

***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. 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 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

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

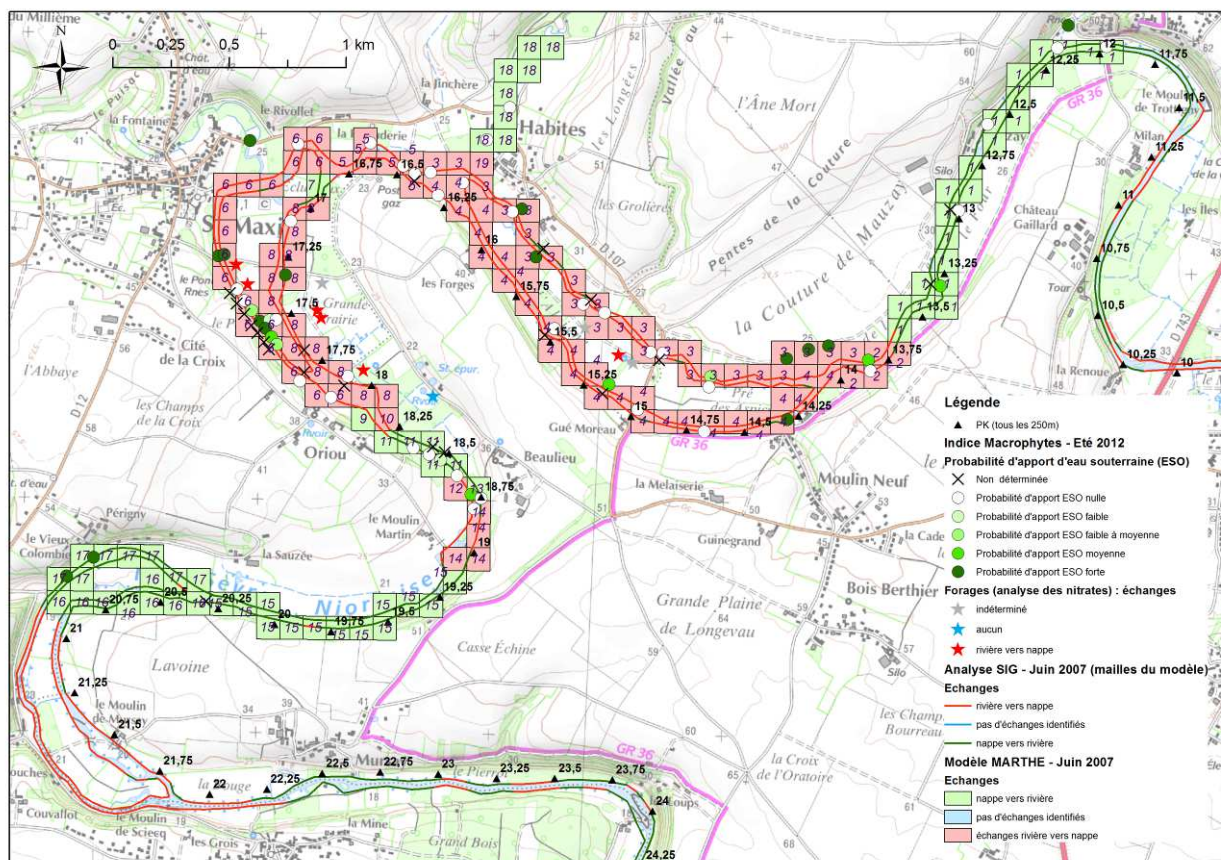
° Ce qu'il faut retenir des travaux sur le site de la Sèvre-Niortaise à Saint-Maxire/Echiré

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

Résultats sur les échanges nappe/ri vi ère (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 vi ères 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

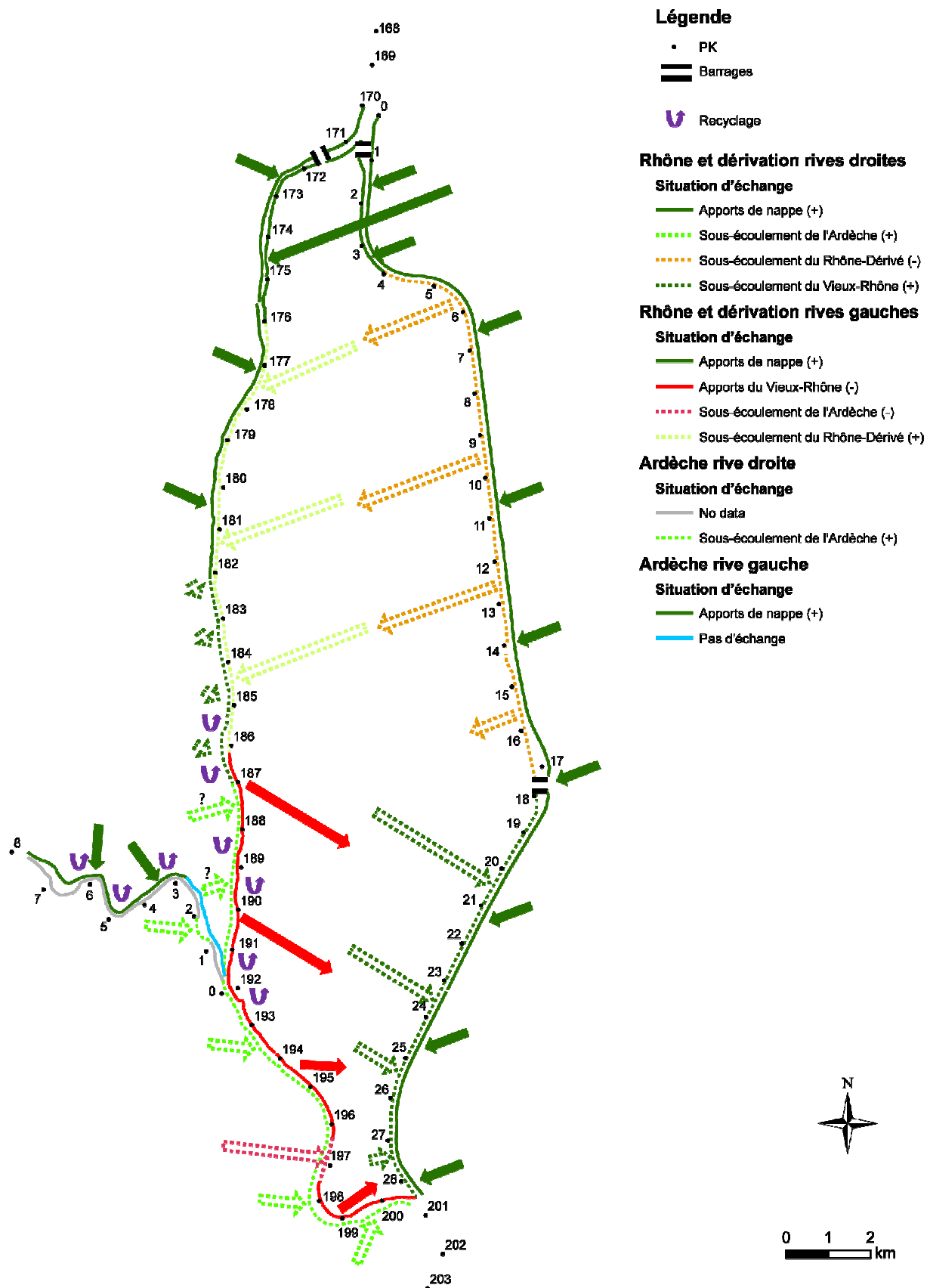
° Ce qu'il faut retenir des travaux sur le site du Rhône à Donzère-Mondragon

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

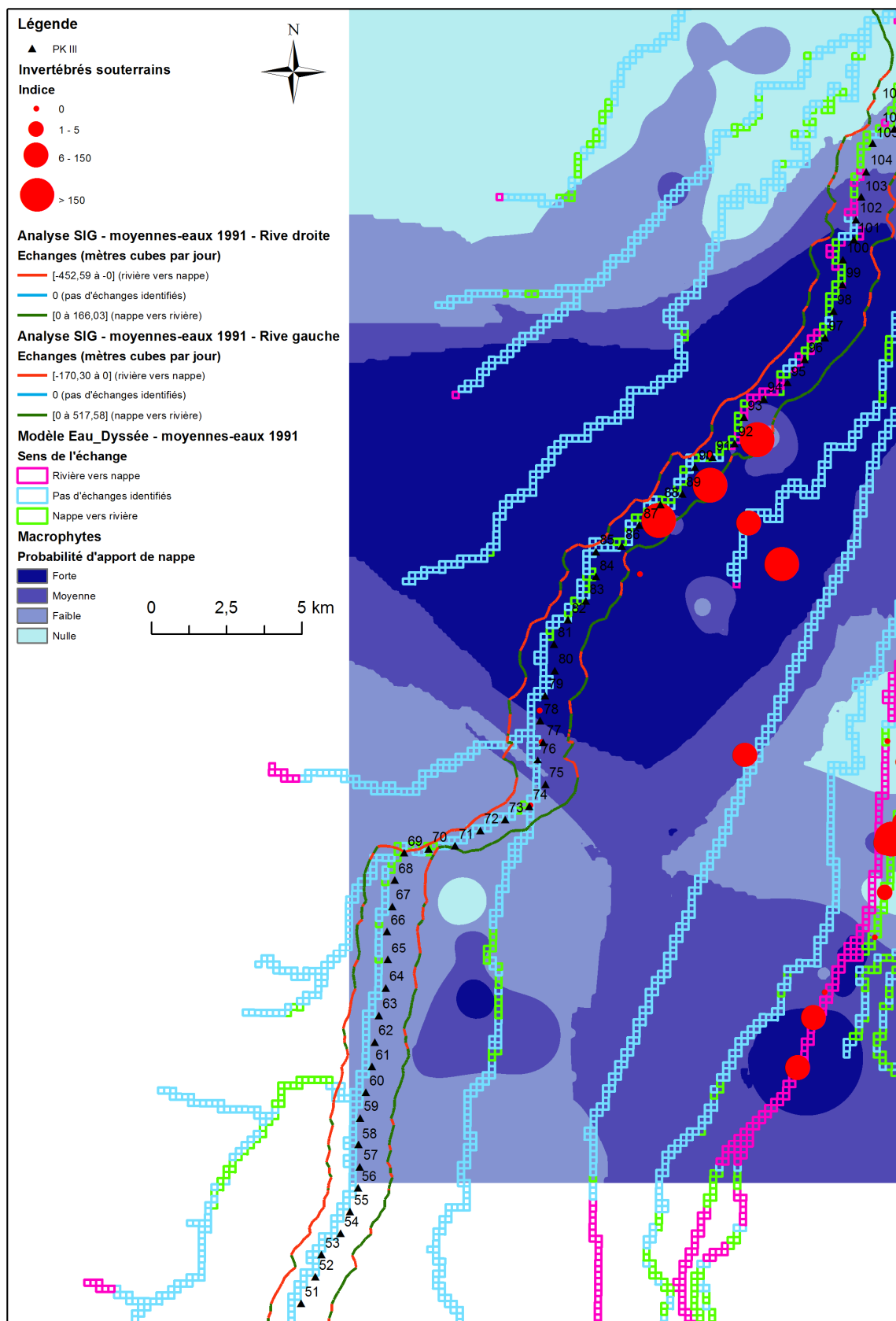
Résultats sur les échanges nappes/rivières (Diagnostic synthétique 3) : les différentes métriques ne sont pas toutes concordantes quant au sens et à l'intensité des échanges nappes/rivières sur le site étudié. On observe une forte divergence de diagnostic sur la partie amont de l'III entre le modèle 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>