'eau de la nappe vers la rivière : PK 12 à 13,5 ; PK 18,25 à 21
 - . flux d'eau de la rivière vers la nappe : PK 13,75 à 18

4.1.5.4. Première synthèse croisée

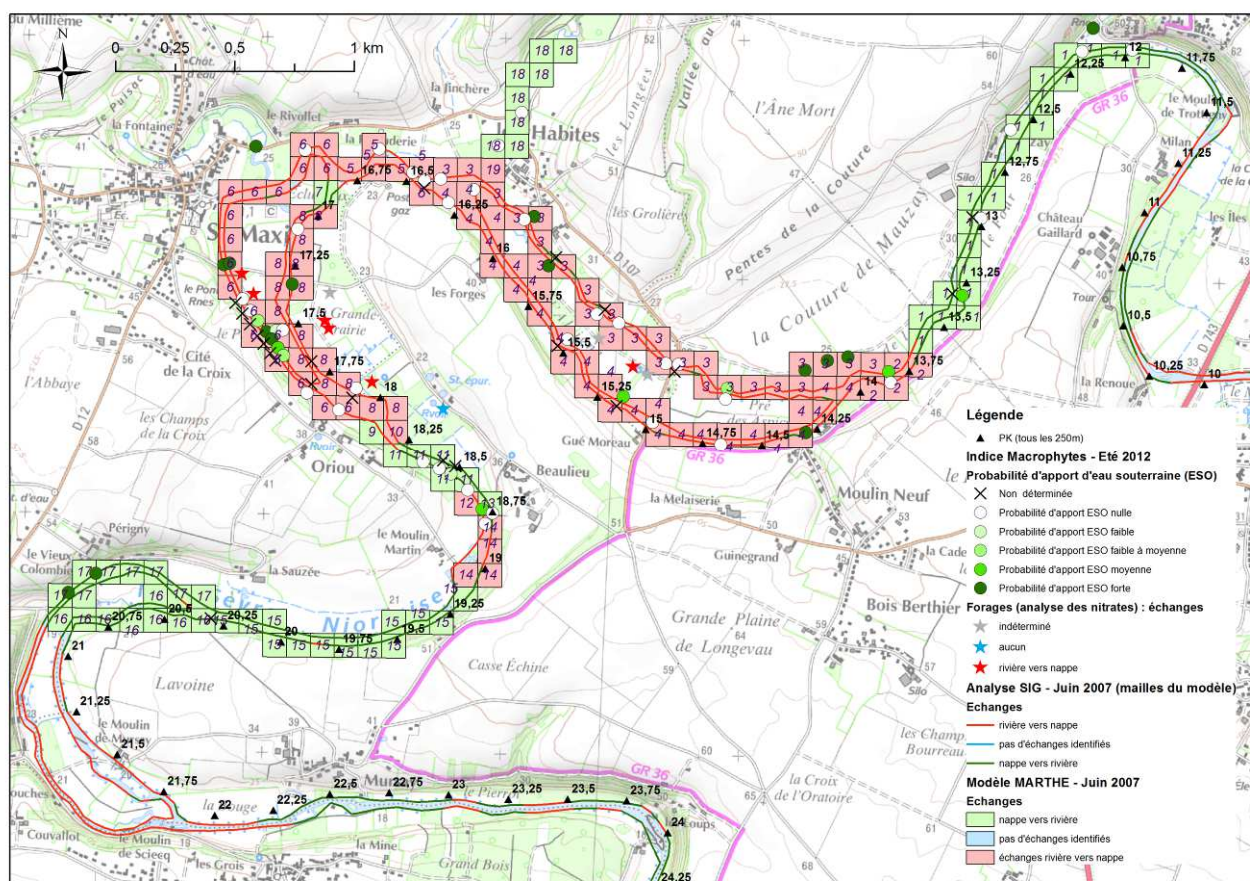


Figure 53 : Carte de superposition des métriques

La Figure 53 présente une carte où les résultats des trois métriques utilisées sur la Sèvre-Niortaise sont superposés :

- modèle 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 : tronçon de berge représentés par des segments (flux nappe vers rivière en vert ; flux rivière vers nappe en rouge).

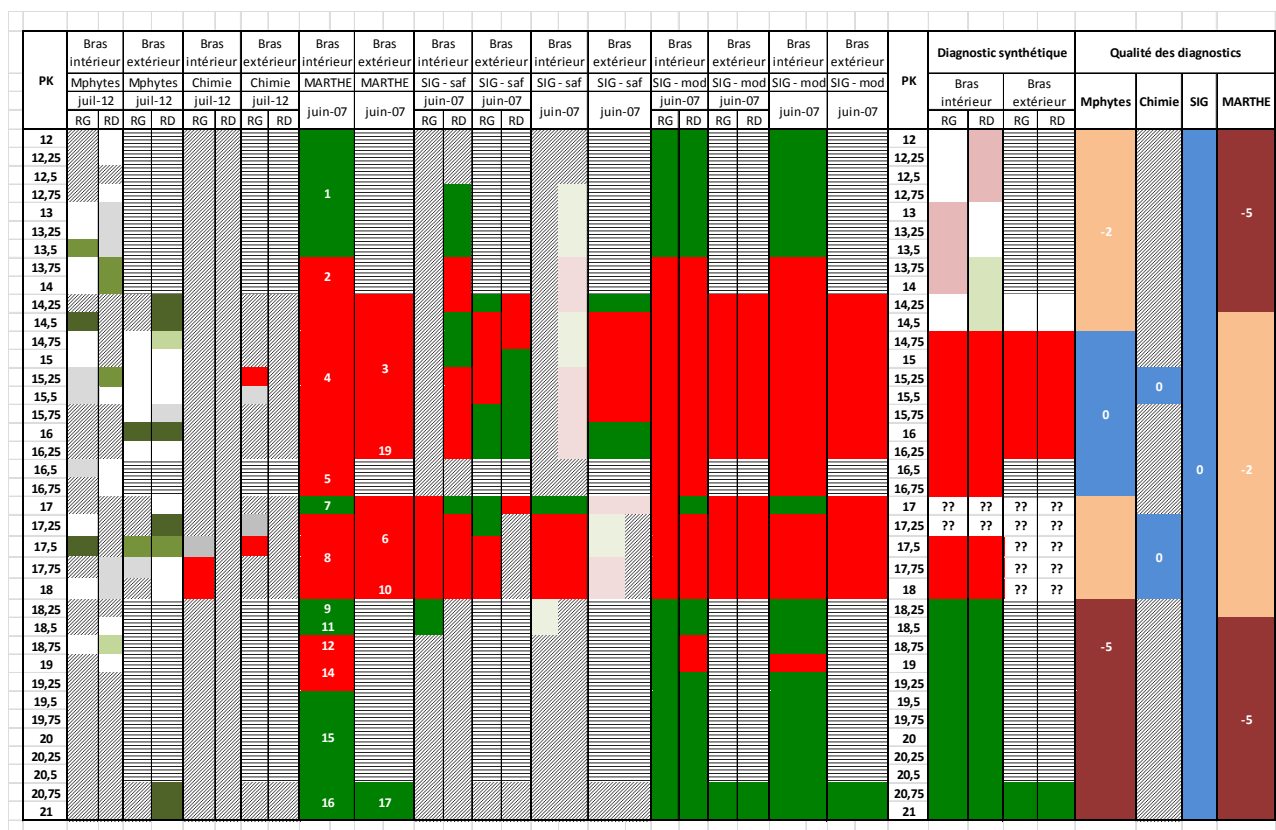


Tableau 21 : Synthèse croisée des échanges nappe/Sèvre-Niortaise

Le Tableau 21 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. Ce tableau est organisé de la façon suivante :

- colonne 1 (Mphytes) : probabilité d'apport d'eau souterraine d'après les macrophytes, rive gauche et rive droite ((probabilité d'apport d'eau souterraine ou ESO mise en évidence par un dégradé de vert ; plus la couleur est foncé plus la probabilité est forte)

- colonne 2 (Chimie) : diagnostic d'après la chimie des eaux souterraines (rive gauche et rive droite) ;

- colonne 3 (MARTHE) : caractérisation des échanges avec le modèle MARTHE (bras extérieur et intérieur seulement). La numérotation correspond aux 18 tronçons homogènes présentés Figure 53 et Tableau 23 ;

- 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) : pour cette colonne le codage est le suivant : en vert un apport de nappe à la rivière (en vert clair un apport moins évident) ; en rouge un apport de rivière à la nappe (en rouge clair un apport moins évident) ; en blanc pas de diagnostic possible ; les points d'interrogation indique d'il n'a pas été possible de trancher entre les résultats divergents des différentes métriques ;
- colonne 9 (Qualité des diagnostics) : code couleur en cohérence avec le Tableau 44.

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.

Ce secteur reste délicat à diagnostiquer du point de vue des échanges nappe/rivières pour plusieurs raisons :

- différences de potentiel très faibles entre nappe et rivière rendant sensibles l'interprétation de l'échange compte-tenu des incertitudes liées aux données et aux géoréférencement. Des analyses de sensibilité sur les TIN de nappe seraient intéressantes à réaliser en attribuant une marge d'erreur au coordonnées (x, y, z) des points ayant servis à le construire ;

- la morphologie typique du cours d'eau : fort méandrage et faible largeur du cours d'eau, faible épaisseur et faible extension des alluvions autour du cours d'eau, présence d'îles. Cette morphologie implique une forte densité de données et une bonne continuité pour construire des TIN de nappe cohérents ou renseigner le modèle ;

- fort taux d'étagement du cours d'eau (nombreux seuils) et présence de nombreux biefs rendant encore plus délicates la construction des TIN de nappe ou la construction du modèle de nappe notamment si l'on travaille sur la variabilité saisonnière.

On observe des résultats divergents avec les macrophytes. Ceci est sans doute dû au fait que l'on ne travaille pas à la même date, même si la piézométrie de modèle sélectionnée correspond à une situation hydrologique similaire. De plus, le diagnostic fourni par les macrophytes n'est pas interpolé pour ce site et correspond donc à une information locale et ponctuelle. La réalisation de ce diagnostic a rencontré 3 problèmes sur le site de la Sèvre-Niortaise : 1) espèces hors liste ; 2) couvert végétal faible ; 3) milieu aquatiques hyper-eutrophes.

Le calcul de débits d'échange (Q) par analyse SIG a été réalisé selon différentes hypothèses sur la surface d'échange (A) et la perméabilité (K) des alluvions (Tableau 22) :

Débit d'échange (m ³ /s)	Surface d'échange par longueur de tronçon considéré (m ²)	Perméabilité des alluvions (m/s)
Q1	A1 = (cote niveau d'eau de la rivière – cote fond du lit) * longueur du tronçon	K1 = champ de perméabilité des alluvions
Q2	A2 = épaisseur des alluvions * longueur du tronçon	K1
Q3	A3 = épaisseur d'alluvion mouillée * longueur du tronçon	K1
Q4	A4 = moitié de la largeur du lit de la rivière * longueur du tronçon	K2 = perméabilité des alluvions du fond du lit de la rivière
Q5	A5 = épaisseur moyenne (moyenne des surface d'échange A1)	K1
Q6	A5	K3 = perméabilité moyenne (moyenne des perméabilités K1)

Tableau 22 : Calcul du débit d'échange (Q) par analyse SIG selon différentes hypothèses sur la surface d'échange (A) et la perméabilité (K) des alluvions

Ces débits d'échanges ont été agrégés par maille du modèle sur 18 tronçons (voir Figure 53) jugés homogènes du point de vue du travail de modélisation. Le Tableau 23 présente les débits d'échanges comparés obtenus avec le modèle MARTHE et l'analyse SIG sur ces tronçons.

Tronçons	PK à PK		Q Marthe		Q1		Q2		Q3		Q4		Q5		Q6	
n°	km		m³/j	m³/j/km	m³/j	m³/j/km	m³/j	m³/j/km	m³/j	m³/j/km	m³/j	m³/j/km	m³/j	m³/j/km	m³/j	m³/j/km
1	12	13,75	2 187	613	17 101	4 789	65 420	18 322	53 983	15 119	32	9	25 248	7 071	12 339	3 456
2	13,75	14	-3,2	-6,7	-359	-761	-775	-1 645	-703	-1 493	-0,45	-0,96	-606	-1 287	-661	-1 404
3	13,75	16,5	-195	-50	-6 185	-1 575	-23 785	-6 057	-18 325	-4 667	-4,6	-1,2	-10 834	-2 759	-12 869	-3 277
4	14	16,25	-421	-87	-17 498	-3 637	-35 018	-7 279	-28 202	-5 862	-11	-2,3	-15 113	-3 141	-21 834	-4 539
5	16,5	16,75	-46	-47	-6 077	-6 191	-5 509	-5 612	-4 967	-5 060	-3,7	-3,7	-3 423	-3 487	-3 869	-3 942
6	16,75	18	-1 166	-367	-9 144	-2 878	-9 606	-3 024	-8 702	-2 739	-35	-11	-6 653	-2 094	-10 512	-3 309
7	16,75	17	0,1	0,7	110	598	203	1 100	156	846	0,2	1,1	98	534	141	765
8	17	18	-783	-350	-3 898	-1 742	-5 491	-2 454	-4 733	-2 115	-4,9	-2,2	-2 579	-1 152	-5 258	-2 350
9	18	18,25	0,3	3,4	-108	-1 136	-110	-1 156	-90	-939	-0,1	-1,2	-76	-797	-124	-1 294
10	18	18,25	-4,6	-26	-178	-1 026	-208	-1 199	-186	-1 070	-0,2	-1,0	-92	-530	-106	-612
11	18,25	18,5	50	65	1 004	1 292	1 018	1 310	873	1 124	0,9	1,2	487	626	532	685
12	18,75	18,75	-0,1	-2,0	-63	-1 023	-63	-1 030	-53	-868	-0,1	-1,0	-31	-497	-33	-542
13	18,75	18,75	0,3	1,6	51	287	-59	-328	-67	-375	0,0	0,3	25	138	27	150
14	18,75	19,25	-32	-48	-1 546	-2 323	-590	-886	-369	-554	-1,5	-2,3	-795	-1 195	-868	-1 304
15	19	20,25	70	31	9 558	4 181	11 497	5 029	7 660	3 351	15	6,6	7 393	3 234	8 066	3 528
16	20,25	21	4 338	3 112	5 285	3 792	18 093	12 982	13 701	9 831	11	7,9	8 077	5 795	8 812	6 322
17	20,25	21	2 971	2 103	6 915	4 894	11 593	8 205	9 887	6 997	9,5	6,7	6 927	4 903	7 558	5 349
19	16,25	16,25	-10	-559	-3,7	-202	-5,1	-275	-2,5	-134	0,0	-0,5	-4,3	-234	-22	-1 186

	Q Marthe		Q1		Q2		Q3		Q4		Q5		Q6	
Total nappe vers rivière	9 617	981	40 024	4 083	107 765	10 992	86 194	8 792	69	7,0	48 255	4 922	37 474	3 823
Total rivière vers nappe	-2 660	-160	-45 061	-2 711	-81 161	-4 883	-66 333	-3 991	-61	-3,7	-40 206	-2 419	-56 158	-3 379
Bilan	6 957	263	-5 037	-191	26 604	1 007	19 861	752	7,6	0,3	8 049	305	-18 684	-707

Tableau 23 : Comparaison des débits Marthe vs analyse SIG

Globalement, les débits potentiels à travers le fond du lit (Q4) sont très faibles. Les débits d'échanges calculés avec l'analyse SIG ont une nette tendance à surestimer les flux échangés par rapport au modèle MARTHE. On observe une inversion du bilan pour les débits (Q1 et Q6) calculés à partir des hypothèses 1 et 6. Sans surprise les débits calculés en tenant compte de l'épaisseur des alluvions (Q2) et de l'épaisseur mouillée des alluvions (Q3) sont les plus forts.

On observe que les flux quantifiés :

- pour les échange nappe vers rivière varient d'un facteur 4 à 11 entre l'analyse SIG et le modèle
- pour les échanges rivière vers nappe varient d'un facteur 15 à 31 entre l'analyse SIG et le modèle
- en terme de bilan varient d'un facteur 1 à 4 entre l'analyse SIG et le modèle quand le bilan est positif

La Figure 54 positionne les débits d'échanges obtenus à partir du modèle MARTHE et ceux calculés avec l'analyse SIG selon différentes hypothèses. Cette figure dessine la même tendance pour les débits issus du modèle et ceux issus de l'analyse SIG calculés avec les différentes hypothèses.

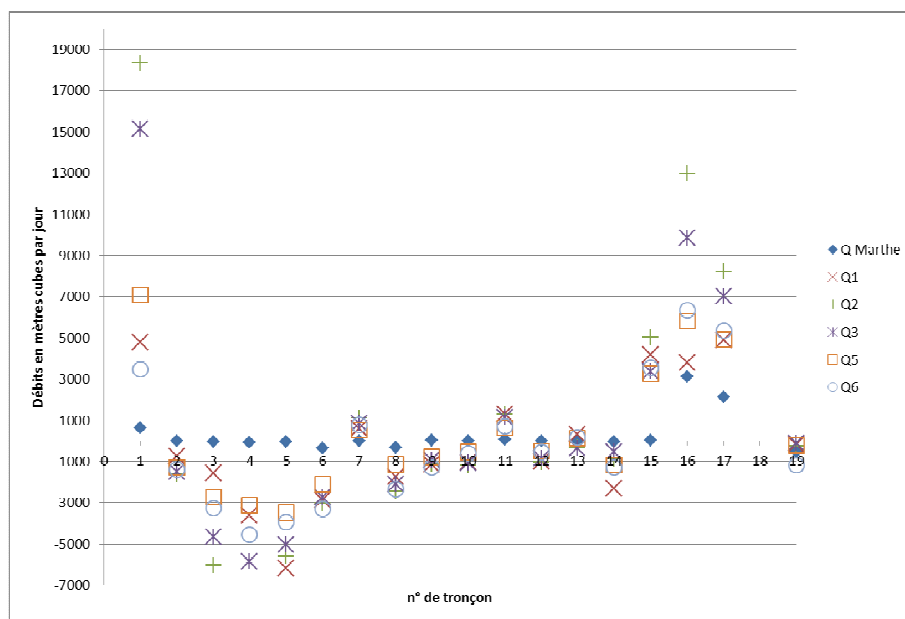


Figure 54 : Comparaison des débits Marthe vs analyse SIG

4.2. Rhône – Donzère-Mondragon / Plaine du Tricastin

Cette partie est tirée des résultats commentés issus du croisement des métriques (Analyse SIG, Macrophytes, Invertébrés souterrains, physico-chimie et isotopes) pour les deux rives du Vieux-Rhône, du canal de dérivation et de l'Ardèche dans le cadre du projet ZABR/AE-RMC « Échanges nappes/Rhône » (Bornette et al., 2012).

Code couleur	Typologie des échanges
	Métrique non-utilisée dans le diagnostic
	Pas de données / pas de site d'échantillonnage
	Echange de la nappe vers la rivière
	Echange de la rivière vers la nappe
	Pas d'échange / Equilibre nappe/rievière
	Colmatage
	Sous-écoulement
	Recyclage
	Mélange d'eau de rivière et de nappe

Tableau 24 : Code couleur utilisé pour la typologie des métriques et dans le tableau de comparaison des métriques (les tons gris blanc ne sont utilisés que dans les tableaux car ils codent respectivement une métrique non-utilisée et l'absence de données).

4.2.1. Typologie des échanges nappes/rivières

Une typologie schématique des échanges nappes/rivières a été établie lors des phases 3 et 4 du projet ZABR/AE-RMC. Chacun des types a été associé à un code couleur et fait l'objet d'une représentation schématique sous forme de diagramme. Le code couleur sélectionné correspond à celui utilisé dans les tableaux de comparaison des métriques. Seuls les tons gris et blanc ne sont utilisés que dans les tableaux

car ils codent respectivement une métrique non-utilisée et l'absence de données. Le Tableau 24 présente le code couleur sélectionné actuellement. Celui-ci sera utilisé pour le projet NAPROM et modifié en fonction des besoins.

4.2.2. Comparaison des métriques

La comparaison des métriques est effectuée sous forme de tableau. Le Tableau 26 présente le diagnostic des échanges nappes/rivières par croisement des métriques pour gauche du Vieux-Rhône. Ce tableau reprend les codes couleurs établis pour les typologies schématiques des échanges nappe/rivière. Le diagnostic est présenté à l'échelle du PK (en ligne) séparément pour chacune des métriques (colonnes de gauche), puis est interprété de manière synthétique et unique (colonne centrale). De plus, les colonnes de droite proposent une évaluation de l'incertitude, à dire d'experts pour l'instant, concernant le sens de l'échange pour chacune des métriques sous forme d'indice de 0 à -5 (Tableau 25).

Code couleur et indice de pénalité	Signification de la pénalité sur le sens de l'échange
0	Bonne évaluation du sens
-1	Incertitudes faibles sur le sens
-2	Incertitudes fortes sur le sens
-5	Evaluation douteuse ou suspectée mauvaise du sens

Tableau 25 : Indice de pénalité et/ou pondération pour les sens des échanges

4.2.1. Diagnostic de synthétique des échanges nappes/rivière

Les travaux réalisés dans le cadre du projet ZABR/AE-RMC sont présentés ici de manière synthétique et simplifiée. La Figure 55 spatialise ces résultats. Les échanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche sont caractérisés de la façon suivante :

- **Ardèche rive droite**
 - PK 8 à 3 : apports de nappe à l'Ardèche / 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) / Recyclage PK 186 à 189
 - PK 187 à 201 : sous-écoulement de l'Ardèche à travers la plaine vers le Vieux-Rhône

Donzère-Mondragon - Vieux-Rhône - Rive gauche										
PK	Hydraulique				Isotopes		Invertébrés		Macrophytes	
	07/1968	09/1969	06/2008	03/2009	04/2011	04-06/2008	05/2008	06/2008	06-07/2008	Physico-chimie
	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)	ME	ME	ME	ME/BE	Eau sup. 06-07/2008
	BE	BE	BE	ME	ME					ME/BE
171	-3 964		32 824	126 361						
171.5	827			-1 617						
172		-3 963								
172.5		808	-1 324							
173	1 445 843									
173.5	-797									
174		134 031								
174.5		-1 701								
175										
175.5										
176										
176.5										
177										
177.5										
178										
178.5										
179										
179.5										
180										
180.5										
181										
181.5										
182										
182.5										
183										
183.5										
184										
184.5										
185										
185.5										
186										
186.5										
187										
187.5										
188										
188.5										
189										
189.5										
190										
190.5										
191										
191.5										
192										
192.5										
193										
193.5										
194										
194.5										
195										
195.5										
196										
196.5										
197										
197.5										
198										
198.5										
199										
199.5										
200										

[1] Sous-écoulement du contre-canal (canal de dérivation) vers le Vieux-Rhône à travers la Plaine
[2] Sous-écoulement de l'Ardèche sous le Rhône

Tableau 26 : Croisement des métriques pour la rive gauche du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon

Les points d'interrogation (???) indiquent des secteurs sur lesquels l'incertitude du diagnostic pour certaines métriques n'a pas pu être déterminée avec précision.

- 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 / recyclage PK 189 à 193 / 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

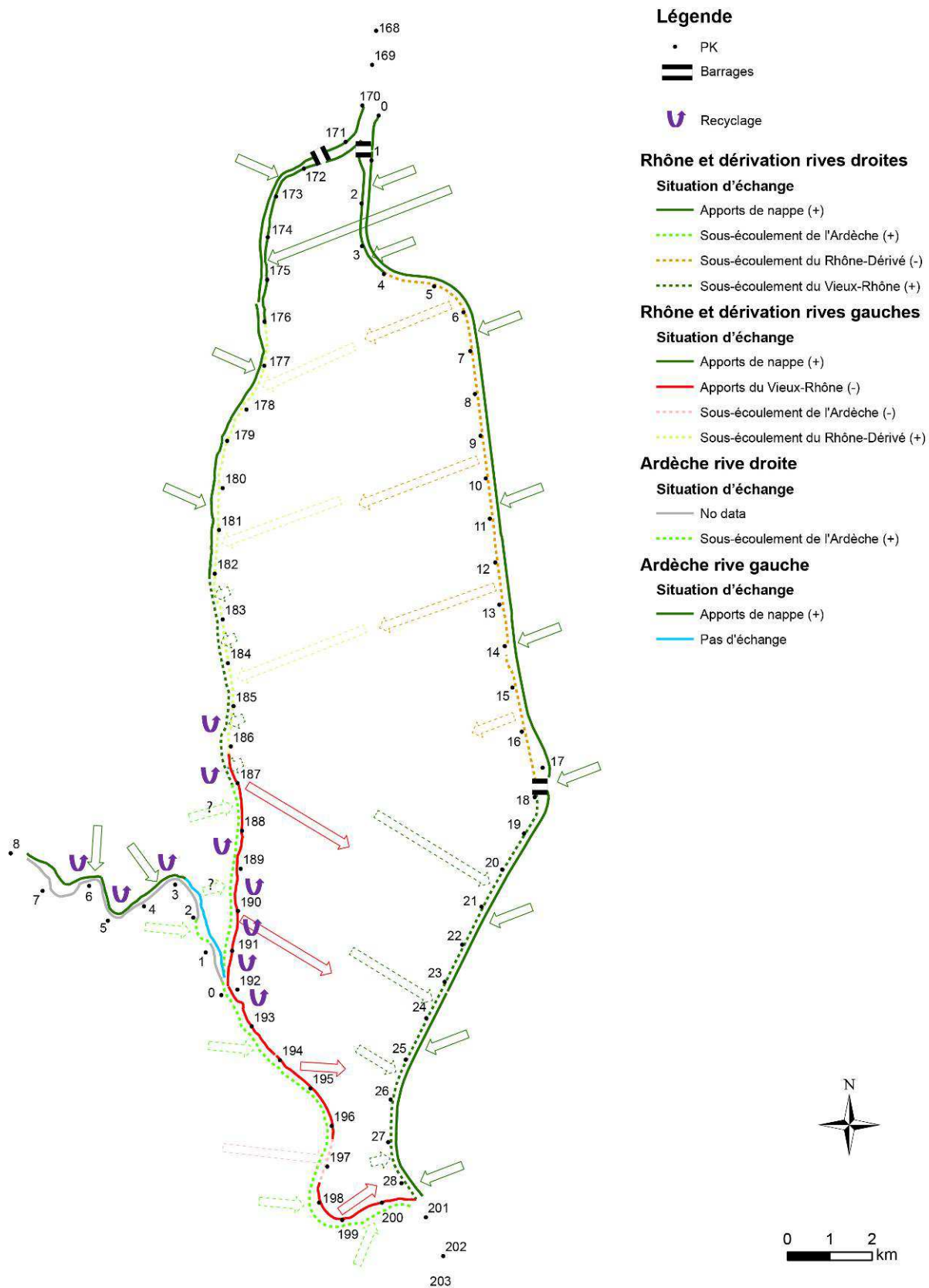


Figure 55 : Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère-Mondragon et pour la confluence Rhône/Ardèche

L'étude de ce site a permis de mettre en avant les éléments suivants :

- globalement ce site est celui qui a bénéficié du plus grand nombre de méthodes ; les résultats sont convergents pour la plupart des méthodes à quelques exceptions près, ce qui a permis d'établir un diagnostic synthétique de manière relativement aisée ;
- la méthode fondée sur l'analyse SIG met en avant une variabilité saisonnière dans le sens et l'intensité des échanges (analyse effectuée sur des piézométries basses-eaux et moyennes-eau) ; elle met aussi en avant des changements dans le temps des directions générales des écoulements souterrains (analyse effectuée sur des piézométries récentes et passées) ;
- les analyses isotopiques permettent de discriminer facilement les eaux locales des eaux du fleuve Rhône ;
- la plupart des sites hébergent une faune stygobie importante et intéressante ; la métrique de faune stygobies testée à différentes périodes montre que les apports de nappe fluctuent fortement dans le temps, avec des diminutions notables à l'étiage ; le phénomène de recyclage est diagnostiqué à plusieurs reprises et apporte une information complémentaire aux métriques géomatiques et géochimiques ;
- la diversité de la végétation aquatique est aussi intéressante ; le diagnostic fondé sur cet outil met bien en avant les apports de nappe diffus sur de courts linéaires de berge, les secteurs influencés par des sous-écoulements liés au fleuve Rhône notamment sous le canal de dérivation, un secteur particulier où l'écoulement de l'aquifère passe sous le fleuve Rhône.

4.3. Rhin – Plaine de l'Il

4.3.1. Expériences réalisées avec la plateforme Eau-Dyssée

La période de simulation s'étend d'août 1985 à août 2003. L'objectif est de caractériser les échanges nappes/rivières en utilisant les trois méthodes d'estimation de hauteur en rivière citées dans la section précédente (hauteur fixe, hauteur estimée par l'équation de Manning Strickler, hauteur estimée avec la courbe de tarage). Par ailleurs, le sens et la quantité des échanges dépendent en grande partie de l'altitude du niveau de la rivière. Cette altitude est le plus souvent déterminée via un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et dépend donc fortement des incertitudes liées à ce type de données (résolution, type de terrain, instrumentation, etc.). Quatre simulations seront présentées :

- CTL : simulation de contrôle avec hauteurs d'eau fixes en rivière ; cette simulation utilise des niveaux de rivière constants issus d'un MNT (données satellites SRTM) et utilisé à la base dans le cadre du projet MONIT au sein d'un modèle hydraulique régional (LUBW, 2006 ; Thierion, 2011) ;
- CST : simulation avec niveau de rivière constant, mais MNT corrigé et lissé de manière à éliminer le "bruit" inhérent aux données satellites ;
- MAN : simulation avec hauteur d'eau variable en rivière estimée à partir de l'équation de Manning ;
- VAR : simulation avec des hauteurs de rivières variables via l'utilisation de courbe de tarage hauteur/débit mesurées en différentes stations de mesure sur l'Il. Le fond de rivière correspond au fond utilisé dans le cadre du projet MONIT et corrigé de la même manière que pour le niveau d'eau en rivière de la simulation CST [Saleh et al., 2011].

4.3.1.1.1. Paramètres de l'équation de Manning (simulation MAN)

La largeur du fleuve W est calculée dans chaque maille selon la formulation empirique décrite dans (Decharme et al., 2012) :

$$W = \beta Q_{yr}^{0.5}$$

Avec Q_{yr} (m^3/s) la moyenne annuelle du débit calculée à partir de la moyenne annuelle des débits simulés par RAPID dans chaque maille sur la période 1986-2003. Le coefficient β est fixé à 9 pour l'application sur le Rhin. Cette valeur de

β a été choisie de manière à obtenir des largeurs cohérentes sur le fleuve du Rhin (environ 300 m à l'exutoire du Rhin sur le domaine étudié).

Le coefficient de Manning n traduit la résistance qu'exerce le lit du fleuve à l'écoulement de l'eau. Sur l'ensemble du bassin versant du Rhin, il varie de manière linéaire dans chaque maille selon l'expression suivante :

$$n = n_{\min} + (n_{\max} - n_{\min}) \left(\frac{SO_{\max} - SO}{SO_{\max} - 1} \right)$$

Avec SO la séquence de rivière de la maille, et $SO_{\max}$ la séquence maximum du bassin versant correspondant à la maille située à l'embouchure du fleuve. Une telle représentation repose sur l'hypothèse que la rugosité du lit joue un rôle plus important sur les rivières de faible largeur situées en amont par rapport à celles de plus grande largeur situées en aval (Decharme et al., 2010). $n_{\max}$ est fixée à 0,06 ; $n_{\min}$ à 0,04.

La pente du lit de la rivière s dans la maille est déterminée par rapport à la topographie et aux directions d'écoulement selon la formulation suivante :

$$s = \max \left(\frac{Z - Z_{\text{next}}}{L}, 10^{-5} \right)$$

Avec Z (m) la topographie dans la maille, Z_{next} (m) la topographie dans la maille voisine aval et L la longueur de la rivière.

Enfin, le fond de la rivière Z_{fond} à 200 m de résolution a été obtenu à partir de la topographie SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) à 50 m de la manière suivante : la valeur minimum des mailles à 50 m dans une maille à 200 m a été prise comme étant la valeur du fond de la rivière.

4.3.1.1.2. Hauteur moyenne d'eau et courbe de tarage

Trente mesures de hauteurs d'eau et de débit ont été obtenues uniquement sur la partie française à partir de la base donnée hydrologique BDHydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). La Figure 56 montre deux exemples de courbes de tarage obtenues avec ces données : l'une prise sur l'Ille, l'autre sur la Sauer.

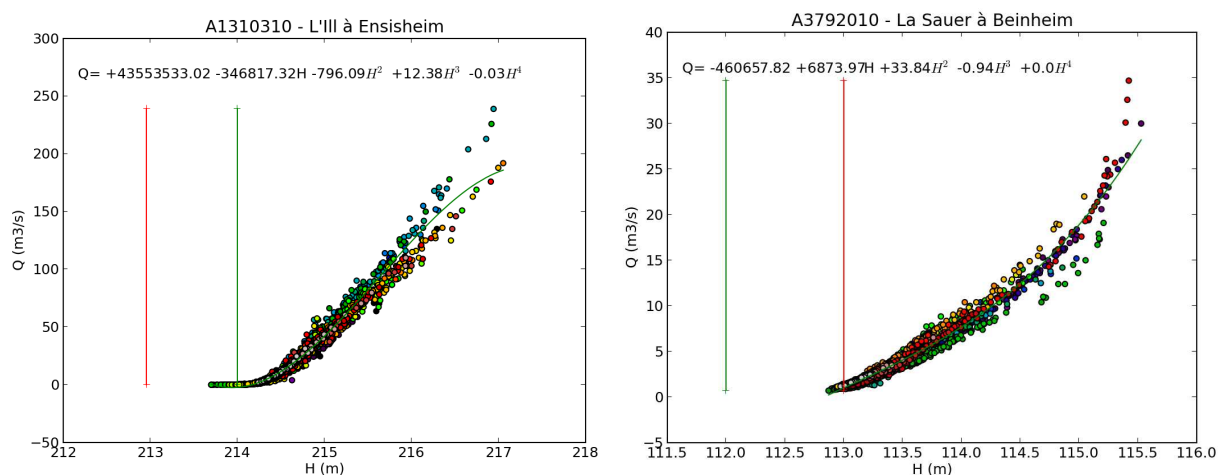


Figure 56 : Exemple de courbe de tarage sur l'Ille (à gauche) et sur la Sauer (à droite). Les droites rouges correspondent aux hauteurs fixes de la simulation CTL, les vertes aux hauteurs de référence des données de la BDHydro (zéro de l'échelle limnimétrique).

Il s'agit dans les deux cas d'une régression polynomiale d'ordre 3. Les courbes rouges correspondent aux hauteurs de rivières fixées pour la simulation CTL. Ces hauteurs fixes sont censées être représentatives de

la hauteur moyenne du cours d'eau. On voit clairement sur la figure de gauche que ce n'est pas toujours le cas puisque la hauteur fixe en rivière (courbe rouge) se trouve en-dessous du niveau de référence de l'échelle limnimétrique utilisée pour les mesures de hauteur en rivière (courbe verte). Celle représentée sur la figure de droite semble en revanche plus cohérente. Ces deux exemples soulignent la difficulté à correctement estimer les altitudes de surface et de fond de rivière dans les modèles à partir des données topographiques actuelles issues des MNTs.

4.3.1.1.3. Données d'observation utilisées pour l'évaluation du modèle

L'évaluation du modèle s'effectue en comparant les sorties des simulations avec un réseau de 97 stations de mesures de débit réparties sur l'ensemble du domaine et 190 piézomètres situés sur la plaine alluviale (Thierion, 2011). Nous utiliserons également les données de hauteurs de rivière récoltées pour la constitution des courbes de tarage.

4.3.1.1.4. Résultats

Dans un premier temps, les simulations CTL (contrôle : hauteur d'eau en rivière fixe) et MAN (hauteur d'eau calculée par l'équation de Manning) sont analysées puis les simulations CST (hauteur d'eau en rivière fixe, mais MNT corrigé) et VAR (hauteur d'eau en rivière variable suivant la courbe de tarage et MNT corrigé) sont comparées à la simulation de contrôle.

- **Échanges nappes/rivières (simulation avec hauteur d'eau en rivière fixe ou variable)**

La Figure 57 présente les échanges d'eau moyens entre la nappe et la rivière sur l'ensemble du domaine souterrain simulé pour la simulation de référence CTL (gauche), et la simulation avec hauteur variable MAN (droite).

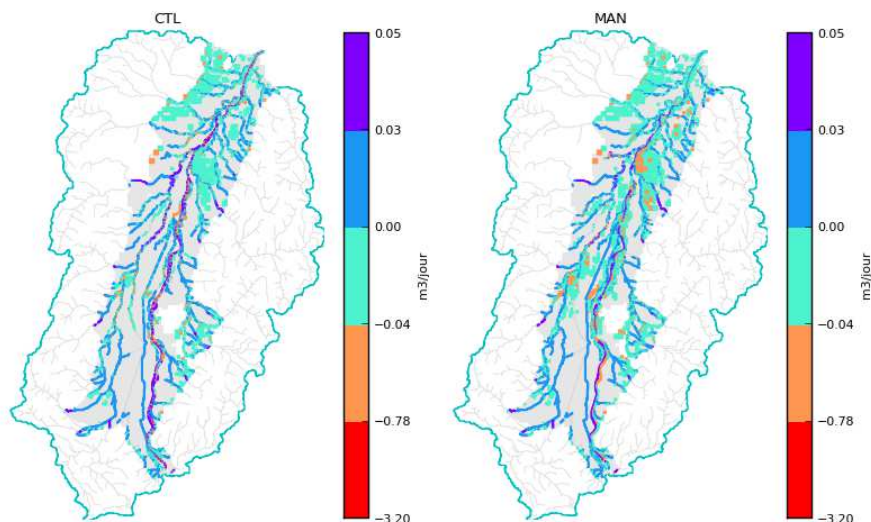


Figure 57 : Moyenne des échanges d'eau entre la surface et l'aquifère pour (à gauche) la simulation avec hauteur fixe (CTL) et (à droite) la simulation avec hauteur variable (MAN). Les couleurs rouges et oranges désignent les secteurs où la rivière alimente la nappe, le violet les secteurs où la rivière draine la nappe et le bleu les secteurs sans échanges diagnostiqués

Sur la figure de gauche, les zones de drainage préférentielles de la nappe sont situées le long des cours d'eau et en bordure de l'aquifère. Dans la partie nord de l'aquifère, la nappe est très proche de la surface, ce qui entraîne un drainage de la nappe important. La rivière draine la nappe sur la majeure partie du cours

du Rhin et une partie de l'Ill amont. La figure de droite présente les mêmes flux calculés cette fois pour la simulation MAN. La distribution spatiale des flux est la même, mais la quantité de flux échangés est plus importante. L'alimentation du Rhin par la nappe est plus importante avec MAN qu'avec CTL. De même, la quantité d'eau drainée avec MAN est plus importante, et les zones de drainage sont plus étendues, notamment en bordure du Rhin et sur la partie centrale de l'aquifère. Ainsi, la moyenne spatiale de la quantité d'eau échangée en valeur absolue sur l'ensemble du domaine vaut 2,75 m³/jour pour MAN et 2,47 m³/jour pour CTL.

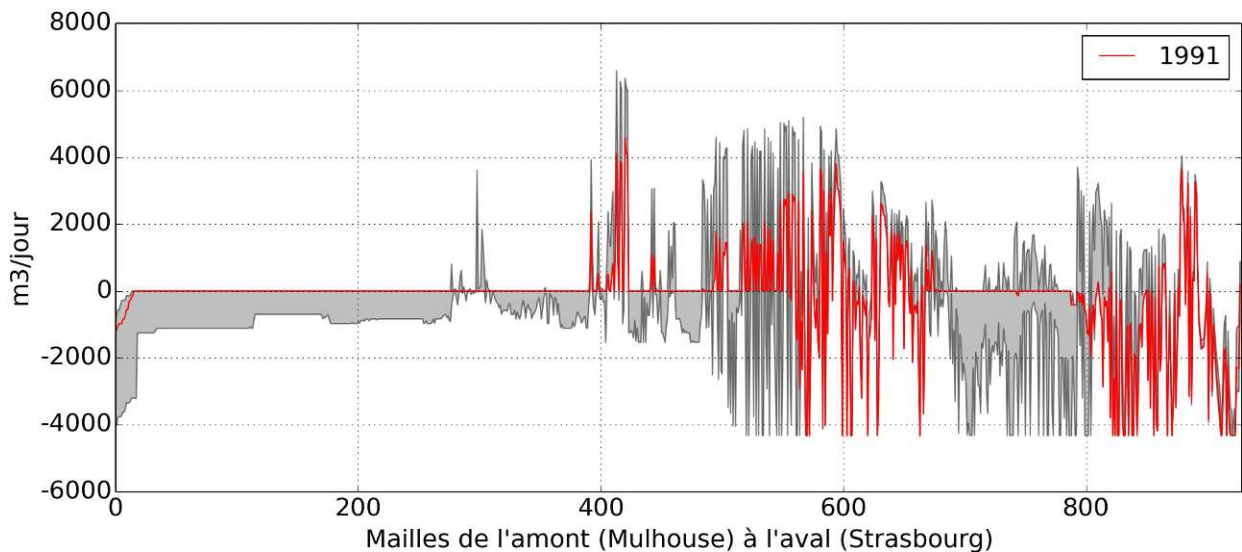


Figure 58 : Profil des échanges nappe/rivière simulées sur l'Ill entre Mulhouse (amont, à gauche sur le graphique) et Strasbourg (aval, à droite) pour le mois de juillet 1991. L'enveloppe grise correspond aux maximum et minimum des échanges pour tous les mois de juillet de 1986 à 2003

Il existe de la variabilité interannuelle dans les échanges. En effet, certains échanges marqués nuls pour le mois de juillet 1991 ne le sont pas pour d'autres. En témoigne la Figure 58 qui compare le mois de juillet 1991 aux autres années pour toutes les mailles rivières le long de l'Ill. Le profil des échanges nappe/rivière pour le mois de juillet 1991 est représenté en rouge. L'enveloppe grise correspond à la plage de valeurs prises par les échanges nappe/rivière pour tous les mois de juillet de la simulation entre 1986 et 2003. Les limites de cette enveloppe correspondent aux maximum et minimum des échanges des mois de juillet de cette période. On voit clairement que sur certaines années, les échanges ne sont pas nuls. Ces différences s'expliquent par des années plus humides que 1991 au cours desquelles l'apport en eau est suffisant pour autoriser des échanges de la rivière vers la nappe dans le modèle.

- **Hauteur en rivière (simulation avec hauteur d'eau en rivière fixe ou variable)**

La Figure 59 montre les séries temporelles observées et simulées sur la période 1985-2003 sur trois stations de mesure de hauteur de rivière. Les cycles annuels moyens journaliers sont également représentés. Les observations sont en noires, la cote fixe en rivière de la simulation CTL en rouge, et la hauteur d'eau en rivière obtenue avec MAN en jaune :

- Le graphique du haut sur la figure correspond à une mesure prise en amont de l'Ill. Les deux simulations sous-estiment les niveaux moyens de hauteur de rivière par rapport aux observations. La variabilité des hauteurs d'eau simulées par MAN semble en revanche cohérente par rapport aux observations.

- Le graphique au milieu de la figure représente les résultats obtenus plus en amont de l'Ill à Strasbourg. Les hauteurs d'eau observées varient peu dans le temps, voire sont quasi-constantes. La

hauteur fixe choisie pour CTL est cohérente avec le niveau moyen des observations. En revanche, la simulation MAN surestime largement l'amplitude et le niveau moyen du signal observé.

- Le dernier graphique, en bas de la figure, montre un exemple de mesure sur la Sauer où, à l'inverse, la simulation MAN reproduit de manière satisfaisante les observations, alors que la hauteur fixe choisie pour CTL présente un biais d'environ 1 mètre par rapport aux observations.

Ces premiers résultats qualitatifs montrent à quel point il est difficile d'estimer une altitude correcte des hauteurs d'eau en rivière à partir d'un modèle numérique de terrain.

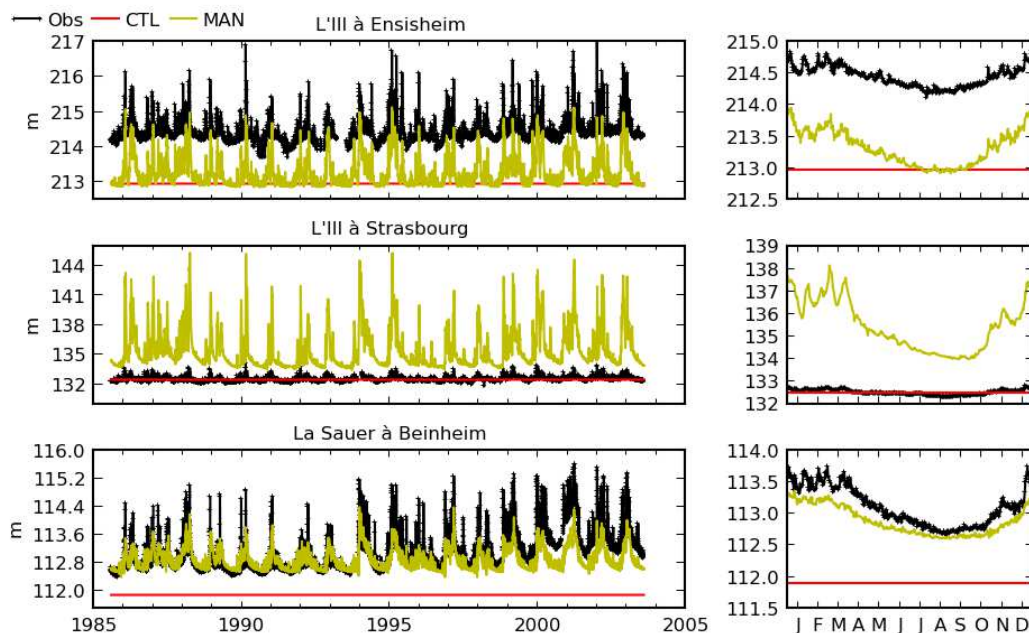


Figure 59 : Séries temporelles des variations de hauteurs de rivière observées et simulées par CTL et MAN pour trois exemples de stations de mesure. Les cycles annuels moyens journaliers sont également représentés

- **Hauteur de nappe (simulation avec hauteur d'eau en rivière fixe ou variable)**

La Figure 60 (partie gauche (a)) montre les biais de hauteur de nappe de la simulation de référence CTL. Par rapport aux observations, les niveaux moyens de nappe sont sous-estimés à l'ouest du Rhin et surestimés à l'est. Les biais restent relativement faibles sur la majeure partie de la plaine, exceptés au sud et en bordure ouest du domaine où ils peuvent atteindre 4 mètres. La Figure 60 (partie droite (b)) illustre les différences de valeur absolue de biais de hauteur de nappe entre la simulation MAN et CTL. Les couleurs rouges signifient que les biais de MAN sont plus faibles, et bleues que ceux de CTL sont plus faibles. De manière générale, la simulation CTL a des biais plus faibles que MAN. On observe malgré tout que les biais de CTL semblent être corrigés sur la partie sud-ouest du domaine, et qu'en revanche les biais sont accentués sur la partie sud-est du domaine avec MAN.

Il semble que ces biais soient essentiellement dus au choix de la topographie utilisée pour déterminer le fond de la rivière dans l'équation de Manning. Sur la plaine alluviale du Rhin, les hauteurs de nappe dépendent fortement du niveau d'eau en rivière, et une mauvaise estimation de l'altitude de ces niveaux d'eau entraîne inévitablement des biais sur la simulation des hauteurs de nappe. Cela illustre la difficulté à estimer les paramètres d'altitude en utilisant les modèles numériques de terrain.

La Figure 61 compare les hauteurs de rivière fixes prises pour CTL et la moyenne des hauteurs de rivière simulées avec MAN en termes de biais par rapport aux observations sur l'ensemble des 31 stations de mesure obtenues à partir de la BDHydro. L'altitude des hauteurs de rivière est sous-estimée par CTL en amont du bassin (biais de l'ordre de -3 m), tandis que sur le reste du domaine les valeurs oscillent entre -1 et 1 m. Les biais en amont du bassin sont corrigés en amont du domaine avec MAN, mais on constate une

légère dégradation des résultats sur les stations localisées en aval. Ces biais sont très certainement dus au choix du MNT utilisé dans les deux cas (issu du projet Monit pour CTL et issu des données SRTM pour MAN). Cela illustre une nouvelle fois la difficulté à estimer ces hauteurs de rivière en se basant sur des données topographiques.

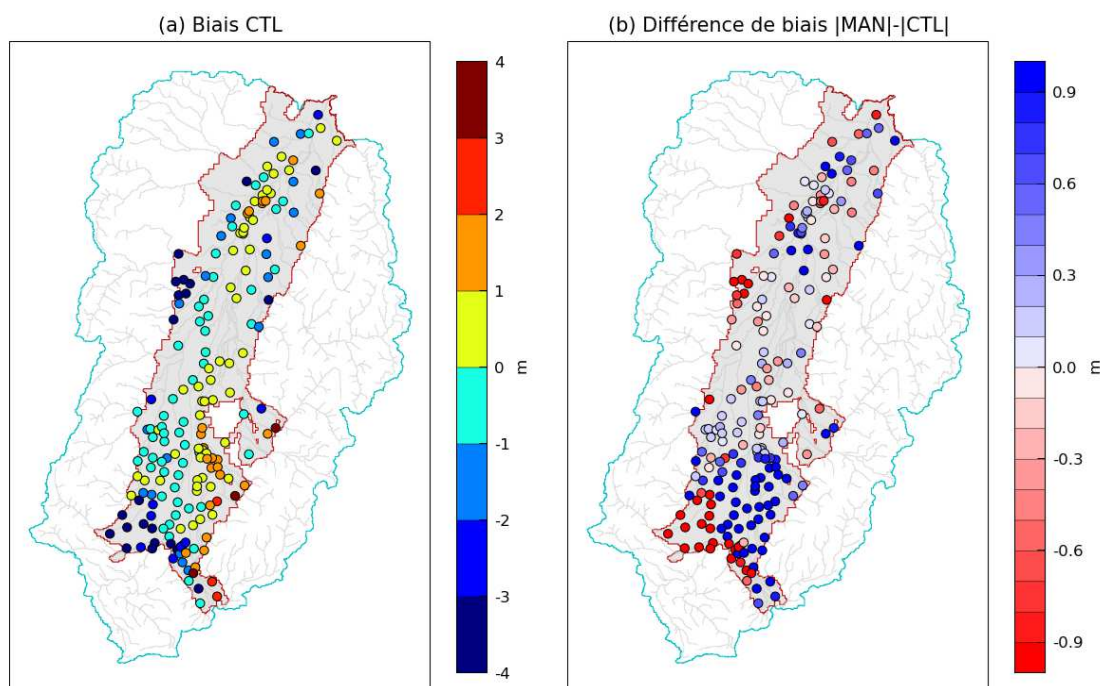


Figure 60 : Comparaison entre les hauteurs de nappe observées et simulées sur la période 1985-2003 aux 190 piézomètres. (a) Les biais pour la simulation de référence CTL et (b) les différences entre MAN et CTL (en valeurs absolues) sont représentées

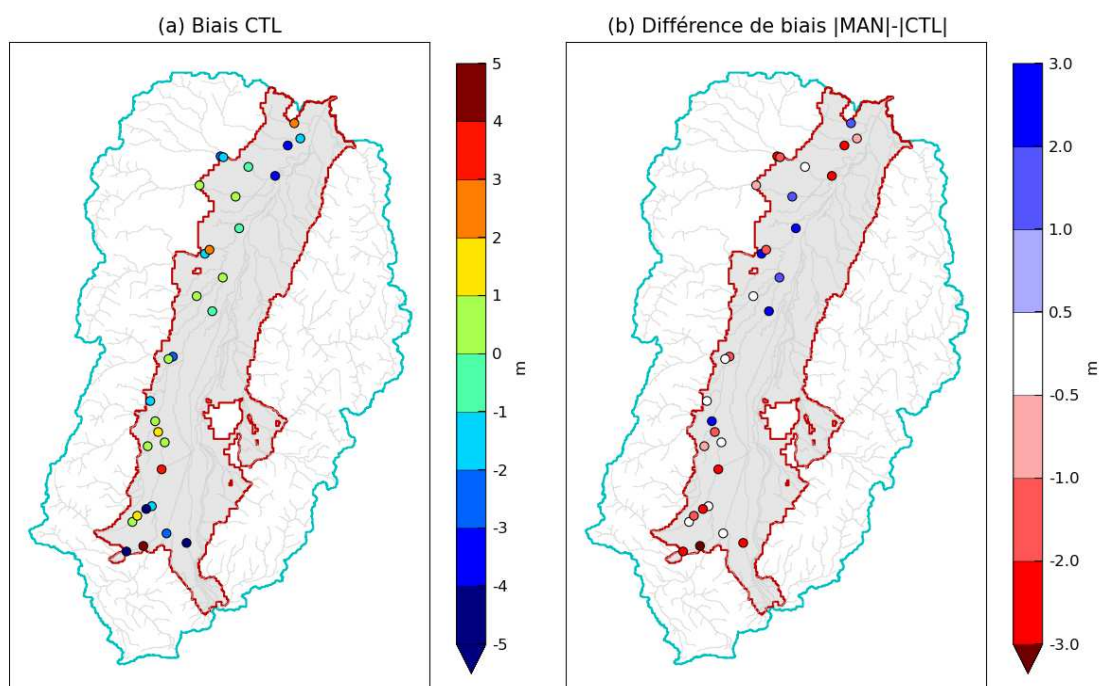


Figure 61 : Comparaison entre les hauteurs de rivière observées et simulées sur la période 1985-2003 au 31 stations de mesure issues de la BDHydro. (a) Les biais pour la simulation de référence CTL et (b) les différences entre MAN et CTL (en valeurs absolues) sont représentées

- **Hauteurs variables : choix du MNT et utilisation des courbes de tarage pour la hauteur d'eau en rivière**

La Figure 62 montre les profils de hauteur de rivière le long d'un tronçon de l'Il. Le niveau d'eau non-corrigé utilisé pour CTL est en rouge, le niveau corrigé utilisé pour CST en bleu et l'altitude du lit de la rivière utilisé pour VAR en vert. On constate tout de suite que le MNT est très bruité. La correction appliquée au MNT (en bleu) correspond à une moyenne mobile opérée sur une largeur de 1,8 km. Elle permet d'obtenir quelque-chose de plus cohérent et sans doute plus réaliste.

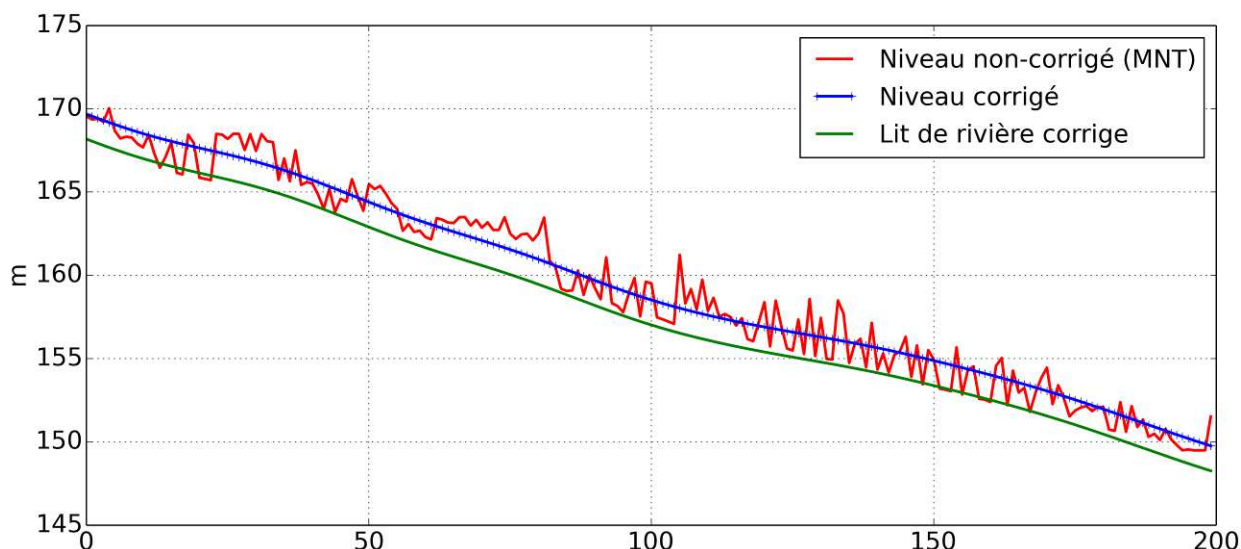


Figure 62 : Zoom sur le niveau d'eau en rivière sur un tronçon de l'Il. Il s'agit là d'un exemple pour illustrer le bruit du signal du MNT

La Figure 63 montre les échanges nappe/riverie le long de l'Il pour ces trois simulations. On voit clairement le lien important qu'il existe entre la détermination des échanges nappe/riverie et le MNT. Le bruit des données du MNT se retrouve dans la simulation CTL (en rouge), alors qu'il n'est plus présent dans la simulation CST (en noir). La prise en compte des hauteurs de rivière variables apporte des changements moins significatifs au regard du choix du MNT. En revanche, elle introduit une dynamique qui n'était pas présente avec CTL ou CST. La Figure 63 montre que là où les échanges sont nuls pour les simulations à hauteurs constantes, une dynamique spatiale apparaît en tenant compte des hauteurs en rivière variables. De plus, les hauteurs variables modifient l'amplitude des échanges et jouent donc sur la quantité d'eau échangée.

Enfin, la Figure 64 compare les variations de hauteur de rivière pour deux stations de mesure sur l'Il prise en amont à Colmar et en aval à Strasbourg. Si la simulation avec hauteurs variables (courbe verte) présente une corrélation correcte avec les observations, les amplitudes sont en revanche surestimées, en particulier à Strasbourg. Plusieurs éléments peuvent expliquer ce résultat : erreurs sur le ruissellement et l'infiltration utilisée, incertitudes sur les conditions aux limites du débit en amont, anthropisation du milieu (seuil, barrage, etc.) et enfin faible nombre de stations de mesures utilisé pour la méthode "courbe de tarage" (8 en tout sur l'Il).

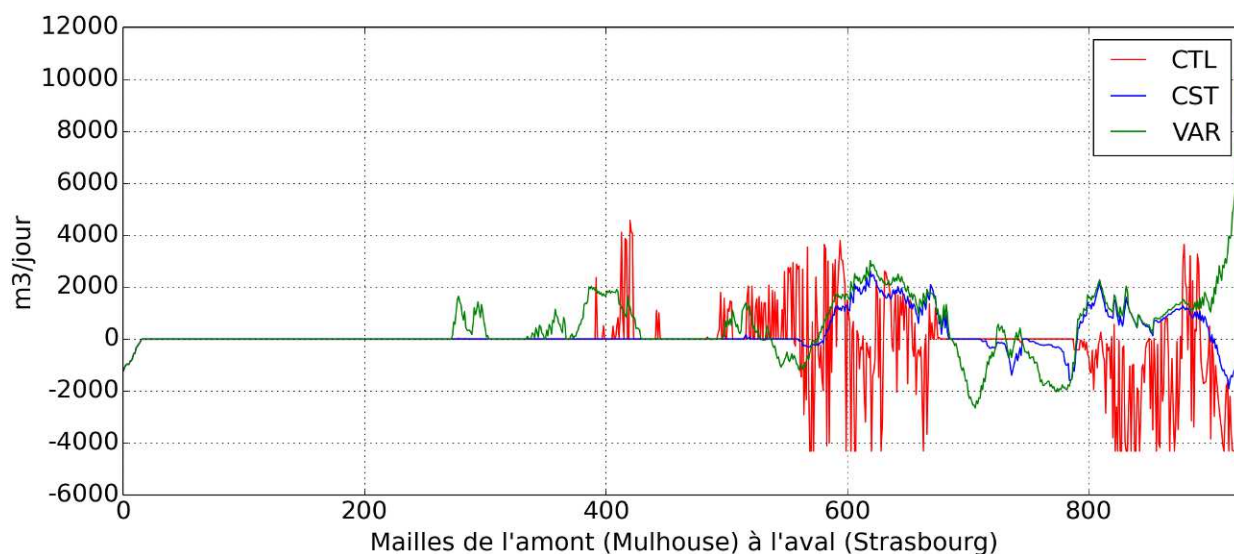


Figure 63 : Profil des échanges nappe/rivière le long de l'Ille pour le mois de juillet 1991 et pour les simulations CTL, CST et VAR

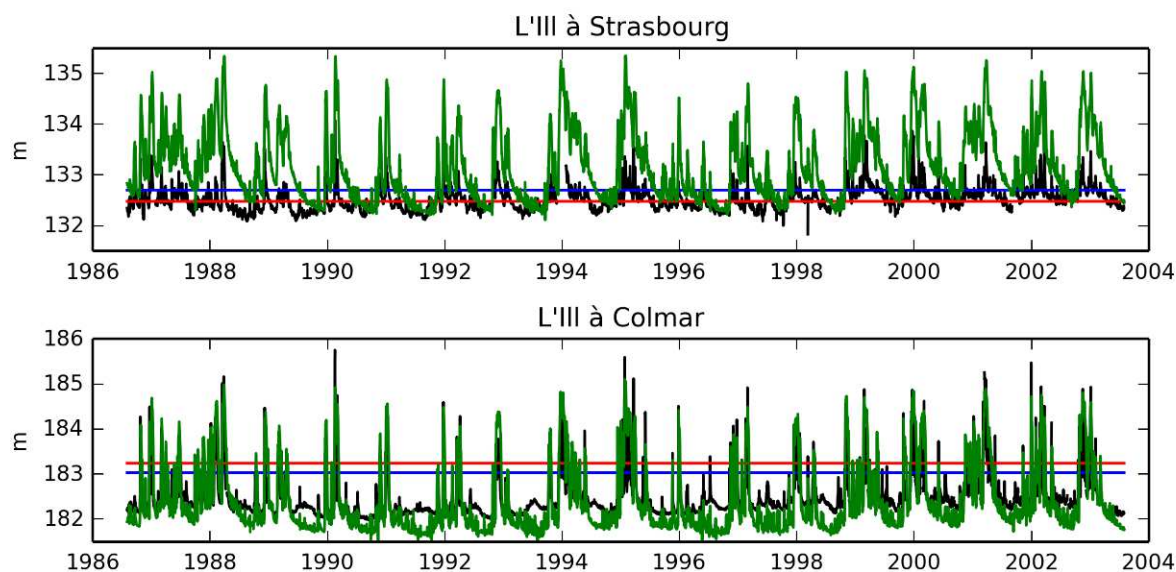


Figure 64 : Séries temporelles de hauteurs d'eau en rivière observées (noir) et simulées. CTL est en rouge, CST en bleu et VAR en vert

En conclusion, ces résultats montrent qu'un fort degré d'incertitude existe lorsque l'on utilise le modèle pour déterminer les échanges nappe/rivière à l'échelle régionale. Cette incertitude est surtout due à la précision de la topographie utilisée pour déterminer l'altitude des rivières. Elle joue sur le sens et la quantité des échanges nappe/rivière. Les hauteurs d'eau variables quant à elles influent surtout sur l'intensité des échanges. Sur certains tronçons, elles introduisent des échanges là où ils étaient nuls auparavant.

4.3.2. Macrophytes

4.3.2.1. Campagne de terrain

L'étude de la plaine d'Alsace, pour la métrique végétation aquatique, est basée sur la bibliographie regroupant des suivis de la végétation de zones humides. Le secteur se situe sur le grand Ried d'Alsace, au

centre de la plaine d'Alsace, délimité par Strasbourg au Nord et Colmar au Sud, entre les montagnes Vosgiennes à l'Ouest et le Rhin à l'Est. Dans cette région, deux zones ont été particulièrement documentées, de par leur intérêt écologique : La vallée de l'Ill, autour de Sélestat et les îles artificielles de Rhinau et Daubensand formées par la dérivation du Rhin du début du 20^{ème} siècle.

Les données concernant la région du Rhin ont été recensées dans les publications qui contenaient des inventaires botaniques. Le travail a permis de recenser les inventaires réalisés essentiellement dans la région de l'Ill, et de leur appliquer la méthode de diagnostic (Amoros et al., 2000).

Le principal problème rencontré dans cette analyse a été de trouver des tableaux phytosociologiques complets utilisant la méthode de Braun-Blanquet avec les points de mesure géoréférencés. Il faut de plus remarquer que la région Alsacienne est surtout réputée pour ses forêts alluviales ; ce sont donc celles-ci, non-inclues dans notre méthode, qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'études. Il fut donc relativement difficile de trouver des données d'une qualité suffisante pour réaliser un bilan exhaustif de la végétation aquatique présente dans la plaine du Rhin.

4.3.2.2. Résultats

4.3.2.2.1. Trophie

Les écosystèmes aquatiques échantillonnés dans la plaine de l'Ill, entre Sélestat et Benfeld sont oligotrophes ou mésotrophes (Figure 65). La partie amont, avant Sélestat, est caractérisée par des niveaux de trophie très hétérogènes, avec un gradient d'oligotrophie à hypereutrophe lorsque l'on se rapproche de l'Ill et de Sélestat. Les milieux aquatiques échantillonnés dans la plaine Rhénane sont eutrophes à hyper-eutrophes, sauf sur la rive gauche du Rhin, à hauteur de l'île de Rhinau, où on observe des situations oligotrophes. La confluence Rhin-Ill, au Nord de Strasbourg, se caractérise par des écosystèmes fréquemment oligo-mesotrophes vers l'Ill (seulement 2 sites) et eutrophes côté Rhin et en Allemagne.

4.3.2.2.2. Apports d'eau souterraine (alluviale ou phréatique)

La carte d'interpolation des indices d'apports de nappe (Figure 66) permet de caractériser 3 zones dans la plaine de l'Ill :

- la zone centrale de l'Ill, entre Sélestat et Benfeld, avec de forts apports d'eau souterraine
- la partie aval et amont de l'Ill, avec des apports moyens
- les secteurs du Rhin caractériser majoritairement par des apports faibles ou nuls

La confluence Rhin-Ill, au Nord de Strasbourg, se caractérise par des apports moyens vers l'Ill (seulement 2 sites) et nul côté Rhin et en Allemagne.

4.3.2.2.1. Probabilité d'apports de nappe phréatique

La carte de probabilité d'apports de nappe de versant (Figure 67) montre les mêmes patrons que la carte des apports d'eau souterraine :

- la zone sud et nord de l'Ill avec une probabilité d'apports phréatiques moyenne à faible,
- la partie centrale de l'Ill avec une probabilité forte d'alimentation par des eaux souterraines oligotrophes, le secteur adjacent en rive gauche du Rhin présentant également des écosystèmes alimentés par des eaux souterraines de bonne qualité, mais la probabilité que ces eaux proviennent en partie de sous-écoulements fluviaux, plus eutrophes, est plus forte.
- Les écosystèmes de la zone de confluence Rhin-Ill présentent des caractéristiques de milieux alimentés par des eaux souterraines de bonne qualité, suggérant une influence forte de la nappe phréatique, et de faibles apports fluviaux. Sur l'île de Rhinau, en aval de la centrale hydroélectrique, les écosystèmes sont également potentiellement influencés par des eaux souterraines de bonne qualité.

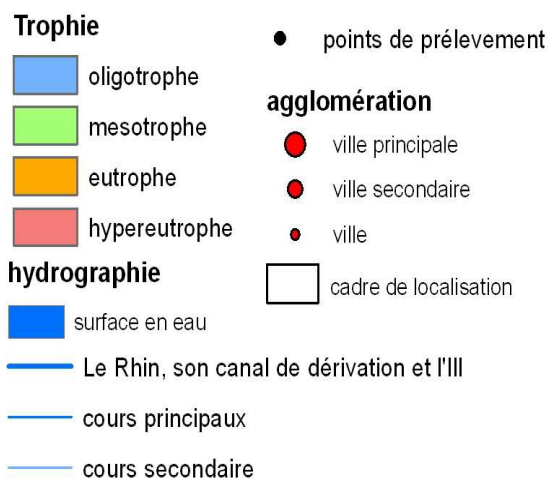
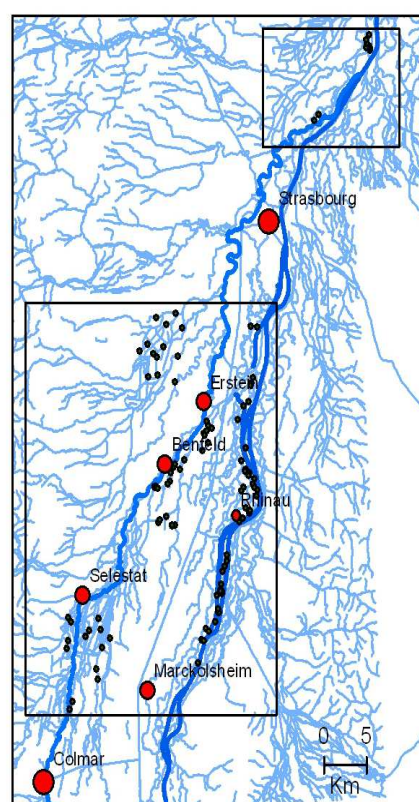
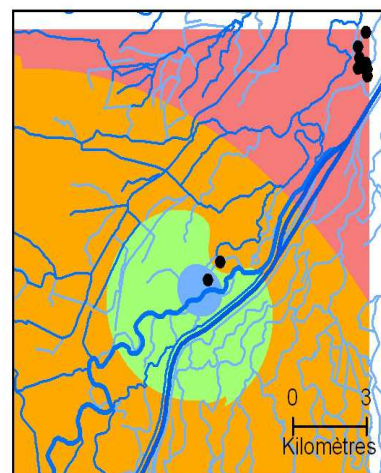
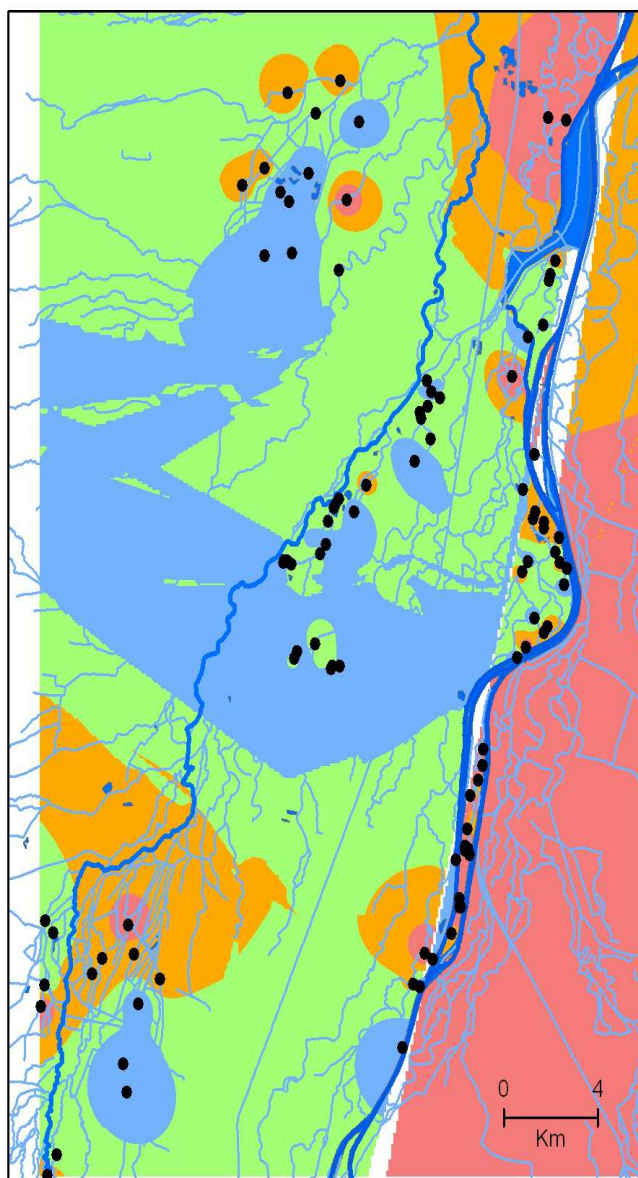


Figure 65 : Estimation du niveau d'eutrophisation de la plaine d'Alsace

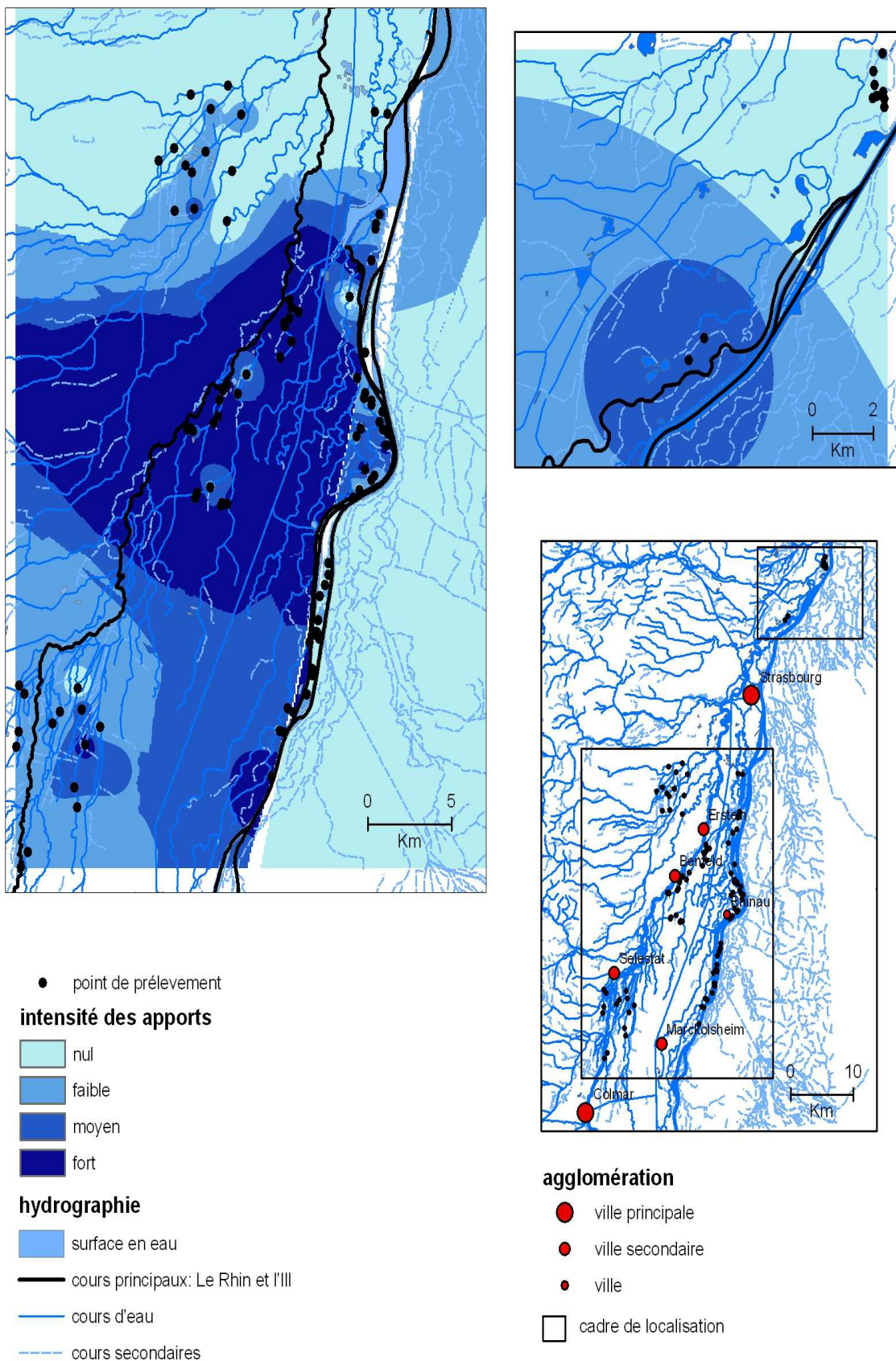


Figure 66 : Estimation de l'intensité des apports d'eau souterraine de la plaine d'Alsace

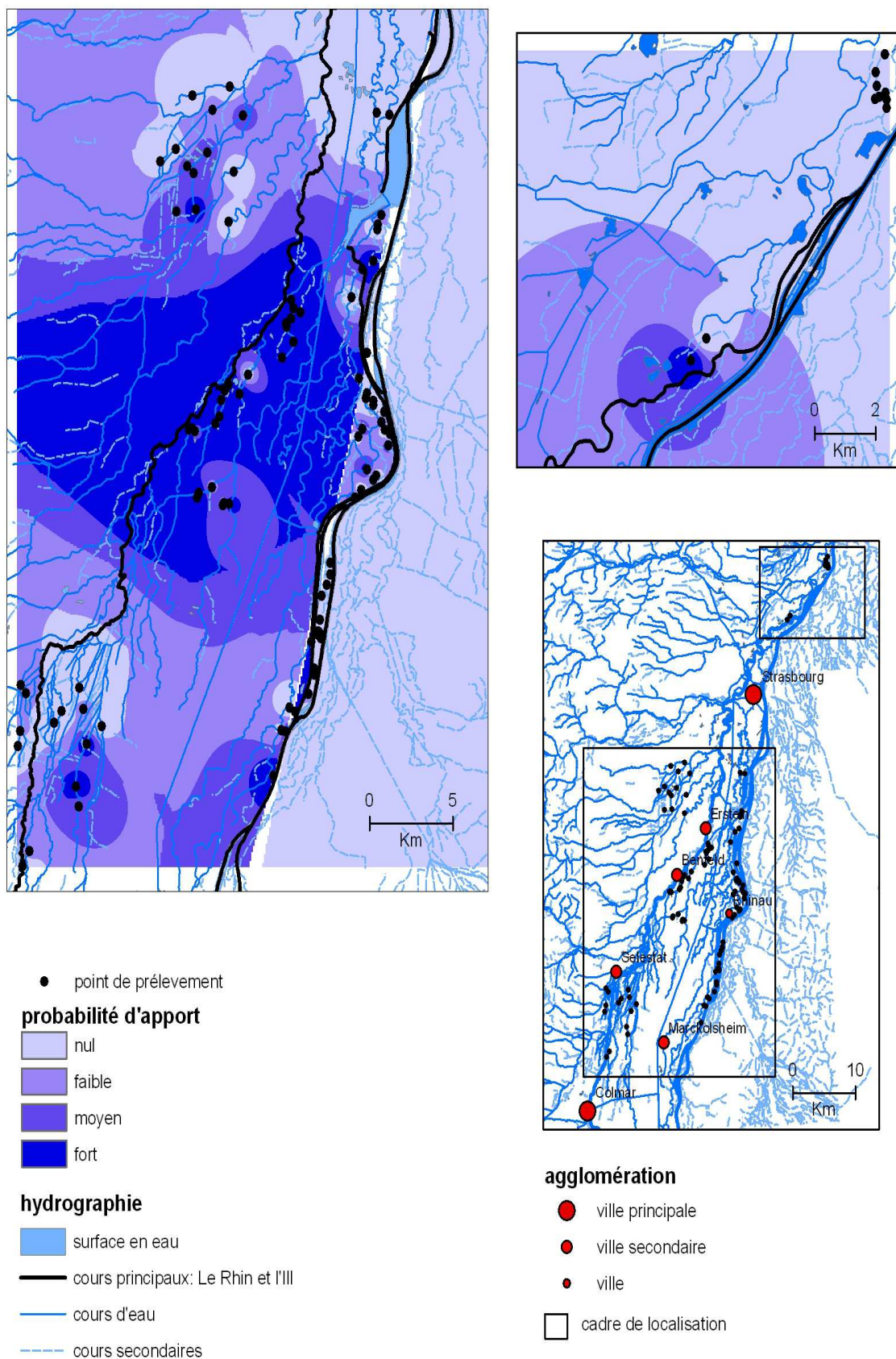


Figure 67 : Estimation de la probabilité d'apports de la nappe de versant de la plaine d'Alsace

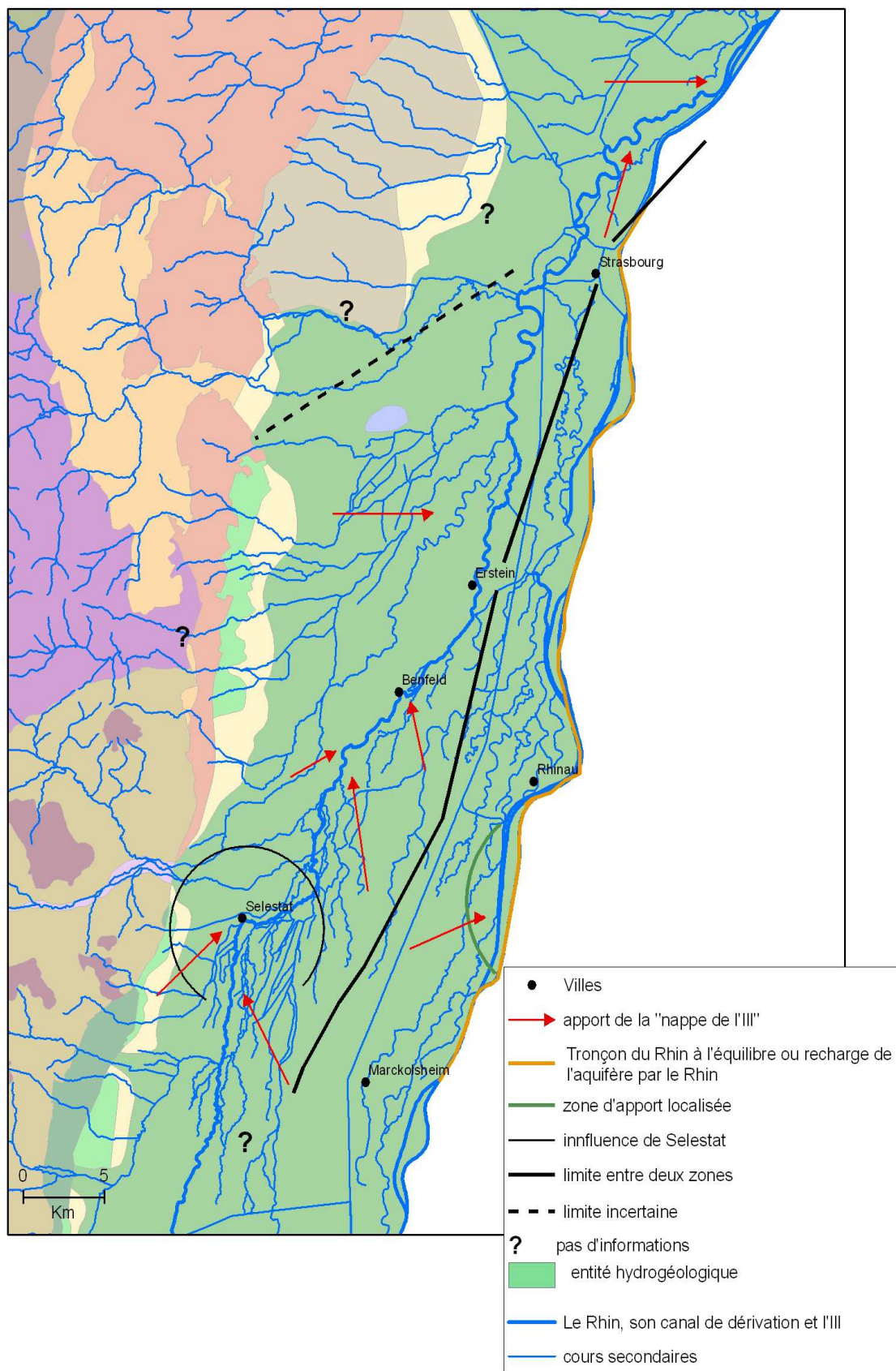


Figure 68 : Synthèse de la métrique végétation aquatique de la plaine d'Alsace

4.3.2.2.1. Interprétation

La carte de synthèse (Figure 68) montre de très forts apports d'eau phréatique au centre de la plaine alluviale, entre Selestat et Benfeld le long de l'III. Il s'agirait de la « nappe de l'III », un sous-secteur de la nappe d'Alsace qui surgirait dans les cours d'eau phréatiques le long de l'III et alimenterait l'III et ses petits affluents en eau de bonne qualité.

Le canal de dérivation du Rhin, qui surélève ce dernier, empêche les échanges avec la nappe d'Alsace, sauf localement en rive gauche au niveau de l'île de Rhinau où le Brunnwasser (cours d'eau) survit et laisse rejaillir la nappe. En effet en rive gauche du Rhin, au niveau de l'île de Rhinau, on observe une étroite bande de paysage dans laquelle les écosystèmes sont oligo-mesotrophes, avec un fort indice d'apport en eau phréatique suggérant le drainage local de la nappe d'Alsace, malgré la proximité du Rhin et de son canal de dérivation. Au niveau de la confluence Rhin-III, l'altitude du Rhin s'abaisse à la sortie de l'aménagement hydroélectrique, ce qui explique probablement qu'il draine la nappe d'Alsace.

4.3.3. Invertébrés souterrains

4.3.3.1. Stations échantillonnées

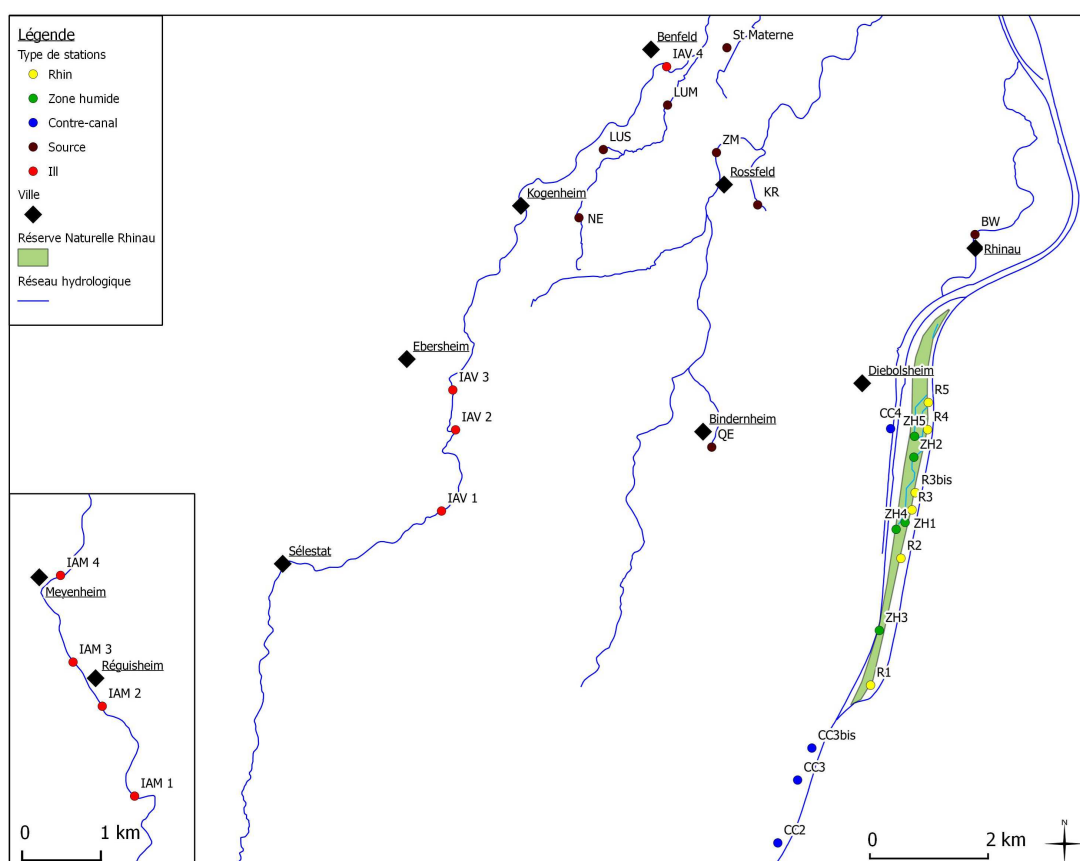


Figure 69 : Répartition des stations d'invertébrés sur la plaine alluviale du Rhin

La campagne de prélèvements a été réalisée en juillet 2012, en période de moyennes eaux. 32 stations ont été échantillonnées (Figure 69) :

- 6 stations sur le chenal court-circuité du Rhin, en rive droite de la Réserve Naturelle de Rhinau (R1, R2, R3, R3bis, R4, R5). En raison d'un colmatage important, un seul prélèvement a pu être fait sur la station R1, au lieu des trois habituels ;

- 4 stations dans le contre-canal gauche du Rhin, entre la forêt domaniale de Marckolsheim et la centrale électrique de Rhinau (CC2, CC3, CC3bis, CC4) ;
- 5 stations dans les zones humides de la Réserve Naturelle de Rhinau (ZH1, ZH2, ZH3, ZH4, ZH5) ;
- 8 stations réparties le long de l'III : 4 en amont, entre la forêt communale de Réguisheim et Meyenheim (IAM1, IAM2, IAM3, IAM4), et 4 en aval, entre Sélestat et Benfeld (IAV1, IAV2, IAV3, IAV4) ;
- 8 stations dans des sources situées entre le Rhin et l'III : Les ruisseaux Hanfgraben (St Materne), Neugraben (NE), Krautlandergraben (KR), Brunnwasser (BW), Bindernheim (QE), ainsi que les cours d'eau de la Lutter (source LUS et médian LUM) et de la Zembs (ZM).

4.3.3.2. Analyse et diagnostic des échanges à partir des invertébrés

La richesse faunistique est de 27 espèces stygobies. Cette forte diversité s'explique par l'histoire biogéographique du Rhin, fleuve qui a été efficacement recolonisé à partir de refuges périglaciaires situés près de la Mer du Nord.

La distribution des espèces stygobies dans les différents secteurs est donnée dans le Tableau 27 :

Groupe taxonomique	Espèce	Rhin	Zones humides	Contre-canal	Sources	III
Copépodes	<i>Elaphoidella elaphoides</i>				x	
	<i>Nitokra psammophila</i>				x	
	<i>Eucyclops graeteri</i>			x		
	<i>Acanthocyclops sensitivus</i>		x	x	x	
	<i>Acanthocyclops stammeri</i>				x	
	<i>Diacyclops zschokkei</i>		x			
Ostracodes	<i>Pseudocandona zschokkei</i>				x	
	<i>Fabaeformiscandona wegelinei</i>		x			
	<i>Fabaeformiscandona bilobatoidea</i>				x	
	<i>Cryptocandona kieferi</i>		x		x	
	<i>Mixtacandona cf laisi</i>				x	
	<i>Cavernocypris subterranea</i>					x
Amphipodes	<i>Niphargopsis casparyi</i>		x	x	x	
	<i>Niphargus foreli</i>		x		x	
	<i>Niphargus fontanus</i>		x		x	
	<i>Niphargus laisi</i>				x	
	<i>Niphargus setiferus</i>				x	
	<i>Bogidiella albertimagni</i>			x		
	<i>Crangonyx subterraneus</i>				x	
Isopodes	<i>Proasellus cavaticus</i>		x		x	
	<i>Proasellus n. sp.</i>				x	
	<i>Proasellus slavus</i>				x	
	<i>Proasellus walteri</i>		x		x	
	<i>Proasellus sp.</i>	x		x	x	
Gastéropodes	<i>Bythiospeum sp.</i>				x	
Syncarides	<i>Bathynella sp.</i>		x		x	
Cladocères	<i>Phreatalona phreatica</i>	x				x
Nombre total d'espèces stygobies		2	10	5	21	2

Tableau 27 : Distribution des espèces stygobies dans les différents types de stations

Les espèces ubiquistes des classes 1 et 3 (par exemple l'ostracode *Cryptocandona kieferi* et l'amphipode *Niphargopsis casparyi*) sont présentes dans quasiment tous les types de milieux. Toutefois, l'ostracode *Pseudocandona zschokkei* est lui présent uniquement dans les sources alors qu'il est connu pour être également ubiquiste.

Les espèces de la classe 2 (l'ostracode *Fabaeformiscandona wegelinei* et le cladocère *Phreatalona phreatica*) présentes sur ZH1, R2 et l'III en amont suggèrent quant à elles plutôt un recyclage d'eau de surface circulant dans les interstices, sur de faibles distances (boucle de spiraling).

Enfin, les espèces phréatobies de la classe 4 sont représentées par des syncarides du genre *Bathynella sp.* (sur les stations LUS et ZH1), l'ostracode *Mixtacandona cf laisi* (BW, KR, LUS) et l'amphipode *Bogidiella albertimagni* (CC3) où elles pourraient indiquer des arrivées d'eau profonde.

La Figure 70 présente la valeur de l'indice d'échange qui combine l'abondance des espèces stygobies et leurs traits écologiques. La figure montre également le nombre d'échantillon dans lequel des espèces stygobies ont été trouvées, ceci afin de renseigner sur la distribution spatiale des échanges (généralisés ou localisés).

Deux habitats hébergent des communautés donnant des valeurs fortes à l'indice d'échange :

- Les sources : c'est dans ce type de milieux où la faune stygobie est la plus riche, avec 21 espèces récoltées (copépodes, ostracodes, amphipodes, isopodes, gastéropodes et syncarides). Les valeurs de l'indice d'échange sont plus fortes au nord de la zone d'étude (LUM, LUS, KR et Saint-Materne), un peu plus faibles dans la zone centrale (ZM et QE) ou près du Rhin (BW). Enfin, une station de la plaine alluviale (NE) n'héberge aucune faune souterraine. D'un point de vue de la répartition des espèces, certains résultats soutiennent l'idée d'un apport de nappe profond en LUS ou en KR (le syncaride *Bathynella sp.* ou l'ostracode *Mixtacandona cf. laisi*). D'autres sont plus étonnants, comme la présence de ce même ostracode *M. laisi*, en BW où la valeur de l'indice est très faible. Un mélange entre eau de surface et eau souterraine profonde pourrait expliquer cette apparente contradiction.

- Les zones humides où 10 espèces stygobies ont été échantillonnées dans la Réserve Naturelle de Rhinau (copépodes, ostracodes, amphipodes, isopodes et syncarides), surtout au niveau de la station ZH1 (présence de *Bathynella sp.*) ce qui pourrait indiquer une arrivée ponctuelle d'eau souterraine profonde au niveau de cette station, l'intensité des apports sur ce site étant aussi confirmée par la présence d'espèces stygobies dans chaque échantillon. La présence de l'isopode *Proasellus cavaticus* et du copépode *Diacyclops zschokkei* récoltés respectivement en ZH2 et ZH4 indique probablement des apports de nappe dans ces stations, d'autant plus qu'un seul des trois réplicats contient des espèces stygobies.

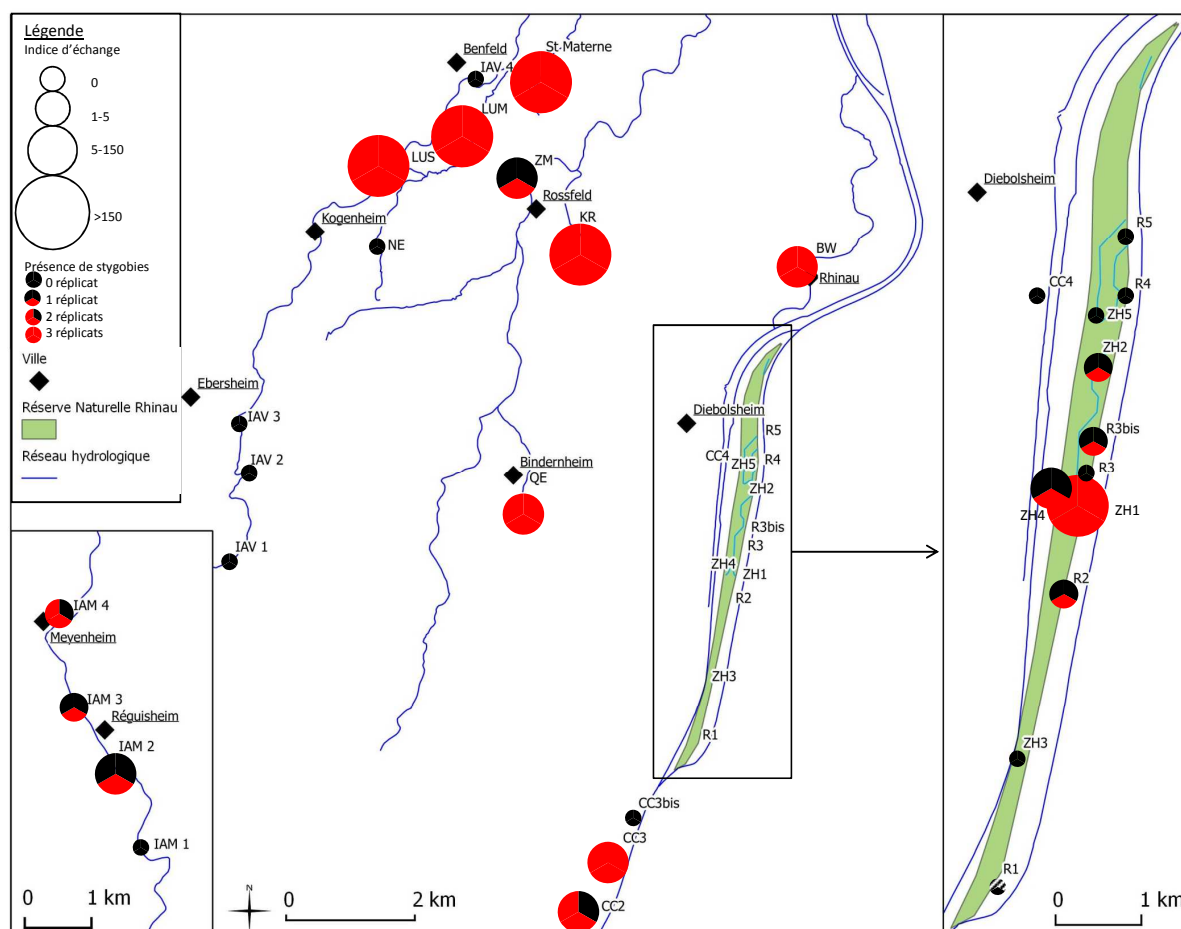


Figure 70 : Indice pondéré des espèces stygobies sur la plaine alluviale du Rhin

Les trois autres habitats sont moins riches en espèces stygobies et l'indice d'échange reste à des valeurs plus faibles :

- Le Rhin : seules deux espèces stygobies ont été échantillonnées dans le Rhin, au niveau de R2 et R3bis (l'isopode *Proasellus sp.* et le cladocère *Phreatalona phreatica*). Ces deux espèces appartenant aux classes écologiques 1 et 2 ne semblent pas indiquer d'apports souterrains profonds, mais plutôt un recyclage de l'eau de surface sur de courtes distances.

- Le contre-canal : les stations CC2 et CC3 ont une faune stygobie assez diversifiée (copépodes, amphipodes et isopodes). Elles hébergent une faune composée d'espèces fréquentes dans le chenal des fleuves (*Niphargopsis casparyi*) mais aussi des espèces phréatobies (*Bogidiella albertimagni*) indiquant des apports de nappe. A l'inverse, aucune espèce stygobie n'est retrouvée au niveau de CC3bis et CC4. Ces deux dernières stations, situées en amont du barrage pourraient être partiellement colmatées.

- L'III : il existe un contraste fort entre les deux secteurs de l'III. En aval, les abondances des peuplements interstitiels sont faibles (moins d'une centaine d'individus pour 10 L sauf en IAV2), les richesses réduites (une dizaine de taxons en général), et aucune espèce stygobie n'a été échantillonnée. Inversement, dans le secteur en amont, les abondances des peuplements et leur richesse sont fortes (plusieurs milliers d'individus pour 10 l). On y retrouve deux espèces stygobies, le cladocère *Phreatalona phreatica* et l'ostracode *Cavernocypris subterranea*. Le secteur en aval semble donc partiellement colmaté par les sédiments fins (sauf en IAV2) alors que la partie en amont est caractérisée par un important recyclage d'eau de surface sur de courtes distances.

4.3.3.3. Analyse et interprétation des caractéristiques physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles échantillonnées sur le secteur (Figure 71, Figure 72, Figure 73 et Tableau 28) confirment les hypothèses d'échange formulées à partir de la faune interstitielle :

- Les eaux interstitielles du chenal court-circuité du Rhin, des zones humides de la réserve et du contre-canal sont assez similaires, avec des conductivités (350-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ par exemple), des concentrations en nitrates et en chlorures faibles, traduisant une origine superficielle commune. Toutefois, quelques stations du Rhin qui hébergeaient de la faune souterraine, comme R2 et R3bis ont des caractéristiques physico-chimiques similaires aux autres stations du chenal du Rhin. De même, les stations CC2 et CC3 ont des caractéristiques physico-chimiques très similaires à celles du chenal du Rhin, mais avec une conductivité un peu plus élevée (en CC3) et des teneurs en oxygène plus faibles. Les caractéristiques physico-chimiques des stations ZH1 et ZH3 sont assez similaires aux autres stations de l'Ile de Rhinau, à l'exception de la conductivité (un peu plus forte en ZH3 et particulièrement faible en ZH1). Enfin, l'III possède des caractéristiques similaires entre l'amont et l'aval, avec une conductivité stable sur tout le linéaire étudié (entre 400 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de faibles concentrations en nitrates et des valeurs intermédiaires de chlorures (surtout sur le secteur en aval).

- Dans les sources de la plaine alluviale, les caractéristiques chimiques de l'eau interstitielle traduisent des apports en eau souterraine : les concentrations en nitrates sont fortes (sans doute en raison de nombreuses activités agricoles) tout comme les valeurs de conductivité (aux alentours de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et de chlorures importantes (en LUS, LUM et NE sans doute d'origine géologique). Seule la source BW (près de Rhinau) fait exception avec des eaux ayant de plus faibles valeurs de conductivité et de nitrates. Cette station, proche du Rhin, est alimentée en surface par les eaux du contre-canal qui pourraient diluer les apports souterrains et les rendre peu perceptibles par ces analyses chimiques simples.

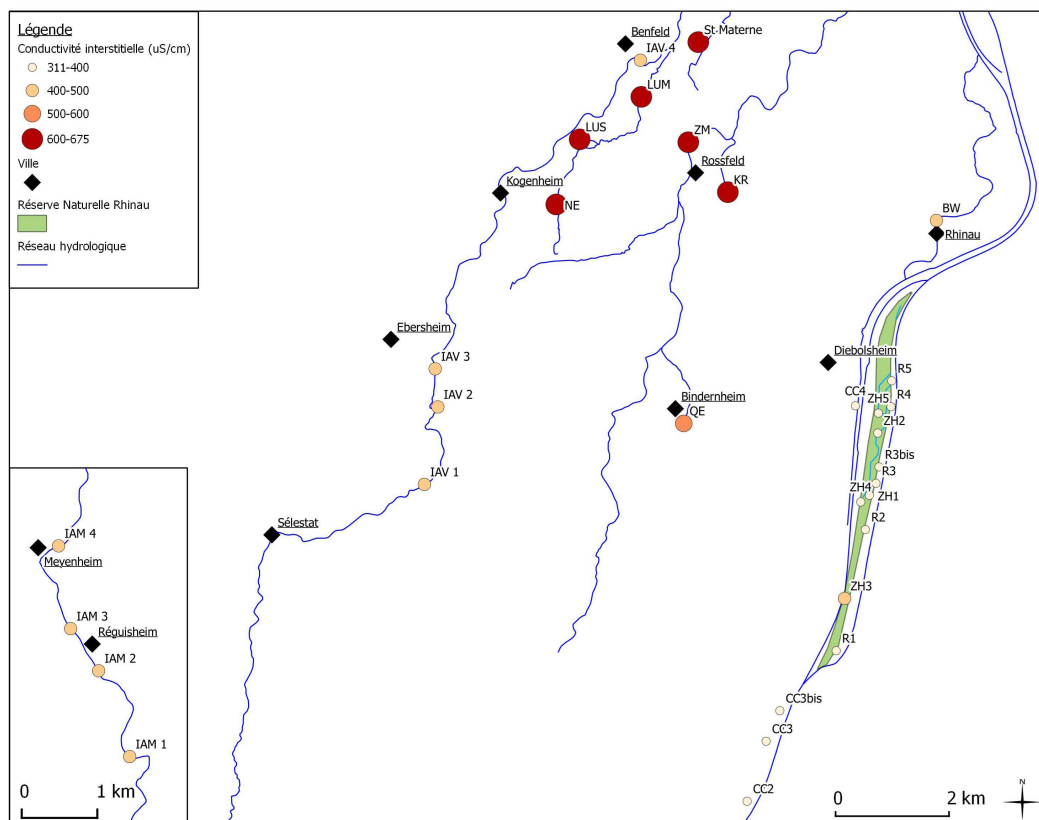


Figure 71 : Conductivité interstitielle des stations

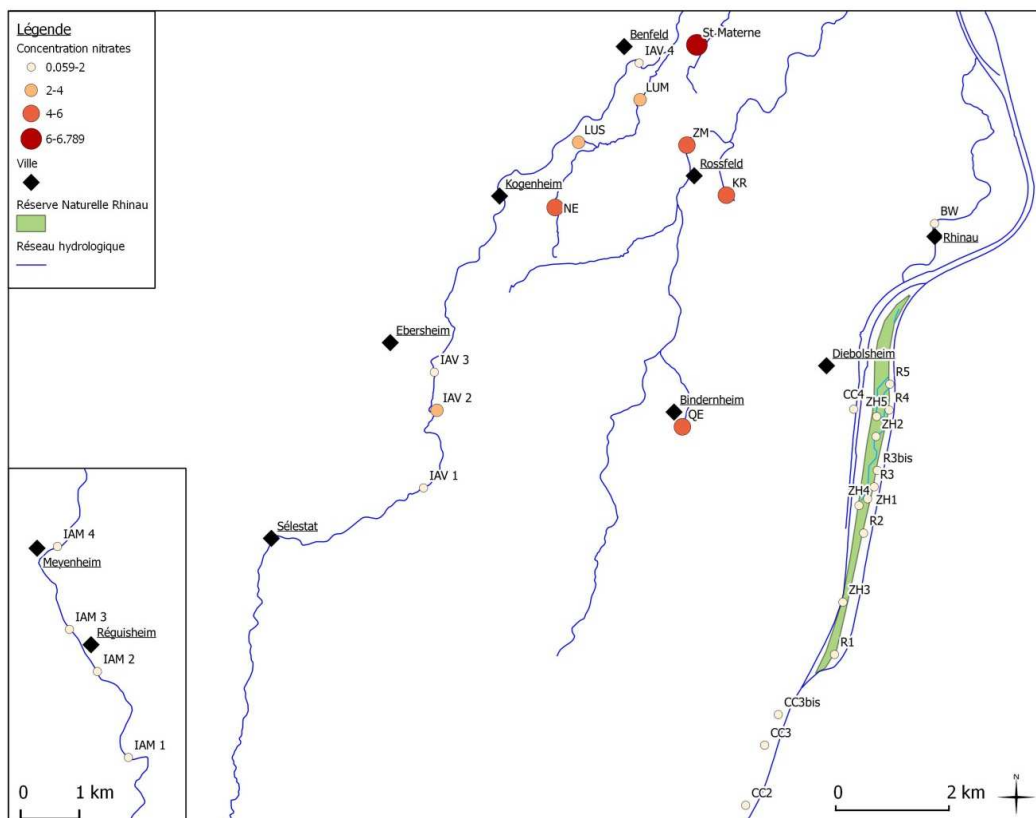


Figure 72 : Concentration interstitielle en nitrates

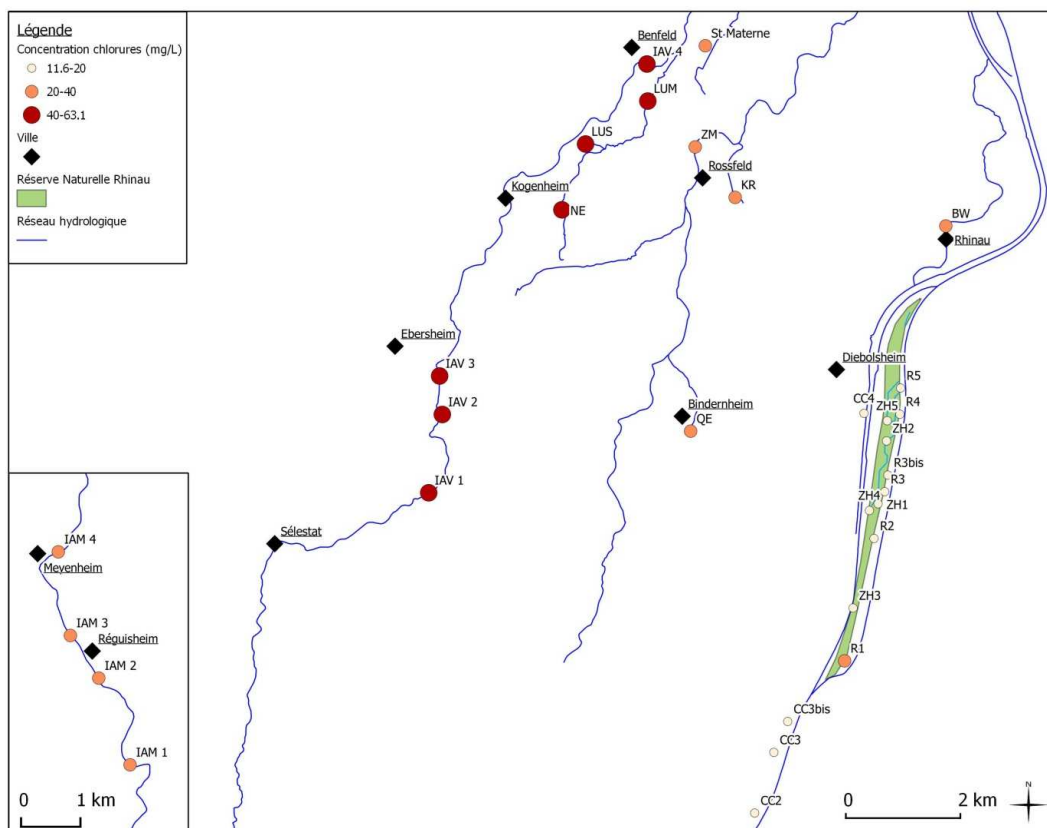


Figure 73 : Concentration interstitielle en chlorures

Stations	Température (°C) Surface	Température (°C) Interstitiel	Conductivité (µS/cm) Surface	Conductivité (µS/cm) Interstitiel	Oxygène (mg/L) Surface	Oxygène (mg/L) Interstitiel	Concentration en nitrates (mg/L) Surface	Concentration en nitrates (mg/L) Interstitiel	Concentration en chlorures (mg/L) Surface	Concentration en chlorures (mg/L) Interstitiel
BW	19,8	15,7	365	403	8,31	4,65	1,008	0,698	18,358	21,798
CC2	18,5	18,5	356	354	5,3	4,95	0,007	0,116	11,03	12,576
CC3	15,7	15,4	364	381	5,2	5,92	0,576	0,472	13,505	13,268
CC3 bis	16,1	16,2	355	360	6,9	6,87	0,622	0,526	13,894	13,417
CC4	19,4	19,2	397	393	9,8	6,8	0,661	0,402	18,572	19,504
IAM 1	18,5	18,7	417	414	9,76	8,26	1,466	1,699	23,301	23,556
IAM 2	17,5	18,4	419	412	9,49	7,92	1,697	1,796	54,754	24,419
IAM 3	18,2	18,3	412	412	9,8	7,61	1,305	1,456	54,515	25,366
IAM 4	18,3	18,7	410	410	9,14	7,13	1,402	1,663	24,565	25,036
IAM 1	19,4	18,8	444	495	9,22	4,84	2,108	0,44	41,497	41,054
IAM 2	19,3	19,1	490	491	9,46	7,83	1,088	2,396	49,26	49,574
IAM 3	18,7	19,3	481	463	9,25	5,32	1,99	0,125	47,181	44,799
IAM 4	18,4	18,1	486	483	9,1	5,82	1,128	1,665	50,359	48,557
KR	13,7	12,8	613	605	6,87	7,86	5,586	5,743	27,513	27,896
LUM	14	14,5	640	641	8	6,83	4,72	3,449	48,488	48,797
LUS	12,5	12,5	625	623	2,4	5,71	3,374	3,031	61,286	63,045
NE	13,5	13,7	682	675	6,12	7,3	6,874	5,851	45,053	44,734
OE	14,9	13,4	515	528	6,47	7,68	4,238	4,239	22,499	22,999
R1	22,2	21,7	317	340	9,58	0,2	0,921	0,059	11,835	21,613
R2	21,2	21	313	335	9,92	4,62	0,868	0,35	10,059	11,896
R3	20,5	19,5	306	354	9,81	6,9	0,749	0,598	14,293	14,31
R3 bis	20,5	21,1	306	347	9,81	6,03	1,037	0,971	13	14,58
R4	22,1	21,6	303	386	9,2	5,75	0,766	0,294	11,341	15,363
R5	22,1	22,9	303	382	9,2	4,25	0,513	0,099	11,003	15,997
St Materne	12,1	12,3	652	634	5,3	7,04	5,918	6,789	32,199	32,213
ZH 1	21,1	20,6	313	321	8,9	6	0,128	0,215	10,935	12,887
ZH 2	22,1	21,8	311	318	9,5	5,13	0,354	0,384	10,381	11,612
ZH 3	24,6	21,2	263	474	12,5	1,15	0,102	0,089	12,452	19,03
ZH 4	21,3	18,3	366	371	8,3	2,47	0,226	0,091	11,483	14,545
ZH 5	24,1	23,4	303	311	10,3	5,97	0,404	0,236	10,693	11,738
ZM	16,1	15,7	618	624	10,3	7,22	6,352	4,96	31,986	31,39

Tableau 28 : Tableau de la physico-chimie des eaux de surface et interstitielles de la plaine alluviale du Rhin

4.3.3.4. Conclusions

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 d'autant plus intéressante qu'elle est écologiquement très diversifiée, allant d'espèces vivant à faible profondeur dans le chenal à des espèces phréatobies caractéristiques des eaux de nappe. La diversité de cette faune pourrait permettre de déterminer de façon plutôt fiable l'origine de l'eau interstitielle.

Le bilan en terme d'échanges hydrologiques de la métrique « invertébrés souterrains » est présenté sur la Figure 74.

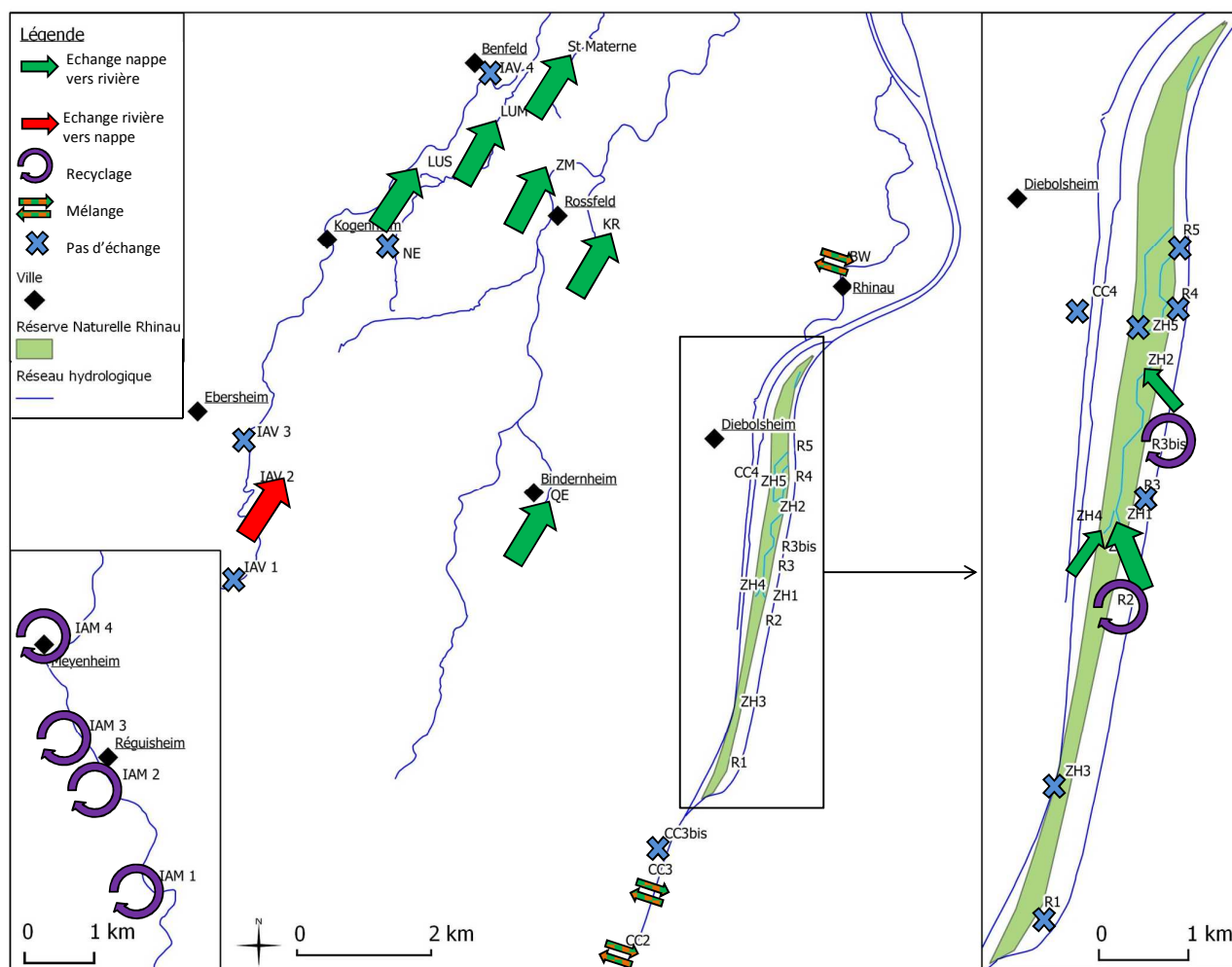


Figure 74 : Bilan des échanges nappe-rivières sur la plaine alluviale du Rhin pour la métrique invertébrés

(1) Les sources situées au nord de la zone d'étude sont largement alimentées par la nappe (grandes flèches vertes sur la figure). En effet, 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 potentielles d'eau en provenance de l'aquifère. La source NE ne présente pas d'échange avec la nappe (croix bleue sur la figure), son sédiment étant très riche en 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 le Rhin ou le canal de drainage (double flèche verte et orange sur la figure).

(2) Quelques zones humides sont alimentées par la nappe alluviale du Rhin par l'amont. C'est le cas de ZH1 où un grand nombre d'espèces stygobies a été récolté (à la fois des ubiquistes et des espèces d'eau profonde), mais également de ZH2 et ZH4 dans une moindre mesure (petites flèches vertes sur la figure) puisqu'un seul taxon a été échantillonné et ceci dans un seul des trois échantillons.

(3) Dans le contre-canal, un mélange d'eau souterraine et d'eau du Rhin est observé uniquement sur les deux stations les plus en amont. En effet, la richesse en espèces stygobies est très faible, mais une espèce inféodée aux eaux profondes (l'amphipode *Bogidiella albertimagni*) et des espèces caractéristiques du chenal du Rhin (par exemple *Niphargopsis casparyi*) ont été échantillonnées. Les valeurs de conductivité semblent confirmer une dilution des arrivées d'eau souterraines par des fuites d'eau du Rhin. En revanche, aucune arrivée d'eau souterraine n'est observée dans les autres stations du contre-canal. Un colmatage important dû à un dépôt de sédiments fins pourrait indiquer qu'il n'y a pas d'échange dans cette zone.

(4) Du point de vue des deux principaux cours d'eau de cette étude (l'III et le Rhin), nous n'avons pas observé d'échanges avec la nappe à l'exception d'un peu de recyclage ponctuel. Aucun échange n'est observé sur l'III en aval, en raison de la proportion importante de particules fines dans les sédiments sur lesquels coule le cours d'eau à ce niveau. Les sédiments fins limiteraient les échanges avec la nappe et empêcheraient tout passage de la faune. Toutefois les fortes abondances d'organismes récoltés en IAV2, pourraient indiquer que cette station exporte de l'eau de surface vers la nappe (flèche rouge sur la figure). Sur l'III en amont, nous avons observé de fortes densités d'espèces stygobies traduisant des mouvements de recyclage sur de courtes distances (boucles de spiraling indiquées par des flèches arquées violettes sur la figure). Des remarques similaires peuvent être faites pour le Rhin : aucun échange n'est observé sur la plupart des stations, excepté dans la partie centrale (R2 et R3bis), où la présence du cladocère *Phreatalona phreatica* indiquerait des recyclages d'eau sur de courtes distances.

4.3.4. Analyse géomatique des échanges nappe/rivières sur l'III

4.3.4.1. Données d'entrée

Pour ce travail de caractérisation des échanges nappe/Rhin-III les données disponibles pour l'analyse SIG sont peu nombreuses. Le travail de caractérisation des échanges a été réalisé à partir d'une carte piézométrique de niveau d'eau moyen pour l'année 1991. La BD Carthage a été utilisée pour déterminer le linéaire de berges de la rivière III.

La quantification des échanges a été calculée avec :

- une surface d'échange fixée à 2m ;
- une perméabilité moyenne des alluvions de 5.10^{-3} m/s.

Le manque de données nous a conduits à ne diagnostiquer que le sens des échanges nappe/III. La quantification pourrait être faite avec des données complémentaires non seulement sur l'III, mais aussi sur le Rhin où la nature des aménagements (barrages, contre-canaux) rend impératif la mise à disposition de cotes de niveaux d'eau.

4.3.4.2. Caractérisation des échanges nappe/rivière

Pour l'III, les échanges sont difficiles à sectoriser. On observe tant en rive gauche qu'en rive droite de nombreux petits tronçons où les échanges alternent tantôt de la nappe vers la rivière tantôt de la rivière vers la nappe (92 tronçons au total). On observe de plus une symétrie inverse des échanges pour chaque tronçon en rive gauche et en rive droite : le flux semble juste transiter par l'III sur les 280km de berge étudiés. Quand on agrège les flux de rive gauche et rive droite, la situation n'est pas plus claire puisqu'on obtient 81 tronçons où les échanges s'alternent. Pour faciliter l'interprétation, les résultats ont finalement

été agrégés selon les grands secteurs de fonctionnement homogènes définis suite aux travaux de modélisation.

Les trois figures de synthèse de la partie suivante (§ 4.3.5) spatialisent les échanges sur le cours de l'III. Pour rendre la lecture plus facile la rive gauche et la rive droite de l'III ont été écartés de 2km. Sur ces figures, les résultats issus de l'analyse SIG sont représentés selon le code couleur habituel :

- en vert les échanges de la nappe vers l'III
- en rouge les échanges de l'III vers la nappe
- en bleu pas d'échange identifié (observé sur aucun tronçon)

Au final, le bilan réalisé montre que l'III perd environ 156 m³/jour vers la nappe sur les 280 km de linéaire de berge ce qui représente environ 0,55 m³/jour/km. D'après l'analyse SIG agrégée selon la sectorisation issue de la modélisation type VAR :

- la nappe alimente l'III à l'amont essentiellement (PK 0 à 48 ; PK 61 à 71) et plus localement (PK 88 à 89 ; PK 120 à 122) ;
- l'III alimente la nappe sur la partie aval (globalement PK 72 à 148 ; PK 49 à 60).

4.3.5. Synthèse

4.3.5.1. Plateforme Eau-Dyssée

La simulation sur la plaine alluviale du Rhin est réalisée en journalier entre 1986 et 2003. Le niveau d'eau en rivière est constant et pris égal au MNT, excepté sur le Rhin et sur le canal de la Hardt [Thierion et al., 2012].

Pour la période de simulation CTL qui s'étend d'août 1985 à août 2003, les principaux résultats concernant les échanges nappes/rivières sont les suivants :

- Zones de drainage de la nappe : le long des cours d'eau et en bordure de l'aquifère
- Zones de drainage important de la nappe : partie nord de l'aquifère
- Zones de drainage de la nappe : majeure partie du cours du Rhin et une partie de l'III amont
- Flux moyen d'eau échangé en valeur absolue sur le domaine : 2,47 à 2,75 m³/jour

Les simulations VAR montrent un comportement un peu différent sur l'III :

- Amont : l'III alimente la nappe (PK 0 à 44 et PK 72 à 82) ; la nappe alimente l'III (PK 45 à 71)
- Aval : les échanges s'alternent du PK 83 à 148.

4.3.5.2. Macrophytes

Les données de trophie et d'apports concordent et distinguent bien la zone d'action de l'III de la zone d'action du Rhin. Les effets des apports de nappe, sont moins visibles près de Selestatt, car la ville doit certainement influencer le fonctionnement de la nappe (pollution, anthropisation, ...). La canalisation du Rhin, sur toute la zone empêche en effet les échanges avec la nappe. La nappe peut alors soit être à l'équilibre avec le Rhin, ou rechargée par celui-ci. À la confluence Rhin-III, il y a possibilité d'échanges car le Rhin est alors suffisamment bas par rapport à la nappe. De plus, le Rhin étant possiblement très pollué, le niveau d'eutrophisation de la région en est sûrement modifié, modifiant à son tour la répartition de la végétation. Les résultats concordent avec ceux de Carbiener (1982, 1988), qui séparait la nappe d'Alsace en trois sous-unités. De plus, celui-ci affirmait déjà que le canal du Rhin empêchait les échanges entre la nappe et le Rhin en surélevant ce dernier par rapport à la nappe. Il décrivait déjà que l'III drainait la nappe, et que celle-ci infiltrait les sources affluentes de l'III.

La sectorisation des échanges nappes/rivières présentée de manière simplifiée est donc la suivante :

- zones sud et nord de l'III : probabilité d'apports phréatiques moyenne à faible,
- zone centrale de l'III : probabilité forte d'alimentation par des eaux souterraines

- zone de confluence Rhin-III : influence forte de la nappe phréatique.

Le travail sur la plaine d'Alsace semble donc montrer que la méthode peut fonctionner à partir de données issues de la bibliographie. La bibliographie permet ainsi d'avoir des données facilement utilisables et peu coûteuses, et a priori sur des secteurs d'étude plus diversifiés, par d'autres moyens que des campagnes de terrain.

Il reste à comparer ces résultats à ceux obtenus avec d'autres métriques pour pouvoir valider l'utilisation de données provenant de la bibliographie, d'autant plus que les cartes obtenues représentent un diagnostic passé des apports de nappe phréatique de la plaine d'Alsace car elles ont été réalisées en partie avec de la bibliographie très ancienne.

4.3.5.3. Invertébrés souterrains

La sectorisation des échanges nappes/rivières présentée de manière simplifiée est la suivante :

- sources nord : alimentation par la nappe
- source NE : pas d'échange avec la nappe
- source BW : un mélange avec le Rhin ou le canal de drainage
- zones humides : alimentation par la nappe alluviale du Rhin par l'amont
- contre-canal amont : mélange d'eau souterraine et d'eau du Rhin est observé uniquement sur les deux stations les plus en amont
- contre-canal (autres stations) : aucune arrivée d'eau souterraine (colmatage important)
- III et Rhin : pas d'échanges avec la nappe à l'exception d'un peu de recyclage ponctuel
- III aval : colmatage mais potentiel export de l'eau de surface vers la nappe
- III amont : mouvements de recyclage sur de courtes distances
- Rhin : aucun n'échange sauf dans la partie centrale (recyclages d'eau sur de courtes distances)

4.3.5.4. Analyse géomatique

La sectorisation des échanges nappes/rivières est difficile à décrire compte-tenu de l'alternance des situations d'échange. Le bilan réalisé montre que l'III perd environ $0,55\text{m}^3/\text{jour}/\text{km}$ vers la nappe sur les 280km de linéaire de berge étudiés.

Pour aller plus avant dans le diagnostic des échanges il conviendrait de disposer des niveaux d'eau en rivière ou des contre-canaux pour le Rhin et l'III. La quantification des échanges demanderait quant à elle de disposer :

- des niveaux du fond du lit des cours d'eau (Rhin et III)
- des champs de perméabilité

Il serait aussi intéressant de disposer de données sur les ouvrages pour apprécier la structuration des aménagements hydrauliques (contre-canaux, barrages...). Des informations concernant les niveaux dans ces ouvrages seraient aussi les bienvenues.

4.3.5.5. Synthèse

Le Tableau 29 présente la synthèse multi-métrique simplifiée des diagnostics des échanges le Rhin et l'III pour chaque PK (colonne de gauche) et pour chaque métrique. Lorsque les métriques discriminent rive gauche et rive droite les résultats sont détaillés pour chacune d'entre elles.

Le Tableau 29 est organisé de la façon suivante :

- colonne 1 (Mod_VAR) : caractérisation des échanges avec le modèle avec niveau de rivière variable. La numérotation correspond aux tronçons homogènes présentés ;
- colonne 2 (SIG_VAR) : caractérisation des échanges avec l'analyse SIG agrégées en fonctions de la sectorisation issue des simulations VAR ;
- colonne 3 (Mphytes) : probabilité d'apport d'eau souterraine d'après les macrophytes (rive gauche et rive droite confondue) ;
- colonne 4 (Invertébrés) : échanges nappes/rivières d'après l'indice invertébrés souterrains (rive gauche et rive droite confondue) ;
- colonne 5 : synthèse générale
- colonne 6 : qualité des diagnostics selon les métriques.

Le code couleur est le même que celui utilisé sur la Sèvre-Niortaise. Apparaît ici le code couleur violet pour les situations de recyclage diagnostiquables avec les invertébrés souterrains.

Du point de vue quantitatif, les écarts sont importants entre la méthode SIG et le travail de modélisation. Ce dernier donne des valeurs beaucoup plus élevées que celle du SIG, la différence étant d'un ordre de grandeur d'un facteur 1000 pour la simulation VAR. De plus, le bilan est faiblement négatif d'après l'analyse SIG ($-0,55\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ soit $-156\text{m}^3/\text{s}$ sur le cours d'III) alors qu'il est fortement positif pour la modélisation ($699\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ soit $197\,287\text{m}^3/\text{s}$ sur le cours de l'III).

Une remarque est à prendre en compte concernant les valeurs du modèle. Les échanges nappe/rivière "nuls" (à l'amont de l'III) traduisent en réalité une paramétrisation du modèle visant à ne pas vider les rivières. En effet, sur ces tronçons, le bilan d'eau est négatif : la rivière fournit plus d'eau qu'elle n'en reçoit. D'un point de vue modèle, ce phénomène risque de vider la rivière. Pour pallier ce problème, une paramétrisation permet de couper les échanges nappe/rivière lorsque le niveau d'eau en rivière devient faible, ce qui évite de vider la rivière, et ce qui engendre du même coup des échanges nappe/rivière nuls. A l'échelle de la plaine, la recharge de la nappe est due en effet pour 80% à l'eau de la rivière et pour 20% à l'eau de pluie.

On observe donc au final une forte divergence de diagnostic sur la partie amont de l'III entre le modèle et l'analyse SIG. En revanche, les résultats du diagnostic réalisé avec les macrophytes d'après la bibliographie sont plutôt en phase avec le modèle dans la partie centrale de l'III, mais s'opposent au diagnostic SIG.

PK	Diagnostic synthétique				Synthèse générale	Qualité des diagnostics			
	Mod_VAR	SIG_Var	Mphytes	Invert.		Mphytes	Invert.	SIG_Var	Mod_VAR
0					??				
1					??				
2					??				
3					??				
4					??				
5					??				
6					??				
7					??				
8					??				
9					??				
10					??				
11					??				
12					??				
13					??				
14					??				
15					??				
16									
17									
18									
19									
20									
21					??				
22					??				
23					??				
24					??				
25					??				
26					??				
27					??				
28					??				
29					??				
30					??				
31					??				
32					??				
33					??				
34					??				
35					??				
36					??				
37					??				
38					??				
39					??				
40					??				
41					??				
42					??				
43					??				
44					??				
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									
57									
58									
59									
60									
61									
62									
63									
64									
65									
66									
67									
68									
69									
70									
71									
72									
73									
74									
75									

PK	Diagnostic synthétique				Synthèse générale	Qualité des diagnostics			
	Mod_VAR	SIG_Var	Mphytes	Invert.		Mphytes	Invert.	SIG_Var	Mod_VAR
76									
77									
78									
79									
80									
81									
82									
83									
84									
85									
86									
87									
88									
89									
90									
91									
92									
93									
94									
95									
96									
97									
98									
99									
100									
101									
102									
103									
104									
105									
106									
107									
108									
109									
110									
111									
112									
113									
114									
115									
116									
117									
118									
119									
120									
121									
122									
123									
124									
125									
126									
127									
128									
129									
130									
131									
132									
133									
134									
135									
136									
137									
138									
139									
140									
141									
142									
143									
144									
145									
146									
147									
148									

Tableau 29 : Synthèse croisée des métriques sur l'III

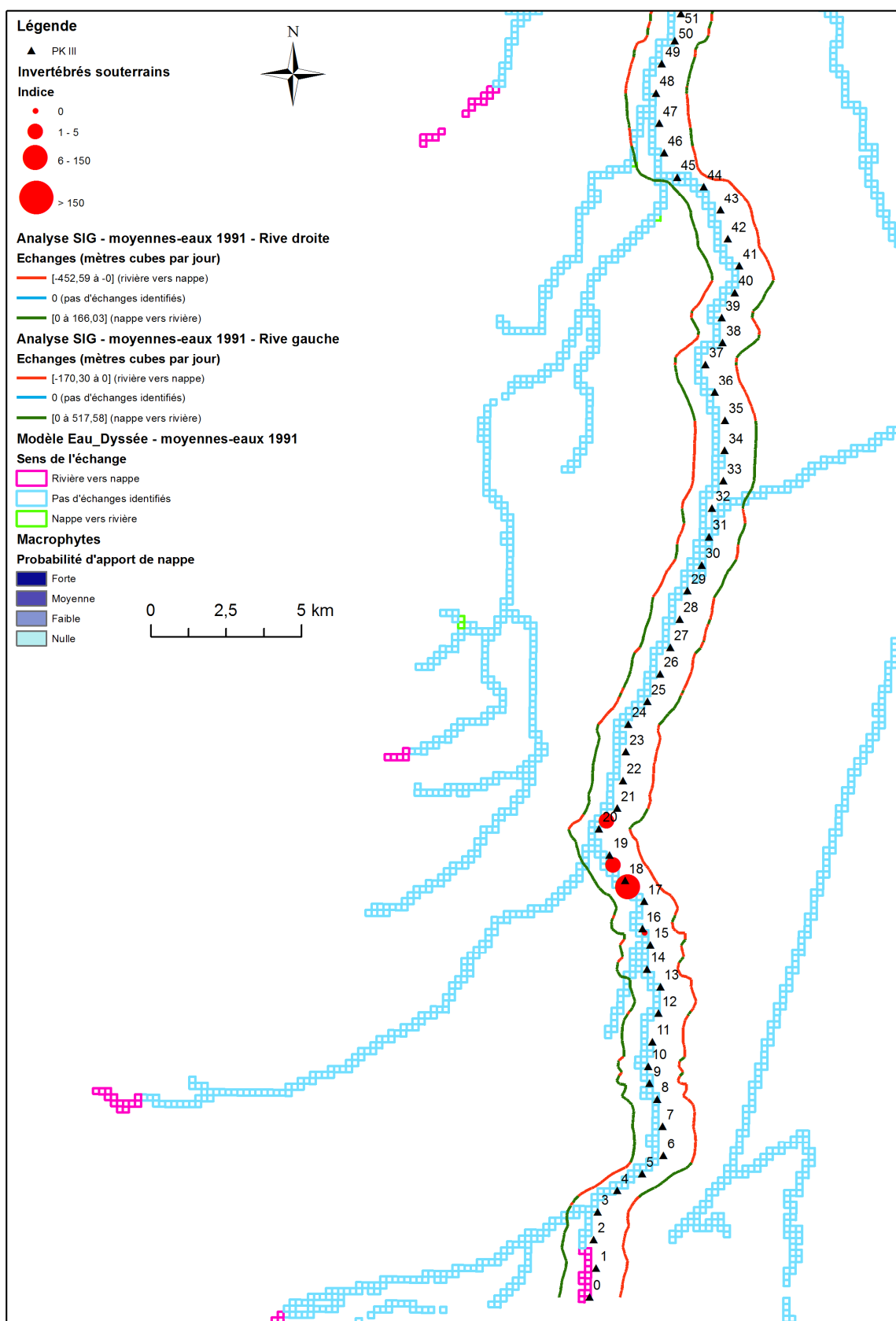


Figure 75 : Superposition des métriques : Ill amont

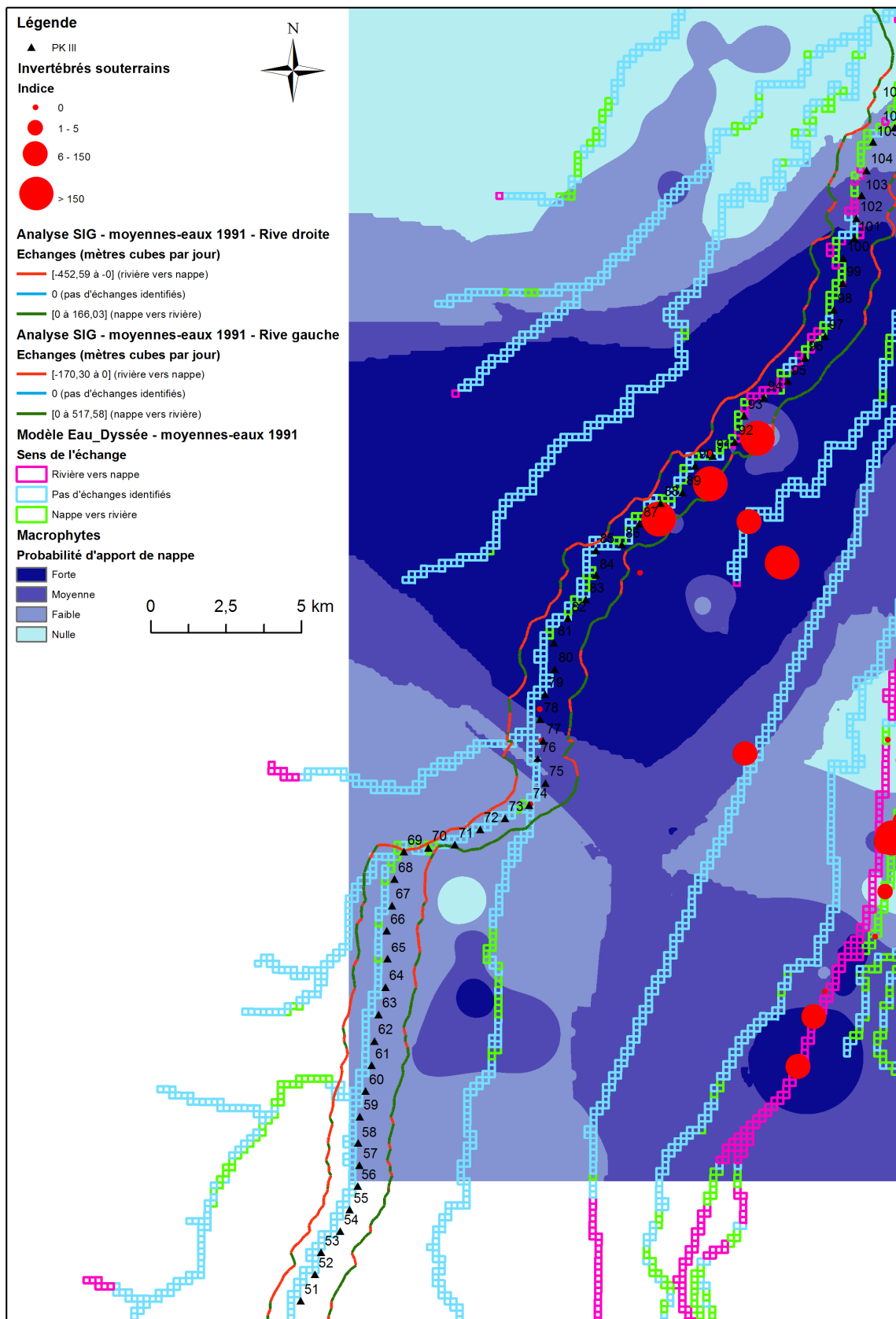


Figure 76 : Superposition des métriques : Ill centre

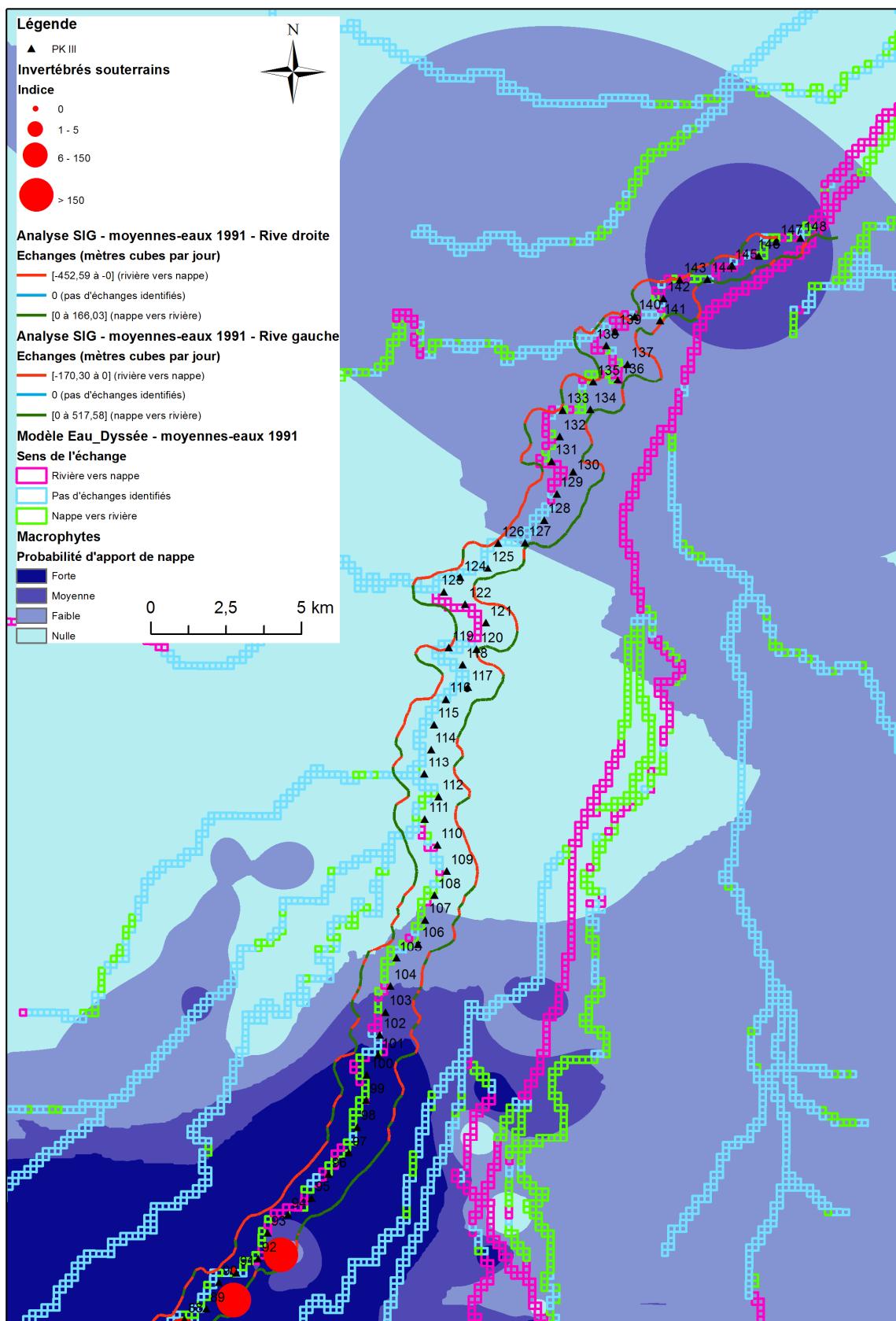


Figure 77 : Superposition des métriques : Ill aval

4.4. Loire amont – Plaine du Forez

Les échanges nappe/Loire ont pu être caractérisés dans le cadre du programme « Plan Loire Grandeur Nature 3 » (Paran et al., 2009) pour la rive gauche dans deux situations : piézométries de basses-eaux et de hautes-eaux pour l'année 2005. Le diagnostic pour la rive droite a été effectué dans le cadre du projet NAPROM. La spatialisation des échanges nappe/Loire pour ce secteur et ces deux situations hydrologiques est présentée Figure 78 (basses eaux) et Figure 79 (hautes eaux). Ces deux cartes présentent :

- le tracé du fleuve Loire qui s'écoule du sud vers le nord ;
- la localisation d'un petit barrage (barrage de Feurs) et d'un seuil (lieu-dit Villeneuve) sur le fleuve Loire ;
- la carte piézométrique (altitude des isopièzes en mètres), différente selon la situation hydrologique de la nappe ;
- le linéaire de berge (rive gauche) sur lequel les échanges nappe/Loire sont caractérisés. En bleu clair, les secteurs où les échanges sont nuls ou très faibles, en dégradé de vert les secteurs où la nappe alimente le fleuve (noté +), en rouge/orange les secteurs où le fleuve alimente la nappe (noté -).

Que ce soit en basses eaux ou en hautes eaux, on observe que sur cette zone c'est la nappe qui alimente principalement le fleuve. En basses eaux (Figure 78), on note l'influence du barrage et du seuil qui en relevant artificiellement le niveau du fleuve provoque une inversion des échanges, et donc une alimentation de la nappe par le fleuve. Inversement, l'effacement éventuel du seuil se traduirait par une moindre recharge de la nappe. Cette tendance se retrouve de manière moins marquée en hautes eaux (Figure 79) où l'effet du seuil est gommé.

Le Tableau 30 et le Tableau 31 présentent un bilan quantitatif des échanges nappe/Loire sur le secteur de l'Écozone du Forez pour les deux situations hydrologiques de la nappe. Il propose une quantification des paramètres utilisés pour le calcul du débit (Q) selon la Loi de Darcy, au niveau du linéaire de berge impliqué (moyenne, écart type, minimum, maximum) :

- K : perméabilité des alluvions à l'interface nappe/Loire exprimée en m/s ;
- i : gradient de charge piézométrique à l'interface nappe/Loire exprimé en ‰ ;
- A : surface d'échange entre la nappe et la Loire en m² par mètre linéaire de fleuve (Ce paramètre est estimé ici à partir de la profondeur du fleuve).

Le Tableau 30 et le Tableau 31 proposent aussi une quantification des débits d'échange cumulés sur toute la longueur (L exprimé en m) de la berge impliquée :

- Q+ : débit d'alimentation du fleuve par la nappe exprimé en m³/j ;
- Q- : débit d'alimentation de la nappe par le fleuve exprimé en m³/j.

De plus, les débits d'échanges sont exprimés en m³/j/km afin de permettre les comparaisons entre secteurs de taille différentes.

Pour la rive gauche, si l'on compare les deux situations hydrologiques, on observe que le débit d'alimentation de la nappe par le fleuve varie assez peu. Au contraire, le débit de drainage de la nappe par le fleuve varie presque du simple au double. Pour la rive droite, on observe le phénomène inverse.

Pour ce secteur, il est dommage de ne pas disposer d'autres métriques pour comparer les résultats.

Légende

==== Barrages et seuils

Basses-eaux de nappe - 2005

Flux d'eau - Echange

— Rivière vers nappe

— Pas d'échange identifié

— Nappe vers rivière

■ Fleuve Loire

■ Gravières

--- Piézométrie basses-eaux 2005

0 500 1 000
Mètres

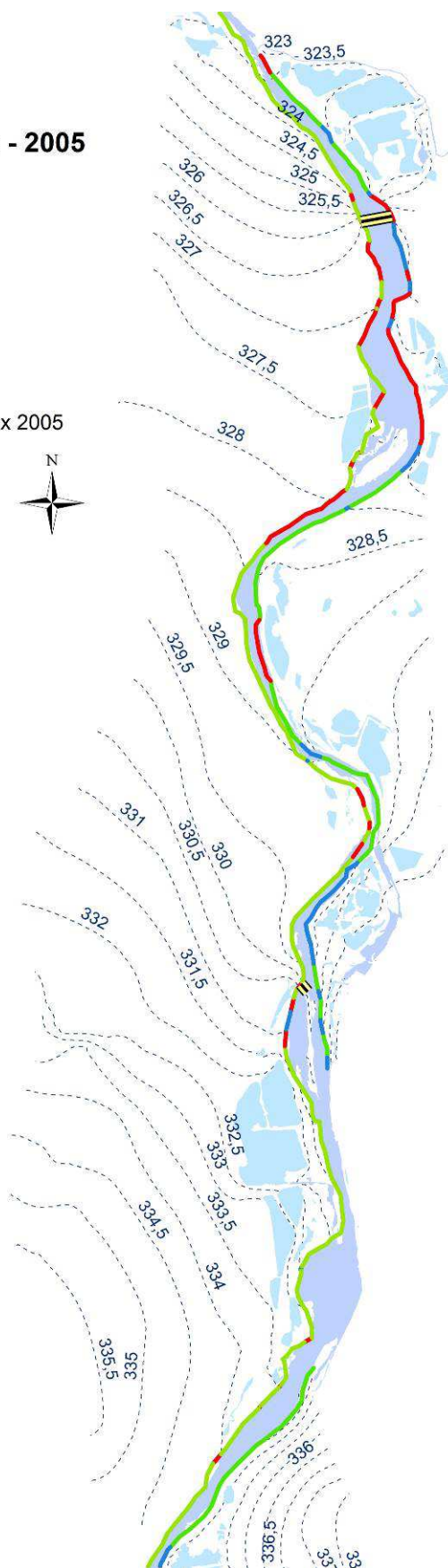


Figure 78 : Echanges nappe/Loire pour une piézométrie basses-eaux

Légende

— Barrages et seuils

Hautes-eaux de nappe - 2005

Flux d'eau - Echange

— Rivière vers nappe

— Pas d'échange identifié

— Nappe vers rivière

— Fleuve Loire

— Gravières

--- Piézométrie hautes-eaux 2005

0 500 1 000
Mètres

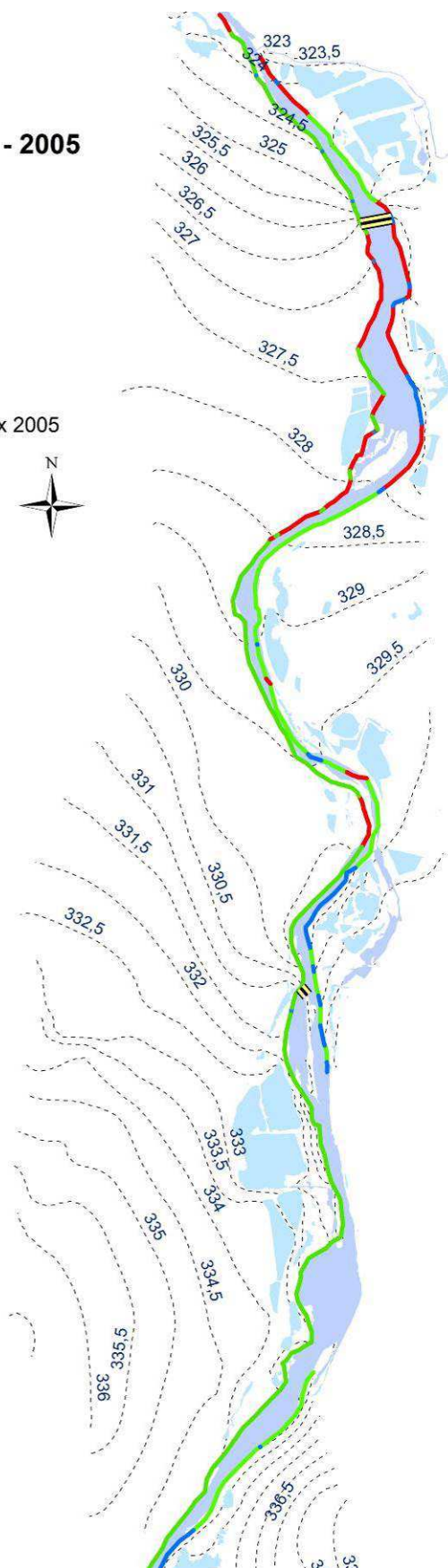


Figure 79 : Echanges nappe/Loire pour une piézométrie hautes-eaux

	Nappe (Basses-eaux 2005)						
	Rive gauche				Rive droite		
	K (m/s)	A (m²/m linéaire)	I (‰)		K (m/s)	A (m²/m linéaire)	I (‰)
Moyenne	3,49.10 ⁻³	1,79	1,53		2,79.10 ⁻³	1,73	2,24
Écart type	8,44.10 ⁻⁴	0,88	1,57		1,05.10 ⁻³	1,27	2,48
Minimum	1,42.10 ⁻³	0,61	0		1,8.10 ⁻³	0,05	0
Maximum	4,00.10 ⁻³	3,60	4,46		4.10 ⁻³	3,85	6,59
	m³/j	m³/j/km	L (m)		m³/j	m³/j/km	L (m)
Q-	-738	-307	2 401		-1 872	-980	1 911
Q+	5790	569	10 176		6 144	1 013	6 066
Q0	0	0	178		0	0	2 263

Tableau 30 : Bilan quantitatif des échanges nappe/Loire en basses-eaux de nappe sur le secteur de l'Écozone du Forez

	Nappe (Hautes-eaux 2005)						
	Rive gauche				Rive droite		
	K (m/s)	A (m²/m linéaire)	I (‰)		K (m/s)	A (m²/m linéaire)	I (‰)
Moyenne	3,64.10 ⁻³	1,99	1,65		2,93.10 ⁻³	1,79	2,51
Écart type	4,54.10 ⁻⁴	1,28	1,60		1,06.10 ⁻³	1,10	3,29
Minimum	2,82.10 ⁻³	0,50	0		1,80.10 ⁻³	0,30	0
Maximum	4,00.10 ⁻³	3,86	4,74		4.10 ⁻³	3,32	9,48
	m³/j	m³/j/km	L (m)		m³/j	m³/j/km	L (m)
Q-	-1 057	-401	2 636		-3 608	-1 494	2 416
Q+	9 333	934	9 988		6 435	1 114	5 778
Q0	0	0	131		0	0	2 046

Tableau 31 : Bilan quantitatif des échanges nappe/Loire en hautes-eaux de nappe sur le secteur de l'Écozone du Forez

4.5. Orgeval

4.5.1. Métriques géophysiques, MOLONARI et METIS

4.5.1.1. Métrique géophysique : Connectivité nappe-rivière

Une synthèse de l'ensemble des données de seize carottages (Figure 80), réalisés dans le cadre du programme PIREN-Seine (trois de 12 à 18 m au niveau du plateau, et treize de 3 à 4 m en bordure de rivière), et des interprétations des prospections géophysiques (Mouhri et al., 2012) est réalisée dans le but de déterminer l'influence du contexte hydrogéologique sur la connectivité nappe-rivière au niveau de la vallée incisée des Avenelles et au droit des 5 sections sélectionnées (Mouhri et al., 2013). Cette étape préliminaire a permis de sélectionner 5 sections de rivière (Figure 80), représentatives des différents types de contact entre la rivière et le substrat géologique, pour l'implantation des stations du dispositif expérimental MOLONARI (MONitoring LOCAL des échanges NAppe-Rivière) :

1. les sections amont 1 et 2, qui drainent respectivement 10 et 24 km², sont en connexion avec la formation de Brie ; à ces points, la zone hyporhéique (ZH) est composée de résidus de petits blocs de meulière, issus de d'altération des calcaires de Brie, englobés dans une matrice argileuse ;

2. la section 3, drainant 38 km², est en connexion avec les argiles vertes, mais avec une présence d'une ZH "latérale" typique d'une rivière coulant sur un substrat imperméable (Malard et al., 2002) ; la ZH se développe dans un remplissage constitué de colluvions formées à partir des résidus de la formation des argiles à meulières ; la continuité hydraulique entre la nappe de Brie et la rivière est probablement assurée par ruissellement de sub-surface sur le toit des argiles vertes ;

3. la section 4 drainant 40 km² est en contact avec les marnes supra-gypseuses ; la ZH se développe également latéralement et sous le ru au niveau des colluvions d'argiles à meulières résiduelles ; des piézomètres ont été ajoutés au dispositif MOLONARI, et installés le long du continuum plateau-fond de vallée afin de préciser le fonctionnement de la connexion entre la nappe de Brie de plateau et la rivière mise en regard de son environnement constitué de marnes supra-gypseuses coiffant le Champigny ;

4. la section 5, correspondant au point 6 sur la Figure 80, situé à l'exutoire du bassin des Avenelles (46 km²), est en contact avec l'aquifère inférieur du Champigny ; cette section, installée plus récemment, constitue le dernier point du dispositif de suivi des échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin de l'Orgeval.

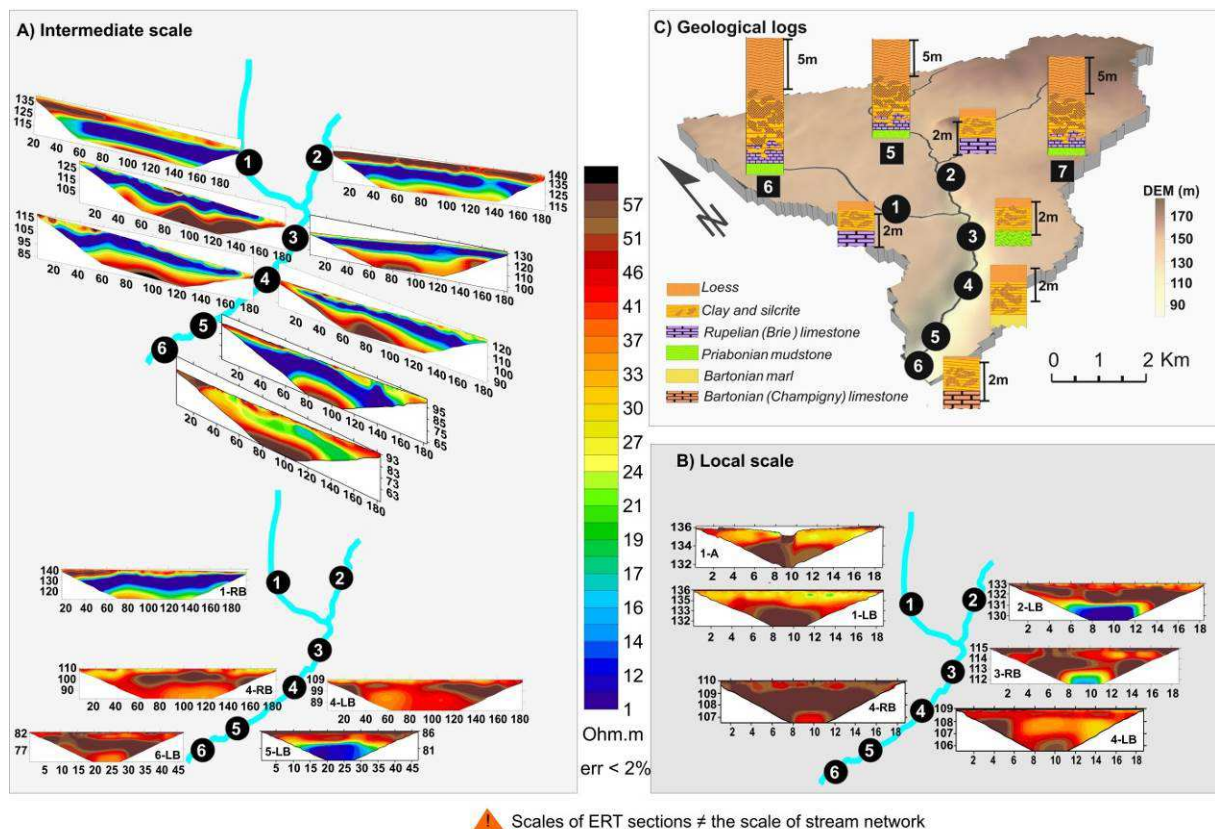


Figure 80 : Détermination de la connectivité nappe-rivière par les Profils 2-D des Tomographies de résistivité électrique (ERT). A) Echelle intermédiaire : Profils transverses (en haut) et longitudinaux (en bas) avec un espacement de 4 m entre les électrodes (en haut et 1-RB, LB-4 dans le fond) ou un espacement de 0,5 m entre les électrodes (5 LB, LB-6 et 4-RB dans le fond). B). Echelle de la ZH: Profils longitudinaux des ERT avec un espacement des électrodes de 0,25m (sauf 1-A, qui est une vue en coupe transversale). RB: rive droite, LB: rive gauche. C) interprétation de la stratigraphie par carottage (Mouhri et al., 2013)

4.5.1.2. Métrique MOLONARI (MONitoring LOCAL des échanges NAppe-Rivière)

Chaque site identifié a été équipé d'une station MOLONARI, qui est constituée de deux piézomètres de bordure, et de deux ensembles de capteurs de température distribués verticalement dans la zone hyporhéique. Les piézomètres et la rivière sont équipés de capteurs de mesure de la pression et de la température en continu (Figure 81).

Le suivi de la variation des écarts entre les niveaux d'eau des piézomètres de bordure et de la rivière montre, pour la période d'avril 2012 à février 2013, une variabilité spatio-temporelle des échanges entre le cours d'eau et la nappe de surface (Figure 82).

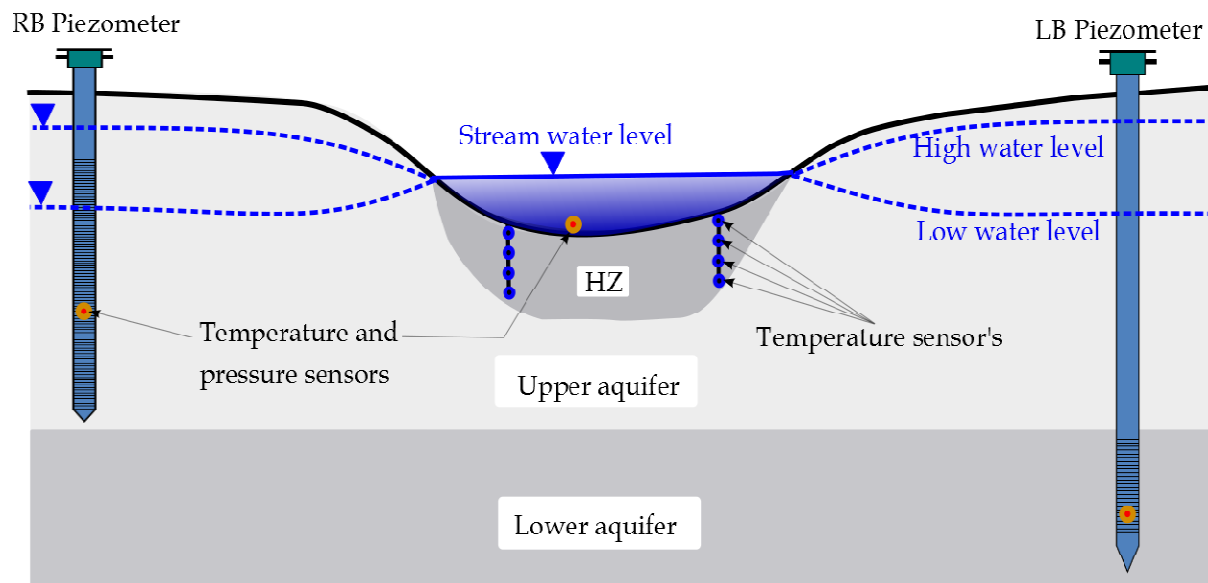


Figure 81 : Schéma conceptuel d'une station de MONitoring Local des échanges NAppe-Rivière (MOLONARI)

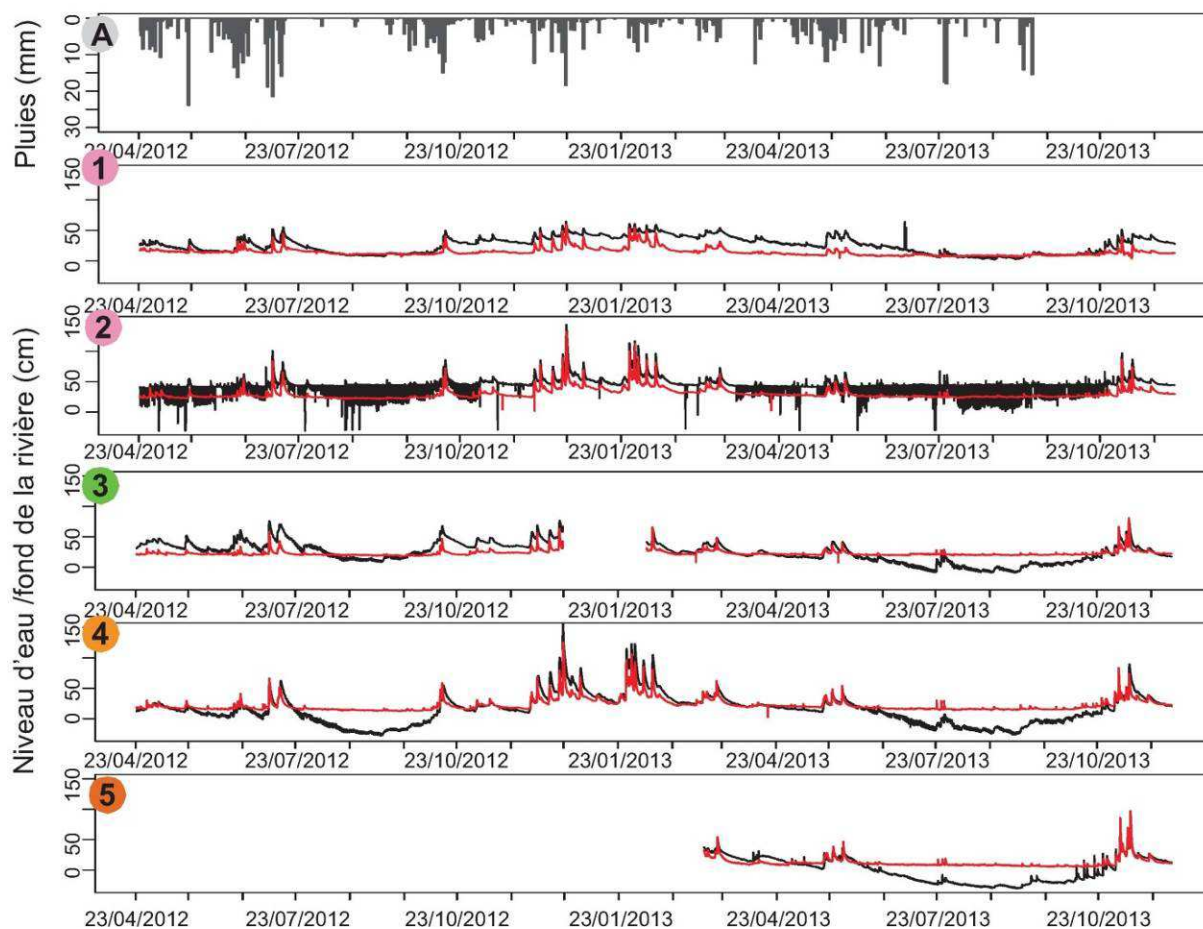


Figure 82 : Variabilité spatio-temporelle du niveau d'eau "relatif" entre la rivière et la nappe (piézométrie en noire et rivière en rouge) : La rivière est en contact avec la nappe de Brie en 1 et 2, avec les argiles vertes en 3, avec les marnes supra-gypseuses en 4, et avec l'aquifère du Champigny en 5; A) pluie horaire à la station de Boissy-Le-Châtel

Les conditions hydrologiques de la période d'étude (Figure 82-A) sont assez contrastées, caractérisées par une année civile 2012 (750 mm) plus pluvieuse que l'année 2013 (672 mm). Dans ces conditions, le suivi de

la variation des niveaux d'eau entre les piézomètres de bordure et celui de la rivière à l'échelle du tronçon de la rivière des Avenelles, montre une variabilité spatio-temporelle des échanges entre le cours d'eau et la nappe de surface (Figure 82).

De manière remarquable, la rivière draine systématiquement la nappe de Brie au niveau des sections amont 1 et 2, et ce même en période de crue. Au niveau de la station 1, les niveaux d'eau tendent à s'équilibrer en période d'étiage, traduisant une stagnation des échanges. Au niveau de la section 2, des inversions du gradient hydraulique sont observées lors des phases de pompage du puits. Dans ce cas, les mesures thermiques illustrent l'effet de l'anthropisation sur le fonctionnement du système (Figure 82-2).

Au niveau de la section 3, le cours d'eau est en contact avec les argiles vertes. La rivière draine son champ proche en période de hautes eaux et l'alimente à l'étiage (Figure 82-3). Dans cette configuration, l'écart entre les niveaux d'eau en rivière et dans le piézomètre de bordure peut atteindre 10 cm. Ce fonctionnement saisonnier est fortement accentué par le cycle hydrologique et notamment par le remplissage de la nappe. En effet, la rivière est globalement drainante en année humide (2012) et infiltrante en année sèche (2013).

Au niveau des points 4 et 5, hormis, les périodes de crue, la rivière alimente l'aquifère du Champigny, avec une différence entre les niveaux d'eau pouvant atteindre 50 cm en période d'étiage (Figure 82-4&5). Au vu des chroniques, il apparaît très clairement que le réseau hydrographique perd de l'eau dans ce secteur.

Cette première caractérisation des échanges nappe-rivière, réalisée grâce à la mesure directe des niveaux d'eau de la rivière et de la nappe, montre clairement l'existence d'un gradient amont aval le long de la transition entre formations géologiques. La rivière draine la nappe de Brie en amont et s'infiltre pour alimenter l'aquifère de Champigny en aval du bassin. La variabilité spatiale des échanges est contrôlée par le type de contact entre le cours d'eau et le substrat géologique, tandis que la variabilité temporelle est soumise aux forçages météorologiques.

4.5.1.3. Modélisation hydro-thermique des échanges : métrique METIS

4.5.1.3.1. Modélisation des flux hydro-thermiques à l'interface nappe-rivière

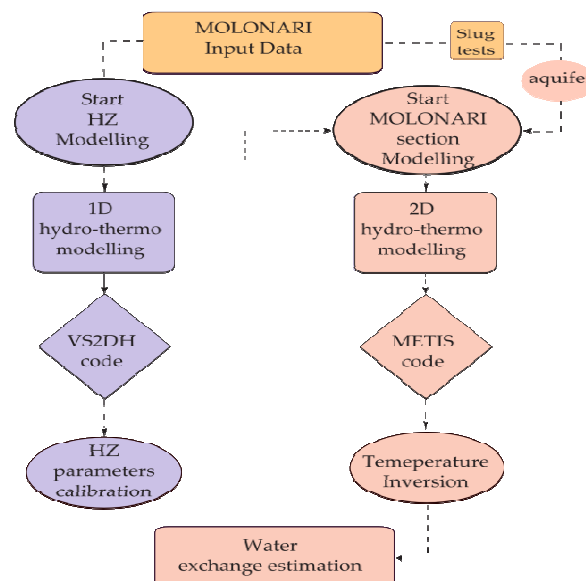


Figure 83 : Étapes de paramétrisation et de calibration des modèles hydro-thermiques 1D et 2D (Mouhri et al. 2014a,b)

Le transfert thermique à travers les sédiments de la ZH s'effectue par les processus d'advection (par transport de matière, ici par flux d'eau) et de conduction thermique. L'utilisation de la température comme traceur pour suivre les mouvements de l'eau à travers cette interface (Constantz, 2008; Krause et al., 2011;

Kalbus et al., 2007; Schornberg et al., 2010) est simple à mettre œuvre pour un suivi en continu mais elle nécessite des outils d'inversion de cette mesure pour quantifier a posteriori les flux d'eau.

À cet effet, la quantification des échanges nappe-rivière est réalisée par la modélisation hydro-thermique couplée. Une démarche de calibration en deux étapes est adoptée : une première calibration en 1D est réalisée dans la ZH, et une deuxième calibration en 2D est réalisée à l'échelle de chaque section (Figure 83) du domaine délimité par l'ensemble des stations MOLONARI.

4.5.1.3.2. Pré-calibration des paramètres hydrodynamiques et thermiques de la zone hyporhéique

Un modèle vertical 1D (VS2DH) couplant le transfert de chaleur et les flux d'eau est utilisé pour simuler et reproduire les profils de température mesurés dans la ZH en milieu saturé. Ce modèle est utilisé dans notre cas pour calibrer les propriétés hydrodynamiques et thermiques (difficilement mesurables dans les conditions in situ) des sédiments de la ZH. Au niveau de chaque section, le domaine de la ZH est simulé en colonne-1D discrétisée verticalement par une grille de 2 cm. La profondeur totale simulée dépend de la position du capteur de température le plus profond (profondeur Z_p) qui est de 40 ou 55 cm selon la section considérée. Les simulations ont été réalisées en régime transitoire à la fois pour le transfert thermique et pour les écoulements. La perméabilité K des matériaux du domaine modélisé est supposée constante sur toute la profondeur en raison de l'homogénéité des sédiments de la ZH. Les conditions limites utilisées pour le transfert thermique et pour les écoulements sont issues des mesures en milieu semi contrôlé des dispositifs MOLONARI. La différence de charge hydraulique mesurée entre les sédiments de la ZH et la colonne d'eau de la rivière constitue les conditions limites du domaine simulé. Les températures appliquées aux limites supérieures du domaine simulé correspondent aux températures mesurées dans la colonne d'eau (profondeur Z_0), et celles des limites inférieures correspondent aux mesures les plus profondes enregistrées dans la ZH (profondeur Z_p). L'ajustement du modèle a été réalisé par essais-erreurs, jusqu'à reproduire au mieux les températures observées entre le capteur de la profondeur Z_0 et celui de la profondeur Z_p . La minimisation des écarts quadratiques moyens (RMSE, Root Mean Square Error en anglais) globales a été utilisée comme fonction objectif. Les propriétés hydrodynamiques et thermiques des sédiments de la ZH et les RMSE globales, obtenues après calibration des 5 points, sont rapportées dans le Tableau 32.

Les résultats de la calibration 1D (Tableau 32) sont très satisfaisants pour les 5 sections simulées (les RMSE varient de 0,08 à 0,2°C). Dans l'ensemble les propriétés hydrodynamiques de la ZH, obtenues par inversion des températures mesurées, sont homogènes pour le réseau hydrographique amont ($2 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) et un peu plus faibles dans la partie intermédiaire de la vallée, où le cours d'eau coule sur un substrat peu perméable ($5 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ pour le point 3 et $2 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ pour le point 4). Dans la partie aval, où la ZH est constituée de colluvions plus grossières, la perméabilité obtenue est un peu plus élevée ($2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) que pour les points 2 et 3.

Paramètres	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Perméabilité [m.s^{-1}]	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Porosité [-]	0,25	0,2	0,25	0,15	0,2
Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Capacité calorifique [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$]	$1,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$11,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$
Profondeur ZH [m]	0,45	0,40	0,45	0,55	0,40
RMSE_tot [°C]	0,2	0,08	0,1	0,2	0,08

Tableau 32 : Paramétrisation des modèles 1D pour l'estimation des perméabilités de la ZH et les RMSE totales des simulations

4.5.1.3.3. Modélisation 2-D des flux hydro-thermiques au niveau des stations MOLONARI

Le modèle METIS a été utilisé dans sa configuration 2D pour simuler les écoulements verticaux et le transfert de chaleur en milieu poreux (Goblet, 2010). Un modèle a été construit verticalement pour chaque section MOLONARI (Figure 84). La géométrie et le nombre de couches utilisées pour les sections modélisées sont fidèles aux nivellements de la topographie et à la stratigraphie observée sur le terrain. En plus des couches géologiques observées (limons, argiles à meulière, calcaire de Brie, argiles vertes, marnes et calcaire de Champigny), la couche de la ZH est explicitement présente dans toutes les sections modélisées. Des modèles à 4 couches géologiques ont été construits au niveau des sections 1, 2, 4, et 5 et un modèle à 3 couches est établi pour la section 3 (Tableau 33). La résolution du maillage des modèles varie de 10 à 20 cm à la base des sections et de 1,25 à 5 cm au niveau de la ZH (Tableau 33).

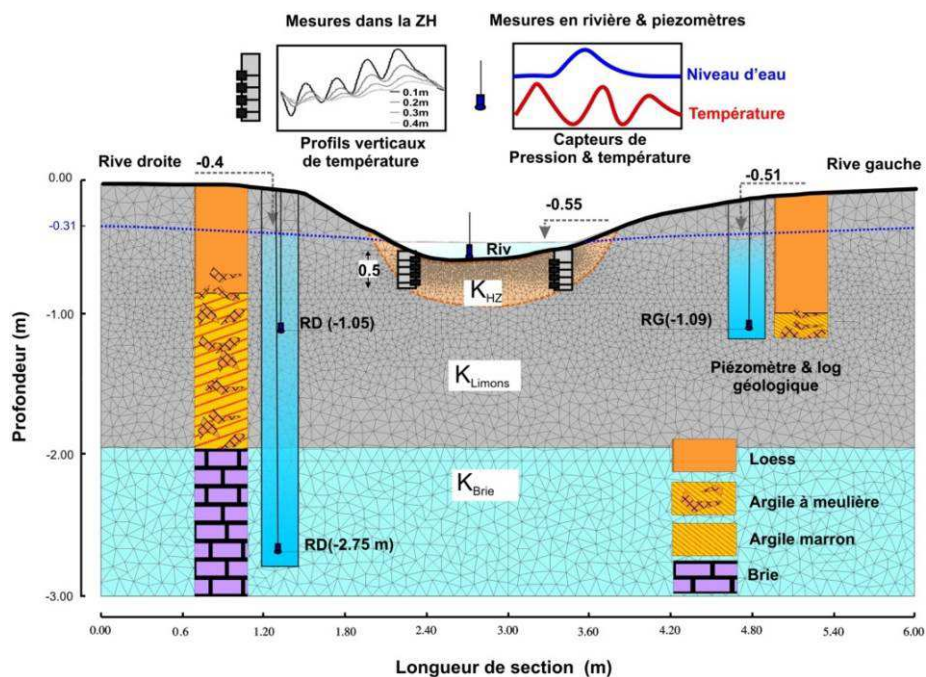


Figure 84 : Exemple de maillage du modèle hydro-thermique 2D vertical à 3 couches. Station MOLONARI 1.

Toutes les simulations ont été réalisées en régimes hydrauliques et thermiques transitoires afin de tenir compte des transferts de chaleur par diffusion et par advection. La chronique de températures mesurées en rivière est utilisée comme condition limite au niveau de l'interface eau de rivière-sédiments de la ZH. Les chroniques de températures mesurées dans chaque piézomètre de bordure au niveau de la couche limon-argile à meulière sont appliquées comme conditions limites latérales de la partie supérieure du modèle. Les conditions limites latérales de la partie inférieure (i.e. calcaire de brie) du modèle sont contraintes par la chronique de températures mesurées dans le piézomètre.

Une charge hydraulique correspondant aux niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres de bordure et dans la rivière est imposée respectivement au niveau des arrêtes (bords) latérales, et au niveau de l'arrête du lit (section mouillée) de la rivière du modèle. Le fond de chaque section est considéré (ou supposé) imperméable. Les valeurs de perméabilités utilisées pour la ZH sont obtenues par les modèles 1D de la ZH, alors que celles utilisées pour les autres couches géologiques sont issues des mesures par chocs hydrauliques. Les paramètres thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique) du milieu sont issus de la littérature.

La validation des modèles 2D est réalisée par comparaison des chroniques de température simulées au niveau de la ZH à celles mesurées. Les performances du modèle sont évaluées par les critères statistiques habituels (la corrélation r^2 , le biais et le RMSE, cf. Tableau 34).

Paramètres	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Aire (m²)	10,9	20	20,3	45,7	29,6
Nombre d'éléments	10084	4738	5008	10295	4345
Nombre de Nœuds	5144	2457	2603	5284	2286
Résolution (cm)	1,25 à 10	5 à 20	5 à 20	5 à 20	5 à 20
Profondeur (m)	3	3,5	3	5	4
Largeur (m)	4	7	9	13,2	11,1
Nombre de couches	4	4	3	4	4
Perméabilité [m.s⁻¹]					
Limons	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁶
Argiles à meulière	1.10 ⁻⁶	5.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁶	5.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁶
Calcaire de Brie	5.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁵			
Argiles vertes					
Marnes	2.10 ⁻⁷	5.10 ⁻⁷			
ZH	5.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁶	5.10 ⁻⁷	2.10 ⁻⁷	2,2.10 ⁻⁶

Tableau 33 : Géométrie et paramétrisation des modèles 2 D

Les résultats sont globalement très satisfaisants (Tableau 34). En effet, les simulations reproduisent à la fois les variations et les tendances saisonnières, ainsi que les fluctuations diurnes de la température des 4 profondeurs de la ZH. Les corrélations entre la température observée et celle de la simulation sont proches de 1. Les RMSE globales ne dépassent pas 0,8°C, et elles varient entre 0,22 et 0,77 °C. Les biais sont également proches de 0 (-0,05 à -0,23°C). Il est à noter que des critères statistiques moins satisfaisants sont observés au niveau des stations 3 et 4. Cela peut être dû au type de contact entre le cours d'eau et le substrat (couches peu perméables) et la nature des sédiments de la ZH (probablement plus hétérogènes qu'en amont du bassin).

Les estimations 2D de flux d'eau via une section de rivière sont présentées sur la Figure 85. Le sens des échanges simulés sont cohérents avec les gradients hydrauliques mesurés entre la rivière et les piézomètres de bordure (Figure 82). En effet, on observe la dominance des exfiltrations (nappe vers rivière) en amont et des infiltrations (rivière vers nappe) en aval du bassin. Les inversions du sens des échanges sont également bien simulées, que ce soit en période de crues (sur les 2 sections amont), ou en période de transition saisonnière entre les bas niveaux et les hauts niveaux piézométriques. Au niveau des sections amont 1 et 2, le drainage de la nappe de Brie par la rivière représente, respectivement 95% et 98% des flux totaux échangés. Quelques périodes de ré-infiltration de la rivière vers la nappe sont observées sporadiquement, lors des fortes crues. À l'inverse, les infiltrations représentent plus des trois quarts des échanges dans la partie aval du bassin (avec 78% pour la section 4 et 76 % pour la section 5). La section intermédiaire 3 présente un bilan équilibré où les infiltrations (42%) sont presque équivalentes aux exfiltrations (58%). Ces résultats de flux, aux sections 4 et 5, montrent clairement que l'aquifère du Champigny est alimenté par la rivière dans la partie aval du bassin.

Les flux moyens simulés par section ont été normalisés par la largeur de la section afin de confronter l'intensité des échanges entre stations. Les exfiltrations moyennes diffèrent d'un ordre de grandeur entre l'amont (de l'ordre de $9,5.10^{-3}$ à $2,5.10^{-2}$ m.s⁻¹), et l'aval du réseau hydrographique (2.10^{-3} m.s⁻¹). De même, les infiltrations moyennes diffèrent d'un ordre de grandeur d'amont (de l'ordre de $4,3.10^{-4}$ à $4,9.10^{-4}$ m.s⁻¹) en aval (de $-7,2.10^{-3}$ à $-6,6.10^{-3}$ m.s⁻¹). Par contre la dynamique du gradient amont aval est inversée lorsque les exfiltrations et les infiltrations sont comparées. En effet l'exfiltration diminue d'amont en aval, alors que l'infiltration augmente.

	moy obs	moy sim	Std obs	Std sim	rho	biais	RMSE
points 1							
Prof 0.15 m	11.97	11.90	4.00	3.98	0.98	-0.07	0.76
Prof 0.25 m	12.26	12.14	3.67	3.63	0.99	0.12	0.39
Prof 0.35 m	12.24	12.10	3.43	3.43	1.00	0.14	0.32
Prof 0.45 m	11.94	11.74	3.28	3.21	1.00	0.20	0.37
Total	12.11	11.98	3.60	3.57		0.13	0.49
point 2							
Prof 0.10 m	12.40	12.37	2.06	1.99	0.99	-0.03	0.31
Prof 0.20 m	12.37	12.31	1.90	1.86	0.98	-0.05	0.36
Prof 0.30 m	12.24	12.27	1.81	1.81	0.97	0.04	0.41
Prof 0.40 m	12.27	12.24	1.74	1.79	0.97	-0.03	0.45
Total	12.32	12.30	1.88	1.86		0.02	0.39
point 3							
Prof 0.10 m	10.40	10.23	3.71	3.83	0.99	-0.17	0.54
Prof 0.20 m	10.29	10.19	3.59	3.81	0.99	0.10	0.50
Prof 0.30 m	10.40	10.13	3.45	3.79	0.99	-0.27	0.70
Prof 0.40 m	8.04	7.32	1.32	1.34	0.88	-0.72	0.97
Total	10.14	9.91	3.44	3.65		-0.23	0.63
point 4							
Prof 0.10 m	10.05	10.27	4.00	4.02	0.99	0.22	0.58
Prof 0.25 m	10.17	10.57	3.90	3.45	0.97	0.40	1.14
Prof 0.40 m	10.34	10.35	3.56	3.86	0.99	0.00	0.54
Prof 0.55 m	10.34	10.39	3.35	3.78	0.99	0.05	0.68
Total	10.22	10.39	3.71	3.78		0.17	0.77
point 5							
Prof 0.10 m	12.79	12.79	3.40	3.48	1.00	0.00	0.13
Prof 0.20 m	12.69	12.67	3.30	3.42	1.00	-0.03	0.17
Prof 0.30 m	12.65	12.55	3.22	3.39	1.00	-0.10	0.27
Prof 0.40 m	12.55	12.48	3.16	3.38	1.00	-0.07	0.29
Total	12.67	12.62	3.27	3.42		0.05	0.22

Tableau 34 : Critères statistiques des simulations METIS en °C. rho : coefficient de corrélation.

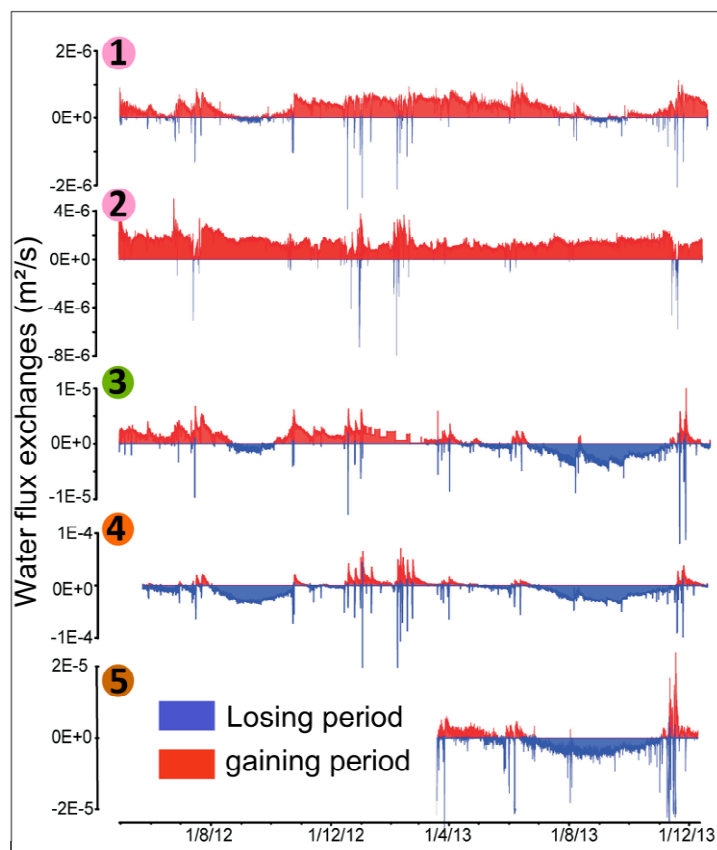


Figure 85 : Résultats des simulations des flux échangés par section de rivière. Exfiltrations en rouge, Infiltration en bleu (Mouhri et al. 2014a,b)

4.5.1.4. Estimations des flux échangés à l'échelle des tronçons de rivière

En formulant l'hypothèse forte de l'homogénéité de la perméabilité de la ZH à l'échelle d'un tronçon présentant, d'amont en aval, le même type de connectivité nappe-rivière, nous avons tenté d'extrapoler les résultats obtenus à l'échelle d'une section MOLONARI à l'échelle de tronçons de rivière "homogènes". Cette hypothèse pourra être raffinée par des campagnes de mesure in situ de ce paramètre pour les 6 km de réseau hydrographique suivi par les infrastructures MOLONARI.

Pour les premières estimations réalisées dans ce rapport, la méthodologie consiste à intégrer, par extrapolation linéaire, les flux estimés au niveau de chaque section sur toute la longueur du tronçon (Figure 86). Les flux échangés obtenus ont été 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, nous avons quantifié, sur cette base, les échanges nets (Q_{net}) et les échanges absolus (Q_{abs}). Les exfiltrations, les infiltrations et le ruissellement sont notés, respectivement E, I et R. Q et Q_{amont} représentent le débit mesuré, respectivement au droit de la section et en amont du tronçon considéré

$$Q_{net} = \sum E + \sum I \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_{abs} = \sum |E| + \sum |I| \dots\dots\dots(2)$$

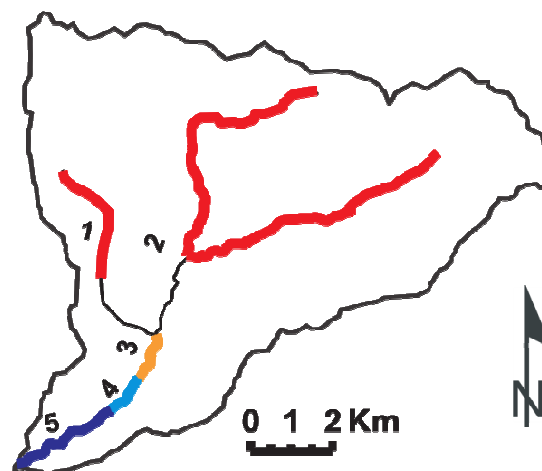


Figure 86 : Carte des échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin des Avenelles, obtenue par extrapolation des estimations des débits échangés à l'échelle des sections MOLONARI : l'exfiltration est dominante sur les tronçons rouges et l'infiltration sur les tronçons bleus (Mouhri et al. 2014a,b)

Les échanges nets sont généralement utilisés pour établir des bilans hydriques alors que les échanges absolus intéressent le potentiel épuratoire de la ZH via des réactions biogéochimiques.

Pour établir le bilan à l'échelle des tronçons amont, l'équation 3 est utilisée, et pour les tronçons intermédiaires et aval, l'équation 4 prend en compte le débit amont. Le bilan annuel est calculé en lame d'eau (mm) :

$$Q = \sum E + \sum I + R \dots\dots\dots(3)$$

$$Q = \sum E + \sum I + R + Q_{amont} \dots\dots\dots(4)$$

Dans les tronçons amont 1 et 2, en raison de la faible valeur des infiltrations, les flux net échangés (67,9 mm) sont quasiment équivalents aux flux absolus (70,5 mm). Le ruissellement (36,6 mm) représente près de 40 % du débit observé. Cette estimation est cohérente avec les résultats de traçage isotopique de l'origine des eaux du bassin de Mélarchez (Blavoux, 1978). En aval, la différence entre les échanges nets et les échanges absolus est plus remarquable. En effet, le débit absolu (≈ 53 mm) est 2 fois plus élevé que le débit net (≈ 28 mm) au niveau des tronçons 4 et 5. Quant au tronçon intermédiaire 3, il est caractérisé par un très faible flux net (3,4 mm) et un fort flux absolu (20,6 mm).

4.5.1.5. Bilan des échanges de flux à l'échelle du bassin des Avenelles

L'extrapolation des flux échangés à l'échelle du réseau hydrographique a permis d'établir un premier bilan des échanges nets entre la nappe et la rivière à l'échelle du bassin des Avenelles. En termes de bilan, la lame d'eau totale simulée (échanges absolus) de 286 mm/an, en tenant compte des pertes vers le Champigny, est supérieure à la lame d'eau observée de 191 mm à l'exutoire (Figure 87). Cette différence (déficit) s'explique par les importantes infiltrations de la rivière vers l'aquifère du Champigny (-48 mm/an soit -14%). Le débit à la sortie du bassin ne représente donc que 86% de la lame d'eau (190 mm/an). Les exfiltrations représentent 94 mm/an soit 40% et le ruissellement représente 144 mm/an soit 60%.

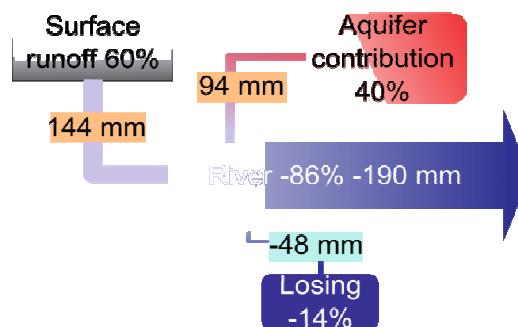


Figure 87 : Bilan des échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin des Avenelles, obtenu par extrapolation des estimations du modèle hydro-thermique couplé (METIS) (Mouhri et al. 2014a,b)

4.5.1.6. Premières estimations de flux avec la plateforme Eau-Dyssée

Les données du modèle tertiaire de la Seine, calibré par ailleurs et utilisé dans le cadre de la quantification des échanges d'eau entre les masses d'eau souterraines et les masses d'eau cours d'eau du bassin de la Seine (Flipo et al. 2013)(Labarthe et al. 2014), ont été exploitées pour estimer les échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin de l'Orgeval. Les simulations de ce modèle sont restreintes au cours d'eau d'ordre 2 et plus. La simulation des échanges au niveau du ru des Avenelles a été réalisée sur une période de 20 ans (1993 à 2013). L'objectif est d'estimer les échanges en utilisant la méthode des hauteurs fixes en rivière citée dans la section précédente, dont le potentiel pour quantifier les échanges nappe-rivière à l'échelle de 3250 km de réseau hydrographique de la Seine, a été récemment démontré par (Pryet et al. n.d.). La résolution des mailles rivière pour le bassin de l'Orgeval est de 250x250m.

Les résultats du modèle Eau-Dyssée, dont la calibration dans le secteur de l'Orgeval n'est pas optimale du fait de sa résolution grossière sur les plateaux agricoles (maille de 1 à 2 km de côté) sont présentés dans le but de les confronter à ceux des estimations obtenues par extrapolation spatiale des quantifications du modèle hydro-thermique METIS. A cet effet, les simulations de l'année civile 2012 ont été utilisées comme référence.

La comparaison des flux moyens échangés entre les deux modèles (Figure 88) montre que les intensités de flux échangés estimées sont cohérentes entre les deux modèles. Les bilans du flux annuel échangé, à l'échelle du bassin, semble donc assez cohérent. A l'inverse le sens des échanges présente des différences entre les deux modèles en particulier sur le tronçon entre le point 4 et 5. Cependant il s'agit ici de

premières comparaisons, qui devront être renouvelées suite à la recalibration à venir du modèle hydrologique-hydrogéologique couplé des Avenelles en cours de raffinement.

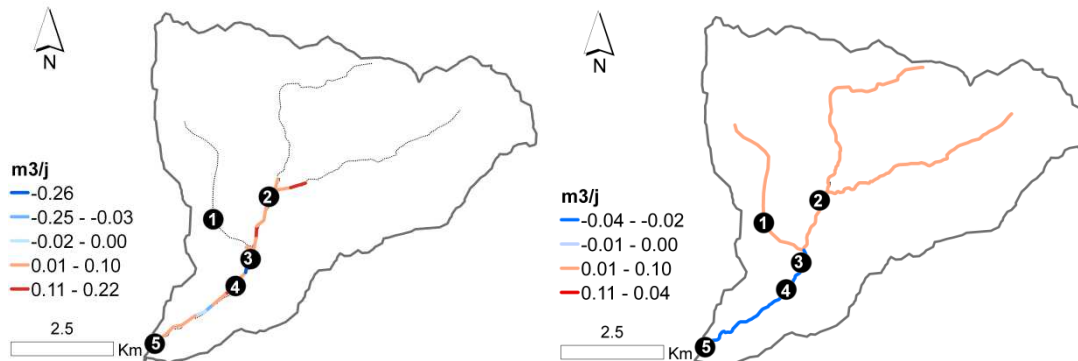


Figure 88 : Comparaison de flux moyens échangé issus du modèle Eau-Dyssée (à gauche) et du modèle METIS extrapolé à l'échelle des biefs du bassin des Avenelles (à droite).

4.5.1.7. Conclusion

La métrique géophysique a permis :

- de définir et de caractériser la structure géologique (hétérogénéités) des grandes unités structurales et de la ZH ;
- de caractériser la connectivité ou le type de contact entre le cours d'eau et le substratum géologique ;
- de sélectionner les 5 points d'intérêt pour l'implantation du dispositif MOLONARI.

La métrique MOLONARI a permis :

- de caractériser, à l'aide enregistrements hydro-thermiques à pas de temps 15 min, la variabilité spatio-temporelle de la dynamique des échanges d'eau entre la rivière et les différentes unités aquifères ;
- de montrer que la connectivité hydraulique entre la rivière et les aquifères est fortement contrainte par le contexte géologique (type de contact entre le cours d'eau et les unités géologiques) et par les conditions hydrométéorologiques, ce qui se traduit par une variabilité spatiale et temporelle de la relation nappe-rivière. Au niveau de l'amont du bassin, hormis, les périodes de crue, la rivière draine la nappe de Brie, alors qu'au niveau des sections intermédiaires et aval, respectivement, en contact avec les marnes et avec le Champigny, la rivière, globalement, alimente l'aquifère de Champigny ;
- de confirmer les mesures de profils verticaux de la température de la ZH sont donc bien appropriés pour suivre la direction et l'intensité des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines ;
- de fournir un jeu de données à haute résolution temporelle pour mieux contraindre les conditions limites des modèles 2D couplant le transfert de chaleur aux écoulements au droit de chaque section de rivière suivie.

La métrique METIS (modélisation hydro-thermique couplée) a permis :

- de fournir une quantification des échanges nappe-rivière à l'échelle locale de la station MOLONARI. Ces simulations démontrent le rôle des flux d'eau dans le transfert de chaleur par advection et la pertinence de la mesure thermique verticale dans la ZH ;
- de mettre en avant l'importance des infiltrations, dans la partie aval du bassin, pour la recharge de l'aquifère de Champigny ;
- de boucler le bilan hydrologique à l'échelle du bassin.

4.5.2. Invertébrés souterrains

4.5.2.1. Stations échantillonnées

La campagne de prélèvements a été réalisée en juin 2012 et 13 stations ont été échantillonnées (Figure 89) :

- 3 stations en fond de rivière, directement dans l'Orgeval et la Yaiche (S1, S2 et S3) ;
- 7 piézomètres de bordure de rivière, en rive droite et gauche de l'Orgeval et de la Yaiche (PS2, PS3, PS6, PS7, PS8, Pz et Berget témoin) ;
- 3 piézomètres de plateau, répartis sur le bassin des Avenelles et en bordure (PS4, Pz3 et Avenelles mi-pente).

Lors de cette campagne, 3 échantillons de 10 litres ont été prélevés sur chaque station en fond de rivière et un échantillon de 10 litres a été récupéré dans chaque piézomètre.

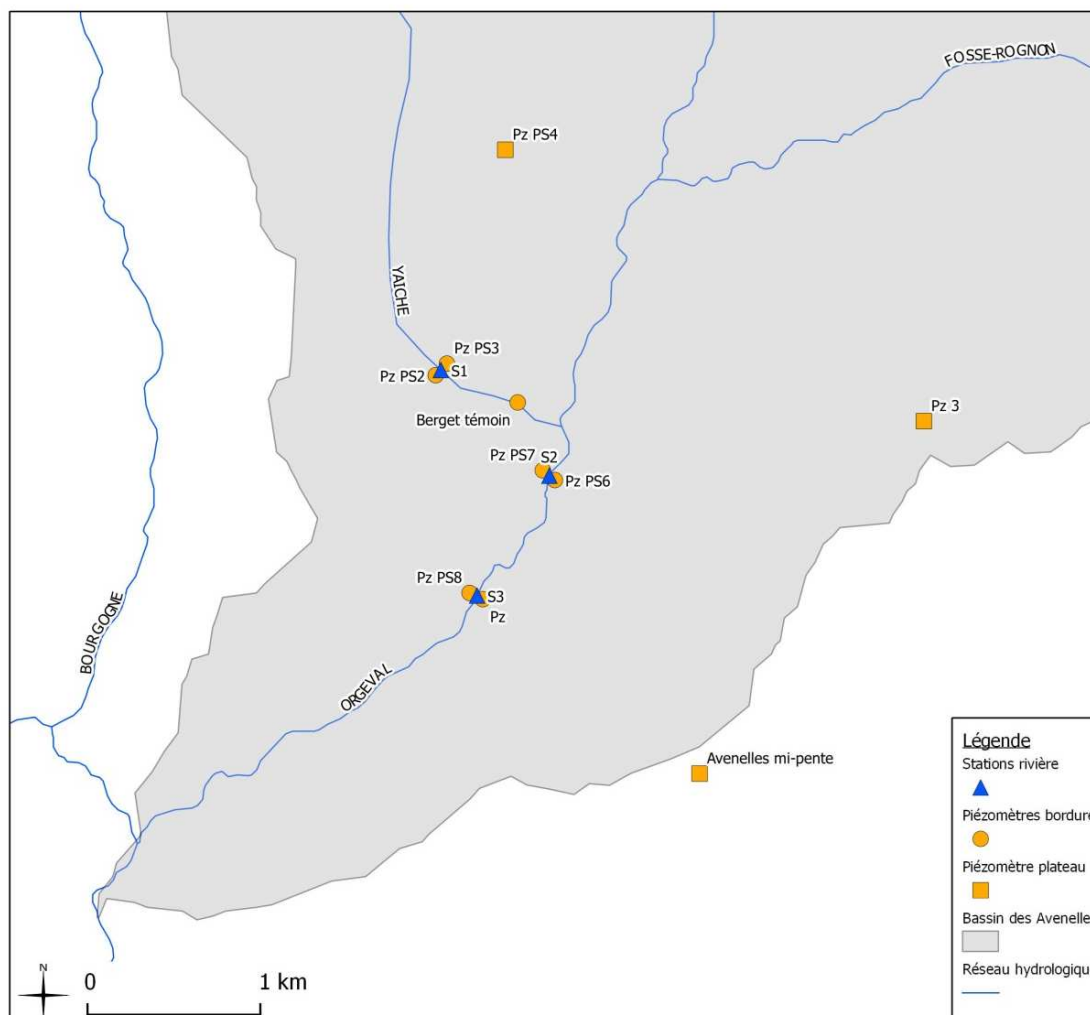


Figure 89 : Répartition des stations d'invertébrés sur l'Orgeval

4.5.2.2. Analyse et diagnostic des échanges à partir des invertébrés

La richesse faunistique est très faible avec seulement deux espèces amphipodes stygobies ubiquistes (classe 3), *Niphargus kochianus* et *Niphargus sp1*. Ces espèces sont retrouvées dans deux piézomètres de plateau (Avenelles mi-pente et PzPS4) ainsi que dans le piézomètre de bordure en rive gauche de la station S3 (Pz) (Figure 90). Cette faible diversité s'explique probablement par la position du bassin de l'Orgeval très

éloignée des zones refuges périglaciaires et/ou par une géologie locale peu propice au développement d'une faune stygobie abondante.

45 individus stygobies ont été échantillonnés dans le piézomètre en rive gauche de la station 3, 5 dans le piézomètre Avenelles mi-pente et 4 dans le piézomètre PzPS4. La faune souterraine est donc très localisée. La présence de stygobies en grand nombre dans le piézomètre proche de la rivière en S3 laisse supposer qu'il est alimenté par la nappe, mais l'eau de celle-ci ne semble pas atteindre la rivière. Cette absence d'apport est probablement due aux activités agricoles (champs labourés) qui produisent des sédiments fins et tassent le sol en bordure de cours d'eau.

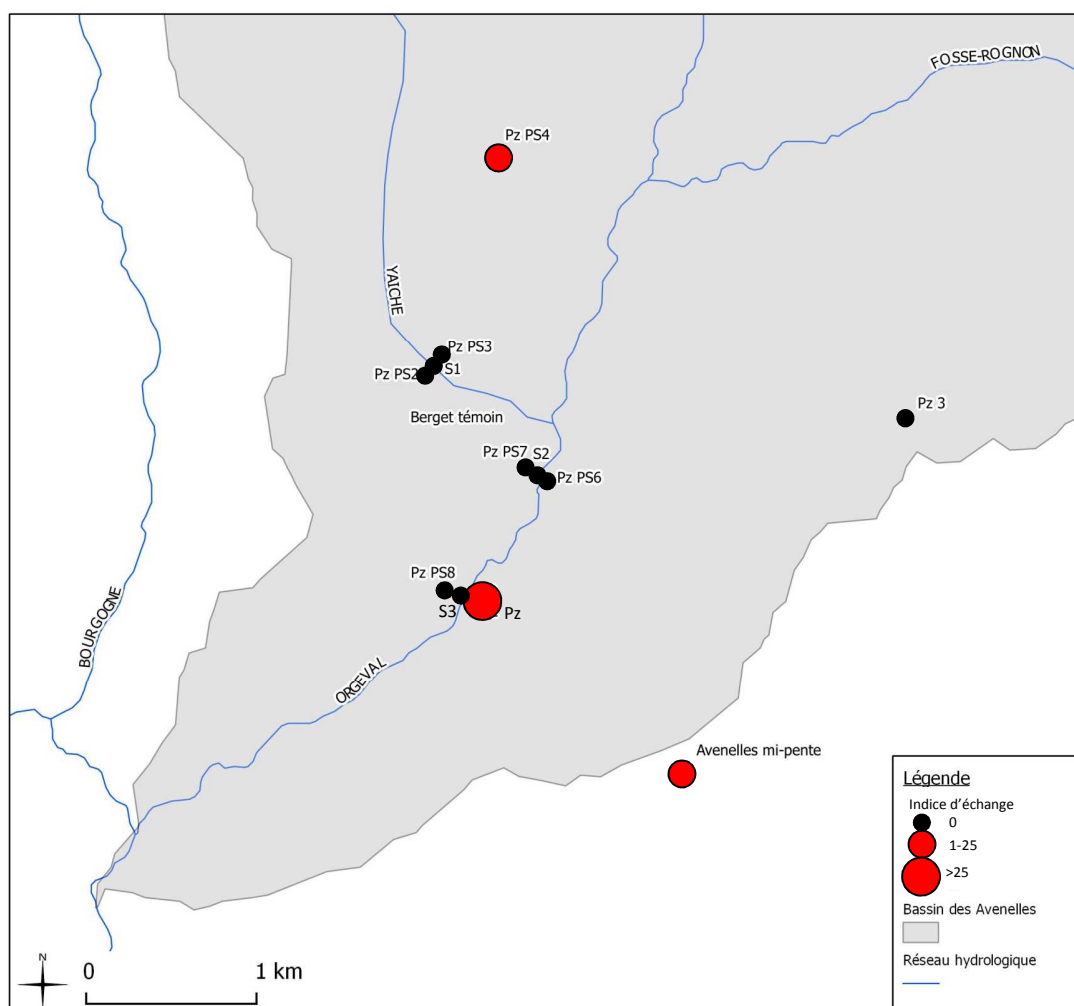


Figure 90 : Indice pondéré des espèces stygobies sur l'Orgeval

4.5.2.3. Analyse et interprétation des caractéristiques physico-chimiques

Le Tableau 35 présente les données physico-chimiques.

La température des trois stations échantillonnées dans le chenal de l'Orgeval est peu variable, elle se situe aux alentours de 13,5°C (Figure 91). L'eau prélevée dans les piézomètres PzPS6 et Pz3 est un peu plus élevée (15,5 et 15,3°C). En revanche, les eaux des piézomètres qui entourent la station S3 en bas du secteur d'étude sont beaucoup plus froides, entre 10°C et 12°C, ce qui semble indiquer des apports d'eau de nappe à ce niveau.

La conductivité relevée dans la zone d'étude est globalement élevée (Figure 92). Elle explose dans les piézomètres de bordure aux abords des stations S1 et S2 (>1000 µS/cm) et affiche des valeurs hautes (>500

μS/cm) dans tous les autres piézomètres. Ces valeurs importantes traduisent sans doute une circulation lente de l'eau de nappe alimentant ces piézomètres. Les piézomètres de la station S3 s'individualisent là encore. La conductivité mesurée dans le piézomètre Pz est plus faible et équivalente à celle de la nappe mesurée sur les piézomètres de plateau (Avenelles mi-pente et Pz3) avec lesquels il pourrait être en relation.

C'est dans ce piézomètre Pz à l'eau plus fraîche et plus chargée en ions dissous qu'ont été récoltés la majorité des individus stygobies. Les teneurs en oxygène dissous indiquent également une bonne circulation latérale de l'eau (2 mg/l), elles sont supérieures à celles mesurées dans les autres piézomètres de bordure (Figure 93). Il existe donc probablement une bonne connexion entre le piézomètre Pz et la nappe.

Stations	Température (°C) Surface	Température (°C) Interstitiel	Conductivité (μS/cm) Surface	Conductivité (μS/cm) Interstitiel	Oxygène (mg/l) Surface	Oxygène (mg/l) Interstitiel
S1	13,6	13,8	441	440	8,55	7,08
S2	13,1	13,5	613	668	8,76	5,47
S3	13	13,7	647	614	9,15	6,01
Pz PS3		13,5		677		1,45
Pz PS2		12,7		1427		1,98
Pz PS7		11		1165		1,21
Pz PS6		15,5		1453		0,25
Pz PS8		11,6		546		0,7
Pz		11,2		908		2,2
Berget témoin		13		523		3,7
Avenelles mi-pente		12,6		743		5,1
Pz 3		15,3		707		7,95

 Données indisponibles

Tableau 35 : Tableau de la physico-chimie des eaux de surface et interstitielles de l'Orgeval

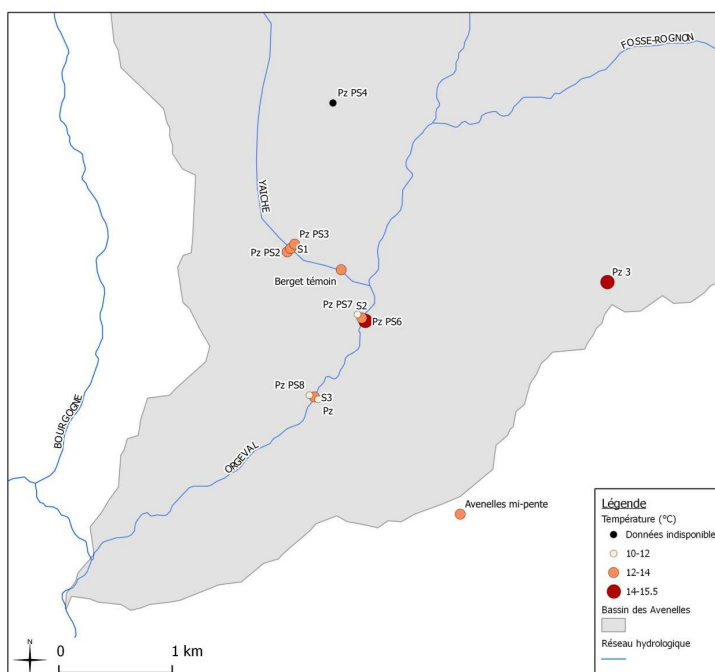


Figure 91 : Température interstitielle des stations

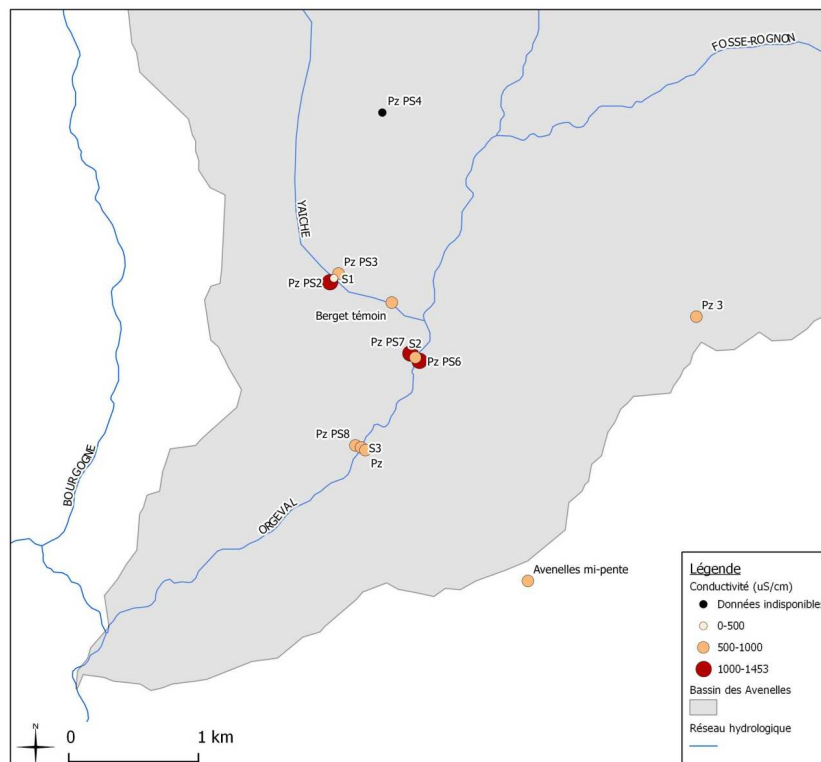


Figure 92 : Conductivité interstitielle des stations

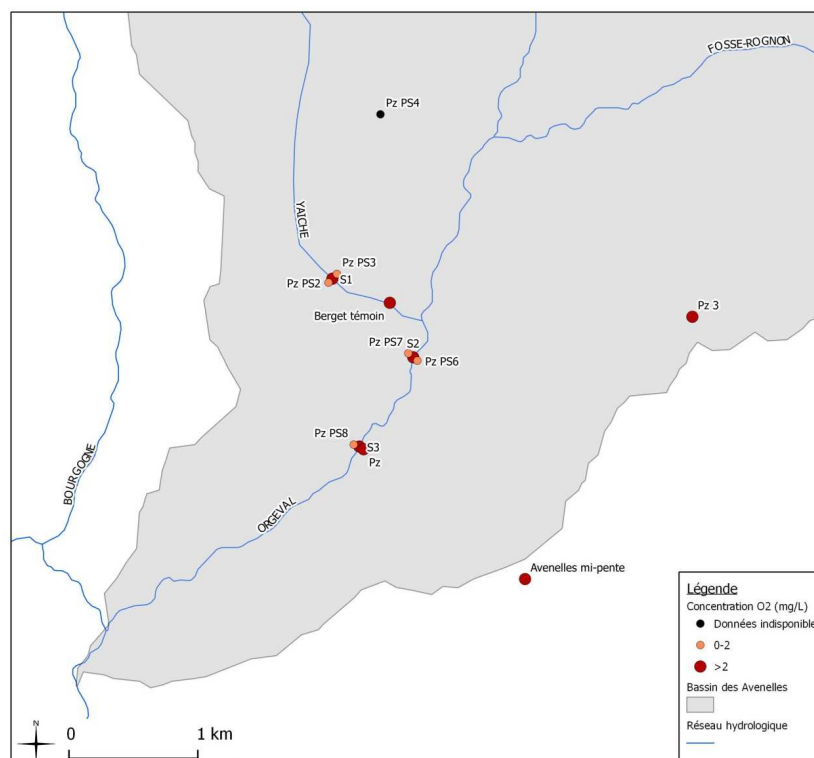


Figure 93 : Oxygène dissous interstitiel des stations

4.5.2.4. Conclusions

Les résultats obtenus dans le bassin de l'Orgeval restent difficiles à interpréter, d'une part à cause de la très faible richesse des peuplements en organismes stygobies et d'autre part par les limites méthodologiques liées à l'échantillonnage de rivières ayant une importante charge de fond limoneux. Notre méthode, testée pour la première fois dans le bassin parisien, s'avère être moins pertinente sur ce type de cours d'eau (petit ruisseau agricole à sédiments fins). L'habitabilité des sédiments devient alors une limite à la structuration des communautés interstitielles et à l'usage même de la méthode.

Toutefois et malgré ces limites, les résultats indiquent :

(1) que les piézomètres de plateau PzPS4 et Avenelles mi-pente sont bien en contact avec une nappe hébergeant des organismes stygobies

(2) qu'il existe des apports de cette nappe dans le piézomètre Pz situé en bordure de la station S3 (Figure 94).

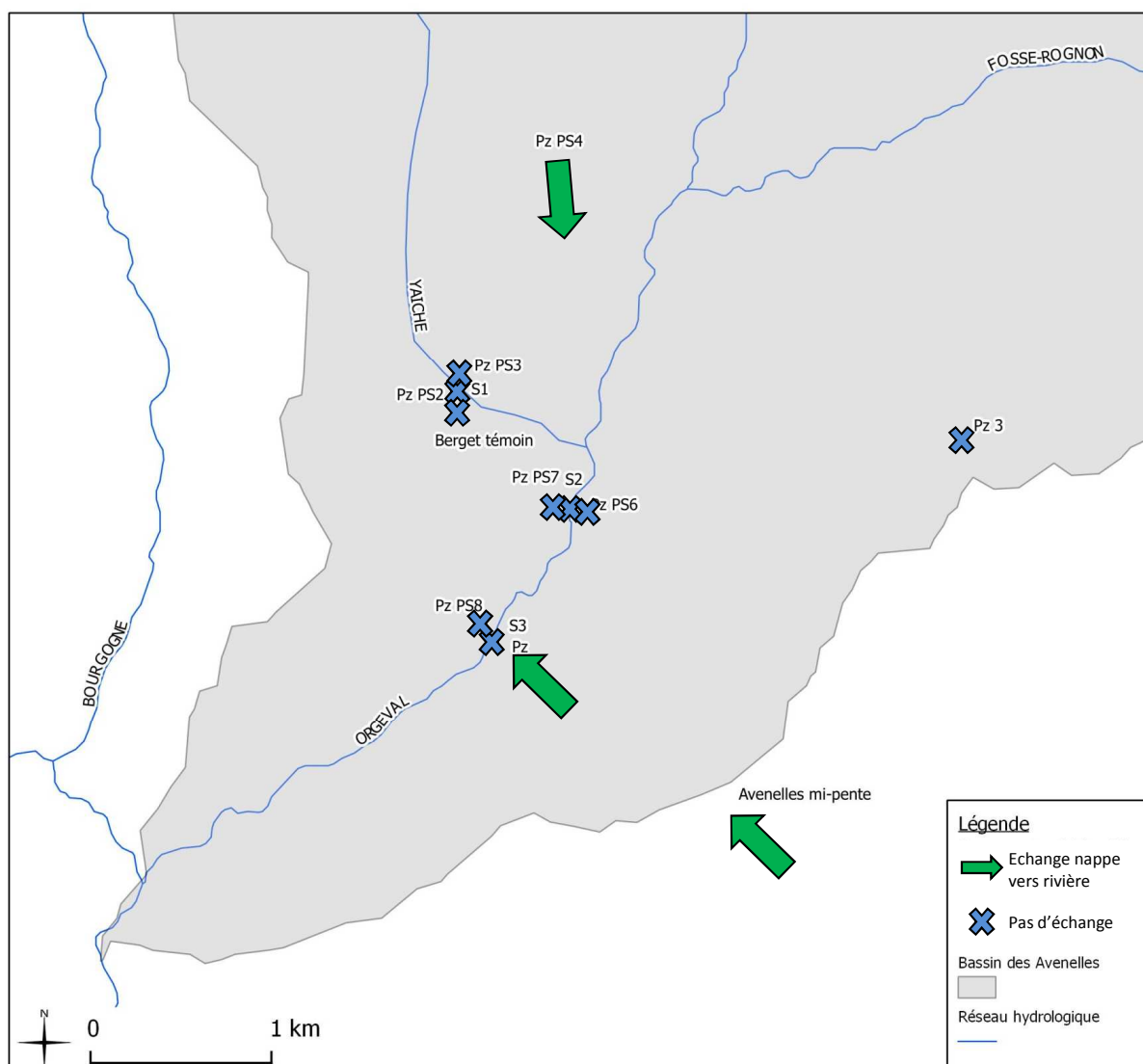


Figure 94 : Bilan des échanges nappe-rivières sur l'Orgeval pour la métrique invertébrés

4.5.3. Analyse géomatique

4.5.3.1. Données d'entrée

Pour ce premier travail de caractérisation des échanges sur l'Orgeval les données disponibles étaient les suivantes :

- Cartes piézométriques : octobre 2011 (basses-eaux), juin 2011 (hautes-eaux), septembre 2009 (basses-eaux) et avril 2009 (hautes-eaux)
- BD Carthage pour le tracé des cours d'eau (Avenelles et Yaiche).

Le manque de données pour cette première phase de travail nous a conduit à ne diagnostiquer que le sens des échanges nappe/Avenelles et nappe/Yaiche. La quantification des échanges est fondée sur une perméabilité moyenne de $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ et l'hypothèse d'une surface d'échange de 1 m^2 .

4.5.3.2. Caractérisation des échanges nappe/rivière

La Figure 95 présente, à titre d'exemple, les résultats spatialisés des échanges nappe/Avenelles et nappe/Yaiche pour la piézométrie d'octobre 2011 (basses-eaux). Cette carte présente :

- un découpage du linéaire du cours d'eau en points kilométriques (PK en noir) : PK 0 à 5,75 pour les Avenelles et PK 0 à 4,5 pour la Yaiche ;
- 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 ; en bleu les tronçons sur lesquels aucun échange n'est identifié. La valeur associée est le gradient de nappe estimé : valeurs négatives pour les échanges de la rivière vers la nappe et valeurs positives pour les échanges de la nappe vers la rivière. Les tronçons non diagnostiqués sont en gris.

La spatialisation des échanges pour octobre 2011 sur la rive gauche de la Yaiche est la suivante :

- PK 0 à 0,25 : la nappe alimente la rivière
- PK 0,25 à 0,75 : la rivière alimente la nappe
- PK 1 : la nappe alimente la rivière
- PK 1,25 à 2,25 : pas d'échange détecté
- PK 2,5 : la nappe alimente la rivière
- PK 2,75 à 3,25 : pas d'échange détecté
- PK 3,5 à 4,25 : la nappe alimente la rivière
- PK 4,5 : la rivière alimente la nappe

La spatialisation des échanges pour octobre 2011 sur la rive droite de la Yaiche est la suivante :

- PK 0 : la rivière alimente la nappe
- PK 0,25 à 1 : la nappe alimente la rivière
- PK 1,25 à 3 : pas d'échange détecté
- PK 3 à 4,5 : la nappe alimente la rivière

La spatialisation des échanges pour octobre 2011 sur la rive gauche des Avenelles est la suivante :

- PK 0 : la rivière alimente la nappe
- PK 0,25 à 1,25 : la rivière draine la nappe
- PK 1,5 à 1,75 : la rivière alimente la nappe
- PK 2 à 2,5 : pas d'échange détecté

- PK 2,75 à 3,25 : la rivière alimente la nappe
- PK 3,5 à 3,75 : la rivière draine la nappe
- PK 4 : pas d'échange détecté
- PK 4,25 à 4,5 : la rivière draine la nappe
- PK 4,75 à 5,25 : pas d'échange détecté
- PK 5,5 à 5,75 : la rivière draine la nappe

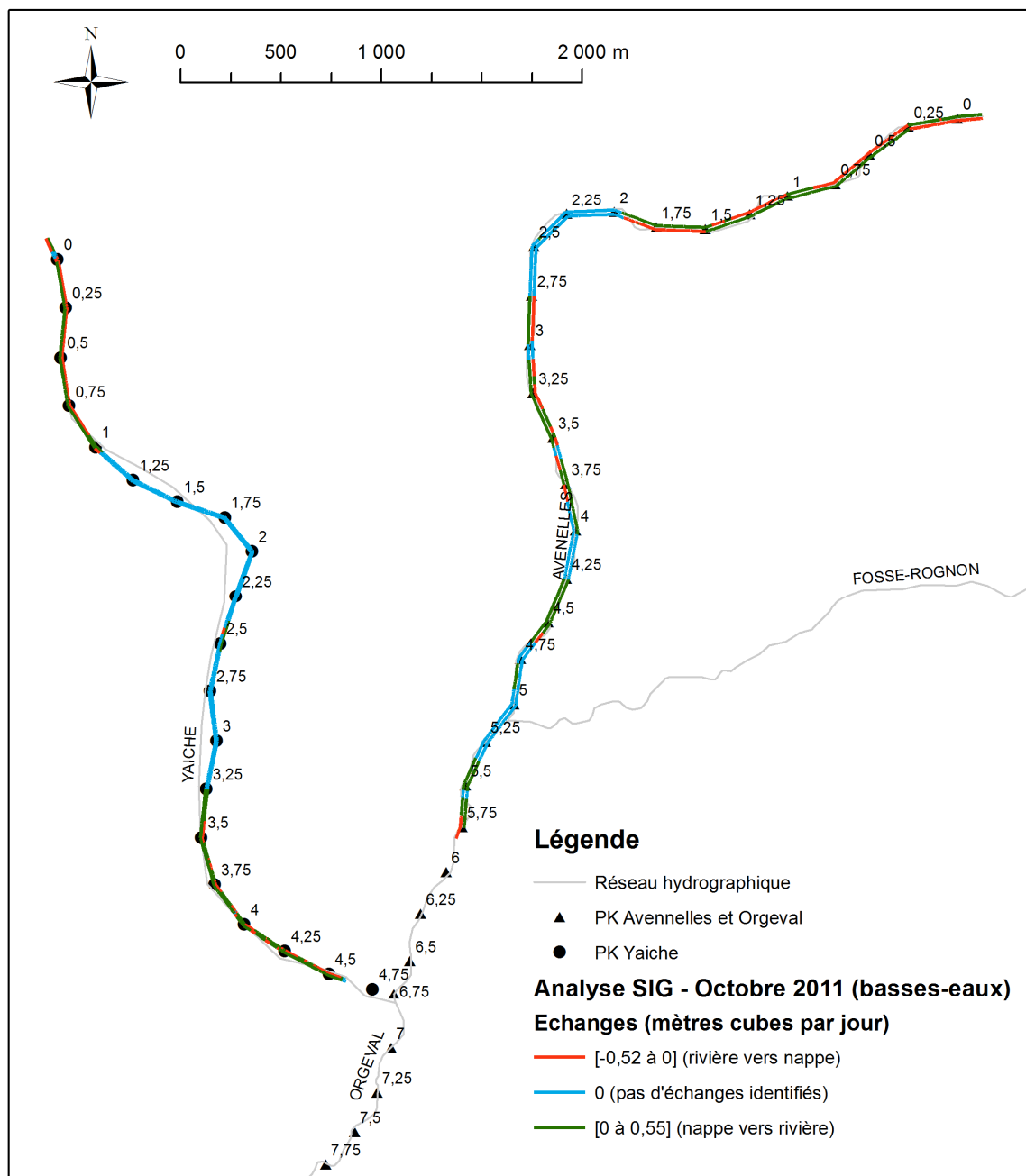


Figure 95 : Spatialisation des échanges nappes/rivières sur la Yaiche et l'Orgeval

La spatialisation des échanges pour octobre 2011 sur la rive gauche des Avenelles est la suivante :

- PK 0 : la rivière draine la nappe
- PK 0,25 à 0,75 : la rivière alimente la nappe

- PK 1 : la rivière draine la nappe
- PK 1,25 : la rivière alimente la nappe
- PK 1,5 à 1,75 : la rivière draine la nappe
- PK 2 à 2,25 : pas d'échange détecté
- PK 2,75 à 3,75 : la rivière draine la nappe
- PK 4 : pas d'échange détecté
- PK 4,25 à 4,75 : la rivière draine la nappe
- PK 5 à 5,25 : pas d'échange détecté
- PK 5,5 : la rivière draine la nappe
- PK 5,75 : la rivière alimente la nappe

D'une manière générale le diagnostic des échanges n'est pas très différent pour les autres périodes.

4.5.4. Synthèse

4.5.4.1. Géophysique, MOLONARI, METIS

Globalement, ces méthodes montrent que la nappe alimente les Avenelles sur leur partie amont (PK 0 à 5). Les échanges s'inversent sur la partie aval (PK 8,25 à 10,5). La partie centrale (PK 5 à 8) est soumise à des inversions saisonnières. Les apports de nappe au cours d'eau sont faibles : de l'ordre de $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{jour/m}^2$ avec Métis et de $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{jour/m}^2$ avec Eau-Dyssée.

Sur la Yaiche la nappe alimente le cours d'eau sur le secteur étudié.

4.5.4.2. Invertébrés souterrains

Le diagnostic des échanges nappes/rivières sur la base des invertébrés souterrains a été réalisé à partir de prélèvements effectués en juin 2012. Sur le site de l'Orgeval, les données restent difficiles à interpréter, à cause de la très faible richesse des peuplements en organismes stygobies et des limites méthodologiques liées à l'échantillonnage de rivières ayant une importante charge de fond sableux-limoneux

Toutefois et malgré ces limites, les résultats indiquent :

- (1) que les piézomètres de plateau PzPS4 et Avenelles mi-pente sont en contact avec une nappe hébergeant des organismes stygobies
- (2) qu'il existe des apports de cette nappe dans le piézomètre Pz situé en bordure de la station S3.

4.5.4.3. Analyse géomatique

La méthode géomatique montre que sur toutes les périodes diagnostiquées la nappe alimente majoritairement les cours d'eau étudiés :

- pour la Yaiche les apports sont de l'ordre de $0,6$ à $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{jour/m}^2$ (soit environ 14 à $18 \text{ m}^3/\text{jour}$ sur le linéaire du cours d'eau)
- pour les Avenelles les apports sont de l'ordre de $1,25$ à $1,63 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{jour/m}^2$ (soit environ 10 à $15 \text{ m}^3/\text{jour}$ sur le linéaire du cours d'eau)

Contrairement aux essais de quantification réalisés sur la Sèvre-Niortaise et l'III, pour l'Orgeval les débits d'échanges de l'analyse SIG et du modèle sont du même ordre de grandeur.

Avenelles															Synthèse		Qualité diagnostic											
PK	Invertébrés		SIG			SIG			SIG			SIG			Modèle Metis	Molanari	Modèle Metis/Molanari	Modèle Metis/Molanari	Eaudysee	PK	Synthèse	Invert.	SIG	Molanari	Modèle Metis	Modèle Metis/Molanari	Eaudysee	
	juin-12		Avril 2009 HE			Sept. 2009 BE			Juin 2011 HE			Oct. 2011 BE			Flux moyen	Hautes eaux	Basse eaux	Flux moyen 2012										
	RG	RD	RG	RD	Bilan	RG	RD	Bilan	RG	RD	Bilan	RG	RD	Bilan	Flux moyen				RG									RD
0																			0									
0,25																			0,25									
0,5																			0,5									
0,75																			0,75									
1																			1									
1,25																			1,25									
1,5																			1,5									
1,75																			1,75									
2																			2									
2,25																			2,25									
2,5																			2,5									
2,75																			2,75									
3																			3									
3,25																			3,25									
3,5																			3,5									
3,75																			3,75									
4																			4									
4,25																			4,25									
4,5																			4,5									
4,75																			4,75									
5																			5									
5,25																			5,25									
5,5																			5,5									
5,75																			5,75									
6																			6									
6,25																			6,25									
6,5																			6,5									
6,75																			6,75									
7																			7									
7,25																			7,25									
7,5																			7,5									
7,75																			7,75									
8																			8									
8,25																			8,25									
8,5																			8,5									
8,75																			8,75									
9																			9									
9,25																			9,25									
9,5																			9,5									
9,75																			9,75									
10																			10									
10,25																			10,25									
10,5																			10,5									
10,75																			10,75									
11																			11									

Tableau 36 : Croisement des métriques sur les Avenelles

PK	Yaiche														PK	Synthèse	Qualité du diagnostic																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	Invertébrés		SIG			SIG			SIG			Modèle Metis		Molanari			Modèle Metis/Molanari		Modèle Metis/Molanari																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	juin-12		Avril 2009 HE			Sept. 2009 BE			Juin 2011 HE			Oct. 2011 BE		flux moyen			Hautes eaux		Basse eaux																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	RG	RD	RG	RD	Bilan	RG	RD	Bilan	RG	RD	Bilan	RG	RD	Bilan			RG	RD	Bilan	RG	RD	Bilan																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
0																					0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Tableau 37 : Croisement des métriques sur la Yaiche

4.5.4.4. Synthèse

Comme précédemment pour la Sèvre-Niortaise et l'Ille, la synthèse est présentée sous forme de tableau (Tableau 36 ; Tableau 37) fondés sur le même formalisme.

5. Eléments pour l'élaboration du guide méthodologique

5.1. Approche multi-critère : grille de caractérisation des sites et mise au point d'un corpus de métadonnées

L'objectif de cette grille est de mettre en évidence l'adéquation entre les spécificités des sites et les méthodes/outils de caractérisation des échanges, l'idéal étant d'aboutir à une typologie de configurations à mettre en face d'un panel de techniques d'évaluation possibles.

Cette grille a été conçue au format OpenOffice (La grille vierge utilisée actuellement est le fichier « **Grille_Naprom_Vierge_sept2011.ods** » du 20/08/2011 14/03, taille 51ko) et est constituée de plusieurs onglets (ou fiches) permettant de caractériser les sites au mieux :

- **Onglet « Contacts »** : décrit, caractérise et spécifie qui a rempli la fiche (Non, Prénom, Numéro de téléphone, Adresse e-mail, Organisme)
- **Onglet « Description du site d'étude »** : 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, ID Syrah, Débits, Écoulement, Affluents, Masses d'eau superficielles DCE, Paramètres climatiques, Linéaire de berge)
 - la géologie du site (Formations, Faille)
 - la géomorphologie du site (Style, Sédiments, Colmatage, Transport solide)
 - l'hydrogéologie du site (Code masses d'eau souterraine DCE, Code entité bdrhf V1 et V2, Surface, Volume, Paramètres hydrogéologiques, Niveaux d'alerte, Connexions, Recharge, Vulnérabilité, Hydroécorégions)
 - les grandes caractéristiques chimiques du site
 - les grandes caractéristiques paysagères du site (Éco-régions codes HER1 et 2)
- **Onglet « Niveau d'anthropisation »** : 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, Canal, Ouvrages de captage, Digue, Loisirs nautiques, Centrales nucléaires)
 - Rejets (Industriels, Agricoles, Ménagers)
 - Occupation des sols (A 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 »** : donne des spécificités en terme 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 »** : donne des spécificités en termes d'enjeux de connaissance à l'échelle locale du site ou régionale :
 - Instrumentation du site en nappe (Niveau, Paramètres mesurés, Instruments, Nombre de stations de mesures, Propriétaires des données et du matériel)
 - Instrumentation du site en rivière (Niveau, Paramètres mesurés, Instruments, Nombre de stations de mesures, Propriétaires des données et du matériel)
 - Instrumentation du site à l'interface nappe/rievre (Niveau, 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/rievre (Paramètres mesurés, Campagnes, Chroniques)
 - Modèle (Type, Description)
 - Mesures physico-chimiques (Paramètres mesurés, Campagnes, Chroniques)
 - Mesures biologiques (Paramètres mesurés, Campagnes, Chroniques)
 - Données sociologiques et économiques
 - Autres données
 - Études
- **Onglet « Méthode de caractérisation des échanges nappes/rievre »** : vise à identifier la technique d'évaluation de ces échanges et surtout le type d'informations nécessaires à cette évaluation :
 - Description de la méthode (Nom, Concepts, Compétences, Résolution spatiale, Coût, Support, Tapes, Références, Accessibilité, Niveau de pratique, Réalisme, Transposabilité)
 - Informations nécessaires et données (Études préalables, Données a minima, Données optimales)
 - Points négatifs, inconvénients, points faibles (Limites, Contraintes, Incertitudes, Non applicabilité)
 - Points positifs, avantages, points forts (Applicabilité)
- **Onglet « Résultats »** : donne les résultats obtenus en termes d'évaluation quantitative ou qualitative des échanges nappe/rievre grâce à la méthode de caractérisation utilisée et décrite dans l'onglet précédent (cet onglet sera complété au fur et à mesure de l'avancement du projet) :
 - Résultats primaires (Quantitatif, Qualitatif, Représentation, Échelle d'interprétation)
 - Résultats complémentaires

De plus chaque onglet contient des espaces dédiés à la saisie d'informations complémentaires :

- Source de l'information (Auteur, Date, Titre, Page, Type)
- Cartes
- Commentaires plus détaillés

5.2. Préfiguration d'un glossaire thématique sur les échanges nappes/rievres

Cette partie présente une première version du glossaire thématique du vocabulaire technique et/ou spécifique à chaque discipline utilisée dans ce rapport de première année du projet NAPROM.

La version définitive de ce glossaire pourra être incluse dans le guide méthodologique. De même, les termes finalement sélectionnés et définis pourront être utilisés dans un index de ce guide méthodologique.

Sources consultées (numéro indiqué en exposant après chaque terme) :

1 : Glossaire eaufrance

<http://www.glossaire.eaufrance.fr/>

2 : 1001 mots de l'environnement et du développement durable, Recyconsult, 192 p.

<http://www.dictionnaire-environnement.com/>

3 : Glossaire international d'hydrologie

<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglu.htm>

4 : A glossary of hydrogeological terms, John M. Sharp, Department of Geological Sciences, Jackson School of Geosciences, The University of Texas, Austin, Texas, USA

<http://www.geo.utexas.edu/faculty/jmsharp/sharp-glossary.pdf>

* : Dictionnaire Larousse

<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>

Abiotique³

Relatif à la fraction non vivante d'un écosystème ou à un milieu dont la vie est absente³.

Se dit d'un milieu impropre à la vie*.

Abondance^{1 et 2}

Paramètre d'ordre quantitatif servant à décrire une population. Le dénombrement exhaustif d'une population, animale ou végétale, est généralement impossible. Par extension, elle désigne un nombre d'individus dans une catégorie donnée : population, recrutement, stock, rapportée à une unité de temps ou de surface¹.

Abondance relative, l'abondance relative correspond au nombre total des individus d'une espèce par rapport au nombre total des individus de toutes les espèces présentes, par unité de surface ou de volume².

Anthropique (anthropogénique)⁴

Créé, causé, ou induit par les actions humaines⁴.

Se dit d'un paysage, d'un sol, d'un relief dont la formation résulte essentiellement de l'intervention de l'homme*.

Aquifère (nappe, réservoir souterrain)^{1 et 3}

Formation géologique, continue ou discontinue, contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables (formation poreuses ou fissurées) et capable de la restituer naturellement ou par exploitation (drainage, pompage,...). 60% de l'eau potable distribuée en France provient des nappes souterraines¹.

Formation perméable contenant de l'eau en quantités exploitables³.

Aquitard⁴

Le matériau géologique, la strate, ou la formation de faible perméabilité (une unité de confinement) qui transmet des quantités importantes d'eau à l'échelle régionale ou dans le temps géologique⁴.

Bathymétrie¹

Équivalent sous-marin de la topographie, c'est-à-dire description du relief immergé grâce à l'étude de la nature des fonds d'un milieu aquatique et de leur profondeur. Les résultats de ces études sont traduits par des cartes bathymétriques¹.

Bras mort¹

Partie relictuelle d'un ancien méandre ou d'une tresse. Les bras morts sont plus ou moins déconnectés du lit principal du fait du déplacement de celui-ci au fil des temps ou des mécanismes de sédimentation. Selon leur âge, la saison et le contexte météorologique, les bras morts peuvent être en eau ou asséchés. Ces milieux évolutifs très riches sont des zones de reproduction favorables aux poissons ou à certains amphibiens¹.

Continuum (Corridor aquatique)¹

Correspond au continuum ou à la continuité écologique constitué par un cours d'eau, ses annexes et ses affluents, considéré des sources jusqu'à la mer. Ce réseau ainsi constitué permet le déplacement des espèces aquatiques et semi aquatiques (loutre, castor), nécessaire à la colonisation de leur habitat et à l'accomplissement de leur cycle biologique. Il permet aussi de maintenir le bon fonctionnement physique du cours d'eau, d'assurer le transport des sédiments et des flux liquides dans le système. Ces mécanismes sont indispensables à la constitution d'habitats aquatiques de bonne qualité hydromorphologique (alternances des faciès d'écoulements) et nécessaire à la fonction auto-épuratrice du cours d'eau. A l'échelle régionale, le corridor aquatique apparaît de manière uniforme (cours d'eau). A l'échelle locale, il est constitué de nombreux habitats : banc alluviaux, prairies inondables, bras morts, radiers, mouilles¹.

Ensemble de valeurs que peut prendre une grandeur dont les variations sont continues*.

Éponte

Terrain stérile qui borde une couche ou un filon et qui le délimite. (L'éponte qui est au-dessus d'une couche est appelée toit ; celle qui est en dessous, mur)*.

Etiage¹

Période de plus basses eaux des cours d'eau et des nappes souterraines (généralement l'été pour les régimes pluviaux)¹.

Eutrophe²

Eau ou milieu riche en sels minéraux nutritifs (en particulier, nitrates et phosphates)².

Se dit d'un plan d'eau (étang, lac, etc.) dont les eaux enrichies en matières organiques sont le siège d'une prolifération végétale et bactérienne entraînant une désoxygénation prononcée de l'eau*.

Eutrophisation¹

Enrichissement excessif des cours d'eau et des plans d'eau en éléments nutritifs, essentiellement le phosphore et l'azote qui constituent un véritable engrais pour les plantes aquatiques. Elle se manifeste par la prolifération excessive des végétaux dont la décomposition provoque une diminution notable de la teneur en oxygène. Il s'en suit, entre autres, une diversité animale et végétale amoindrie et des usages perturbés (*alimentation en eau potable, loisirs,...*)¹.

Exhaure (Drainage)³

Extraction de l'eau contenue dans le sol ou dans une cavité³.

Évacuation des eaux d'infiltration hors d'une mine ou d'une carrière, par canalisation et pompage*.

Exutoire^{1 et 3}

Cours d'eau par lequel se déversent vers la partie aval d'un bassin fluvial les eaux d'un lac ou de toute autre zone humide occidentale¹.

1) Ouverture ou passage par lequel s'écoule le débit sortant d'un réservoir ou d'un cours d'eau³.

2) Exutoire d'un réseau hydrographique, point le plus bas d'un réseau hydrographique (Il s'agit en général d'une embouchure, mais le sens de ce terme est trop restrictif pour rendre celui du terme anglais)³.

3) Exutoire d'un réseau de drainage ou d'égouts, point d'aboutissement d'un réseau de drainage (urbain ou non) ou d'égouts³.

Géomorphologie¹

Discipline qui étudie les formes de relief et leur mobilité, leur dynamique. Dans le cadre des hydrosystèmes l'analyse porte sur la géométrie du lit des cours d'eau et les causes de ses transformations spatiales (de l'amont vers l'aval) ou temporelles en relation avec la modification des flux liquides et solides, la dynamique de la végétation riveraine, les interventions humaines. Il s'agit donc d'une science d'interface et de synthèse qui fait appel à des données naturalistes et expérimentales (hydraulique et hydrologie notamment) et à des données issues des sciences humaines (histoire, économie agricole...). Géomorphologie fluviale : Science qui cherche à comprendre et décrire la structure du cours d'eau. Elle étudie les formes des cours d'eau et les conditions de leur formation. La géomorpho-dynamique conditionne le fonctionnement écologique des milieux aquatiques¹.

Gourd (voir bras mort)

Hydraulique³

Branche de la mécanique des fluides qui traite de l'écoulement de l'eau (ou d'autres liquides) dans des conduites, canaux découverts et autres ouvrages³.

Charge hydraulique (Charge piézométrique) : Hauteur atteinte par l'eau dans un piézomètre relié à un point d'une nappe⁴.

Régime hydraulique¹, ensemble des variations de l'état et des caractéristiques d'une formation aquatique qui se répètent régulièrement dans le temps et dans l'espace et passent par des variations cycliques, par exemple saisonnières¹.

Hydro-écorégion (HER)¹

Zone homogène du point de vue de la géologie, du relief et du climat. C'est l'un des principaux critères utilisés dans la typologie et la délimitation des masses d'eau de surface. La France métropolitaine peut être décomposée en 21 hydro-écorégions principales¹.

Hydrographie¹

Étude et la description des cours d'eau et des étendues d'eau (océans, mers, lacs...) qu'on peut observer à la surface de la terre. Le terme désigne aussi l'ensemble des cours d'eau d'une région donnée, organisés en bassins hydrographiques¹.

Hydrographique¹

Bassin hydrographique¹, d'après le référentiel BD Carthage, grand bassin versant découpé en plusieurs régions hydrographiques, elles-mêmes divisées en secteurs hydrographiques, sous-secteurs hydrographiques et zones hydrographiques¹.

Région hydrographique¹, partie d'un bassin hydrographique, et 1^{er} ordre de la partition du découpage hydrographique français. Ce découpage regroupe en effet l'ensemble des quatre partitions hiérarchisées du territoire réalisées selon des aires hydrographiques croissantes : Région hydrographique (1^{er} ordre), Secteur hydrographique (2^{ème} ordre), Sous-secteur hydrographique (3^{ème} ordre), Zone hydrographique (4^{ème} ordre). Un secteur est découpé suivant un maximum de 10 sous-secteurs, et un sous-secteur est découpé suivant un maximum de 10 zones hydrographiques¹.

Réseau hydrographique¹, ensemble des milieux aquatiques (plans d'eau, cours d'eau, eaux souterraines, zones humides, etc.) présents sur un territoire donné, le terme de réseau évoquant explicitement les liens physiques et fonctionnels entre ces milieux¹.

Secteur hydrographique¹, partie d'une région hydrographique et 2^{ème} ordre de la partition du découpage hydrographique français. Ce découpage hydrographique regroupe en effet l'ensemble des quatre partitions hiérarchisées du territoire réalisées selon des aires hydrographiques croissantes : Région hydrographique (1^{er} ordre), Secteur hydrographique (2^{ème} ordre), Sous-secteur hydrographique (3^{ème} ordre), Zone hydrographique (4^{ème} ordre). Un secteur est découpé suivant un maximum de 10 sous-secteurs, et un sous-secteur est découpé suivant un maximum de 10 zones hydrographiques¹.

Sous-secteur hydrographique¹, partie d'un secteur hydrographique et 3^{ème} ordre de la partition du découpage hydrographique français. Ce découpage hydrographique regroupe en effet l'ensemble des quatre partitions hiérarchisées du territoire réalisées selon des aires hydrographiques croissantes : Région hydrographique (1^{er} ordre), Secteur hydrographique (2^{ème} ordre), Sous-secteur hydrographique (3^{ème} ordre), Zone hydrographique (4^{ème} ordre). Un secteur est découpé suivant un maximum de 10 sous-secteurs, et un sous-secteur est découpé suivant un maximum de 10 zones hydrographiques¹.

Zone hydrographique¹, le découpage hydrographique est l'ensemble des quatre partitions hiérarchisées du territoire français réalisées selon des aires hydrographiques croissantes : Région hydrographique (1^{er} ordre), Secteur hydrographique (2^{ème} ordre), Sous-secteur hydrographique (3^{ème} ordre), Zone hydrographique (4^{ème} ordre). Un secteur est découpé suivant un maximum de 10 sous-secteurs, et un sous-secteur est découpé suivant un maximum de 10 zones hydrographiques¹.

Hydrogéologie¹

Science des eaux souterraines, comprise dans les sciences de la Terre. L'hydrogéologie réunit la connaissance des conditions géologiques et hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, les mouvements et les propriétés des eaux souterraines, ainsi que les applications de ces connaissances aux actions humaines sur les eaux souterraines, notamment à leur prospection, à leur captage et à leur protection¹.

Partie de la géologie qui s'occupe des processus de circulation de l'eau dans le sol et les roches, de la recherche des eaux souterraines, ainsi que de leur captage et de leur protection*.

Hydromorphologie¹

Étude de la morphologie et de la dynamique des cours d'eau, notamment l'évolution des profils en long et en travers, et du tracé planimétrique : capture, méandres, anastomoses etc¹.

Hydrologie¹

Étude des propriétés physiques, chimiques et biologiques des eaux situées à la surface de la Terre et au-dessous de cette surface, en particulier du point de vue de leur formation, de leur déplacement, de leur répartition dans le temps et l'espace et de leur interaction avec l'environnement inerte et vivant. L'hydrologie continentale étudie les cours d'eau, plans d'eau et milieux humides, les eaux souterraines et les étendues d'eau solide des terres émergées, tandis que l'hydrologie marine s'identifie à l'océanographie¹.

Science qui traite des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des eaux*.

Hydrologique¹

Année hydrologique, période de 12 mois qui débute après le mois habituel des plus basses eaux. En fonction de la situation météorologique des régions, l'année hydrologique peut débiter à des dates différentes de celle du calendrier ordinaire, mais en France, généralement elle débute au mois de septembre¹.

Station à signification hydrologique, station de mesure située sur des cours d'eau à régime naturel (y compris les régimes glaciaire ou phréatique). Les cours d'eau influencés, même fortement, rentrent aussi dans cette catégorie. Les stations sans signification hydrologique sont celles situées sur des cours d'eau dont le régime est totalement artificiel (canal* d'irrigation, canal usinier, canal de dérivation...) ¹.

Hydrométrie³

Science des mesures et de l'analyse de l'eau; elle comprend les méthodes, les techniques et l'instrumentation utilisées en hydrologie¹.

Science qui a pour objet de mesurer les propriétés physiques de l'eau, et spécialement le débit des eaux superficielles et souterraines*.

Hydrométrie¹

Station hydrométrique, station de mesure où sont effectués des relevés sur un ou plusieurs des éléments suivants relatifs aux cours d'eau, plans d'eau et réservoirs : hauteur d'eau, débit, transport et dépôt de matériaux, température et autres propriétés physiques de l'eau, caractéristiques de la couverture de glace et propriétés chimiques de l'eau¹.

Hyporhéique¹

Zone hyporhéique¹, ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface. Si le cours d'eau s'écoule sur un substratum imperméable, il ne développera pas de zone hyporhéique. La zone hyporhéique peut être constituée exclusivement d'eau de surface (cas des rivières perchées au-dessus de la nappe alluviale) ou caractérisée par un mélange d'eau de surface et d'eau souterraines (lorsque les échanges avec la nappe existent). Ces différentes configurations se succèdent le long d'une même rivière, les têtes de bassin présentent une zone hyporhéique réduite ou absente contrairement à la plaine alluviale. La zone hyporhéique joue un rôle important dans l'autoépuration du cours d'eau¹.

Isotope

Chacun des différents types de noyaux atomiques d'un même élément, différant par leur nombre de neutrons mais ayant le même nombre de protons et d'électrons, et possédant donc les mêmes propriétés chimiques*.

Isopièze (isobathe d'une nappe souterraine libre)³

Courbe d'égale profondeur de la surface de la nappe au-dessous de la surface du sol³.

Se dit d'une courbe joignant les points où une nappe aquifère est à la même altitude*.

Karst¹

Aquifère en terrain calcaire dont le comportement est caractérisé par une hétérogénéité et un compartimentage du réservoir qui se traduisent par deux grands types de fonctions : la fonction conductrice qui donne lieu à des écoulements rapides par les conduits karstiques interconnectés (fissures qui ont été élargies par dissolution) et qui explique la grande vulnérabilité aux contaminations de ces aquifères et la vitesse de déplacement des pollutions, et la fonction capacitive, assurée principalement par les zones fissurées et micro-fissurées, qui est le siège de vitesses d'écoulement plus lentes et autorise une capacité de stockage variable selon les calcaires¹.

Karstique¹

Se dit d'une formation géologique calcaire où prédomine l'érosion chimique. Plus précisément, un cours d'eau karstique est une voie d'eau naturelle à écoulement pérenne ou intermittent, superficiel ou souterrain traversant des terrains karstiques (constitués par des roches calcaires compactes et solubles) et pouvant subir des pertes ou bénéficier d'apports dus à des résurgences¹.

Cours d'eau karstique, voie d'eau naturelle à écoulement pérenne ou intermittent, superficiel ou souterrain traversant des terrains fissurés en général calcaire (zone de karst) et pouvant subir des pertes ou bénéficier d'apports dus à des résurgences¹.

Krigeage⁴

Méthode géostatistique de contourage en utilisant des moyennes pondérées des données environnantes⁴.

Technique géostatistique d'estimation des caractéristiques d'un volume minier (par exemple teneur) prenant en compte des informations intérieures et extérieures à ce volume*.

Lacustre⁴

Portant sur des processus qui se produisent dans un lac⁴.

Qui vit, qui est situé sur les bords ou dans les eaux des lacs : plantes lacustres*.

Limnimétrie¹

Relatif à la mesure du niveau d'eau (courbe limnimétrique)¹.

Échelle limnimétrique¹, règle graduée permettant d'apprécier directement la cote du niveau de l'eau dans un réservoir, un cours d'eau, etc¹.

Limnigraphe³

Instrument qui enregistre les variations du niveau de l'eau en fonction du temps³.

Macrophytes²

Désigne l'ensemble des plantes aquatiques macroscopiques.

Modèle gigogne

Modèle dont le maillage principal est localement sub-divisé en mailles plus fines. Modèle constitué d'un emboîtement de mailles discrétisées de façon croissante.

Nappe alluviale¹

Volume d'eau souterraine contenu dans des terrains alluviaux, en général libre et souvent en relation avec un cours d'eau¹.

Niveau trophique / Classes de trophie / État trophique

Les niveaux trophiques servent à classer les lacs selon leur degré de productivité biologique, leur état pouvant varier de très oligotrophe à très eutrophe.

Pergélisol (permafrost)³

Couche de sol ou de roches dans laquelle la température a été continuellement inférieure à 0°C pendant au moins quelques années³.

Piézomètre¹

Au sens strict, dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un système aquifère, qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression. Le concept de piézomètre a été étendu à l'ensemble des ouvrages artificiels (puits, forages, gravières,...) ou naturels (avens, grottes,...) qui permettent l'accès aux eaux souterraines. On parle alors plutôt de forage non exploité qui permet la mesure du niveau de l'eau souterraine en un point donné de la nappe. Ce niveau qui varie avec l'exploitation nous renseigne sur la capacité de production de l'aquifère¹.

Niveau piézométrique¹, niveau atteint par l'eau en un point et à un instant donné dans un tube atteignant la nappe. Le niveau piézométrique peut être reporté sur une carte piézométrique. Certains forages non exploités servent à mesurer ce niveau, ce sont des piézomètres. Ce niveau correspond à la pression de la nappe, il est généralement indiqué en mètres NGF (Nivellement général de France). Quand ce niveau dépasse le niveau du sol, la nappe est dite artésienne : l'eau est jaillissante. Les cartes piézométriques établies à partir de l'ensemble des données mesurées donnent une représentation graphique de la surface des nappes d'eau souterraine et permettent de suivre leur évolution dans le temps et d'identifier leur sens d'écoulement¹.

Cote de la chronique piézométrique¹, cote définie soit en cote NGF (Nivellement Général de la France), soit en profondeur relative. La cote NGF, établie sous le contrôle de l'Institut Géographique National (IGN), est la référence. Le NGF permet en effet l'expression des altitudes dans un même et unique système de référence, c'est-à-dire par rapport au même et unique point fondamental (ou « zéro origine »). Le niveau « 0 » correspond au niveau moyen de la mer à Marseille. Ce point permet de déterminer l'altitude de tout autre point. L'expression de la cote des chroniques du piézomètre* peut également s'exprimer en profondeur relative vis à vis du repère du point d'eau. Chaque point d'eau possède en effet deux points remarquables principaux : le repère du point d'eau (repère de mesure par rapport auquel est établi le niveau de la nappe au droit du point d'eau - bord du tubage du forage, margelle de puits, ponton sur une gravière, ...) et les références altimétriques, qui permettent de croiser les mesures obtenues sur plusieurs points d'eau afin de connaître l'état du niveau de la nappe sur toute sa surface (trois

localisations peuvent être utilisées comme référence altimétrique : le rebord supérieur du socle (margelle), le sol au pied du point d'eau (sol) ou le repère de mesure directement - rebord du tube)¹.

Recouvrement

« Le degré de recouvrement est déterminé par la projection verticale des organes végétaux aériens sur le sol et exprimé par la proportion... du terrain considéré par rapport à l'air considérée » (Allorge, 1922 p.48)

Allorge, P., 1922. Les associations végétales du Vexin français. Thèse, Univ. Paris. 342 p.

Relation nappe-rivière¹

Échange d'eau dans un sens ou dans l'autre entre une nappe et un cours d'eau. Suivant le niveau de la ligne d'eau, et les saisons, la nappe alimente le cours d'eau ou est alimentée par celui-ci notamment lors des inondations. Dans le cas de karst ces relations sont importantes et localisées¹.

Richesse

Nombre d'espèces.

Ried

Sol hydromorphe à gley organique et fréquemment calcaire des alluvions rhénanes*.

Stygobie⁴

Organismes aquatiques obligatoirement souterrains (aptés à exister sous des conditions environnementales souterraines)⁴.

Stygofaune, animaux souterrains, ce qui inclut les animaux des grottes (troglobies, qui comprennent stygobites), ceux qui passent une partie de leur cycle de vie dans les grottes (troglophiles), et les animaux de passage (trogloxenes)⁴.

Substratum⁴

Niveau inférieur des sédiments dans un remplissage fluvial, déposés par accrétion verticale probablement pendant une période de hausse des niveaux de base⁴.

Formation géologique sous-jacente à une unité charriée (*substratum d'une nappe*) ou à une couverture sédimentaire*.

Thalweg / Talweg¹

Se définit par opposition à la ligne de crête (ou « ligne de faite » ou « ligne de partage des eaux »). L'espace compris entre deux talwegs est appelé « interfluve ». Ligne de fond d'une vallée. Dans une vallée drainée, le talweg est le lit du cours d'eau¹.

Profil en long¹, profil qui permet de caractériser la pente du cours d'eau ou plus généralement le talweg d'écoulement. Cette pente tend à diminuer vers l'aval (profil concave), différents style fluviaux se succédant d'amont vers l'aval¹.

Taxon¹

Chacun des niveaux hiérarchiques utilisés dans les classifications biologiques pour regrouper des espèces ayant des traits communs : classe, ordre, famille, genre, espèce...¹.

Tresse (Lit en tresse)¹

Espace de divagation d'un lit mineur d'un cours d'eau comportant plusieurs bras en évolution permanente¹.

Zone humide (ZH)¹

Zone où l'eau, douce, salée ou saumâtre, est le principal facteur qui contrôle le milieu naturel et la vie animale et végétale associée. Les zones humides sont alimentées par le débit du cours d'eau et/ou par les remontées de nappes phréatiques et sont façonnées par l'alternance de hautes eaux et basses eaux. Il s'agit par exemple des ruisseaux, des tourbières, des étangs, des mares, des berges, des prairies inondables, des prés salés, des vasières, des marais côtiers, des estuaires. Ces zones sont des espaces de transition entre la terre et l'eau (ce sont des écotones). La végétation présente a un caractère hygrophile (qui absorbe l'eau) marqué. Comme tous ces types d'espaces particuliers, il présente une forte potentialité biologique (faune et flore spécifique) et ont un rôle de régulation de l'écoulement et d'amélioration de la qualité des eaux. La convention de Ramsar a adopté une optique plus large pour déterminer quelles zones humides peuvent être placées sous son égide. Les zones humides sont « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres »¹.

Zone humide alluviale¹, située en fond de vallées des cours d'eau, zone comprenant les habitats fluviaux (îlots, grèves, berges...) et les annexes alluviales (prairies inondables, marais tourbeux, bras morts, ripisylves, forêts alluviales, annexes hydrauliques...) ainsi que les zones humides des têtes de bassins (tourbières notamment). Les zones humides alluviales sont des réservoirs de biodiversité et constituent souvent des habitats de reproduction ou des aires de repos pour de nombreuses espèces animales protégées. Leur capacité stockage, à plus ou moins long terme, prévient des risques d'inondation en diminuant l'intensité des crues et soutient le débit à l'étiage. La plupart d'entre elles participent à la recharge de la nappe phréatique et à l'épuration des eaux. Les zones humides ont une forte valeur paysagère. Par ces nombreuses fonctions, elles participent à la gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau¹.

5.3. Approches multi-métrique : fiches synthétiques de chaque métrique

Cette partie présente un bilan synthétique de chacune des métriques et/ou méthode utilisées dans le cadre du projet NAPROM pour caractériser les échanges nappe/rivière. Ce bilan est fondé sur 8 items qui permettent de mieux cerner et de préciser :

- Le contexte hydrogéologique dans lequel elles sont utilisables
- L'échelle à laquelle elles permettent de caractériser les échanges nappes/rivières
- Ce qui a justifié le choix des méthodes et/ou des métriques
- La vision ou la conception des échanges nappe/rivière qui sous-tend leur utilisation
- Le type d'échanges pris en compte (modalités par rapport aux échanges : en long, par le fond du lit, les berges, toute la surface...)
- Les améliorations possibles
- Les forces de ces méthodes et/ou métriques
- Les faiblesses de ces méthodes et/ou métriques

5.3.1. Analyse géométrie SIG

Contexte hydrogéologique :

Nappe alluviale libre superficielle ou aquifère de versant

Échelle de travail :

- Taille du maillage ou de la zone maximale d'intérêt : entité hydrogéologique
- Seuil d'interprétation limite : 0,5 à 1 km (échelle du PK)
- Taille typique du maillage et limite inférieure : -

Justification du choix de la méthode :

La méthode est adaptée pour réaliser la caractérisation rapide des échanges nappes/rivière en secteur alluvial libre superficiel sur des zones d'étude relativement étendues et sur lesquelles on dispose d'un minimum de données souvent hétérogènes.

Vision (conception) des échanges nappe/rivière :

Les échanges nappes alluviales/rivière consistent en des échanges d'eau entre un milieu poreux (alluvions dans lesquelles s'écoulent la nappe alluviale) et un milieu en eau libre (rivière ou fleuve) à travers une interface (matérialisée par le linéaire de berge et la plaine alluviale adjacente). Les échanges sont ici envisagés comme un écoulement en milieu poreux conditionné par la différence de niveau d'eau entre la nappe au niveau de la berge et le niveau de la rivière. Cette différence de niveau permet de calculer un gradient et un angle qui caractérisent l'échange. Il peut y avoir trois configurations : échanges de la nappe vers la rivière (niveau de la nappe plus haut que celui de la rivière), échanges de la rivière vers la nappe (niveau de la rivière plus haut que celui de la nappe), pas d'échange ou équilibre (niveaux de la nappe et de la rivière similaires ou berge très colmatée). Les échanges sont de plus envisagés uniquement de manière latérale. On considère qu'ils se font à travers une surface d'échange en plan (par défaut perpendiculairement ou pondérés en fonction de l'angle) dont l'aire est évaluée avec le linéaire de berge considéré et la hauteur d'eau en rivière. La perméabilité des alluvions sur ce plan de berge simplifié influence la quantité d'eau échangée.

Types d'échanges pris en compte :

Seuls les échanges latéraux sont pris en compte. Les échanges d'eau s'effectuant par le fond de la rivière ne sont pas pris en compte à l'heure actuelle.

Améliorations possibles :

- Prise en compte de plus de paramètres dans la loi de filtration utilisée (ex : Pente du substratum)
- Meilleure connaissance des conditions souvent hétérogènes à l'interface nappe/rivière (ex : perméabilités des alluvions, surface d'échange...)
- Engagement d'une réflexion pour prendre en compte les échanges par le fond de la rivière

Forces de la méthode :

- Rapide, relativement simple (souplesse d'utilisation), reproductible
- Peu gourmande en données (a minima hauteurs d'eau en rivière et en nappe)
- Permet de travailler sur des territoires relativement étendus
- Permet de réaliser des bilans à différentes échelles

Faiblesses de la méthode :

- Utilisable uniquement pour les milieux alluviaux libres et superficiels
- Fortement dépendante de l'existence et de la précision des données de départ
- Fortement dépendante du contexte anthropique

5.3.2. Macrophytes

Contexte hydrogéologique :

Échanges entre le fond de vallée (rivière et masses d'eau alluviales) et la nappe alluviale et les aquifères adjacents

Échelle de travail :

- Taille du maillage ou de la zone maximale d'intérêt : -
- Seuil d'interprétation limite : 500m à 1km
- Taille typique du maillage et limite inférieure : -

Justification du choix de la méthode :

La méthode est adaptée pour réaliser la caractérisation rapide des échanges nappes/rivière à l'échelle de la plaine alluviale, sur des zones d'étude relativement étendues via les relevés floristiques associés aux exigences écologiques des espèces.

Vision (conception) des échanges nappe/rivière :

Les masses d'eau souterraines se rechargent en eau par infiltration des eaux de pluie et des eaux superficielles (cours d'eau et plan d'eau) ou encore par les eaux d'un autre aquifère. Dans le cas des nappes alluviales (aquifère poreux), celles-ci sont alimentées par les infiltrations du cours d'eau, les précipitations, et pour partie par les nappes de versant, dans certains contextes hydrogéologiques.

La restitution de l'eau est conditionnée par la topographie et la lithologie locale. De manière générale, les émergences (exutoires) « se localisent aux contacts altimétriquement les plus bas entre la formation aquifère et les imperméables qui la limitent à sa base et sur ses bordures. (E. Gili, 2008) ». Les plans d'eau libres, et notamment le réseau hydrographique, constituent des ouvertures sur les nappes, et s'ils sont connectés à un cours d'eau, des drains naturels de celles-ci.

L'émergence de la nappe dans le lit des cours d'eau et des milieux aquatiques de la plaine alluviale se fait soit de façon diffuse, si le substrat est poreux (ex. granulats grossiers) soit ponctuelle, sous forme de sources par exemple, lorsque le fond du milieu aquatique est partiellement colmaté. La surface piézométrique d'une nappe se raccorde au niveau d'un cours d'eau et des annexes hydrauliques avec lesquelles elle est en contact. Si le colmatage du lit interdit le contact, le cours d'eau est alors indépendant et la baisse de la surface piézométrique le met en situation perchée, au-dessus de la nappe. En règle générale, dans le contexte d'incision plus ou moins marqué qui caractérise les cours d'eau français, la rivière draine la nappe. Cependant, le niveau de la rivière peut être plus haut que celui de la nappe, inversant ainsi le sens de l'écoulement qui se fait alors de la rivière vers la nappe. Cette situation peut-être locale et/ou temporaire (étiage de la nappe ou crue du cours d'eau).

Types d'échanges pris en compte :

Échanges des nappes vers la rivière (toute la surface), et identification de l'origine de la nappe dans les cas où les qualités de nappes sont tranchées.

Améliorations possibles :

Intégration de nouvelles espèces (exigences écologiques) afin de généraliser la méthode à l'échelle nationale, voire européenne.

Forces de la méthode :

- Rapide et peu coûteuse en matériel
- Intègre les échanges sur une période de temps annuelle

Faiblesses de la méthode :

- Applicable uniquement dans les zones avec végétation (2 espèces indicatrices au minimum)
- Semi-quantitative

- Pertinence du diagnostic limitée par la densité de milieux aquatiques alluviaux.
- 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 nappes (alluviales, de versant)

5.3.3. Invertébrés souterrains

Contexte hydrogéologique :

Nappe alluviale superficielle libre, karst

Échelle de travail :

- Taille du maillage ou de la zone maximale d'intérêt : -
- Seuil d'interprétation limite : <100 m
- Taille typique du maillage et limite inférieure : -

Justification du choix de la méthode :

La méthode est adaptée pour caractériser les échanges nappes/rivière en secteur alluvial superficiel sur des zones d'étude relativement petites qui peuvent être extrapolées sur de plus grandes distances (plurikilométrique) en multipliant le nombre de points d'échantillonnage. Elle ne nécessite pas de données préexistantes et permet d'intégrer les échanges sur le moyen terme (de quelques jours à quelques mois) en étant peu sensible aux fluctuations journalières.

Vision (conception) des échanges nappe/rivière :

Les échanges nappes alluviales/rivière consistent en des échanges d'eau entre un milieu poreux (alluvions dans lesquelles s'écoulent les eaux souterraines) et le milieu de surface (fleuve, rivière, zone humide) par les interstices du fond (appelée aussi zone hyporhéique). Les échanges sont caractérisés par la présence d'invertébrés souterrains (ou stygobies) échantillonnés à 50 cm de profondeur dans les sédiments (en-dessous de la colonne d'eau ou sous des bancs de graviers exondés). De façon générale, le nombre total d'individus stygobies est corrélé au sens et à l'intensité des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les échanges de la nappe vers la rivière sont caractérisés par une augmentation du nombre d'individus stygobies (plus les échanges seront importants et plus le nombre de stygobies sera grand). Les échanges de la rivière vers la nappe vont faire diminuer le nombre d'invertébrés souterrains au profit des organismes de surface qui accompagnent l'eau s'infiltrant dans les sédiments. Finalement, l'absence d'échange sera plutôt caractérisée par la quasi-absence d'invertébrés (stygobies ou de surface) dans les sédiments. En complément, l'identification à l'espèce des invertébrés stygobies peut, dans certains cas, nous renseigner sur l'origine de ces eaux. En effet, certaines espèces dites « indicatrices » sont caractéristiques de certains milieux (sous-écoulement, karst, milieux poreux profonds) ou de certaines masses d'eau hébergeant des espèces spécifiques. La présence de ces espèces indicatrices sur un site nous permet de confirmer l'origine géographique et hydrogéologique des eaux alimentant le site.

Types d'échanges pris en compte :

Cette méthode permet de prendre en compte les échanges par le fond ou par les berges si ceux-ci ne sont pas trop affectés par le colmatage minéral et organique.

Améliorations possibles :

- Mieux connaître les exigences écologiques de certaines espèces encore très mal connues

- Mieux prendre en compte le nombre d'espèces ou leurs exigences écologiques (en plus de l'abondance) pour nuancer la valeur de l'indice
- Mieux appréhender la très grande hétérogénéité spatiale dans la distribution des invertébrés

Forces de la méthode :

- Relativement rapide à mettre en œuvre sur le terrain pour un faible coût
- Ne nécessite aucune donnée préliminaire
- Intègre les échanges sur des sites complexes avec une forte hétérogénéité spatio-temporelle
- Dans certain cas, les échanges peuvent être caractérisés par l'origine géographique et hydrogéologique de l'eau

Faiblesses de la méthode :

- Ne permet pas de quantifier précisément les échanges
- Indication des échanges uniquement à petite échelle (<100m par point de mesure)
- Fort impact de la biogéographie locale (histoire climatique récente)
- Nécessite de fortes compétences en systématique
- Temps de traitement en laboratoire assez long et nécessite une expertise technique importante

5.3.4. Modèle hydrodynamique MARTHE

Contexte hydrogéologique :

Nappe alluviale/domaine calcaire/toute nappe

Échelle de travail :

- Taille du maillage ou de la zone maximale d'intérêt : Site (18 km²) ; bassin versant (1000 km²)
- Seuil d'interprétation limite : maille
- Taille typique du maillage et limite inférieure : Site / Maillage (100 m x 100 m ou inférieur) ; Bassin versant / Maillage (1 km x 1 km)

Justification du choix de la méthode :

Le code de calcul MARTHE permet de coupler les écoulements souterrains tridimensionnels aux écoulements du réseau hydrographique superficiel. Ce couplage a fait ses preuves quant à la restitution étroitement liée du fonctionnement hydrodynamique des aquifères jurassiques de la région Poitou-Charentes et des débits des rivières implémentées dans le modèle. Le modèle régional est aujourd'hui utilisé pour répondre à différentes questions de gestion quantitative de l'eau telles que l'impact des prélèvements sur les débits d'étiage [Douez O. et al., 2010 ; Douez O. et al., 2011].

Vision (conception) des échanges nappe/rivière :

Selon la position relative de la hauteur d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé, d'une manière non linéaire, par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité. Trois situations (Figure 96) sont possibles :

- Lorsque le niveau dans l'aquifère est inférieur à la base du lit de la rivière, le débit d'échange vers l'aquifère est un terme de percolation indépendant de ce niveau.

- Lorsque le niveau dans l'aquifère est située au-dessus de la base du lit de la rivière: le débit d'échange est le produit de la surface d'échange, qui intègre les berges du fleuve, multipliée par la différence entre la hauteur dans la rivière et le niveau dans l'aquifère, divisée par l'épaisseur du lit.

- Lorsque la charge hydraulique de l'aquifère est supérieure à la cote du sol et aussi supérieure 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.

Il apparaît donc que, dans le cas général, le débit d'échange dépend des variations d'eau dans la rivière. Considérant un niveau donné dans l'aquifère, le débit d'échange est plus élevé quand le débit de la rivière, et donc la hauteur d'eau dans la rivière, sont plus élevés. Le modèle peut donc être vérifié ou calibré à partir d'observations de variations de hauteur dans la rivière quand elles sont disponibles.

Types d'échanges pris en compte :

Les échanges considèrent la surface mouillée (fond et berges).

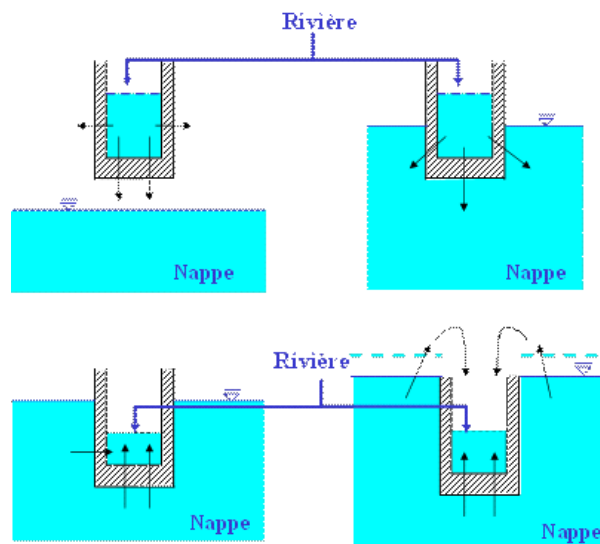


Figure 96 : Différentes situations d'échanges nappes/rièrres envisagées par le modèle MARTHE

Améliorations possibles :

- Prise en compte de l'hétérogénéité des propriétés physiques du lit de rivière (fond, berges)
- Gestion des obstacles à l'écoulement (seuils, écluses etc.)
- Simulation avec transport de soluté pour apprécier la proportion relative des flux d'eau en provenance de la rivière au sein du système aquifère (hors des mailles rivière).

Forces de la méthode :

- Couplage dynamique système souterrain/système superficiel
- Possibilité de travailler sur modèle multicouche constitué d'aquifères libres et d'aquifères captifs
- Relation hauteur/débit dans le réseau hydrographique
- Quantification des flux et bilans hydrodynamiques à différentes échelles
- Spatialisation des résultats à différentes échelles
- Simulations prédictives

Faiblesses de la méthode :

- 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)
- Corrélation entre la densité spatiale et temporelle du jeu de données initial et l'échelle d'interprétation
- Difficulté pour prendre en compte les obstacles à l'écoulement dans un objectif de prédiction
- Augmentation du temps de calcul engendré par la création d'un maillage gigogne
- Pas de suivi des flux en provenance de la rivière hors des mailles rivières du modèle

5.3.5. Modèle de l'Orgeval (approche multi-échelle et pluridisciplinaire)

Contexte hydrogéologique :

Bassin sédimentaire avec vallées incisées, Aquifère multi-couches

Échelle de travail :

- Taille du maillage ou de la zone maximale d'intérêt : Bassin versant
- Seuil d'interprétation limite : Section de rivière (métrique) ; Tronçon de rivière (3,5 à 5km) ; Bassin versant (40km²)
- Taille typique du maillage et limite inférieure : -

Justification du choix de la méthode :

- une approche pluridisciplinaire, multi-échelles et qui combine plusieurs méthodes de mesure afin de limiter les erreurs et valider les estimations,
- le couplage des méthodes hydrogéophysiques et de la modélisation permet une estimation intégrée sur plusieurs échelles spatiales des échanges nappes/rivières.

Vision (conception) des échanges nappe/rivière :

La dynamique multi-échelles des échanges d'eau à l'interface nappes/rivières est complexe et dépend de plusieurs facteurs en relation avec la morphologie, la géologie, l'écologie et le climat. Les flux d'eau varient essentiellement en fonction du gradient hydraulique entre les eaux souterraines et des eaux de surface et de la conductivité hydraulique du sédiment de la zone hyporhéique. Celle-ci dépend des caractéristiques physiques des sédiments à petite échelle et de la structure géologique à grande échelle. La distribution des échanges d'eau entre les rivières et les eaux souterraines obéit donc à des facteurs de contrôle s'exprimant différemment selon les échelles d'étude. Suivant l'échelle d'observation, les hétérogénéités fonctionnelles peuvent varier du centimètre au mètre. A grande échelle et au niveau des bassins versants, les flux entre les eaux souterraines et des eaux de surface peuvent être fortement affectées par de fortes hétérogénéités géologiques dans la nappe alluviale qui contrôlent le champ d'écoulement des eaux souterraines. A petite échelle, les échanges de flux à l'interface aquifère-rivière semblent être fortement contrôlés par la répartition spatiale de la conductivité hydraulique et par la géomorphologie du lit telle que les ruptures de pente et les obstacles. Indépendamment des approches utilisées pour quantifier ces échanges, il est donc crucial de considérer la distribution spatiale et l'amplitude des écoulements souterrains du bassin versant vers la rivière. La détermination des flux est donc confrontée au problème des hétérogénéités et à l'intégration (transpositions) des mesures à des échelles variables. Sur ce point, le choix d'un modèle qui sert à interpoler spatialement et temporellement des données est un compromis entre un certain nombre

de facteurs tels que la précision requise, le type et la disponibilité des données, et l'échelle spatiale et temporelle d'analyse.

Type d'échanges pris en compte :

Le modèle et les dispositifs de mesures formulent une hypothèse de verticalité des flux. Si besoin cette hypothèse pourra être levée au niveau des sections de mesure pour la quantification des flux. Par contre à l'échelle régionale les modèles s'appuient sur une hypothèse de verticalité des échanges nappes/rivières qui considère la différence de charge entre l'aquifère et la rivière comme le « moteur » de l'écoulement. Cette approche formule l'hypothèse que les échanges sub-horizontaux via les berges de la rivière sont simulés à l'échelle de l'aquifère par la simulation du champ de charges dans l'aquifère, duquel résulte une charge souterraine « théorique » sous la rivière. Le gradient de charge entre cette charge souterraine théorique et la charge en rivière définit du point de vue du modèle le « moteur » de l'échange nappes/rivières.

Améliorations possibles :

Au droit des sections transversales, les flux échangés pourraient être étudiés via l'extension du dispositif expérimental horizontalement au niveau des berges

Forces de la méthode :

- Quantification de flux à haute résolution temporelle et cartographie spatiale de ces échanges le long de la rivière à pas de temps fin
- Détermination de la structure géologique à l'échelle du bassin versant et estimation des flux à l'échelle régionale et vers l'interface nappes/rivières
- Estimation multi-échelles de la variabilité spatiale et temporelle des flux
- Méthode couplée mesure hydro-géo-thermiques et modélisation
- Détermination de la connectivité entre la rivière et les différentes entités aquifères permettant ainsi la sélection des points de contrôle au niveau des tronçons et des sections de rivière

Faiblesses de la méthode :

- Méthode lourde à mettre en œuvre en termes de moyens financiers et techniques aussi bien au niveau de la mesure que de la modélisation
- Problème de transfert d'échelle

5.3.6. Modèle hydrogéologique Eau-Dyssée

Contexte hydrogéologique :

Nappe alluviale libre superficielle

Échelle de travail :

- Taille du maillage ou de la zone maximale d'intérêt : Bassin versant (5000 km²)
- Seuil d'interprétation limite : 125 m
- Taille typique du maillage et limite inférieure : -

Justification du choix de la méthode :

La méthode utilisée est classique pour les modèles hydrologiques : il s'agit d'exprimer le flux d'échange nappe/riverie comme étant égal à la différence de charge entre les niveaux piézométriques et le niveau de

la rivière, avec un facteur dépendant des propriétés du lit de la rivière. Ce facteur étant méconnu, nous avons sur ce bassin utilisé plusieurs valeurs possibles. Par ailleurs, lorsque la rivière alimente la nappe, le flux d'échange est seuillé en fonction encore une fois des propriétés hydrauliques du lit, résumé ici par un débit limite, et bien sûr, par le débit disponible en rivière.

Vision (conception) des échanges nappe/rivière :

Les échanges ainsi simulés supposent que le niveau piézométrique est le même pour chaque rive de la rivière, et considèrent que les échanges se font essentiellement de façon verticale.

Il y a 4 cas possibles :

- la charge piézométrique est supérieure à celle de la rivière : la rivière est donc alimentée par la nappe
- la différence de charge est modérée, mais la hauteur d'eau en rivière est supérieure au niveau piézométrique. Dans ce cas, l'expression est inchangée par rapport au 1^{er} cas.
- la hauteur d'eau en rivière est nettement supérieure au niveau piézométrique, et le flux d'eau apporté par la rivière est supérieur à la conductivité hydraulique du lit. Dans ce cas, ce flux est seuillé par un débit limite correspondant à cette conductivité, tant que celui-ci est inférieur au débit disponible en rivière.
- la nappe et la rivière sont déconnectées. Dans ce cas, cela revient au cas précédent.

Type d'échanges pris en compte :

Échanges par le fond du lit.

Améliorations possibles :

- Meilleure estimation des hauteurs d'eau en rivière (actuellement sur la plaine alluviale uniquement, variable sur le Rhin)
- Meilleure connaissance des propriétés du lit de la rivière

Forces de la méthode :

- Basée sur un concept physique, permettant de relier explicitement la modélisation des écoulements en rivière et en nappe
- Applicable à différents pas de temps et différentes résolutions spatiales

Faiblesses de la méthode :

- La dépendance à des propriétés du lit mal connues
- L'hypothèse d'un niveau symétrique de la nappe sur chaque rive, hypothèse qui devient certainement sensible lorsque l'on travaille à fine échelle

5.4. Protocole de comparaison des métriques

Cette partie présente l'avancement de la construction du protocole de comparaison des métriques. Ce protocole vise à formaliser la manière d'obtenir un diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières, sur un site d'étude, à partir du diagnostic réalisé séparément à partir de chacune des métriques impliquées. Ce protocole est inspiré de celui mis en œuvre sur le Rhône dans le cadre du projet « Eau Sout' ». Il a toutefois été modifié et complété pour tenir compte des spécificités du projet NAPROM, par rapport à l'introduction de nouvelles métriques et de contextes hydrogéologiques nouveaux.

Au final, cette partie présente :

- la typologie des échanges nappe/rivière retenue et illustrée par des coupes et des blocs diagrammes ;
- des grilles de comparaisons des différentes métriques synthétisant : les éléments fondamentaux des différentes méthodes, la façon dont elles prennent en compte les échanges et quelles configurations elles peuvent diagnostiquer, les points forts et les points faibles de chacune des métriques ;
- le protocole des comparaisons des métriques fondé sur la superposition des métriques et élaboration d'un diagnostic synthétique tenant compte des incertitudes.

5.4.1. Typologie des configurations d'échange

Pour le projet NAPROM, six grands types d'échanges ont été retenus. Chacun est associé à un code couleur spécifique qui est utilisé dans le tableau de comparaison croisée des métriques. De plus, 2 figurés ont été ajoutés pour 2 cas :

- Métrique non-utilisée dans le diagnostic (blanc)
- Pas de site d'échantillonnage et/ou de relevé (hachuré)

Code couleur	Typologie des échanges
	Nappe vers la rivière (latéral et /ou par le fond)
	Rivière vers la nappe (latéral et/ou par le fond)
	Absence d'échange observable (diagnostiqué, détecté)
	Colmatage (physique et/ou biologique)
	Cheminement de l'eau
	Sous-écoulement (méandre/digue)
	Recyclage
	Quantification mélange
	Situations particulières
Code couleur	Autres figurés
	Métrique non-utilisée dans le diagnostic
	Pas de site d'échantillonnage et/ou de relevé

Tableau 38 : Typologie des métriques – code couleur

Les différents types d'échanges sont les suivants :

- **Nappe vers rivière** (Nappe → rivière) en vert foncé. On distingue ici les apports latéraux des apports par le fond (Figure 97)
- **Rivière vers nappe** (Rivière → nappe) en rouge. On distingue ici aussi les apports latéraux des apports par le fond (Figure 98)
- **Absence d'échanges observables** en bleu clair (Figure 99)
- **Colmatage physique (Phys.) et colmatage biologique (Bio.)** en orange (Figure 100)
- Indicateurs du cheminement de l'eau en jaune. Ce type est divisé en plusieurs sous-types :
 - . Sous-écoulement à l'échelle du méandre / transit de l'eau à travers la plaine alluviale (transit du cours d'eau vers la nappe vers le cours d'eau) (méandre) en brun tanné (Figure 101)
 - . Sous-écoulement à l'échelle des digues / transit de l'eau à travers les digues (transit du cours d'eau vers la digue puis vers le cours d'eau (digue) en brun tanné (Figure 101)
 - . **Recyclage / phénomènes d'infiltration/exfiltration amont/aval dans le cours d'eau au niveau des bancs de sables et de graviers (Recycl.)** en violet (Figure 102)
 - . Quantification du mélange / (% d'eau provenant : de la nappe alluviale, de la rivière, des aquifères adjacents) (Mélange) en noir (exemple Figure 101)
- Situations particulières par exemple cas de nappes déconnectées ou surélevées par rapport au cours d'eau (ex : incision du lit) (Cas particuliers Nappe déconnectée ou surélevée) en gris (Figure 103).

Pour illustrer chaque type d'échange, une coupe et un bloc diagramme ont été réalisés (Figure 97 à Figure 102). Dans chaque figure et pour chaque type est de plus précisé la ou les métriques capables de le diagnostiquer.

Le type quantification de mélange (11) est présenté à titre d'exemple sur la Figure 101 et le cas particulier présentant l'incision du lit Figure 103. Le type quantification du mélange (11) n'est diagnostiquable que par le dispositif MOLONARI pour l'instant.

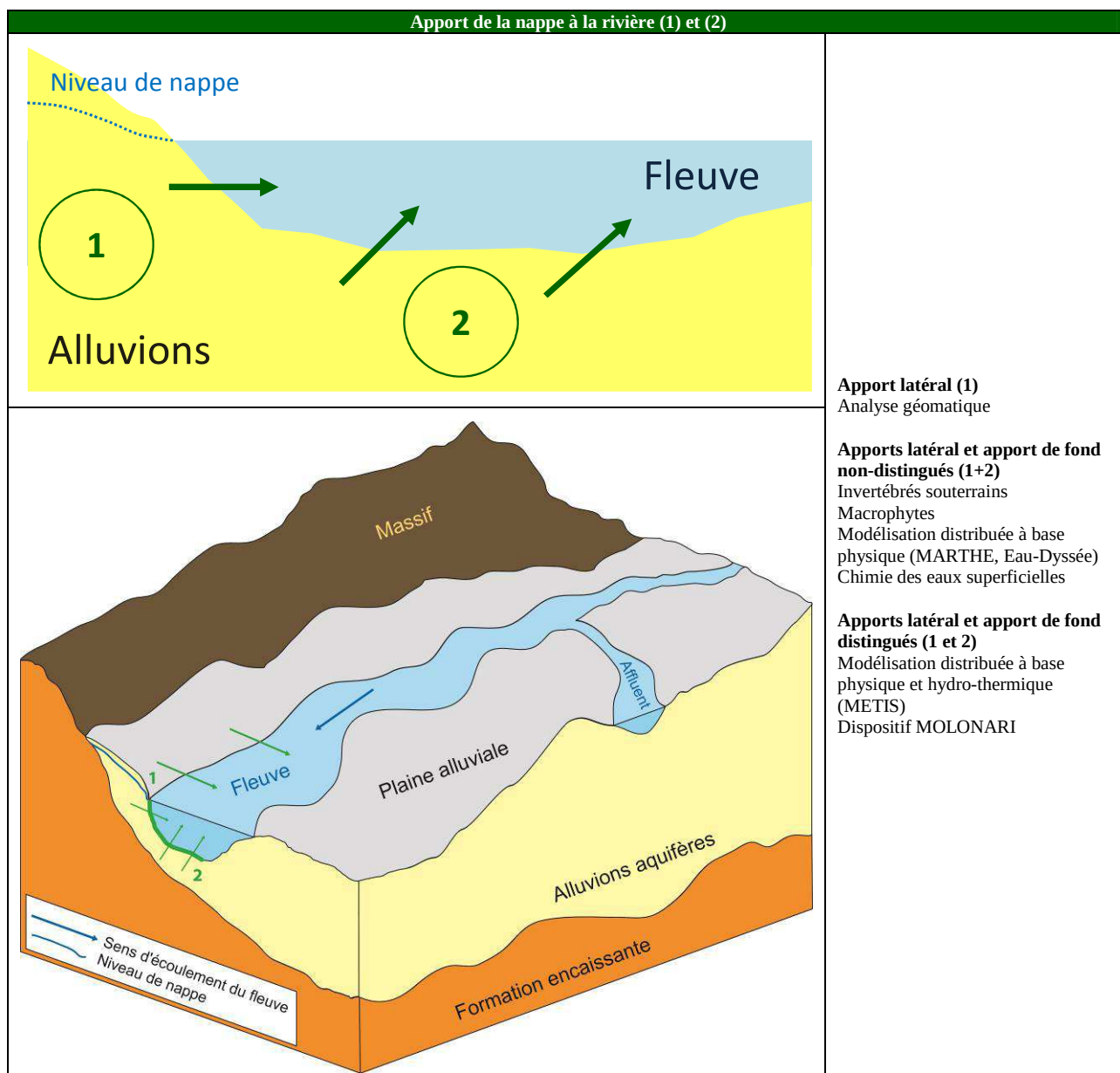


Figure 97 : Apport de la nappe à la rivière

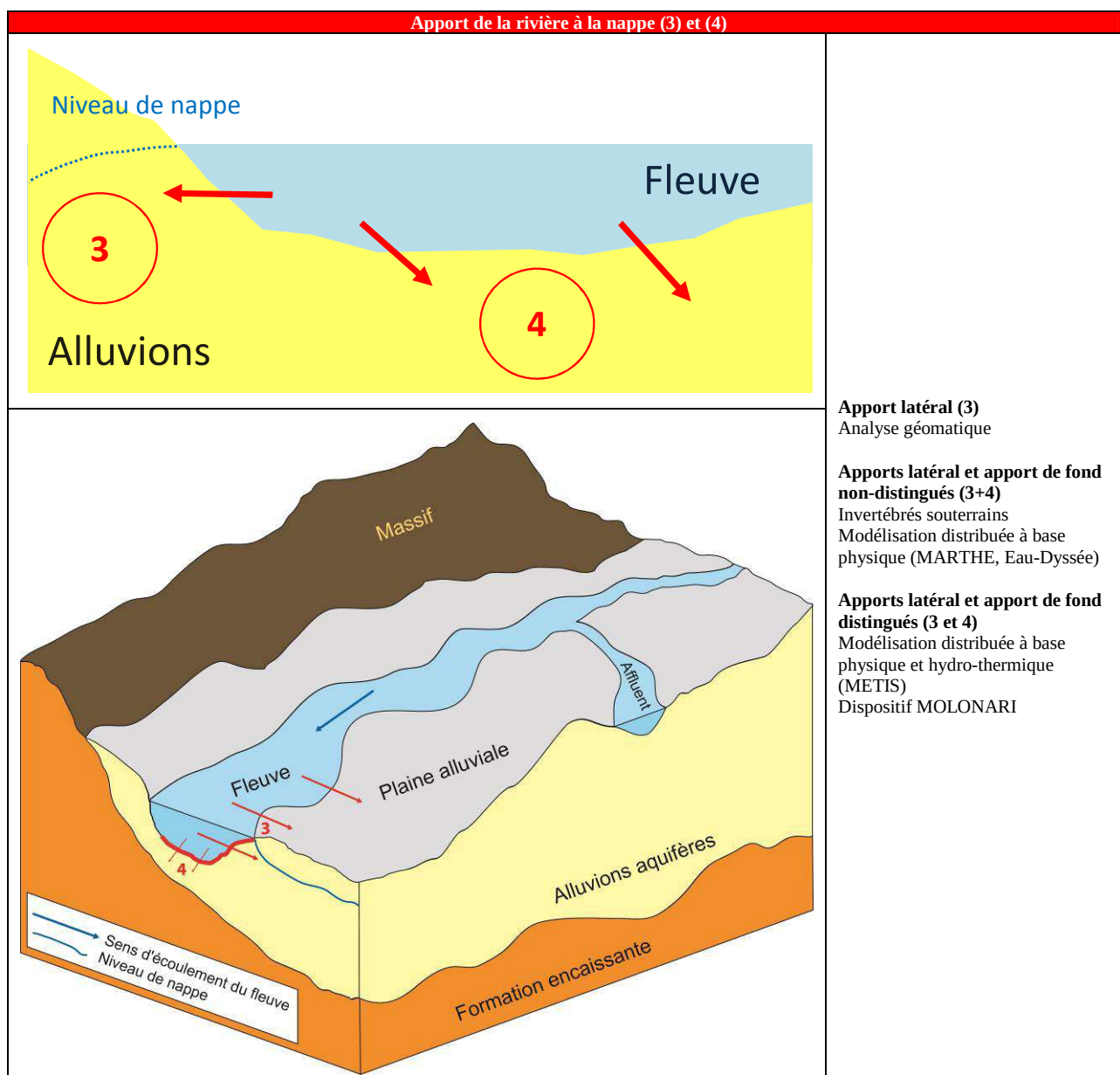


Figure 98 : Apport de la rivière à la nappe

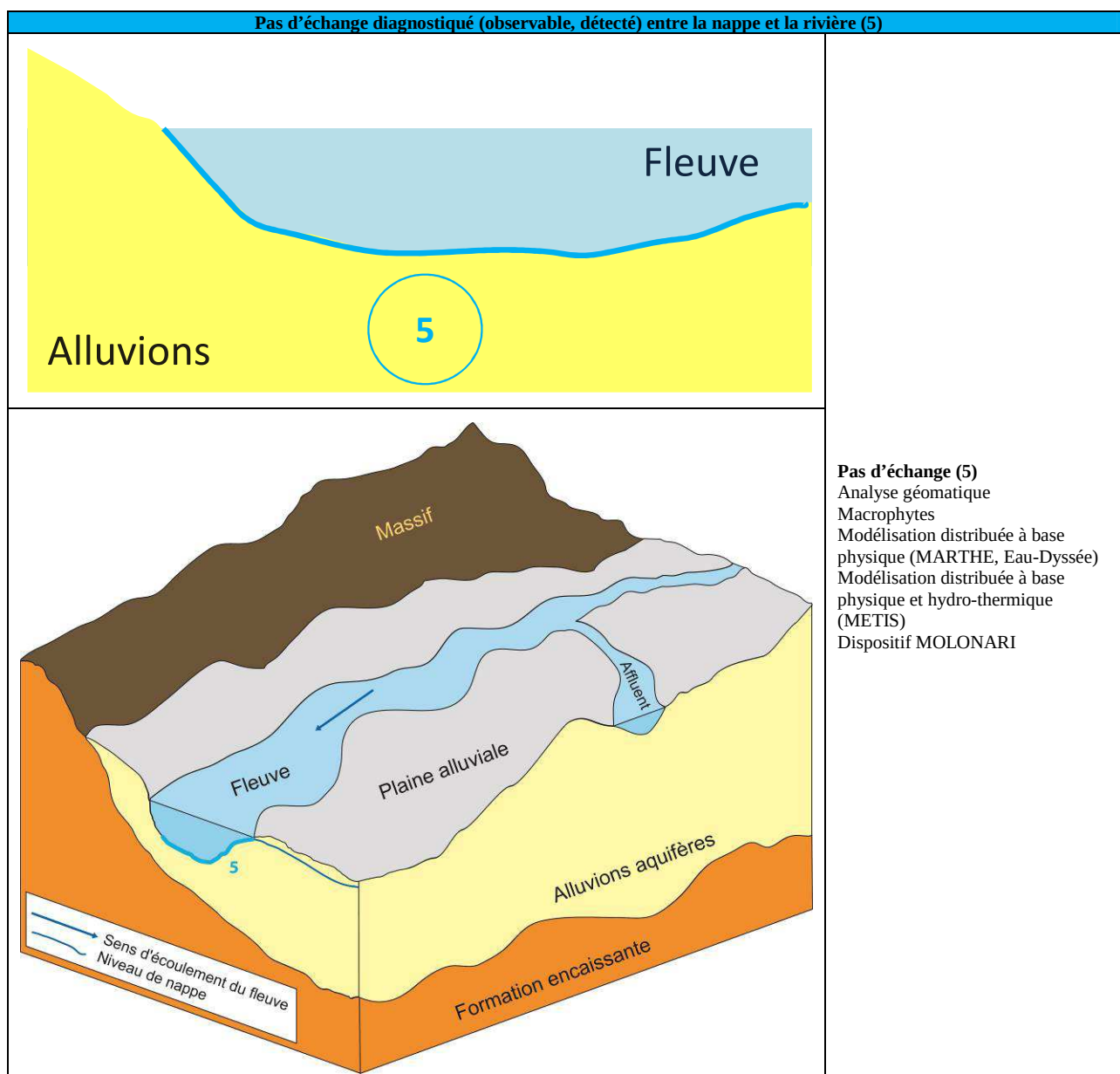


Figure 99 : Pas d'échange diagnostiqué (observable, détecté) entre la nappe et la rivière

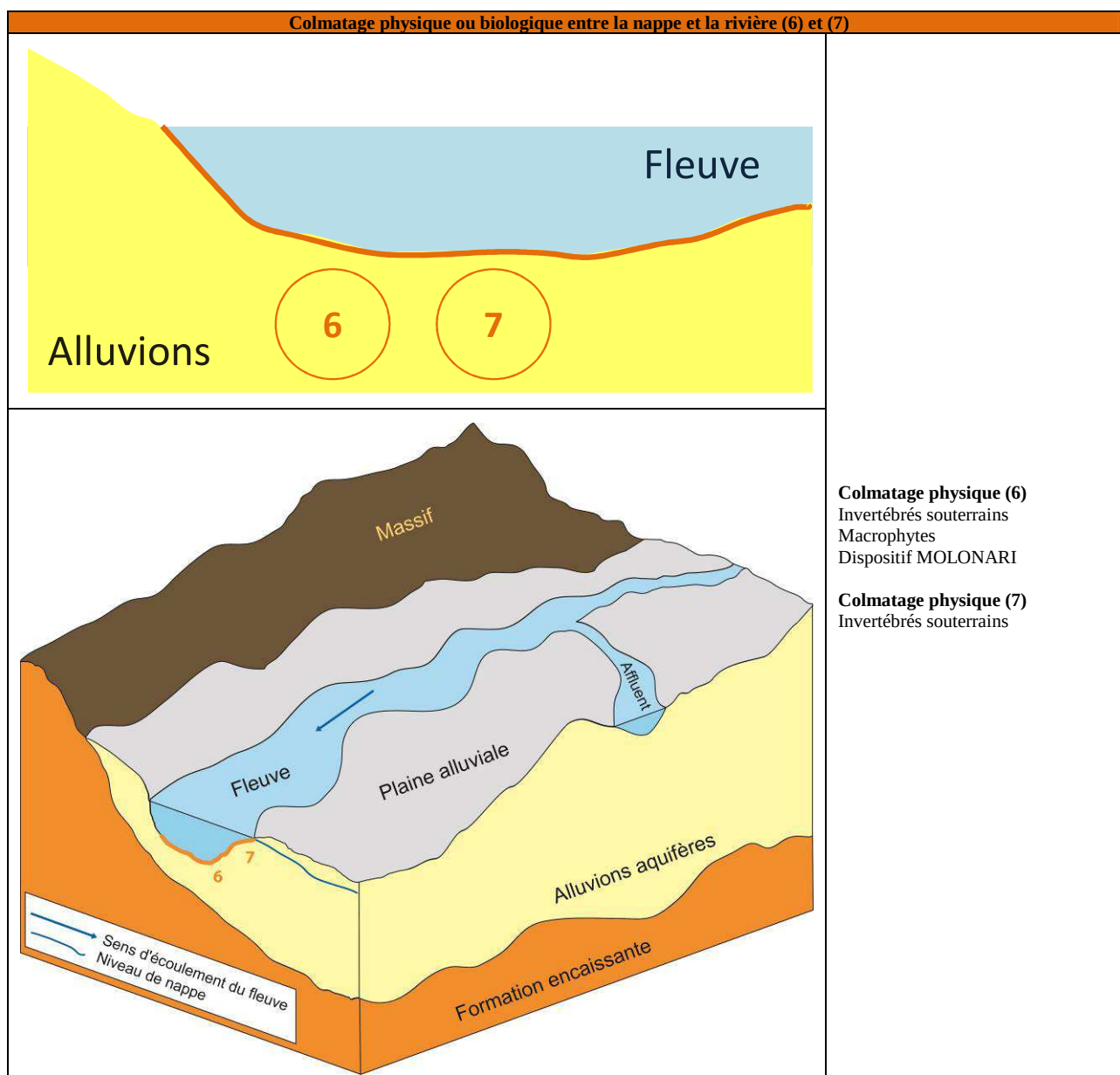
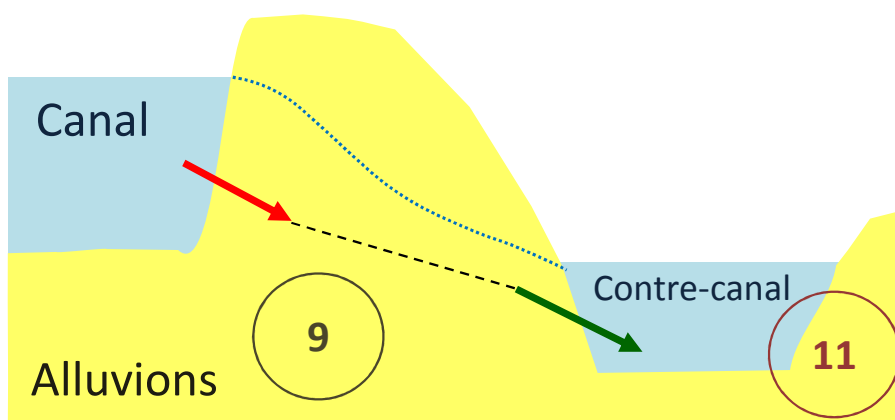
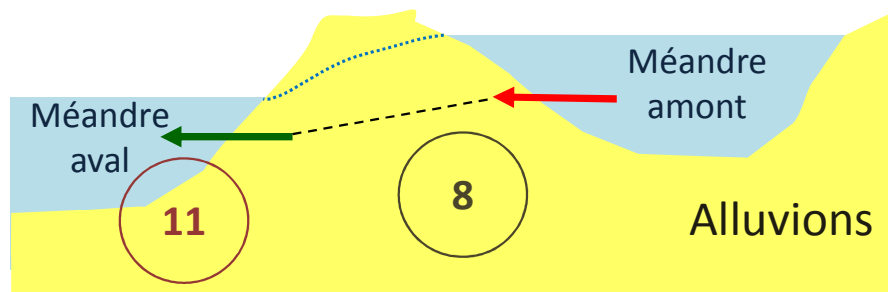


Figure 100 : Colmatage physique ou biologique entre la nappe et la rivière

Sous-écoulement d'eau superficielle via le milieu souterrain (digue, nappe) vers la rivière ou un canal (8) et (9)



Sous-écoulement – méandre (8)

Invertébrés souterrains
Macrophytes
Modélisation distribuée à base physique (MARTHE, Eau-Dyssée)
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique (METIS)
Chimie des eaux superficielles

Sous-écoulement – digue (9)

Invertébrés souterrains
Macrophytes
Dispositif MOLONARI
Chimie des eaux superficielles

Remarque 1 : 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.

Remarque 2 : dans ce type d'échange un **mélange** d'eau superficielle et d'eau souterraine a lieu (**11**). Il est quantifiable avec le dispositif MOLONARI.

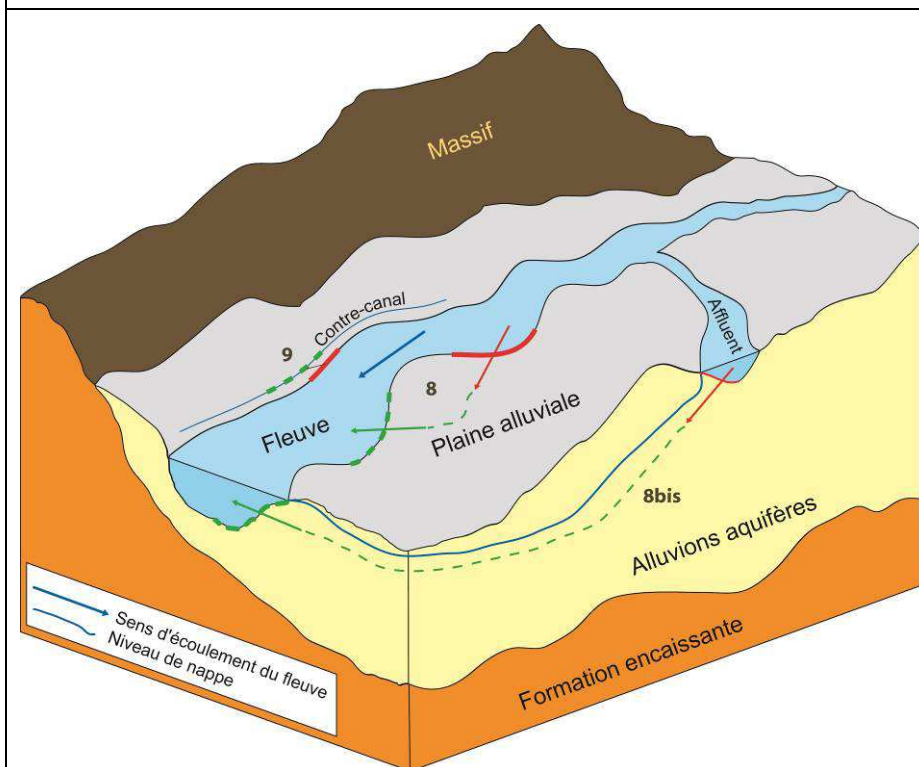
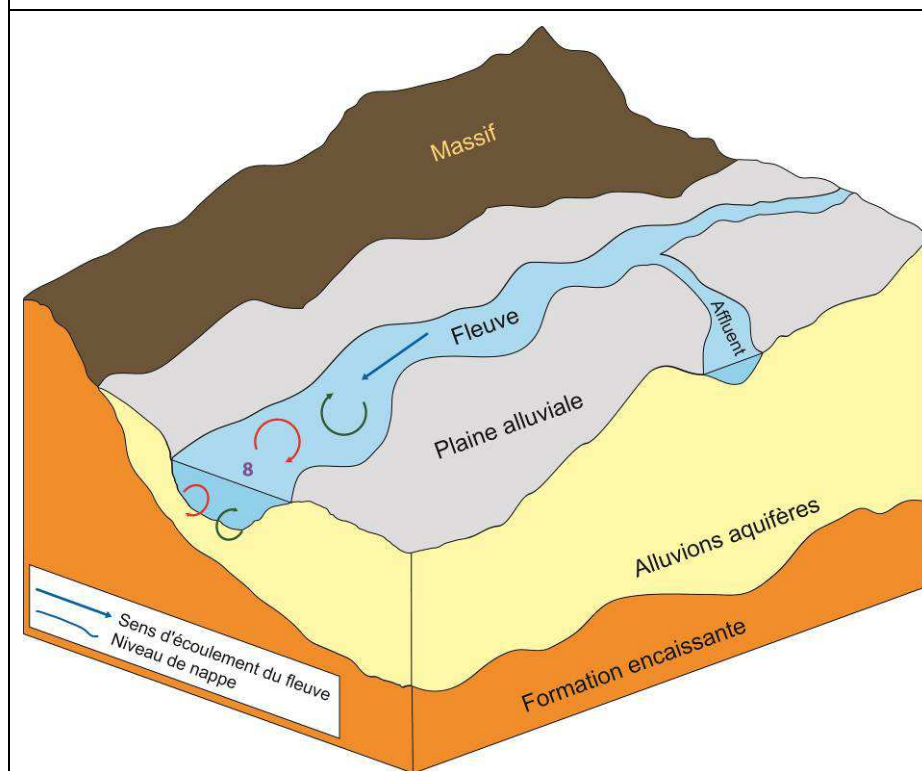
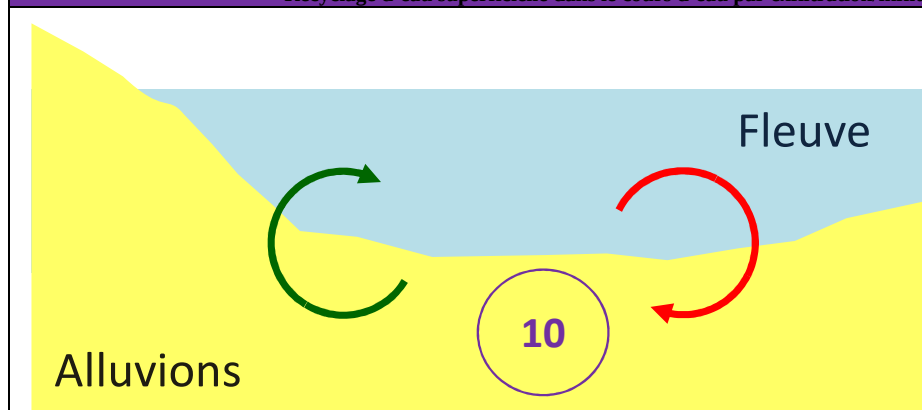


Figure 101 : Sous-écoulement d'eau superficielle via le milieu souterrain (digue, nappe) vers la rivière ou un canal

Recyclage d'eau superficielle dans le cours d'eau par exfiltration/infiltration (10)



Recyclage (10)
Invertébrés souterrains
Dispositif MOLONARI

Figure 102 : Recyclage d'eau superficielle dans le cours d'eau par exfiltration/infiltration



Figure 103 : Cas particuliers : incision du lit de la rivière

5.4.2. Grilles de comparaison des métriques

Cette partie propose un bilan synthétique de l'approche multi-site, multi-métrique et multi-critère proposée dans le projet NAPROM. Ce bilan est présenté sous forme de grilles (tableau). Celles-ci serviront de base de travail pour la rédaction du futur guide méthodologique. Elles permettront de guider le futur utilisateur dans le choix des métriques à utiliser en fonction des caractéristiques de son site. Le site ayant été au préalable décrit par l'utilisateur avec les grilles de caractérisation présentées dans la partie 5.1. et annexe 2.

Le Tableau 39 indique les métriques mobilisées sur chacun des sites.

Métriques	Sites
Analyse géomatique	Rhône, Rhin, Loire, Sèvre-Niortaise, Orgeval
Invertébrés souterrains	Rhône, Rhin, Orgeval
Macrophytes	Rhône, Rhin, Sèvre-Niortaise
Modélisation distribuée à base physique (Plateforme Eau-Dyssée, MARTHE)	Rhin (Plateforme Eau-Dyssée), Sèvre-Niortaise (MARTHE), Orgeval (CaWaQS ou plateforme Eau-Dyssée)
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique (METIS)	Orgeval
Dispositif MOLONARI (MONitoring LOcal des échanges NAppe-Rivière)	Orgeval
Résistivité	Orgeval
Température	Rhône, Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval
Conductivité	Rhône, Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval
Chimie des eaux superficielles (Chimie eau sup.)	Rhône, Rhin, Sèvre-Niortaise
Chimie des eaux interstitielles (Chimie eau sout.)	Rhône, Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval
Images thermiques Infrarouges (IRT)	Rhône (en cours)
Fibre optique (Thermie)	?
Modélisation aux éléments analytiques (AEM)	?
Chimie isotopiques (Isotopes)	Rhône (à voir)

Tableau 39 : Grille synthétique - métriques mobilisées par site

Le Tableau 40 synthétise les éléments fondamentaux permettant de décrire et de caractériser chacune des méthodes/métriques. Les champs sont au nombre de 5 et tentent de répondre aux questions suivantes :

- Contexte hydrogéologique (Contexte hydrogeol.)

Dans quels contextes hydrogéologiques la méthode est-elle applicable ?

- Principes de la méthode (Principes)

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

- Informations nécessaires

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

- Echelle spatiale de description des données [Echelle spatiale (description des données)]

Quelle est l'échelle d'acquisition ou de représentation des données permettant de mettre en œuvre la méthode ?

- Echelle spatiale de représentativité des échanges [Echelle spatiale (représentativité des échanges)]

Quelle est la plus petite unité spatiale à laquelle la méthode permet d'interpréter de manière pertinente les échanges nappes/rivières ?

- Temporalité

La méthode permet-elle de diagnostiquer des variations saisonnières dans les échanges nappes/rivière ? Sinon quelle est sa sensibilité temporelle ?

Eléments fondamentaux des différentes méthodes						
Métriques	Contexte hydrogéol.	Principes	Informations nécessaires	Echelle spatiale (description des données)	Echelle spatiale (représentativité des échanges)	Temporalité
Analyse géomatique	Nappe libre connectée 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	Ponctuelle (puits ou piézomètre)	0,5 à 1 km	- Variations saisonnières (si données disponibles) - Instantané sous hypothèse de régime permanent
Invertébrés souterrains	- Nappe libre - Milieu carbonaté dont karst	Composition des communautés d'invertébrés interstitiels	- Exigences écologiques des espèces (stygoxies) - Contexte biogéographique	Ponctuelle (3 répliquats 1m ² sur moins de 100m)	<100 m	- Variations saisonnières - Peu sensible aux fluctuations journalières
Macrophytes	Nappe libre	Composition des communautés de macrophytes	- Exigences écologiques des espèces (trophie, perturbations, apports de nappe) - Contexte biogéographique	Transect (2 m de large tous les 50 m)	0,1 à 2 km (dépend de la densité d'échantillonnage)	Intégration annuelle sur un relevé estival
Chimie eau sup.	Nappe libre	Analyse multivariée des paramètres physico-chimiques des annexes fluviales	- valeurs pour la rivière/fleuve au minimum - valeurs pour la nappe	Ponctuelle	0,1 à 2 km (dépend de la densité d'échantillonnage)	- Saisonnier (nécessite plusieurs dates d'échantillonnage)
Modélisation distribuée à base physique	- Nappe libre - Aquifère multicouche	- Modèle hydrogéologique-IDPR - Code de calcul MARTHE - Equation de diffusivité - volumes finis	- Géométrie du milieu, optionnel : épaisseur d'alluvions - Paramètres hydrodynamiques : perméabilité (k), Transmissivité, coefficient d'échange nappes/rivières, paramètre de Manning (frottement en rivière) - Conditions limites : précipitations, ETP - Conditions initiales et données de calibration et validation : h rivière et nappe (cote), Q rivière (débit)	Maille 100x100 m	Maille 100x100 m	- Régime transitoire - Pas de temps pluriannuel, mensuel et journalier)
		- Modèle couplé hydrologique / hydrogéologique - Code Eau-Dyssée - Equation de diffusivité - Différence finie		Maille 200x200 m	Maille 200x200 m	
		- Modèle couplé hydrologique / hydrogéologique - Code CaWaQS ou Eau-Dyssée - Equation de diffusivité - Différence finie		Maille 31,25x31,25 m	Maille 31,25x31,25 m	
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	Nappe libre	- Modèle thermique/hydrogéologique - Code METIS - Equation du transport de chaleur couplée à l'équation de diffusivité - Eléments finis - 2D vertical	- 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	Mailles variables 1 à 10 cm	Section de rivière	- Evénement hydrologique jusqu'à pluriannuelle - Pas de temps horaire
Dispositif MOLONARI	- Nappe libre - Aquifère multicouche	- Mesures hydrogéophysiques - Calcul du gradient hydraulique nappes/rivières - 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	Ponctuelle	Section de rivière	- Evénement hydrologique jusqu'à pluriannuelle - Pas de temps horaire

Tableau 40 : Grille synthétique - caractérisation et description des métriques (éléments fondamentaux)

Métriques	Echanges					
	Types	Sens	Quantification	Rive	Représentation	Zone hyporhéique
Analyse géomatique	- Latéraux, à travers les berges à l'échelle de tronçon - Interface nappe/cours d'eau (section plan)	O	O m³/jour	O	Linéaire de berge	N
Invertébrés souterrains	- Par le fond ou par les berges - Localement, toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	O	N	O	Ponctuelle	O
Macrophytes	- 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	N Uniquement nappe vers rivière	O Semi-quantitatif (4 classes)	O Si on l'intègre dans le suivie en séparant chaque rive N Si on fait le relevé standard sans a priori	- Relevés ponctuels (à l'échelle de la zone humide) - Interpolation surfacique	N
Modélisation distribuée à base physique	Surface mouillée (fond et berges)	O	O	N	Surfacique	N
Chimie eau sup.	Intégré à l'échelle des masses d'eau	N Uniquement nappe vers rivière	N	O Difficile (demande un échantillonnage complexe dans le temps et l'espace)	- Relevés ponctuels (à l'échelle de la zone humide) - Interpolation surfacique	N
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	Distingue échanges par le fond et par les berges	O	O	O	Ponctuelle	O
Dispositif MOLONARI	Surface mouillée (fond et berges)	O	O Si couplé avec modèle	N	Ponctuelle	O

Tableau 41 : Grille synthétique - caractérisation et description des métriques (échanges)

Le Tableau 41 présente la façon dont chacune des métriques/méthodes prend en compte les échanges nappes/rivières à travers 6 champs qui tentent de répondre aux questions suivantes :

- Type d'échanges pris en compte / aire d'échange (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...) ? A distinguer de la façon dont ils sont calculés ?

- Sens de l'échange (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 (Quantification)

La méthode permet-elle de quantifier les flux d'eau échangés (m³/jour ; l/s...) ?

- Caractérisation de l'échange pour chaque rive (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 (Représentation)

Comment les résultats issus du diagnostic peuvent-ils être représentés sous forme cartographiques et notamment sous SIG (points, lignes, surfaces, 3D...) ?

- Caractérisation de la zone hyporhéique (Zone hyporhéique)

La méthode permet-elle de caractériser les échanges en distinguant la zone hyporhéique ?

Ensuite, le Tableau 42 présent de manière synthétique le potentiel de chaque métrique à diagnostiquer les différents types d'échanges présentés dans la partie précédente (5.4.1).

Enfin, le Tableau 43 synthétise les points forts (avantages) et les points faibles (défauts, incertitudes) de chacune des métriques

	Configurations d'échanges											
	Nappe → rivière		Rivière → nappe		Absence d'échange	Colmatage		Indicateurs du cheminement de l'eau			Cas particuliers	
	Latéral	Fond	Latéral	Fond		Phys.	Bio.	Sous-écoulement		Recycl.	Mélange	Nappe déconnectée ou surélevée
Métriques												
Analyse géomatique	O	N	O	N	O	N	N	N	N	N	N	N
Invertébrés souterrains	O Non distingués		O Non distingués		N	O	O	O	O	O	N	O Si colmatage
Macrophytes	O Non distingués		N	N	O	O ¹	N	O	O	N	N	?
Chimie eau sup.	O Non distingués		N	N	N	N	N	O	O	N	N	N
Modélisation distribuée à base physique	O Non distingués		O Non distingués		O	N	N	O ²	N	N	N	O
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	O	O	O	O	O	N	N	O	N	N	N	O
Dispositif MOLONARI	O	O	O	O	O	O	N	N	O	O ³	O ⁴	O

¹ : Les macrophytes peuvent détecter le colmatage physique seulement à l'échelle des zones humides créées par alluvionnement

² : 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

³ : Le recyclage est détectable par cette métrique si plusieurs dispositifs MOLONARI sont installés sur un même tronçon

⁴ : Le mélange est détectable si le dispositif MOLONARI est couplé avec modèle à base physique

Tableau 42 : Grille synthétique - configuration d'échanges prises en compte par les métriques

Métriques	Points forts	Points faibles
Analyse géomatique	Rapide, simple, peu de données, extension spatiale, agrégation spatiale	Milieux alluviaux libres uniquement, existence et précision des données de départ
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
Macrophytes	Rapide, peu coûteux, intégration des échanges sur une période annuelle	Présence de végétation, semi-quantitatif, homogénéité de la qualité des eaux
Chimie eau sup.	Peu coûteux	Nécessité d'échantillonner plusieurs fois, données pas toujours fiable (pics liés à productivité primaire, sondes mal calibré, échantillons mal conservés)
Modélisation 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
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	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
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.

Tableau 43 : Grille synthétique - points forts et points faibles des métriques

5.4.3. Protocole de comparaison des métriques

Les différentes étapes du protocole de comparaison des métriques sont les suivantes :

- diagnostic par métriques impliquées sur le site à étudier
- sectorisation spatiale des échanges à l'échelle du PK pour chaque métrique, pour chaque tronçon de rivière étudié à l'aide de la typologie des échanges nappes/rivières
- superposition spatiale des diagnostics par métrique sur les tronçons étudiés
- détermination des incertitudes liées au sens de l'échange diagnostiqué et à sa quantification pour chaque tronçon de rivière (
- diagnostic synthétique multi-métrique des échanges par tronçon de rivière
- représentation cartographique du diagnostic synthétique

Métriques	Qualité du diagnostic		
	0 Bonne évaluation	-2 Incertitudes	-5 Douteux
Analyse géomatique	- 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
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)
Macrophytes	- Forte densité de site (1 tous les 500m)	- Proportion importante d'espèces ubiquistes	- Hyper-eutrophisation - Recouvrement végétal très faible - Instabilité hydrologique récente (après une crue)
Chimie eau sup.	- Fort contraste entre nappe et surface - Mesure de qualité de nappe en parallèle	- Contexte anthropique (agriculture)	- Mesures ponctuelles - Contexte anthropique (forte pollution)
Modélisation 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 - Connaissance 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, etc.) - Hypothèses de modélisation adaptées à l'échelle spatio-temporelle	- 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, etc.) - Absence d'un processus hydrologique susceptible de modifier les échanges nappe/rievre (inondations, remontées de nappe...)	- Réseau faiblement dense d'observations - Fort biais par rapport aux observations - Méconnaissance totale du domaine simulé (paramètres, hydrodynamiques, géomorphologiques, topographiques, etc.) - Hypothèse de modélisation mal adaptée au domaine et aux objectifs (maillage trop grossier, pas de temps trop faible, etc.) - Choix d'un type de modèle pas adapté au problème (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)
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	- Réseau de mesure assez dense (calibration) - Peu 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 mesure (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 terrain
Dispositif MOLONARI	- Rivière connectée, - Présence d'échange - Bon nivellement. - Mesure en continue à haute fréquence	- Faible gradient (<0.5 cm) entre la nappe et la rivière - Mesures hebdomadaires	- Rivière déconnectée - Absence d'échange - Mauvais nivellement - Mesures ponctuelles

Tableau 44 : Incertitudes par métriques sur le diagnostic des échanges nappe/rievre : exemples

Le tableau de comparaison croisée des métriques sectorisées spatialement à l'échelle du ½ PK ou du PK est structuré de la façon suivante [voir tableau de croisement des métriques réalisés pour la Sèvre-Niortaise (Tableau 21), l'III (Tableau 29) et l'Orgeval (Tableau 36 et Tableau 37)] :

- Dans la partie gauche le diagnostic des échanges par métriques. Pour chacune est indiquée 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 devront être réalisés à la même date. La sectorisation spatiale en unités fonctionnelles des échanges nappes/rivières est effectuée à l'échelle du ½ PK à l'aide du code couleur issu de la typologie des échanges. De plus des informations complémentaires pourront être intégrées (remarques, quantification des flux échangés). Par convention, 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 par chacune des métriques et pour chaque secteur homogène en termes d'échange l'incertitude pesant sur le diagnostic. Le Tableau 44 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 : 0 : bonne évaluation, -2 : incertitudes, -5 : douteux. Le choix de la classe d'incertitude devra reposer sur des critères permettant à l'utilisateur de faire son choix. Pour les métriques permettant une quantification du flux, une incertitude relative devra aussi être indiquée (ex : $Q \pm 30\%$).

- La partie centrale est réservée au diagnostic synthétique croisé. Dans, un premier temps se diagnostic sera réalisé à « dire d'experts » après discussion. Dans un deuxième temps, une formule de calcul fondée sur les incertitudes devra permettre au futur utilisateur du guide de réaliser son diagnostic synthétique de manière autonome.

6. Conclusion et perspectives

6.1. Synthèse du projet

6.1.1. *Diagnostics des échanges nappes/rivières sur tous les sites*

En 2011, la première année du projet NAPROM (Nappes Rivières : Observations et modélisation) a permis de choisir et de caractériser cinq sites qui servent de test pour l'évaluation des échanges entre les nappes et les fleuves sur les bassins versants du Rhône, de la Seine (Orgeval), de la Loire, du Rhin et de la Sèvre-Niortaise. Pour cela plusieurs critères ont été définis : régime hydraulique, ouvrages et aménagements, usages de l'eau et enjeux, altitudes et latitudes, sensibilité des milieux.

De 2012 à 2014 les tâches prévues ont permis de mettre en œuvre différentes méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières sur ces sites. Différentes méthodes (ou métriques) ont été appliquées :

- l'analyse géométrique SIG des niveaux de nappes et des rivières (tous les sites),
- la caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques (Rhône, Rhin, Orgeval),
- le diagnostic des échanges nappes/rivières à l'aide des macrophytes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise),
- la modélisation hydrogéologique couplée surface-souterrain (Rhin, Sèvre-Niortaise, Orgeval),
- la géophysique (Orgeval),
- la chimie des eaux dont les isotopes (Rhin, Rhône, Sèvre-Niortaise),
- les méthodes utilisant les données de température (Orgeval, Rhône)
- la modélisation hydrothermique (Orgeval).

L'objectif est de rassembler les éléments nécessaires pour élaborer et développer un guide technique de caractérisation des échanges nappes/rivières.

Sur chaque site, les métriques impliquées ont produit des résultats pour la caractérisation des échanges nappes/rivières. Parallèlement, pour chaque site une vision synthétique sectorisée des premiers diagnostics est proposée sous forme de tableau dans certains cas de cartes quand cela s'est avéré nécessaire.

Il serait possible d'aller plus loin, notamment avec l'analyse géomatique, avec un certain nombre de données complémentaires notamment pour le Rhin et l'III (§ 4.3.5.4. p118) et l'Orgeval (§ 4.5.4.3. p146).

6.1.2. *Protocole de comparaison des métriques*

6.1.2.1. Typologie des échanges nappes/rivières

En l'état, 11 configurations différentes d'échanges nappes/rivières ont été retenues, définies et schématisées pour caractériser les échanges nappes/rivières. Un code couleur est affecté à chacune d'entre elles :

- Métrique non-utilisée dans le diagnostic
- Pas de site d'échantillonnage et/ou de relevé
- Nappe vers la rivière (1. latéral et /ou 2. par le fond)
- Rivière vers la nappe (3. latéral et/ou 4. par le fond)
- Absence d'échange détectée (5.)
- Colmatage (6. physique et/ou 7. biologique)
- Cheminement de l'eau
 - . Sous-écoulement (8. méandre/9. digue)

- . Recyclage (10.)
- . Quantification mélange (11.)
- 12. Situations particulières

6.1.2.2. Caractérisation fine de chacune des métriques

Chacune des métriques a été cernée dans le contexte du projet NAPROM et décrite finement dans plusieurs grilles :

- métriques mobilisées par site
- éléments fondamentaux
- prise en compte des échanges
- configurations d'échanges diagnosticables
- points forts et points faibles

6.1.2.3. Protocole de comparaison des métriques

Il est fondé sur les travaux préalables réalisés dans le cadre du projet « Eau Sout' » sur le Rhône adapté au contexte du projet NAPROM. A l'heure actuelle, les étapes qui composent ce protocole sont listées ci-dessous avec les éléments nécessaires à leur déroulement :

- Diagnostic par métriques impliquées sur le site à étudier
- Sectorisation spatiale des échanges à l'échelle du PK pour chaque métrique, pour chaque tronçon de rivière étudié à l'aide de la typologie des échanges nappes/rivières
- Superposition spatiale sous SIG des diagnostics par métrique sur les tronçons étudiés
- Détermination des incertitudes liées au sens de l'échange diagnostiqué et à sa quantification pour chaque tronçon de rivière
- Diagnostic synthétique multi-métrique des échanges par tronçon de rivière à « dire d'experts »
- Représentation cartographique sous SIG du diagnostic synthétique final

Ces différents éléments permettront de construire les différentes fiches techniques qui constitueront le futur guide méthodologique.

6.2. Perspectives : construction et test du guide technique

Ce guide est destiné aux gestionnaires de l'eau et sera complémentaire du guide méthodologique réalisé au préalable sur le Rhône. Une fois la maquette du guide finalisée celui-ci sera testé par un panel d'utilisateurs. Des ajustements pourront être effectués en fonction des retours obtenus auprès des utilisateurs et d'une analyse critique fonctionnelle du guide. L'année 2015 sera finalement consacrée à ce travail. En plus des fiches décrivant chacune des méthodes un chapitre est prévu pour décrire la démarche à suivre (règles de cheminement organisées en graphe) pour utiliser le guide assorti de conseils pour :

- les traitements SIG et cartographiques ;
- l'utilisation des métriques en fonction des besoins et du contexte ;
- le dimensionnement des moyens humains et la détermination des compétences nécessaires.

De plus, cette action de recherche aborde les questions concernant « les changements globaux » et « la prospective changement climatique » en s'intéressant surtout à l'influence des régimes transitoires au pas de temps saisonnier sur les échanges nappes/rivière, et en donnant des éléments pour améliorer les modèles numériques d'impact.

7. Références bibliographiques

7.1. Par Site

7.1.1. Rhône aval (Donzère Mondragon)

7.1.1.1. Hydrométrie

CNRa (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. Volet 2 : Hydraulique – Dossiers historiques. Dossier historique : Donzère-Mondragon. DI-CE 99-1237. 46p.

CNRb (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. Volet 2 : Hydraulique – Diagnostic hydraulique par bief. Diagnostic hydraulique du bief de : Donzère-Mondragon. DIT-HY 02-0049. 48p.

Delattre P. (1955) La place des ouvrages de Donzère-Mondragon dans le programme d'aménagement du Rhône. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série, pp. 11-20.

Guégan B. (1972) Tritium et bilan hydrogéologique en cas de pollution de la nappe alluviale du Rhône entre Donzère (Drôme) et Mondragon (Vaucluse). Thèse de Géodynamique externe (hydrogéologie), Université ParisVI.

Henry M. (1955) Les problèmes liés aux sables et aux graviers. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série, pp. 39-54.

Jacob C. (1955) Site et conditions géologiques de l'aménagement de la chute de Donzère-Mondragon. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série, pp. 21-35.

Maire A. (1955) Le rétablissement des communications, de l'écoulement des eaux et de la nappe. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série, pp. 311-332.

Poinsart D. (1992) Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides. L'exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon. Thèse de Géographie-Aménagement, Université Lyon 3.

SOGREAH (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide. Volet 3 : Dynamique fluviale – Transport solide. 1er étape : Diagnostic de l'état actuel : analyse par aménagement. CNR, IRS. 250p.

7.1.1.2. Invertébrés

Balazuc, J., 1954. Les Amphipodes troglobies et phréatobies de la faune gallo-rhénane. Arch. Zool. Exp. Gén., 91, 153-193.

Bernasconi, R., 1994. Le genre *Moitesseria* bgt, 1863 en France : révision , inventaire et description de *M. corsica* n ; sp ; (Mollusca Gasteropoda Prosobranchia Hydrobiidae). Mémoires de Biospéléologie, 21, 7-20.

Boeters, H.D., and Falkner, G., 2003. Die Bythiospeen des Rhône-Genists (Gastropoda :

Hydrobiidae). Heldia, 5, 1-6.

Creuzé des Châtelliers, M. 1991. Dynamiques de répartition des biocénoses interstitielles du Rhône en relation avec des caractéristiques géomorphologiques (secteurs de Brégnier-Cordon, Miribel-Jonage et Donzère-Mondragon). Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 161 p.

Dollfus, A., 1897. Sur deux types nouveaux de Crustacés Isopodes appartenant à la faune souterraine des Cévennes. C. R. Acad. Sc. Fr. 125, 130-131.

Ginet, R., 1990. Répartition en France de l'Amphipode hypogé *Niphargopsis casparyi* (Pratz)(Crustacea). Bull. Soc. Linn. Lyon, 59, 350-356.

Plénet, S., Hugueny, H., Gibert, J. 1996. Invertebrate community response to physical and chemical factors at the river/aquifer interaction zone II. Downstream from the city of Lyon. Arch. Hydrobiol., 136, 65-88.

Schellenberg, A., 1951. Un *Niphargus* nouveau du sud-est de la France. Bull. Mus. Nat. Hist. Nat., 23, 187-189.

Serban, E., 1989. Taxa nouveaux des Bathynellidés d'Europe (Bathynellacea, Podophallocarida, Malacostraca). Trav. Inst. Spéol. " Emile Racovitza " 28, 3-17.

Vervier, P., 1988. Hydrologie et dynamique des peuplements aquatiques souterrains : comparaison de deux systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 219 p.

7.1.2. Sèvre-niortaise (Champ captant de Saint-Maxire-Echiré)

Bichot F., THINON-Laminach M., Touchard. et BAILLY D. (2005) - Synthèse hydrogéologique par bassins versants de la Région Poitou-Charentes. Relation nappes-rivières. Rapport BRGM RP-53767-FR.

Chatelier M. avec la collaboration de D. Thiéry (2012a) - Etude par modélisation hydrodynamique des relations nappes/rivières autour du champ captant de Saint Maxire-Echiré. Phase 1 : adaptation du modèle régional et calage en régime permanent. Rapport BRGM/RP-60308-FR, 69 pages, 38 ill.

Chatelier M. avec la collaboration de Subra P. et Grosset Y. (2012b) – Modélisation des échanges nappe-rivière autour du champ captant de St Maxire-Echiré (79). Phase 2 : mesures complémentaires et calage en régime transitoire. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-61859-FR. 78 p., 44 ill, 1 ann.

DASSARGUES A. (1990)- Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation, Annales de la Société Géologique de Belgique, T.113, fascicule 2, 217-229

DOUEZ O. (2008) - Le champ captant de Saint-Maxire et Echiré – Synthèse des connaissances – Rapport BRGM RP-56352-FR, 50 p., 36 ill., 1 ann., 1 carte hors texte.

Douez O., Bichot F., Dequidt D., Dugrillon D., Putot E., Petit L. (2010) - Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-58297-FR, 239 p, 212 ill., 5 ann., 12 pl.

DOUEZ O., BICHOT F., PETIT L. (2011) – Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. BRGM/RP-59288-FR, 411 p., 286 ill., 2 ann., 4 planches hors texte.

GEOAQUITAINE (1991) - Forages pour l'eau potable-champ captant de Saint-Maxire-Synthèse hydrogéologique-Tome 1 : Contexte hydrogéologique. 26p, 8 annexes.

Mondain P.H. (2008) – Expertise des objectifs du projet SDAGE de la ressource en eau sur la

bordure nord du Marais Poitevin vendéen, bassin u Lay, de la Vendée et des Autizes, et propositions de principes de gestion. Phase 2 : Expertise du travail produit par le groupe de travail technique de l'inter-SAGE. Rapport CALLIGEE pour le Conseil général de la Vendée N08-85138-B, septembre 2008.

NOYER M.L., MENJOS A., ELSASS Ph., THIERY D., MARTIN J.C. avec la collaboration de SAUTY J.P., VANCON J.P. (1998) – Modèle de la nappe d'Alsace – Projet de développement 312 – Rap. Final. Rap BRGM R 40335, 207 p., 47 fig., 20 tab., 6 ann.

PUTOT E., BICHOT F. (2007) - CPER 2000-2006 Phase 4 - Modèle Infra-Toarcien Dogger : calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGM/RP- 55742-FR, 94 p., 86 ill., 7 tab., 8 ann.

Thiery D. (1990 a) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

Thiery D. (1990 b) - Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid in Transient state for Hydrodynamic calculations of hEads and flows. Release 4.3. Rapport BRGM 4S/EAU n° R 32548.

Thiery D. (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. Revue Hydrogéologie, 1993, n° 4, p. 325-336.

Thiery D. (1994) - Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38108 DR/HYT 94, 114 p.

Thiery D. (1995 a) - Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38149 DR/HYT 95, 171 p.

THIERY D. (2006) - Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP 54652-FR, 83 p., 48 fig.

Thiery, D. (2007) - Modélisation 3D des écoulements à densité variable avec le logiciel MARTHE version 6.9. Rap. BRGM/RP-55871-FR, 88 p., 23 fig.

THIERY D. (2008) - Code MARTHE 7.0 : Couplage Nappe-Rivières et Nappe-Drains ; Bilans Hydroclimatiques, Note technique NT EAU 2004/19, 2ème édition, 19p

Thiery, D. (2009) – Modèles d'hydrogéologie. in Traité d'hydraulique environnementale - Volume 3 - Modèles mathématiques en hydrologie et en hydraulique fluviale. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 4 pp. 95-117. ISBN 978-2-7462-1838-3.

Thiery, D. (2010a) – Modélisation des écoulements souterrains en milieu poreux avec MARTHE. in Traité d'hydraulique environnementale – Volume 9 – Logiciels d'ingénierie du cycle de l'eau. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 4 pp. 77-94. ISBN 978-2-7462-2339-4.

Thiery, D. (2010b) – Hydrogeologic Models. in "Mathematical Models Volume 2, chapter 4, pp. 71-92 • Environmental Hydraulics Series". Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-154-4.

Thiery, D. (2010c) – Groundwater Flow Modeling in Porous Media Using MARTHE. in "Modeling Software Volume 5, Chapter 4, pp. 45-60 • Environmental Hydraulics Series". Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-157-5.

Thiery D., Golaz C., Azaroual M. (2002) - Mise en œuvre et tests d'application du code MARTHE – PHREEQC Version 6.2. Rapport BRGM/RP-51905-FR, 67 p.

Thiery D., Golaz C. (2002) - Consideration of vegetation effects in version 6.2 of the MARTHE

model. Consequences for water and mass uptake. Rapport BRGM/RP- 51988-FR, 48 p.

Touchard F., Bichot F., Karnay G. (2002) - CPER 2000-2006 – Phase 1 – Outils pour la gestion de l'aquifère de l'Infra-Toarcien – Synthèse hydrogéologique de l'aquifère Infra-Toarcien en Poitou-Charentes. Rapport BRGM/RP-51881-FR.

Touchard F., Bichot F., Ouafi H. (2005) - CPER 2000-2006 - phase 3. Outils pour la gestion de l'aquifère de l'Infra-Toarcien. Modélisation des aquifères de l'Infra-Toarcien et du Dogger. Rapport BRGM/RP-54294-FR, 74 p., 21 ill., 3 tab., 6ann.

Touchard F., Karnay G., Bichot F. et al. (2004) - CPER 2000-2006 – Phase 2 – Outils pour la gestion de l'aquifère de l'Infra-Toarcien – Réalisation de deux forages et modélisation géologique de l'aquifère. Rapport BRGM RP-52713-FR.

7.1.3. Rhin supérieur (Plaine de l'Ill)

7.1.3.1. Hydrométrie

Bauer, Michael, Eichinger, Lorenz, Elsass, Philippe, Kloppmann, Wolfram, Wirsing, Gunther (2005), Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the Southern Upper Rhine Graben. International Journal in Earth Sciences, 94, 565-579.

Durbec, André, Muntzer, Paul, Zilliox, Lothaire (1986), Visualisation par thermographie aérienne des échanges hydrodynamiques entre la nappe phréatique, les cours d'eau et les gravières dans la plaine du Rhin au Nord de Strasbourg. Bulletin de la société française de photogrammétrie et de télédétection, 102, 25-36.

Esteves, Michel (1989), Etude et modélisation des relations aquifère-rivières dans le Ried de Colmar (Haut-Rhin, France). Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg.

George, M., Calmbach, L., Lettermann, M., Ménillet, F., Baderot, S. (1995), Carte hydrogéologique suisse au 1/100000 – Feuille Bâle. Rapport BRGM R-38678.

Königer, P., Uhlenbrook, S., Leibundgut, Ch., Jaeger, L., Mayer, H. (2001) Isotopic hydrological investigation on groundwater origin in the floodplain of the Upper Rhine Valley. New approaches characterizing groundwater flow, Seiler et Wohnlich (eds.).

LUBW (2006), Modélisation hydrodynamique et transport des nitrates. INTERREG III A: MoNit "Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur," *Tech Rept LUBW*.

PIREN EAU-Alsace (1984), Recherche méthodologique sur les hydrosystèmes pour optimiser la gestion des ressources en eau dans la région Alsace. Rapport technique, Conseil Régional Alsace

Rotstein, Y., Edel, J.-B., Gabriel, G., Boulanger, D., Schaming, M., Munsch, M. (2006), Insight into the structure of the Upper Rhine Graben and its basement from a new compilation of Bouguer gravity. Tectonophysics, 425, 55-70.

Saleh, F., N. Flipo, F. Habets, A. Ducharne, L. Oudin, P. Viennot, and E. Ledoux (2011), Modeling the impact of in-stream water level fluctuations on stream-aquifer interactions at the regional scale, J. Hydrol., 400(3–4), 490–500, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.001.

Schmitt, Laurent (2001), Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau : recherche méthodologique appliquée aux systèmes alluviaux d'Alsace. Thèse de l'Université Louis Pasteur,

Strasbourg.

Thierion, C. et al. (2012), Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem, J. Hydrol., 424–425, 68–83, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.028.

Thierion, Charlotte (2011), Modélisation du fonctionnement de l'aquifère alluvial du fossé rhénan supérieur et vulnérabilité sous l'impact du changement climatique. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Trautmann, Jean (1981), Utilisation de la télédétection aérienne infrarouge pour l'étude de la dynamique fluviale du Rhin, Annales de Géographie, 499, 284-310.

Trémolières, Michèle, Roeck, Ute, Klein, Jean-Paul et Carbiener, Roland (1994), The exchange process between river and groundwater on the central Alsace floodplain (Eastern France): II. The case of a river with functional floodplain, Hydrobiologia, 273, 19-36.

7.1.3.2. Invertébrés

Hertzog, L. 1933. *Bogidiella albertimagni* sp. nov., ein neuer Grundwasseramphipode aus der Rheinebene bei Straßburg. I. Mitteilung Zoologischer Anzeiger 102, 225-227.

Hertzog, L. 1936. Crustaceen aus unterirdischen Biotopen des Rheintales bei Straßburg. I. Mitteilung. Zoologischer Anzeiger 114, 271-279.

Hertzog, L. 1936. Crustacés de biotopes hypogées de la vallée du Rhin d'Alsace. Bulletin de la Société zoologique de France, tome LXI, 356-372.

Hertzog, L. 1938. Crustaceen aus unterirdischen Biotopen des Rheintales bei Straßburg. III. Mitteilung. Zoologischer Anzeiger 123, 45-56.

Creuzé des Châtelliers, M. Marmonier P. Dole-Olivier M. J., E. Castella. 1992. Structure of interstitial assemblages in a regulated channel of the Rhine river (France). Regulated rivers: Research & Management 7, 23-30.

7.1.4. Loire amont (Plaine du Forez – Ecozone)

Allignol F. (1997) Analyse spatiale et aide à la décision pour la recherche de gisements alluvionnaires : application à la Loire supérieure (42). Mémoire de thèse de doctorat, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 224p

Appert F. (1997) La Loire et ses crues dans la Plaine du Forez : rapport. FRAPNA Loire, 48p.

Cesame (1996) Plan de Gestion des milieux naturels Ecopôle / Ecozone du Forez : rapport intermédiaire. FRAPNA Loire, 145p.

Cesame (2003) Plan de gestion, Ecozone/Ecopôle du Forez 2003-2008 : volet milieux naturels et état des lieux. FRAPNA Loire, 130p.

Cfeg (1994) Recherche de matériaux d'emprunt, commune de Chambéon : sablières et entreprises Morillon Corvol, rapport E.178/84. Morillon Corvol, 22p.

Delorme F. (1994) Les changements de la morphodynamique fluviale de la Loire dans la Plaine du Forez entre Montrond-les-Bains et Feurs. Mémoire de DEA, Université Lyon 3, 121p.

Duclos P. (1967) Géologie et minéralisation uranifères de la Plaine tertiaire du Forez. Mémoire de

thèse, Centre à l'Energie Atomique, rapport 3117, Fontenay-aux-Roses, 104p.

Encem (1987) Etude de faisabilité de réaménagement de carrière en secteur scientifique et d'observation pédagogique, commune de Chambéon, département Loire, Rapport T.10.264. Morillon Corvol, 113p.

Encem (1992) Demande d'autorisation d'ouverture de carrière, commune de Chambéon, lieux-dits La Pège et Randan, Rapport 10 42 1698. Morillon Corvol, 175p.

Encem (1998) Dossier de demande d'autorisation de renouvellement et d'extension de carrière, communes de Chambéon, Saint-Laurent la Conche, lieux-dits Les Gravières et Au Moriaud : Etude d'impact, Rapport 10 42 1122. Morillon Corvol, 131p.

Graillot D., Paron F., Déchomets R., Mimoun D., Batton-Hubert M., Re-Bahaud J., Lafont M., Jézéquel C. & Breuil F. (2008) Contribution interdisciplinaire à la gestion équilibrée de la ressource en eau de l'hydro-sociosystème ligérien amont dans un contexte de changement climatique. Rapport de suivi pour l'année 2009. Plan Loire Grandeur Nature 3, FEDER, EPL, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), CEMAGREF Lyon.

Jay M.N. (1985) Aménagement et mise en valeur écologique des gravières des bords de Loire de Chambéon - Magneux-haute-Rive. FRAPNA Loire, 75p.

Le Griel A. (1975) L'évolution morphologique de la Plaine du Forez au Pliocène et au Quaternaire. Mémoire de thèse de 3^{ème} cycle, Laboratoire rhodanien de géomorphologie, 268p.

Le Griel A. (1984) Géologie et relief de la Plaine du Forez, In. Paysages et milieux naturels de la Plaine du Forez. Centre d'Etudes Foréziennes, 139-188.

Michal P. (1992) Rapport géologique sur la réalisation d'une carrière sur la commune de Chambéon. SEMC, Morillon Corvol.

Mimoun D. (2004) Spatialisation de l'information : une aide à l'analyse hydraulique et paysagère développée lors de la réhabilitation de sites post-industriels, cas des réaménagements des gravières en eau en milieu alluvionnaire. Mémoire de thèse de doctorat, Ecole des Mines de Saint-Etienne, <http://www.emse.fr/site/themerecherche/dmimoun.pdf>

Paron F. (2005) Représentations territoriales pour la gestion équilibrée d'un patrimoine écologique et anthropique dans le domaine de l'eau Mémoire de thèse de doctorat, Ecole des Mines de Saint-Etienne, <http://www.agora21.org/entreprise/these7.html>

Sogreah & Aquascope (1996) Etude géomorphologique de la Loire dans le département de la Loire, rapport 30 0325 R5. DDE Loire.

Sogreah (2000) Plan de prévention des risques naturels prévisibles d'inondation : département Loire, fleuve Loire, rapport 55 0538. DDE Loire.

Ulmer A. (1997) Expertise écologique de l'Ecozone du Forez : rapport. FRAPNA Loire, 41p.

7.1.5. Seine (Orgeval)

Constantz, J., 2008. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. Water Resour. Res. 44, 1–20.

Flipo, N., B. Labarthe, F. Saleh, A. Pryet, P. Goblet, P. Viennot, and L. Abasq. 2013. Relations eaux souterraines-réseau hydrographique sur le bassin Seine Normandie : Quantification des flux hydriques. .

ARMINES-MINES ParisTech.

Flipo, N. et Kurtulus, B., 2011: geo-anfis: application to piezometric head interpolation in unconfined aquifer unit. Proceedings of FUZZYSS'11, November 17-18 2011, Ankara, Turkey.

Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Théry, S., Ledoux, E. 2007a. Modeling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sci Total Environ.* 375, 69-79. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.016.

Flipo, N., Jeannée, N., Poulin, M., Even, S., Ledoux, E. 2007b. Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France): combined use of geostatistics and physically-based modelling. *Environmental Pollution.* 146(1), 241-256. doi:10.1016/j.envpol.2006.03.056.

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 - Ecole des Mines de Paris.

Krause, S., Hannah, D. M., Fleckenstein, J. H., Heppell, C. M., Kaeser, D., Pickup, R., Pinay, G., Robertson, A. L., Wood, P. J., 2011. Inter-disciplinary perspectives on processes in the hyporheic zone. *Ecohydrology* 4 (4), 481-499.

Kalbus, E., Schmidt, C., Bayer-Raich, M., Leschik, S., Reinstorf, F., Balcke, G., Schirmer, M., 2007. New methodology to investigate potential contaminant mass fluxes at the stream-aquifer interface by combining integral pumping tests and streambed temperatures. *Environmental Pollution* 148 (3), 808-816.

Kurtulus, B. et Flipo, N., 2011. Hydraulic head interpolation using ANFIS - Model selection and sensitivity analysis. *Computers and Geosciences*, vol. In Press, 2011. doi:10.1016/j.cageo.2011.04.019

Kurtulus, B., Flipo, N., Goblet, P., Vilain, G., Tournebize, J., Tallec, G. (2011). Hydraulic head interpolation in an aquifer unit using ANFIS and Ordinary Kriging. *Studies in Computational Intelligence* 343, 265-276, doi: 10.1007/978-3-642-20206-3_18

Labarthe, B., A. Pryet, F. Saleh, M. Akopian, and N. Flipo. 2014. Distributed simulation of daily stream-aquifer exchanged fluxes in the Seine river basin at regional scale. *in Engineering Geology for society and Territory-Vol 3*. M. Arrattano, M. Rinaldi, O. Giustolisi, J.-C. Marechal, G. Lollino, editor. Springer.

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

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., 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., Tallec, G., Bodet, L., Durand, V., Jost, A., Guérin, R., Ansart, P., 2012a. Stratégie d'échantillonnage des échanges nappe-rivière du bassin agricole de l'orgeval. Tech. rep., PIREN Seine.

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Goblet, P., Bodet, L., Tallec, G., Ansart, P., Jost, A., Durand, V., de Fouquet, C., 2013b. Investigations hydro-géophysiques et premières modélisations thermiques de la

vallée des avenelles à l'interface cours d'eau-nappe. Tech. rep., PIREN Seine.

Mouhri, A., Flipo, N., Vitale, Q., Bodet, L., Ansart, P., Tallec, G., Rejiba, F., 2013c. L'observation long terme en environnement, Exemple du bassin versant de l'Orgeval. Quae.

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Durand, V., Tallec, G., Kurtulus B., de Fouquet, C., Jost, A., Bodet L. 2011 a: Mise en place d'un dispositif expérimental multi échelle pour quantifier les échanges nappe-rivière dans un système aquifère multicouche. 8eme Colloque de GFHN-GEOFCAN, 29 novembre – 1er décembre 2011 – ORLEANS , France.

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Durand, V., Tallec, G., Kurtulus B., de Fouquet, C., Jost, A., Bodet L. 2011 b : Designing a multiscale experimental sampling system for quantification of stream-aquifer water exchanges – the Orgeval basin case study (France). AGU, San Francisco, December 5-9, 2011.

Pryet, A., B. Labarthe, F. Saleh, M. Akopian, and N. Flipo. (n.d.). Quantification of stream-aquifer flow distribution at the regional scale with a distributed process-based model. Water Resources Management. Accepté avec révisions

Schornberg, C., Schmidt, C., Kalbus, E., Fleckenstein, J., 2010. Simulating the effects of geologic heterogeneity and transient boundary conditions on streambed temperatures - implications for temperature-based water flux calculations. *Advances in Water Resources* 33 (11), 1309–1319.

7.2. Métriques hydrologiques

7.2.1. Analyse géomatique

Baillet H., Bornette G., Dechomets R., Graillot D., Marmonier P., Paron F., Piscart C., Rodriguez C., Simon L. & Y. Travi (2010) Évaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Application au fleuve Rhône et à ses aquifères associés. Influence des variations saisonnières sur les échanges. Rapport final phase 3, Action recherche valorisation ZABR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse (UAPV) 157p. + Annexes (74p.).

Rapport + fiche de synthèse en ligne : <http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>

Bornette G., Dechomets R., Dufour M., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillot D., Jezequel C., Lafont M., Marmonier P., Paron F., Piscart C., Puijalon S. & Simon L. (2008) Évaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Application au fleuve Rhône et à ses aquifères associés. Rapport final phase 2, Action recherche valorisation ZABR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), Cemagref (Lyon) 113p. + Annexes (75p.).

Rapport + fiche de synthèse en ligne : <http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>

Bornette G., Dechomets R., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillot D., Lafont M., Paron F. & Puijalon S. (2007) Évaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport final phase 1, Action recherche valorisation ZABR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), Cemagref (Lyon) 167p. + Annexes (154p.).

Ce rapport est accompagné d'une fiche de synthèse de 4P.

Rapport + fiche de synthèse en ligne : <http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>

BRGM (2010) Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE. Rapport final BRGM/RP-57044-FR

De Marsily G. (1981) – Hydrogéologie quantitative. Collection des sciences de la terre, Masson ed.

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

Paran F., Graillot D., Dechomets R., Marmonier P. & Bornette G. (2009) Les relations usages des sols/ressources en eaux souterraines envisagées selon une double perspective dans le cas d'échanges nappes/rivière - Application au fleuve Rhône. Milieux poreux et transferts hydriques, Bulletin du groupe francophone humidimétrie et transfert en milieux poreux, 54, pp. 27-32.

7.2.2. Modèles

Babovic, V., Keijzer, M., 2002. Rainfall runoff modelling based on genetic programming. Nordic hydrology 33 (5), 331–346.

Blavoux, B., 1978. Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris), 333 p.

Blavoux, B., Mudry, J., 1989. Utilisation des isotopes stables en hydrologie. Colloque physicochimie des eaux continentales. In : ORSTOM (Ed.), Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, 4. Montpellier (FRA), 1988/09/14-15. Paris, pp. 279–303

Bricon, C., Cavelier, C., 1961. Prévisions géologiques et programme d'étude géologique du bassin versant expérimental de l'Orgeval (affluent du Grand Morin) en Seine-et-Marne. Tech. rep., BRGM.

Brodie R., Sundaram B., Tottenham R., Hostetler S., Ransley T. (2007) – An overview of tools for assessing groundwater-surface water connectivity. Bureau of Rural Sciences, Canberra, 131 p.

Campinchi, J., Morisseau, M., 1983. Etude bibliographique en vue du renforcement de l'alimentation en eau potable (haute vallée du Grand Morin). Technical report , 83SNG 693 IDF 27 pages, BRGM.

Canipelle, A., 1964. Géologie du bassin versant de l'Orgeval (affluent du Grand Morin-région de Coulommiers S. et M.). thesis, Paris.

Chandesris, A., Mengin, N., Malavoi, J.R., Souchon, Y., Pella, H., Wasson, J.G. (2008) - Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau : principes et méthodes. 64 + annexes.

Chandesris, A., Mengin, N., Malavoi, J.R., Souchon, Y., Wasson, J.G. (2009) - SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH_CE. ATLAS A LARGE ECHELLE V2.0. 58 p

Chatelier M. (2011) - Etude par modélisation hydrodynamique des relations nappes/rivières autour du champ captant de Saint Maxire-Echiré. Phase 1 : adaptation du modèle régional et calage en régime permanent. Rapport BRGM/RP-60308-FR, 69 pages, 38 ill.

Constantz, J. (2008) - Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. Water Resources Research, 44(December), p.1–20.

Cormary, Y., Galea, G., 1972. Modèles déterministes des relations pluies-débits sur le bassin versant de l'Orgeval. Tech. Rep. 53p, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Laboratoire

d'hydrologie.

Cuthbert, M. O., Mackay, R., Durand, V., Aller, M.-F., Greswell, R. B., Rivett, M. O., 2010– Impacts of river bed gas on the hydraulic and thermal dynamics of the hyporheic zone. *Advances in Water Resources*, 33, 1347-13458 doi:10.1016/j.advwatres. 2010.09.014

David, C. H., Habets, F., Maidment, D. R. and Yang, Z.-L.: RAPID applied to the SIM-France model, *Hydrol. Process.*, 25(22), 3412–3425, doi:10.1002/hyp.8070, 2011.

de Marsily, G., 1986. *Groundwater Hydrology for Engineers*. Academic Press, New-York.

Decharme, B., Alkama, R., Douville, H., Becker, M. and Cazenave, A.: Global Evaluation of the ISBA-TRIP Continental Hydrological System. Part II: Uncertainties in River Routing Simulation Related to Flow Velocity and Groundwater Storage, *J. Hydrometeorol.*, 11(3), 601–617, doi:10.1175/2010JHM1212.1, 2010

Decharme, B., Alkama, R., Papa, F., Faroux, S., Douville, H. and Prigent, C.: Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model, *Clim. Dyn.*, 38(7), 1389–1412, doi:10.1007/s00382-011-1054-9, 2012. LUBW: Modélisation hydrodynamique et transport des nitrates. INTERREG III A: MoNit "Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur," Tech Rept Lubw, 2006.

Douez O. (2008) - Le champ captant de Saint Maxire et Echiré. Synthèse des connaissances. Rapport BRGM/RP-56352-FR, 50 p., 36 ill., 1 annexe, 1 carte hors texte.

Douez O., Bichot F., Petit L. (2011) – Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. BRGM/RP-59288-FR, 411 p., 286 ill., 2 ann., 4 planches hors texte.

Ferry, M., 1989. Etude hydrogéologique du bassin d'alimentation de Mélarchez. Tech. rep., Cemagref.

Filiz, 1973. Etude du ruissellement et de l'infiltration sur le bassin versant expérimental de l'orgeval à l'aide de l'oxygène 18. Doctorat, 95 p., Université Paris VI.

Flipo, N., 2005. Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières: Application au bassin du Grand Morin. Doctorat Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives, CIG- Centre d'informatique géologique, ENSMP.

Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Théry, S., Ledoux, E. (2007a). Modeling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sci Total Environ.* 375, 69-79. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.016.

Flipo, N., Jeannée, N., Poulin, M., Even, S., Ledoux, E. (2007b). Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France): combined use of geostatistics and physically-based modelling. *Environmental Pollution*. 146(1), 241-256. doi:10.1016/j.envpol.2006.03.056.

Flipo, N., Poulin, M., Even, S., Ledoux, E. (2005). Hydrological part of CAWAQS (Catchment WATER Quality Simulator) : fitting on a small sedimentary basin. *Proceedings of the SIL 2004, Lahti August 8-14 août 2004*. In *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 29(2), 768-772.

Flipo, N., Rejiba, F., Kurtulus, B., Tournebize, J., Tallec, G., Vilain, G., Garnier, J., Ansart, P., Lotteau, M., 2009. Caractérisation des fonctionnements hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Orgeval. Tech. rep., PIREN Seine.

Flipo, N., Saleh, F., Mouhri, A., Labarthe, B., 2013. État de l'art sur la modélisation des échanges

nappe-rivière. Tech. rep., PIREN Seine.

GEOAQUITAINE (1991) - Forages pour l'eau potable-champ captant de Saint-Maxire-Synthèse hydrogéologique-Tome 1 : Contexte hydrogéologique. 26p, 8 annexes.

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 -Ecole des Mines de Paris

Greswell, R., Ellis, P., Cuthbert, M. O., White, R., Durand, V., 2009– The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. *Journal of Hydrology*, 373 (4), 416-425, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.05.001

Hayashi, M., Rosenberry, D., 2002. Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Ground Water* 40 (3), 309–316.

Krause, S., Hannah, D., Fleckenstein, J., 2009. Hyporheic hydrology : interactions at the groundwater-surface water interface. *Hydrological Processes* 23, 2103–2107.

Kurtulus, B., Flipo, N., 2012. Hydraulic head interpolation using ANFIS -Model selection and sensitivity analysis. *Computers and Geosciences* 38 (1), 43–51.

Kurtulus, B., Flipo, N., Goblet, P., Vilain, G., Tournebize, J., Tallec, G., 2011. Hydraulic head interpolation in an aquifer unit using ANFIS and ordinary kriging. In : *Studies in computational intelligence*. Vol. 343 of 978-3-642-20205-6. Springer, pp. 265–273.

Lautz, Laura K., Kranes, N.T. & Siegel, D.I. (2010). Heat tracing of heterogeneous hyporheic exchange adjacent to in-stream geomorphic features. *Hydrological Processes*, 24, p.3074–3086.

Loke, M., Barker, R., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method1. *Geophysical prospecting* .44 (1), 131–152.

Lorenz, C., Obert, D., 1989. Notice explicative de la feuille de coulommiers à 1/50 000. Tech. Rep. N° ISBN : 2-7159-1185-8, BRGM.

Mégien, C., 1970. Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. Editions BRGM.

Ménillet, F., 1981. Les meulrières du Bassin de Paris et les faciès associés (France). Ph.D. thesis, Université Luis Pasteur de Strasbourg, 536p.

Mondain P.H. (2008) – Expertise des objectifs du projet SDAGE de la ressource en eau sur la bordure nord du Marais Poitevin vendéen, bassin u Lay, de la Vendée et des Autizes, et propositions de principes de gestion. Phase 2 : Expertise du travail produit par le groupe de travail technique de l'inter-SAGE. Rapport CALLIGEE pour le Conseil général de la Vendée N08-85138-B, septembre 2008.

Monteil, C. 2011. Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin-versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Doctorat Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives, ED GRN-MINES ParisTech.

Monteil, C., Flipo, N., Poulin, M., Krimissa, M. (2011). Hybrid fitting of a hydrosystem model: long term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research*, soumis

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

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., de Fouquet, C., Tallec, G., Bodet, L., Durand, V., Jost, A., Guérin, R., Ansart, P., 2012. Stratégie d'échantillonnage des échanges nappe-rivière du bassin agricole de l'orgeval. Tech. rep., PIREN Seine.

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., de Fouquet, F., Bodet, L., Tallec, G., Durand, V., Jost, A., Ansart, P., Goblet, P. (2012). La mesure thermique pour quantifier les échanges nappe-rivière dans l'aquifère multicouche du bassin de l'Orgeval. 50 ans de l'Orgeval & 37èmes journées du GFHN. Paris, November 20-23, 2012. Proceedings of GFHN-GEOFCAN. 6p

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Durand, V., Tallec, G., Kurtulus, B., de Fouquet, C., Jost, A., Bodet, L., 2011. Mise en place d'un dispositif expérimental multi-échelle pour quantifier les échanges nappe-rivière dans un système aquifère multicouche. In : Proceedings of GFHN-GEOFCAN. 6p.

Mouhri, A., Flipo, N., Vitale, Q., Bodet L., Tallec, Ansart, P., G., Rejiba, 2013b. Influence du contexte hydro-géologique sur la connectivité nappe-rivière au niveau de la vallée incisée des Avenelles. Synthèse sur le bassin de l'Orgeval. QUAE.

Paran, F., Dechomets, R., Graillot, D., 2008 --Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale. Géomatique Expert, 64, 7 pages.

Paret, F., 2001. Étude du fonctionnement de petits bassins versants agricoles et forestiers de l'Orgeval. apports des isotopes stables. Mémoire de Master hydrologie, hydrogéologie : Géostatistiques et géochimie, Université de Paris Sud -Laboratoire d'hydrologie et de Géochimie Isotopique d'Orsay, 64p.

Roussel, 1995. Séparation des composantes d'un hydrogramme de crue par l'utilisation de traceurs chimiques et isotopiques sur le sous-bassin amont et à l'exutoire principal du bassin versant de l'Orgeval. Master 2 hydrochimie, hydrologie isotopique, Université Paris 6, 75 pp.

Saleh, F., 2010. Apport de la modélisation hydraulique pour une meilleure simulation des tirants d'eau et des échanges nappe-rivière à l'échelle régionale. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.

Saleh, F., Flipo, N., Habets, F., Ducharne, A., Oudin, L., Viennot, P., Ledoux, E. (2011). Impact of in-stream water level fluctuations on interactions between streams and aquifer units at the regional scale. Journal of Hydrology, 400(3-4), 490-500. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.001

Thierion, C., Longuevergne, L., Habets, F., Ledoux, E., Ackerer, P., Majdalani, S., Leblois, E., Lecluse, S., Martin, E., Queguiner, S. and Viennot, P.: Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem, J. Hydrol., 424-425(0), 68-83, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.028, 2012.

Thierion, C.: Modélisation du fonctionnement de l'aquifère alluvial du fossé rhénan supérieur, vulnérabilité sous l'impact du changement climatique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 27 September. [online] Available from: <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00667218> (Accessed 12 April 2013), 2011.

Thiery D. (1990 a) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

Thiery D. (1990 b) - Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid in Transient state for Hydrodynamic calculations of heads and flows. Release 4.3. Rapport BRGM 4S/EAU n° R 32548.

Thiery D. (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. Revue Hydrogéologie, 1993, n° 4, p. 325-336.

Thiery D. (1994) - Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel

MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38108 DR/HYT 94, 114 p.

Thiéry D. (1995 a) - Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38149 DR/HYT 95, 171 p.

Thiéry D. (2006) - Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0. Rapport final. BRGM/RP 54652-FR, 83 p., 48 fig.

Thiéry D., Golaz C. (2002) - Consideration of vegetation effects in version 6.2 of the MARTHE model. Consequences for water and mass uptake. Rapport BRGM/RP- 51988-FR, 48 p.

Thiéry D., Golaz C., Azaroual M. (2002) - Mise en œuvre et tests d'application du code MARTHE – PHREEQC Version 6.2. Rapport BRGM/RP-51905-FR, 67 p.

Thiry, M., Simon-Coinçon, R., 1996. Tertiary paleoweatherings and silcretes in the southern Paris Basin. CATENA 26, 1–26.

Valette, L., Chandesris, A., Mengin, N., Malavoi, J.R., Souchon, Y., Wasson, J.G. – (2008) - SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH CE. Principes et méthodes de la sectorisation.

Vergnes, J.-P. and Decharme, B.: A simple groundwater scheme in the TRIP river routing model: global off-line evaluation against GRACE terrestrial water storage estimates and observed river discharges, Hydrol Earth Syst Sci, 16(10), 3889–3908, doi:10.5194/hess-16-3889-2012, 2012

Vernoux J.S., 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 final BRGM/RP-57044-FR, 207 p., 91 ill., 1 ann.

7.3. Métriques Biologiques

7.3.1. Invertébrés souterrains

Bou C, Rouch R. 1967. Un nouveau champ de recherches sur la faune aquatique souterraine. CR Acad. Sci. 265, 369–70.

Bou C. 1974. Recherches sur les eaux souterraines –25- Les méthodes de récolte dans les eaux souterraines interstitielles. Ann. Spéléol., 29, 611–9.

Boulton A., Dole-Olivier M.J., Marmonier P., 2003. Optimizing a sampling strategy for assessing hyporheic invertebrate biodiversity using the Bou-Rouch Method: within-site replication and sample volume. Arch. Hydrobiol., 156, 431-456.

Boulton, A.J., Dole-Olivier, M.J., Marmonier P. 2004. Effects of sample volume and taxonomy resolution on assessment of hyporheic assemblage composition sampled using a Bou-Rouch pump. Archiv Hydrobiol.. 159, 327-355.

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, 451-471.

Dole-Olivier, M.J., Marmonier, P. 1992. Ecological requirements of stygofauna in an active channel of the Rhône river. Stygologia, 7, 2, 65-75.

Dole-Olivier, M.J., Marmonier, P. 1992. Patch distribution of interstitial communities: prevailing

factors. *Freshwat. Biol.*, 27, 177-191.

Kibichii, S., Baars, J.R., Kelly-Quinn, M. 2009. Optimising sample volume and replicates using the Bou-Rouch method for the rapid assessment of hyporheic fauna. *Mar. Freshwat. Res.*, 60, 83-96

Marmonier, P., Creuzé des Châtelliers, M., Dole-Olivier, M.J., Plénet, S., Gibert, J. 2000. Rhône groundwater systems. In *Ecosystems of the world*, vol 30. Subterranean ecosystems. H. Wilkens, D.C. Culver & W.F. Humphreys Eds, Elsevier Publ., 513-531.

7.3.2. Végétation aquatique

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

Baillet H. (2009) - Evaluation des échanges entre eau de surface et eau souterraine par les indicateurs végétaux : origine des aquifères, évaluation semi-quantitative des échanges, vulnérabilité des écosystèmes – Mémoire SSE Géographie-Environnement-Tourisme, Université Lumière Lyon 2, UMR 5023.

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.

Britto, D.T., Siddiqi, M.Y., Glass, A.D.M., et Kronzucker, H.J. (2001) - Futile transmembrane NH₄⁺ cycling: a cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 4255-4258.

Carbiener R. 1982 : Brunnwasser. *Encyclopédie d'Alsace*, vol. 1 : 891-900

Carbiener R. 1988 : Les associations végétales, biorévélatrices des échanges hydrologiques eaux de surface-eaux souterraines. In : Kobus, H.R. Et Zilliox, L.(eds), *Nitratbelastung des Grundwassers. Mitteilungen Inst.f. Wasserbau, Stuttgart, Heft 71* : , pp. 171-200

Onaindia, M., de Bikuna, B.G., et Benito, I. (1996) - Aquatic Plants in Relation to Environmental, Factors in Northern Spain. *Journal of Environmental Management*, 47, 123-137.

Rivoire E. et Bornette G., 2006. Mise à jour des profils écologiques des espèces végétales aquatiques utilisées pour la méthode de diagnostic fonctionnel des zones humides périfluviales. Non publié

8. Liste des figures et tableaux

8.1. Liste des figures

Figure 1 : Système de réseau de rivière connecté à la grille (à gauche)	14
Figure 2 : Géométrie d'un tronçon de rivière (à droite)	14
Figure 3 : Bilan des débits dans un tronçon de rivière.....	15
Figure 4 : Différentes configurations d'échanges nappe -rivière.....	16
Figure 5 : Extension et raffinement spatial du modèle hydrodynamique	18
Figure 6 : Station de MONitoring LOCAL des échanges NAppe-Rivière (MOLONARI) sur la base de mesures hydro- géophysiques (température, pression). D'après Mouhri et al. (2013)	20
Figure 7 : Extension du domaine modélisé sur le bassin du Rhin Supérieur	22
Figure 8 : Extension du maillage du modèle MODCOU du bassin du Rhin Supérieur	23
Figure 9 : Découpage administratif de l'aménagement de Donzère-Mondragon (source BDCarthage).....	27
Figure 10 : Géologie du secteur de Donzère-Mondragon (Jacob, 1955)	30
Figure 11 : Réseau hydrographique et vallées sèches	33
Figure 12 : Caractérisation des années climatiques à partir de la station météorologique de Niort	34
Figure 13 : Obstacles à l'écoulement recensés auprès de l'ONEMA	35
Figure 14 : Contexte géologique, hydrographique et anthropique autour du méandre de la Sèvre-Niortaise à Saint- Maxire.....	36
Figure 15 : Concentrations en nitrates mesurées dans les eaux de la Sèvre-Niortaise et de l'Egray (2000-2009).....	37
Figure 16 : Concentrations en nitrates mesurées dans la nappe du Dogger.....	37
Figure 17 : Localisation des forages du champ captant de Saint-Maxire-Échiré	38
Figure 18 (à gauche) : Contexte géologique du bassin (d'après Rotstein et al., 2006).....	39
Figure 19 (à droite) : Contexte topographie du bassin.....	39
Figure 20 : Situation géographique de l'Écozone du Forez (en vert).....	41
Figure 21 : Carte géologique du site d'étude [D'après la carte géologique de la France au 1/50 000 - Feuille de Montbrison, d'après Mimoun (2004). Les deux traits rouges localisent les coupes géologiques et géomorphologiques interprétatives de la plaine du Forez. La légende de la carte est donnée Figure 22].....	44
Figure 22 : Coupes géologiques et géomorphologiques interprétatives du secteur d'étude. D'après Le Griel (1975) modifié d'après Mimoun (2004).....	44
Figure 23 : Situation géographique.....	46
Figure 24 : Dispositif expérimental (MOLONARI) multi-échelle imbriqué dans le réseau de mesure ORACLE du bassin de l'Orgeval (extrait de Mouhri et al., 2013a)	47
Figure 25 : Carte géologique du bassin de l'Orgeval	48
Figure 26 : Relations nappe/fleuve pour un régime de hautes-eaux en condition d'écoulement naturel (résultats obtenus par un calage en régime permanent du modèle hydrodynamique local)	52
Figure 27 : Localisation des forages du champ captant de Saint-Maxire-Echiré	53
Figure 28 : Localisation des piézomètres et des stations de débit utilisés pour le calage en régime transitoire.....	54
Figure 29 : Caractérisation des années climatiques à partir des données MétéoFrance de la station de Niort. En abscisse, la hauteur de pluie tombée sur les mois de juin/juillet/août/septembre. En ordonnée, la hauteur de pluie efficace entre le mois de septembre de l'année précédente et le mois de mai de l'année considérée. ...	55
Figure 30 : Ecart de hauteur d'eau du fleuve entre l'année 3 et l'année 2 du projet NAPROM.....	58
Figure 31 : Distribution des écarts entre cote piézométrique observée et cote piézométrique simulée entre juin 2005 et décembre 2007 : a) tous ouvrages confondus, b) en excluant F18 et F28. Les écarts sont exprimés en mètre et sont calculés entre la valeur ponctuelle mesurée un mois donné et la valeur mensuelle simulée. ...	59

Figure 32 : Répartition des débits simulés dans le méandre et rapportés au mètre linéaire de fleuve – Hautes-Eaux. En négatif, les débits d'échange de la nappe vers le fleuve et en positif les débits d'échange du fleuve vers la nappe.	64
Figure 33 : Répartition des débits simulés dans le méandre et rapportés au mètre linéaire de fleuve – Basses-Eaux. En négatif, les débits d'échange de la nappe vers le fleuve et en positif les débits d'échange du fleuve vers la nappe.	64
Figure 34 : Année 2006 - Débits d'échange simulés par tronçon en 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.	66
Figure 35 : Année 2001 - Débits d'échange simulés par tronçon en 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.	67
Figure 36 : Année 2005 - Débits d'échange simulés par tronçon en 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.	68
Figure 37 : Variabilité temporelle des flux d'échanges simulés en différents points de méandre de Saint-Maxire entre 2000 et 2007 (pour l'échelle de couleurs, se référer aux points sur la carte).	69
Figure 38 : Linéaire de la Sèvre-Niortaise affecté par une inversion du sens des échanges nappe/rivière entre la paramétrisation de l'année 3 et celle de l'année 2, a) en hautes-eaux 2006, b) en basses-eaux 2006.	71
Figure 39 : Rapports des débits simulés entre l'année 3 et l'année 2. Année 2006, a) hautes-eaux, b) basses-eaux. Le rapport fait intervenir des valeurs absolues de débit.	72
Figure 40 : Localisation des stations de relevé macrophytes (carrés rouges) et de mesures de la chimie de l'eau (disques bleus).....	74
Figure 41 : Peuplements de macrophytes recensés dans le méandre de Saint-Maxire/Echiré : de a) Callitriche platycarpa (premier plan) et Berula erecta (arrière-plan), b) Mentha aquatica, c) Nasturtium officinale, d) Lemna minor (amont du méandre), e) Nuphar lutea.	75
Figure 42 : Niveau de d'eutrophisation du milieu aquatique déterminée sur la Sèvre-Niortaise et l'Egray en fonction de l'exigence des macrophytes composant le peuplement aquatique	78
Figure 43 : Intensité des apports d'eaux souterraines (ESO) diagnostiqué à l'aide des espèces végétale	79
Figure 44 : Probabilité des apports de nappe diagnostiquée par la méthode des macrophytes le long du méandre de la Sèvre-Niortaise	79
Figure 45 : Température des eaux superficielles dans le méandre de Saint-Maxire-Echiré.....	80
Figure 46 : Conductivité électrique des eaux superficielles dans le méandre de Saint-Maxire-Echiré	80
Figure 47 : pH des eaux superficielles sans le méandre de Saint-Maxire-Echiré.....	81
Figure 48 : Report des caractères physico-chimiques en fonction de l'indice de trophie	83
Figure 49 : Report des caractères physico-chimiques en fonction de l'indice d'intensité d'apport.....	83
Figure 50 : Report des caractères physico-chimiques en fonction de l'indice de probabilité d'apport en eau souterraine	83
Figure 51 : Caractérisation des échanges nappe/Sèvre-Niortaise par analyse SIG (données issues du modèles MARTHE)	85
Figure 52 : Caractérisation des échanges nappe/Sèvre-Niortaise par analyse SIG (données dégradées).....	86
Figure 53 : Carte de superposition des métriques.....	88
Figure 54 : Comparaison des débits Marthe vs analyse SIG	92
Figure 55 : Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère-Mondragon et pour la confluence Rhône/Ardèche	95
Figure 56 : Exemple de courbe de tarage sur l'Il (à gauche) et sur la Sauer (à droite). Les droites rouges correspondent aux hauteurs fixes de la simulation CTL, les vertes aux hauteurs de référence des données de la BDHydro (zéro de l'échelle limnimétrique).....	97
Figure 57 : Moyenne des échanges d'eau entre la surface et l'aquifère pour (à gauche) la simulation avec hauteur fixe (CTL) et (à droite) la simulation avec hauteur variable (MAN). Les couleurs rouges et oranges désignent les secteurs où la rivière alimente la nappe, le violet les secteurs où la rivière draine la nappe et le bleu les secteurs sans échanges diagnostiqués	98

Figure 58 : Profil des échanges nappe/rivière simulées sur l'Ille entre Mulhouse (amont, à gauche sur le graphique) et Strasbourg (aval, à droite) pour le mois de juillet 1991. L'enveloppe grise correspond aux maximum et minimum des échanges pour tous les mois de juillet de 1986 à 2003	99
Figure 59 : Séries temporelles des variations de hauteurs de rivière observées et simulées par CTL et MAN pour trois exemples de stations de mesure. Les cycles annuels moyens journaliers sont également représentés	100
Figure 60 : Comparaison entre les hauteurs de nappe observées et simulées sur la période 1985-2003 aux 190 piézomètres. (a) Les biais pour la simulation de référence CTL et (b) les différences entre MAN et CTL (en valeurs absolues) sont représentées	101
Figure 61 : Comparaison entre les hauteurs de rivière observées et simulées sur la période 1985-2003 aux 31 stations de mesure issues de la BDHydro. (a) Les biais pour la simulation de référence CTL et (b) les différences entre MAN et CTL (en valeurs absolues) sont représentées	101
Figure 62 : Zoom sur le niveau d'eau en rivière sur un tronçon de l'Ille. Il s'agit là d'un exemple pour illustrer le bruit du signal du MNT	102
Figure 63 : Profil des échanges nappe/rivière le long de l'Ille pour le mois de juillet 1991 et pour les simulations CTL, CST et VAR	103
Figure 64 : Séries temporelles de hauteurs d'eau en rivière observées (noir) et simulées. CTL est en rouge, CST en bleu et VAR en vert	103
Figure 65 : Estimation du niveau d'eutrophisation de la plaine d'Alsace	105
Figure 66 : Estimation de l'intensité des apports d'eau souterraine de la plaine d'Alsace	106
Figure 67 : Estimation de la probabilité d'apports de la nappe de versant de la plaine d'Alsace	107
Figure 68 : Synthèse de la métrique végétation aquatique de la plaine d'Alsace	108
Figure 69 : Répartition des stations d'invertébrés sur la plaine alluviale du Rhin	109
Figure 70 : Indice pondéré des espèces stygobies sur la plaine alluviale du Rhin	111
Figure 71 : Conductivité interstitielle des stations	113
Figure 72 : Concentration interstitielle en nitrates	113
Figure 73 : Concentration interstitielle en chlorures	114
Figure 74 : Bilan des échanges nappe-rivières sur la plaine alluviale du Rhin pour la métrique invertébrés	115
Figure 75 : Superposition des métriques : Ille amont	122
Figure 76 : Superposition des métriques : Ille centre	123
Figure 77 : Superposition des métriques : Ille aval	124
Figure 78 : Echanges nappe/Loire pour une piézométrie basses-eaux	126
Figure 79 : Echanges nappe/Loire pour une piézométrie hautes-eaux	127
Figure 80 : Détermination de la connectivité nappe-rivière par les Profils 2-D des Tomographies de résistivité électrique (ERT). A) Echelle intermédiaire : Profils transverses (en haut) et longitudinaux (en bas) avec un espacement de 4 m entre les électrodes (en haut et 1-RB, LB-4 dans le fond) ou un espacement de 0,5 m entre les électrodes (5 LB, LB-6 et 4-RB dans le fond). B). Echelle de la ZH: Profils longitudinaux des ERT avec un espacement des électrodes de 0,25m (sauf 1-A, qui est une vue en coupe transversale). RB: rive droite, LB: rive gauche. C) interprétation de la stratigraphie par carottage (Mouhri et al., 2013)	129
Figure 81 : Schéma conceptuel d'une station de MONitoring LOCAL des échanges NAPpe-Rivière (MOLONARI)	130
Figure 82 : Variabilité spatio-temporelle du niveau d'eau "relatif" entre la rivière et la nappe (piézométrie en noire et rivière en rouge) : La rivière est en contact avec la nappe de Brie en 1 et 2, avec les argiles vertes en 3, avec les marnes supra-gypseuses en 4, et avec l'aquifère du Champigny en 5; A) pluie horaire à la station de Boissy-Le-Châtel	130
Figure 83 : Étapes de paramétrisation et de calibration des modèles hydro-thermiques 1D et 2D (Mouhri et al. 2014a,b)	131
Figure 84 : Exemple de maillage du modèle hydro-thermique 2D vertical à 3 couches. Station MOLONARI 1.	133
Figure 85 : Résultats des simulations des flux échangés par section de rivière. Exfiltrations en rouge, Infiltration en bleu (Mouhri et al. 2014a,b)	135

Figure 86 : 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).....	136
Figure 87 : Bilan des échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin des Avenelles, obtenu par extrapolation des estimations du modèle hydro-thermique couplé (METIS) (Mouhri et al. 2014a,b)	137
Figure 88 : Comparaison de flux moyens échangé issus du modèle Eau-Dyssée (à gauche) et du modèle METIS extrapolé à l'échelle des biefs du bassin des Avenelles (à droite).....	138
Figure 89 : Répartition des stations d'invertébrés sur l'Orgeval	139
Figure 90 : Indice pondéré des espèces stygobies sur l'Orgeval.....	140
Figure 91 : Température interstitielle des stations	141
Figure 92 : Conductivité interstitielle des stations	142
Figure 93 : Oxygène dissous interstitiel des stations.....	142
Figure 94 : Bilan des échanges nappe-rivières sur l'Orgeval pour la métrique invertébrés	143
Figure 95 : Spatialisation des échanges nappes/rivières sur la Yaiche et l'Orgeval.....	145
Figure 96 : Différentes situations d'échanges nappes/rivières envisagées par le modèle MARTHE	163
Figure 97 : Apport de la nappe à la rivière.....	169
Figure 98 : Apport de la rivière à la nappe.....	170
Figure 99 : Pas d'échange diagnostiqué (observable, détecté) entre la nappe et la rivière.....	171
Figure 100 : Colmatage physique ou biologique entre la nappe et la rivière	172
Figure 101 : Sous-écoulement d'eau superficielle via le milieu souterrain (digue, nappe) vers la rivière ou un canal..	173
Figure 102 : Recyclage d'eau superficielle dans le cours d'eau par exfiltration/infiltration	174
Figure 103 : Cas particuliers : incision du lit de la rivière.....	174

8.2. Liste des tableaux

Tableau 1 : Les indices de la méthode de Braun-Blanquet (1932)	11
Tableau 2 : Exemple de calcul de l'indice de trophie sur la Sèvre-Niortaise pour la station n°11 (ruisseau de la Maillée). Cette station est mésotrophe à eutrophe	11
Tableau 3 : Calcul de l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques pour la Sèvre-Niortaise au niveau de la station n°11-Ruisseau de la Maillé.....	12
Tableau 4 : Codage des indices de trophie et d'apport phréatique	12
Tableau 5 : Calcul du niveau relatif de perturbations et du processus ou non d'alluvionnement sur un site situé sur le secteur de Donzère-Mondragon (L'indice nous indique que cette station est soumise à de forte perturbation par les crues).....	13
Tableau 6 : Paramètres du réseau hydrographique implémentés dans le modèle sur le secteur du gigogne.....	19
Tableau 7 : Débit du Rhône sur le secteur de Donzère-Mondragon (CNRa, 1999 ; CNRb, 1999 ; Sogreah, 1999).....	29
Tableau 8 : Débits caractéristiques de la Sèvre-Niortaise à la station de Château Salbart. Le bassin versant de la Sèvre-Niortaise est ici de 565 km ²	34
Tableau 9 : Données de base d'ORACLE pour les 2 Morin qui incluent l'Orgeval	48
Tableau 10 : Etat des connaissances concernant les paramètres du réseau hydrographique	57
Tableau 11 : Cotes de ligne établies mensuellement lors du calage en régime transitoire	58
Tableau 12 : Chroniques piézométriques observées/simulées : secteur de l'Aleigne.....	60
Tableau 13 : Chroniques piézométriques observées/simulées : Secteur de la Grande Prairie	61
Tableau 14 : Chroniques piézométriques observées/simulées : Secteur de la Grande Prairie et de Beaulieu	62
Tableau 15 : Chroniques piézométriques observées/simulées : Secteur du Pont.....	62
Tableau 16 : Gammas de valeur attribuées aux paramètres de calage sur le gigogne	63
Tableau 17 : 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.....	64
Tableau 18 : Indice de Braun-Blanquet (1932)	74

Tableau 19 : Table des exigences des espèces végétales (Baillet, 2009).....	77
Tableau 20 : Paramètre physico-chimiques moyens caractéristiques de la nappe du Dogger (données du forage 06104X0008/P intégrées sur 16 ans, source ADES).....	81
Tableau 21 : Synthèse croisée des échanges nappe/Sèvre-Niortaise.....	89
Tableau 22 : Calcul du débit d'échange (Q) par analyse SIG selon différentes hypothèses sur la surface d'échange (A) et la perméabilité (K) des alluvions.....	90
Tableau 23 : Comparaison des débits Marthe vs analyse SIG	91
Tableau 24 : Code couleur utilisé pour la topologie des métriques et dans le tableau de comparaison des métriques (les tons gris blanc ne sont utilisés que dans les tableaux car ils codent respectivement une métrique non-utilisée et l'absence de données).	92
Tableau 25 : Indice de pénalité et/ou pondération pour les sens des échanges	93
Tableau 26 : Croisement des métriques pour la rive gauche du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	94
Tableau 27 : Distribution des espèces stygobies dans les différents types de stations	110
Tableau 28 : Tableau de la physico-chimie des eaux de surface et interstitielles de la plaine alluviale du Rhin	114
Tableau 29 : Synthèse croisée des métriques sur l'Il 121	121
Tableau 30 : Bilan quantitatif des échanges nappe/Loire en basses-eaux de nappe sur le secteur de l'Écozone du Forez	128
Tableau 31 : Bilan quantitatif des échanges nappe/Loire en hautes-eaux de nappe sur le secteur de l'Écozone du Forez	128
Tableau 32 : Paramétrisation des modèles 1D pour l'estimation des perméabilités de la ZH et les RMSE totales des simulations.....	132
Tableau 33 : Géométrie et paramétrisation des modèles 2 D.....	134
Tableau 34 : Critères statistiques des simulations METIS en °C. rho : coefficient de corrélation.	135
Tableau 35 : Tableau de la physico-chimie des eaux de surface et interstitielles de l'Orgeval.....	141
Tableau 36 : Croisement des métriques sur les Avenelles	147
Tableau 37 : Croisement des métriques sur la Yaiche	147
Tableau 38 : Typologie des métriques – code couleur	167
Tableau 39 : Grille synthétique - métriques mobilisées par site	175
Tableau 40 : Grille synthétique - caractérisation et description des métriques (éléments fondamentaux)	176
Tableau 41 : Grille synthétique - caractérisation et description des métriques (échanges)	177
Tableau 42 : Grille synthétique - configuration d'échanges prises en compte par les métriques.....	178
Tableau 43 : Grille synthétique - points forts et points faibles des métriques.....	178
Tableau 44 : Incertitudes par métriques sur le diagnostic des échanges nappe/rivière : exemples.....	179

9. Table des matières complète

<i>Fiche signalétique du document</i>	I
<i>Liste des acronymes</i>	III
<i>Les auteurs</i>	V
<i>Les correspondants</i>	VII
<i>Table des matières synthétique</i>	IX
<i>Résumé</i>	XI
<i>Abstract</i>	XII
<i>Synthèse pour l'opérationnel du projet NAPROM (2011-2014)</i>	XIII
1. Introduction	1
1.1. Contexte et objectifs.....	1
1.2. Description du projet recherche	2
1.2.1. Année 1 - Tâches 2011/2012 (A1 à I1).....	2
1.2.2. Année 2 - Tâches 2012/2013 (T1 à T7).....	2
1.2.3. Année 3 - Tâches 2013/2014 (T8 à T14).....	3
1.3. Structuration du rapport	3
2. Approche multi-métrique : méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières	5
2.1. Analyse géométrique SIG de caractérisation des échanges nappes (alluviales)/rivières [ENSM-SE]	5
2.1.1. Fondements de la méthode.....	5
2.1.2. Données hydrogéologiques et spatialisation des échanges nappes/rivière	6
2.1.2.1. La rive : détermination de son orientation par analyse spatiale	6
2.1.2.2. L'aquifère : calcul du flux et évaluation des débits	6
2.1.2.3. Echange nappe/rivière : détermination du sens et représentation.....	7
2.1.3. Préparation des données pour traitement SIG	7
2.1.4. Bilan.....	7
2.2. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques [UMR 5023].....	8
2.2.1. Utilisation des espèces stygobies pour caractériser la direction et l'intensité des échanges	8
2.2.2. Recherche d'espèces caractéristiques des différents aquifères	9
2.2.3. Matériel et méthodes : Pompages dans la zone hyporhéique.....	9
2.3. Principes de la méthode de diagnostic des échanges nappes/rivière à l'aide des macrophytes [UMR 5023]	10
2.3.1. Principe général	10
2.3.2. Campagne de terrain.....	10
2.3.3. Méthode de calcul des indices d'état trophique	11
2.3.4. Méthode de calcul de l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques	12

2.3.5. Indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant	12
2.3.6. Calcul du niveau relatif de perturbations par les crues	13
2.4. Modèle hydrodynamique du champ captant de Saint-Maxire/Échiré sur le bassin de la Sèvre-Niortaise [BRGM]	14
2.4.1. Le logiciel MARTHE utilisé pour la modélisation	14
2.4.1.1. Bilan des débits dans un tronçon de rivière	15
2.4.1.2. Interactions entre rivière et aquifère	16
2.4.1. Application de MARTHE au champ captant de Saint-Maxire/Echiré	17
2.5. Géophysique, Métrique MOLONARI et Modèle METIS sur le bassin de l'Orgeval [Mines ParisTech + Sisyphe Geophy + Irstea]	19
2.5.1. Géophysique	19
2.5.2. Métrique pression-température des Avenelles (Métrique MOLONARI)	20
2.5.3. Modélisation des flux d'eau et du transfert thermique dans la zone hyporhéique ...	21
2.6. Modélisation hydrogéologique couplée surface-souterrain avec la plate-forme Eau-Dyssée sur le bassin du Rhin supérieur [Sisyphe Hydro]	21
2.6.1. Description générale du modèle	21
2.6.2. Prise en compte des échanges nappes/rivières	24
3. Approche multi-site : présentations des cinq sites sélectionnés	27
3.1. Rhône aval (Donzère-Mondragon) [ENSM-SE + UMR 5023]	27
3.1.1. Localisation géographique	27
3.1.2. Aménagements CNR du secteur de Donzère-Mondragon	28
3.1.3. Un climat méditerranéen soumis aux épisodes cévenols	28
3.1.4. Débits du Rhône	29
3.1.5. Géologie	29
3.1.6. Hydrogéologie : la nappe alluviale de la plaine du Tricastin	31
3.1.7. Point sur les invertébrés	32
3.2. Sèvre-Niortaise (Champ captant de Saint-Maxire/Échiré) [BRGM]	32
3.2.1. Situation géographique	33
3.2.2. Climatologie	34
3.2.3. Débits de la Sèvre-Niortaise	34
3.2.4. Contexte hydrogéologique	35
3.3. Rhin supérieur (Plaine de l'Ill) [Sisyphe Hydro + UMR 5023]	38
3.3.1. Contexte géographique et géologique	38
3.3.2. Climatologie	38
3.3.3. Hydrologie	38
3.3.4. Faune aquatique souterraine (stygie) de la vallée du Rhin en Alsace: État des connaissances	40
3.4. Loire amont (Plaine du Forez – Écozone) [ENSM-SE + UMR 5023]	40
3.4.1. Situation géographique	40
3.4.2. Description générale (Cesame, 1996 & 2003 ; Ulmer, 1997 ; Mimoun, 2004)	42
3.4.3. Cadre géologique	42
3.4.4. Cadre géomorphologique	43
3.4.5. La nappe alluviale et l'aquifère	43
3.4.6. Cadre hydrographique et hydrologique	45

3.5. Seine (Orgeval) [Mines ParisTech + Sisyphé Geophy + Irstea]	45
3.5.1. Problématique des échanges nappes/rivières	45
3.5.2. L'Orgeval : Situation géographique et climat	46
3.5.3. L'Orgeval : un contexte géomorphologique représentatif de la zone centrale du bassin de la Seine	46
3.5.4. Les données disponibles	48
3.6. Détenteurs de données et de modèles sur les sites sélectionnés	49
3.6.1. Rhône aval : Donzère-Mondragon	49
3.6.2. Sèvre-Niortaise	50
3.6.3. Rhin supérieur	50
3.6.3.1. Hydrométrie	50
3.6.3.2. Invertébrés souterrains	51
3.6.4. Loire amont	51
3.6.5. Seine (Orgeval)	51

4. Résultats – premiers diagnostics des échanges nappes/rivières..... 52

4.1. Sèvre-Niortaise – Champ captant de Saint-Maxire/Echiré	52
4.1.1. Modèle hydrologique/hydrogéologique MARTHE	52
4.1.1.1. Etat des connaissances sur les relations nappes/rivières dans le méandre	52
4.1.1.2. Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire	53
4.1.1.2.1. Rappels	54
4.1.1.2.2. Période de simulation et paramètres de validation	54
4.1.1.2.3. caractéristiques climatiques des années simulées	54
4.1.1.2.4. Conditions limites	55
4.1.1.2.5. Paramètres d'entrée	55
4.1.1.2.6. Appréciation du calage	58
4.1.1.2.7. Résultats du calage	63
4.1.1.3. Comparaison des résultats de simulation en imposant un débit ou une hauteur d'eau dans la rivière	69
4.1.1.3.1. Comparaison des sens d'échange entre nappe et fleuve	70
4.1.1.3.2. Variation des flux d'échange	70
4.1.1.4. Conclusion	73
4.1.2. Macrophytes et physico-chimie	73
4.1.2.1. Campagne de terrain	73
4.1.2.2. Indicateurs biologiques : les macrophytes	75
4.1.2.3. Mesures physico-chimiques in situ	80
4.1.3. Comparaison des résultats des métriques biologique et physico-chimique	81
4.1.4. Analyse géomatique	84
4.1.4.1. Méthodologie choisie et données d'entrée	84
4.1.4.2. Première caractérisation des échanges nappe/rivière	84
4.1.4.2.1. A partir des données issues du modèle MARTHE	84
4.1.4.2.2. A partir des données dégradées	85
4.1.5. Synthèse	87
4.1.5.1. Modèle MARTHE	87
4.1.5.2. Macrophytes et physico-chimie des eaux superficielles	87
4.1.5.3. Analyse géomatique	88

4.1.5.4. Première synthèse croisée	88
4.2. Rhône – Donzère-Mondragon / Plaine du Tricastin	92
4.2.1. Typologie des échanges nappes/rivières.....	92
4.2.2. Comparaison des métriques.....	93
4.2.1. Diagnostic de synthèse des échanges nappes/rivière	93
4.3. Rhin – Plaine de l'Ill.....	96
4.3.1. Expériences réalisées avec la plateforme Eau-Dyssée	96
4.3.1.1.1. Paramètres de l'équation de Manning (simulation MAN)	96
4.3.1.1.2. Hauteur moyenne d'eau et courbe de tarage.....	97
4.3.1.1.3. Données d'observation utilisées pour l'évaluation du modèle.....	98
4.3.1.1.4. Résultats.....	98
4.3.2. Macrophytes	103
4.3.2.1. Campagne de terrain.....	103
4.3.2.2. Résultats.....	104
4.3.2.2.1. Trophie	104
4.3.2.2.2. Apports d'eau souterraine (alluviale ou phréatique).....	104
4.3.2.2.1. Probabilité d'apports de nappe phréatique	104
4.3.2.2.1. Interprétation.....	109
4.3.3. Invertébrés souterrains.....	109
4.3.3.1. Stations échantillonnées.....	109
4.3.3.2. Analyse et diagnostic des échanges à partir des invertébrés	110
4.3.3.3. Analyse et interprétation des caractéristiques physico-chimiques.....	112
4.3.3.4. Conclusions	115
4.3.4. Analyse géomatique des échanges nappe/rivières sur l'Ill.....	116
4.3.4.1. Données d'entrée	116
4.3.4.2. Caractérisation des échanges nappe/rivière	116
4.3.5. Synthèse	117
4.3.5.1. Plateforme Eau-Dyssée.....	117
4.3.5.2. Macrophytes	117
4.3.5.3. Invertébrés souterrains.....	118
4.3.5.4. Analyse géomatique	118
4.3.5.5. Synthèse.....	118
4.4. Loire amont – Plaine du Forez	125
4.5. Orgeval	128
4.5.1. Métriques géophysiques, MOLONARI et METIS.....	128
4.5.1.1. Métrique géophysique : Connectivité nappe-rivière	128
4.5.1.2. Métrique MOLONARI (MONitoring LOcal des échanges NAppe-RIVière).....	129
4.5.1.3. Modélisation hydro-thermique des échanges : métrique METIS	131
4.5.1.3.1. Modélisation des flux hydro-thermiques à l'interface nappe-rivière	131
4.5.1.3.2. Pré-calibration des paramètres hydrodynamiques et thermiques de la zone hyporhéique.....	132
4.5.1.3.3. Modélisation 2-D des flux hydro-thermiques au niveau des stations MOLONARI	133
4.5.1.4. Estimations des flux échangés à l'échelle des tronçons de rivière	136
4.5.1.5. Bilan des échanges de flux à l'échelle du bassin des Avenelles	137
4.5.1.6. Premières estimations de flux avec la plateforme Eau-Dyssée	137

4.5.1.7. Conclusion	138
4.5.2. Invertébrés souterrains.....	139
4.5.2.1. Stations échantillonnées.....	139
4.5.2.2. Analyse et diagnostic des échanges à partir des invertébrés	139
4.5.2.3. Analyse et interprétation des caractéristiques physico-chimiques.....	140
4.5.2.4. Conclusions	143
4.5.3. Analyse géomatique.....	144
4.5.3.1. Données d'entrée	144
4.5.3.2. Caractérisation des échanges nappe/rivière	144
4.5.4. Synthèse	146
4.5.4.1. Géophysique, MOLONARI, METIS	146
4.5.4.2. Invertébrés souterrains	146
4.5.4.3. Analyse géomatique	146
4.5.4.4. Synthèse.....	147
5. Eléments pour l'élaboration du guide méthodologique.....	149
5.1. Approche multi-critère : grille de caractérisation des sites et mise au point d'un corpus de métadonnées.....	149
5.2. Préfiguration d'un glossaire thématique sur les échanges nappes/rivières.....	150
5.3. Approches multi-métrique : fiches synthétiques de chaque métrique	158
5.3.1. Analyse géométrique SIG	158
5.3.2. Macrophytes	159
5.3.3. Invertébrés souterrains.....	161
5.3.4. Modèle hydrodynamique MARTHE	162
5.3.5. Modèle de l'Orgeval (approche multi-échelle et pluridisciplinaire).....	164
5.3.6. Modèle hydrogéologique Eau-Dyssée.....	165
5.4. Protocole de comparaison des métriques	166
5.4.1. Typologie des configurations d'échange.....	167
5.4.2. Grilles de comparaison des métriques	175
5.4.3. Protocole de comparaison des métriques.....	179
6. Conclusion et perspectives	181
6.1. Synthèse du projet	181
6.1.1. Diagnostics des échanges nappes/rivières sur tous les sites	181
6.1.2. Protocole de comparaison des métriques.....	181
6.1.2.1. Typologie des échanges nappes/rivières	181
6.1.2.2. Caractérisation fine de chacune des métriques	182
6.1.2.3. Protocole de comparaison des métriques	182
6.2. Perspectives : construction et test du guide technique	182
7. Références bibliographiques	183
7.1. Par Site	183
7.1.1. Rhône aval (Donzère Mondragon)	183
7.1.1.1. Hydrométrie	183
7.1.1.2. Invertébrés.....	183
7.1.2. Sèvre-niortaise (Champ captant de Saint-Maxire-Echiré).....	184
7.1.3. Rhin supérieur (Plaine de l'Il).....	186

7.1.3.1. Hydrométrie	186
7.1.3.2. Invertébrés	187
7.1.4. Loire amont (Plaine du Forez – Ecozone)	187
7.1.5. Seine (Orgeval)	188
7.2. Métriques hydrologiques	190
7.2.1. Analyse géomatique	190
7.2.2. Modèles	191
7.3. Métriques Biologiques	195
7.3.1. Invertébrés souterrains	195
7.3.2. Végétation aquatique	196
8. Liste des figures et tableaux	197
8.1. Liste des figures	197
8.2. Liste des tableaux	200
9. Table des matières complète	203
10. Sommaire des annexes	209

10. Sommaire des annexes

A1 : Résumé des tâches

A2 : Grilles de caractérisation de chaque site complétées

A3 : Comptes-rendus de réunions et visites de terrain

A4 : Fiches action

A5 : Valorisation scientifique

A6 : Présentations des partenaires, des compétences mobilisées et de leurs contributions

Onema

Hall C – Le Nadar
5 Square Félix Nadar
94 300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.onema.fr

Armines

60, Boulevard Saint-Michel
75 272 PARIS Cedex 06

01 40 51 90 50

www.armines.net

NAPROM (NAPpes-Rivières : Observation et Modélisation) - D. Graillot, F. Paran, E. Lalot, F. Dujardin, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, M. Novel, F. Arthaud, N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin, G. Tallec, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis, B. Augeard