

**Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part
des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de
surface (cours d'eau)**

Préfiguration du guide méthodologique de caractérisation des
échanges nappe/rivière en milieu alluvial

Rapport final Phase 4 (2010-2012)

Action n° 9 du Programme 2009 au titre de l'accord
cadre Agence de l'Eau ZABR

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Centre SPIN-
GSE : Didier Graillot, Frédéric Paran, Eric Lalot

Université Claude Bernard Lyon I, Laboratoire « Écologie des
Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés » UMR CNRS 5023 : Florent Arthaud,
Gudrun Bornette, Pierre Marmonier, Christophe Piscart

Décembre 2012

FICHE SIGNALÉTIQUE

Destinataire du document : AE-RMC, ZABR

Coordonnées complètes :

- Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC) 2-4, Allée de Lodz 69 363 Lyon Cedex 07 ;

- Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) 66, boulevard Niels Bohr - BP 2132 - 69 603 Villeurbanne Cedex.

Interlocuteur : Laurent Cadilhac

Date : Décembre 2012

Évaluation 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)
Préfiguration du guide méthodologique de caractérisation
des échanges nappe/rivière en milieu alluviale
Phase 4 (2010-2012)

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

Auteurs :

- ENSM-SE – Centre SPIN – Département Géo-Sciences et Environnement (Didier Graillot, Frédéric Paron, Eric Lalot).

- LEHNA – Ecologie souterraine (Pierre Marmonier, Christophe Piscart) ;

- LEHNA – Ecologie végétale (Gudrun Bornette, Florent Arthaud).

Données hydrauliques : en convention avec la CNR.

Financements complémentaires : aucun

Nombres d'exemplaires édités :

Diffusion : ZABR

Nombres de volumes : 2 (dont 1 pour les annexes)

Nombres de pages du rapport hors annexes : 126

Nombres d'illustrations hors annexes : 46 figures, 28 tableaux et 14 cartes

Nombre d'annexes : 5

Mots clefs : écoulements souterrains, eaux de surface, échanges nappes/rivière, hydraulique, hydrogéologie, analyse spatiale, invertébrés souterrains, végétation aquatique, isotopes, guide méthodologique

TABLE DES MATIERES SYNTHETIQUE

FICHE SIGNALÉTIQUE	I
TABLE DES MATIERES SYNTHETIQUE	III
Résumé	V
INTRODUCTION	1
1. Finalités, objectifs et planification du projet.....	1
2. Justification du choix de la chute CNR de Beauchastel.....	5
3. Organisation du rapport et travaux effectués lors de la phase 4 (2010-2012).....	6
PARTIE I – Caractérisation des échanges nappes/Rhône : Compléments – chute de Donzère-Mondragon / Diagnostic – chute de Beauchastel / Régime transitoire – chute de Péage de Roussillon	7
1. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Donzère-Mondragon et à la confluence Rhône/Ardèche : compléments au diagnostic multi-métriques de la phase 3.....	9
2. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux : diagnostic multi-métriques	31
3. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Péage-de-Roussillon : approches pour un diagnostic en régime transitoire (travail de thèse de Eric Lalot : 2010-2013).....	63
PARTIE II – Plan/maquette du guide méthodologique de caractérisation des échanges nappes/rivière en milieu alluvionnaire	91
1. Résumé de la démarche	91
2. Présentation synthétique du guide méthodologique	91
3. Etat d'avancement du guide méthodologique	94
4. Annexes du guide méthodologique : sommaire	100
CONCLUSION.....	101
1. Efficacité des descripteurs	101
2. Bilan par chute CNR.....	105
3. Applicabilité et pertinence de la méthode	107
4. Vers un guide méthodologique.....	108
PERSPECTIVES : PLANIFICATION DE LA PHASE 5 (JANVIER 2013 – DECEMBRE 2014).....	109
1. Approfondissement méthodologique : transposabilité de la méthodologie d'évaluation des échanges	109
2. Instrumentation complémentaire	109
3. Constitution du guide méthodologique final	110
PARTENAIRES ET CORRESPONDANTS	111
BIBLIOGRAPHIE.....	113
LISTE DES FIGURES, TABLEAUX, EQUATIONS, CARTES ET PHOTOGRAPHIES	117
1. Liste des figures	117
2. Liste des tableaux	118
3. Liste des équations	119
4. Liste des cartes	120
TABLE DES MATIERES COMPLETE.....	121
TABLE DES MATIERES DES ANNEXES	125

Résumé

Le travail présenté dans ce rapport correspond à la phase 4 (2010-2012) de l'action de recherche ZABR/Agence de l'eau RMC intitulée « 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 aux aquifères associés ». L'objectif de ce travail vise à identifier et à quantifier les échanges nappes/Rhône du lac Léman à la mer Méditerranée.

La méthodologie interdisciplinaire d'identification et de quantification des échanges repose sur :

- une approche spécifique fondée sur 3 métriques principales : hydrophysique (hydrogéologie quantitative), hydrobiologique (indicateurs biologiques : invertébrés souterrains, macrophytes) et géochimique (traceurs chimiques et isotopiques) ;
- une interprétation croisée des résultats obtenus pour chaque métrique.

La finalité de ce travail est tant scientifique qu'opérationnelle et vise à produire un outil d'interprétation des échanges nappes/Rhône, assorti de préconisations pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité. Cet outil prendra la forme d'un guide méthodologique de caractérisation des échanges nappe/rivière en milieu alluvial qui sera finalisé en phase 5 du projet (fin 2014/début 2015).

Le rapport de la phase 2 portait sur un secteur du Haut-Rhône (Brégnier-Cordon). Pour la phase 3, un nouveau secteur sur le Rhône aval avait été sélectionné : la chute CNR de Donzère-Mondragon. Ce secteur a été choisi du fait de sa représentativité par rapport à la problématique étudiée. Pour la phase 4, c'est la chute CNR de Beauchastel qui a été étudiée.

La première partie du rapport propose : 1) un diagnostic complémentaire de la chute CNR de Donzère-Mondragon au niveau de la confluence Rhône-Ardèche ; 2) un diagnostic de la chute CNR de Beauchastel ; 3) Premiers travaux en régimes transitoires. Ces diagnostics des échanges nappe/rivière reposent sur différentes métriques :

- La métrique hydrophysique est fondée sur la schématisation des configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges, l'hydrogéologie quantitative, notamment la Loi de Darcy, et les techniques d'analyse géomatique sous SIG. La caractérisation des échanges nappes/Rhône a pu être effectuée à partir de quatre piézométries différentes, ce qui a permis d'initier une réflexion sur les variations saisonnières des échanges.
- La métrique isotopique est fondée sur l'analyse des teneurs en tritium et oxygène 18 des eaux superficielles et souterraines du secteur. La pré-campagne réalisée à l'aide de ces indicateurs montre leur pertinence pour appréhender les mélanges et le rôle respectif des eaux du Rhône et des eaux locales (pluie, cours d'eau) dans l'alimentation des nappes.
- La métrique hydrobiologique mobilise deux types d'indicateurs pour évaluer les échanges : 1) d'une part les végétaux aquatiques, ou macrophytes, sensibles aux variations thermiques dues aux apports d'eaux souterraines, à la trophie du milieu aquatique et aux perturbations ayant pour origine la dynamique fluviale ; 2) d'autre part, les invertébrés souterrains marqueurs des arrivées d'eaux souterraines.

L'interprétation croisée des échanges nappes/Rhône a permis de dresser une cartographie issue de SIG montrant la superposition des résultats issus des différentes métriques mobilisées sur le secteur de Beauchastel. Ici, les métriques convergent dans la plupart des cas vers des résultats similaires. Le croisement des métriques permet une évaluation plus robuste des échanges. La complémentarité des métriques permet une évaluation spatialement plus étendue pour des zones où l'on ne dispose pas de toutes les données, et procure aussi une plus-value d'informations spécifiques à chacune des métriques. Par exemple l'hydrophysique permet de quantifier les volumes échangés, les macrophytes identifient les sources de pollutions et les invertébrés les apports souterrains profonds. Sur le secteur de Beauchastel, on aboutit au final à une sectorisation spatiale fonctionnelle en 12 zones pour un linéaire de berge d'environ 27 km.

Le diagnostic synthétique conduit à constater que les eaux superficielles, notamment le Vieux-Rhône en rive gauche et les contre-canaux du canal de dérivation en rive droite (canal d'amené), drainent la nappe sur la plus grande partie du linéaire. Pour les berges de « l'île » constituée par le Vieux-Rhône et sa dérivation, le diagnostic montre une situation sans échange. Pour l'Eyrieux, les situations d'échanges sont rares avec toutefois des contextes de recyclage et de sous-écoulement.

La deuxième partie du rapport propose une maquette détaillée du guide méthodologique.

Le plan et la structure du guide ont été arrêtés, ainsi que le principe de caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvial. L'utilisateur cheminera via un graphe de décision. Concernant le contenu, les éléments déjà rédigés dans les précédents rapports ont été sélectionnés.

Au final, le guide sera complété, testé et finalisé durant la phase 5 du projet (2013). De plus, un essai de transposition de la méthode sera réalisé sur un autre hydrosystème dans un contexte de plaine alluviale traversée par un cours d'eau.

INTRODUCTION

Avant de rentrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de rappeler de manière succincte le contexte dans lequel se déroule ce projet de recherche et plus particulièrement les sources de financements, les partenaires et son rattachement aux thèmes et sites ateliers de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR).

Ce programme de recherche (phase 1, phase 2, phase 3 et phase 4) est actuellement cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC). La phase 3 a été cofinancée par la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA).

Ce programme correspond à une action de recherche ZABR, labellisée Plan Rhône, qui est rattaché au thème du groupe de travail n°2 de la ZABR concernant les outils et méthodes de caractérisation des milieux aquatiques. Il est aussi rattaché aux sites ateliers ZABR impliquant l'axe Axe Rhône/Saône et les Zones Humides, mais d'autres sites le long du fleuve Rhône peuvent être concernés.

Cinq équipes sont principalement impliquées dans cette action de recherche :

- le Département GSE (Géo-Sciences et Environnement) du Centre SPIN (Sciences des Processus Industriels et Naturels) de l'ENSM-SE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne);
- l'UMR 5023 LENAHE (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés) de l'Université Lyon I, et plus spécifiquement des équipes « Hydrobiologie et Ecologie Souterraines » et « Ecologie des Communautés Végétales » ;
- l'Irstea Lyon (phase 1 et 2) ;
- le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon (phase 3) ;
- l'ENTPE Lyon (phase 3).

D'autres partenaires interviennent dans ce programme. Il peut s'agir de chercheurs (Hydrosciences-Montpellier, Université de Savoie, BRGM), d'institutions (DREAL) ou de partenaires privés (CNR, EDF). Une relation privilégiée a été établie avec la CNR (Compagnie Nationale du Rhône). Effet, une convention nous lie à elle pour la transmission de données concernant le fleuve Rhône.

1. Finalités, objectifs et planification du projet

Les paragraphes qui suivent présentent les finalités et les objectifs du projet et sa planification en 5 phases, prévues de 2006 à 2014 suite à la labellisation ZABR effective depuis juin 2005.

1.1. Finalités opérationnelles, objectifs et méthodologie

Il s'agit de se doter d'un outil de caractérisation et d'évaluation des échanges entre le Rhône et ses aquifères superficiels dans une optique de gestion opérationnelle de la ressource en eau et de préservation de la biodiversité. Cet outil prendra la forme d'un guide méthodologique à destination des gestionnaires de la ressource en eau.

Ce programme de recherche a pour objectif de caractériser les échanges hydrauliques existants entre :

- 1) le Rhône, ses annexes fluviales, les contre-canaux ;
- 2) les nappes alluviales et les autres aquifères en connexion, et de développer les méthodologies, voire les outils, permettant de caractériser ces échanges.

Il s'agit à terme de proposer un outil interdisciplinaire pour la caractérisation et l'évaluation, tant qualitative que quantitative, des échanges entre le fleuve Rhône et ses aquifères superficiels du lac Léman à la mer Méditerranée en tenant compte du caractère anthropisé du fleuve. Un tel outil contribuera à la préservation des nappes phréatiques, patrimoine souterrain et invisible, et plus généralement à la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité sur le bassin du Rhône.

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 sur le corridor alluvionnaire du Rhône, le programme permettra :

- d'estimer la contribution des eaux souterraines au débit du Rhône et identifier leur origine ;
- d'identifier à l'échelle du corridor alluvionnaire, les portions de nappe les plus directement sous influence du fleuve et les plus vulnérables à une pollution du Rhône ;
- d'identifier les milieux superficiels et humides sous dépendance majoritaire d'apports souterrains.

Les résultats obtenus fourniront des éléments d'informations appréciables pour la préservation des enjeux alimentation en eau potable (AEP) et alimentation des milieux aquatiques superficiels par les eaux souterraines en vue de la prévention des conflits d'usage. Les éléments acquis apporteront également des indications utiles pour la poursuite de programmes de restauration des milieux aquatiques ou la localisation et le dimensionnement des zones d'expansion de crues à (re-)créer.

1.2. Phases de l'étude

Le programme a été planifié sur plusieurs années et découpé en 5 phases (voir fiches projet aux Annexes 1). La phase 1, la phase 2 et la phase 3 ont déjà fait l'objet d'un précédent rapport et d'une fiche de restitution (voir fiches de restitution aux Annexes 2). La phase 4 est l'objet de ce rapport et la phase 5 a été décrite synthétiquement dans une fiche ZABR (voir aussi la partie de ce rapport intitulée Planification de la phase 5 p93)

Les différentes phases prévues de l'étude sont les suivantes :

Phase 1, Année 1 (mars 2006-Mars 2007) : Réalisation d'un inventaire des documents et des données existantes pour rédiger une synthèse interdisciplinaire générale intégrant les aspects quantitatifs et qualitatifs le long du Rhône. Cette synthèse a permis de préciser les apports de méthodes physiques, biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes), géochimiques et isotopiques pour la caractérisation des échanges nappes/rivière en tenant compte des influences anthropiques.

Phase 2, Année 2 (mars 2007-mars 2008) : Réalisation d'un premier diagnostic qualitatif et quantitatif des échanges sur un secteur du Haut-Rhône sélectionné (Brégnier-Cordon) avec visualisation sur support cartographique SIG des premiers résultats. Ce travail s'accompagne de la proposition de zones prioritaires à étudier pour envisager l'acquisition de données complémentaires.

Phase 3, Années 3 et 4 (mars 2008-juin 2010) : le choix du secteur témoin aval a été validé (Donzère-Mondragon). De plus des études complémentaires sont engagées sur le secteur de Brégnier-Cordon, notamment avec la métrique hydraulique.

L'étude du secteur de Donzère-Mondragon a conduit à acquérir de nouvelles données :

- hydrauliques, piézométriques ;
- biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes) ;
- isotopiques et physico-chimiques.

Comme dans la phase 2, le tableau des métriques a été renseigné, les résultats issus des différentes métriques analysés et couplés pour aboutir à une sectorisation fonctionnelle quantifiée.

Phase 4, Années 5 et 6 (Mai 2010-Décembre 2012) :

Les tâches suivantes ont été réalisées pour cette nouvelle phase de travail :

- Etude des échanges nappes/rivières sur un nouveau secteur du Rhône, la chute CNR de Beauchastel confluence Rhône/Eyrieux, et compléments d'étude sur la chute CNR de Donzère-Mondragon confluence Rhône/Ardèche.

- Mise en place d'une Database commune cohérente avec la nomenclature de Database existantes (ex : code BSS). L'enjeu de cette tâche va consister à harmoniser les données de chaque équipe de recherche afin de construire une base de données non seulement spatiale mais aussi temporelle. Cette tâche, encore en cours, devra être finalisée en phase 5 du projet. Son extension à l'ensemble du cours du Rhône nécessitera un financement complémentaire par le Plan Rhône.

- Valorisation des résultats avec l'identification des contextes hydrauliques sur lesquels les métriques sont pertinentes (seules ou combinées) à travers un protocole méthodologique d'évaluation des échanges et avec une sortie opérationnelle d'aide à la décision (guide méthodologique).

- Thèse EMSE (octobre 2010 – décembre 2013) : Étude des relations hydrauliques nappe alluviale/rivière – Application à un secteur anthropisé du fleuve Rhône (Chute CNR de Péage-de-Roussillon). L'enjeu de cette thèse est technique et méthodologique puisqu'il s'agit d'étudier l'influence des régimes transitoires saisonniers sur les échanges nappes/fleuve et d'instrumenter le site d'étude.

Phase 5, Années 7 et 8 (Janvier 2013-Décembre 2014) : la phase 5 devra être une phase de valorisation des résultats acquis lors des 4 phases précédentes et du travail de thèse. L'outil opérationnel d'aide à la décision (Guide méthodologique) sera finalisé. De plus, sa mise en œuvre devra tenir compte de la réflexion engagée en phase 4 sur les conditions de transférabilité de l'outil intégrant :

- les problèmes posés par les informations manquantes ;
- les conditions d'utilisation ;
- les solutions exportables à d'autres cours d'eau.

1.3. Phase 1 (2006-2007) et premiers résultats

Cette première phase était essentiellement consacrée à un travail documentaire qui a permis d'aboutir à :

- une synthèse bibliographique interdisciplinaire en matière d'échanges nappes/rivière ;
- un recensement des données existantes (géomorphologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, physico-chimiques, hydrobiologiques, aménagements et usages anthropiques) et à une convention avec la CNR principal détenteur de données sur le Rhône ;
- plusieurs sectorisations du fleuve Rhône en fonction des données existantes et à des hypothèses concernant l'identification des échanges nappes/Rhône ;
- la schématisation des configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent ces échanges ;
- une visualisation des informations obtenues avec un SIG (gradients faunistiques et floristiques, caractéristiques physiques des aquifères, gradients hydrauliques, géolocalisation des débits en rivière, prise en compte des ouvrages et usages anthropiques) ;
- la construction de la base de données SIG ;
- au choix d'un secteur test, la chute CNR de Brégnier-Cordon

1.4. Phase 2 (2007-2008)

Lors de cette seconde phase le choix du secteur témoin présélectionné (Brégnier-Cordon) dans la phase 1 a été validé. Ce secteur, qui avait été proposé du fait de son caractère relativement peu anthropisé pour l'étude des mécanismes d'échange sur le Rhône-Amont, s'est avéré en réalité plus complexe. Cette phase 2 a conduit à :

- la schématisation des configurations hydrogéologique sur le Rhône-Moyen et le Bas-Rhône ;
- la collecte de données complémentaires ;

- au développement d'une méthode d'analyse spatiale sous SIG de caractérisation des échanges
- l'initiation du tableau d'interprétation des résultats par métriques ;
- l'initiation de la codification des métriques ;
- l'analyse des résultats inter-sites sur Brégnier-Cordon ;
- une sectorisation fonctionnelle quantifiée sur Brégnier-Cordon.

La phase 2 comprend également :

- l'estimation des débits de nappe sur d'autres secteurs sous réserve de l'obtention des données auprès de la CNR ;
- l'identification des données biologiques mobilisables et l'évaluation quantitative et qualitative des données à collecter ;
- l'identification des données isotopiques existantes ;
- la proposition d'un site aval (la chute CNR de Donzère-Mondragon) en fonction des données disponibles (hydraulique, biologique, isotopique).

Pour le volet hydrogéologique, la phase 2 comprend également :

- une réflexion sur l'analyse des échanges en régime transitoire dans un contexte de changement climatique ;
- une analyse bibliographique internationale sur la modélisation des échanges nappes/rivière (Mississipi, Danube, Columbia river, river Murray, Snake river).

Du point de vue hydrogéologique, sur le secteur de Brégnier-Cordon, les sites étudiés montrent des apports souterrains, relativement limités vers le Rhône et les contre-canaux, là où ils existent. Ces apports représentent un total d'environ 340 l/s pour 7,5km. En terme d'usage, ceci signifie que les aquifères étudiés ne représentent pas une réserve stratégique en eau souterraine pouvant faire l'objet de captages supplémentaires. Le travail portant sur les métriques biologiques aboutit à une sectorisation de la plaine en termes d'influence phréatique, qui est mis en correspondance avec les résultats fournis par l'étude hydrogéologique, et qui démontre la grande sensibilité des métriques biologiques à l'origine et l'importance relative des apports phréatiques.

Les premiers résultats attachés à la chute de Brégnier-Cordon montrent tout l'intérêt de l'approche interdisciplinaire. Il apparaît que :

- les premiers croisements de résultats hydrauliques et biologiques sont globalement en accord sur les zones où la comparaison est possible ;
- les données de végétation et d'invertébrés apportent des informations sur l'origine et l'importance relative des alimentations phréatiques et sur l'eutrophisation du Rhône et des milieux aquatiques alluviaux.

Bien sûr ce type de synthèse est à pondérer en fonction de la densité des données disponibles dans chacun des domaines.

En ce qui concerne les rendus, pour chacune des deux premières phases, 1 rapport a été rédigé, ainsi qu'une fiche de restitution, 1 comité de suivi plénier a été organisé et des comités de suivi techniques ont eu lieu.

1.5. Phase 3 (2009-2010)

Le choix du secteur témoin aval a été validé (Donzère-Mondragon). De plus des études complémentaires sont engagées sur le secteur de Brégnier-Cordon, notamment avec la métrique isotopique. Sur Donzère-Mondragon, l'étude des échanges est effectuée selon 2 niveaux à partir des méthodes mises au point lors des phases précédentes: 1) une analyse corrélative inter-sites

d'échantillonnage qui cherchera le lien statistique entre les différentes métriques (hydraulique, biologique, géochimique) ; 2) une recherche de la cohérence entre les typologies de secteurs fonctionnels mises en place dans les différentes métriques.

Cette étude a conduit à acquérir de nouvelles données :

- hydrauliques, piézométriques ;
- biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes) ;
- isotopiques et physico-chimiques.

Comme dans la phase 2, le tableau des métriques a été renseigné, les résultats issus des différentes métriques analysés et couplés pour aboutir à une sectorisation fonctionnelle quantifiée. La carte de synthèse présente le diagnostic fonctionnel spatialisé des échanges nappes/Rhône réalisé à l'aide des différentes métriques impliquées aussi bien en rive gauche qu'en rive droite sur le Vieux-Rhône et le canal de dérivation de la chute de Donzère-Mondragon. Les schémas accompagnant cette carte décrivent plus précisément les différentes situations observées. Les variations saisonnières des échanges ont été appréhendées, notamment, à partir de 4 cartes piézométriques rendant compte d'états (saisons) hydrologiques de l'hydrosystème nappe/Rhône différents. Du point de vue hydraulique, on observe que les échanges sont plus intenses en moyennes-eaux et plus faibles en hautes-eaux. De plus, le sens de l'échange peut s'inverser d'une saison à l'autre sur certains secteurs.

Il conviendra dès lors de mener une réflexion sur la méthodologie, non seulement sur les secteurs ou sites où l'on dispose de toutes les métriques, mais aussi sur les secteurs ou sites où certaines sont manquantes. Cette démarche conduira à l'élaboration d'une première ébauche de l'outil d'analyse en phase 4.

Comme lors des deux premières phases, un comité plénier a été organisé pour clôturer la phase 3 et initier la phase 4.

Concernant la phase 4 un Comité Plénier est prévu le 29 janvier 2013

2. Justification du choix de la chute CNR de Beauchastel

Le choix du secteur de Beauchastel/Eyrieux a été difficile. Des visites de sites avaient préalablement été organisées sur le Rhône aval du côté de Beaucaire/Arles, du côté des terrasses d'Orange/Avignon et du côté de la confluence Aygues/Rhône. Au final, le choix s'est porté sur la chute CNR de Beauchastel et de la confluence Rhône/Eyrieux pour deux raisons principales :

1. Bien qu'il s'agisse d'un secteur du Rhône aval au climat semblable à Donzère-Mondragon il diffère par la présence d'un socle granitique et d'eaux faiblement minéralisées (la conductivité étant utilisée comme indicateur des échanges nappes/rivières) ;
2. Il s'agit d'un secteur où la couche de limon superficielle couvrant les alluvions du Rhône n'est pas continue et pas très épaisse.

Ces deux raisons ont été déterminantes du point de vue des métriques biologiques. Concernant les invertébrés l'absence de couche de limon rend possible l'échantillonnage et la présence d'eau acide va permettre de tester l'efficacité du descripteur dans un tel contexte. Du point de vue hydraulique l'existence de données (essentiellement détenues par la CNR) a rendue possible la caractérisation des échanges nappes/Rhône dans ce secteur. On regrette toutefois que la densité et la variété de l'information disponible n'ont pas été aussi importantes que sur le secteur de Donzère-Mondragon, investigué en phase 3 du projet.

3. Organisation du rapport et travaux effectués lors de la phase 4 (2010-2012)

Par rapport au programme prévisionnel, la phase 4 s'est déroulée selon le plan des tâches prévu. Seule l'étude synchrone multi-échelle et multi-métrique des échanges nappes/Rhône et entre masses d'eau souterraines différentes planifiée en tâche 1 n'a pas pu être entièrement réalisée. En effet, l'étude piézométrique, sous-traitée à un bureau d'étude, prévue sur le secteur de la confluence Ardèche/Rhône n'a pas été réalisée. De plus, le secteur des terrasses d'Orange/Avignon a été remplacé par la chute CNR de Beauchastel confluence Rhône/Eyrieux pour les raisons évoquées dans la partie précédente.

Les comptes rendus de réunion et de visites de terrains s'étant déroulés pendant la phase 4 sont disponibles en Annexes 3.

Au final, et conformément aux tâches planifiées pour la phase 4 ce rapport, ce rapport est découpé en deux grandes parties.

La première partie concernant des diagnostics de site présente :

1. Un complément au diagnostic des échanges nappes/Rhône et nappes/Ardèche réalisé en phase 3, ainsi qu'une mise à jour du diagnostic synthétique et de la typologie des échanges ;
2. Un diagnostic complet des échanges nappes/Rhône et nappes/Eyrieux sur le secteur de Beauchastel accompagné d'un diagnostic synthétique
3. Un état d'avancement du travail de thèse d'Eric Lalot sur la question des échanges nappes/rivière en régime transitoire sur le secteur de Péage-de-Roussillon.

La deuxième partie présente l'avancement dans la construction du guide méthodologique de caractérisation des échanges nappe/rivière en milieu alluvionnaire :

1. Résumé de la démarche
2. Présentation synthétique du guide
3. Etat d'avancement du guide et contenu

La dernière partie (Conclusion et perspective) propose un bilan du travail réalisé et la planification future du projet de recherche. Elle propose d'une part un bilan en termes de couverture spatiale des secteurs traités et des données acquises ou en cours d'acquisition sur le fleuve Rhône et d'autre part détaille l'organisation et les secteurs d'étude de la phase 5 (2012-2014).

PARTIE I

—

Caractérisation des échanges nappes/Rhône : Compléments – chute de Donzère-Mondragon / Diagnostic – chute de Beauchastel / Régime transitoire – chute de Péage de Roussillon

1. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Donzère-Mondragon et à la confluence Rhône/Ardèche : compléments au diagnostic multi-métriques de la phase 3

2. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux : diagnostic multi-métriques

3. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Péage-de-Roussillon : approches pour un diagnostic en régime transitoire (travail de thèse de Eric Lalot : 2010-2013)

1. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Donzère-Mondragon et à la confluence Rhône/Ardèche : compléments au diagnostic multi-métriques de la phase 3

Cette partie propose des compléments d'investigation sur le secteur de Donzère-Mondragon déjà traité durant la phase 3 (rapport précédent). L'accent est mis sur la confluence Rhône/Ardèche où deux diagnostics, l'un fondé sur l'hydraulique et l'autre sur les invertébrés souterrains ont été réalisés, pour caractériser les échanges nappes/rivières. Ici, seuls les éléments nouveaux seront présentés. Toutefois, les nouveaux résultats intégrés à ceux de l'année précédente seront présentés : pour toute autre information, se référer au rapport de la phase 3 du projet.

1.1. Confluence Rhône/Ardèche : métrique hydraulique

1.1.1. Données

La caractérisation des échanges nappe/rivière au niveau de la confluence Rhône-Ardèche a été effectuée à partir des données suivantes :

- Campagne piézométrique du 27 avril 2011 dans 6 puits avec mesure du niveau d'eau dans l'Ardèche (la partie amont du niveau d'eau a été extrapolée en tenant compte de la topographie)
- Cotes du talweg du Rhône : données CNR
- Cotes du niveau d'eau du Rhône : données CNR
- Fiches entités hydrogéologiques et couvertures spatiales : données AE-RMC
- Débits du Rhône et de l'Ardèche : Banque Hydro

1.1.2. Situation hydrologique

Le 27 avril 2011 les débits mesurés sur le Rhône et l'Ardèche sont les suivants :

- Débit du Vieux-Rhône à Bourg-Saint-Andéol (amont de la confluence Rhône/Ardèche) : 55,7 m³/s

Le débit du Vieux-Rhône est donc quasiment égal au débit réservé (60m³/s)

- Débit du Vieux-Rhône à Pont-Saint-Esprit (aval de la confluence Rhône/Ardèche : 102 m³/s)

On peut donc estimer le débit de l'Ardèche à la confluence avec le Rhône à environ 45 m³/s. Le débit de l'Ardèche mesuré à la première station à l'amont (Saint-Martin d'Ardèche) était ce jour-là de 16,9 m³/s (Module : 64,4 m³/s).

1.1.3. Entités hydrogéologiques

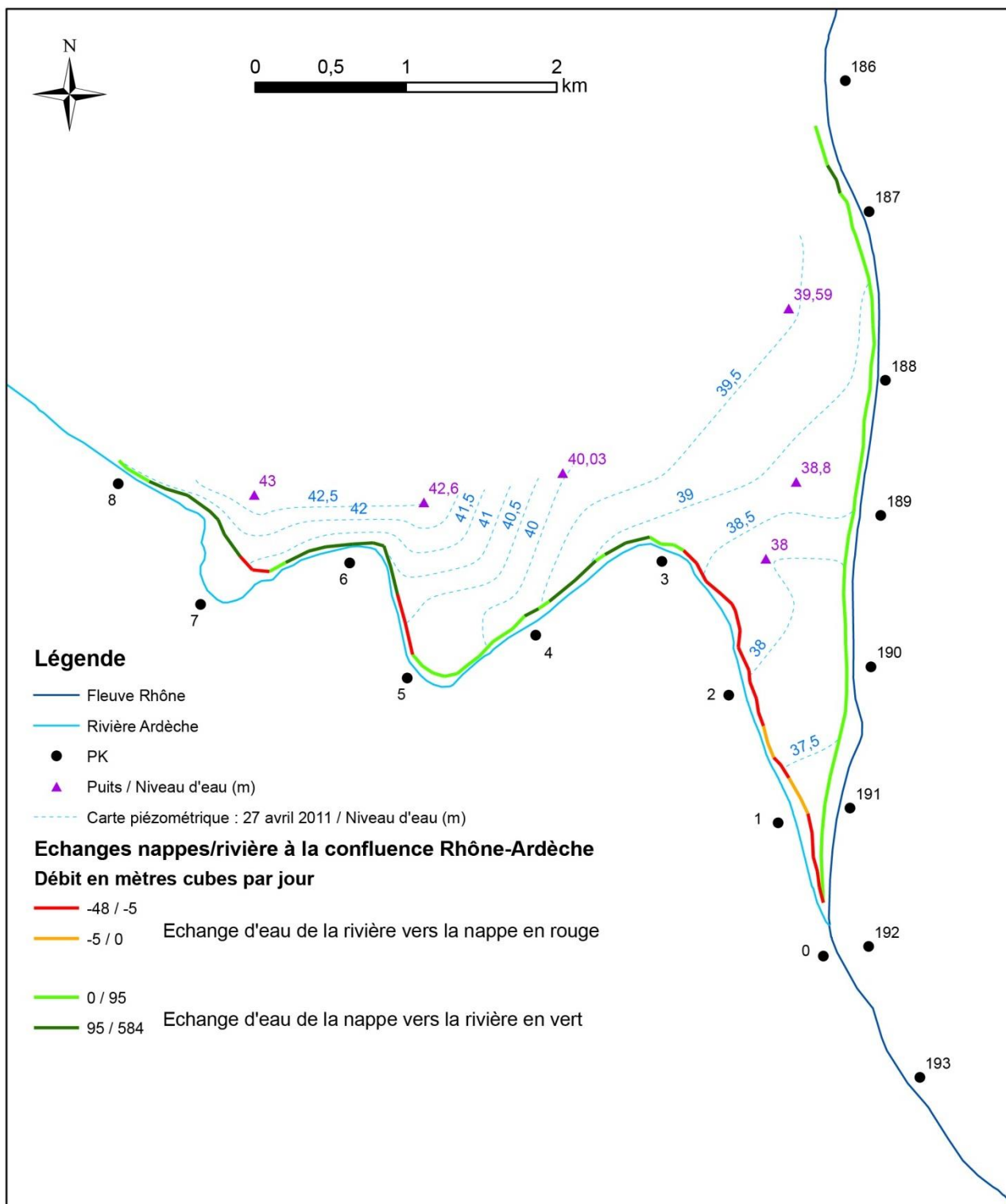
Sur le secteur de la confluence Rhône/Ardèche, il y a deux entités hydrogéologiques en présence :

- **548B2 : Alluvions quaternaires de l'Ardèche à la confluence du Rhône**
 - Alluvions quaternaires (plus grossières que celles du Rhône)
 - Substratum : marnes bleues peu perméables du Pliocène inférieur (PLIO3)
 - La nappe de l'Ardèche alimente celle du Rhône (RHDI5)
 - Perméabilité : 10⁻² à 10⁻³ m/s
 - Epaisseur mouillée : 5 à 10 m
 - Qualité : faciès bicarbonaté calcique
 - Vulnérabilité : très sensible à la pollution du fait des échanges nappe/rivière

- **RHDI5 : Alluvions quaternaires de la vallée du Rhône en aval de Viviers**

- Ancien code 327c : Alluvions quaternaires en rive droite du Rhône du défilé de Donzère à la confluence de l'Ardèche
- Substratum : Formations argileuses du Pliocène (PLIO3)
- Perméabilité : 10^{-2} à 10^{-3} m/s (moyenne 2.10^{-3} m/s)
- Epaisseur mouillée : 5 à 15 m

1.1.4. Caractérisation des échanges nappes/rivières



Carte 1 : Caractérisation des échanges nappes/rivières à la confluence Rhône-Ardèche

Les échanges ont été identifiés et quantifiés selon la même méthode que dans les phases 2 et 3 de la présente étude. Le Tableau 1 présente les résultats de manière synthétique et sectorisée. La Carte 1 spatialise les résultats. La limite entre les entités hydrogéologiques RHDI5 et 548B2 au niveau de l'Ardèche se fait à l'intersection de la courbe isopièze cote 40 m et du linéaire de berge (Carte 1).

Sur ce secteur on constate que la nappe alimente le Vieux-Rhône en rive droite sur tout le linéaire étudié (PK 186 à 192 soit environ 5 300 m). Les flux échangés sont relativement faibles.

L'Ardèche en rive gauche est principalement alimentée par la nappe sur le linéaire étudié amont (environ 4 400 m) entrecoupé par quelques secteurs dans les méandres où les échanges s'inversent (environ 650 m). Sur la partie aval du linéaire étudié, au niveau de la confluence avec le Rhône, c'est l'Ardèche qui alimente la nappe sur environ 2 600 m. Les flux échangés restent relativement faibles sur la partie aval, mais sont plus importants sur la partie amont.

Compte-tenu de la faiblesse des flux d'eau échangés et des incertitudes habituelles sur les données et des hypothèses faites sur le niveau d'eau dans l'Ardèche, il semble que le secteur aval au niveau de la confluence Rhône-Ardèche (RHDI5) pourrait être considéré à l'équilibre pour cette période.

Secteur	Entité hydrogéologique	PK	Cours d'eau Rive	Gradient hydraulique moyen (‰)	Q (m³/j)	Longueur (m)	Q (m³/j/km)
1	RHDI5	186 à 192	Vieux-Rhône Rive droite	1,1	1149,48	5257,06	275,72
2	RHDI5	Confluence Rhône aval	Ardèche Rive gauche	1,2	-430,95	2594,79	-166,08
3	RHDI5	Confluence Rhône aval	Ardèche Rive gauche	1,7	854,80	1513,09	564,94
4	548B2	Confluence Rhône amont	Ardèche Rive gauche	3,5	3622,01	2866,50	1263,57
4	548B2	Confluence Rhône amont	Ardèche Rive gauche	0,9	-81,76	644,84	-126,80

Tableau 1 : Caractérisation des échanges nappes/rivières à la confluence Rhône-Ardèche

En vert les secteurs où la nappe alimente le Rhône ou l'Ardèche

En rouge les secteurs où l'Ardèche alimente la nappe

1.2. Confluence Rhône-Ardèche : métrique invertébrés souterrains

Pour rappel, deux campagnes de prélèvements ont été réalisées durant l'année 2008, en mai et en septembre. Pour la période de mai, les prélèvements ont été effectués du 21 au 25 avril pour la faune interstitielle et du 12 au 16 mai pour les sources et les puits. Pour la période de septembre, les prélèvements ont été effectués du 29 août au 2 septembre.

Pour la période de mai (21, 22, 23, 24 et 25 avril 2008) les débits moyens journaliers (m^3/s) du Vieux-Rhône et de l'Ardèche (Banque Hydro) étaient les suivants :

- Vieux-Rhône à Bourg-Saint-Andéol :	812	944	717	542	550
- Vieux-Rhône à Pont-Saint-Esprit :	1310	1180	827	609	582
- L'Ardèche à Saint-Martin d'Ardèche :	694	385	240	184	156

Pour la période de mai (12, 13, 14, 15 et 16 avril 2008) les débits moyens journaliers (m^3/s) du Vieux-Rhône et de l'Ardèche (Banque Hydro) étaient les suivants :

- Vieux-Rhône à Bourg-Saint-Andéol :	132	134	136	137	144
- Vieux-Rhône à Pont-Saint-Esprit :	123	128	126	131	164
- L'Ardèche à Saint-Martin d'Ardèche :	43,5	49,6	46,0	53,0	86,1

Pour la période de septembre (29, 30 et 31 août et 1 et 2 septembre) les débits moyens journaliers (m^3/s) du Vieux-Rhône et de l'Ardèche (Banque Hydro) étaient les suivants :

- Vieux-Rhône à Bourg-Saint-Andéol :	42,6	42,9	42,6	42,4	42,6
- Vieux-Rhône à Pont-Saint-Esprit :	67,6	67,5	67,4	67,2	67,1
- L'Ardèche à Saint-Martin d'Ardèche :	8,90	8,79	8,92	9,09	9,09

Pour la période de mai, la plupart des sites hébergeaient une faune stygobie importante (17 espèces), alors qu'au mois de septembre, celle-ci était nettement moins abondante et diversifiée (9 espèces). L'alimentation en eau souterraine se révélait être plus étendue dans l'espace et plus intense en période de moyennes-eaux (mai 2008).

En juin 2010, une nouvelle campagne de prélèvements (14 au 18 juin) a été effectuée sur le même secteur. Deux stations (ST1 et ST2) ont été ajoutées à cette campagne, afin de déterminer si les apports souterrains côté Ardèche arrivent jusqu'au Rhône (Figure 1).

Pour cette dernière période (14, 15, 16, 17 et 18 juin) les débits moyens journaliers (m^3/s) du Vieux-Rhône et de l'Ardèche (Banque Hydro) étaient les suivants :

- Vieux-Rhône à Bourg-Saint-Andéol :	117	163	155	399	634
- Vieux-Rhône à Pont-Saint-Esprit :	133	176	186	373	562
- L'Ardèche à Saint-Martin d'Ardèche :	28,1	38,0	55,8	56,3	37,0

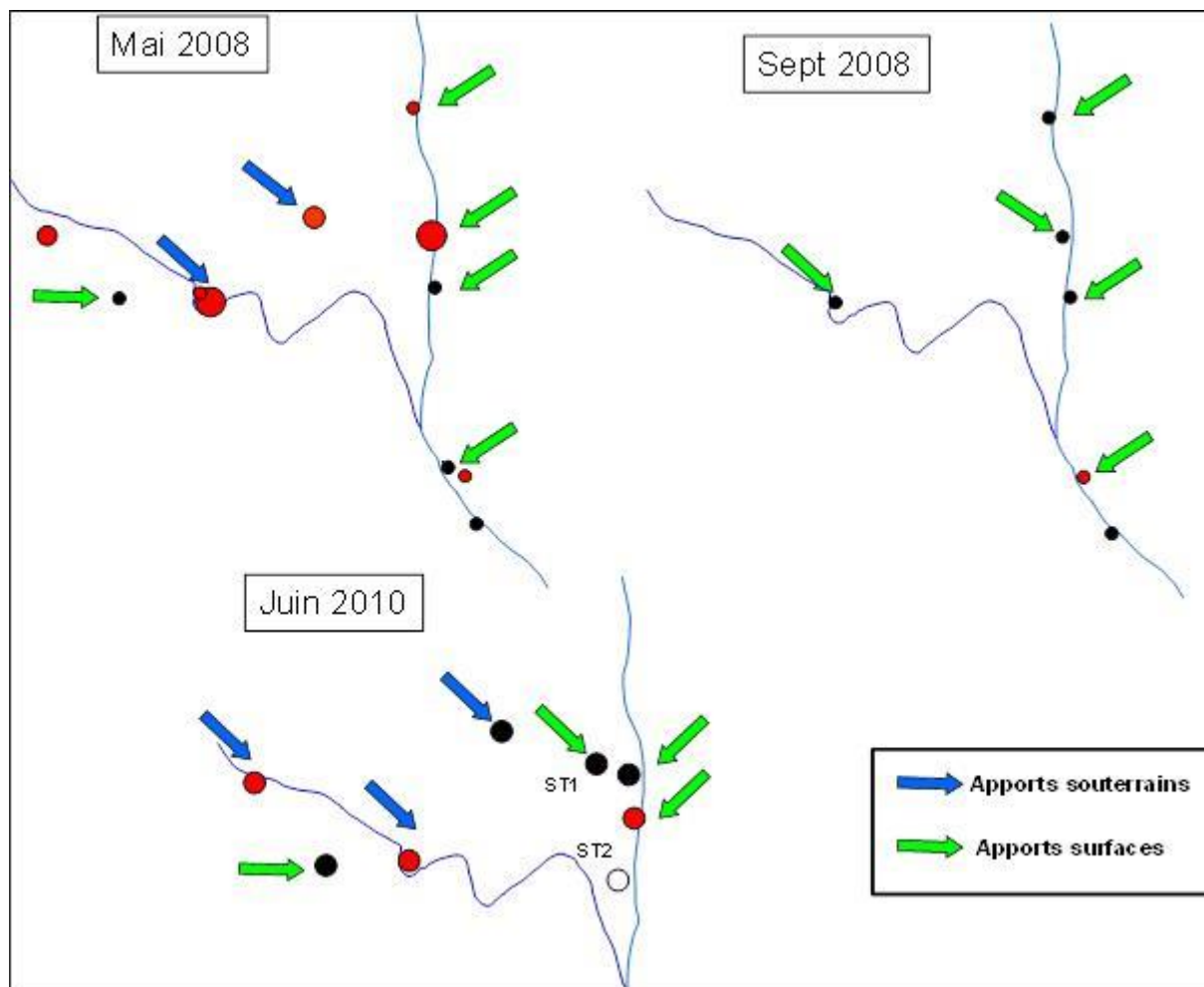


Figure 1 : Schéma des échanges nappe/rivière suivant les saisons et les années

On retrouve quasiment le même patron spatial d'échanges d'eau en juin 2010 et en mai 2008 : apports de surface côté Drôme, apports souterrains côté Ardèche. Les deux stations ajoutées en juin 2010 n'ont pas permis de mettre en évidence des influences souterraines de la nappe de l'Ardèche arrivant jusqu'au Rhône.

Au contraire, en septembre 2008 nous avons observé des apports d'eau de surface des deux côtés du fleuve. On peut donc supposer, au vu de ces résultats, qu'il existe une relative stabilité inter-annuelle, mais une forte variabilité saisonnière, avec des apports souterrains plus intenses en période de moyennes-eaux.

1.3. Mises à jour de la typologie schématiques des échanges nappes/rivière

Une typologie schématique des échanges nappes/rivières avait été établie lors de la phase 3. Chacun des types avait 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 2 présente le code couleur sélectionné actuellement. Celui-ci pourra être modifié en fonction des besoins lors de la rédaction du guide méthodologique.

Cette symbolique a été affinée et modifiée suite aux compléments de diagnostic au niveau de la confluence Rhône/Ardèche. Le plus gros changement concerne le type « recyclage ». Ce dernier a été reconsidéré et un nouveau type « sous-écoulement » a été ajouté. Ces deux types correspondent au cas où il y a signature d'eau du Rhône. Une distinction a donc été faite entre recyclage sur de courte distance et reprise du sous-écoulement sur de plus grandes distance. Au final, les deux termes ont été définis comme suit :

- recyclage : boucles de reprise avec infiltration et exfiltration d'eau du Rhône sur de courtes distances, échanges hyporhéiques dans le sens longitudinal (du mètre à plusieurs dizaines de mètres) ;
- reprise du sous-écoulement (underflow) d'eau du Rhône sur de plus grande distance (plusieurs centaines de mètres ou kilomètres) ; par voie latérale (à travers les berges).

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/rivière
	Colmatage
	Sous-écoulement
	Recyclage
	Mélange d'eau de rivière et de nappe

Tableau 2 : Code couleur utilisé pour la topologie schématique 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).

La nouvelle typologie schématique est la suivante :

Apports de nappe

Apports de nappe au fleuve Rhône (Figure 2 et Figure 3). Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, isotopes, invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

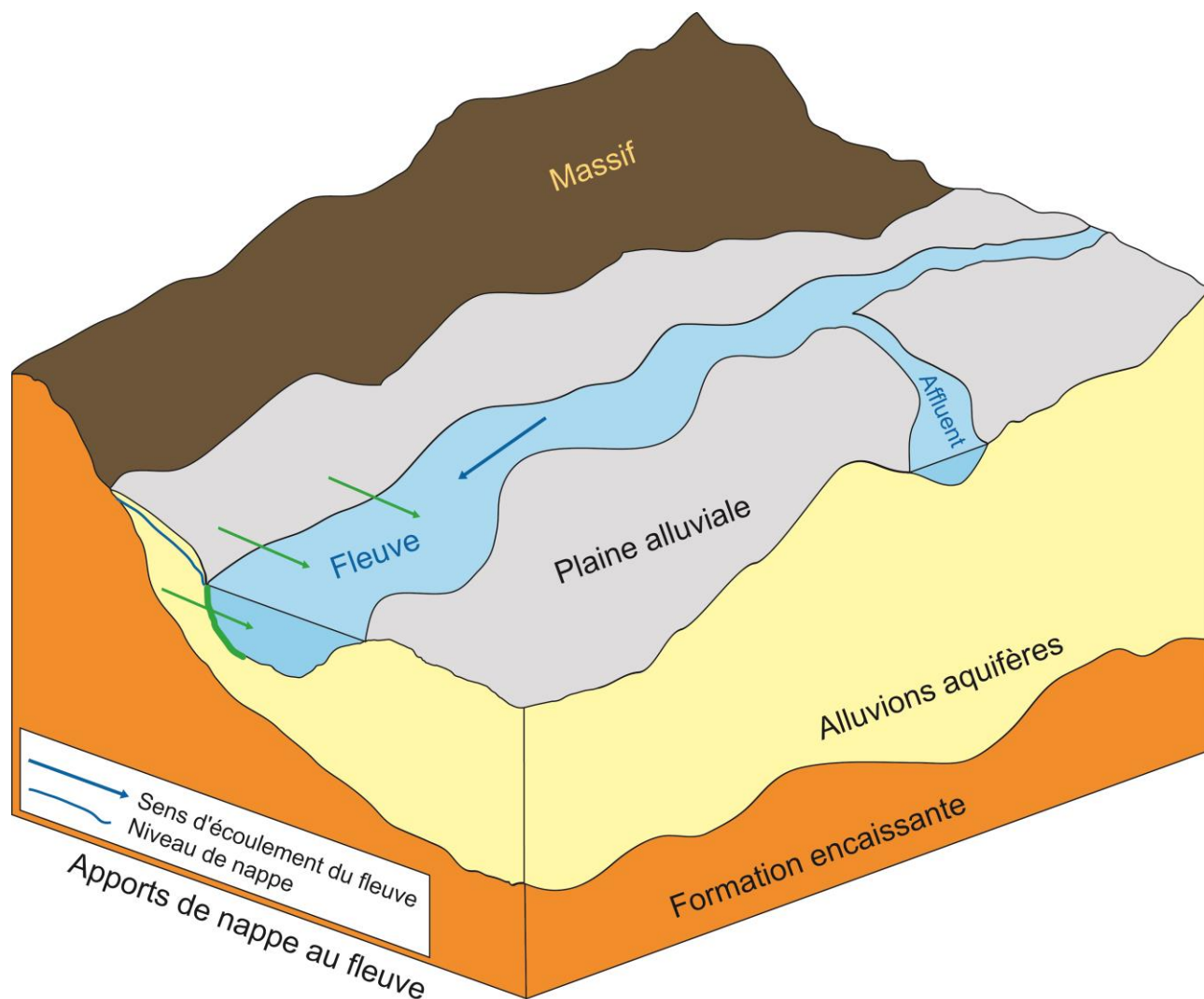


Figure 2 : Apports de nappe au fleuve : vue 3D

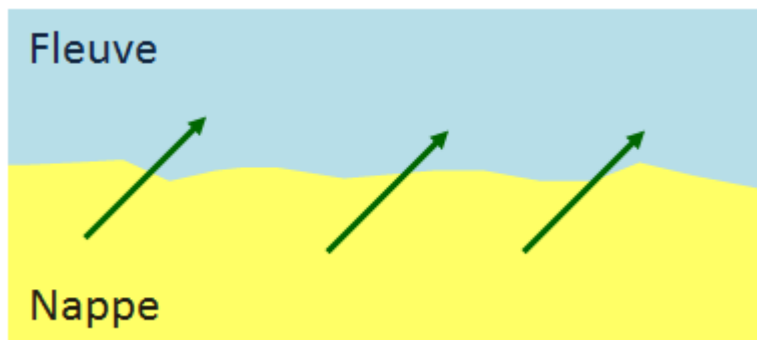


Figure 3 : Apports de nappe au fleuve : représentation simplifiée

Apports du fleuve

Apports du fleuve Rhône à la nappe (Figure 4 et Figure 5). Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, isotopes et invertébrés. Elle n'est pas détectable par la métrique végétation.

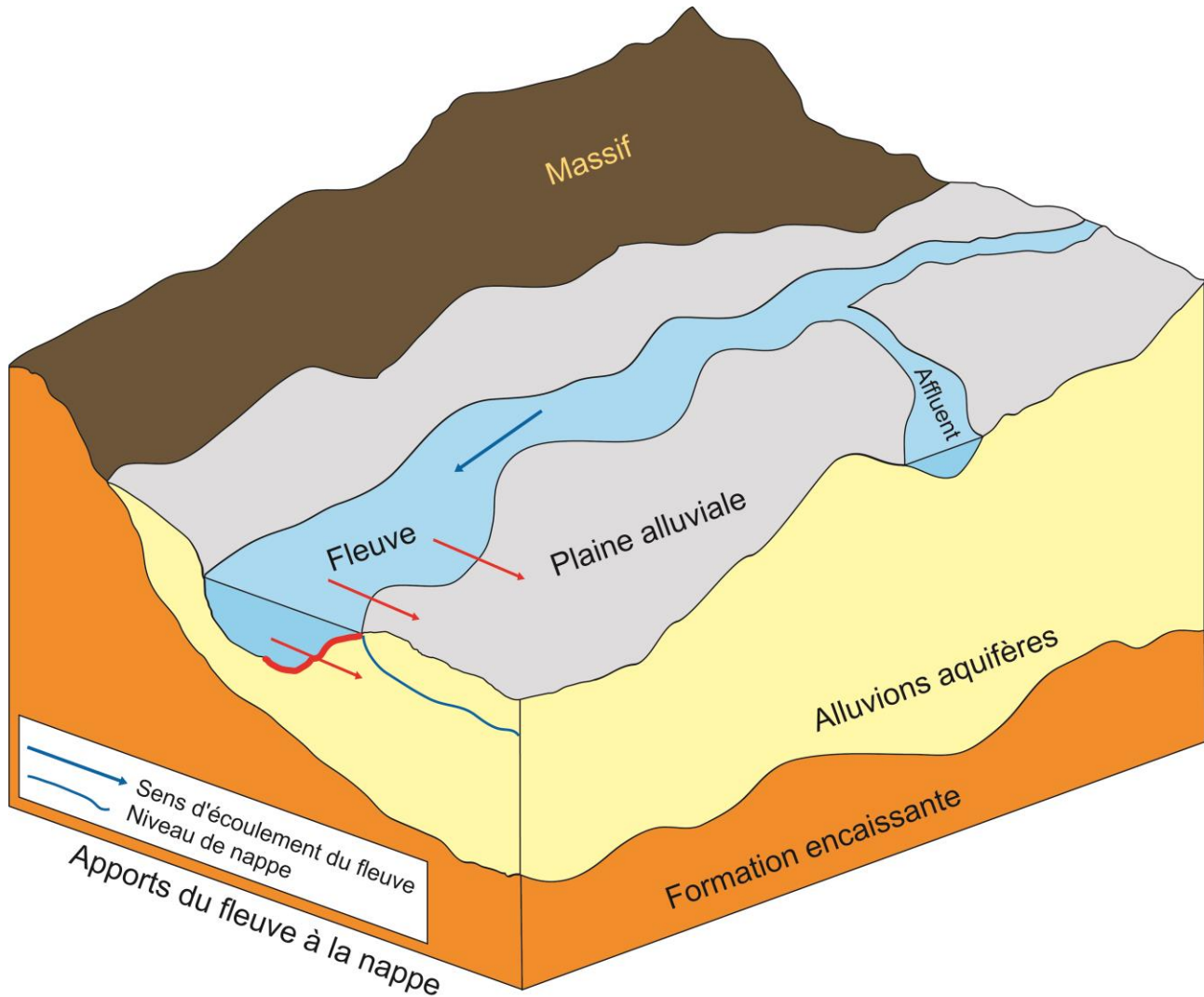


Figure 4 : Apports du fleuve à la nappe : vue 3D



Figure 5 : Apports du fleuve à la nappe : représentation simplifiée

Pas d'échange

Pas d'apport de la nappe au fleuve, ni du fleuve à la nappe (Figure 6 et Figure 7), par exemple, cas où l'écoulement de la nappe est parallèle au fleuve. Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

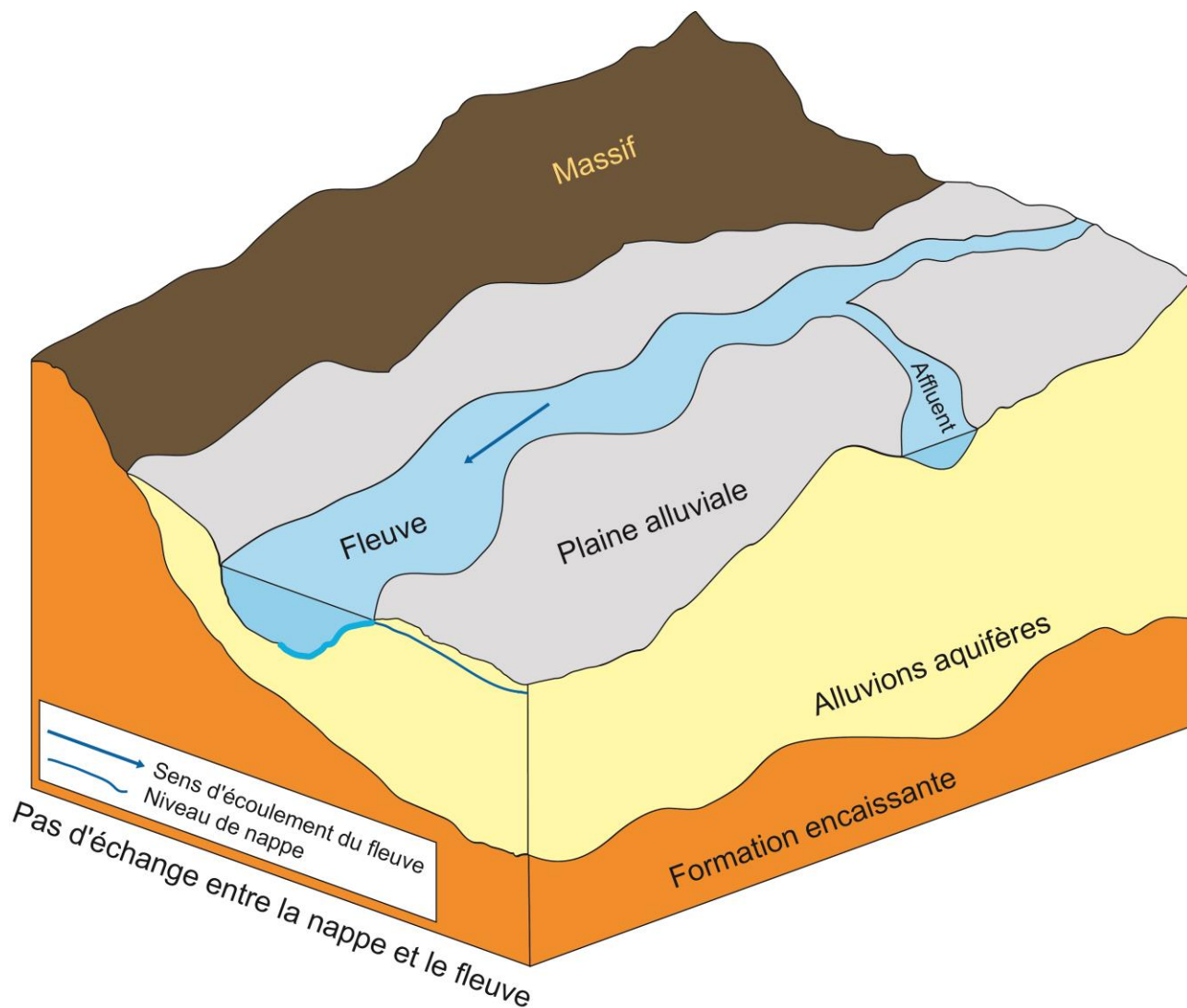


Figure 6 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : vue 3D

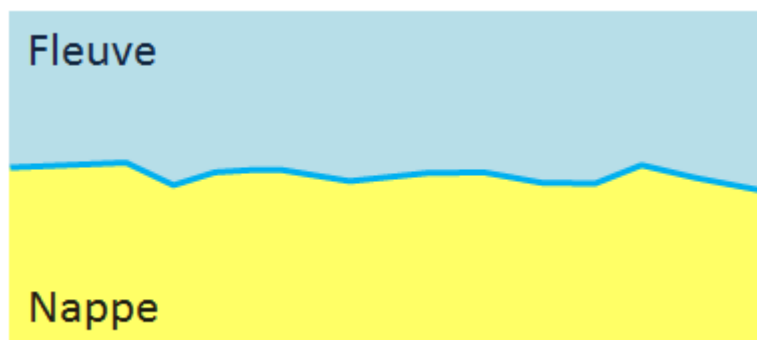


Figure 7 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : représentation simplifiée

Colmatage

Colmatage entre la nappe et le fleuve (Figure 8 et Figure 9), cas par exemple, où les berges sont colmatées. Cette configuration est détectable par les métriques isotopes et invertébrés.

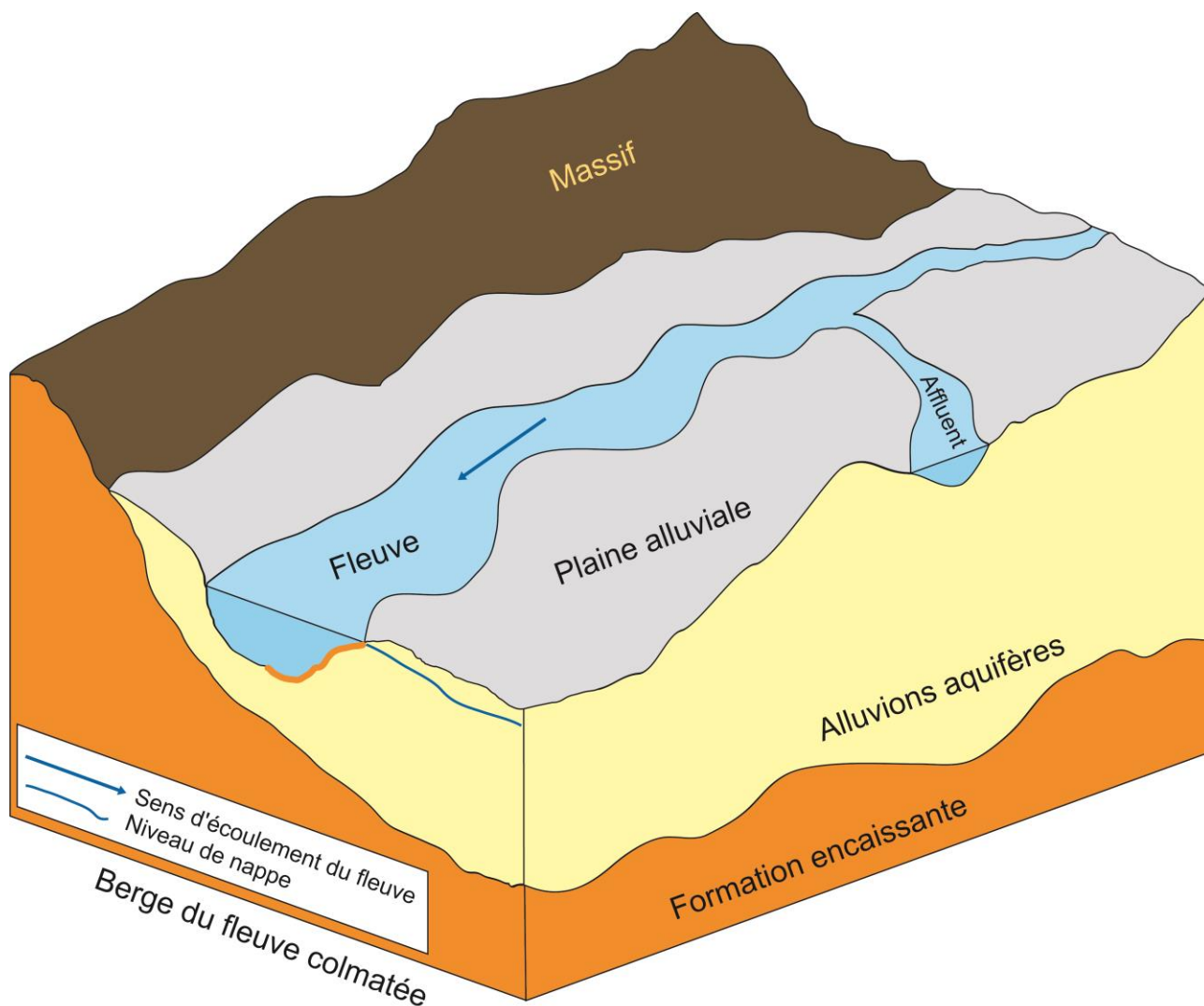


Figure 8 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : vue 3D

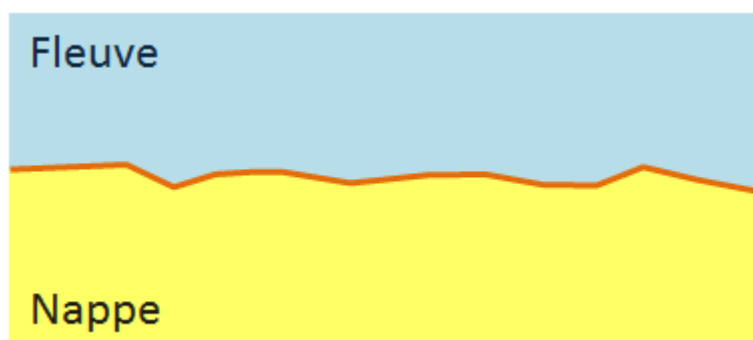
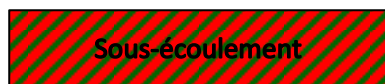


Figure 9 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : représentation simplifiée



Reprise du sous-écoulement (underflow) d'eau du Rhône ou d'un cours d'eau sur des distances de l'ordre de plusieurs centaines de mètres voire de kilomètres ou bien par voie latérale à travers les berges (Figure 10 et Figure 11). Cette configuration est détectable par les métriques invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

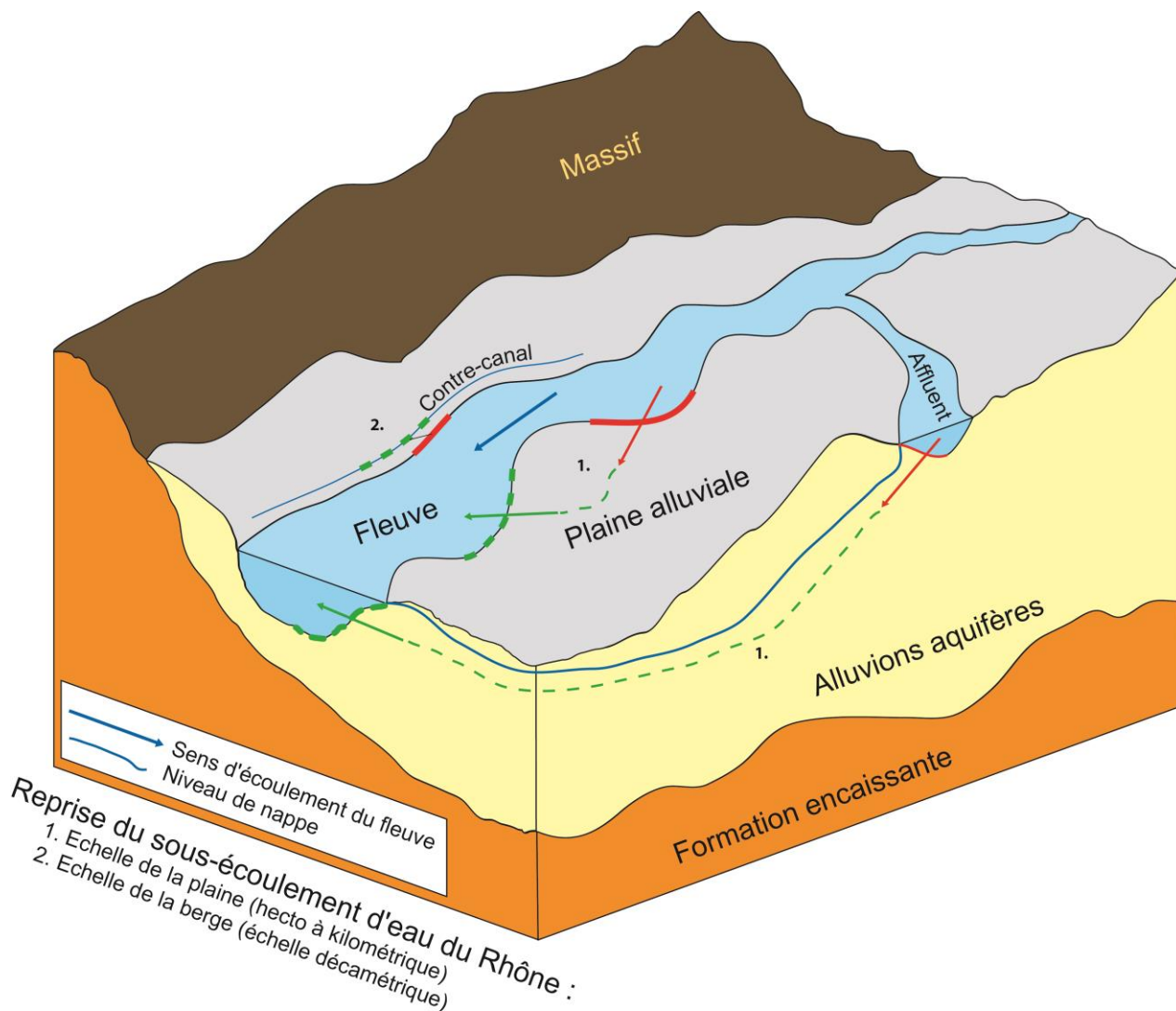


Figure 10 : Sous-écoulement d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : vue 3D

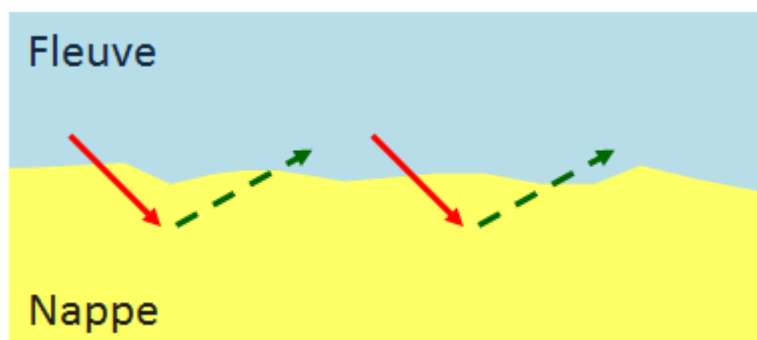


Figure 11 : Sous-écoulement d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : représentation simplifiée

Recyclage

Recyclage : boucles de reprise avec infiltration et exfiltration d'eau du Rhône sur de courtes distances, échanges hyporhéiques dans le sens longitudinal du mètre à plusieurs dizaines de mètres (Figure 12 et Figure 13). Cette configuration est détectable uniquement par les métriques invertébrés.

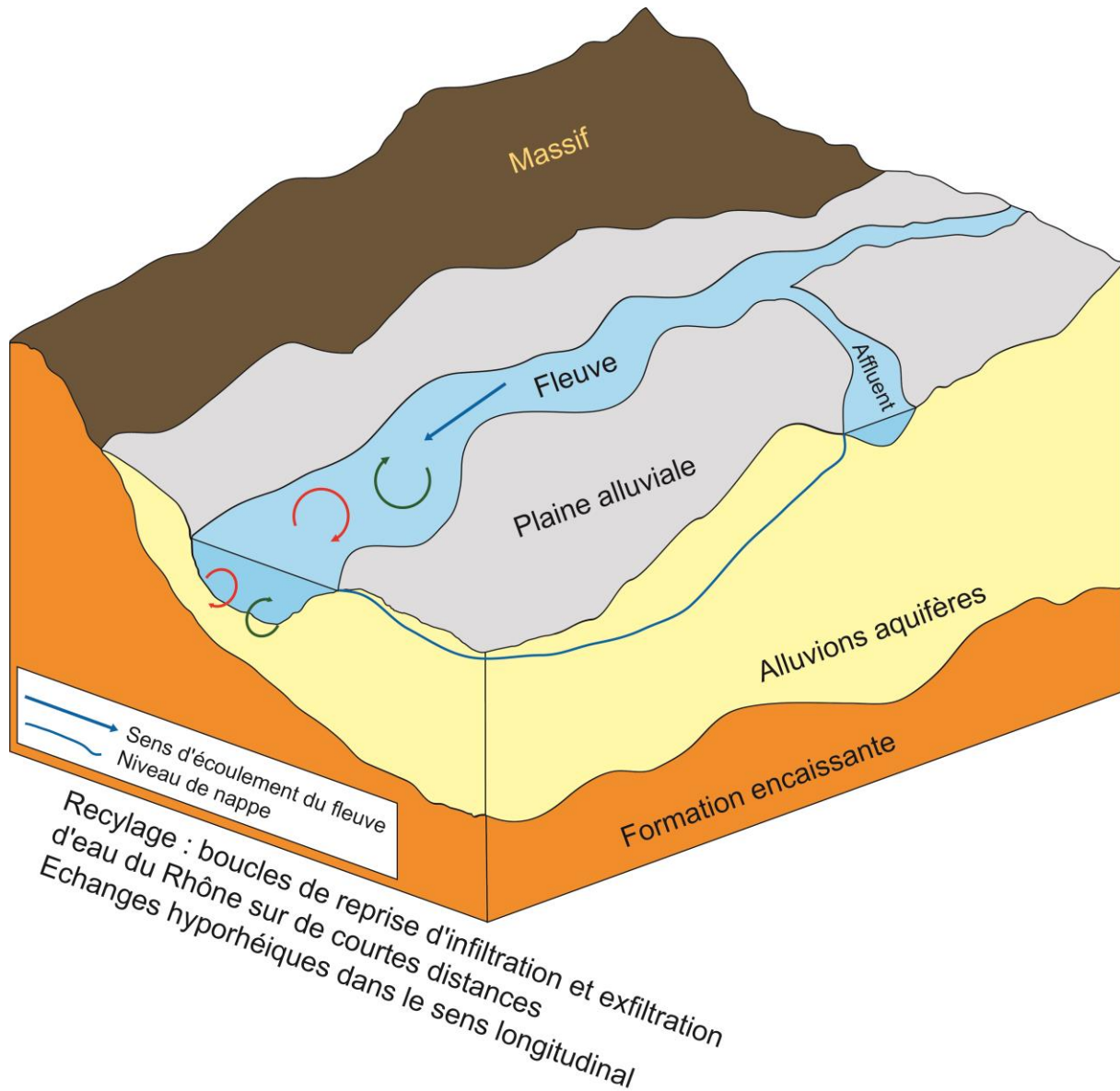


Figure 12 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : vue 3D

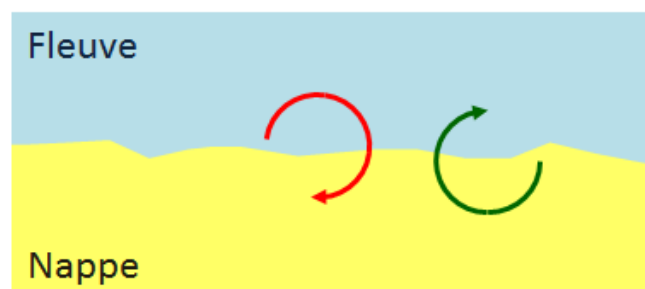


Figure 13 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : représentation simplifiée



Apports mélangés d'eau superficielle recyclée (via la nappe) et de nappe au fleuve (Figure 14 et Figure 15). Cette configuration est détectable par les invertébrés, les macrophytes et la physico-chimie.

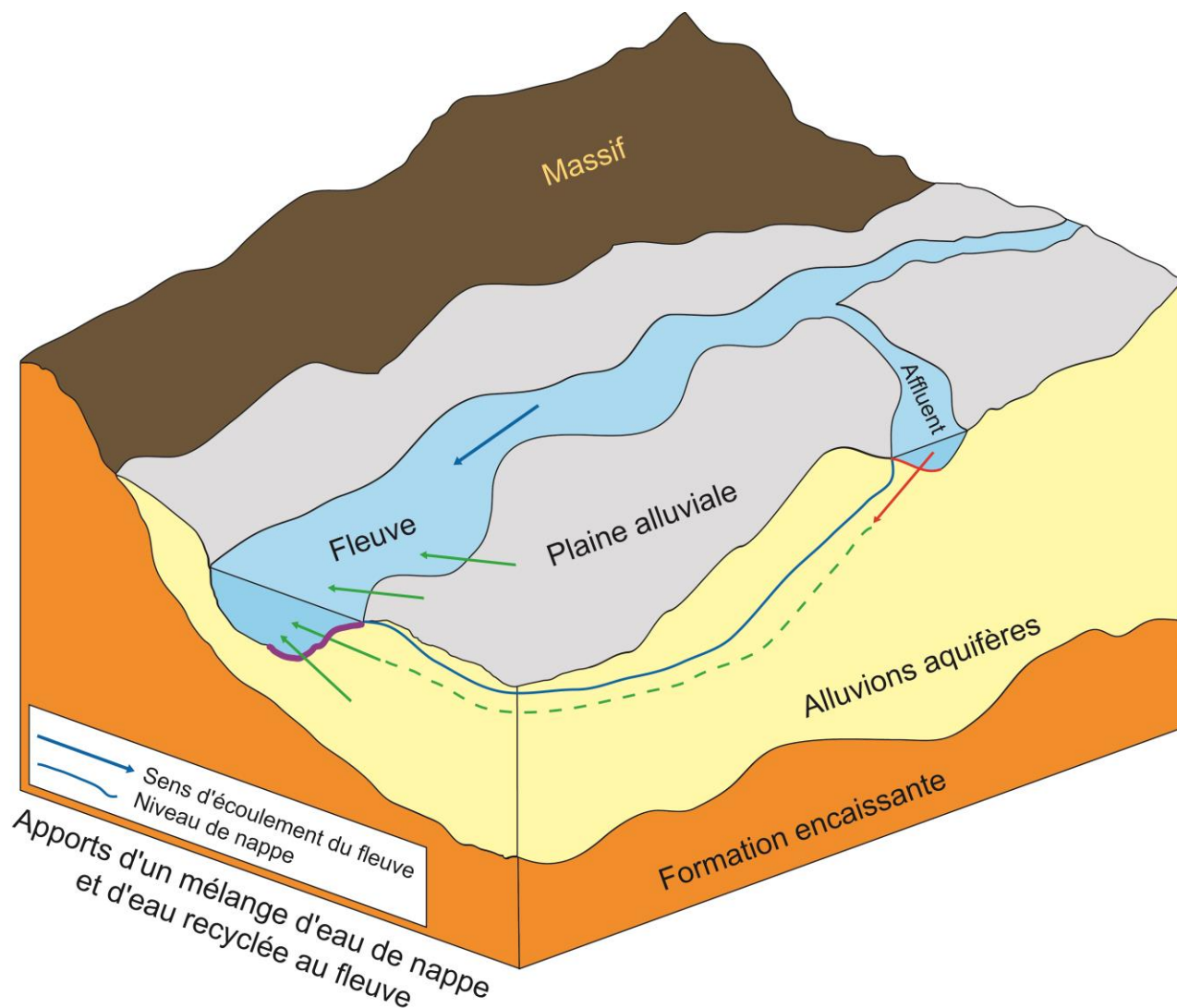


Figure 14 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : vue 3D

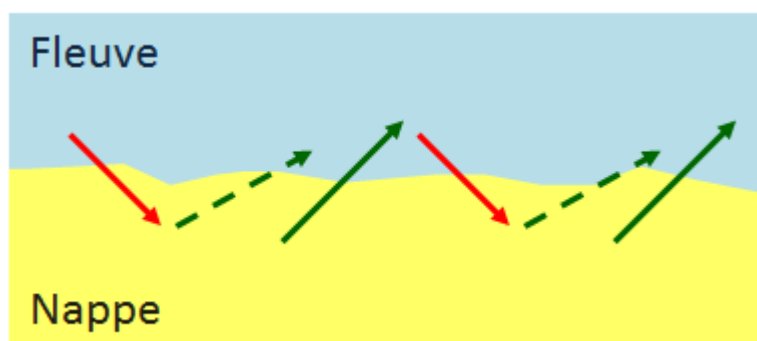


Figure 15 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : représentation simplifiée

1.4. Mises à jour du diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières

Les compléments de diagnostics effectués sur ce secteur changent très peu la caractérisation des échanges nappes/Rhône. Le diagnostic a toutefois été mis à jour suite à la distinction faite entre recyclage et sous-écoulement (voir §1.3 p 15). L'élément nouveau concerne la caractérisation des échanges nappes/Ardèche (essentiellement sur la rive gauche) sur environ 8 km à partir de la confluence avec la Rhône. Compte-tenu de son intérêt et de sa diversité sur les plans hydrogéologiques, aménagements et situations d'échanges nappes/rivières, le diagnostic de ce secteur servira de base en tant qu'exemple et illustration dans le guide méthodologique.

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 3 : Indice de pénalité pour les sens des échanges

PK	Ardèche - Rive gauche							Interprétation des échanges nappes/Rhône ME	Pénalité (sens de l'échange)					
	Hydraulique	Isotopes	Invertébrés			Macrophytes	Physico-chimie		Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle	Physico-chimie eau sup	Isotope
	04/2011		05/2008	08/2008	06/2010	06-07/2008	Interstitielle 06/2010							
	Q (m³/j)		BE	ME	BE	ME/BE	ME							
0	-431							Pour être cohérent il faudrait tel une alimentation de la nappe par l'Ardèche ??						
0.5														
1														
1.5							Nul							
2														
2.5														
3														
3.5	4 477													
4	42													
4.5														
5														
5.5														
6														
6.5														
7														
7.5														
8														

Hydraulique [-5 : peu de mesures piézométriques / niveau de l'Ardèche calés par rapport à la topo]
 Macrophytes [-5 : peu de points de mesure]
 Physico-chimie interstitielle [-5 : mesures ponctuelles / une seule campagne]
 Physico-chimie eau sup [??]
 Isotope [??]

Tableau 4 : Croisement des métriques pour la rive gauche de l'Ardèche

PK	Ardèche - Rive droite							Interprétation des échanges nappes/Rhône ME	Pénalité (sens de l'échange)					
	Hydraulique	Isotopes	Invertébrés			Macrophytes	Physico-chimie		Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle	Physico-chimie eau sup	Isotope
	04/2011		05/2008	08/2008	06/2010	06-07/2008	Interstitielle 06/2010							
	Q (m³/j)		BE	ME	BE	ME/BE	ME							
1.5														

[1] Sous-écoulement de l'Ardèche vers l'Ardèche à travers la Plaine
 Macrophytes [??]

Tableau 5 : Croisement des métriques pour la rive droite de l'Ardèche

Le Tableau 4 et le Tableau 5 présentent le diagnostic des échanges nappes/rivières par croisement des métriques pour les rives gauche et droite de l'Ardèche. Ces tableaux reprennent 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 3). Un tel exercice ce veut être une préparation à l'attribution d'une pénalité ou d'une pondération concernant le diagnostic séparé de chacune des métriques. L'attribution de cette pénalité ou cette pondération par métrique, une fois les modalités établies (phase 5 du projet), devra faciliter l'interprétation synthétique des échanges notamment pour l'utilisateur du guide méthodologique (voir Figure 46 et §3.6 p98). En l'état cet indice de pénalité est en phase de test. Pour faciliter sa lecture, les raisons de la valeur d'indice sélectionnée pour chaque métrique à l'échelle du PK sont explicitées.

L'attribution de pénalité sera aussi testée pour le diagnostic synthétique du secteur de Beauchastel (§2.4 p57).

Donzère-Mondragon - Canal de dérivation - Rive droite													
PK	Hydraulique				Isotopes		Invertébrés		Macrophytes		Physico-chimie		Interprétation des échanges nappes/Rhône
	07/1968	09/1969	06/2008	03/2009	04/2011	04/06/2008	05/2008	08/2008	06/07/2008	eau sup	06/07/2008		
	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)								
	BE	BE	HE	ME	ME	ME	ME	BE	ME/BE		ME/BE		
1	-39 242	-75 454		-86 978	3 424							Possibles apports de nappes potentiellement par les siphons	
1.5	1 328	49										???	
2												???	
2.5				-4 172								???	
3				0								???	
3.5												???	
4												???	
4.5												???	
5				2 782								???	
5.5												???	
6												???	
6.5				-1 187								???	
7												???	
7.5				-513								???	
8				0								???	
8.5												???	
9				6 664								???	
9.5												???	
10				0								???	
10.5												???	
11												???	
11.5				-2 356								???	
12				0								???	
12.5												???	
13				766								???	
13.5												???	
14				0								???	
14.5												???	
15												???	
15.5				-2 787								???	
16				3 052								???	
16.5												???	
17												???	
17.5												???	
18												???	
18.5	13 633	21 343			124 470							???	
19	-994	-990			-30							???	
19.5												???	
20												???	
20.5												???	
21												???	
21.5												???	
22												???	
22.5				3 898								???	
23												???	
23.5												???	
24												???	
24.5	-4 624	-10 274		-3 213								???	
25	4 488	1 084										???	
25.5												???	
26												???	
26.5												???	
27												???	
27.5												???	
28												???	

[1] Sous-écoulement du canal de dérivation vers le contre-canal à travers la berge puis vers la nappe

[2] Sous-écoulement du canal de dérivation vers le contre-canal à travers la berge puis vers la nappe

Interprétation des échanges nappes/Rhône

Macrophytes [???

Physico-chimie [???

Isotope [???

Tableau 6 : Croisement des métriques pour la rive droite du canal de dérivation de Donzère-Mondragon

Donzère-Mondragon - Canal de dérivation - Rive gauche											Interprétation des échanges nappes/Rhône	Pénalité (sens de l'échange)				
PK	Hydraulique					Isotopes		Invertébrés		Macrophytes		Physico-chimie		Isotope		
	07/1968	09/1969	06/2008	03/2009	04/2011	04-06/2008	05/2008	08/2008	06-07/2008	eau sup		Physico-chimie eau sup.				
	Q+ (m³/j) BE	Q+ (m³/j) BE	Q+ (m³/j) HE	Q+ (m³/j) ME	Q+ (m³/j) ME	ME	ME	BE	ME/BE	06-07/2008 ME/BE						
0																
0.5																
1		135 040					Nul	Nul								
1.5																
2																
2.5																
3																
3.5																
4																
4.5																
5																
5.5																
6																
6.5																
7																
7.5																
8																
8.5																
9																
9.5																
10																
10.5																
11																
11.5																
12																
12.5																
13																
13.5																
14																
14.5																
15																
15.5																
16																
16.5																
17																
17.5																
18																
18.5																
19																
19.5																
20																
20.5																
21																
21.5																
22																
22.5																
23																
23.5																
24																
24.5																
25																
25.5																
26																
26.5																
27																
27.5																
28																

[1] Mélange d'eau de nappe et de sous-écoulement du canal d'amenée à travers la berge

[2] Sous-écoulement du Lez vers le canal de dérivation / le contre-canal

Pénalité (sens de l'échange)				
Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie eau sup.	Isotope
0	0	???	???	???
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				

Tableau 7 : Croisement des métriques pour la rive gauche du canal de dérivation de Donzère-Mondragon

Le diagnostic mis à jour des échanges pour le canal de dérivation et le Vieux-Rhône (rives gauches et droites) est présenté du Tableau 6 au Tableau 9.

Une fois le diagnostic synthétique établi, l'interprétation des échanges obtenue est spatialisée et présentée de manière cartographique. La Carte 2 spatialise le diagnostic des échanges nappes/Rhône modifié par rapport à la phase 3 du projet et le nouveau diagnostic nappes/Ardèche.

Tableau 8 : Croisement des métriques pour la rive droite du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon

Donzère-Mondragon - Vieux-Rhône - Rive gauche												
PK	Hydraulique				Isotopes		Invertébrés		Macrophytes	Physico-chimie		Interprétation des échanges nappes/Rhône ME
	07/1968	09/1969	06/2008	03/2009	04/2011	04-06/2008	05/2008	08/2008	06-07/2008	Eau sup.	06-07/2008	
	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)							
	BE	BE	HE	ME	ME	ME	ME	BE	ME/BE		ME/BE	
171	-3 964			126 561								
171.5	827			-1 457								
172		-3 863										
172.5		806		-1 514								
173	145 887											
173.5	-797											
174		134 031										
174.5		-1 781										
175												
175.5												
176												
176.5												
177												
177.5												
178												
178.5												
179												
179.5												
180			-1 692									
180.5			870									
181			19 211									
181.5			-679									
182												
182.5												
183												
183.5												
184												
184.5												
185												
185.5												
186				-93 674								
186.5				651								
187												
187.5												
188												
188.5			-4 985									
189			617									
189.5												
190												
190.5												
191												
191.5												
192												
192.5				4 980								
193				-213								
193.5												
194												
194.5												
195												
195.5												
196												
196.5												
197		-1 887	-247									
197.5		6	6									
198												
198.5												
199												
199.5				4 542								
200				-1 676								

[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

Pénalité (sens de l'échange)				
Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie eau sup.	Isotope
0	0	???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		0	0	???
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
???				
-5	-5			???
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		
		???		

Invertébrés [-5 : absence de faune du au colmatage]

Macrophytes [???

Physico-chimie [???

Isotope [???

Tableau 9 : Croisement des métriques pour la rive gauche du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon

Pour synthétiser toute l'information, et de manière simplifiée, voici comment les échanges sont caractérisés sur le secteur de Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche :

- **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
- **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

Légende

- PK
- == Barrages
- ↻ Recyclage

Rhône et dérivation rives droites

Situation d'échange

- Apports de nappe (+)
- Sous-écoulement de l'Ardèche (+)
- Sous-écoulement du Rhône-Dérivé (-)
- Sous-écoulement du Vieux-Rhône (+)

Rhône et dérivation rives gauches

Situation d'échange

- Apports de nappe (+)
- Apports du Vieux-Rhône (-)
- Sous-écoulement de l'Ardèche (-)
- Sous-écoulement du Rhône-Dérivé (+)

Ardèche rive droite

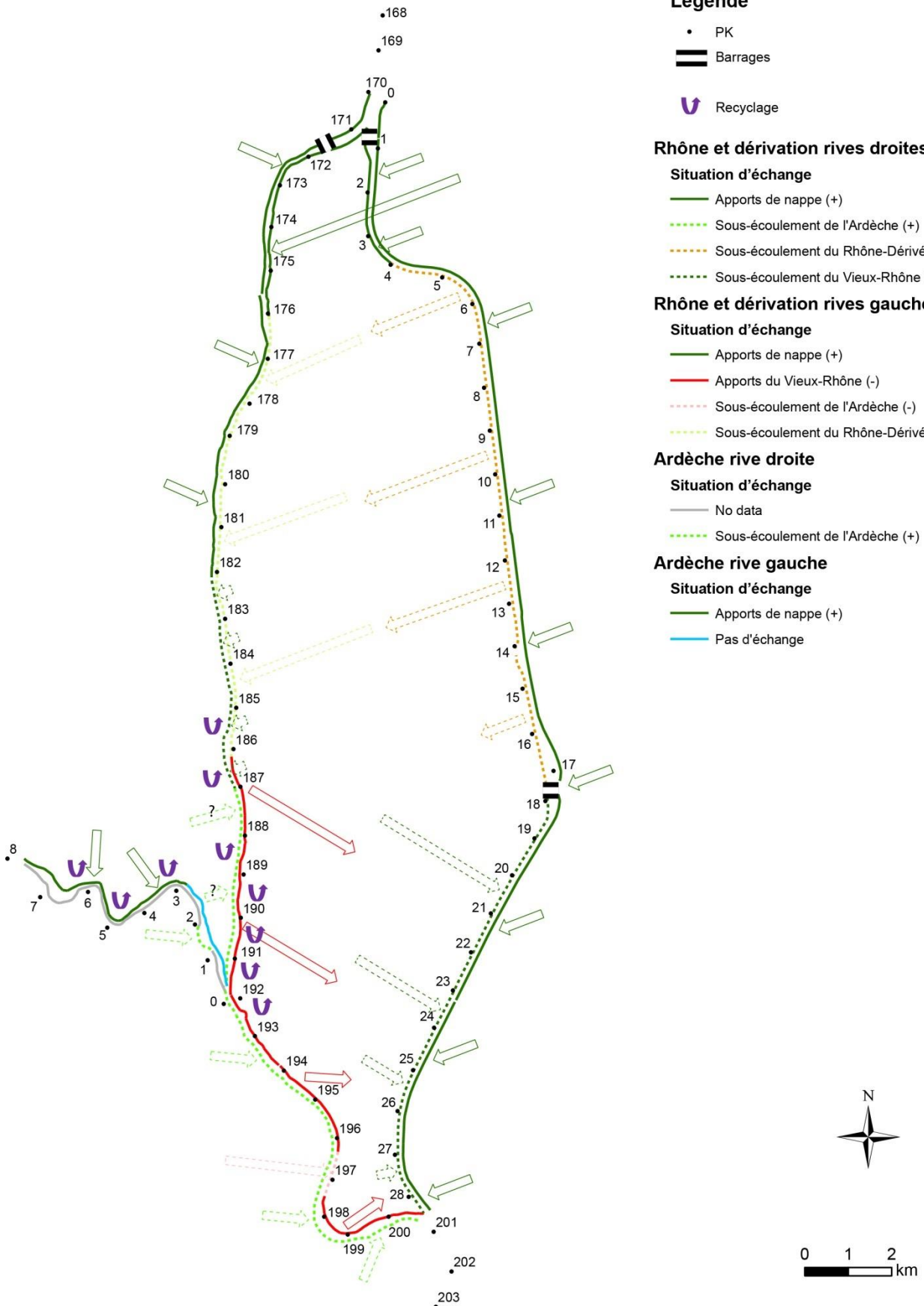
Situation d'échange

- No data
- Sous-écoulement de l'Ardèche (+)

Ardèche rive gauche

Situation d'échange

- Apports de nappe (+)
- Pas d'échange



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

2. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux : diagnostic multi-métriques

2.1. Métrique hydraulique

2.1.1. Données

La caractérisation des échanges nappes/rivières au niveau de la chute CNR de Beauchastel et de la confluence Rhône/Eyrieux a été effectuée à partir des données suivantes :

- Campagnes piézométriques : CNR
- Cotes du talweg du Rhône : données CNR
- Cotes du niveau d'eau du Rhône : données CNR
- Fiches entités hydrogéologiques et couvertures spatiales : données AE-RMC
- Débits du Rhône et de l'Eyrieux : Banque Hydro

2.1.2. Chute CNR de Beauchastel

L'aménagement CNR de Beauchastel est situé à l'aval de Valence entre les aménagements CNR de Bourg-lès-Valence et de Baix-le Logis Neuf. Sur ce secteur, le Rhône délimite les départements de l'Ardèche en rive droite et le département de la Drôme en rive gauche. Sur cette rive les communes riveraines, de l'amont vers l'aval, sont les suivantes : Bourg-lès-Valence, Valence, Portes-lès-Valence, Etoile-sur-Rhône et Livron-sur-Drôme ; sur la rive gauche : Guilharand-Granges, Soyons, Charmes-sur-Rhône, Saint-Georges les Bains, Beauchastel et La Voulte-sur-Rhône (Carte 3).

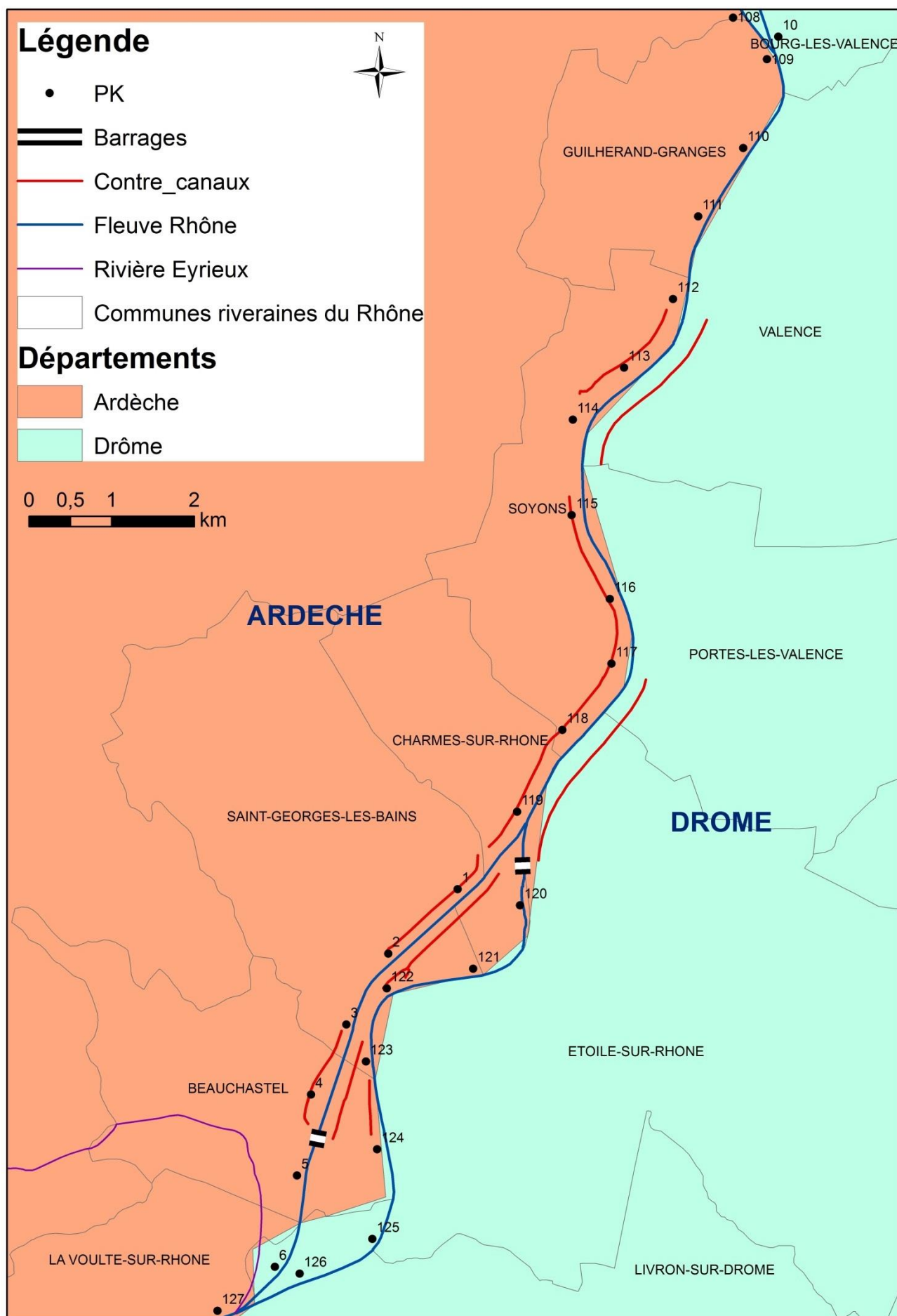
L'aménagement CNR de Beauchastel s'étend du PK 109 au nord de Valence jusqu'au PK 127 en aval de la confluence avec l'Eyrieux. Cet aménagement a été construit entre 1957 à 1963, date de la mise en service. Il produit 1,2 milliard de kWh/an. Le barrage de retenue, court-circuitant le Rhône, est sis au niveau de Charmes-sur-Rhône au PK 119,6. La Vieux-Rhône rejoint le canal de dérivation au PK 126,6. Ce dernier débutant au PK 119,2. L'unité de production hydroélectrique, la centrale-déchargeur-écluse de Beauchastel, se trouve entre les PK 4 et 5 sur le canal de dérivation. Comme tous les aménagements au fil de l'eau, on note la présence de contre-canaux

2.1.3. Situation hydrologique

Les données présentées ci-dessous sont issues de la banque hydro pour la station de Valence. On trouvera dans le Tableau 10 des informations sur les débits caractéristiques du Rhône à cet endroit, ainsi que concernant les périodes étudiées pour le diagnostic des échanges nappes/rivières : octobre 1985, septembre 2003 et mai-juin 2007.

Date	Octobre 1985 Deuxième quinzaine	Septembre 2003 26 au 30	Mai-Juin 2007 30 au 1
Débit moyen mensuel (m ³ /s)	510	641	Mai : 1 220 / Juin : 1 850
Fourchettes de débits journaliers moyens (m ³ /s)	350 à 610	600 à 654	1 510 à 2 110
Situation hydrologique	Basses-eaux du Rhône et de nappe	Basses-eaux du Rhône et de nappe	Moyennes-eaux humides du Rhône et de nappe

Tableau 10 : Débits du Rhône à Valence pour les périodes étudiées



Carte 3 : Principales limites administrative sur le secteur de la chute CNR Beauchastel

Station de Valence, débits caractéristiques :

- Module : 1 400 m³/s (quinquennale sèche : 1 100 m³/s ; quinquennale humide : 1 700 m³/s)
- QMNA (Débit mensuel minimum annuel) : 700 m³/s (Biennale) ; 560 m³/s (quinquennale)
- Crue biennale : 3 800 m³/s
- Débits réservés du Vieux-Rhône à de l'aménagement VNR de Beauchastel: 10m³/s de septembre à mars et 20m³/s d'avril à août.

2.1.4. Entités hydrogéologiques

Sur le secteur de la chute CNR de Beauchastel, il y a essentiellement une seule entité hydrogéologique alluviale en présence. Cette entité est entourée de 4 entités adjacentes et repose sur 2 autres comme substratum (Carte 4).

- **Entité alluviale principale : RHDI4**

Alluvions quaternaires de la vallée du Rhône de Tain l'Hermitage à Viviers

- Perméabilité : 10⁻² à 10⁻⁴ m/s (minimum 10⁻⁶ m/s)
- Epaisseur mouillée : 15 à 25 m (minimum : 5 m / maximum : 35 m)
- Profondeur de l'eau : 2 à 5 m
- Qualité : eaux bicarbonatées calciques
- Vulnérabilité : nappes en sensibilités fortes

- **Aquifères adjacents à RHDI4 :**

603c (rive droite) : Vivarais Cévennes / Doux et Heyrieux (Formations cristallophylliennes et magmatiques)

603k (rive droite) : Formations cristallophylliennes et magmatiques dans les bassins versants de l'Eyrieux et de l'Ouvèze

154b1 (rive gauche) : Alluvions anciennes des basses-terrasses entre la confluence de l'Isère et de la Drôme

154c (rive gauche) : Plaine de Valence Sud

- **Substratum de RHDI4 :**

MIO3 (nord du secteur) : Formations molassiques du Bas-Dauphiné

PLIO3 (sud du secteur) : Argiles bleues du Pliocène inférieur de la moyenne Vallée du Rhône

603c (bordure ouest du secteur) : Vivarais Cévennes / Doux et Heyrieux (Formations cristallophylliennes et magmatiques)

2.1.5. Caractérisation des échanges nappes/rivières**2.1.5.1. Secteur Guilherand – Rive droite – octobre 1985 (2^e quinzaine)**

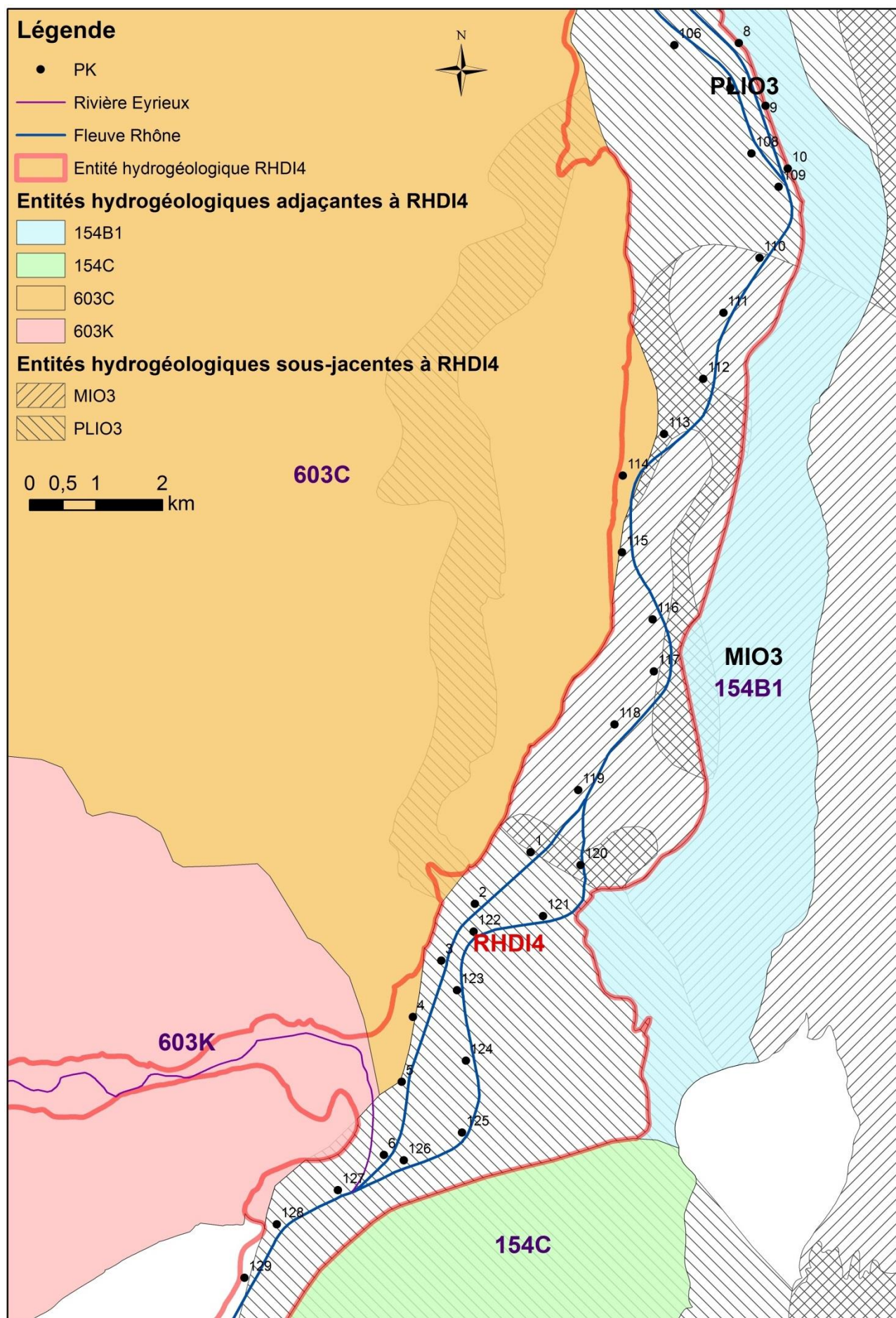
Secteur	Entité hydrogéologique	PK	Cours d'eau Rive	Gradient hydraulique moyen (‰)	Q (m ³ /j)	Longueur (m)	Q (m ³ /j/km)
1	RHDI4	109 à 112	Rhône Rive droite	0,97	-24 392,89	3460,47	-7 047,97
2	RHDI4	112 à 113	Contre-canal Rhône Rive droite	0,07	82,63	652,73	126,47
3	RHDI4	113 à 114	Contre-canal Rhône Rive droite	0,86 0	-307,58 0	165,70 673,03	-1 854,35 0

Tableau 11 : Caractérisation des échanges nappes/Rhône – secteur Guilherand

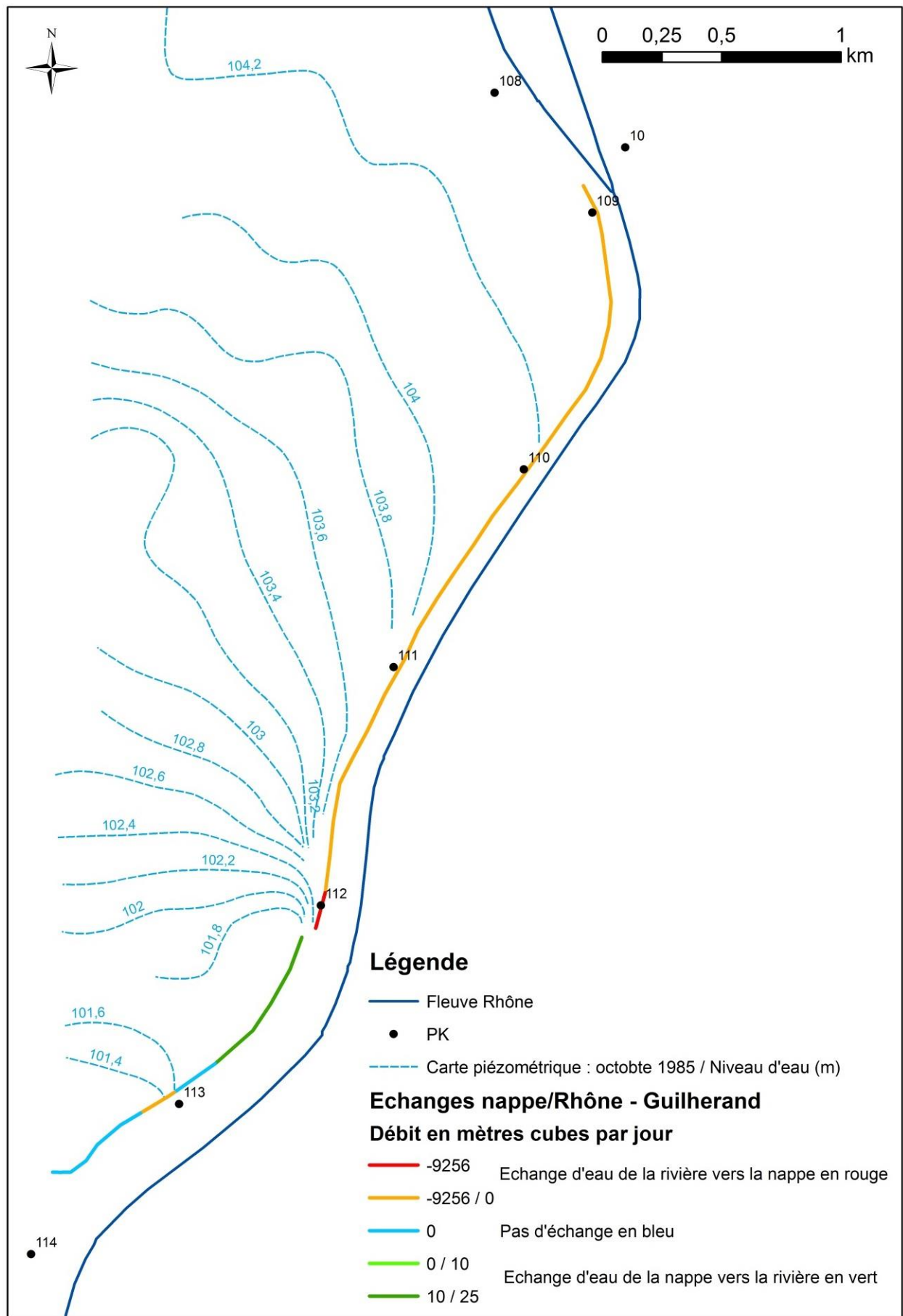
En vert les secteurs où la nappe alimente la rivière

En rouge les secteurs où la rivière alimente la nappe

En bleu les secteurs à l'équilibre



Carte 4 : Entités hydrogéologiques en présence sur le secteur de Beauchastel



Carte 5 : Caractérisation des échanges nappes/ Rhône – secteur Guilherand

A l'amont du secteur, le Rhône alimente la nappe. L'intensité de l'échange augmente vers l'aval.

Plus à l'aval, le contre-canal est alimenté par la nappe à l'amont, puis l'échange s'inverse ou devient nul à l'aval.

Le Tableau 11 synthétise les situations d'échanges sur ce secteur et la Carte 5 les spatiale pour une situation de basses-eaux.

2.1.5.2. Secteur de Beauchastel – 26-30 septembre 2003 – basses-eaux

Le Tableau 12 synthétise les situations d'échanges sur ce secteur et la Carte 6 les spatiale.

En basses-eaux, d'une manière générale la nappe alimente le Rhône ou les contre-canaux. On observe un fort gradient de nappe du PK 3 au PK 4 du canal de dérivation. Il semble que pour ce tronçon le niveau d'eau utilisé pour fabriquer la carte piézométrique n'est pas représentatif de la nappe alluviale. On observe aussi quelques situations pour lesquelles le Rhône et les contre-canaux alimentent la nappe :

- influence potentiel d'un pompage : PK 124 rive droite du Vieux-Rhône
- influence potentiel du barrage-usine : PK 4 à 4,5 en rive droite et PK 3 à 4,5 en rive gauche du canal de dérivation
- influence potentiel de la retenue aval : PK 5,5 à 6 en rive droite et rive gauche du canal de dérivation

La nappe alimente l'Eyrieux au niveau de la confluence.

Comme au niveau de la confluence Rhône/Ardèche, le secteur de la confluence Rhône/Eyrieux et de la restitution du canal de dérivation au Vieux-Rhône, sur lequel les échanges sont faibles pourrait être considéré à l'équilibre.

Secteur	Entité hydrogéologique	PK	Cours d'eau Rive	Gradient hydraulique moyen (‰)	Q (m³/j)	Longueur (m)	Q (m³/j/km)
1	RHDI4	115 à 119,5	Contre-canal Rhône Rive droite	0,36	2 563,98	4 314,33	594,30
2	RHDI4	0,5 à 2	Contre-canal Dérivation Rive droite	0,41	1 377,25	1 672,72	823,36
3	RHDI4	119,5 à 126	Vieux-Rhône Rive gauche	0,59	18 737,82	6 722,47	2 787,34
4	RHDI4	122,5 à 126 <i>124</i>	Vieux-Rhône Rive droite	0,66 <i>1,11</i>	5 374,53 <i>-2 448,35</i>	3 114,05 <i>541,25</i>	1 725,89 <i>-4 522,63</i>
5	RHDI4	3 à 4,5	Contre-canal Dérivation Rive gauche	0,10	-1 947,41	1 228,30	-1 585,46
6	RHDI4	4,5 à 5,5 <i>5,5 à 6</i>	Dérivation Rive gauche	0,49 <i>0,004</i>	3 389,47 <i>-11,55</i>	1 168,55 <i>598,68</i>	2 900,57 <i>-19,27</i>
7	RHDI4	3 à 4 <i>4 à 4,5</i>	Contre-canal Dérivation Rive droite	11,02 <i>0,96</i>	-	734,03 <i>505,45</i>	-
8	RHDI4	4,5 à 5,5 <i>5,5 à 6</i>	Dérivation Rive droite	0,31 <i>0,004</i>	1 231,27 <i>-12,05</i>	949,71 <i>979,53</i>	1 296,47 <i>-12,31</i>
9	RHDI4	Confluence Rhône	Eyrieux Rive gauche	0,15	1 227,08	1 903,34	644,70

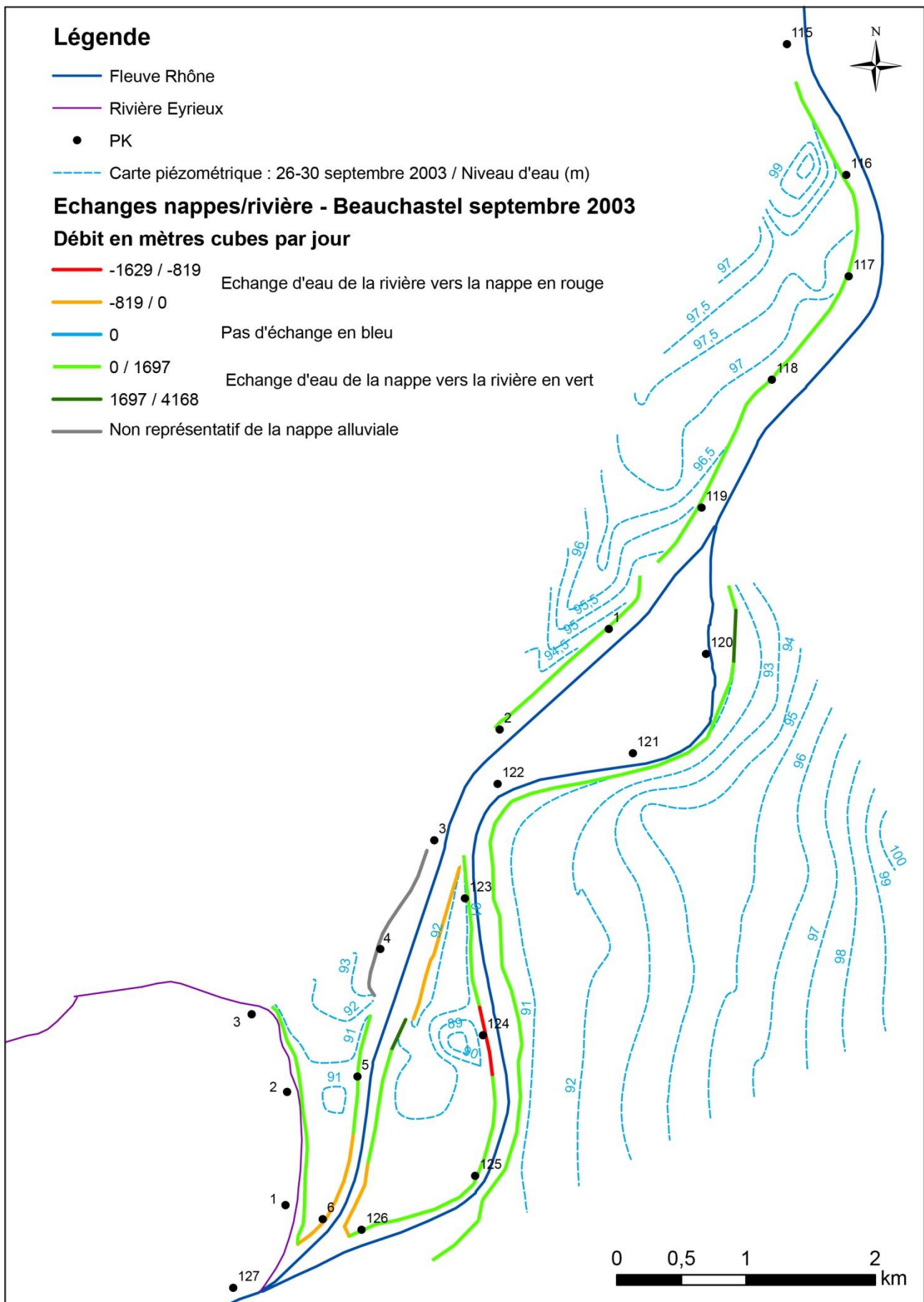
Tableau 12 : Caractérisation des échanges nappes/Rhône – secteur Beauchastel – septembre 2003

En vert les secteurs où la nappe alimente la rivière

En rouge les secteurs où la rivière alimente la nappe

En bleu les secteurs à l'équilibre

En gris les secteurs non représentatifs de la nappe alluviale



Carte 6 : Caractérisation des échanges nappes/ Rhône – secteur Beauchastel – septembre 2003

2.1.5.3. Secteur de Beauchastel – 1 juin 2007 – moyennes-eaux humides

Le Tableau 13 synthétise les situations d'échanges sur ce secteur et la Carte 7 les spatialise.

En moyennes-eau humides la situation change. La nappe alimente toujours le Rhône et les contre-canaux à l'amont du secteur en rive droite et au niveau du Vieux-Rhône en rive gauche. On observe l'influence potentielle d'un pompage (PK 117,5) sur la partie amont qui semble inverser les échanges.

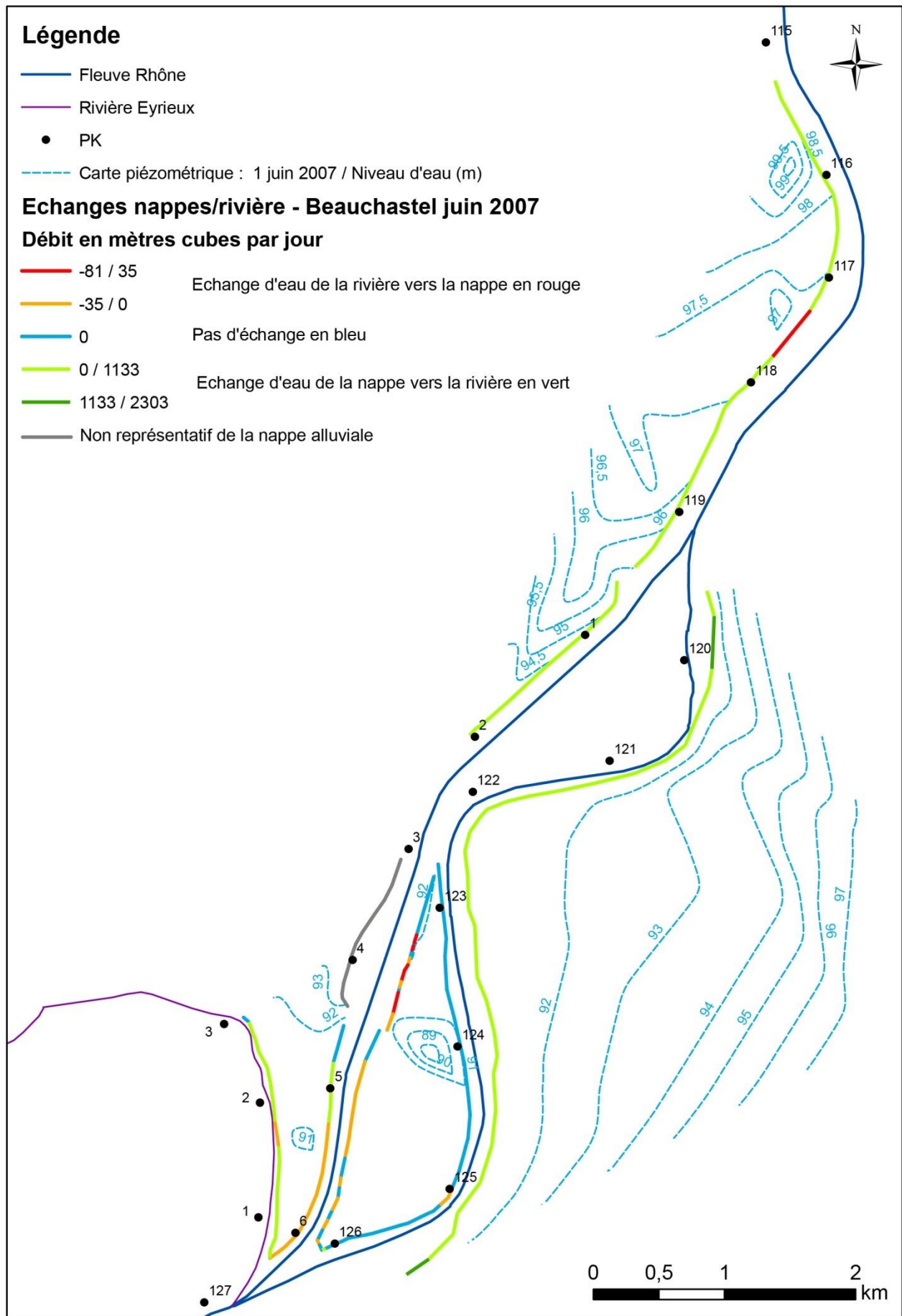
A l'aval du secteur, la tendance est à l'équilibre notamment en rive droite du Vieux-Rhône. En rive gauche du canal de dérivation, on observe quelques secteurs où le fleuve alimente la nappe. En rive droite, on observe un fort gradient de nappe entre les PK 3 et 4. Entre les PK 4 et 6 les échanges d'eau sont faibles. Comme pour la période précédente, il semble que pour ce tronçon le niveau d'eau utilisé pour fabriquer la carte piézométrique n'est pas représentatif de la nappe alluviale. L'Eyrieux quant à lui draine la nappe, même si l'intensité des échanges très faible.

Le secteur de la confluence Rhône-Eyrieux et de la restitution du canal de dérivation au Vieux-Rhône, sur lequel les échanges sont faibles pourrait être considéré à l'équilibre comme en septembre 2003.

Secteur	Entité hydrogéologique	PK	Cours d'eau Rive	Gradient hydraulique moyen (‰)	Q (m³/j)	Longueur (m)	Q (m³/j/km)
1	RHDI4	115 à 119,5 <i>117,5</i>	Contre-canal Rhône	0,27	1 594,50	3 865,72	412,47
			Rive droite	<i>0,19</i>	<i>-149,60</i>	<i>448,61</i>	<i>-332,63</i>
2	RHDI4	0,5 à 2	Contre-canal Dérivation	0,31	1 114,82	1 672,82	666,47
			Rive droite				
3	RHDI4	119,5 à 126	Vieux-Rhône	0,40	13 866,85	6 722,47	2 062,76
			Rive gauche				
4	RHDI4	122,5 à 126 <i>125</i> <i>126</i>	Vieux-Rhône Rive droite	+ (122,5 à 124)	0	3 494,23	0
				- (124 à 125,5)			
				+ (125,5 à 126)			
				<i>0,2</i>			
5	RHDI4	3,5 à 4,5 <i>3 à 4</i>	Contre-canal Dérivation	0,56	-293,76	626,74	-468,71
			Rive gauche	-	0	<i>604,56</i>	0
6	RHDI4	5 à 6 <i>4,5 à 6</i>	Dérivation	0,05	-79,00	1 059,51	-74,57
			Rive gauche	-	0	<i>707,73</i>	0
7	RHDI4	3 à 4,5	Contre-canal Dérivation) Rive droite	+	-	678,72	-
		4		4,57		164,35	
		<i>4 à 4,5</i>		<i>0,71</i>		<i>396,41</i>	
8	RHDI4	5 à 6	Dérivation Rive droite	0,04	-59,00	1 164,42	-50,67
		5		0,01	27,59	477,36	57,79
		<i>4,5</i>		+	0	<i>52,52</i>	0
9	RHDI4	Confluence Rhône	Eyrieux Rive gauche	0,07	28,19	1 670,74	16,87
				<i>0,14</i>	<i>-5,90</i>	<i>180,10</i>	<i>-35,78</i>
				+	0	<i>52,52</i>	0

Tableau 13 : Caractérisation des échanges nappes/Rhône – secteur Beauchastel – juin 2007

En vert les secteurs où la nappe alimente la rivière
 En rouge les secteurs où la rivière alimente la nappe
 En bleu les secteurs à l'équilibre
 En gris les secteurs non représentatifs de la nappe alluviale



Carte 7 : Caractérisation des échanges nappes/ Rhône – secteur Beauchastel – juin 2007

2.1.5.4. Bilan

Le Tableau 14 et le Tableau 15 présentent un bilan comparatif des flux échangés entre les nappes et les rivières en présence pour les deux périodes étudiées : le premier (Tableau 14) présente les échanges agrégés par berge ; le second (Tableau 15) présente les échanges agrégés globalement.

PK	Septembre 2003				Juin 2007		
	Cours d'eau Rive	Q (m³/j)	Longueur (m)	Q (m³/j/km)	Q (m³/j)	Longueur (m)	Q (m³/j/km)
115 à 119,5 4,5 à 6 7 916,3 m	Rhône et Dérivation Rive droite	5 172,50	6 936,76	745,67	2 736,91	6 015,80	454,95
	Rhône et Dérivation Rive droite	-12,05	979,53	-12,30	-208,22	1 613,02	-129,09
	Rhône et Dérivation Rive droite	0	0	0	-	287,45	0
3 à 6 2 995,5 m	Dérivation Rive gauche	3 389,47	1 168,55	2 900,58	0	0	0
	Dérivation Rive gauche	-1 958,94	1 826,98	-1 072,24	-372,76	1 686,25	-221,06
	Dérivation Rive gauche	0	0	0	-	1 309,29	0
122,5 à 126 3 655,4 m	Vieux-Rhône Rive droite	5 374,53	3 114,05	1 725,90	3,32	30,27	109,68
	Vieux-Rhône Rive droite	-2 448,35	541,25	-4 523,51	-40,39	130,90	-308,56
	Vieux-Rhône Rive droite	0	0	0	+ et -	3 494,23	0
119,5 à 126 6 772,5 m	Vieux-Rhône Rive gauche	18 737,82	6 722,48	2 787,34	13 866,85	6722,48	2 062,76
- 1 903,4 m	Eyrieux Rive droite	1 227,08	1 903,24	644,70	28,19	1 670,74	16,87
	Eyrieux Rive droite	0	0	0	-5,90	180,10	-32,76
	Eyrieux Rive droite	0	0	0	+	52,52	0

Tableau 14 : Comparaison des flux d'eau échangés entre la nappe et la rivière en septembre 2003 et en juin 2007

En vert les secteurs où la nappe alimente la rivière
En rouge les secteurs où la rivière alimente la nappe
En bleu les secteurs à l'équilibre

La sectorisation par rive nous donne les renseignements suivants (Tableau 14) :

- en rive droite du Rhône et de la dérivation la nappe alimente plus fortement le cours d'eau en situation de basses-eaux. Une tendance plus marquée à l'équilibre apparaît sur certains secteurs.
- en rive gauche du Rhône et de la dérivation si le cours d'eau est majoritairement drainant en basses-eaux, il alimente plus la nappe en moyennes-eaux en linéaire. Une diminution de l'intensité des échanges et une tendance à l'équilibre caractérisent la période de moyennes-eaux.
- en rive droite du Vieux-Rhône la nappe est majoritairement drainée en basses-eaux, alors qu'en moyennes-eaux on observe une situation d'équilibre marquée.

- En rive gauche du Vieux-Rhône, on observe une légère diminution des apports de nappes au fleuve en moyennes-eaux par rapport aux basses-eaux.
- L'Eyrieux quant à lui passe d'une situation de cours d'eau drainant la nappe (en basses-eaux) à une situation de quasi équilibre en moyennes-eaux.

Flux d'eau	Septembre 2003			Juin 2007		
	Q (m³/jour)	Longueur (m)	Q (m³/jour/km)	Q (m³/jour)	Longueur (m)	Q (m³/jour/km)
Pas d'échange	0	0	0	0	5 143,49	0
Nappe vers rivière	33 901,40	19 845,17	1 708,29	16 635,27	14 639,28	1 152,08
Rivière vers nappe	-4 119,36	3 347,76	-1 320,09	-627,27	3 610,27	-173,74

Tableau 15 : Comparaison globale de flux d'eau échangés entre septembre 2003 et juin 2007

En vert les secteurs où la nappe alimente la rivière

En rouge les secteurs où la rivière alimente la nappe

En bleu les secteurs à l'équilibre

La sectorisation globale nous donne les renseignements suivants (Tableau 15) pour une longueur de linéaire de berge totale d'environ 23 193 m :

- les situations d'équilibres sont nettement plus fréquentes en moyennes-eaux
- l'alimentation des cours d'eau par les nappes diminue fortement en moyennes-eaux
- l'alimentation des nappes par les cours d'eau augmente fortement en moyennes-eaux.

2.2. Métrique invertébrés souterrains

2.2.1. Méthode de caractérisation des origines hydrauliques par leurs signatures faunistiques

Le secteur de Brégnier-Cordon (phases 1 et 2 du projet) s'est révélée pauvre en faune stygobie, les glaciations du Quaternaire ayant éliminé une grande partie des invertébrés souterrains. Au contraire, celui de Donzère-Mondragon (phase 3 projet) héberge une faune plus diversifiée, ce résultat pouvant être expliqué par sa localisation beaucoup plus au sud de la limite des glaciations, ainsi que par l'échantillonnage d'un plus grand nombre de sites dans les affluents, les puits et les sources.

Pour cette phase 4, nous avons travaillé dans le secteur du village de Beauchastel et de la rivière Eyrieux, au sud de Valence. Le contexte climatique est le même que pour le secteur de Donzère-Mondragon, mais le contexte géologique est différent. En effet, dans ce secteur, les rivières coulent sur des formations de socle. Nous nous attendons donc à observer un contraste très fort entre l'Eyrieux (affluent du Rhône à Beauchastel) qui draine des aquifères granitiques et le Rhône. Ce choix de secteur devrait permettre également de tester la limite des conditions d'application de notre indicateur dans des eaux plus acides.

Tout comme le rapport de phase 3, nous avons caractérisé la structuration spatiale de la faune hyporhéique afin d'identifier les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Deux approches complémentaires sont utilisées :

- l'utilisation de l'ensemble des espèces stygobies pour caractériser la direction et l'intensité des échanges. Comme dans la phase 3, nous allons utiliser l'abondance des individus stygobies (c'est-à-dire le nombre d'individus adaptés au milieu souterrain) pour mettre en évidence l'arrivée des eaux de nappe ;

- la recherche d'espèces caractéristiques des différents aquifères. Dans le rapport de phase 1, le repérage d'espèces vivant dans les nappes profondes avait permis de localiser les arrivées d'eaux souterraines profondes dans le secteur du Mont Cordon. De même, dans le rapport de phase 3, des espèces caractéristiques du versant drômois et du Rhône ont pu confirmer des alimentations en eau souterraine provenant des aquifères de la Drôme.

Comme prévu, nous avons aussi mesuré un certain nombre de paramètres physico-chimiques : température, conductivité électrique, pH, oxygène dissous (ces quatre paramètres pris en surface et en interstitiel sur le terrain), nitrate et silice (mesurés au laboratoire).

2.2.2. Stations échantillonnées

Cette région n'ayant jamais été prospectée, nous n'avons pas de données issues de la littérature.

La majorité de la campagne de prélèvements a été réalisée début juillet 2012, avec des niveaux hydrologiques moyens, après stabilisation des débits pendant trois semaines.

Au final, ce sont 30 sites qui ont été échantillonnés (Figure 16) :

- 20 sites en milieu hyporhéique, comprenant l'ensemble des types de milieux aquatiques et les principaux affluents : 2 stations dans le Vieux-Rhône en rive droite et gauche (en aval du barrage de Charmes-sur-Rhône), 9 stations dans les contre-canaux (6 en rive droite et 1 en rive gauche, réparties le long du canal d'amenée, ainsi que 2 autres dans les contre-canaux à l'amont du barrage de Charmes-sur-Rhône, sur les deux rives), 7 stations dans les affluents en rive droite (dans l'Eyrieux entre Beauchastel et St-Laurent-du-Pape, et dans le ruisseau le Boyon, affluent rive droite de l'Eyrieux, à environ 500 m en amont de la confluence), et 2 stations dans les affluents en rive droite (dans la Véore, au lieu-dit « les Contents », et dans le Petit Rhône, en aval de la « Maison Boucher »).

- 10 échantillons dans 5 sources (prélevées fin août) afin d'identifier la faune caractéristique des eaux souterraines de cette partie septentrionale de l'Ardèche, réparties de Beauchastel à St-Laurent-du-Pape : 3 échantillons dans des sources en bordure du ruisseau de la Crotte, 2 sur le Banerol, 1 sur le ruisseau de la Figuière, 1 sur le ruisseau du Thouat et enfin 3 échantillons dans des sources près du lieu-dit « la Béraude ».

Aucun puits n'a pu être prélevé, car ils étaient soit obturés, soit équipés par des systèmes de pompage. Lors de cette campagne, 3 échantillons de 10 litres (par pompage Bou-Rouch à 50 cm de profondeur) ont été effectués à chaque station prospectée en milieu interstitiel. Chaque prélèvement était ensuite tamisé à 100 μm et conservé dans l'alcool à 96°. A cause d'un colmatage important, un seul prélèvement a pu être fait sur la station 4 du contre-canal droit du Rhône.

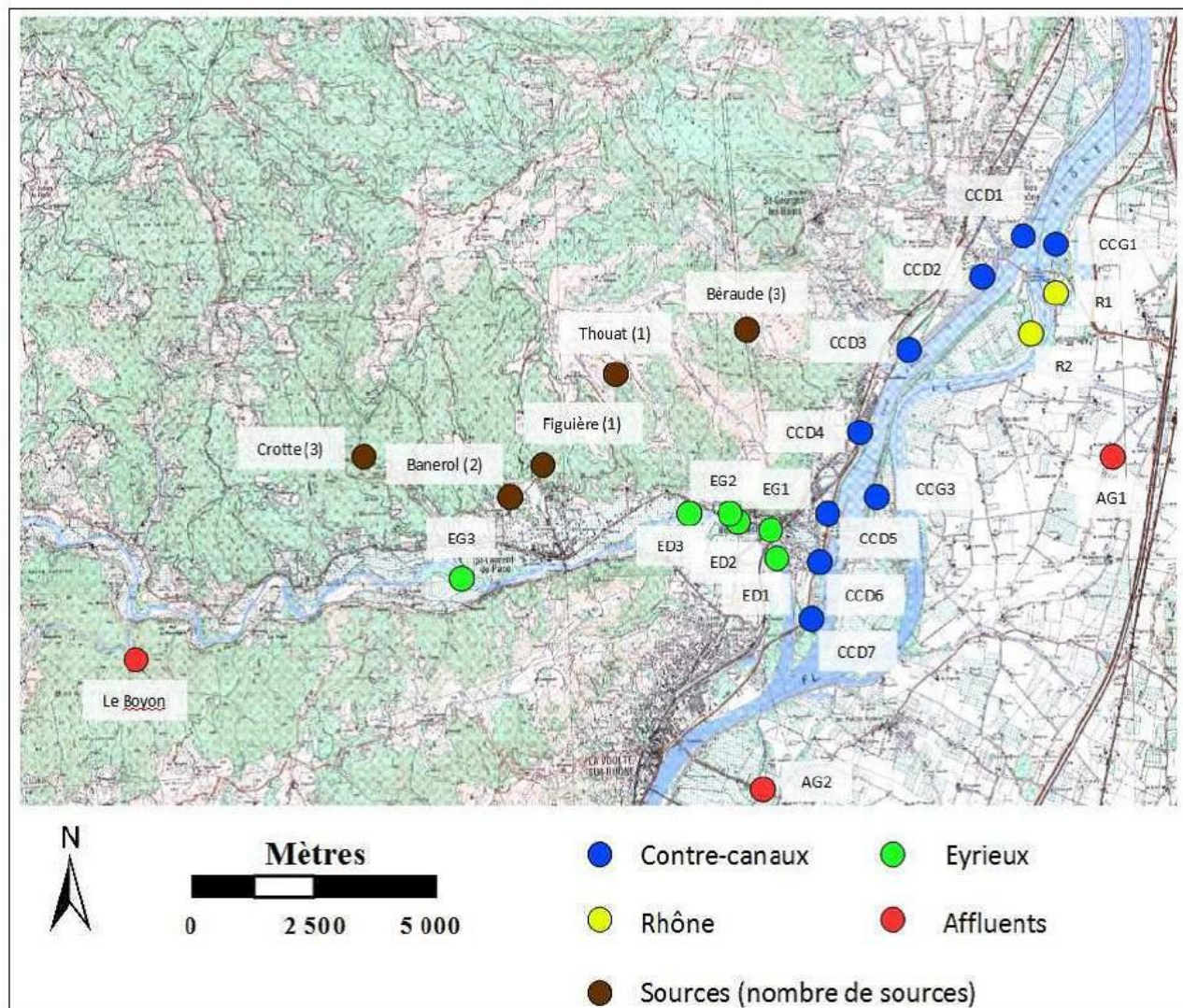


Figure 16 : Répartition des stations d'invertébrés sur le secteur de Beauchastel

2.2.3. Analyse et interprétation des échanges sur le secteur Beauchastel à partir des invertébrés

Lors des précédentes campagnes, la diversité en espèces stygobies était de 10 pour Brégnier-Cordon, et de 23 pour Donzère-Mondragon.

Pour ce qui est du secteur de Beauchastel, la richesse faunistique n'est que de 9 espèces stygobies. Cette très faible diversité peut s'expliquer par la présence du socle granitique sur lequel coulent l'Eyrieux et ses affluents dans ce secteur, et, de ce fait, de l'eau peu minéralisée (conductivité inférieure à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et faiblement chargée en calcium. Ce manque freine la croissance des mollusques et des crustacés qui représentent la majorité des espèces stygobies, et qui dans ces conditions, n'arrivent pas à fixer suffisamment le calcium.

La distribution des espèces stygobies entre les différents secteurs est donnée dans le Tableau 16 ci-dessous :

Groupe taxonomique	Espèces	Versant côté Ardèche	Rhône	Versant côté Drôme
Ostracode	<i>Fabaeformiscandona breuili</i>	x		
Ostracode	<i>Cf. Fabaeformiscandona (juvénile)</i>	x		
Ostracode	<i>Pseudocandona zchokekei</i>	x		
Copépode	<i>Parastenocaris sp.</i>	x		
Syncarides	<i>Parabathynellidae</i>	x		
Amphipode	<i>Salentinella juberthiae</i>		x	
Ostracode	<i>Cryptocandona gr kieferi</i>	x	x	
Amphipode	<i>Niphargopsis casparyi</i>	x	x	
Amphipode	<i>Niphargus rhenorhodanensis</i>	x	x	

Tableau 16 : Distribution des espèces stygobies dans les différents secteurs

- Nous avons récolté 5 espèces que l'on ne retrouve que sur les affluents et sources, latéralement côté Ardèche : *Fabaeformiscandona breuili*, (ainsi que les juvéniles indéterminés d'une espèce du même genre) et *Pseudocandona zchokekei* sont connues pour leur caractères ubiquistes ne traduisant pas d'apports très profonds. L'Harpacticoïde souterrain *Parastenocaris sp.* et le Syncaride de la famille des *Parabathynellidae* sont des espèces pouvant au contraire caractériser des origines profondes des eaux ;

- *Cryptocandona gr kieferi* est une espèce souterraine assez ubiquiste récoltée ici aussi bien côté ardéchois que sur le Rhône lui-même et qui aurait aussi bien pu se rencontrer sur le versant côté Drôme ;

- *Salentinella juberthiae* serait plutôt caractéristique de la nappe d'accompagnement du Rhône et d'affinité plus forte avec le milieu souterrain ;

- En revanche, *Niphargopsis casparyi* et *Niphargus rhenorhodanensis* sont des espèces plutôt caractéristiques du sous-écoulement du fleuve et de la nappe d'accompagnement du Rhône, elles ont été régulièrement récoltées sur les versants ardéchois et drômois du fleuve ;

- Aucune espèce stygobie n'a été échantillonnée sur les sites prospectés côté drômois au cours de cette étude. La granulométrie assez fine observée sur un des deux sites (AG2) pourrait en partie expliquer cette absence.

La Figure 17 présente l'abondance des espèces stygobies.

- Les affluents de rive droite

C'est dans ces affluents, en rive droite du Rhône sur le versant côté Ardèche, que la faune stygobie est la plus abondante, avec 8 espèces trouvées (Ostracodes, Amphipodes, Copépodes et Syncarides). La présence de ces organismes semble traduire des apports souterrains dans l'Eyrieux et le Boyon, sans doute par recyclage (boucles de reprise d'infiltration et d'exfiltration) et plus localement des apports profonds (la présence du Copépode *Parastenocaris sp.* et du Syncaride *Parabathynellidae* identifiés en rive droite de l'Eyrieux pourraient indiquer de telles arrivées).

- Le Rhône court-circuité

Seulement 2 stations ont pu être échantillonnées sur le Rhône court-circuité, en raison notamment de l'absence de bancs de galets. Aucun organisme stygobie n'a pu être collecté. De même, la lône dans laquelle ont été prélevés les échantillons en rive gauche est colmatée par des alluvions et ne semble pas héberger de faune souterraine. Les échanges nappe-rivière sont donc faibles à nuls à ce niveau.

- *Les affluents en rive gauche*

Pour les affluents côté Drôme (La Véore et le Petit Rhône), aucune espèce stygobie n'a été trouvée.

- *Les contre-canaux*

Dans le contre-canal gauche, deux espèces stygobies ubiquistes (l'Ostracode *Cryptocandona gr kieferi* et l'Amphipode *Niphargopsis casparyi*) ont été trouvées à l'amont du barrage de Charmes-sur-Rhône, et pourraient indiquer un apport du Rhône par infiltration à travers les digues (noté sous-écoulement en provenance du Rhône).

Dans le contre-canal droit, la même espèce d'Ostracode, ainsi que l'Amphipode *Niphargus rhenorhodanensis* (espèce elle aussi ubiquiste), sont retrouvés au même niveau (en amont du barrage), et semble donc confirmer une fuite d'eau du Rhône à travers les digues, vers les contres-canaux.

Un peu plus en aval, on trouve l'Amphipode *Salentinella juberthiae* dans le contre-canal droit. Cette espèce, initialement observée à grande profondeur, pourrait indiquer des apports phréatiques ou d'eau profonde associée à la nappe alluviale du Rhône.

C'est dans ce secteur qu'un affluent du Rhône, le Turzon, arrive et pourrait provoquer localement une perturbation des échanges.

- *Les sources (zone de socle)*

Les sources ne nous apportent que peu d'informations, puisqu'une seule espèce stygobie ubiquiste y a été trouvée (*Fabaeformiscandona breuili*) près du lieu-dit « La Béraude ». Le contexte hydrogéologique (formations aquifères, taille des interstices) peut expliquer le faible nombre d'espèces échantillonnées.

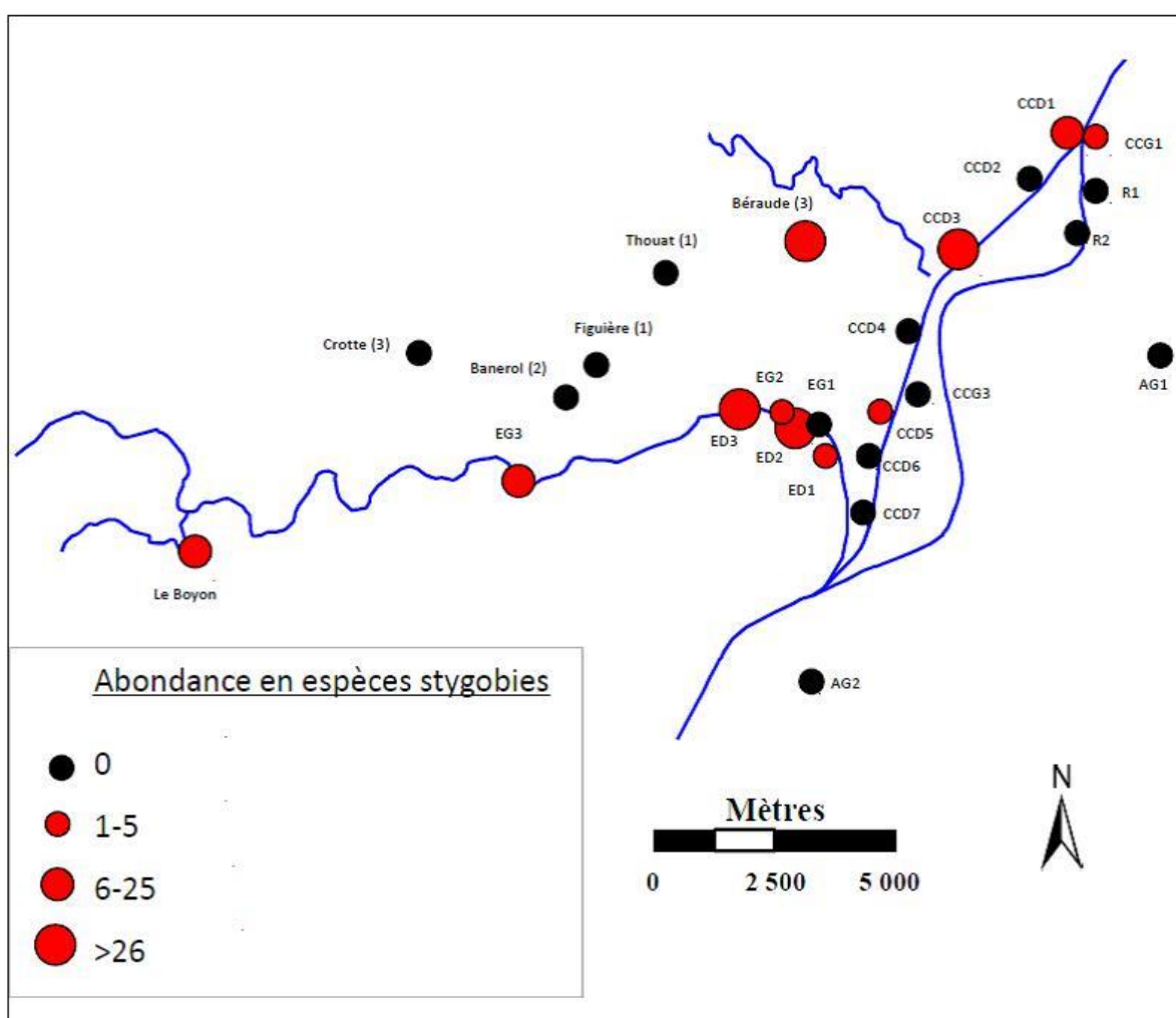


Figure 17 : Abondance en espèces stygobies sur le secteur de Beauchastel

2.2.4. Analyse et interprétation des caractéristiques physico-chimiques sur le secteur Beauchastel

Les données physico-chimiques sont à prendre en compte avec prudence. En effet, une seule mesure a été effectuée en même temps que l'échantillonnage des invertébrés (*Annexe 4*). Bien que ces données soient très ponctuelles, elles peuvent cependant nous apporter quelques compléments de diagnostic.

Les contre-canaux affichent une température assez stable dans l'espace (entre 15 et 19 °C) tout comme la conductivité (aux alentours de 400-450 µS/cm). Ces caractéristiques sont identiques à celles des eaux du Rhône.

Au contraire, l'Eyrieux possède une conductivité beaucoup plus faible (< 100µS/cm) qui reflète les caractéristiques d'un milieu granitique.

Les concentrations en nitrates se révèlent majoritairement assez faibles à l'exception de la rive droite à l'extrémité aval de l'Eyrieux (ED1). Ces teneurs pourraient s'expliquer par des apports d'eau ayant transité sous les nombreux vergers situés en bordure de l'Eyrieux (sous-écoulement de l'Eyrieux). Cette hypothèse est confirmée par l'augmentation de la conductivité (aux alentours de 300 µS/cm contre un maximum de 100 µS/cm dans l'Eyrieux elle-même).

Les deux affluents côté Drôme (AG1 et AG2) ont les conductivités les plus fortes, entre 500 et 600 µS/cm. Leur concentration en nitrate est également assez forte. Ces résultats sont probablement dus aux activités agricoles dans ce secteur et à l'apport d'eau des aquifères drômois riches en calcium.

Le site CCD3 dans le contre-canal droit du Rhône où se trouve l'Amphipode *Salentinella juberthiae* affiche une des plus importantes concentrations en silice (après les sources ardéchoises). Nous pouvons supposer que cet organisme traduit un apport phréatique d'eau provenant du côté Ardèche.

2.2.5. Conclusions

L'extrême pauvreté de la faune stygobie probablement liée au contexte granitique dans ce secteur rend l'interprétation des échanges à partir de la métrique des invertébrés beaucoup moins précise. Cette difficulté est d'autant plus importante que les espèces trouvées s'avèrent souvent être ubiquistes dans leurs exigences écologiques et ne permettent donc pas de déterminer de façon fiable l'origine de l'eau. Cette phase a ainsi permis de mettre en évidence des limites à l'utilisation de cet indicateur dans ce type de contexte géologique.

Le bilan en terme d'échanges hydrologiques de la métrique « invertébrés souterrains », avec toutes les réserves émises précédemment, est présenté sur la Figure 18.

(1) Le Rhône alimente largement les contre-canaux en rive gauche et en rive droite en amont du barrage de Charmes-sur-Rhône par des fuites à travers les rives créant ainsi un sous-écoulement. Ce phénomène s'explique probablement par la charge en eau à l'amont du barrage qui induit des infiltrations à travers les berges, phénomène déjà observé sur le Haut-Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon. Comme sur le secteur de Donzère-Mondragon, nous n'avons pas observé d'arrivée d'eau souterraine à l'aval immédiat du barrage. La présence d'une espèce stygobie d'eau profonde, *Salentinella juberthiae*, sur le site CCD3 situé au niveau du PK 2-2,5, ainsi que la teneur élevée en silice par rapport aux autres sites suggèrent une arrivée potentielle d'eau en provenance de l'aquifère ardéchois. En aval du PK 3, nous n'avons pas pu mettre en évidence d'échanges entre le Rhône et l'Eyrieux, la confluence avec l'Eyrieux étant sans doute trop riche en sédiments fins.

(2) Peu ou pas d'échanges ont pu être mis en évidence par les invertébrés sur la partie drômoise du secteur étudié.

(3) Sur l'Eyrieux, nos résultats n'ont pas mis en évidence d'interactions avec les aquifères latéraux en rive gauche, mais uniquement des recyclages d'eau de surface à l'amont du PK 2,5 (noté par des flèches arquées sur la figure). La grande quantité de nitrate retrouvée en rive droite au PK 2, ainsi que la présence du Copépode stygobie *Parastenocaris sp.*, laisse penser qu'il existe des arrivées d'eau du sous-écoulement de l'Eyrieux (flèches rouge à rayures vertes). Enfin, la présence de l'espèce d'eau profonde *Parabathynellidae* en rive droite de l'Eyrieux au niveau du PK 4 semble indiquer des arrivées profondes d'eau souterraine en provenance de la nappe (flèche verte).

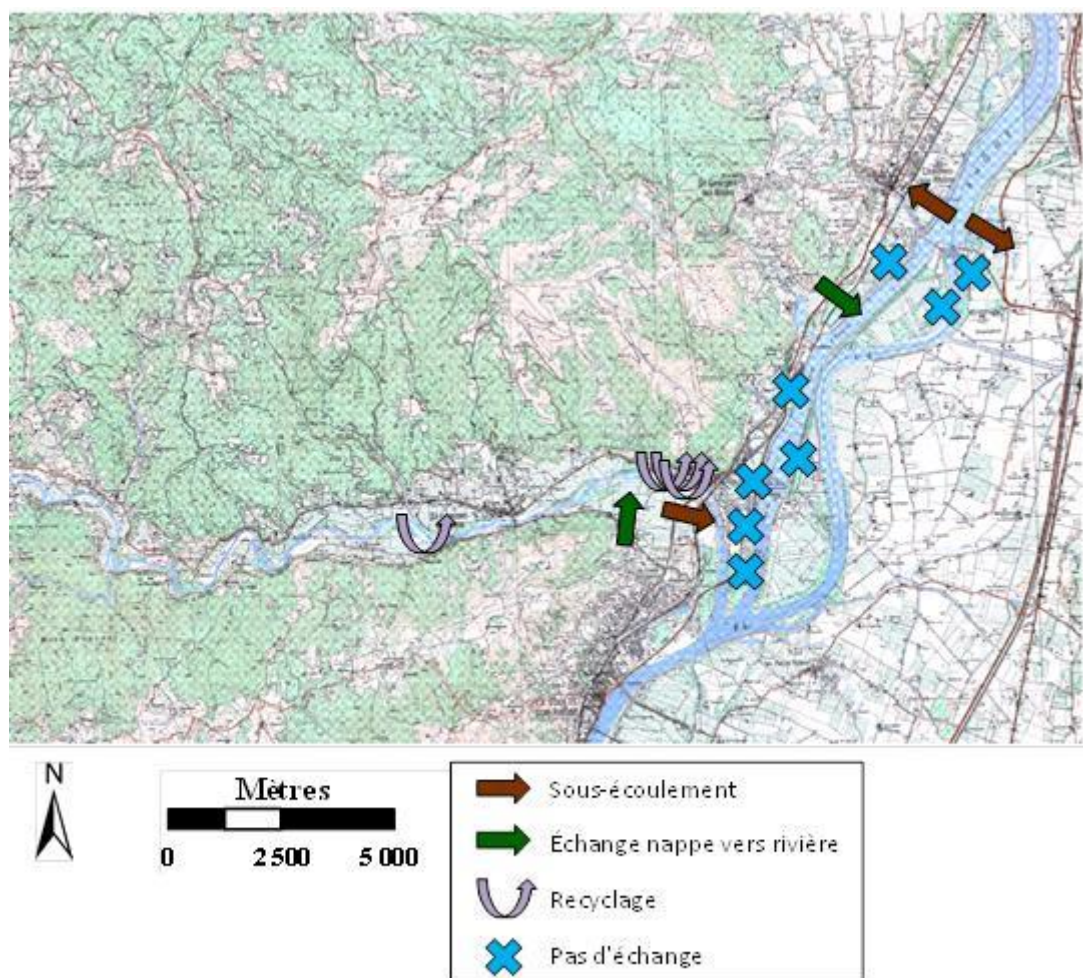


Figure 18 : Bilan des échanges nappe-rivières sur le secteur de Beauchastel pour la métrique invertébrés

2.3. Métrique macrophytes

2.3.1. Campagne de terrain :

Le secteur d'étude pour la métrique végétation aquatique se situe entre le village de Portes-lès-Valence au nord et le Pouzin au Sud. Nous avons étudié la végétation présente dans les zones humides le long du lit du Rhône et le long de ses affluents, l'Eyrieux et la Drôme, préalablement repérées via une précédente excursion de terrain, les cartes IGN et les cartes du site internet Carmen (Cartographie du Ministère de l'Environnement).

La campagne de terrain a été réalisée sur le site d'étude du 18 au 21 juin 2012 et concerne 23 entités Zones Humides représentant 65 transects.

La méthode utilisée (Amoros et al., 2000) est la même que celle présentée dans le précédent rapport final Phase 3.

Au cours de cette étude, des analyses physico-chimiques des eaux de surface ont également été réalisées (température, pH, conductivité et nitrates) dans 10 zones humides (28 prélèvements) ainsi qu'en amont et aval du Rhône et de l'Eyrieux. Ces données ne peuvent être utilisées comme métriques physico-chimiques car elles ne portent que sur une seule date de collecte, ce qui en diminue la significativité. Les résultats ne seront par conséquent pas présentés dans ce rapport.

2.3.2. Résultats de la métrique végétation aquatique

- **Trophie** (Carte 8)

La représentation des données de trophie des sites, estimée à partir de la végétation, permet de distinguer deux secteurs, une zone sud, vers la confluence Rhône/Drôme et la Lône du Petit Rhône mésotrophe (un site à proximité immédiate de la Drôme est oligotrophe), et un secteur nord, principalement eutrophe ou hypereutrophe.

- **Apports d'eau souterraine alluviale ou phréatique** (Carte 9)

La carte d'interpolation des indices d'apports de nappe, permet de caractériser trois zones :

- la zone sud, à la confluence Drôme/Rhône avec des apports moyens et forts ;
- la zone centrale et nord, sans apports ;
- une zone de petite superficie, sur la rive droite du Rhône au niveau de Charmes-sur-Rhône, avec des apports apparemment assez forts.

On observe que les deux lônes, au nord du secteur (lône de l'Ove) et au sud (lône du Petit Rhône) ont des indices d'apports très différents, respectivement nul et fort.

- **Probabilité d'apports de nappe phréatique** (Carte 10)

La carte de probabilité d'apports de nappe de versant montre les mêmes patrons que la carte des apports d'eau souterraine : 3 zones apparaissent également, la zone sud (Petit Rhône et Drôme) avec une probabilité d'apports phréatiques importante, la partie centrale et nord avec une probabilité nulle, et une zone d'apports potentiellement élevés, en rive droite du Rhône à hauteur de Charmes-sur-Rhône.

- **Perturbations** (Carte 11)

La carte d'interpolation du niveau de perturbation par les crues n'est valable que dans le champ d'inondation du Rhône. Elle permet toutefois de distinguer trois zones : au nord on observe des écosystèmes qui sont soumis à des perturbations par les crues élevées et des phénomènes d'alluvionnement (lône de l'Ove), ce qui est conforme avec le diagnostic d'échanges eau de surface/eau

souterraine, qui conclut à l'absence d'échange dans cette lône. Au sud, vers la Drôme, les perturbations sont moyennes à faibles (lône du Petit Rhône). Au centre, les perturbations sont moindres, associées à des processus d'alluvionnement lors des crues.

2.3.3. Interprétation des résultats

- **Carte de synthèse**

Il est possible de dresser une carte de synthèse (Carte 12) des échanges entre le Rhône et les eaux souterraines. La végétation ne permet pas de distinguer la rive droite (département de l'Ardèche) de la rive gauche (département de la Drôme) du Rhône du fait du faible nombre de points de prélèvement en rive droite. L'Eyrieux est une rivière à courant fort, dépourvue de végétation aquatique.

La partie centre et nord de la zone d'étude est eutrophe à hypereutrophe, avec des indices d'apports d'eau souterraine faibles ou nuls. On peut donc en déduire qu'il n'y a probablement pas de connectivité entre eau de surface et eau souterraine (phréatique ou alluviale) dans cette zone. Le canal d'aménée du Rhône est surélevé et donc probablement peu influencé par les nappes de versant. S'il est colmaté, il influence probablement peu les écosystèmes alluviaux (peu d'infiltration).

La partie sud de la zone d'étude, à la confluence Rhône/Drôme, montre un faible niveau d'eutrophisation (mésotrophe et oligotrophe), et des indices d'apports de nappe oligotrophe forts. Il pourrait s'agir soit d'apports provenant de la nappe alluviale de la Drôme (entité 327a), soit de la nappe latérale (entité 154a). On peut faire l'hypothèse d'une influence conjointe de ces deux nappes dans ce secteur.

Enfin, en rive droite du Rhône, à hauteur de Charmes-sur-Rhône, quelques points sont localement mésotrophes dans un secteur globalement eutrophe, avec la présence d'espèces témoignant d'apports d'eau souterraine. La nappe du massif d'Ardèche (603c et 603g) contenue dans les calcaires du Tussol, est potentiellement drainée par le Rhône dans ce secteur.

- **Fonctionnement des lônes**

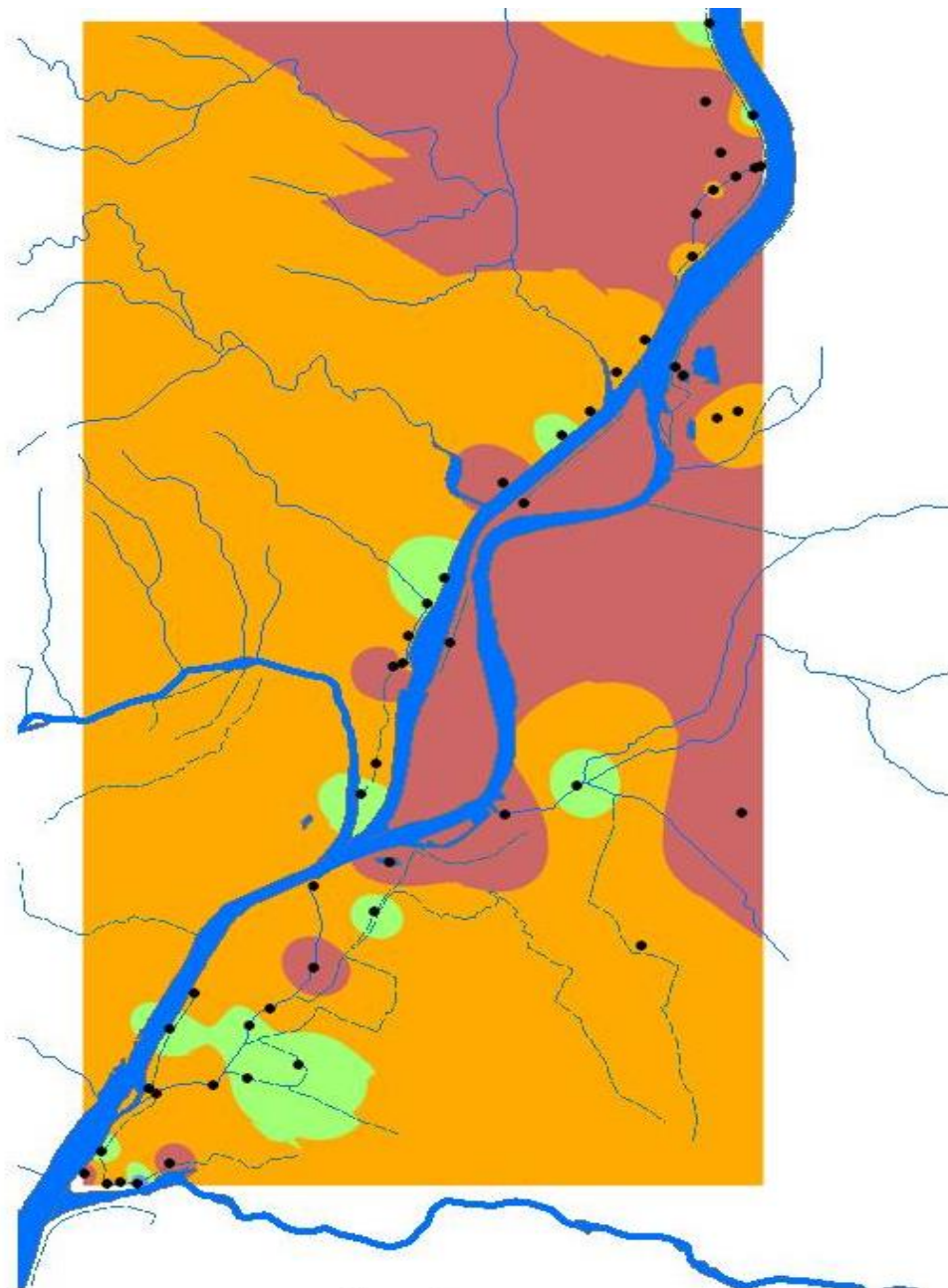
La lône du Petit Rhône est moyennement perturbée. Cela indique que les crues du Rhône participent au curage de la lône. Des barrages en amont de la lône permettent le contrôle des débits d'entrée. Les eaux du Petit Rhône mésotrophes, assez froides et fortes en conductivité indiquent que la lône est alimentée par des eaux souterraines qui ne sont pas du sous-écoulement fluvial (celles-ci seraient alors probablement eutrophes). Elles pourraient être issues soit des sous-écoulements de la Drôme, soit de la nappe du versant est du Rhône. Une analyse de la qualité respective de ces deux nappes permettrait de conclure sur l'origine des apports.

La lône de l'Ove est très vraisemblablement déconnectée des eaux souterraines, car elle est eutrophe ou hypereutrophe, et soumise à des processus d'alluvionnement, qui contribuent au colmatage des fonds. De fait, la lône ne montre pas d'espèces témoignant d'apports d'eau souterraine.

La comparaison de ces deux lônes, l'une alimentée et l'autre non, mettent en exergue le lien entre la persistance des zones humides et les apports d'eau phréatique.

- **Synthèse**

Il y aurait ainsi deux zones d'échanges, respectivement en rive gauche au sud et en rive droite au nord. Au centre, les échanges sont plus incertains. On peut supposer qu'il n'y a pas d'apport de la nappe latérale sur la rive gauche du Rhône, mais on ne peut savoir si le Rhône alimente la nappe, ou si le Rhône et la nappe sont à l'équilibre. En rive droite, les informations de végétation ne sont pas suffisantes pour tirer des conclusions. On peut seulement supposer qu'il n'y a pas d'échange le long du massif d'Ardèche sauf au niveau de Charmes-sur-Rhône. À cet endroit le Rhône drainerait la nappe. Au sud, on distingue clairement un apport de nappe, mais il est impossible de savoir s'il s'agit d'apports de la nappe alluviale de la Drôme ou de la nappe latérale.



Légende

● points de prélèvement

trophie

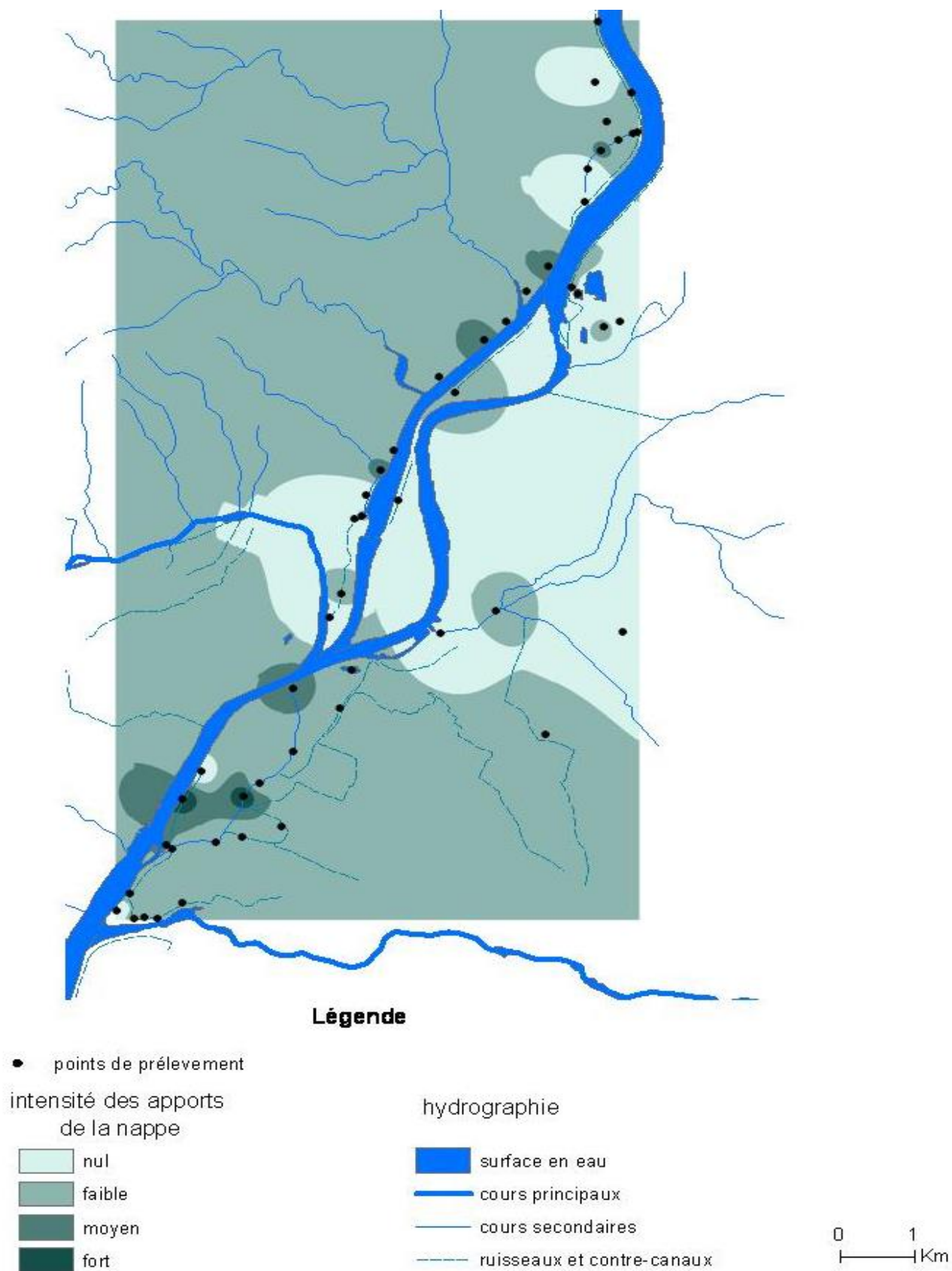
- oligotrophe
- mesotrophe et meso_eutrophe
- eutrophe et eutrophe-hypereutrophe
- hypereutrophe

hydrographie

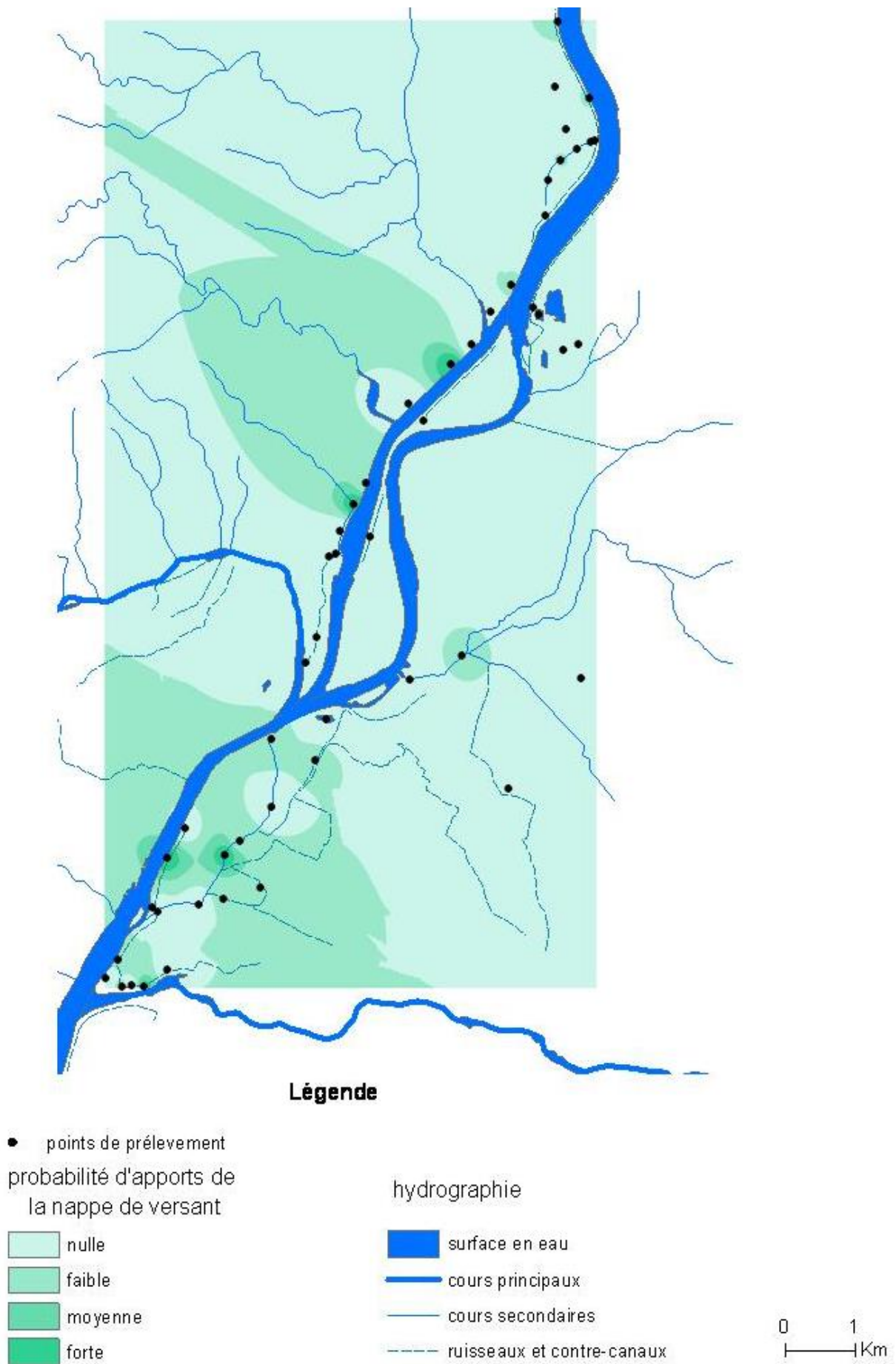
- surface en eau
- cours principaux
- cours secondaires
- ruisseaux et contre-canaux

0 1
Km

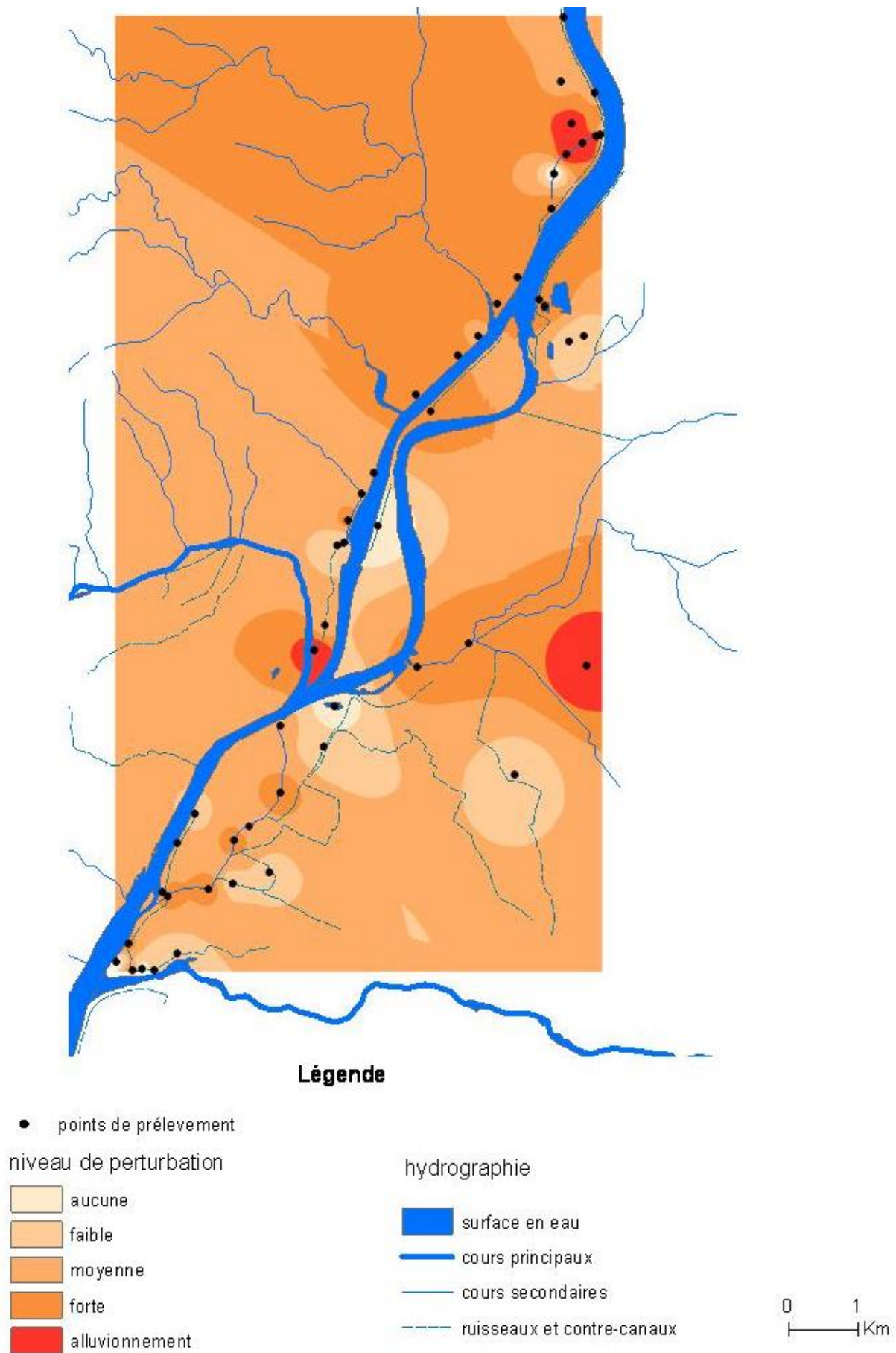
Carte 8 : Estimation du niveau d'eutrophisation du secteur de Beauchastel



Carte 9 : Estimation de l'intensité des apports d'eau souterraine dans le secteur de Beauchastel

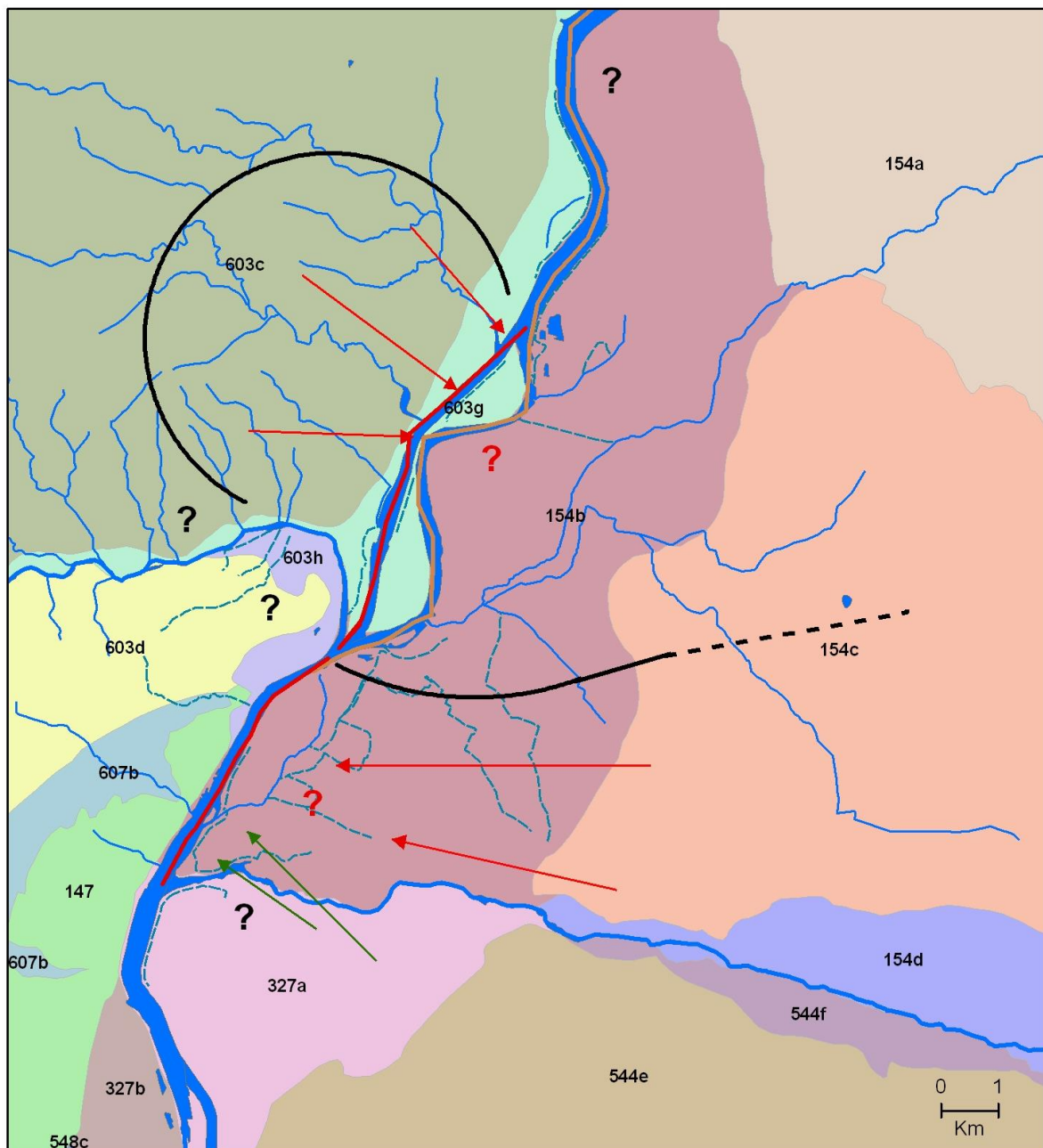


Carte 10 : Estimation de la probabilité d'apports de la nappe de versant dans le secteur de Beauchastel



Carte 11 : Estimation du niveau de perturbations par les crues dans le secteur de Beauchastel

carte de synthèse, résumant les apports d'eau souterraine du secteur de Beauchastel



mode d'alimentation des milieux aquatiques

- Apport de la nappe de versant
- apport de la nappe alluviale de la Drôme
- Tronçon du Rhône recevant des apports de nappe de versant
- Tronçons du Rhône à l'équilibre ou recharge de l'aquifère par le Rhône
- limite entre les zones
- limite incertaine entre les zones
- ? zone d'incertitude sur la nature des apports
- ? absence de données

hydrographie et hydrogéologie

- 327a entité hydrogéologique
- surface en eau
- le Rhône, son canal de dérivation et ses principaux affluents
- cours secondaires
- ruisseaux et contre-canaux

Carte 12 : Synthèse de la métrique végétation aquatique dans le secteur de Beauchastel

2.4. Synthèse des échanges sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux en période moyennes-eaux

Pour ce secteur la synthèse des échanges à l'échelle du PK est faite selon le même principe que pour le secteur de Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche (§1.4 p23) à l'aide des mêmes codes couleurs et des mêmes typologies des échanges.

2.4.1. Superposition spatiale des métriques

Cette carte (Carte 13) reprend les informations présentées dans les parties précédentes :

- les points et cercles rouges localisent les sites échantillonnés pour les invertébrés. Leur taille est proportionnelle au nombre d'individus stygobies identifiés, indicateurs d'apports souterrains.
- les segments colorés localisent les portions de berge pour lesquels le diagnostic hydraulique a été effectué. Les segments verts foncés et verts clairs indiquent des secteurs où la nappe alimente le cours d'eau, en bleu des secteurs où il n'y a pas d'échange, en rouge et orange des secteurs sur lesquels le cours d'eau alimente la nappe. Les débits échangés sont en m³/s.
- les plages colorées dans un dégradé de vert localisent la probabilité d'un apport de nappe au cours d'eau en se fondant sur l'indice macrophytes. La probabilité d'apport de nappe est plus forte pour les tons foncés et plus faible (voire nulle) pour les tons les plus clairs. Pour finir, les petites touffes bleues positionnent les sites échantillonnés pour les macrophytes.

Le fond de carte localise les principaux cours d'eau du secteur et les aménagements de la CNR.

2.4.2. Tableaux de croisement des métriques

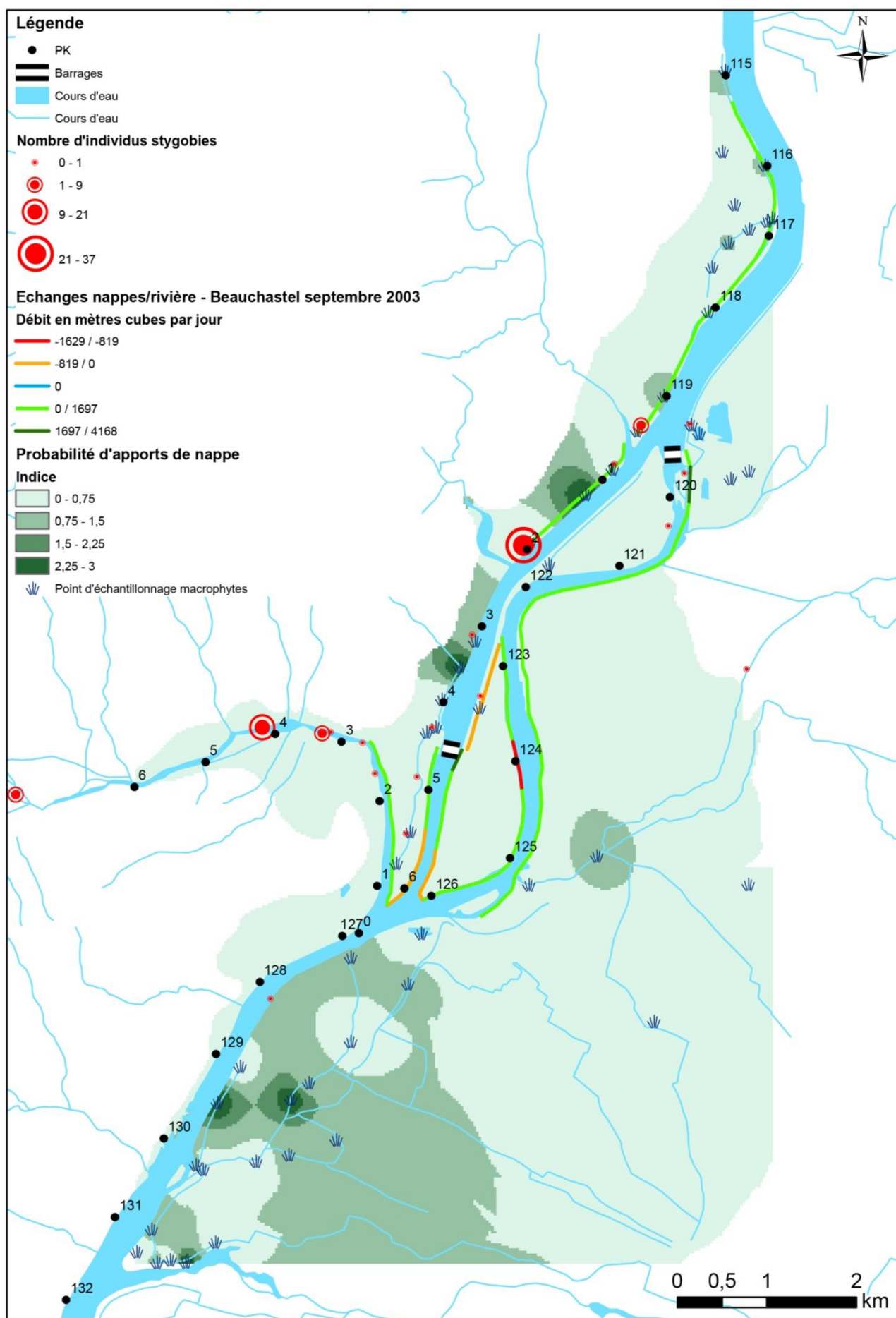
Ces tableaux (Tableau 17 à Tableau 23) sont structurés de la même façon que pour le secteur de Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche :

- interprétation de chaque métrique dans les colonnes de gauche
- interprétation synthétique unique dans la en colonne centrale
- indice de pénalité par métrique dans les colonnes de droite

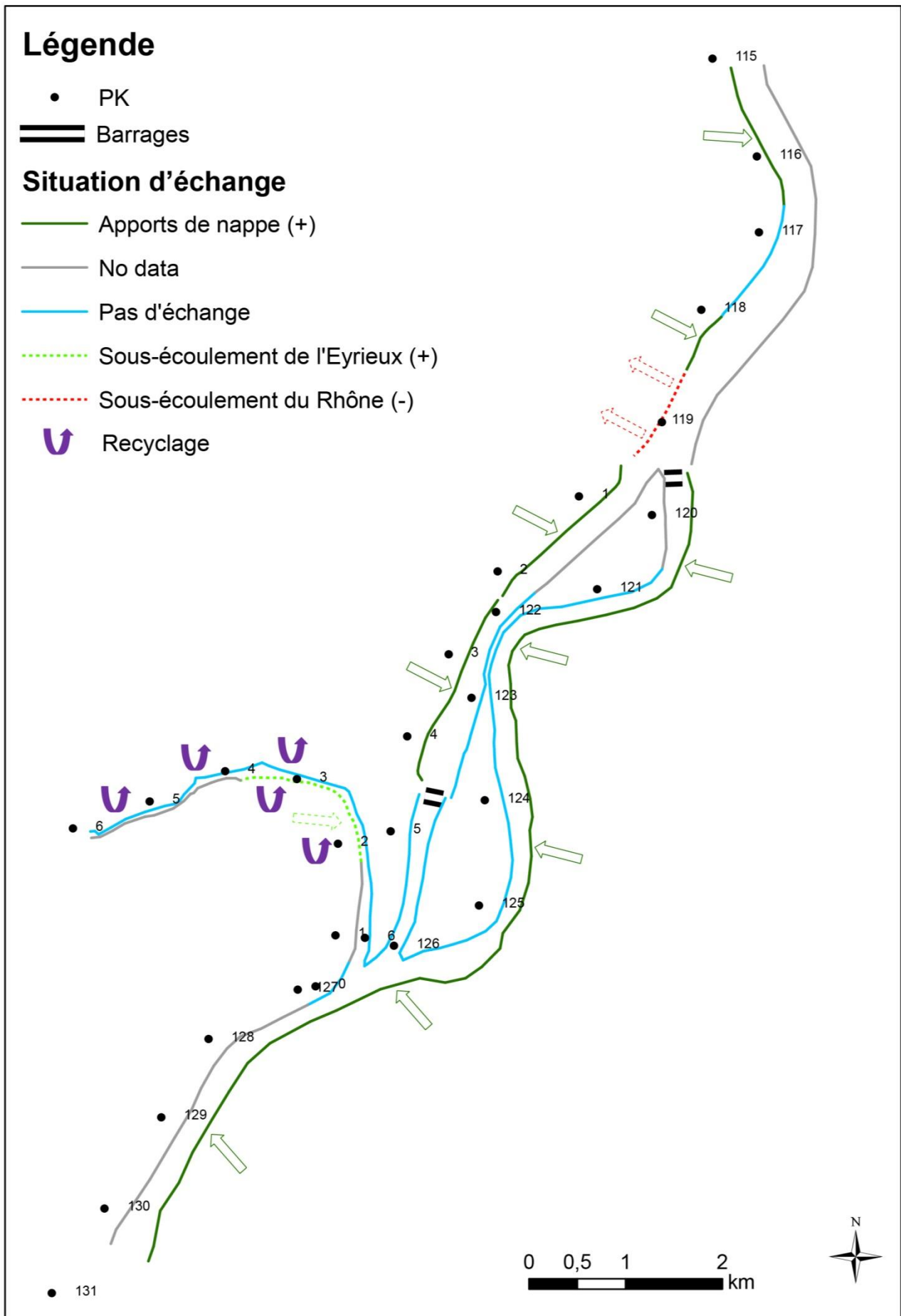
2.4.3. Spatialisation du diagnostic synthétique

Pour synthétiser l'information ci-avant, et de manière simplifiée (Carte 14), voici comment les échanges sont caractérisés sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux :

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Eyrieux rive gauche
PK 0 à 6 : pas d'échange / recyclage PK 6 à 3 • Eyrieux rive droite
PK 2 à 4 : sous-écoulement de l'Eyrieux à travers la plaine vers l'Eyrieux / recyclage PK 4 à 2
PK 0 à 0,5 : pas d'échange • Canal de dérivation rive gauche/retenue
PK 2 à 6 : pas d'échange • Vieux-Rhône rive droite et aval
PK120,5 à 127 : pas d'échange • Vieux-Rhône rive gauche et aval
PK 119,5 à 130 : apport de nappe au Vieux-Rhône | <ul style="list-style-type: none"> • Canal de dérivation rive droite/retenue
PK 115 à 116,5 : la nappe alimente le contre-canal
PK 116,5 à 118 : pas d'échange
PK 118 à 118,5 : la nappe alimente le contre-canal
PK 118,5 à 119,5 : le contre-canal alimente la nappe
PK : 0 à 4,5 : la nappe alimente le contre-canal
PK 4,5 à 6 : pas d'échange |
|--|--|



Carte 13 : Superposition spatiale des métriques sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux



Carte 14 : Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux

Guilherand - Rive droite								Interprétation des échanges nappes/Rhône ME	Pénalité (Sens de l'échange)			
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie		Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle
	10/1985	09/2003	06/2007									
	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)									
	BE	BE	ME									
109	-24 393				07/2012	P_apport 06/2012	Interstitielle 07/2012					
109.5					ME	ME	ME					
110												
110.5												
111												
111.5												
112												
112.5	83											
113												
113.5	0											
114	-308											

Tableau 17 : Croisement des métriques pour le secteur de Guilherand rive droite (amont de Beauchastel)

Beauchastel - Retenue et Canal de dérivation - Rive droite							
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie
	10/1985	09/2003	06/2007				
	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)				
	BE	BE	ME		07/2012	P_apport 06/2012	Interstitielle 07/2012
					ME	ME	ME
115		2 564	1 595				
115.5						Faible	
116							
116.5							
117							
117.5			-150			Nul	
118							
118.5						Faible	
119							
119.5					Sous-écoulement du Rhône [1]	Nul	
0.5		1 377	1 115				
1							
1.5							
2					Nul		
2.5					Arrivées de versant faibles	Faible à moyen	
3							
3.5						Faible	
4						Moyenne	
4.5						Faible	
5		1 231	-59				
5.5			28				
6		-12	0			Nul	

</

Tableau 18 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Canal de dérivation rive droite

Beauchastel - Canal de dérivation - Rive gauche							Interprétation des échanges nappes/Rhône ME	Pénalité (Sens de l'échange)				
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes		Physico-chimie	Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle
	10/1985	09/2003	06/2007									
	Q (m³/j) BE	Q (m³/j) BE	Q (m³/j) ME									
					07/2012	P_apport 06/2012	Interstitielle 07/2012					
					ME	ME	ME					
2												
2.5												
3												
3.5												
4												
4.5												
5												
5.5												
6												

Tableau 19 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Canal de dérivation rive gauche

Beauchastel - Vieux-Rhône - Rive droite							
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie
	10/1985	09/2003	06/2007				
	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)				
	BE	BE	ME				
120.5							
121							
121.5							
122							
122.5		5 375	0				
123							
123.5							
124		-2 448					
124.5							
125			-40				
125.5							
126			3				
126.5							
127							

Interprétation des échanges nappes/Rhône ME	Pénalité (Sens de l'échange)			
	Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle
		0		-5
	-2			

Hydraulique [-2 : peu de mesures piézométriques]

Physico-chimie [-5 : mesures ponctuelles /une seule campagne]

Tableau 20 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Vieux-Rhône rive droite

Beauchastel - Vieux-Rhône - Rive gauche							
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie
	10/1985	09/2003	06/2007				
	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)				
	BE	BE	ME				
119							
119.5		18 738	13 867				
120							
120.5							
121							
121.5							
122							
122.5							
123							
123.5							
124							
124.5							
125							
125.5							
126							
126.5							
127							
127.5							
128							
128.5							
129							
129.5							
130							

[1] : Sous-écoulement du Rhône à travers les digues vers le contre-canal

Interprétation des échanges nappes/Rhône ME	Pénalité (Sens de l'échange)			
	Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle

Tableau 21 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Vieux-Rhône rive gauche

Beauchastel - Vieux-Rhône - Rive gauche							
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie
	10/1985	09/2003	06/2007				
	Q (m³/j)	Q (m³/j)	Q (m³/j)				
	BE	BE	ME				
2					07/2012	P_apport 06/2012	Interstitielle 07/2012
2.5					ME	ME	ME
3					Recyclage	Pas de site	Sous-écoulement [1]
3.5							Recyclage
4				Apport de la nappe			

Pénalité (Sens de l'échange)			
Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle
	-1		-5

Interprétation des échanges nappes/Rhône ME

Recyclage et/ou sous écoulement

Invertébrés [-1 : faible diversité]

Physico-chimie [-5 : mesures ponctuelles /une seule campagne]

[1] Sous-écoulement de l'Eyrieux vers l'Eyrieux à travers la Plaine

Tableau 22 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Confluence Rhône/Eyrieux rive droite

Beauchastel - Vieux-Rhône - Rive gauche							
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie
	10/1985	09/2003	06/2007		07/2012	P_apport 06/2012	Interstitielle 07/2012
	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)				
	BE	BE	ME		ME	ME	ME
0.5		1 227	28				
1			-6				
1.5			0				
2							
2.5							
3							
3.5							
4							
4.5							
5					Recyclage		Recyclage
5.5							
6							

Pénalité (Sens de l'échange)			
Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie
-5	-1		
			-5

Interprétation des échanges nappes/Rhône ME	
---	--

Hydraulique [-5 : peu de mesures piézométriques / niveaux de l'Eyrieux calés par rapport à la topo]

Invertébrés [-1 : faible diversité]

Physico-chimie [-5 : mesures ponctuelles /une seule campagne]

Tableau 23 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Confluence Rhône/Eyrieux rive gauche

3. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Péage-de-Roussillon : approches pour un diagnostic en régime transitoire (travail de thèse de Eric Lalot : 2010-2013)

3.1. Objectifs et zone d'étude

3.1.1. Objectif

Les différentes démarches initiées lors des phases précédentes du projet échanges nappes/Rhône (Bornette et al., 2007, 2008 et 2010) se sont concentrées sur l'étude des relations nappe/rivière en régime permanent. Ainsi, la métrique utilisant le gradient de nappe, pour estimer les flux échangés, se base sur une carte piézométrique établie à une date donnée. L'estimation du débit n'est donc valable que sous réserve que l'on soit effectivement dans une situation de régime permanent à cette date. Or, les hauteurs d'eau au sein de la rivière et dans la nappe alluviale varient dans le temps. Et, si la période temporelle moyenne entre deux perturbations est inférieure au temps de relaxation du système, le régime permanent ne pourra jamais être vraiment établi.

Les paramètres biologiques et chimiques intègrent une part d'information sur la variabilité des débits échangés. Toutefois, là aussi, et notamment dans le cas des invertébrés souterrains, un échantillonnage peut être influencé par une inversion récente du sens des échanges. D'autre part ces indicateurs biologiques ne donnent pas directement accès à la quantification des débits échangés, entre la nappe et la rivière, ni n'expliquent la variation des hauteurs piézométriques en fonction de celles qui sont observées dans le cours d'eau.

Cependant, intégrer l'effet des perturbations régulières subies par le système peut être primordial. Des fluctuations, même transitoires, du niveau d'eau dans l'une des deux entités (rivière ou nappe phréatique) peuvent en effet engendrer une inversion du sens des échanges et une variation du niveau d'eau au sein de l'autre entité.

De nombreuses techniques peuvent être envisagées afin d'étudier la variabilité temporelle des échanges nappe/rivière (Vernoux et al., 2010). Les grands critères de choix entre ces méthodes sont notamment :

- L'étendue de la zone d'étude ;
- Les données et les moyens disponibles ;
- Les objectifs.

L'objectif du présent chapitre n'est pas d'identifier toutes les méthodes qui ont déjà pu être employées dans ce cadre mais plutôt de se focaliser sur quelques techniques en particulier pouvant être employées à l'échelle du secteur.

Dans le cadre de ce travail de thèse effectuée à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, différentes techniques complémentaires ont, à ce titre, été développées. Une première étape a consisté à étudier les différents signaux de hauteurs de nappe et à distinguer les zones de la nappe alluviale sous influence de la rivière. Les relations entre hauteurs de nappe et hauteurs de rivières sont caractérisées en termes de temps de transfert et d'atténuation de l'onde de pression, par le biais d'analyses corrélatoires et spectrales. Un modèle numérique déterministe est ensuite mis en œuvre afin d'estimer les flux échangés entre les deux entités. Un troisième volet consistera à mettre en relation les résultats obtenus avec ces deux jeux de méthodes. Un simple traitement du signal est en effet moins coûteux à réaliser, en termes de temps et de données nécessaires, que la mise en place d'une modélisation physique déterministe complète, mais il ne permet pas d'ordinaire la même compréhension de la physique du système. La mise en relation des deux méthodes a pour but de discerner si le traitement du signal ne permettrait

cependant pas de révéler certaines caractéristiques du fonctionnement de l'aquifère. Dans ce cas, si l'analyse statistique des signaux piézométriques permettait de répondre rapidement à des questions qui sont généralement traitées à l'aide d'une modélisation numérique, elle pourrait s'avérer intéressante comme un outil d'aide à la gestion.

3.1.2. Zone d'étude

Les objectifs ayant été définis, une zone d'étude sur le Rhône a été choisie selon 3 principaux éléments:

- Les enjeux ;
- L'existence de données ;
- La présence d'échanges nappe/rivière variables dans le temps et l'espace.

Le site de la plaine alluviale autour de Péage-de-Roussillon a été retenu, après discussion avec l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse (Figure 19). Ce site présente en effet de forts enjeux. On y trouve ainsi :

- une centrale nucléaire ;
- de nombreux aménagements hydro-électriques (un canal de dérivation, 2 barrages et de nombreux contre-canaux) appartenant à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) ;
- une forte concentration d'industries chimiques et des volumes d'eau de ce fait prélevés en nappe très importants ;
- une réserve naturelle (Ile de la Platière) ;
- de forts pompages agricoles et d'alimentation en eau potable.

Le Schéma de COhérence Territoriale (SCOT) de la vallée du Rhône stipule ainsi que : « la mise en œuvre de démarches de gestion concertée de l'eau par bassin versant (partage de la ressource entre usages (agricoles, industriels, AEP, écologiques), adéquation des ressources aux usages en fonction de leur qualité, sécurisation des ressources pour l'eau potable...) qui s'imposeraient au Scot semble essentielle, notamment dans le secteur des quatre vallées, du roussillonnais, du Pilat,... Le Scot envisage par ailleurs, dans sa phase de réalisation, la mise en place d'une communauté de l'eau potable,... Le niveau piézométrique des nappes (en particulier celles des alluvions rive gauche du Rhône des Roches-de-Condrieu au Dolon et des vallées Gère – Vésonne) pourra être une alerte sur l'impact des prélèvements par rapport à la capacité de renouvellement des nappes. » (SCOT, 2010)

Un certain nombre de données ont été recueillies sur le site, par le passé, par les différents intervenants du secteur. Parmi ces données il existe des mesures de hauteurs d'eau en continue en divers points de la nappe et du Rhône. Il s'agit d'une information essentielle pour l'étude des relations nappe/rivière en régime transitoire.

La présence d'échanges nappe/rivière a été identifiée lors de précédentes études (Bornette et al., 2008 ; BURGEAP, 2007). La zone présente des situations d'échanges variables dans l'espace. Et la présence de prélèvements variables en nappe et d'importantes fluctuations du niveau du Rhône indique qu'il doit également exister une certaine variabilité temporelle des flux et des sens d'échange.

La zone d'étude comprend la nappe alluviale du Rhône de Condrieu, au nord, à Andancette au sud, soit 22 km de long pour 2 à 4 km de large. Ce secteur constitue un ensemble délimité à l'ouest par un massif cristallin et à l'est par des molasses éocènes. La nappe alluviale repose sur une couche faiblement perméable argilo-marneuse (Pliocène). Au nord et au sud des verrous limitent l'extension latérale de la plaine alluviale.

Sur la zone d'étude la nappe alluviale possède une épaisseur moyenne comprise entre 10 et 30 m. Elle est composée principalement de sable, de gravier et de limon. La conductivité hydraulique moyenne est assez élevée et est comprise entre 10^{-2} et 10^{-4} m/s.

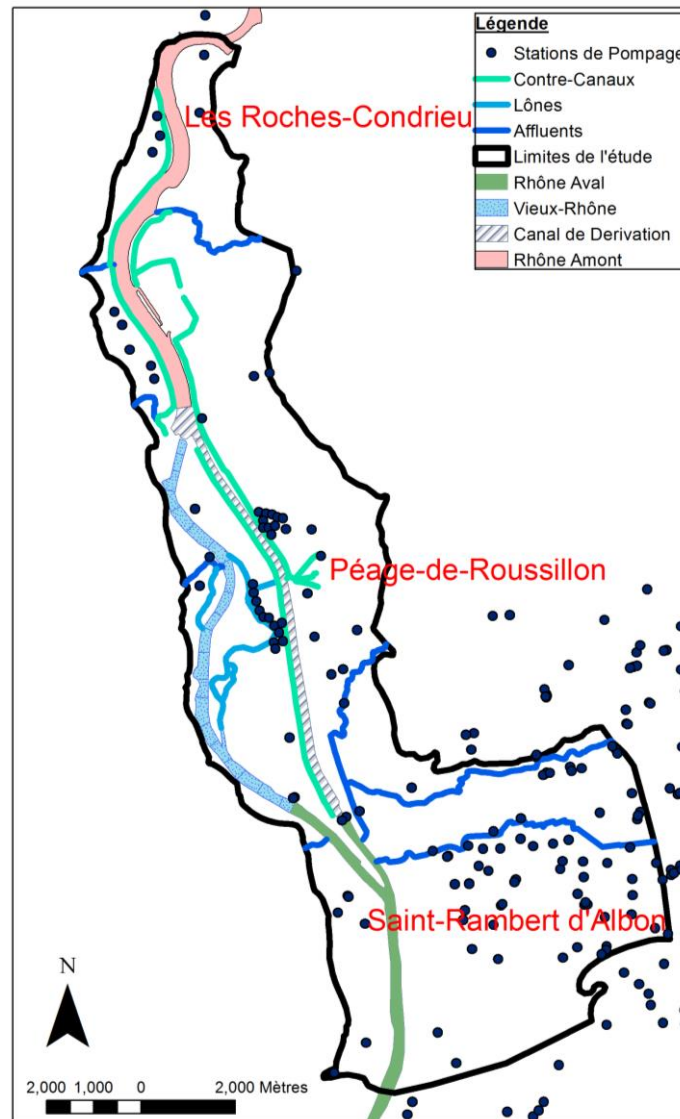


Figure 19 : Zone d'étude

Le réseau hydraulique de la zone d'étude peut être divisé en plusieurs secteurs (Figure 19). En partant du nord vers le sud on trouve :

- un Rhône amont fortement canalisé (rose) et bordé de contre-canaux sur les deux rives (vert clair), sauf au niveau d'un affluent en rive droite et en rive gauche (bleu foncé) ; les amplitudes des variations de niveaux sont faibles ;
- le canal de dérivation (gris hachuré) qui est bordé par un contre-canal (vert clair) en rive droite et sur la moitié amont de sa rive gauche ; les fluctuations de sa ligne d'eau sont très limitées ;
- le Vieux-Rhône (bleu avec points) compris entre le barrage de Saint-Pierre de Bœuf et le seuil de Peyraud et qui est connecté aux lônes de la Platière et de Limony ; les fluctuations sont fortes dans ce secteur ;
- le Rhône aval (vert) qui n'est bordé par aucun contre-canal et dans lequel débouche en rive gauche la Sanne et les Collières (bleu foncé) ; Les fluctuations de niveaux peuvent être fortes sur la partie amont.

La nappe alluviale est soumise à de fortes pressions au niveau de la ressource en eau. Une partie des captages exploités est représentée sur la carte de la zone d'étude. Les principaux points de prélèvements sont situés sur la partie centrale de la zone d'étude (60 millions de m³ prélevés par ans).

3.2. Données et instrumentation

3.2.1. Données existantes

Les données nécessaires à la réalisation de la présente étude sont de différents types :

- Hauteurs d'eau en nappe et le long des cours d'eau ;
- Flux sortants du système (volumes prélevés en nappe principalement) ;
- Flux entrants dans le système (pluie, apports latéraux,...) ;
- Aménagements (nature des ouvrages, emplacement, fonctionnement,...) ;
- Modèle numérique de terrain (y compris la cote du fond des cours d'eau) ;
- Géologie et hydrogéologie (nature de l'aquifère et du sol, épaisseur, perméabilité,...).

La plupart des intervenants qui disposent de données sur notre secteur d'étude ont été contacté : la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), la Réserve Naturelle de l'Île de la Platière, le groupe d'intérêt économique OSIRIS, le Syndicat Mixte Intercommunal du Rhône Court-circuité Loire Ardèche Isère Drôme (SMIRCLAID), le Syndicat des eaux Serrières-Limony, le Syndicat Intercommunal de Gestion des Eaux et de l'Assainissement de Roussillon – Péage de Roussillon et environ (SIGEARPE), le Syndicat des eaux de Pélussin, les bureaux d'étude CPGF-Horizon et BURGEAP, l'Université de Lyon, le SAGE de Bièvre-Liers-Valloire et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse.

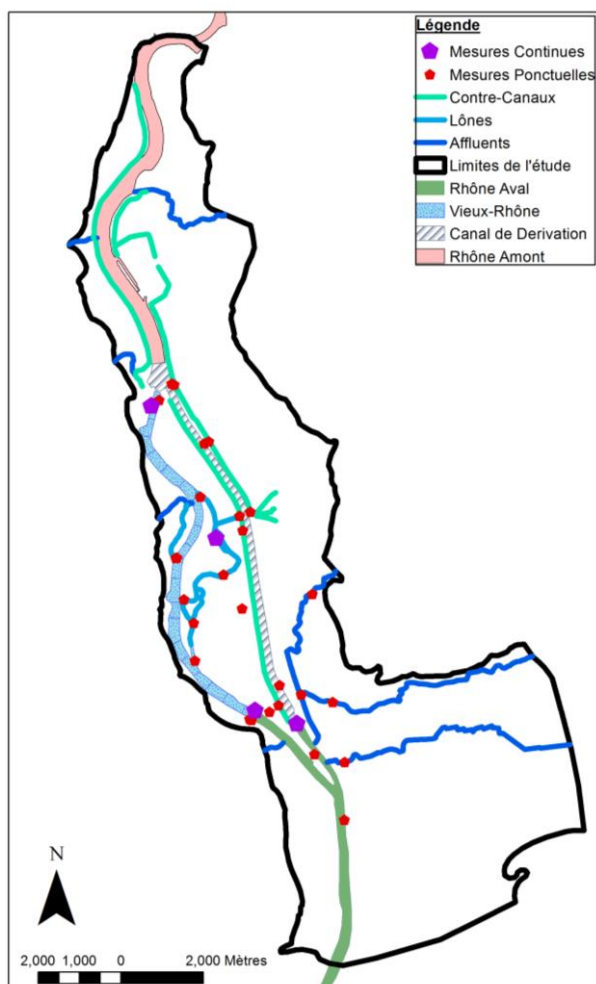


Figure 20 : Points de mesure des niveaux d'eau de surface

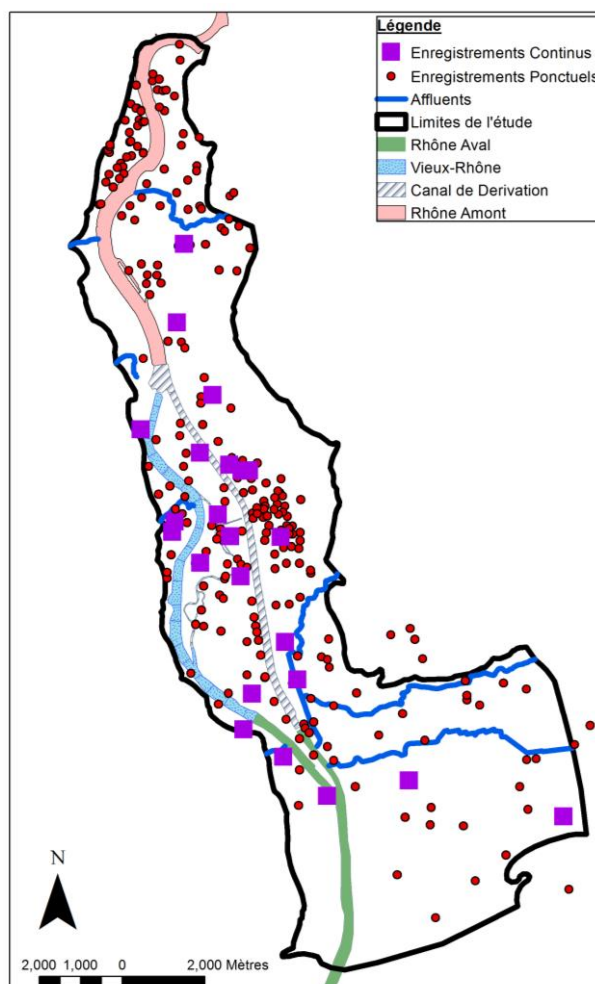


Figure 21 : Points de mesure des niveaux de nappe

Nous disposons d'enregistrements en continu des hauteurs d'eau pour 24 points de la nappe (Figure 20) et pour 6 points (4 seulement sont dans la zone d'étude) du Rhône et de ses affluents (Figure 21).

Cela représente une densité de donnée relativement importante. Mais les pas de temps entre les mesures et les périodes de mesures diffèrent. Certaines chroniques de mesures souffrent d'anomalies et ne sont pas exploitables. De plus, les points de mesure sont répartis spatialement de manière non homogène. Certaines zones sont complètement dépourvues de suivis de hauteurs d'eau.

Les données ponctuelles de mesures de hauteur d'eau sont également très nombreuses mais elles souffrent des mêmes problèmes que les données continues.

Les volumes annuels moyens prélevés en nappe par les principaux exploitants de captages sont connus approximativement. Toutefois ces données ne sont que rarement disponibles au même pas de temps que pour les hauteurs de nappe. Les points de prélèvements sont par contre bien connus.

Les données météorologiques sont fournies par Météo-France qui possède une station d'enregistrement à Reventin. La surface de la zone d'étude est restreinte et le relief est peu marqué. La même station de mesure est donc utilisée pour caractériser les précipitations sur l'ensemble de la zone d'étude. Des estimations des apports latéraux ont également été réalisées lors de précédentes études, notamment en ce qui concerne la plaine de Bièvre-Valloire.

Un modèle numérique de terrain avec une résolution de 2 m a été mis à disposition par l'IGN pour l'ensemble de la plaine alluviale rapprochée du Rhône. La résolution des pixels des zones plus éloignées du Rhône est plus basse, avec une taille de grille de 25 m de côté. Des sections en travers de la bathymétrie du fond du cours du Rhône tous les 500 m en moyenne ont également été fournies par l'IGN.

Les informations sur la géologie de l'aquifère proviennent des cartes géologiques et des données de sondages rassemblées par le BRGM (site Infoterre) ainsi que d'un certain nombre de rapports (Mandier, 1988 ; BURGEAP, 2007, Horizon, 1994). Il n'a pas été possible de générer de cartes de la répartition spatiale des champs de perméabilité en raison du faible nombre de points pour lesquels nous disposons de données. Certaines zones sont toutefois plus riches en données. Ainsi, la couche surfacique de limon a été finement cartographiée sur l'étendue de la Réserve Naturelle de la Platière ainsi que sur une partie de la plaine de Chavanay.

3.2.2. Choix d'une zone d'étude préférentielle

Les fluctuations les plus importantes du Rhône sont centrées autour de l'Île de la Platière (partie du Rhône en jaune). Par ailleurs le gradient moyen de la nappe est relativement faible sur cette zone (Figure 23). C'est par conséquent une zone dans laquelle les phénomènes d'inversion du sens de l'échange nappe/rivière en fonction du temps peuvent être marqués. A l'amont du secteur les contre-canaux contribuent à diminuer la propagation des crues du Rhône en nappe tandis que sur la partie sud le fort gradient de la nappe empêche une propagation lointaine de ces mêmes fluctuations.

Les données disponibles concernent principalement l'Île de la Platière et sa proche périphérie (Figure 20 et Figure 21). Cela inclut les chroniques de mesure de la ligne d'eau. Par conséquent plus on se rapprochera de la partie nord ou sud de la zone d'étude, plus la précision de la reconstitution de la ligne d'eau aura tendance à diminuer. L'absence, sur ces zones, de mesures piézométriques bien localisées ne permet également pas de vérifier l'exactitude de la modélisation des échanges nappe/rivière.

Compte-tenu des données disponibles et des caractéristiques hydrauliques du secteur, nous avons principalement travaillé à la caractérisation des relations nappe/rivière au voisinage de l'Île de la Platière (Figure 22). Les zones nord et sud ne sont toutefois pas complètement oubliées car elles ont des caractéristiques différentes du cœur de la zone d'étude et elles présentent à ce titre un intérêt.

Le principal problème posé par l'étude de l'Ile de la Platière provient du fait que certaines unités de pompages (OSIRIS principalement) y jouent un rôle important et que les volumes prélevés ne sont pas toujours connus avec une bonne résolution temporelle. Cela contribue à augmenter l'incertitude inhérente à la modélisation des échanges nappe/rivière. De plus le système de la Platière est particulièrement complexe :

- le sens d'écoulement de la lône de la Platière dépend du débit du Rhône ;
- la nappe et la lône sont déconnectées ;
- il est possible d'identifier entre 3 et 5 unités hydrauliques selon une section perpendiculaire à la plaine (Vieux-Rhône, lône, canal de dérivation, contre-canaux).

Mais la complexité de la zone est également un facteur d'intérêt au vu de la diversité des situations potentiellement rencontrées.

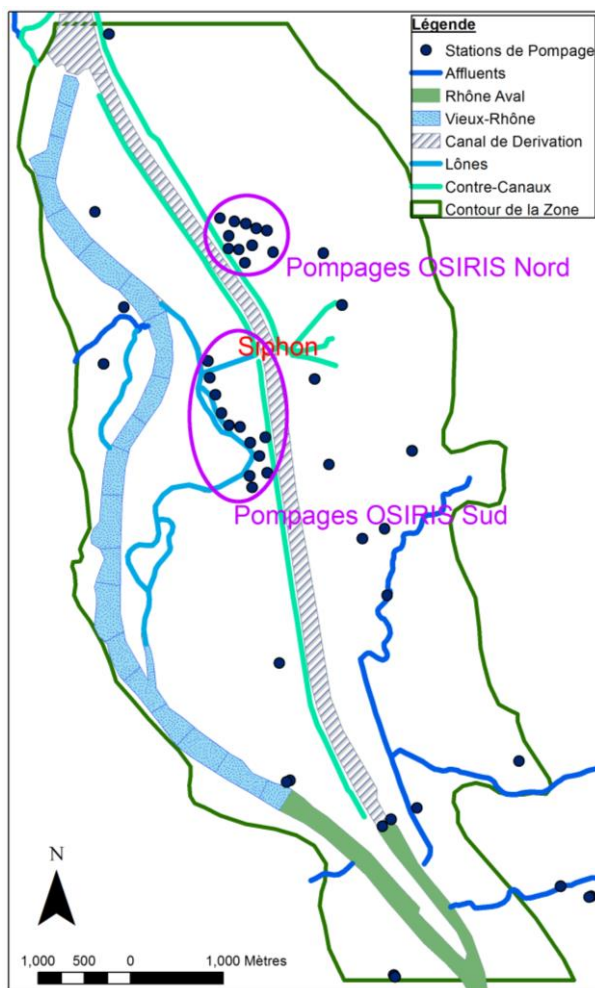


Figure 22 : Zone d'étude préférentielle

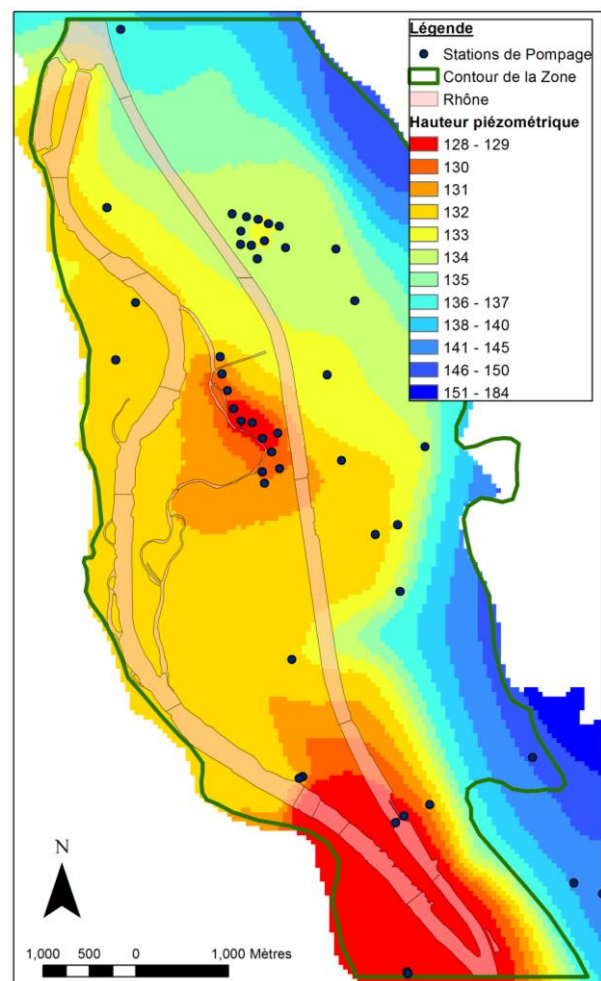


Figure 23 : Hauteur piézométrique moyenne observée (m) dans la nappe phréatique

La zone d'étude a déjà été décrite en détails dans le rapport de la phase 2 des travaux sur les échanges nappe – rivière (Bornette et al., 2008).

3.2.3. Instrumentation

Les données de hauteurs de nappe dont nous disposons sont parfois incomplètes ou de qualité douteuses. Et, certaines zones géographiques sont relativement peu couvertes en points de mesures. Un certain nombre de questions se sont de ce fait posées :

- (1) Quelles sont les conditions d'échanges hydrauliques sous la lône de la Platière (changement de conditions entre régime saturé et non-saturé) ?
- (2) L'onde de crue en nappe passe-t-elle sous le canal de dérivation ? Comment se propage-t-elle le long d'une section perpendiculaire à la plaine alluviale ?
- (3) Les apports de versant changent-ils dans le temps et ont-ils une influence également sur le niveau de la nappe ?
- (4) Quel peut être l'impact des pompages sur les situations d'échanges ?

Nous avons par conséquent installé nos propres sondes de mesure de hauteurs d'eau en certains points particuliers de la nappe (6 sondes). Plutôt que d'étaler les points de mesure nous avons choisi de densifier le réseau de mesure existant de certaines zones afin de mieux pouvoir répondre aux questions précédentes (Figure 24).

Le choix des points de mesure s'est fait après discussion avec l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse et avec l'accord de la CNR au sein de piézomètres préexistants appartenant à cette dernière. Une sonde de mesure de pression a été installée aux P44, P120N, P230, P302, P285bis et P530 à partir du 27 février 2012.

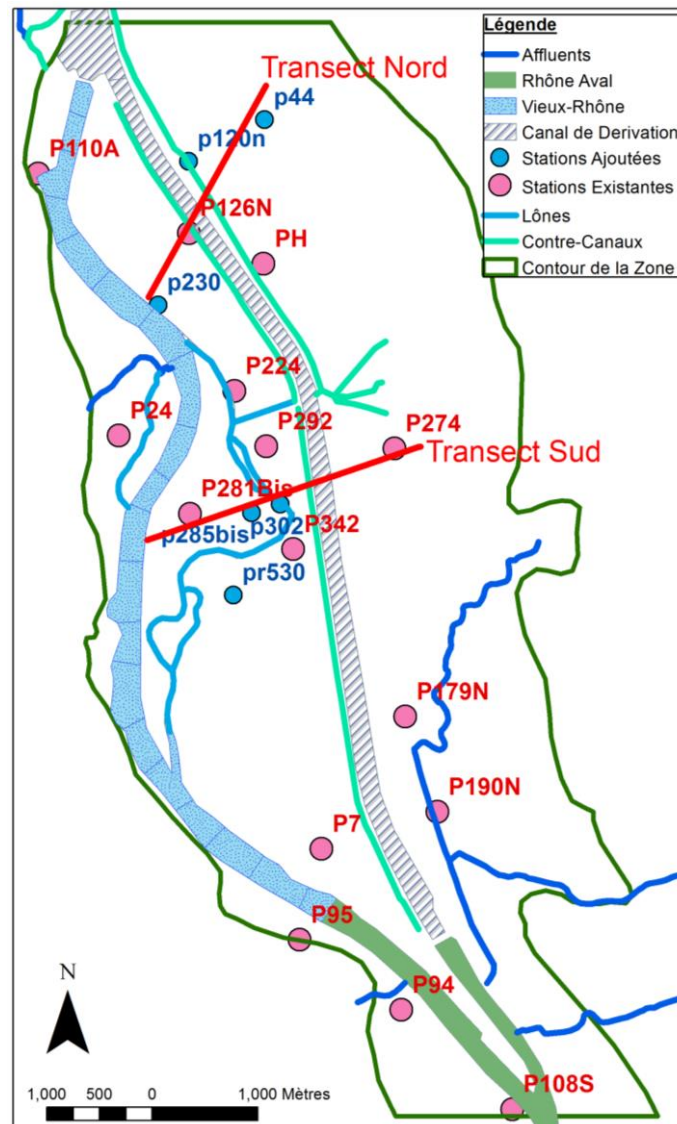


Figure 24 : Points de mesure des variations en continu du niveau de la nappe

Le P44 sert à prendre en compte les apports du nord-est supposés : apports de versants à l'est et venant de la partie nord de la plaine alluviale. Le P120N est situé à proximité du canal de dérivation et du

contre-canal. Il permet de détecter une éventuelle influence de ce dernier sur le niveau de nappe. Le P230, plus proche du Vieux-Rhône, sert de point de référence pour la mesure du niveau de ce dernier. Les points P44, P120N, P126N et P230 sont, en outre, à peu près alignés suivant la ligne d'écoulement (transect nord). Ils sont donc susceptibles de montrer comment fluctue celle-ci lors d'un épisode de crue et s'il est possible que l'onde de crue se propage sous le canal de dérivation.

Trois autres sondes de mesures ont été installées aux alentours de la lône de la Platière. Le P302 est situé à proximité immédiate de la lône et d'une station de pompage d'OSIRIS. Le P285Bis se situe entre la lône et le Vieux-Rhône et forme un alignement avec le P302 et le P281bis. Il permet par conséquent d'étudier la propagation de l'onde de crue au sein du cône de pompage d'OSIRIS car ces points sont alignés selon l'axe d'une ligne de courant (transect sud). Le P530 est influencé par les pompages en nappe et le niveau du Vieux-Rhône. Il capte également l'influence de la plaine de Sablons au sud où une fluctuation annuelle du niveau de nappe est observée.

Ces points de mesure permettront aussi de vérifier la fiabilité des données à notre disposition. La température et la pression sont relevées avec un pas de temps d'une heure, ce qui permet d'affiner la résolution temporelle.

3.3. Méthodes

Dans un premier temps une Analyse en Composantes Principales (ACP) est effectuée, portant sur les signaux de hauteurs d'eau en nappe en fonction du temps. Cette ACP permet de définir les principaux facteurs responsables de la variabilité du niveau d'eau de la nappe et notamment de détecter les zones fortement influencées par les fluctuations de niveaux d'eau en rivière (Longuevergne et al., 2007). A chaque point de la nappe peut être associé le pourcentage de variabilité de la hauteur d'eau qui est expliquée par le cours d'eau voisin. Il est alors possible de déterminer la zone d'influence de la rivière. Les principales zones de comportement homogène, au sein de la nappe, sont ensuite définies à l'aide d'une méthode de groupement qui porte sur les scores des Composantes Principales de l'ACP.

Dans un second volet, des analyses corrélatoires et spectrales sont réalisées, basées sur les niveaux de hauteurs d'eau en nappe et en rivière. Celles-ci permettent de caractériser les relations de cause à effet entre ces différents signaux (Mangin, 1984 ; Larocque et al., 1998). Il est ainsi possible d'estimer les temps de retard et l'atténuation subie par l'onde de pression lors de sa propagation dans l'aquifère depuis la rivière. L'étude de la relation de cause à effet inverse pourrait être réalisée de la même manière, mais dans le cas d'un bassin versant plus étendu dans lequel le niveau de nappe aurait un impact sur le débit de la rivière.

Les résultats issus des deux précédentes approches sont représentés sous forme de cartes par le biais d'une interpolation spatiale.

Ces deux approches s'intéressent à l'évolution respective des niveaux d'eau au sein de la nappe et de la rivière. La connaissance de l'évolution des niveaux de nappe est effectivement intéressante en elle-même. En effet la hauteur d'eau est un paramètre important lorsque l'on prélève de l'eau en nappe. Le passage des ondes de pression est également susceptible de provoquer un mélange dans le cas où l'eau est stratifiée (Xin et al., 2010). Cela peut donc avoir un impact sur la qualité du milieu.

Dans certains cas un temps de retard peut être établi entre l'arrivée de l'onde de pression et l'arrivée de molécules d'eau provenant du cours d'eau (Derx et al., 2010). Un niveau d'eau moyen peut également être calculé afin d'estimer le gradient de nappe moyen (Serfes, 1991). Cependant il n'existe pas nécessairement de relations entre la propagation de l'onde de pression dans le système et entre les flux échangés entre les deux entités, ou, du moins, la relation n'est pas évidente.

Par conséquent une troisième approche a été retenue. Elle consiste à établir un modèle numérique déterministe de la nappe (Derx et al., 2010). Ce type de modèle permet, en théorie, d'obtenir l'évolution des débits échangés en fonction du temps. Cependant il nécessite un grand nombre de données et il ne

propose pas de solution unique : plusieurs jeux de paramètres différents peuvent conduire au même résultat.

La dernière partie, non encore développée, s'intéressera à faire le lien entre les approches statistiques descriptives et l'approche de modélisation numérique.

3.3.1. *Traitement des données*

Les chroniques d'évolution des hauteurs d'eau à notre disposition n'ont pas de pas de temps harmonisés. Une première étape a donc consisté à choisir un pas de temps unique pour étudier l'ensemble des séries de mesures automatiques. Après analyse des données à notre disposition il s'avère qu'un pas de temps de 4 h entre les mesures est le plus adapté. En effet :

- ce pas de temps correspond à la majorité des chroniques de mesures et très peu de chroniques de niveaux d'eau en fonction du temps sont disponibles avec un pas de temps inférieur ;
- les fluctuations de niveau à l'échelle d'un pas de temps de 4 h ne sont pas toujours négligeables et la perte d'information causée par l'utilisation d'un pas de temps journalier pourrait donc s'avérer être trop importante.

Une technique d'interpolation linéaire a été utilisée afin d'harmoniser les pas de temps. Mais cela introduit nécessairement un biais lors de l'analyse ultérieure.

Un autre jeu de données a également été considéré. Il s'agit de mesures trimestrielles réalisées par la CNR. Ces mesures sont réalisées au sein d'un très grand nombre de piézomètres. La résolution spatiale est par conséquent améliorée, bien que la résolution temporelle soit diminuée.

3.3.1.1. *Détection des données aberrantes*

Une fois les pas de temps harmonisés, il a été nécessaire de procéder à l'élimination des valeurs aberrantes des signaux de nappe. Plusieurs types de tests ont été pratiqués afin de détecter :

- Les sauts dans la mesure ;
- Les changements de comportement et les dérives des mesures.

Pour détecter les sauts on procède à un test de comparaison de la variation du signal par rapport à l'écart type (Fatmi, 2009). La difficulté liée à cette technique est de caler la valeur seuil à partir de laquelle on considère le saut comme anormal. Cette valeur est relative à l'amplitude maximale des variations de la nappe au point considéré.

Différentes techniques ont été utilisées pour mettre en évidence les changements de comportements entre différentes périodes temporelles.

Une première méthode consiste à caler un modèle qui reproduise le signal observé, à l'aide d'un « facteur explicatif », sur une période jugée correcte (dite de référence), puis à essayer de reproduire le signal observé à l'aide du même modèle sur les périodes test (douteuses). Une procédure de division de l'échantillon est utilisée pour le calage : les deux tiers de la période de référence sont utilisés pour le calage des paramètres du modèle tandis que le dernier tiers sert à tester la validité du modèle. Si le modèle permet de bien représenter ce qui est observé sur le dernier tiers de la période de référence mais non sur les périodes tests, cela met en évidence un changement de comportement de la nappe avec le temps (Ljung, 1999). Les différents types de modèles utilisés sont développés dans la partie suivante.

Un autre type de méthode employé a consisté en une comparaison de la distribution statistique des niveaux entre la période jugée de référence et entre les périodes tests, à l'aide d'un test du Chi 2 (Pearson, 1900).

La définition de la période de référence est problématique. Le choix se base sur des données ponctuelles de hauteur d'eau qui confirment la justesse de la mesure continue. Mais la longueur de la

période est aussi un facteur à prendre en compte. Afin de pouvoir caler un modèle il s'agit en effet de considérer la période sans lacune la plus importante et la plus représentative possible.

Une dernière technique utilisée consiste à représenter le signal de nappe observé en un point en fonction d'un autre signal de nappe observé en un point proche. Cela permet de relever d'éventuelles incohérences, comme des écrêtages du signal. Certaines anomalies sont également visibles directement à l'aide d'une simple visualisation de la courbe de valeurs.

Les différentes méthodes décrites rendent visibles des changements de comportements de la nappe en fonction du temps. Mais, un changement de comportement de la nappe peut aussi bien traduire un défaut de la mesure qu'un phénomène physique réel. Le choix d'éliminer certaines valeurs jugées incohérentes ne peut donc en final se faire qu'après analyse des facteurs extérieurs pouvant influencer la mesure. Seules les valeurs considérées comme les plus « anormales » sont éliminées.

La période allant du 1 janvier 2003 au 17 juin 2009 (soit 14155 pas de temps), qui concentre la majeure partie des données à notre disposition, a été choisie pour étudier les fluctuations de la nappe alluviale du Rhône. Les périodes sans donnée, en tenant compte des trous et de l'élimination des valeurs aberrantes, représentent en moyenne entre 10 et 20% des chroniques piézométriques. Les chroniques pour lesquelles plus de 50% de la série temporelle doit être reconstituée ne sont pas considérées. Au final seulement 15 des 24 chroniques disponibles sont conservées.

Dans le cas des données trimestrielles, celles-ci couvrent la période 1991-2011. 36 stations de mesures et 74 pas de temps sont considérés.

3.3.1.2. Reconstitution des données manquantes

Afin d'appliquer aux séries temporelles les différentes méthodes statistiques, il est nécessaire de compléter les lacunes des signaux. Des auteurs ont remplacé les données manquantes par des distributions probabilistes (Chen et al., 2009), ou par une valeur moyenne (Joliffe, 2002). Dans cette étude le choix de la reconstruction des données manquantes a été fait. En effet les données aberrantes ont préalablement été détectées à l'aide de modèles de comportement. Ces mêmes modèles de comportement ont donc été utilisés pour reconstituer les données.

- Différents choix ont dû être faits en ce qui concerne notamment :
- Le type de modèle ;
- La technique d'ajustement des paramètres ;
- La période de calibration ;
- Les facteurs explicatifs ;
- Le critère d'ajustement entre le signal observé et modélisé.

Pour la reconstruction, et la détection des erreurs, deux types de modèles déterministes sont utilisés : un modèle linéaire autorégressif (ARX) et un modèle non linéaire de type Hammerstein-Wiener. Le modèle non linéaire permet en général de mieux représenter les fluctuations observées. Cependant, dans le cas où la période de calibration est courte, ou lorsque le facteur explicatif diffère entre la période de calibration et la période de reconstitution, un modèle linéaire est préféré, car il fournit alors des solutions plus stables (Woodhouse, 1999).

Le modèle linéaire ARX procède de la manière suivante (Équation 1) :

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nb-nk+1) + e(t)$$

Équation 1 : Modèle linéaire ARX

La sortie du modèle $y(t)$ représente le niveau de nappe au temps t . Ce niveau dépend des niveaux de nappe aux temps précédents ainsi que du facteur explicatif u . na et nb sont des temps de mémoire du système et nk le temps de retard entre une variation de u et la réponse de y . e représente l'erreur. La

fonction *arx* du logiciel Matlab est utilisée (Ljung, 1996). Les paramètres *na*, *nb* et *nk* sont estimés à l'aide du critère d'Akaike (Akaike, 1974).

Le modèle d'Hammerstein-Wiener est construit avec deux blocs non-linéaires encadrant un bloc linéaire (Billings, 1980). Des fonctions linéaires par morceaux sont utilisées pour les blocs non-linéaires et un modèle « erreur de sortie » est employé pour le bloc linéaire. La fonction Matlab *nlhw* est utilisée (Ljung, 1996).

La période de calibration que l'on considère est en général la plus longue période sans lacune. Toutefois certaines périodes plus courtes peuvent être préférées lorsque les fluctuations de niveaux sont faibles sur la période la plus longue.

Plusieurs facteurs explicatifs différents sont testés : précipitations, évapotranspiration, niveaux du Rhône en divers points. Le niveau du Vieux-Rhône s'avère être le meilleur facteur explicatif des signaux de nappe.

La qualité de la reconstruction est donnée par le critère de Nash. Les paramètres des modèles sont choisis de manière à maximiser le critère de Nash (Nash, 1970). Un critère de Nash supérieur à 0,5 est jugé acceptable.

En bilan, la reconstitution s'est avérée possible pour tous les signaux de hauteurs de nappe tout en respectant un critère de Nash supérieur à 0,5 et en ne prenant en compte qu'un seul facteur explicatif. Le signal de hauteur d'eau de la rivière permet donc d'expliquer la majeure partie des signaux de nappe. Le système possède un comportement non-linéaire marqué.

Cependant la reconstitution reste imparfaite et est susceptible d'entraîner un biais lors de l'analyse ultérieure des données. Des tests de sensibilités sont par conséquent menés afin d'estimer l'impact potentiel que cela peut avoir sur les résultats.

3.3.2. Analyses comportementales

3.3.2.1. Analyse en Composantes Principales

L'ACP permet de décomposer un jeu de données en un jeu plus petit qui puisse expliquer la majeure partie de la variance totale observée. C'est une méthode classique (Karhunen, 1947 ; Jolliffe, 2002). Etant donné n points dans un espace à p dimensions, l'ACP revient à projeter les points dans un espace de dimension t (inférieur à p) tel que la dispersion soit maximale dans l'espace choisi.

L'ACP est réalisée à l'aide de la fonction *princomp* de Matlab. Elle porte sur les séries temporelles des hauteurs de nappe (Longuevergne et al., 2007). Deux ACP sont, à chaque fois, effectuées : l'une basée sur la matrice de covariance et l'autre basée sur la matrice de corrélation du système.

Une fois que les Composantes Principales (CP) ont été calculées le nombre de CP retenu est défini, notamment, par le biais d'un seuil de variance expliqué par les différentes composantes. Un seuil de 80% de variance totale du système expliqué est retenu.

Les scores, associés aux Composantes Principales, des différentes stations de mesures sont ensuite spatialisés à l'aide d'un outil de système d'information géographique. La fonction *toporaster* du logiciel ARCGIS est utilisée (Hutchinson, 1989). Elle se base sur l'utilisation de fonction splines.

Une interprétation physique des CP est alors recherchée. La difficulté théorique provient du fait que le but de l'ACP est de définir des variables non corrélées qui maximisent successivement la variance. Mais les signaux physiques peuvent être corrélés entre eux : pluie et niveau du Rhône, pompes agricoles et évapotranspiration, ... La signification physique des CP est par conséquent révélée de deux manières : (1) tracé des vecteurs propres et comparaison avec les signaux associés aux différents facteurs contributifs envisagés, (2) représentation spatiale des coefficients associés aux différentes CP qui

permet de déterminer si les hypothèses issues de l'étape (1) sont justifiées (par exemple l'influence du Rhône est censée être plus forte au voisinage de celui-ci).

L'ACP permet, en définitive, seulement de détecter les facteurs qui contribuent à la variabilité du niveau d'eau.

3.3.2.2. Groupement par comportement

Faisant suite à l'ACP une technique de groupement par K-means a été employée, à partir des scores des différentes CP, afin de grouper les points de la nappe par similitudes de comportement.

La technique de groupement itérative par K-mean fonctionne de la manière suivante (Mac Queen, 1967) :

Une fois choisi le nombre k de groupes (a) les k centres des groupes sont assignés aléatoirement (b). Puis les distances entre les points et chaque centre de groupes sont calculées (c). Les points sont associés au centre de groupe le plus proche (d). Enfin le centre de chaque groupe est recalculé. La procédure revient à l'étape (d) jusqu'à ce que le centre des groupes n'ait pas changé d'une itération sur l'autre. Afin d'éviter la convergence de l'algorithme sur un optimum local la procédure est réalisée avec différents jeux initiaux de centroïdes.

Cette procédure est relativement facile à implémenter, robuste et est bien documentée. La fonction *kmeans* de matlab a été utilisée.

La distance Euclidienne a été choisie comme distance à minimiser.

Différents nombre de CP ont été retenus. Seules les CP expliquant une part significative de la variance sont toutefois prises en compte (Ben-Hur et al., 2003). Le même poids a été donné à chacune des CP sélectionnées. Cela permet d'identifier les dissimilarités parmi les variables. Un biais peut cependant être introduit comme chaque CP n'explique pas le même pourcentage de variance totale du signal (Joliffe, 2002).

Le choix du nombre de groupes à retenir est également problématique. Une méthode consistant à comparer la compaction intra-groupe avec la séparation entre groupes, à l'aide du calcul de la « silhouette » a été considérée (Chiang et al., 2009). En l'absence d'indications claires provenant du calcul de la « silhouette », la partition apparaissant comme la plus riche en renseignement a été choisie.

Les groupes sont finalement spatialisés selon la même procédure que pour les scores associés aux CP.

3.3.3. Analyses corrélatoires et spectrales

Différentes techniques sont employées afin de caractériser la relation qui existe entre les fluctuations du niveau du Rhône et celles de la nappe alluviale. L'analyse corrélatoire simple (Tam et al., 2004) est employée dans un premier temps pour déterminer quels points de la nappe sont les plus influencés par les fluctuations de niveau du Rhône. L'analyse de Fourier permet ensuite d'étudier la variation de cette corrélation en fonction du contenu fréquentiel du signal (Larocque et al., 1998). L'analyse en Ondelette offre un moyen de combiner les deux approches en observant les variations de la corrélation en fonction du temps et de la périodicité des signaux (Mangin, 1984 ; Labat, 2005 ; Salerno et al., 2010).

Les différents résultats obtenus - atténuation, retard, filtrage fréquentiel - sont par la suite interpolés spatialement afin d'obtenir une carte du fonctionnement de l'aquifère (voir la description dans la partie ACP).

Les fonctions *xcorr*, *corr* et *corrcoeff* de Matlab sont utilisées, dans le cas de la corrélation simple (Box, 1976). Elles permettent de calculer la corrélation qui existe entre les séries temporelles, l'autocorrélation

propre des signaux, ainsi que le temps de retard moyen qui sépare une série de l'autre. Pour l'analyse de Fourier, les fonctions *pwelch*, *mscohere* et *fft* sont utilisées (Cooley, 1965 ; Welch, 1967). Elles autorisent le calcul de la densité spectrale de puissance et de la corrélation spectrale entre les signaux. Pour l'analyse en ondelettes, le paquet *wtc-r16* de Grinsted est utilisé. Il est basé sur les travaux de (Torrence, 1998).

Une difficulté réside dans l'établissement de la valeur seuil à partir de laquelle on peut considérer la corrélation comme étant significative.

Dans le cas de la corrélation simple, le problème est contourné en utilisant la corrélation de Spearman (Spearman, 1904). En ce qui concerne l'analyse de Fourier et l'analyse en Ondelette, on réalise une approximation qui consiste à considérer les signaux de hauteurs d'eau comme étant Gaussiens (Bortel et al., 2006 ; Torrence et al., 1998 ; Maraun et al., 2007). Dans ce cas, le seuil de significativité est déterminé, pour l'analyse en ondelettes, en calculant l'intervalle de confiance de la cohérence qui existe entre des signaux aléatoires gaussiens à l'aide de tirages aléatoire de type Monte-Carlo. En ce qui concerne l'analyse de Fourier le calcul du seuil de significativité est basé sur les travaux de (Koopmans, 1995), en se plaçant dans le cas de segments sans recouvrement.

Le fait que le signal étudié ne soit pas infini entraîne des effets de bord lors du calcul de la transformée de Fourier ou de celle en ondelettes. Un fenêtrage est réalisé dans le cas de l'analyse de Fourier afin de limiter ces effets de bord (fenêtre de Welch). Pour l'analyse en ondelettes, la zone influencée par les effets de bords dans l'espace-temps/fréquence est définie et non-prise en compte lors de l'analyse.

3.3.4. Modélisation numérique déterministe

3.3.4.1. Modélisation des écoulements surfaciques

Le module d'écoulements surfaciques résout les équations de Barré-Saint-Venant en 1D. Ces équations proviennent de l'écriture des relations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Elles s'appliquent dans le cas où la profondeur du cours d'eau est très faible devant sa longueur et où, par conséquent, la vitesse horizontale est constante le long d'une section en travers et la pression reste hydrostatique. La pente du cours d'eau doit aussi être faible et la variation de profil entre deux sections en travers douce. On considère par ailleurs le débit d'apport de la nappe au fleuve comme négligeable par rapport au débit du fleuve.

Les équations s'écrivent de la manière suivante (Équation 2 et Équation 3) :

$$\frac{\delta S}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = Q$$

Équation 2 : Equations de Barré-Saint-Venant en 1D

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta \left(\beta * \frac{Q^2}{S} \right)}{\delta x} + gS \frac{\delta z}{\delta x} = -gSJ$$

Équation 3 : Equations de Barré-Saint-Venant en 1D

Où t est le temps, x l'abscisse longitudinale, S la section mouillée, Q le débit, z la côte de la surface d'eau, g l'accélération de la pesanteur, J la pente de frottement et β est un coefficient de quantité de mouvement. Les équations précédentes sont complétées par une équation explicitant J en fonction de la rugosité du lit (coefficient de Manning ou de Chezy).

Le logiciel MIKE11 a été utilisé pour la résolution de cette équation (DHI, 2007). Le schéma de résolution des équations qui est employé est un schéma implicite d'Abbot Ionescu à 6 points qui utilise

la technique des différences finies. Le nombre de maille du problème correspond au double du nombre de sections en travers considérées. Une résistance de type Manning a été utilisée.

Le résultat de la modélisation est le calcul en tous points (des sections en travers) de l'altitude de la surface libre. Il est nécessaire de disposer des données suivantes :

- Débits en entrée du modèle et éventuellement hauteurs de la ligne d'eau en sortie du modèle ;
- Nombreux profils en travers du cours d'eau (coordonnées x,y,z) ;
- Sens du courant ;
- Emplacement des barrages et seuils ;
- Rugosité du fond du lit.

La rugosité du fond du lit est le principal paramètre de calage du modèle, que l'on optimise, tandis que la validité du modèle est fournie par la comparaison de la ligne d'eau calculée en un point avec la ligne d'eau observée au même point. Le calage s'effectue par minimisation du critère de Nash.

Trois modèles différents ont été réalisés.

Un premier modèle s'attache à reproduire les fluctuations de la partie amont du Rhône (Figure 19), jusqu'au barrage de Saint-Pierre de Bœuf et à l'entrée du canal de dérivation. Le débit d'entrée du système a été considéré égal au débit du Rhône observé à la station de Ternay. Les fluctuations à l'aval sont considérés comme nulles.

Un second modèle considère le Vieux-Rhône (Figure 19). Le débit amont, à l'aval du barrage de Saint-Pierre de Bœuf, est estimé par la CNR. Le niveau du Rhône à l'aval de cette section est également mesuré à la hauteur du seuil de Peyraud.

La partie aval (Figure 19) prend en compte le Rhône du seuil de Peyraud à la retenue de Saint-Vallier. Le débit provenant du Vieux-Rhône est connu. Le débit éclusé par le barrage de Péage-de-Roussillon est pris égal au débit du Rhône à Ternay auquel est retranché celui du Vieux-Rhône. Les fluctuations du Rhône au niveau de la retenue de Saint-Valier sont considérées comme négligeables.

3.3.4.2. Modélisation des écoulements souterrains

Le module d'écoulements souterrains résout l'équation de diffusivité en milieu poreux. En milieu saturé l'équation s'écrit comme (Équation 4) :

$$\text{div}(K \cdot \text{grad}(h)) = q + S \cdot \frac{\delta h}{\delta t}$$

Équation 4 : Equation de diffusivité en milieu poreux

Où q représente le débit prélevé ou injecté (pompages, échanges nappe/rivière,...), K est la conductivité hydraulique, h la hauteur piézométrique, t le temps et S le coefficient d'emménagement spécifique. En milieu non-saturé l'équation de Richards est résolue.

Le logiciel FEFLOW (2D et 3D) a été utilisé. Il résout les équations régissant le comportement de la nappe à l'aide d'un schéma aux éléments finis dans l'espace et d'un schéma de résolution implicite en temps (Diersch, 2009).

Le résultat de la modélisation est le calcul en tous points de l'aquifère de la charge piézométrique de la nappe phréatique. Afin de pouvoir modéliser la zone d'étude, il est nécessaire de disposer des données suivantes :

- Données de précipitations, évapotranspirations et volumes prélevés ;
- Modèle en 3D de l'aquifère ;
- Chroniques de mesure de hauteurs d'eau et des cartes piézométriques ;

- Fourchettes de valeurs pour les caractéristiques de l'aquifère (perméabilité, transmissivité, paramètres de la zone non-saturée,...) ;
- Résultats du modèle d'écoulements surfacique en termes de hauteurs d'eau imposées.

Les caractéristiques de l'aquifère sont les paramètres de calage du modèle, que l'on optimise, tandis que la validité du modèle est fournie par la comparaison de la hauteur d'eau calculée en un point avec la hauteur d'eau observée au même point. Le calage s'effectue par minimisation du critère de Nash. Deux techniques distinctes ont été retenues pour le calage :

- Une technique où l'on fait varier empiriquement les paramètres du modèle – cette technique peut être complétée par l'établissement d'un plan d'expérience ;
- Une technique employant un algorithme de minimisation de la fonction objectif (algorithme de Levenberg-Marquardt) à l'aide du module PEST.

3.4. Résultats

3.4.1. Analyses comportementales

3.4.1.1. Analyse en Composantes Principales

- **Chroniques horaires**

L'ACP est menée dans un premier temps sur le jeu de données au pas de temps de 4h. L'analyse montre que les deux premières CP expliquent, à elles seules, près de 80% de la variance totale du système.

Le premier vecteur propre explique 65 à 70% de la variance totale, selon que l'on considère l'ACP basée sur la matrice de covariance ou sur la matrice de corrélation. La représentation spatiale de la première CP montre que les forts coefficients (scores) associés à cette première CP sont situés au voisinage du Vieux-Rhône (zones foncées sur la Figure 25). Si l'on représente la première CP (série temporelle) on s'aperçoit également que le signal est très proche de celui du Rhône (Figure 26). Il semble donc que les fluctuations observées sur le Vieux-Rhône soient responsables de la majeure partie des variations de niveau de la nappe. Les points de la nappe situés loin de la rivière sont moins affectés par les fluctuations de celles-ci. Cependant des disparités de comportement sont visibles. La zone centrale, où sont situés les principaux prélèvements d'eau d'OSIRIS (zone de pompage sud), est plus fortement influencée par les fluctuations de niveau du Vieux-Rhône que la plaine de Sablons, plus au sud, et ce alors que les prélèvements peuvent expliquer à eux seuls une partie de la variabilité de la nappe. Les prélèvements ne masquent donc pas l'influence de la rivière.

Le second vecteur propre explique environ 15% de la variance du système. L'interprétation physique de cette CP est moins évidente que dans le cas précédent. Il apparaît néanmoins que cette CP peut être rattachée à au moins deux phénomènes différents : l'existence d'un temps de retard dans la propagation de l'onde de crue en nappe, qui explique les pics négatifs (Figure 27), et l'influence des pompes qui expliquent certains pics positifs (diminution des pompes). L'influence des pompes se perçoit également à travers le fait que les coefficients les plus élevés associés à cette CP se situent sur la zone des captages OSIRIS (Figure 28).

Une influence saisonnière est également visible dans cette CP avec des maximums de hauteurs d'eau observés en été et des minimums visibles en hiver (Figure 27). Ce phénomène ne se retrouve ni au niveau des débits du Rhône, ni au niveau de la piézométrie de la nappe de Bièvre-Valloire où les maximums de hauteurs d'eau se retrouve surtout en période hivernale. Cette nappe alimente le Rhône, juste au sud de la zone d'étude. La variabilité saisonnière observée ne peut non plus être rattachée exclusivement à l'influence des prélèvements d'OSIRIS.

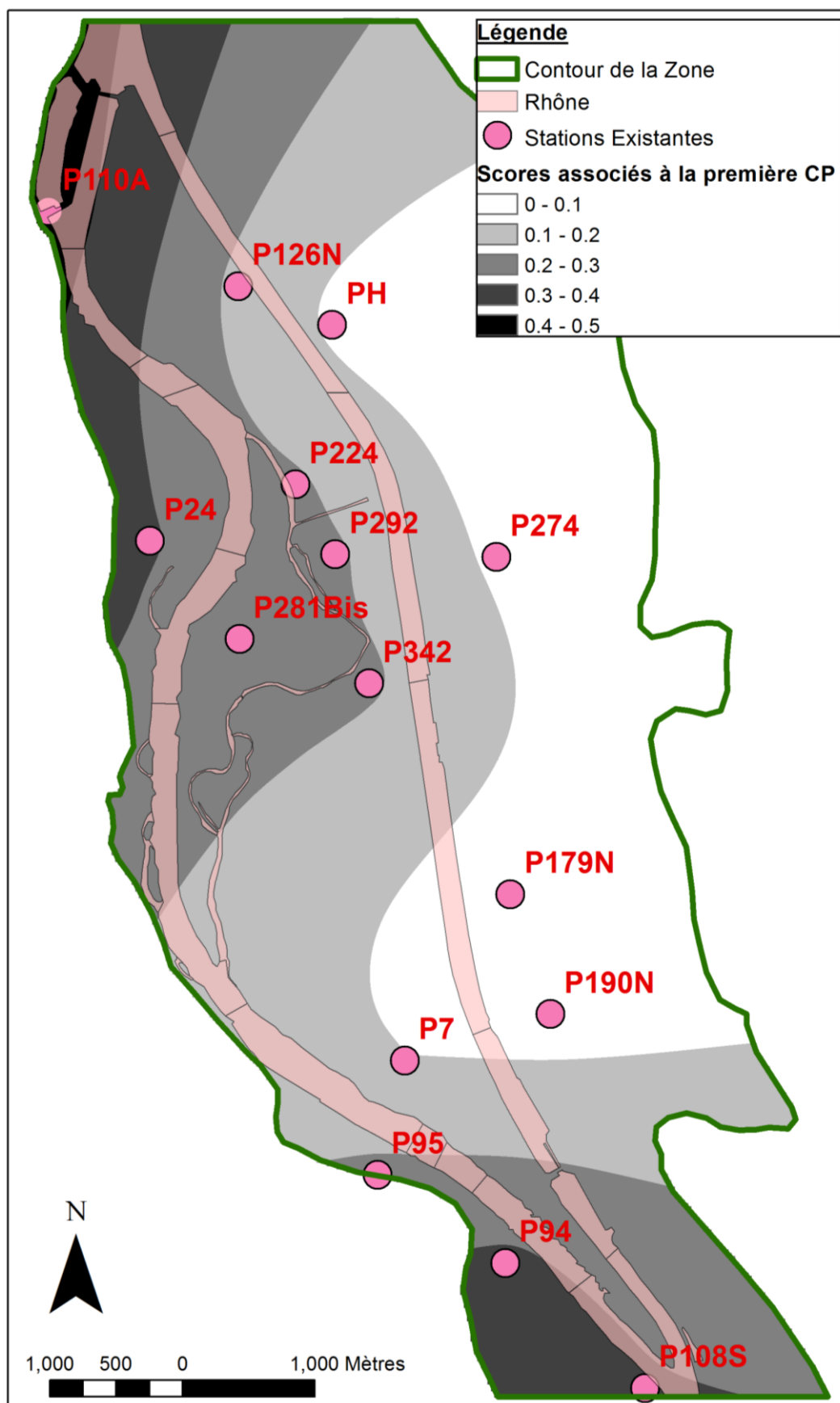


Figure 25 : Représentation spatiale des scores associés à la première composante principale – ACP sur données au pas de temps de 4h

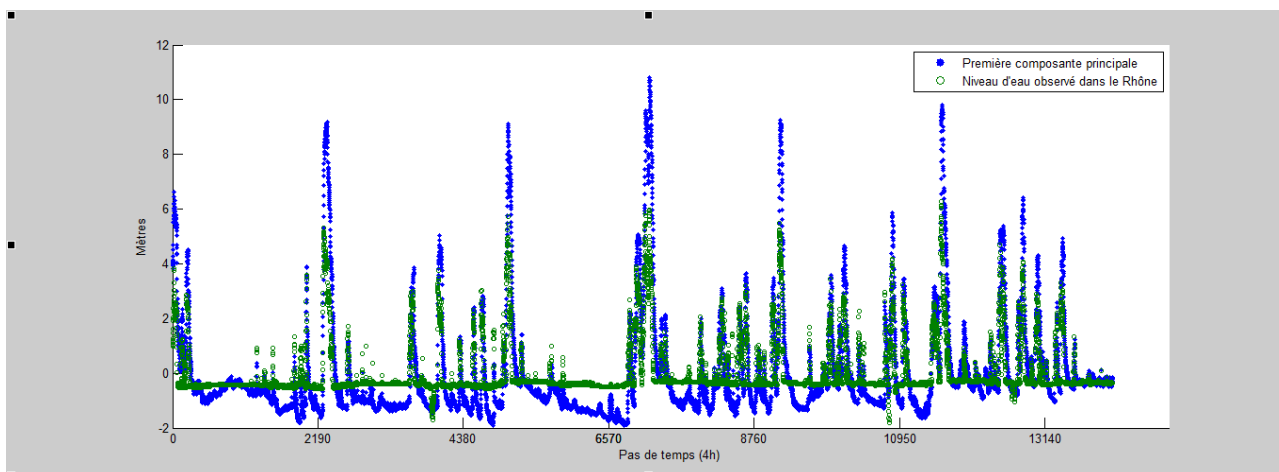


Figure 26 : Comparaison du niveau observé dans le Vieux-Rhône en vert (auquel est retranchée sa moyenne) et de la première composante principale en bleu – ACP sur données au pas de temps de 4h

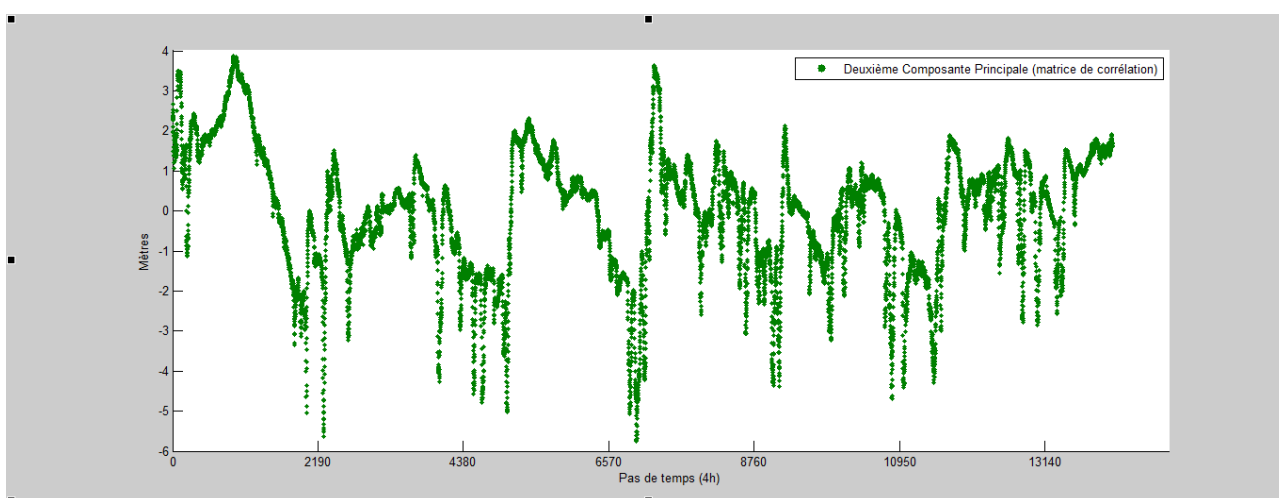


Figure 27 : Deuxième composante principale (obtenue à l'aide de la matrice de corrélation)

• Chroniques trimestrielles

L'intérêt d'utiliser l'ACP sur les chroniques trimestrielles est que celles-ci sont disponibles sur un nombre de points beaucoup plus conséquent que pour les données continues (au pas de temps horaire). Toutefois le changement de pas de temps est susceptible de modifier quelque peu les résultats.

Il est cette fois nécessaire de considérer 5 CP pour expliquer 80% de la variance du système.

Les deux premières CP, qui expliquent à elles seules 60% de la variabilité du système, sont représentatives de l'influence du Vieux-Rhône (Figure 29). La première CP (45% de la variance totale expliquée) est corrélée avec le niveau moyen du Vieux-Rhône sur la semaine précédant les mesures de niveau (non montré). Elle ressemble en cela à la première CP issue des données au pas de temps de 4h. Les deux premières CP se distinguent principalement sur la zone des prélèvements OSIRIS. Sur cette zone les coefficients associés à cette deuxième CP sont relativement faibles.

Les troisièmes, quatrièmes et cinquièmes CP sont assez similaires et possèdent des coefficients associés importants sur la partie sud-est de la zone d'étude, à l'extrémité est de la plaine de Sablons (Figure 30). Il est possible que ces forts coefficients soient dus à un apport de versant important et variable dans le temps sur cette zone, mais on ne peut totalement exclure l'influence d'un facteur plus local (pompage). Cette zone correspond à celle préalablement identifiée comme étant rattachée à la seconde CP associée aux données au pas de temps de 4h. C'est là que sont observées des fluctuations saisonnières avec des maximums de hauteurs d'eau en été. Il serait donc intéressant de densifier le réseau de mesure sur cette zone pour mieux interpréter le phénomène.

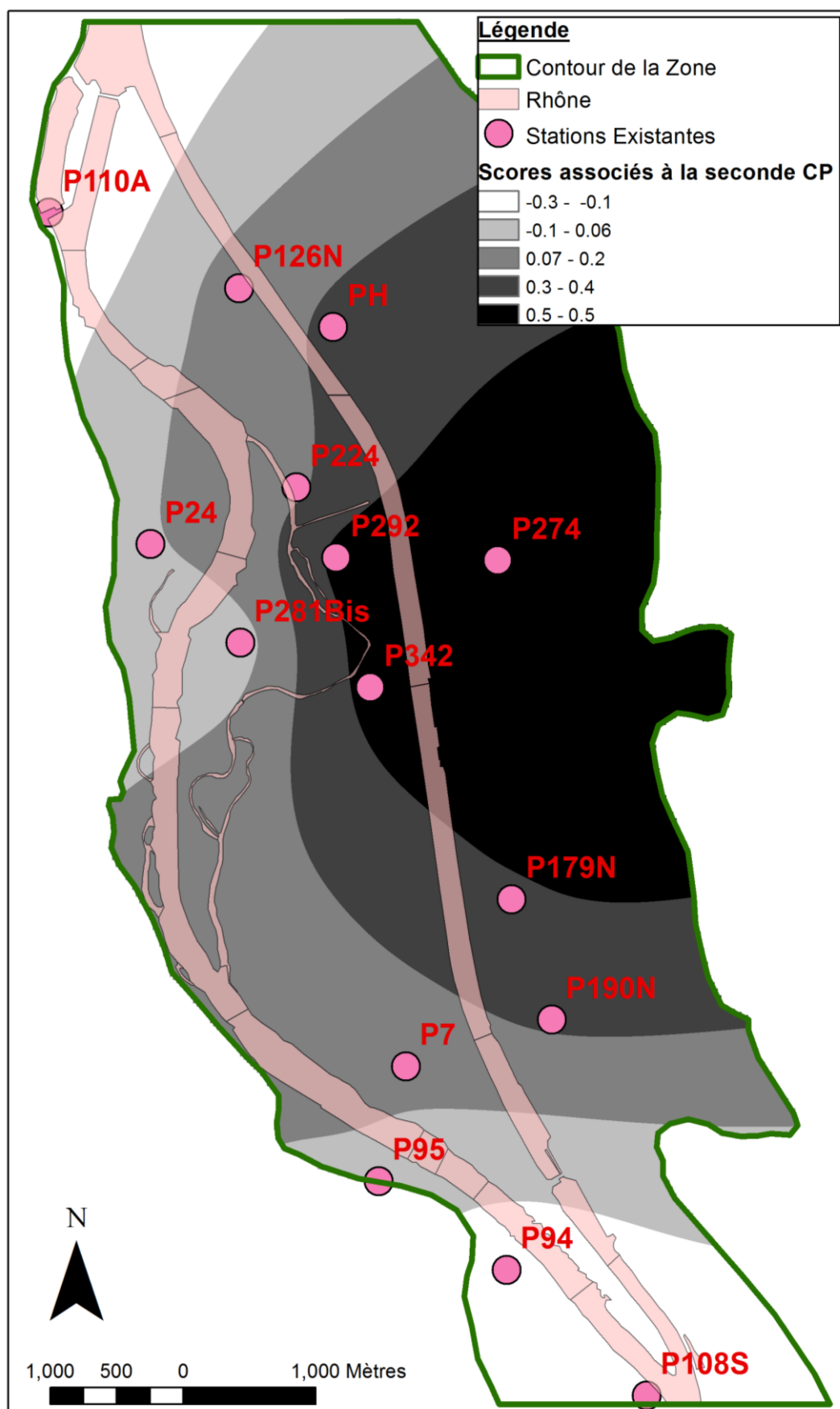


Figure 28 : Représentation spatiale des scores associés à la seconde composante principale – ACP sur données au pas de temps de 4h

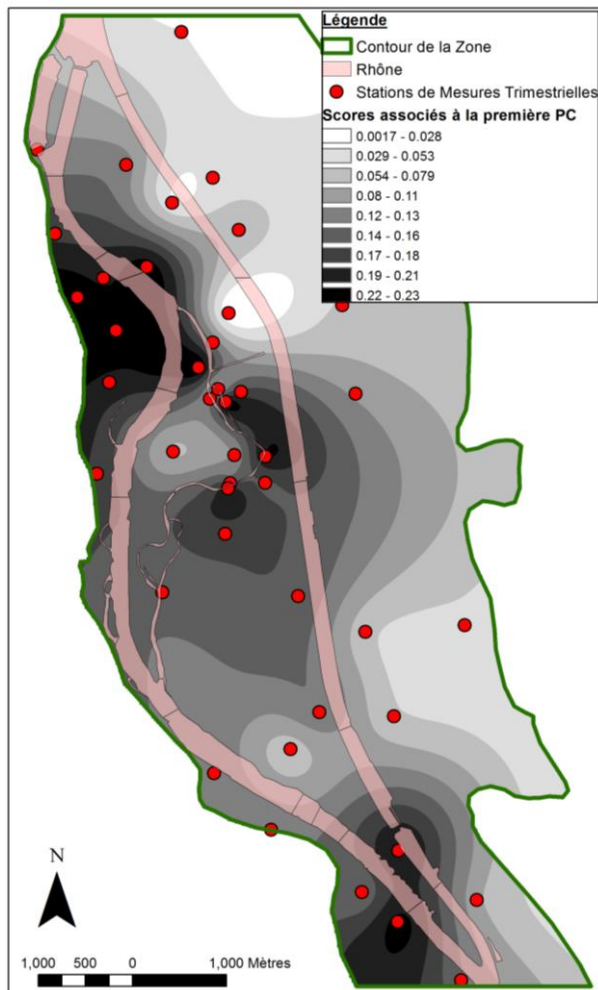


Figure 29 : Représentation spatiale des scores associés à la première composante principale – ACP sur données au pas de temps trimestriel

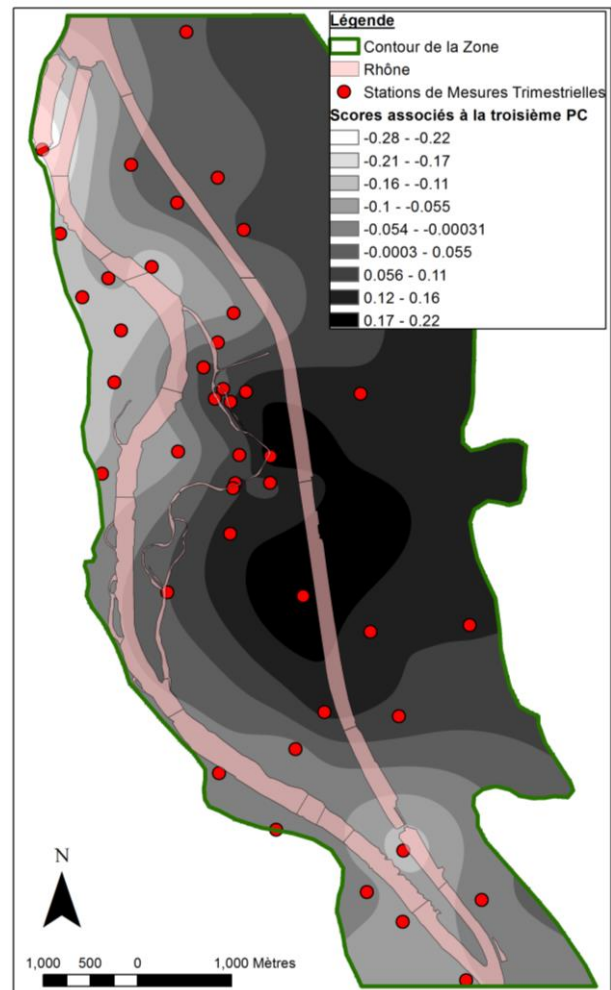


Figure 30 : Représentation spatiale des scores associés à la troisième composante principale – ACP sur données au pas de temps trimestriel

Il est intéressant de remarquer que cette ACP met en valeur l'existence de zones de comportement similaires des deux côtés du canal de dérivation. L'influence du Rhône et des pompages se fait sentir à l'est du canal de dérivation (zones grises sur la Figure 29, notamment près des prélèvements OSIRIS Nord et OSIRIS Sud) tandis que l'apport latéral se propage du côté ouest du celui-ci (zone foncée sur la Figure 30). Le canal de dérivation ne semble donc pas jouer le rôle de barrière hydraulique.

Cette analyse montre également que l'influence des précipitations sur le niveau de la nappe est limitée.

Une analyse de sensibilité a été conduite, sur les données au pas de temps de 4h, afin d'estimer l'impact d'une modification du pas de temps sur les résultats de l'ACP. Elle montre que l'ACP est relativement robuste par rapport au pas de temps choisi. Dans le cas des données au pas de temps de 4h qui portent sur une durée de l'ordre de 5 ans, l'étude montre qu'il est possible d'utiliser un pas de temps mensuel sans trop dégrader les résultats de l'analyse. Un pas de temps trimestriel est par contre trop important. Cependant, sur une période de 20 ans, un pas de temps trimestriel semble être suffisant pour capter les principales différences de comportements au sein de la nappe phréatique. Ces résultats confirment l'intérêt de l'utilisation de l'ACP, sur les données trimestrielles disponibles, qui permet une cartographie plus fine du comportement du système grâce à une densité de points de mesure plus importante.

L'ACP apparaît également relativement robuste par rapport au nombre de points considérés. Cette robustesse dépend cependant du, ou des, points de mesure que l'on considère en plus, ou en moins, dans l'analyse.

Finalement, il a aussi été montré que la reconstitution des données manquantes peut être intéressante, par rapport à l'utilisation d'une valeur moyenne sur les plages lacunaires, dans le sens où elle permet de diminuer la corrélation qui existe entre la taille des lacunes et les coefficients associés à chacune des Composantes Principales.

3.4.1.2. Groupement par comportement

Un groupement des points d'observation des niveaux de nappe, par similitudes de comportement, a été réalisé à partir des différents jeux de données. Seuls les groupements basés sur les données trimestrielles sont présentés dans cette partie, car ce sont les plus intéressants.

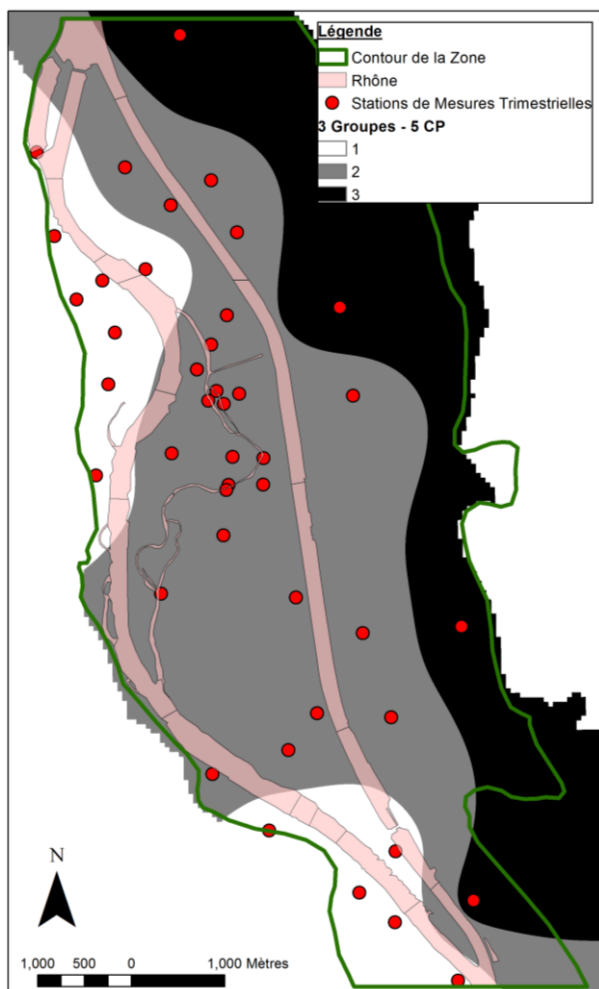


Figure 31 : Groupes de comportements (3 groupes) définis à partir des 5 premières composantes principales

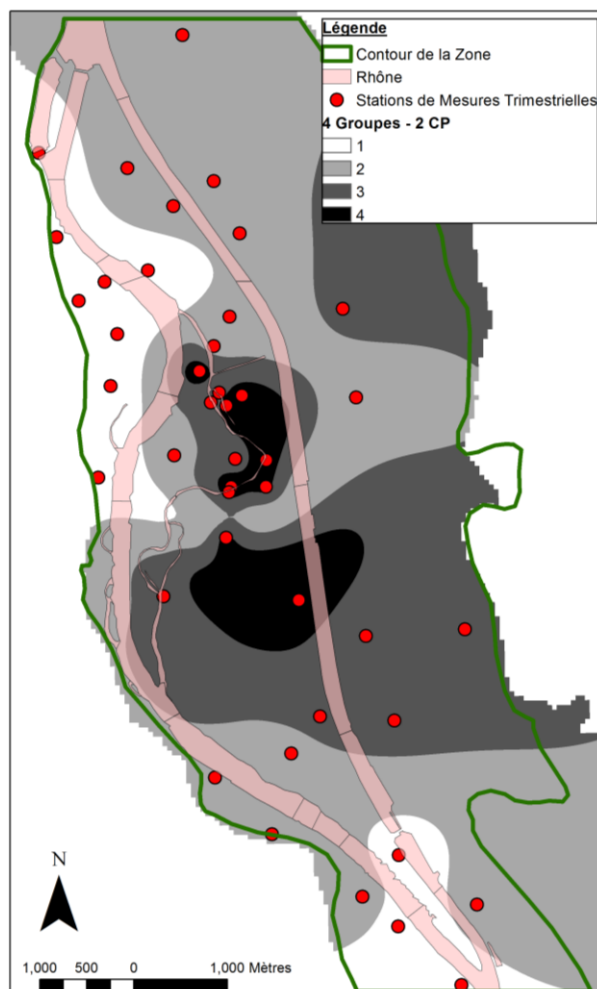


Figure 32 : Groupes de comportements (4 groupes) définis à partir des 2 premières composantes principales

Selon le nombre de groupes conservés et de CP retenues, différents comportements de la nappe peuvent être mis en valeur.

Si l'on considère 4 groupes basés sur les deux premières CP, il est possible de délimiter une sorte de cône d'influence des pompages OSIRIS sud (zone noire sur la Figure 32). Cette représentation du cône d'influence est intéressante car elle intègre les fluctuations transitoires de niveaux, une information que ne peut fournir une simple carte piézométrique.

La prise en compte de trois groupes basés sur les cinq premières CP (Figure 31) rend possible de visualiser une zone influencée quasi exclusivement par le Vieux-Rhône (zone blanche), une zone influencée par le Vieux-Rhône mais de manière non exclusive (zone grise) et une zone très peu influencée par le Rhône (zone noire). Il est intéressant de constater que les points situés dans la zone blanche ne réagissent pas tous à la même influence (influence du Vieux-Rhône et influence de l'amont),

selon qu'ils sont situés à l'amont ou à l'aval du secteur, ce qui ne les empêche pas de pouvoir être regroupé en termes de comportement global.

Un phénomène à première vue difficilement explicable est observé en rive ouest du Vieux-Rhône. Certains points de la nappe se regroupent avec les points situés à l'est du Vieux-Rhône (zone grises sur les Figure 31 et Figure 32). Cela pourrait faire croire à une propagation d'influence de l'est vers l'ouest sous le Vieux-Rhône. Cependant des essais ont montré qu'il s'agit plus probablement d'un artefact dû au fait que certains groupes de stations possèdent des lacunes de données à des dates identiques. Ceci montre tout l'intérêt de réaliser chaque fois des mesures sur l'ensemble des stations, et non sur seulement une partie.

3.4.2. Analyses corrélatoires et spectrales

Les analyses corrélatoires et spectrales sont menées exclusivement sur les signaux au pas de temps de 4h. Les signaux au pas de temps trimestriels ne permettent en effet pas d'analyser le comportement du système pour les grandes fréquences et les corrélations entre niveaux de nappe et de rivière sont plus difficiles à établir.

On observe que la cohérence spectrale entre le signal de nappe et le signal de rivière décroît lorsque la distance à la rivière augmente, et ce quelle que soit la fréquence étudiée. Cependant cette décroissance n'est pas une fonction linéaire de la distance.

La cohérence spectrale est d'autant plus grande que l'on s'intéresse aux faibles fréquences. Les signaux de fortes fréquences sont fortement filtrés lors de leurs propagations en nappe. La cohérence est significative, pour tous les points de mesure de la nappe, pour des périodicités supérieures à 2 semaines environ (Figure 33). Ce filtrage fréquentiel a déjà été remarqué pour les systèmes naturels (Von Asmuth et al., 2004). Il peut être exacerbé par le fait que les fortes fluctuations sont généralement associées à des fréquences plus faibles. Or, l'onde de crue du Vieux-Rhône est susceptible de se propager aux contre-canaux, et de là vers la nappe, lorsque le niveau d'eau dépasse une valeur seuil : la filtration fréquentielle opérée par le système peut donc en être renforcée.

La diminution de la cohérence avec l'accroissement de la fréquence n'est pas un phénomène linéaire. On observe ainsi un pic relatif de cohérence aux P110A, P95, P94 et P24 pour une périodicité de l'ordre de la journée puis une diminution de cette cohérence pour une périodicité de 3 jours suivi ensuite d'une augmentation de la cohérence pour des périodicités plus élevées (non montré). Ce phénomène est attribué au fait qu'une périodicité d'une journée traduit un pic du contenu fréquentiel du signal associé au Vieux-Rhône. Cette fluctuation journalière se retrouve ensuite en nappe proche. Mais elle ne se propage pas aux autres parties de l'aquifère.

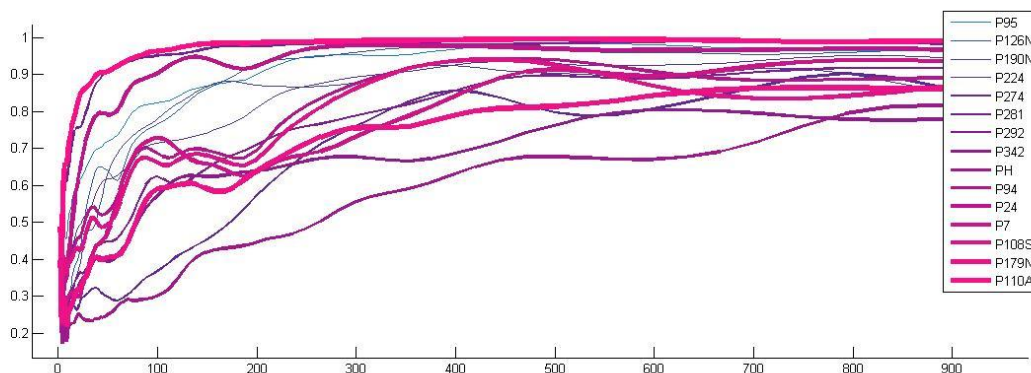


Figure 33 : Cohérence en ondelettes, entre les signaux de hauteurs de nappe et le signal de hauteurs du Rhône, en fonction de la périodicité des signaux (en pas de temps de 4h)

Le temps de retard moyen des ondes de pression entre la rivière et la nappe est au maximum de l'ordre d'une dizaine de jours pour les points les plus éloignés du cours d'eau (Figure 34). Le temps de retard

augmente avec la distance à la rivière. Cependant il n'augmente pas linéairement avec la distance à celle-ci. En moyenne la vitesse de propagation des ondes de pression est de l'ordre de 160 à 340 m/j, ce qui traduit un milieu non-confiné. Deux temps de retard distinct ont été déterminés en fonction de la distance séparant les points de la nappe à la rivière. Lorsque les points de la nappe sont éloignés de la rivière le temps de retard est relativement faible en comparaison de ce qu'il devrait être si l'on se base sur une extrapolation de ce qui est observé aux points les plus proches. Ce phénomène est expliqué par la propagation rapide de l'onde de crue dans le réseau surfacique de la lône de la Platière et des contre-canaux.

Les différentes techniques employées donnent des résultats proches en termes de temps de retard calculés. Cependant, il existe quelques différences. Ainsi le temps de retard moyen calculé à l'aide de l'analyse de Fourier est un peu plus faible que celui calculé en utilisant une simple analyse corrélatoire. Cela peut être dû à l'incertitude qui existe sur l'estimation de la pente du déphasage en fonction de la fréquence. On suppose en effet que la relation entre le niveau du fleuve et le niveau de la nappe est linéaire alors que ce n'est pas forcément le cas.

L'analyse en ondelette ne permet pas de conclure à l'existence de temps de retard différents selon la période que l'on considère (été ou hiver). Il semble par contre que le temps de retard observé pendant la montée du niveau d'eau soit inférieur au temps de retard observé lors de la diminution du niveau de la nappe.

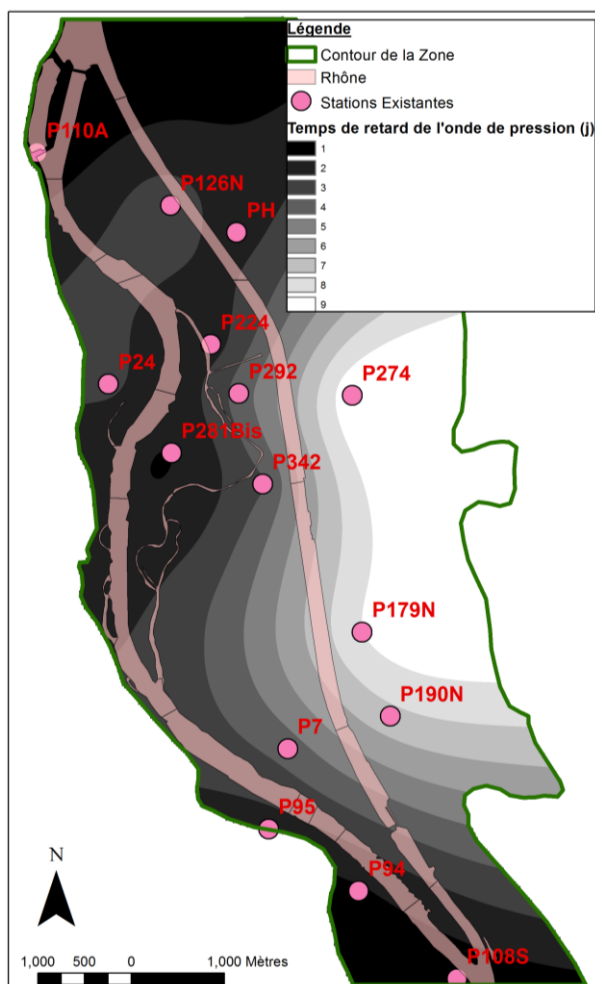


Figure 34 : Temps de retard, en jours, de l'onde de pression en nappe par rapport au fleuve estimé par corrélation simple

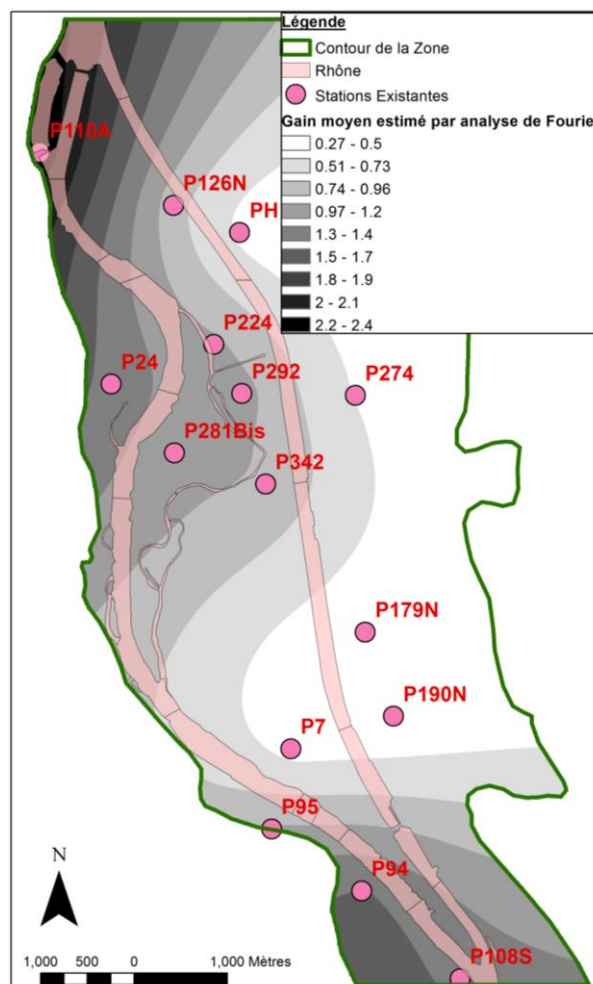


Figure 35 : Gain moyen estimé, à l'aide d'une analyse de Fourier, entre le signal de hauteur d'eau dans le Rhône et dans la nappe

L'atténuation des signaux est en théorie une fonction qui décroît exponentiellement avec la source. Le problème est que l'intensité du signal source n'est pas la même selon le point de la nappe que l'on considère. Il est par conséquent difficile de vérifier cette relation.

Cette étude montre que l'atténuation du signal augmente lorsque la fréquence augmente ce qui traduit un milieu dispersif. (Figure 35)

Il ne semble pas exister de lien direct entre le filtrage fréquentiel, la cohérence, l'atténuation du signal ou le temps de retard. Ainsi le signal associé au P7 est relativement peu cohérent avec le signal observé dans le Vieux-Rhône par rapport aux P179N et P190N, ce qui n'empêche pas le temps de retard de la propagation de l'onde de crue d'être relativement faible, toujours par rapport aux P189N et P190N. Cela pourrait s'expliquer par l'action d'autres facteurs influençant proches du P7 qui perturbent le signal reçu. Mais, comme la distance de propagation de l'onde de crue est plus faible pour le P7, que pour les P179N et P190N, le temps de retard de l'onde de crue est également plus faible.

En bilan différents paramètres ont été calculés pour certains points de la nappe : atténuation du signal, temps de retard, filtrage fréquentiel. Il devient alors possible, pour une crue donnée, d'estimer la forme que prendra l'onde de pression en ces différents points. Une interpolation permet ensuite d'estimer quel est le comportement attendu des autres points de la nappe à cet égard.

3.4.3. Modélisation numérique déterministe

3.4.3.1. Modélisation des écoulements surfaciques

Lors de la modélisation des niveaux d'eau du Rhône des difficultés de stabilité du modèle se sont posées. Cependant la prise en compte de pas de temps suffisamment courts, et de sections en travers situées à distance les unes des autres quasi-identiques (Saleh, 2010), a permis de pallier ces problèmes. Il s'avère possible de n'utiliser que des sections en travers qui ont été mesurées sur le terrain, ce qui contribue à diminuer l'incertitude de la modélisation.

Un accroissement du coefficient de Manning a l'effet suivant :

- Accroissement local du niveau d'eau ;
- Diminution du pic de crue lorsque celui-ci se déplace vers l'aval ;
- Augmentation du temps de parcours de l'onde de crue.

Le coefficient de Manning est généralement la principale variable d'ajustement qui est utilisée pour le calage des modèles. Il est usuellement compris entre 10 et 80 s.m^{-1/3}.

Dans le cas de la section amont du Rhône, on ne dispose pas de points de mesures qui peuvent être utilisés pour caler les niveaux d'eau modélisés. On utilise par conséquent la valeur du coefficient de Manning estimée sur le cours du Vieux-Rhône. Il est néanmoins possible de vérifier la pertinence des résultats obtenus en comparant les lignes d'eau calculées aux lignes d'eau estimées par la CNR pour des crues moyennes, fortes et très fortes (CNR, 2002).

On note que les fluctuations de la ligne d'eau sont faibles en moyenne avec des maximales de l'ordre du mètre à l'amont du tronçon, à hauteur de Condrieu. Il doit néanmoins être remarqué qu'une fluctuation nulle a été considérée au niveau du barrage de Saint-Pierre de Bœuf. Or, ce n'est pas ce qui est observé. Des fluctuations régulières de l'ordre de cinquante centimètres, causées par la gestion hydraulique du barrage, sont observées.

Le Vieux-Rhône correspond à la zone où l'amplitude des fluctuations est maximale. Le niveau du Vieux-Rhône est calé à l'aval du barrage de Saint-Pierre de Bœuf. Un optimum du calage est observé pour un coefficient de Manning de 25. Il apparaît que les pics de crues sont bien reproduits en moyenne (Figure 36). Par contre le niveau de base n'est pas correctement représenté par le modèle sur

la partie amont. Ceci est attribué à l'absence de prise en compte du seuil de Limony pour lequel nous ne disposons pas de données de bathymétrie.

Sur le Vieux-Rhône, les fluctuations de niveau peuvent être fortes : supérieures à 6 m à l'amont et jusqu'à 3 m à l'aval.

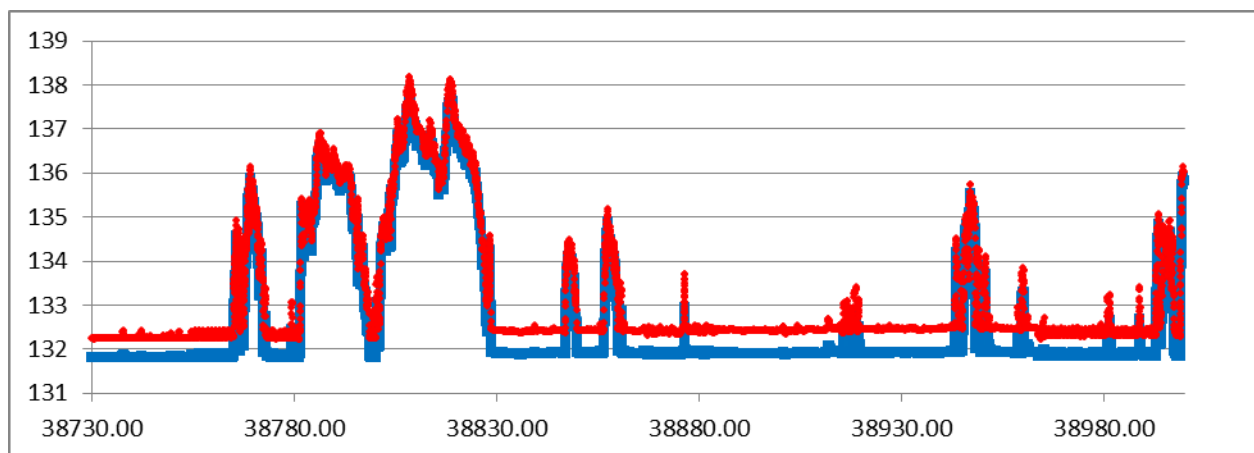


Figure 36 : Niveaux d'eau observés (rouge), à l'aval du barrage de saint-Pierre de Bœuf (année 2006) et modélisés (bleu)

En ce qui concerne la partie aval du Vieux-Rhône, il n'existe pas de mesures de hauteurs d'eau pour caler véritablement le modèle. La validité du modèle est par conséquent uniquement établie par la comparaison effectuée entre les lignes d'eau calculées et les lignes d'eau mesurées par la CNR pour certaines valeurs de débits. On constate que le modèle semble donner des résultats satisfaisants.

Les fluctuations maximales sont observées à l'amont avec des variations pouvant atteindre près de 4 à 5 m. A l'aval de ce tronçon les fluctuations sont plus faibles, limitées à 2 à 3 m.

En bilan la modélisation des variations de niveau d'eau du Rhône semble être relativement bonne. La meilleure modélisation a lieu pour le Vieux-Rhône, sur lequel on dispose de deux points de mesures continues. Le niveau d'eau dans la lône de la Platière n'a, pour le moment, pas pu être modélisé aussi finement, à cause d'un manque de données (débits et bathymétrie). Il a par conséquent été reconstitué par le biais de modèles à apprentissage (voir la partie sur la reconstitution des données) à partir d'un point de mesure existant.

3.4.3.2. Modélisation des écoulements souterrains

Préalablement à l'établissement d'un modèle de nappe général, un certain nombre de modèles locaux ont été réalisés afin de pouvoir appréhender certains phénomènes particuliers. La zone d'étude est en effet complexe et les paramètres à prendre en compte nombreux. Il est donc être intéressant d'étudier séparément l'influence de ces différents paramètres.

Différentes configurations ont ainsi été étudiées :

- Vieux-Rhône en rive droite, sur la zone de Limony, pour étudier ce qui se passe au sein d'un méandre du fleuve supposé être assez faiblement perturbé par des facteurs extérieurs (en dépit des prélèvements pour l'eau potable et d'un apport probable du versant) ;

- Vieux-Rhône en rive droite à l'aval du seuil de Peyraud afin d'analyser la qualité de la reconstruction du signal du Rhône aval – là aussi les facteurs extérieurs sont sensés jouer un rôle limité;

- Rhône-canal de dérivation et contre-canal, dans le but d'étudier les propriétés de type colmatage du canal de dérivation et l'effet de barrière hydraulique en cas d'apports de versants (questions (2) et (3) de la partie instrumentation) ;

- Rhône – lône et pompage pour mieux appréhender les effets possibles de la présence d'une zone non-saturée (questions (1) et (2) de la partie instrumentation).

L'étude corrélatrice a indiqué qu'il n'y a pas de lien évident entre les fluctuations observées dans le canal de dérivation et les fluctuations observées au niveau de la nappe alluviale même si la nouvelle sonde de mesure installée au P120N est toutefois susceptible de remettre en question ce fait. Partant de cette observation il a été possible de réaliser des tests pour déterminer quel devrait être le colmatage du fond du canal de dérivation pour expliquer ce phénomène.

La zone non-saturée qui existe potentiellement sous la lône, dans le cas où il existe une couche de colmatage, présente un comportement complexe. Ainsi une diminution de la conductivité de l'aquifère peut se traduire aussi bien par une augmentation du débit de fuite que par une diminution, à cause des possibilités de barrière capillaire (Goutaland, 2008). Tous les cas n'ont pu être étudiés suite à des problèmes de convergence numérique de la modélisation, notamment pour des mesures de hauteurs de franges capillaires importantes. Une fluctuation du niveau d'eau dans la lône peut éventuellement faire passer les conditions sous la lône de non-saturées à saturées (Brunner et al., 2009) mais il ne semble pas qu'il puisse y avoir dans le cas de la lône de la Platière de déconnection totale entre la lône et la nappe.

Tous les comportements n'ont pas pu être correctement modélisés. Néanmoins différents résultats ont pu être établis :

- Plusieurs modélisations dans des contextes différents montrent que la nappe semble pouvoir posséder un comportement semi-captif avec un coefficient d'emménagement de l'ordre de 0,005 – une nappe entièrement libre ne permettrait pas toujours de bien rendre compte ce qui est observé ;
- La perméabilité moyenne de la nappe est relativement importante (entre 1 et 5.10^{-3} m/s) ;
- Le colmatage du fond des différents cours d'eau paraît être assez important (perméabilité inférieure à 5.10^{-5} m/s pour la lône, inférieur à 10^{-7} m/s pour le canal de dérivation,...) ;
- Il est très important de bien modéliser l'évolution des lignes d'eau observées en surface.

Globalement il est possible de représenter relativement correctement le comportement de la nappe aux points où l'influence du Rhône est forte (coefficients associés à la première CP importants ; Figure 37) mais des problèmes se posent sur les zones où l'effet des prélèvements en nappe est visible (forts coefficients associés à la deuxième CP – données au pas de temps de 4h ; Figure 38). Cela est dû à la méconnaissance des fluctuations des volumes prélevés à une échelle temporelle inférieure au mois.

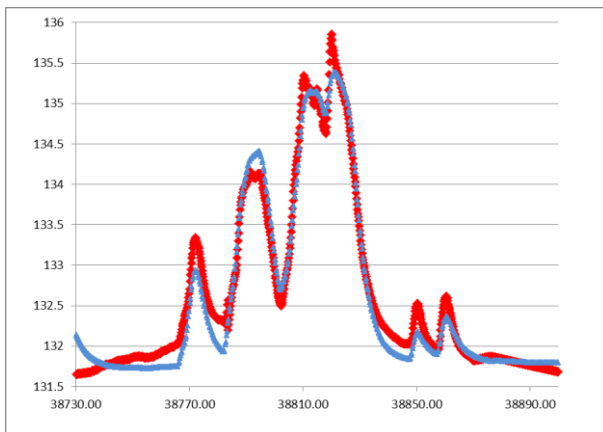


Figure 37 : Niveaux d'eau (mètres) observés (rouge) et modélisés (bleu) dans une zone associée à des scores importants de la première composante principale

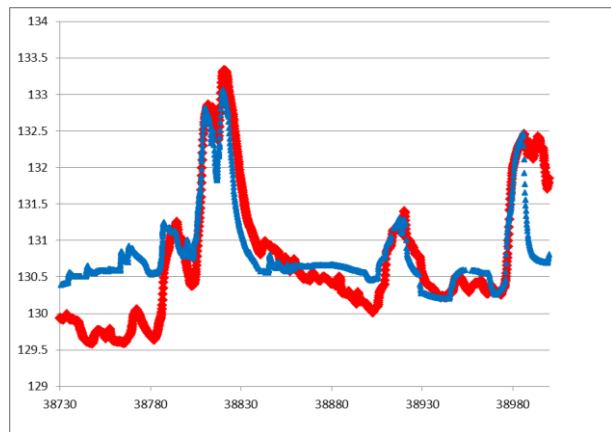


Figure 38 : Niveaux d'eau (mètres) observés (rouge) et modélisés (bleu) dans une zone associée à des scores importants de la seconde composante principale

Une des principales difficultés rencontrée lors de la modélisation physique du système est qu'il existe de très nombreux jeux de paramètres potentiels permettant de représenter le signal observé. Et il n'est pas toujours possible de pouvoir choisir parmi ces différentes combinaisons. L'ensemble des possibilités peut néanmoins être restreint

3.5. Conclusion et perspectives

L'Analyse en Composantes Principales portant sur les séries temporelles de hauteurs de nappe permet une représentation des zones de comportements homogènes de la nappe alluviale. Les différentes zones cartographiées peuvent ensuite éventuellement être modélisées indépendamment. Sur la zone de Péage-de-Roussillon, on a pu montrer que les fluctuations du niveau du Rhône expliquent une large part de la variabilité des niveaux de nappe. Les pompages jouent également un rôle.

L'étude de la corrélation entre les niveaux de nappe et du Rhône montre que les ondes de pression ne se propagent pas de la même manière en tous points de l'aquifère. De manière générale le temps de retard et l'atténuation augmente avec la distance au cours d'eau mais quelques points font exceptions. Les analyses spectrales ont également montrées que les fluctuations de fortes fréquences étaient filtrées lors de leurs propagations en nappe.

Les approches corrélatoires et spectrales ne sont intéressantes que lorsque le niveau d'eau en rivière peut avoir une influence sur le niveau d'eau en nappe. Lorsque le gradient de nappe est très fort et est dirigé vers la rivière, les fluctuations observées au niveau de la rivière n'impactent qu'une zone très restreinte de la nappe alluviale.

	Principales données	Résultats généraux (soulignés) et obtenus sur la zone d'étude	Liens entre les méthodes
Analyse en Composantes Principales et groupements	Séries temporelles piézométriques ; Autres séries temporelles (débits prélevés, précipitations, niveau des eaux de surface,...).	<u>Principaux facteurs influençant la nappe</u> – Niveau du Vieux Rhône et Prélèvements d'eau ; <u>Répartition spatiale des zones d'influences des différents facteurs</u> ; <u>Zones de comportements homogènes</u> – 3 grandes zones, une influencée exclusivement par le Rhône, une sous influence du Rhône et des pompages et la dernière influencée par les apports de versants.	Permet d'établir les principaux facteurs à prendre en compte lors de la modélisation numérique ;
Analyses Corrélatoires et Spectrales	Séries temporelles piézométriques ; Séries temporelles de niveau des eaux de surface.	<u>Temps de retard, atténuation et fréquences filtrées lors de la propagation des ondes de crue en nappe</u> – Temps de retard maximum de l'ordre de la semaine, périodicités inférieures à la semaine relativement filtrées ; <u>Mise en évidence éventuelle des changements de comportement au cours du temps</u> – temps de retard lors de la montée de la nappe, par rapport à la rivière, qui semble inférieur au temps lors de la redescende.	Les différents paramètres étudiés peuvent être reliés à des propriétés physiques du système via la modélisation numérique.
Modèle numérique	Séries temporelles piézométriques ; Autres séries temporelles (débits prélevés, précipitations, niveau des eaux de surface,...) ; Géométrie et propriétés du milieu (perméabilité, épaisseur de l'aquifère,...).	<u>Calcul en tous points, et en fonction du temps, des flux et des charges hydrauliques, estimation des propriétés du milieu</u> – Milieu probablement semi-confiné par endroit, mise en évidence d'un colmatage important du fond du canal de dérivation et de la lône, existence d'une zone partiellement confinée sous la lône.	-

Tableau 24 : Tableau de synthèse

L'approche basée sur l'établissement d'un modèle numérique déterministe de fonctionnement de la nappe est intéressante car elle permet notamment d'avoir un aperçu des propriétés physique du système et des flux échangés entre les entités. Ainsi il semble qu'il faille considérer l'existence, sous la majeure partie de lône de la Platière, d'une zone qui reste de façon permanente non saturée (mais dont la teneur en eau n'est pas minimale non plus). Afin de représenter le phénomène d'absence de barrière hydraulique sous le canal de dérivation il apparaît nécessaire de considérer un colmatage important de ce dernier, de l'ordre de 10^{-7} m/s. Les apports de versants ne peuvent être négligés et varient dans le temps, tandis que la présence de prélèvements dans l'aquifère alluvial facilite la propagation des ondes de crue en nappe.

Les essais de modélisation seront poursuivis afin d'affiner l'estimation des flux échangés et d'observer l'impact que peut avoir une onde de crue sur les flux qui transitent à l'interface nappe/rivière.

Les trois différentes approches considérées sont complémentaires. L'Analyse en Composantes Principales permet notamment de définir les principaux paramètres à prendre en compte dans le modèle numérique et de délimiter la zone à étudier. Les résultats obtenus à l'aide des analyses corrélatoires et spectrales seront, par la suite, reliés à des caractéristiques du milieu par le biais de la modélisation numérique. Une atténuation donnée des ondes de crue en fonction de la distance au cours d'eau est en effet fonction de certains paramètres : hauteur moyenne de nappe, perméabilité,... Et ces caractéristiques ont-elles mêmes une influence sur les débits échangés entre la nappe et la rivière.

Parallèlement un lien sera établi entre les flux nappe/rivière estimés pour une situation de régime permanent avec l'approche SIG, et ceux estimés avec un modèle numérique déterministe en régime transitoire.

PARTIE II

—

Plan/maquette du guide méthodologique de caractérisation des échanges nappes/rivière en milieu alluvionnaire

1. Résumé de la démarche

L'élaboration d'un guide méthodologique pour caractériser les échanges nappes/fleuve Rhône en milieu alluvial est l'aboutissement d'un projet de recherche interdisciplinaire démarré en 2006. Ce guide répond à la question suivante : *Quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappes/rivière ?* Il est destiné à l'usage des techniciens et des gestionnaires de l'eau (SAGE, Contrats rivières, Agences de l'Eau, Bureaux d'études, ONEMA, DREAL, ...). Ce guide intègre les travaux effectués depuis 2006 et fondés sur le croisement de métriques hydraulique, biologique et chimique pour caractériser les échanges. Le cheminement de l'utilisateur dans le guide est organisé selon un graphe arborescent. Il inclut de plus des conseils pour trancher lorsqu'il s'agit de choisir entre plusieurs méthodes ou entre les diagnostics issus de différentes méthodes ; ainsi que la description approfondie des différentes méthodes utilisables.

2. Présentation synthétique du guide méthodologique

2.1. Contexte et objectif préalable à l'élaboration du guide méthodologique

Le travail présenté ici est l'aboutissement d'un programme de recherche intitulé « Évaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface : Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés ». Ce programme initié en 2006 constitue une action de recherche ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) financée par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Il est de plus soutenu par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) pour l'accès aux données et par la Région PACA pour un financement complémentaire.

Ce programme de recherche est fortement interdisciplinaire. Les premières phases de travail (2006-2012) ont abouti à la mise en œuvre d'une méthodologie multi-métrique pour caractériser les échanges nappes/Rhône dans un contexte alluvial libre. Un tel diagnostic est fondé sur :

- 1) une analyse géomatique mobilisant des connaissances hydrogéologiques ;
- 2) une analyse biologique impliquant des indicateurs tels les invertébrés souterrains et les macrophytes ;
- 3) une analyse géochimique fondée sur les isotopes et les éléments dissouts.

L'originalité de la démarche est donc de s'appuyer sur les apports et la complémentarité des différentes métriques impliquées pour réaliser un diagnostic des échanges. De plus, il s'agit aussi de déterminer les conditions dans lesquelles ces métriques ne sont pas utilisables.

La méthodologie étant à ce jour mise en œuvre, la dernière phase du travail a consisté à élaborer un guide méthodologique à destination des gestionnaires et des techniciens de l'eau qui devra répondre à la question suivante : *Quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappes/Rhône ?*

PLAN DU GUIDE

Introduction (Chapitres 1 et 2)

Chapitre 1 – Les échanges nappes/rivière en milieu alluvionnaire

- 1.1. Enjeux (DCE,...)
- 1.2. Fonctionnement (schémas, configurations,...)
- 1.3. Panorama des méthodes existantes

Chapitre 2 – Principe généraux de la démarche et résumé

- 2.1. Evaluation qualitative des échanges
- 2.2. Evaluation de la quantité d'eau échangée
- 2.3. Exploitation des données qualité de l'eau
- 2.4. Présentation des outils
- 2.5. Cheminement dans le guide

Démarche (Chapitres 3, 4 et 5)

Chapitre 3 – Avancer dans l'évaluation des échanges nappes/rivière

- 3.1. Définition de la zone de travail
- 3.2. Définir les objectifs
- 3.3. Sélection au préalable
 - 3.3.1. *Sélection de l'échelle*
 - 3.3.2. *Sélection des outils*
- 3.4. Données

Chapitre 4 – Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière

- 4.1. Protocole
- 4.2. Calcul et interprétation

Chapitre 5 – Conclure sur les échanges nappes/rivière

- 5.1. Tableau des résultats par métrique
- 5.2. Tableau de synthèse comparatif
- 5.3. Cartographie des résultats synthétiques
- 5.4. Conséquences fonctionnelles des échanges nappe/rivière sur la gestion des ressources en eau et de la biodiversité

ANNEXES

A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN

A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation

A3. BIO A : Invertébrés souterrains

A4. BIO V : macrophytes

A5. Bases de données utiles et consultables

A6. Estimation des coûts et des difficultés (homme/jour), des difficultés et limites d'utilisation du guide

A7. Personnes ressources et compétences

2.2. Contenu du guide méthodologique

Le plan du guide et la démarche proposée pour le cheminement de l'utilisateur dans le guide sont étroitement liés. Ils constituent un tout indissociable qui doit permettre à un utilisateur de mettre en œuvre la méthode sur un territoire de son choix.

2.2.1. Plan du guide

Le guide est organisé de manière à rendre son utilisation la plus aisée possible pour les utilisateurs. La structure du guide est découpée en deux parties principales. Une première partie introductive qui définit les échanges nappes/rivière sur le Rhône en milieu alluvial (fonctionnement, enjeux...) et présente le principe de la démarche de caractérisation des échanges (évaluation qualitative et quantitative).

Une seconde partie guide l'utilisateur pas à pas au cours de cette démarche et spécifie (Figure 39) :

- i) les prérequis nécessaires (1. Définir les objectifs, 2. Sélectionner l'échelle spatio-temporelle et les métriques adaptées, 3. Consulter des exemples présélectionnés),
- ii) les méthodes de mesures et les modalités de calcul des échanges (4a et 4b),
- iii) la manière de synthétiser les informations obtenues pour conclure sur les échanges (5. Comment synthétiser qualitativement et quantitativement et évaluer les incertitudes, 6. Cartographier les résultats). Des encarts et des annexes fournissent des informations complémentaires pour les utilisateurs ayant besoin de précisions.

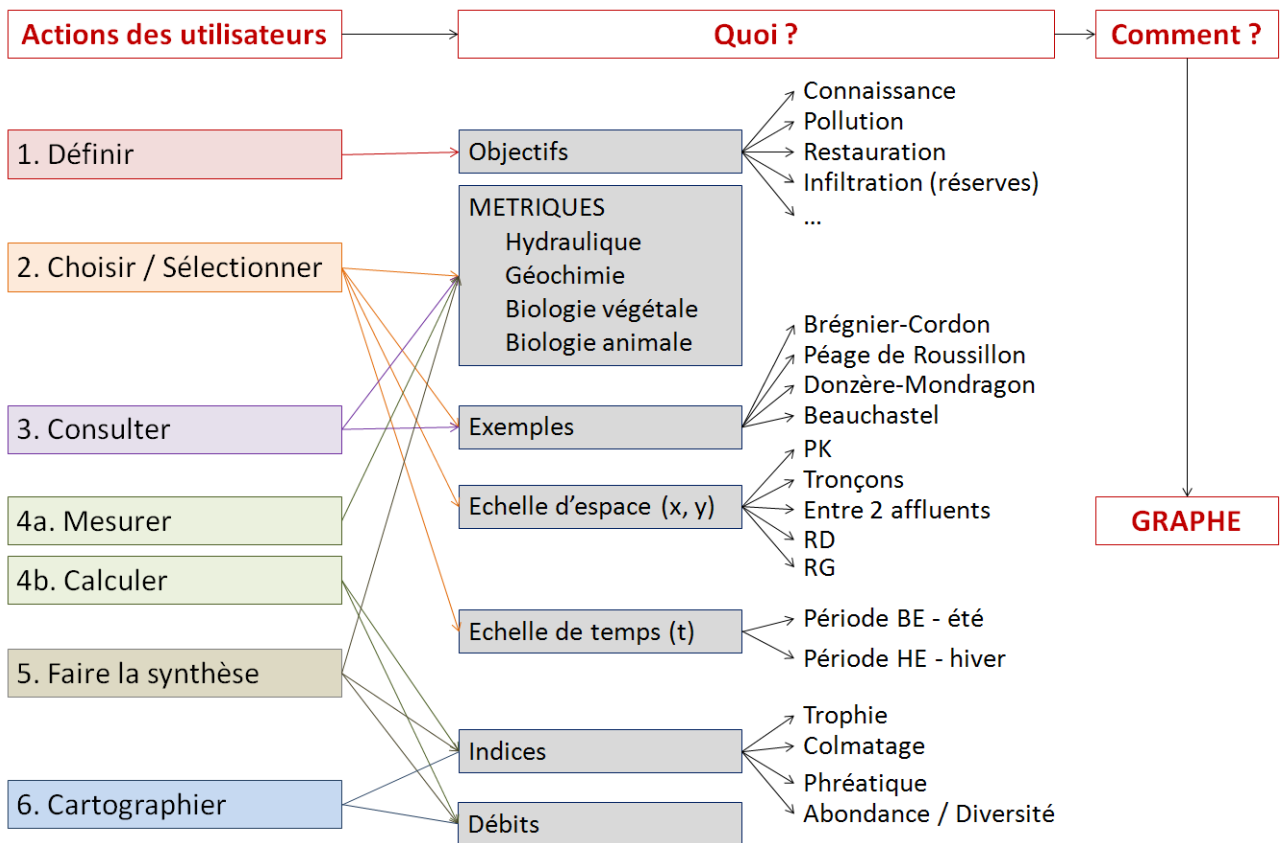


Figure 39 : Principe de la démarche visant à caractériser les échanges nappes/rivière

2.2.2. Principe de la démarche

Le principe de la démarche est schématisé Figure 39. A gauche sur la figure, on trouve listées les actions que l'utilisateur peut/doit effectuer pour caractériser les échanges. Au centre (question « *Quoi ?* ») est indiqué ce à quoi ces actions devront s'intéresser (*Quel est l'objet de ces actions ?*) avec quelques exemples illustratifs. La réponse à la question « *Comment (réaliser ses actions) ?* » renvoie aux explications contenues

dans le guide, les encarts et/ou les annexes. Le cheminement dans le guide ainsi proposé est structuré selon une démarche arborescente.

2.2.3. Cheminement dans le guide

L'arborescence formalisée pour guider le cheminement de l'utilisateur dans le guide est transparente. Ainsi, elle n'est pas présentée dans son intégralité dans le guide afin de ne pas noyer a priori l'utilisateur dans le parcours touffu d'un arbre immense. Toutefois, une telle formalisation est nécessaire à réaliser à l'amont afin de structurer au mieux le guide. Au final, l'utilisateur peut à l'aide de listes de contrôle et après avoir répondu à un certains nombres de questionnement :

- i) définir au mieux sa zone d'étude (contextes géographiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, anthropiques...),
- ii) définir au mieux ses objectifs (connaissance, restauration, impacts de captages...),
- iii) déterminer les échelles spatiales (1km, 10km, 100km...) et temporelles (saisons hydrologiques, cycles hydrologiques, changements globaux...) les mieux adaptées à son site et à ses objectifs. Sur cette base, il peut alors sélectionner les métriques les plus adaptées en étant conscient des facteurs limitant associés à chacune et en ayant à l'esprit l'effort à effectuer pour le recueil, le traitement et l'analyse des données (selon leur existence préalable ou non). La suite du cheminement concerne la synthèse, l'évaluation des incertitudes et la cartographie des résultats.

2.3. Perspectives

En parallèle, un autre guide méthodologique développé pour l'ONEMA devrait voir le jour dans la même période. Il abordera des contextes hydrogéologiques plus variés (ex : aquifères multicouches, aquifères libres et captifs...), des bassins versants plus nombreux (ex : Rhône, Rhin, Seine, Loire, Sèvre-Niortaise) et des méthodes plus diversifiées (ex : modèles hydrogéologiques, traceurs conservatifs).

3. Etat d'avancement du guide méthodologique

3.1. Généralités et points à ne pas oublier

Lors de cette phase de travail une réflexion approfondie a été conduite pour démarrer la construction de la maquette du guide méthodologique. Les trois principales avancées sont les suivantes :

- le cheminement de l'utilisation a été préfiguré (graphe avec renvois aux pages du guide)
- le guide a été structuré et organisé
- les éléments des précédents ont été intégrés dans le plan du guide (Annexes 5).

Une version complète du guide méthodologique (environ 50p) devrait en être en fin d'année 2013. Ce document sera ensuite validé et amélioré suite à une série de tests effectués par un panel d'utilisateurs pertinents (ZABR, AE-RMC, ONEMA...). Le document devrait ensuite être édité fin 2014. Lors de sa diffusion une lettre présentant l'histoire du projet pourrait accompagner le guide.

Pour l'année qui vient (phase 5 du projet), il conviendra :

- de réorganiser et compléter le contenu du guide en fonction des objectifs. Certaines informations restent à acquérir, d'autres à compléter ou à rédiger ou simplement à valider. De nombreux paragraphes de liens et d'explication restent encore à rédiger.
- d'intégrer des conseils pour trancher lorsqu'il s'agit de choisir entre plusieurs méthodes ou entre les diagnostics issus de différentes méthodes
- d'approfondir la description des différentes méthodes (coût, temps...)

- d'intégrer des encarts « warning ! » et/ou des avertissements concernant les contextes où le guide fonctionne bien et ceux où il ne fonctionne pas
- de bien souligner les limites du guide et les contextes où il va être nécessaire de faire appel à des compétences extérieures
- de veiller à ce que les annexes techniques contiennent bien toutes les réponses à apporter aux utilisateurs

3.2. Chapitre 1 – Les échanges nappes/rivière en milieu alluvionnaire

Pour le chapitre 1, il sera nécessaire d'acquérir de l'information ou de mettre à jour l'information concernant les enjeux réglementaires déclinés du niveau européen (DCE) au niveau local. De plus, un gros travail de synthèse devra être effectué concernant les deux autres sous-parties décrivant :

- le fonctionnement des échanges nappe/rivière (schémas, configurations,...) et leur variabilité dans le temps
- les méthodes existantes pour les appréhender (analyse géomatique, modèles hydrodynamiques, bilans et statistiques, mesure de terrain et échantillonnage...)

3.3. Chapitre 2 – Principe généraux de la démarche et résumé

Le chapitre 2 reste globalement à rédiger puisqu'il s'agit d'informations servant à guider l'utilisateur dans le cheminement dans le guide. Ainsi, il conviendra d'explicitier synthétiquement comment réaliser :

- l'évaluation qualitative des échanges (Direction, sens, origine)
- l'évaluation de la quantité d'eau échangée (Volume, contribution)
- l'exploitation des données de la qualité de l'eau

Cette partie présentera aussi les outils de caractérisation des échanges nappe/rivière et leur potentiel d'utilisation croisée complémentaire et interdisciplinaire (Figure 40). De plus, le principe de cheminement dans le guide sera explicité. Ce cheminement est ensuite détaillé dans les chapitres suivants (Figure 41 à Figure 46).

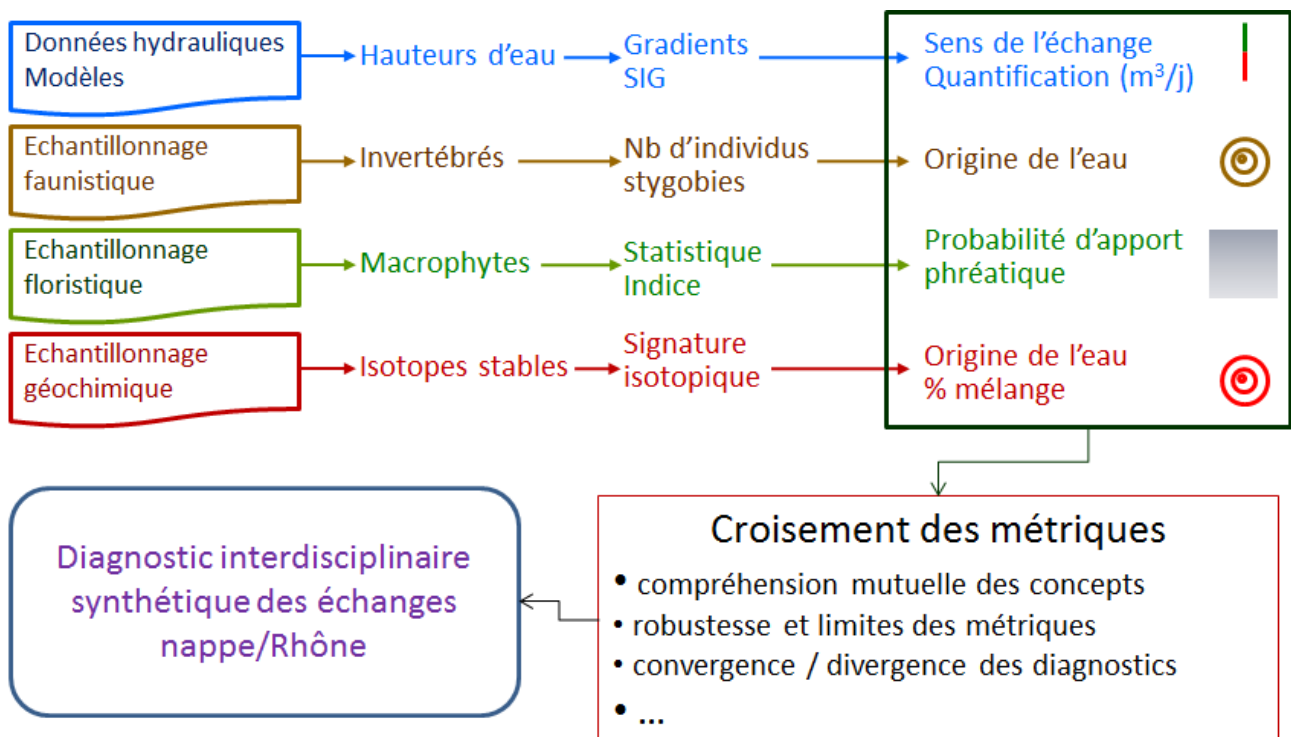


Figure 40 : Schéma de principes

3.4. Chapitre 3 – Avancer dans l'évaluation des échanges nappes/rivière

Le chapitre 3, en grande partie à rédiger lui aussi s'appuiera sur la méthodologie de caractérisation des échanges mise au point dans le cadre du projet et sur le cheminement proposé pour l'utilisateur afin qu'il puisse faut pour évaluer les échanges. Il devra pour ça définir :

- sa zone de travail et ses caractéristiques du point de vue de contextes géographiques, hydrogéologiques, géomorphologiques et anthropiques (Figure 41). Une liste de vérification (check list) permettra à l'utilisateur de contrôler qu'il a bien recueilli toutes les informations nécessaires (réponses par oui ou non – O/N). Un tel principe est appliqué aux étapes suivantes. De plus, des facteurs limitant par rapport à l'utilisation des métriques sont précisés selon les caractéristiques du site d'étude (numéros encadrés en rouge : par exemple ① indique la métrique végétale (macrophytes) atteint ses limites en zone méditerranéenne, alors que la métrique animale (invertébrés) atteint les siennes sur la partie amont du Rhône proche de Genève.

- ses objectifs et enjeux (Figure 42). Il peut s'agir par exemple d'objectifs de connaissance, de réhabilitation des milieux aquatiques, de protection des captages AEP...

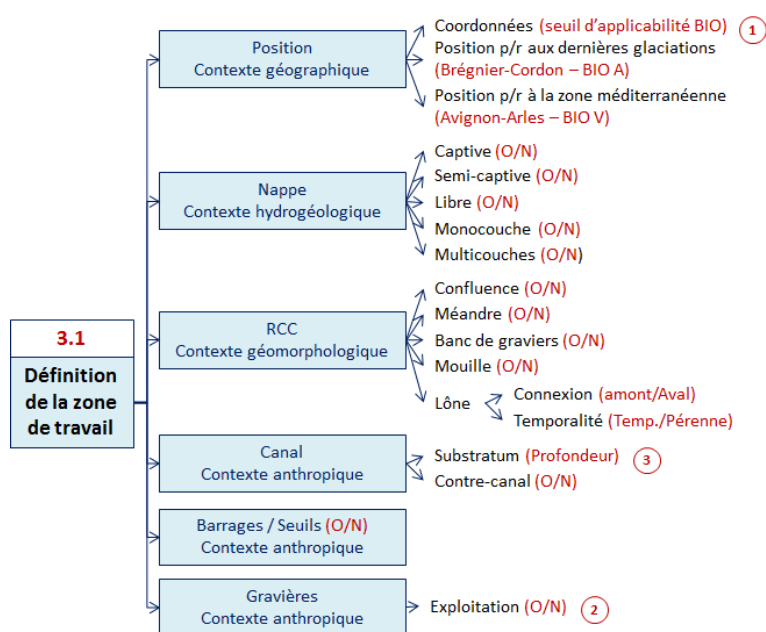


Figure 41 : Définition de la zone de travail (la numérotation 3.1. renvoie à une partie du guide)

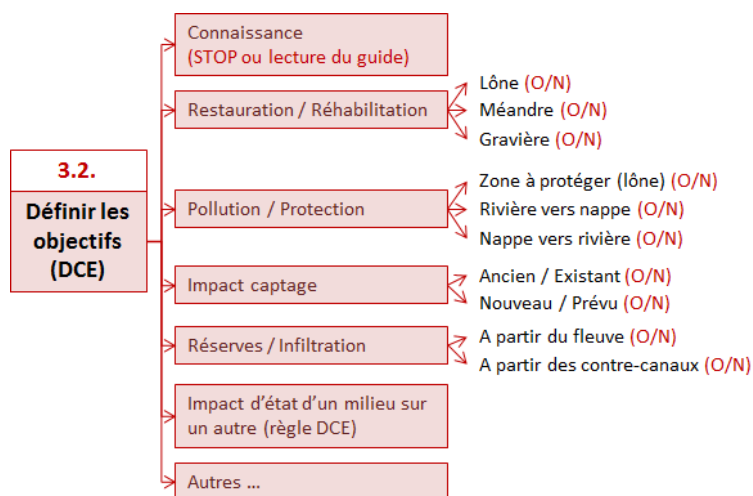


Figure 42 : Définir les objectifs (la numérotation 3.2. renvoie à une partie du guide)

- les échelles d'espaces (de l'échelle hectométrique à l'échelle plurikilométriques) et de temps (de l'échelle saisonnière à l'échelle annuelle) auxquels il travail et/ou s'intéresse en fonction des objectifs et enjeux sélectionnés précédemment (Figure 43).

- les outils utiles et les données existantes (pertinence, qualité) ou à acquérir (voire à reconstituer) (Figure 44). Le guide propose d'utiliser uniquement quatre métriques (hydraulique, invertébrés, macrophytes et géochimie). Les données utiles sont les données associées à ces métriques.

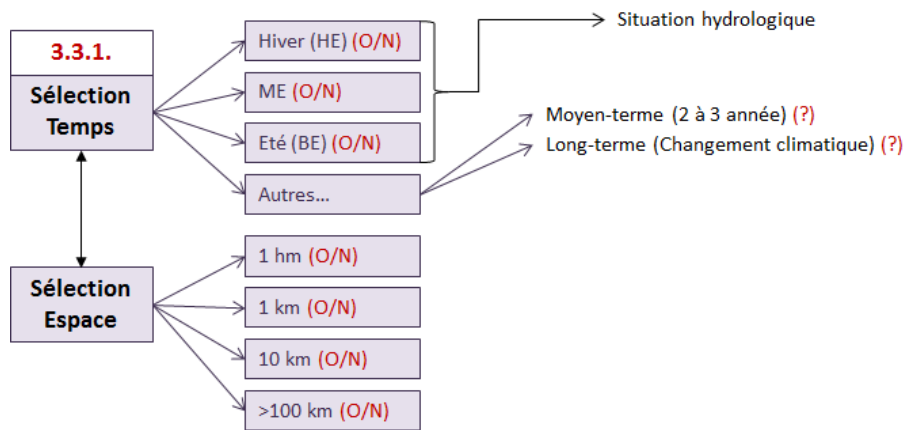


Figure 43 : Sélection des échelles d'espace et de temps (la numérotation 3.3.1. renvoie à une partie du guide)

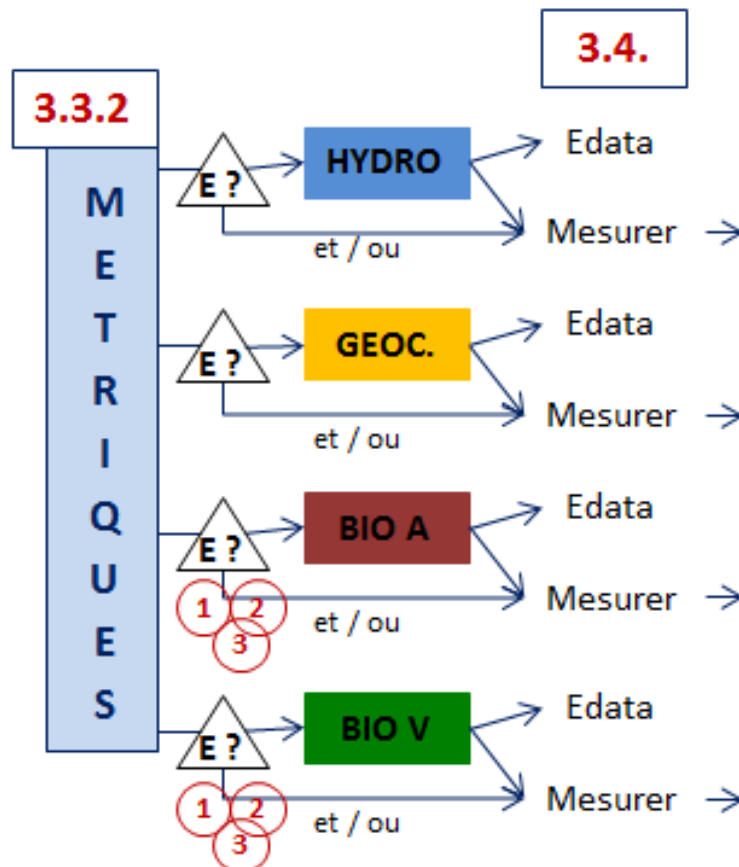


Figure 44 : Sélection des outils (métriques) et des données (la numérotation 3.3.2. et 3.4 renvoie à une partie du guide)

Au final, toutes les informations et toute la réflexion conduite par l'utilisateur seront mobilisées au dans le chapitre suivant pour le calcul et l'interrelation des échanges. A ce stade l'utilisateur doit avoir une bonne idée des atouts et limites des outils qu'il souhaite utiliser selon les objectifs et les échelles

spatiotemporelles pertinentes. Des exemples, vraisemblablement issus des travaux effectués sur la chute de Donzère-Mondragon seront utilisés pour illustrer cette partie

Plusieurs tableaux de décision explicatifs indiquant le potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivière de chacune des métriques en fonction des objectifs et de l'échelle spatiotemporelle pourront être proposés à l'utilisateur (Tableau 25).

Métrique	Qualitatif	Quantitatif	Echelle
Invertébrés	-	+	++
Hydraulique	+	++	+

Tableau 25 : Exemple de principe d'un tableau de décision

3.5. Chapitre 4 – Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière

La rédaction du chapitre 4 devra être réalisée afin de permettre à l'utilisateur caractériser lui-même et entièrement les échanges nappe/rivière sur un secteur de son choix ou bien de décider selon ses compétences et moyens que certaines tâches doivent être sous-traitées. La Figure 45 indique la première partie du cheminement à suivre : sélectionner les métriques utiles, obtenir les données utiles, garder en mémoire le potentiel interprétative des métriques.

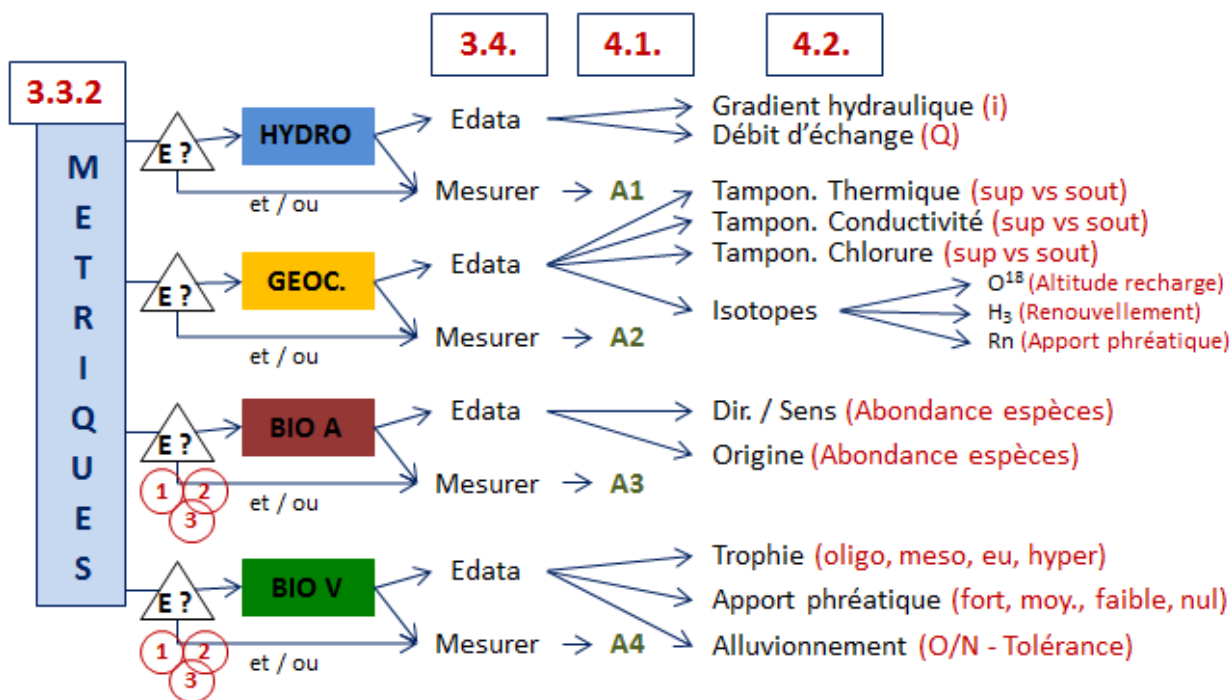


Figure 45 : Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière (la numérotation 3.3.2., 3.4., 4.1. et 4.2. renvoie à une partie du guide)

L'utilisateur sera ensuite guidé pas à pas dans l'utilisation de chaque métrique. Pour chacune d'entre elles les protocoles d'échantillonnage et d'utilisation seront disponibles. Au final, l'utilisateur pourra calculer et interpréter les échanges pour chacune d'entre elles. Les résultats issus de l'étude de la chute de Donzère-Mondragon seront à nouveau mobilisés pour illustrer la démarche.

3.6. Chapitre 5 – Conclure sur les échanges nappes/rivière

La rédaction du chapitre 5 conduira à expliquer à l'utilisateur comment tirer des conclusions des mesures et calculs effectués précédemment et comment synthétiser pour caractériser les échanges nappes/rivière (Figure 46). Les résultats devront être agrégés selon un découpage en lien avec les

échelles d'espace et de temps sélectionnées et des unités fonctionnelles repérées. Il sera par exemple possible d'effectuer un découpage avec les PK (points kilométriques).

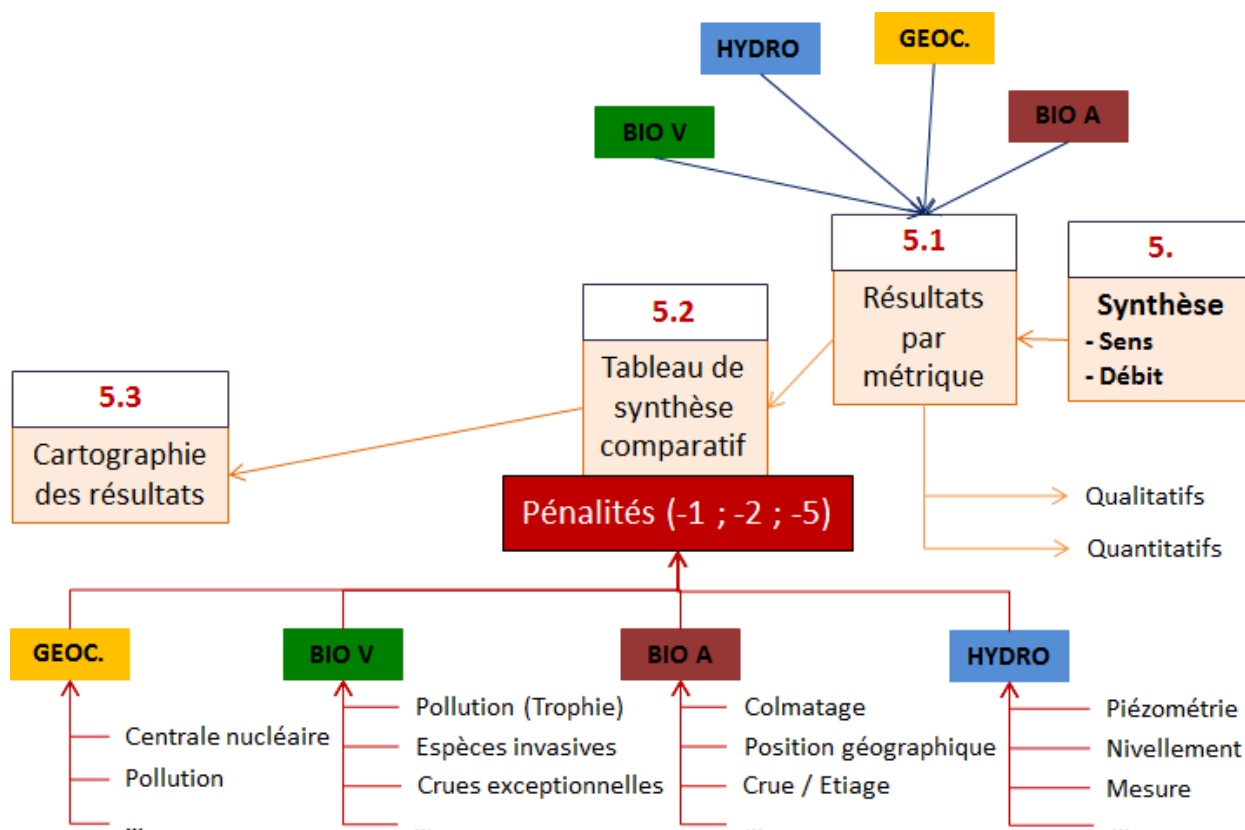


Figure 46 : Synthétiser et cartographier les échanges nappes/rivière (la numérotation 5., 5.1., 5.2. et 5.3. renvoie à une partie du guide)

La synthèse des résultats pourra se faire dans un premier temps par métrique du point de vue qualitatif et quantitatif, puis dans un deuxième temps dans un tableau de synthèse général permettant de comparer les résultats des métriques et de prendre une décision concernant le sens l'intensité des échanges. Ce type de tableau de synthèse comparatif pourra être de la forme de ceux proposés dans les parties précédentes concernant le secteur Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche (§1.4 p23) et le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux (§2.4 p57).

Le guide proposera à l'utilisateur un moyen de prendre en compte les incertitudes concernant le diagnostic effectué à l'aide chacune des métriques. Cette incertitude individuelle sera ensuite reportée au niveau du diagnostic synthétique. A ce niveau, deux solutions sont envisageables et restent encore à développer :

- donner une pondération en fonction de la fiabilité de la métrique (de 0 à 3 par exemple). Le diagnostic synthétique peut alors être obtenu par somme pondérée.
- utiliser des pénalités (penalty theory) et attribuer un nombre de points de pénalité en fonction du problème rencontré et l'ôter à un nombre de points maximum déterminés a priori (par exemple 5 à 10 points).

PK	Invertébrés	Macrophytes	...	Synthèse
1	↑	↓	↑	↑ (fiabilité)
2	↑	→	↓	? (fiabilité)
...				

Tableau 26 : Exemple de principe - passage du diagnostic individuel au diagnostic croisé et synthétique

Une fois la synthèse réalisée le guide donnera toutes les informations nécessaires à la cartographie des résultats synthétique. Afin, d'aider l'utilisateur et d'illustrer chacune des étapes le travail effectué sur Donzère-Mondragon en phase 3 et 4 du projet sera mobilisé.

Le guide ne devant pas être trop volumineux, une grande partie de l'information sera disponible dans les annexes de celui-ci..

4. Annexes du guide méthodologique : sommaire

Une bonne partie des annexes du guide contient déjà l'information nécessaire. Il conviendra de la mettre en forme et éventuellement de la rendre plus accessible à l'utilisateur (synthèse, encart, ...). Pour les annexes A1 à A4 il conviendra d'inclure :

- des exemples de résultats
- les contraintes et limites
- des photos et descriptions du matériel
- des listes de vérification (checks lists) de terrain

Il faudra aussi ajouter les clefs d'identification des invertébrés et des macrophytes.

Il conviendra aussi de compléter et /ou de mettre à jour les annexes A5 à A7.

A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN

1. Lecture de cartes piézométriques / Loi de Darcy
2. Fabriquer une carte piézométrique
3. Générer un modèle TIN (analyse SIG)
4. Limites, conditions d'application

A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation

1. Paramètres simples - nappe/rivière (conductivité, température, chlorures)
2. Isotopes (oxygène 18, deutérium, tritium, radon)

A3. BIO A : Invertébrés

1. Echantillonnage de la faune interstitielle
2. Identification (clef simplifiée)
3. Calcul de l'indice

A4. BIO V : macrophytes

1. Echantillonnage
2. Indentification (clef simplifiée)
3. Calculs des indices (trophie, apport phréatique, alluvionnement, global)

A5. Bases de données utiles et consultables

A6. Estimation des coûts (homme/jour), des difficultés et limites d'utilisation du guide

A7. Personnes ressources et compétences

Annuaire de compétences à mettre à jour tous les 3 ans

CONCLUSION

Cette partie reprend en grande partie des éléments déjà rédigés dans la phase 3 du projet avec quelques mises à jour et compléments. Il est à notre sens essentiel de fixer les éléments importants à garder en tête pour la rédaction du guide méthodologique. La conclusion revient donc sur l'efficacité des descripteurs, le bilan concernant le travail réalisé ainsi que sur l'applicabilité et la pertinence de la méthode. De plus, et pour terminer, une partie est consacrée au guide méthodologique et à sa mise en œuvre.

1. Efficacité des descripteurs

1.1. Hydraulique

L'approche utilisée montre tout l'intérêt et la simplicité d'utilisation de la Loi de Darcy pour calculer des débits d'échanges nappes/rivière sur les secteurs étudiés du Rhône. La généralisation de la loi de Darcy à l'échelle du Rhône n'est possible que sous réserve de l'applicabilité de la loi de filtration. Cette méthode semble aussi adaptée pour travailler sur des cours d'eau de plus petite taille. Elle sera testée en phase 5 du projet dans un autre contexte rivulaire : la confluence Saône/Doubs.

1.1.1. Une méthode simple avec un nombre de données d'entrée minimum

Malgré la simplicité de la méthode, les calculs effectués avec la Loi de Darcy imposent toutefois un nombre de données d'entrée minimum et indispensables pour une précision satisfaisante dans les calculs. Il s'agit :

- de cartes piézométriques datées postérieures à l'aménagement CNR et calées NGF si l'on travaille sur le Rhône ;
- de cotes d'altitudes (lignes d'eau) du fleuve, des lônes ou des contre-canaux à la même date ;
- des champs de perméabilité précis pour déduire la perméabilité à l'interface nappe/rivière ;
- des profils bathymétriques et des largeurs du fond du fleuve, des lônes ou des contre-canaux pour estimer au mieux la surface d'échange utile avec la nappe. Cette surface est calculée de la façon suivante :

Surface utile = (niveau piézo. - altitude du fond) + portion de largeur si alimentation par le fond

Les calculs des débits et des gradients de nappe réalisés sont empreints d'incertitudes compte-tenu de l'imprécision de données. En effet, les piézométries dont nous disposons ne sont pas toujours calées NGF et ne sont pas synchrones avec les côtes d'altitude du fleuve. De plus, nous utilisons dans la plupart des cas des perméabilités issues de la littérature et nous travaillons avec une hypothèse ou une évaluation pour la surface d'échange utile.

1.1.2. Une méthode qui présente de nombreux avantages

La méthode d'indentification et de quantification des échanges par analyse spatiale sous SIG présente les avantages suivants :

- elle limite l'effet observateur (utilisateur) potentiellement existant lors des calculs manuels ;
- 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 : champs de perméabilité, surfaces d'échange utile) ;

- elle permet, si les données existent, une représentation linéaire des échanges sur l'ensemble des berges et non plus une représentation ponctuelle comme avec les calculs manuels ;
- 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.
- elle permet d'instaurer une pondération en fonction de l'angle décrivant l'interface entre la nappe et le fleuve. En effet, la Loi de Darcy ne fonctionne que dans le cas où la nappe et le fleuve ont un écoulement perpendiculaire. Dans les autres cas, le débit calculé avec cette Loi est surévalué.
- elle permet d'automatiser l'enchaînement des fonctions d'analyse spatiale pour un traitement plus rapide.

1.1.3. Une méthode qui nécessite la prise en compte des incertitudes

Cette méthode est encore perfectible. Il conviendra entre autres d'évaluer au mieux les incertitudes pesant sur le calcul des débits et des gradients de nappe. En effet, la généralisation de la méthode demande au préalable une évaluation de la marge d'incertitude induite par les incertitudes des chacune des variables servant au calcul des débits et des gradients de nappe. Il conviendra de travailler sur la façon de prendre en compte les incertitudes dans la caractérisation des échanges. Il faudra tenir compte des incertitudes liées aux variables utilisées pour le calcul du débit d'échange : gradient de nappe, surface d'échange et perméabilité des alluvions. De plus, il faudra engager une réflexion concernant la distance optimale, par rapport à la rivière, à laquelle on détermine le niveau de nappe. Cette distance peut modifier la valeur du gradient de nappe calculé. Il faudra aussi inclure les problèmes de colmatages au niveau des berges et les freins au drainage.

Un tel travail pourra être mené en lien avec le travail de Thèse d'Eric Lalot concernant la caractérisation des échanges nappes/rivière. Il est d'ores et déjà prévu de confronter les résultats issus de modèles de nappes à ceux obtenus par analyse géomatique sur Péage-de-Roussillon. Un tel travail devrait faciliter la détermination des incertitudes.

1.1.4. Une méthode où des développements sont encore possibles

Dans l'optique du travail sur les variations saisonnières, initié en phase 3, continué en phase 4, il conviendra en phase 5 de travailler à partir de cartes piézométriques et des lignes d'eau à des dates hydrologiques caractéristiques (ex : basses-eaux, moyennes-eaux, hautes-eaux) pour le nouveau secteur d'étude (Saône/Doubs). Dans l'éventualité, d'une poursuite du projet suite à la rédaction du guide méthodologique, un travail sur les effets potentiels dû aux évolutions climatiques fondés sur les résultats de scénarios (ex : Météo France) pourrait utiliser ces dates caractéristiques pour estimer les effets prévus par ces scénarios.

La méthode d'identification et de quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale sous SIG pourra être transposée aux autres unités d'aménagement CNR. Elle pourrait être mobilisée sur d'autres fleuves, ou d'autres rivières, pour des aquifères alluviaux sous réserve que les données nécessaires existent.

1.2. Invertébrés

1.2.1. Les invertébrés, des indicateurs de l'origine de l'eau baignant les sédiments des cours d'eau

L'approche utilisée dans ce travail est basée sur l'observation que la distribution de la faune souterraine ou stygobie (qui est adaptée à la vie en milieu souterrain) dans les interstices des cours d'eau est contrôlée par les patrons hydrologiques. Il a été montré en particulier que les influences relatives des apports d'eau de surface (riches en oxygène dissous et en matière organique biodégradable, mais thermiquement instables) et des apports d'eau souterraine (souvent pauvres en oxygène et en matière organique, mais tamponnés thermiquement) conduisaient à des compositions contrastées des

peuplements interstitiels. Nous avons donc proposé d'utiliser cette composition des peuplements pour reconstituer l'origine des eaux baignant les sédiments d'un cours d'eau.

1.2.2. Avantages de la méthode invertébrés

Les points positifs de cette méthode sont :

- (i) d'offrir une source d'information indirecte de l'origine de l'eau et de sa dynamique, les organismes stygobies intégrant une grande diversité de caractéristiques environnementales,
- (ii) d'intégrer les échanges nappe-rivière sur des durées de l'ordre de plusieurs semaines, ces organismes étant peu mobiles ils rendent sans doute bien compte des échanges moyens au niveau d'une station,
- (iii) mais aussi de traduire les effets des changements saisonniers des niveaux relatifs des nappes et du fleuve.

Ces avantages sont clairement mis en avant par le diagnostic des échanges nappe-fleuve sur le secteur de Donzère-Mondragon (Phase 4) au niveau des deux contre-canaux situés de part et d'autre du canal d'amenée. Des apports, variables dans le temps, d'eau de nappe du versant Drômois ont ainsi été diagnostiqués dans le contre-canal gauche et des apports très constants de pertes d'eau du Rhône ont pu être observés dans le contre-canal droit.

Pour finir, les invertébrés constituent la seule métrique capable de diagnostiquer le phénomène de recyclage et de travailler à une échelle aussi locale.

1.2.3. Limites de la méthode invertébrés

Les limites de cet indicateur "invertébrés souterrains" sont liées :

- (i) à la lourdeur de leur échantillonnage (en termes d'effort de prélèvement sur le terrain et de tri au laboratoire) qui conduit à des diagnostics ponctuels à l'échelle de la station, donc discontinus sur la longueur des chenaux,
- (ii) à la difficulté d'identification des organismes, qui doit être réalisée par des spécialistes,
- (iii) à la connaissance parfois limitée de leur écologie, qui ne permet pas toujours de préciser l'origine des eaux souterraines alimentant les interstices des sédiments.

Ces limites sont clairement visibles au niveau du Rhône court-circuité (RCC ou vieux Rhône), où les apports du versant Ardéchois n'ont pu être diagnostiqués dans la partie la plus en amont du RCC et où l'influence de la nappe accompagnant l'Ardèche masque les pertes d'eau de surface vers la plaine au niveau de la confluence avec l'Ardèche.

1.3. Macrophytes et physico-chimie

1.3.1. L'approche physico-chimique, un indicateur des échanges nappe/rivière à améliorer

L'approche physico-chimique des eaux semble être pertinente pour évaluer les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines, puisque les résultats obtenus avec deux autres méthodes sont concordants. Cependant, cette méthode mérite d'être améliorée et complétée. En effet, les mesures de la conductivité des milieux aquatiques du secteur de Brégnier-Cordon n'avaient pas permis de dégager de fortes tendances, alors que sur Donzère-Mondragon, ce paramètre s'est avéré fortement indicateur d'apports phréatiques de versant. Il en ressort que seule l'utilisation combinée de plusieurs paramètres, puis la réalisation d'ACP permettent d'appréhender correctement les flux. La méthode basée sur les indicateurs physico-chimiques trouve également ses limites lorsque la distinction entre les nappes alluviales et les nappes de versant est malaisée (absence de traceur physico-chimique spécifique). Les mesures de la conductivité sur Brégnier-Cordon l'ont démontré, et ce paramètre n'était pas un indicateur adéquat pour ce secteur. En revanche, il est envisageable d'utiliser les concentrations en sulfates sur le Haut-Rhône puisqu'elles caractérisent la nappe du Rhône sur ce secteur.

L'activité biologique dans les écosystèmes peut également biaiser l'outil (ex. modifications des équilibres ioniques susceptibles de modifier le pH ou des activités biologiques modifiant la teneur en nitrates). La

méthode physico-chimique se montre performante surtout pour indiquer les apports des nappes de versant. Il est également intéressant de noter que le niveau de trophie n'intervient pas dans cette méthode (faible pouvoir discriminant de l'ammonium et des phosphates), ce qui semble indiquer que ces paramètres, dont les variations sont influencées par l'activité biologique, influent peu sur la typologie, augmentant ainsi sa validité.

1.3.2. Amélioration possible de la méthode physico-chimique

Dans l'objectif de valider la méthode, il serait nécessaire d'effectuer des mesures physico-chimiques pendant les moyennes-eaux. En effet, l'étude sur Donzère-Mondragon s'est déroulée pendant une période d'étiage, ce qui favorise le drainage des nappes par le réseau hydrographique. Il est possible que l'origine de l'alimentation en eau des milieux aquatiques varie fortement selon que l'on soit en étiage, en crue ou en moyennes eaux, et ce de manière différente selon la géomorphologie des secteurs. Il est tout de même déconseillé d'effectuer les mesures en période de hautes-eaux, puisque la dilution des eaux brouille les paramètres physico-chimiques. La période d'étiage rend les apports phréatiques plus importants, donc plus visible chimiquement, mais peut induire en erreur d'appréciation dans l'intensité des échanges, et même dans leur direction préférentielle. Cette dimension est donc essentielle à considérer.

Une limite réside dans le fait que les analyses ne portent que sur les écosystèmes de surface. Un mauvais maillage de ces écosystèmes dans la plaine génère donc des zones sous documentées, et donc difficiles à caractériser. Il serait alors pertinent de réaliser des prélèvements dans l'eau interstitielle pour compléter le maillage, ce que nous n'avons pas fait.

Enfin, un test de la méthode dans d'autres contextes géologiques permettrait de mesurer le rôle de la lithologie qui pourrait faire fortement varier certains paramètres.

1.3.3. Physico-chimique et macrophytes, des méthodes complémentaires

La méthode basée sur les indicateurs végétaux est donc un complément indispensable aux indicateurs physico-chimiques. De surcroît, la collecte des données de terrain peut se faire simultanément pour les deux méthodes. Le matériel nécessaire est peu coûteux et les compétences requises pour ces deux méthodes (ACP, cartographie sous SIG et détermination des espèces végétales) s'acquièrent rapidement. C'est pourquoi, l'utilisation de la méthode basée sur les macrophytes est très complémentaire, puisque les végétaux sont intégrateurs des variations saisonnières en terme d'alimentation en eau du milieu.

Afin de valider définitivement l'outil combiné macrophyte chimie, il faudrait le tester sur un autre secteur avec une géologie différente (eg, absence de Karst). En effet, les résultats pourraient être moins bons dans des secteurs dans lesquels les nappes seraient moins bien différenciées chimiquement. Pour que la méthode physico-chimique soit utilisable sur l'ensemble du Rhône, une adaptation dans les paramètres choisis en fonction du contexte local est nécessaire (e.g. utilisation des sulfates comme traceur de la nappe alluviale sur le Haut-Rhône). Une prospection du territoire avec la mesure d'un maximum de paramètres, suivi du traitement statistique (ACP) des résultats, permettrait de dégager les caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines sur le secteur concerné. Cet outil ne se substituera cependant pas, du fait de sa lourdeur et de sa relative imprécision, à l'outil végétation.

1.4. Croisement des métriques

Le croisement interdisciplinaire des métriques est réalisé à l'heure actuelle à dire d'experts. Les différents diagnostics sont codifiés dans des tableaux de comparaisons des métriques qui permettent de synthétiser les informations importantes :

- situations d'échanges détectées selon les métriques (accompagné d'une carte)
- incertitudes pesant sur ses situations
- diagnostic synthétique possible (accompagné d'une carte)

Il conviendra dans la suite de projet de travailler à la construction d'une méthode permettant au gestionnaire de réaliser ce croisement des métriques selon ses propres moyens et donc de lui proposer les clefs pour déterminer facilement :

- un diagnostic pour chacune des métriques (liste de cas)
- les incertitudes pesant sur ces métriques (listes de problèmes rencontrés)
- un diagnostic synthétique multi-métriques pour la zone étudiée (pénalité, pondérations).

2. Bilan par chute CNR

Localisation	Secteurs (chutes CNR)	Estimation de l'apport de la nappe au Rhône (m³/j)	
		Rive gauche	Rive droite
Haut-Rhône	Génissiat	Données CNR	
	Seyssel		
	Chautagne-Lavours	Modèle BURGEAP, Données CNR	
	Belley	Données CNR	
	Brégnier-Cordon	Données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 111 à 99 en m³/j : [32 370 ; 61 950]	-
	Pont d'Evieu à Port Lagnieu		
	Port Lagnieu au Pont de Jons		
Rhône-Moyen	Pont de Jons à la Saône		
	Pierre-Bénite		
	Vaugris		
	Péage-de-Roussillon	Modèle BURGEAP, données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 51 à 63 en m³/j : [17 200 ; 46 880]	Modèle de nappe (Thèse E. Lalot]
		Modèle de nappe (Thèse E. Lalot]	
	Saint-Vallier		
	Bourg-Lès-Valence		
Rhône-Aval	Beauchastel	Données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 119,5 à 126 en m³/j : [13 870 ; 18 740]	Apports de nappe au fleuve PK 122,5 à 126 en m³/j : [3 ; 5 370]
		Apports de nappe à l'Eyrieux PK 0 à 3 en m³/j ; [1 230 ; 1 670]	
	Baix-Logis-Neuf		
	Montélimar		
	Donzère-Mondragon	Modèle ANTEA, données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 170 à 195 en m³/j : [126 360 ; 145 890]	Apports de nappe au fleuve PK 186 à 182 en m³/j : [1 150]
		Apports de nappe à l'Ardèche PK 0 à 8 en m³/j : [1 830]	
	Caderousse	Donnés CNR	
	Avignon		
	Vallabrègues		
	Pallier d'Arles 1		
	Pallier d'Arles 2		
	Pallier d'Arles 3		

Tableau 27 : Bilan de la quantification des échanges nappes/Rhône

Le Tableau 27 repositionne le travail déjà effectué et les données acquises ou en cours d'acquisition sur l'ensemble du cours du fleuve du point de vue hydraulique. Si les apports de la nappe aux Rhône ont pu être évalués sur certains secteurs, les apports des aquifères de seconde zone (aquifères satellites) aux nappes alluviales n'ont pas encore fait l'objet d'évaluations.

Le Tableau 28 dresse un bilan des données recueillies actuellement par unité d'aménagement CNR pour chacune des métriques. On observe :

- en blanc sur fond rouge : les chutes étudiées ;
- pour la métrique hydraulique : en bleu foncé les chutes pour lesquelles les données CNR sont acquises, en bleu clair les chutes pour lesquelles d'autres données (rapports, thèses...) sont déjà disponibles ;
- pour la métrique macrophyte : en vert foncé les chutes spécifiquement échantillonnées dans le cadre de l'étude ; en vert clair les chutes déjà échantillonnées par ailleurs ;
- pour la métrique invertébrés souterrains : en orange foncé les chutes spécifiquement échantillonnées dans le cadre de l'étude ; en orange clair les chutes déjà échantillonnées par ailleurs ;
- pour la métrique isotope : en rouge foncé les chutes spécifiquement échantillonnées dans le cadre de l'étude.

Localisation	Secteurs (chutes)	Hydro		Macrophytes		Invertébrés		Isotopes	
		RD	RG	RD	RG	RD	RG	RD	RG
Haut-Rhône	Génissiat								
	Seyssel								
	Chautagne-Lavours								
	Belley								
	Brégnier-Cordon								
	Pont d'Evieu à Sault-Brenaz (Port Lagnieu)								
	Port Lagnieu au Pont de Jons								
Rhône-Moyen	Pont de Jons à la Saône (Cusset, EDF)								
	Pierre-Bénite								
	Vaugris								
	Péage-de-Roussillon								
	Saint-Vallier								
	Bourg-Lès-Valence								
Rhône-Aval	Beauchastel								
	Baix-Logis-Neuf								
	Montélimar								
	Donzère-Mondragon								
	Caderousse								
	Avignon								
	Vallabrègues								
	Pallier d'Arles 1								
	Pallier d'Arles 2								
	Pallier d'Arles 3								

Tableau 28 : Etat d'avancement du recueil de données par unité d'aménagement CNR (chutes)

3. Applicabilité et pertinence de la méthode

Sur les trois grands secteurs étudiés, lors des trois dernières phases (2, 3 et 4) de travail, il apparaît que le croisement des métriques (hydraulique, invertébrés, macrophytes, physico-chimie) permet de réaliser un diagnostic convergent des échanges nappes/Rhône et/ou nappe/cours d'eau. Ce diagnostic est rendu possible grâce aux informations apportées par chacune des métriques. Ces informations peuvent être de même nature ou complémentaires :

1) de même nature si elles conduisent au diagnostic d'un même phénomène de manière convergente ou même divergente ;

2) complémentaires si elles autorisent le diagnostic de phénomènes différents ou si elles comblent les lacunes en données, permettant le diagnostic, de l'une ou l'autre des métriques.

A titre d'exemple, les informations sont de même nature quand il s'agit de diagnostiquer les apports de nappe. En effet, toutes les métriques impliquées peuvent détecter les apports de nappe au fleuve. Au contraire, les informations sont complémentaires quand il s'agit, par exemple :

- de détecter les apports du Rhône à la nappe, impossible avec la végétation ;
- de détecter la contribution des sous-écoulements, impossible avec l'hydraulique ;
- de détecter les apports mélangé du sous-écoulement et de l'aquifère au fleuve, impossible avec l'hydraulique ;
- de détecter les colmatages, possible uniquement avec les invertébrés et les isotopes ;
- de détecter le phénomène de recyclage, possible seulement avec les invertébrés

De plus, l'absence de données hydraulique sur certaine portion des secteurs étudiés rend les informations complémentaires fournies par les autres métriques essentielles pour la compréhension des échanges. Dans d'autres secteurs, par exemple, la couverture limoneuse épaisse peut rendre l'échantillonnage d'invertébrés impossible ou la forte teneur d'une eau en nutriments rendre le diagnostic fondé sur la végétation difficile.

En l'état, le diagnostic des échanges nappes/Rhône par croisement des métriques nécessite :

- un dialogue interdisciplinaire approfondi entre spécialistes du domaine ;
- la compréhension mutuelle et l'acceptation des phénomènes spécifiques diagnostiqués par chacune des métriques, ainsi que la connaissance de leur portée interprétative ;
- la mise à plat, d'une part des doutes et incertitudes et d'autre part des points forts, contraignant ou renforçant respectivement chacun des diagnostics.

Cette approche a permis une sectorisation fonctionnelle des échanges nappes/Rhône simple et opérante. Sur le secteur de Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche, l'interprétation a conduit à découper le linéaire de berge impliqué en un nombre réduit de secteur :

- Vieux-Rhône rive droite : 4 secteurs pour environ 30 km ;
- Vieux-Rhône rive gauche : 3 secteurs pour environ 30 km ;
- Canal de dérivation Rive droite : 3 secteurs pour environ 28 km ;
- Canal de dérivation rive gauche : 1 secteur pour environ 28 km ;
- Ardèche rive gauche : 2 secteur pour environ 8 km ;
- Ardèche rive droite : 1 secteur sur 1 km.

Sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux, l'interprétation a aussi conduit à un découpage en un nombre de secteurs réduits :

- Vieux-Rhône rive gauche : 1 secteur pour environ 10 km
- Vieux-Rhône rive droite : 1 secteur pour environ 5 km

- Canal de dérivation rive gauche : 1 secteur pour environ 4 km
- Canal de dérivation rive droite : 6 secteur pour environ 10 km
- Eyrieux rive gauche : 1 secteur pour environ 6 km
- Eyrieux rive droite : 1 secteur pour environ 2 km

Dans le futur, il conviendra pour améliorer le diagnostic de travailler :

- sur les causes des échanges en donnant des facteurs explicatifs, sans se contenter de résultats descriptifs ;
- sur l'analyse de corrélations statistiques entre indices biologiques, teneurs isotopiques et débits calculés, sans se contenter d'une simple superposition des métriques, afin d'essayer d'associer par exemple, une gamme de débit de nappe à un indice biologique ;
- sur une méthode de pondération des métriques pour une interprétation plus fine, voire plus rigoureuse, du croisement des métriques ;
- sur une meilleure synchronisation de l'acquisition des données dans le temps et dans l'espace.

4. Vers un guide méthodologique

A l'heure actuelle, le guide méthodologique de caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire à l'usage des gestionnaires et acteurs de l'eau est à l'état embryonnaire avancé, voire de maquette inachevée. Les principaux concepts et éléments nécessaires à son développement jusqu'au stade de prototype prêt à être testé ont d'ores et déjà été définis et rassemblés :

- l'objectif a clairement été défini ainsi que le contexte d'utilisation
- le plan du guide a été arrêté et son organisation prévue
- le principe de la démarche et le cheminement dans le guide par l'utilisateur décrits et schématisés sous forme de graphes
- les éléments déjà rédigés et réutilisables issus des rapports précédents identifiés et pré-organisés

La plus grande partie du travail restant en phase 5 a été identifiée :

- Synthèse et réduction des parties préexistantes trop longues et/ou déséquilibrées
- Rédaction des éléments manquants
- Préparation des illustrations et encarts
- Mise au point de la méthode de synthèse de comparaison des métriques fondée sur des pénalités ou des pondérations

Au final, la phase 5 de ce programme de recherche devrait voir la finalisation et l'édition du guide selon le planning prévisionnel suivant :

- courant 2013 : finalisation du prototype du guide méthodologique
- fin 2013 : prototype du guide méthodologique prêt à être testé
- début 2014 : test du guide méthodologique par un panel représentatif de gestionnaires et d'acteurs de l'eau (ZABR, Agence de l'eau, ONEMA, DREAL...)
- courant 2014 : modification du guide méthodologique en fonction des résultats des tests
- fin 2014 : édition du guide méthodologique par l'Agence de l'Eau

PERSPECTIVES : PLANIFICATION DE LA PHASE 5 (JANVIER 2013 – DECEMBRE 2014)

Cette dernière phase du projet est en lien avec plusieurs projets :

1. Projets ZABR :
 - AIN Thermie / Echanges nappes/Ain (Echanges nappe alluviale/rivière)
 - Echanges nappes/Cèze (Echanges karst/rivière)
2. Projet ONEMA - NAPROM

Trois étapes principales composent cette phase 5 :

1. Approfondissement méthodologique
2. Instrumentation complémentaire
3. Constitution du guide méthodologique final

1. Approfondissement méthodologique : transposabilité de la méthodologie d'évaluation des échanges

Il s'agit d'établir le caractère générique de la méthodologie d'évaluation des échanges nappe-fleuve. Pour cela il est nécessaire de choisir un site hors alluvions du Rhône pour tester les méthodes mises au point. La basse vallée du Doubs semble présenter pas mal d'avantages à plusieurs niveaux : contextes hydrologique, hydrogéologique et morphologique bien différenciés, possibilité d'individualiser d'un côté le Doubs de l'autre la Loue. La Saône peut également se prêter à l'application de la méthodologie. Toutes les opérations nécessaires à l'obtention et au traitement des données liées aux différentes métriques seront donc à réaliser dans cette tâche.

2. Instrumentation complémentaire

Des compléments en matière de mesures piézométriques sur des sites déjà investigués sont nécessaires afin de mieux maîtriser les incertitudes de mesures et leur impact dans l'évaluation des échanges. Ces mesures seront utiles pour établir l'efficacité des méthodes de réconciliation de données de hauteurs d'eau en nappe ou en rivière mises en œuvre dans la thèse d'E. Lalot. En effet, il est important de pouvoir utiliser les données existantes pour évaluer les échanges nappe/Rhône même si celles-ci ne sont pas tout à fait complètes ou présentent quelques incohérences (défaut capteurs, problème de nivellement, données manquantes).

En termes d'instrumentation complémentaire, le recours aux techniques d'imagerie IRT pour évaluer à large échelle les apports d'eau phréatique au Rhône peut s'avérer tout à fait pertinent en permettant de localiser de manière précise les zones d'émergence de nappe. Une application est prévue sur les sites de Péage de Roussillon et de Donzère-Mondragon (cf. fiche ZABR 2012 intitulée : Imagerie infrarouge thermique aéroportée et modélisation hydrogéologique pour identifier et comprendre les zones d'échanges entre la nappe et le fleuve et l'échauffement thermique estivale en lien avec le débit réservé. Etude-pilote appliquée aux RCC de péage de Roussillon et de Donzère Mondragon).

Il s'agit d'une métrique complémentaire à celles développées et utilisées dans les phases précédentes qui présente un intérêt majeur pour la détection qualitative des échanges nappe/Rhône. Dans les zones alluvionnaires, les zones d'apport d'eau de nappe peuvent être ponctuelles ou linéaires et la propagation de l'anomalie thermique pourra être calculée sous la forme d'une distance à partir de laquelle le cours d'eau retrouve une température homogène. Cette distance pourra être spatialement corrélée à la nature (ponctuelle ou linéaire) de l'apport et à son intensité. Il s'agit d'un élément de cohérence supplémentaire par rapport aux débits d'échange calculés par méthode géomatique sur les linéaires de berges correspondant.

3. Constitution du guide méthodologique final

La phase 5 est surtout une phase de valorisation des résultats acquis lors des 4 phases précédentes et du travail de thèse initié en 2010. L'outil opérationnel d'aide à la décision est finalisé sous forme de guide méthodologique dont le mode d'élaboration a été choisi en phase 4 sous forme d'arbre de décision ou de graphe de cheminement dans lequel l'utilisateur du guide procède aux différentes étapes de l'évaluation selon le contexte lié à son cas d'étude (données existantes, outils mobilisés et mobilisables, enjeux, moyens pour procéder à des acquisitions de données nouvelles hydrauliques, géochimiques et/ou biologiques). Les conditions de transférabilité et de généralisation de l'outil seront établies en intégrant :

- les problèmes posés par les informations manquantes ;
- les conditions d'utilisation du guide;
- l'application à d'autres sites que ceux étudiés dans le cadre du programme.

Cette 3^e tâche (c) comporte :

- la réalisation finale du guide méthodologique et son édition
- le test du guide méthodologique auprès d'un panel d'utilisateurs identifiés avec l'agence de l'eau
- les modifications et ajustements nécessaires suite au test
- la mise en place d'un protocole de maintenance du guide pour qu'il puisse être opérationnel le plus longtemps possible.

PARTENAIRES ET CORRESPONDANTS

A l'heure actuelle, le réseau de contacts et partenaires constitué est le suivant (par ordre alphabétique d'organismes concernés) :

Agence de l'eau RMC (Cadilhac L., Clottes L., Immediato F., Lacombe E., Pelte T., Stroffek S., Mayen V., Pautrat P., Houssin C.)
 ANTEA (Crochet P.)
 AREVA (Patrice Florens)
 BRGM (Deverly F., Dorfliger N.)
 BURGEAP (Michelot C.)
 CEMAGREF Lyon (Lafont M., Leblois E.)
 CEREGE (Radakovitch O.)
 CNR (Doutriaux E., Taravel Y.)
 DREAL Languedoc-Roussillon (Chemin P.)
 DREAL Provence Alpes Côte d'Azur (Valencia G.)
 DREAL Rhône-Alpes (Vernay L., Henry de Villeneuve C., Caillot Y., Daguillon D.)
 EDF/LNHE (Krimissa M., Castaing P.)
 EMP (Flipo N.)
 ENSM-SE – Centre SITE (Graillot D., Déchomets R., Paran F.)
 ENTPE (Winiarski T.)
 Grand Lyon (Perissin A.)
 LEHF – écologie végétale (Bornette G., Puijalon S., Jezequel C., Baillet H., Rodriguez C.)
 LEHF – écologie souterraine (Marmonier P., Simon L., Piscart C., Ferreira D.)
 ONEMA (Maugis P.)
 Plan Rhône (Balme J.)
 Région Languedoc-Roussillon (Ingouf R.)
 Région Provence Alpes Côte d'Azur (Gentili R.)
 Région Rhône-Alpes (Alzate L., Petit C., Clabaut A.)
 Réserve Ramières/Platière (Pont B.)
 SEGAPAL, Miribel (Champion M.)
 SHR (Muscat B.)
 SMIRCLAID La Platière (Gangloff A.)
 Université d'Avignon – Laboratoire d'Hydrogéologie (Travi Y.)
 Université d'Avignon (Banton O.)
 Université de Besançon (Chauve P.)
 Université de Montpellier (Drogue C., Jourde H., Pistre S.)
 Université de Saint-Etienne (Renac C., Lavastre V.)
 Université de Savoie (Dzikowski M., Josnin J.-Y., Nicoud G.)
 ZABR (Clémens A.)

BIBLIOGRAPHIE

Métrieque hydraulique

Bornette et al., 2008. Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface. Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés. Rapport final phase 2

Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. Automatic control, Vol 19, Issue 6, p 716-723

Ben-Hur, A., Guyon, I., 2003. Detecting stable clusters using principal component analysis, in M.K. Brownstein and A. Kohodursky (Eds.), Functional genomics: method and protocols, Humana Press, p 159-182

Billings, S.A., 1980. Identification of non-linear systems – a survey. IEE proceedings, Vol 127, Part D, No6, p272-285

Bortel, R., Sovka, P., 2006. Approximation of statistical distribution of magnitude squared coherence estimated with segments overlapping. Signal processing, Vol 87, p 1100-1117

Brunner P., Simmons C. T., Cook Peter G. (2009) - Spatial and temporal aspects of the transition from connection to disconnection between rivers, lakes and groundwater JOURNAL OF HYDROLOGY Volume: 376 Issue: 1-2 Pages: 159-169 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.023

BURGEAP, 2007. Etude préalable à la restauration de la nappe d'accompagnement du Rhône. . SMIRCLAID - Syndicat mixte intercommunal du Rhône court-circuité Loire-Ardèche-Isère-Drôme - Rhône Court-Circuité de Péage de Roussillon (38)

Chen, T., Martin, E., Montague, G., 2009. Robust probabilistic PCA with missing data and contribution analysis for outlier detection. Computational statistics and data analysis. Vol. 53, 3706-3716.

Chiang, M.M.T., Mirkin, B., 2009. Intelligent choice of the number of clusters in k-means clustering: an experimental study with different cluster spreads. Journal of classification, Vol 27

CNR, 2002. Modélisation hydraulique hors Delta. Diagnostic hydraulique du bief de Péage-de-Roussillon.

Cooley, J.W., Tukey, J.W., 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathf Comput, Vol 19, p 297-301

Derx, J., Blaschke, A.P., Blöschl, G., 2010. Three dimensional flow patterns at the river-aquifer interface – a case study at the Danube. Journal of hydrology, Vol

DHI, 2007, Mike 11 reference manual.

Diersch, 2009. Feflow White papers. DHI-WASY

Fatmi, H., 2009. Méthode d'analyse des signaux et caractérisation hydrogéologique: application aux chroniques de données obtenues aux laboratoires souterrains du Mont-Terri, Tournemire, Meuse, Haute-Marne. Phd thesis. Ecole doctorale : Toulouse- Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace

Goutaland D. (2008) – Caractérisation hydrogéophysique d'un dépôt fluvioglaciaire. Evaluation de l'effet de l'hétérogénéité hydrodynamique sur les écoulements en zone non-saturée. Thèse ENTPE – INSA

Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S. ; site web : <http://www.pol.ac.uk/home/research/waveletcoherence/>

HORIZON CPGF. 1994. Etude hydrogéologique de la nappe de Péage-de-Roussillon.

Hutchinson, M.F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with

Références bibliographiques

automatic removal of spurious pits. *Journal of hydrology*. Vol 106, p211-232

Jolliffe, I.T., 2002. *Principal component analysis*, second edition. Springer

Karhunen, K., 1947. Über lineare methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. *Ann Ac Sci., Fennicae, Ser A*.137

Koopmans, L.H., 1995. *The spectral analysis of time series. Probability and mathematical statistics. A series of monograph and textbooks*, Vol 22. Academic press, Inc

Labat, D. 2005. Recent advances in wavelet analyses: part 1. A review of concepts. *Journal of hydrology*, Vol 314, p 275-288

Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., Banton, O., 1998. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of hydrology*, Vol 205, p 217-231

Ljung, L., 1996. *System identification*. CRC Press, Inc,

Ljung, L., 1999. *System identification – Theory for the user*. 2nd ed, PTR, Prentic Hall, Upper Saddle River, N.J.

Longuevergne, L., Florsch, N., Elsass P., 2007. Extracting coherent regional information from local measurements with Karhunen-Loeve transform: Case study of an alluvial aquifer (Rhine valley, France and Germany). *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 43, W04430

Mac Queen, J., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Fifth Berkeley Symposium on Mathematics, Statistics and probability*. University of California Press, p 281-297

Mandier, P., 1988. Le relief de la moyenne vallée du Rhône au tertiaire et au quaternaire. *Essai de synthèse paléogéographique*. Document du BRGM n°151

Mangin, A., 1984. Pour une meilleur connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *Journal of hydrology*. Vol 67, p 25-43

Maraun, D., Kurths, J., 2007. Non stationary Gaussian processes in wavelet domain: synthesis, estimation and significance testing. *Physical review*, E75

Pearson, K., 1900. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical magazine, Series 5*, p 157-175

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*. These, Université Pierre et Marie Curie

Salerno, F., Tartari, G., 2010. A coupled hydrological modelling and wavelet analysis for understanding the baseflow components of river discharge in karst environments. *Journal of hydrology*, Vol 376, p 295-306

SCOT des Rives du Rhône, 2010. *Evaluation environnementale. Incidences prévisibles du projet et mesures réductrices et compensatoires envisagées*. Rapport de présentation.

Serfes, M.E., 1991. Determining the mean hydraulic gradient of ground water affected by tidal fluctuations. *Ground Water*, Vol 29, No 4, p 549-555

Spearman, C., 1904. The proof and measurement of association between two things. *J. Psychol.*, Vol 15 p.72-101

Tam, V.T., De Smedt, F., Batelaan, O., Dassargues, A., 2004. Characterization of a cavern conduit system in Vietnam by time series correlation, cross-spectrum and wavelet analyses. *Hydrological sciences journal*, Vol 49

Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A practical guide to wavelet analyses. *Bulletin of the American meteorological society*.

Vernoux, J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., 2010. Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en

lien avec la DCE. Rapport BRGM/RP-57044-FR

Von Asmuth, J.R., Knotters, M., 2004. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. *Journal of hydrology*. Vol 296, p.118-134

Welch, P., 1967. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans Audio Electroacoustics*, Vol 15, p 70-73

Woodhouse, A.C. 1999. Artificial neural networks and dendroclimatic reconstructions: an example from the Front Range. *The Holocene*, Vol 9, p 521-529

Xin, P., Robinson, C., Li, L., Barry, A.D., Bakhtyar, R., 2010. Effects of wave forcing on a subterranean estuary. *Water resources research*, Vol 46,

Banque hydro : <http://hydro.eaufrance.fr>

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 : Beauchastel. DI-CE 99-925. 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.

Craste M. (1955) Construction du barrage de retenue sur le Rhône à Donzère *La bouille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 169-184.

DIREN-RA (1984) Contribution des services extérieurs du ministère de l'agriculture à la connaissance des ressources en eaux souterraines dans le département de l'Ardèche. SRAE-RA, DDA-Ardèche, 115p.

DIREN-RA (2001) Département de la Drôme. Bilan hydrogéologique départemental. DIREN-RA, 121p.

MES_V1 : http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/dce/MES_V1/

Parascandola M.F. (1982) Synthèse hydrogéologique de la région Rhône-Alpes. BRGM 82 SGN 380 RHA.

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. 1^{er} étape : Diagnostic de l'état actuel : analyse par aménagement. CNR, IRS. 250p.

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX, EQUATIONS, CARTES ET PHOTOGRAPHIES

1. Liste des figures

Figure 1 : Schéma des échanges nappe/rivière suivant les saisons et les années	14
Figure 2 : Apports de nappe au fleuve : vue 3D	16
Figure 3 : Apports de nappe au fleuve : représentation simplifiée	16
Figure 4 : Apports du fleuve à la nappe : vue 3D.....	17
Figure 5 : Apports du fleuve à la nappe : représentation simplifiée	17
Figure 6 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : vue 3D	18
Figure 7 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : représentation simplifiée	18
Figure 8 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : vue 3D	19
Figure 9 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : représentation simplifiée.....	19
Figure 10 : Sous-écoulement d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : vue 3D.....	20
Figure 11 : Sous-écoulement d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : représentation simplifiée	20
Figure 12 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : vue 3D.....	21
Figure 13 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : représentation simplifiée	21
Figure 14 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : vue 3D.....	22
Figure 15 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : représentation simplifiée .	22
Figure 16 : Répartition des stations d'invertébrés sur le secteur de Beauchastel.....	44
Figure 17 : Abondance en espèces stygobies sur le secteur de Beauchastel.....	46
Figure 18 : Bilan des échanges nappe-rivières sur le secteur de Beauchastel pour la métrique invertébrés	48
Figure 19 : Zone d'étude.....	65
Figure 20 : Points de mesure des niveaux d'eau de surface	66
Figure 21 : Points de mesure des niveaux de nappe	66
Figure 22 : Zone d'étude préférentielle	68
Figure 23 : Hauteur piézométrique moyenne observée (m) dans la nappe phréatique.....	68
Figure 24 : Points de mesure des variations en continu du niveau de la nappe	69
Figure 25 : Représentation spatiale des scores associés à la première composante principale – ACP sur données au pas de temps de 4h.....	78
Figure 26 : Comparaison du niveau observé dans le Vieux-Rhône en vert (auquel est retranchée sa moyenne) et de la première composante principale en bleu – ACP sur données au pas de temps de 4h	79
Figure 27 : Deuxième composante principale (obtenue à l'aide de la matrice de corrélation).....	79
Figure 28 : Représentation spatiale des scores associés à la seconde composante principale – ACP sur données au pas de temps de 4h.....	80

Liste des figures, tableaux, cartes, équations et photos

Figure 29 : Représentation spatiale des scores associés à la première composante principale – ACP sur données au pas de temps trimestriel	81
Figure 30 : Représentation spatiale des scores associés à la troisième composante principale – ACP sur données au pas de temps trimestriel	81
Figure 31 : Groupes de comportements (3 groupes) définis à partir des 5 premières composantes principales.....	82
Figure 32 : Groupes de comportements (4 groupes) définis à partir des 2 premières composantes principales.....	82
Figure 33 : Cohérence en ondelettes, entre les signaux de hauteurs de nappe et le signal de hauteurs du Rhône, en fonction de la périodicité des signaux (en pas de temps de 4h)	83
Figure 34 : Temps de retard, en jours, de l'onde de pression en nappe par rapport au fleuve estimé par corrélation simple	84
Figure 35 : Gain moyen estimé, à l'aide d'une analyse de Fourier, entre le signal de hauteur d'eau dans le Rhône et dans la nappe	84
Figure 36 : Niveaux d'eau observés (rouge), à l'aval du barrage de saint-Pierre de Bœuf (année 2006) et modélisés (bleu)	86
Figure 37 : Niveaux d'eau (mètres) observés (rouge) et modélisés (bleu) dans une zone associée à des scores importants de la première composante principale.....	87
Figure 38 : Niveaux d'eau (mètres) observés (rouge) et modélisés (bleu) dans une zone associée à des scores importants de la seconde composante principale	87
Figure 39 : Principe de la démarche visant à caractériser les échanges nappes/rivière.....	93
Figure 40 : Schéma de principes.....	95
Figure 41 : Définition de la zone de travail (la numérotation 3.1. renvoie à une partie du guide).....	96
Figure 42 : Définir les objectifs (la numérotation 3.2. renvoie à une partie du guide)	96
Figure 43 : Sélection des échelles d'espace et de temps (la numérotation 3.3.1. renvoie à une partie du guide)	97
Figure 44 : Sélection des outils (métriques) et des données (la numérotation 3.3.2. et 3.4 renvoie à une partie du guide)	97
Figure 45 : Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière (la numérotation 3.3.2., 3.4., 4.1. et 4.2. renvoie à une partie du guide).....	98
Figure 46 : Synthétiser et cartographier les échanges nappes/rivière (la numérotation 5., 5.1., 5.2. et 5.3. renvoie à une partie du guide)	99

2. Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractérisation des échanges nappes/rivières à la confluence Rhône-Ardèche.....	11
Tableau 2 : Code couleur utilisé pour la topologie schématique 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).	15
Tableau 3 : Indice de pénalité pour les sens des échanges.....	23
Tableau 4 : Croisement des métriques pour la rive gauche de l'Ardèche.....	23

Tableau 5 : Croisement des métriques pour la rive droite de l'Ardèche	23
Tableau 6 : Croisement des métriques pour la rive droite du canal de dérivation de Donzère-Mondragon ..	24
Tableau 7 : Croisement des métriques pour la rive gauche du canal de dérivation de Donzère-Mondragon	25
Tableau 8 : Croisement des métriques pour la rive droite du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	26
Tableau 9 : Croisement des métriques pour la rive gauche du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	27
Tableau 10 : Débits du Rhône à Valence pour les périodes étudiées	31
Tableau 11 : Caractérisation des échanges nappes/Rhône – secteur Guilherand.....	33
Tableau 12 : Caractérisation des échanges nappes/Rhône – secteur Beauchastel – septembre 2003.....	36
Tableau 13 : Caractérisation des échanges nappes/Rhône – secteur Beauchastel – juin 2007	38
Tableau 14 : Comparaison des flux d'eau échangés entre la nappe et la rivière en septembre 2003 et en juin 2007	40
Tableau 15 : Comparaison globale de flux d'eau échangés entre septembre 2003 et juin 2007	41
Tableau 16 : Distribution des espèces stygobies dans les différents secteurs.....	45
Tableau 17 : Croisement des métriques pour le secteur de Guilherand rive droite (amont de Beauchastel)	60
Tableau 18 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Canal de dérivation rive droite ..	60
Tableau 19 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Canal de dérivation rive gauche	60
Tableau 20 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Vieux-Rhône rive droite.....	61
Tableau 21 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Vieux-Rhône rive gauche	61
Tableau 22 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Confluence Rhône/Eyrieux rive droite	61
Tableau 23 : Croisement des métriques pour le secteur de Beauchastel – Confluence Rhône/Eyrieux rive gauche.....	62
Tableau 24 : Tableau de synthèse	88
Tableau 25 : Exemple de principe d'un tableau de décision	98
Tableau 26 : Exemple de principe - passage du diagnostic individuel au diagnostic croisé et synthétique ..	99
Tableau 27 : Bilan de la quantification des échanges nappes/Rhône	105
Tableau 28 : Etat d'avancement du recueil de données par unité d'aménagement CNR (chutes)	106

3. Liste des équations

Équation 1 : Modèle linéaire ARX.....	72
Équation 2 : Equations de Barré-Saint-Venant en 1D	75
Équation 3 : Equations de Barré-Saint-Venant en 1D	75
Équation 4 : Equation de diffusivité en milieu poreux	76

4. Liste des cartes

Carte 1 : Caractérisation des échanges nappes/rivières à la confluence Rhône/Ardèche	10
Carte 2 : Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère-Mondragon et pour la confluence Rhône/Ardèche.....	29
Carte 3 : Principales limites administrative sur le secteur de la chute CNR Beauchastel	32
Carte 4 : Entités hydrogéologiques en présence sur le secteur de Beauchastel.....	34
Carte 5 : Caractérisation des échanges nappes/ Rhône – secteur Guilhaud	35
Carte 6 : Caractérisation des échanges nappes/ Rhône – secteur Beauchastel – septembre 2003	37
Carte 7 : Caractérisation des échanges nappes/ Rhône – secteur Beauchastel – juin 2007.....	39
Carte 8 : Estimation du niveau d'eutrophisation du secteur de Beauchastel	51
Carte 9 : Estimation de l'intensité des apports d'eau souterraine dans le secteur de Beauchastel	52
Carte 10 : Estimation de la probabilité d'apports de la nappe de versant dans le secteur de Beauchastel...	53
Carte 11 : Estimation du niveau de perturbations par les crues dans le secteur de Beauchastel	54
Carte 12 : Synthèse de la métrique végétation aquatique dans le secteur de Beauchastel.....	55
Carte 13 : Superposition spatiale des métriques sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux	58
Carte 14 : Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux	59

TABLE DES MATIERES COMPLETE

FICHE SIGNALÉTIQUE	I
TABLE DES MATIERES SYNTHETIQUE	III
Résumé	V
INTRODUCTION	1
1. Finalités, objectifs et planification du projet.....	1
1.1. <i>Finalités opérationnelles, objectifs et méthodologie</i>	1
1.2. <i>Phases de l'étude</i>	2
1.3. <i>Phase 1 (2006-2007) et premiers résultats</i>	3
1.4. <i>Phase 2 (2007-2008)</i>	3
1.5. <i>Phase 3 (2009-2010)</i>	4
2. Justification du choix de la chute CNR de Beauchastel.....	5
3. Organisation du rapport et travaux effectués lors de la phase 4 (2010-2012).....	6
PARTIE I – Caractérisation des échanges nappes/Rhône : Compléments – chute de Donzère-Mondragon / Diagnostic – chute de Beauchastel / Régime transitoire – chute de Péage de Roussillon	7
1. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Donzère-Mondragon et à la confluence Rhône/Ardèche : compléments au diagnostic multi-métriques de la phase 3.....	9
1.1. <i>Confluence Rhône/Ardèche : métrique hydraulique</i>	9
1.1.1. Données	9
1.1.2. Situation hydrologique	9
1.1.3. Entités hydrogéologiques	9
1.1.4. Caractérisation des échanges nappes/rivières	10
1.2. <i>Confluence Rhône-Ardèche : métrique invertébrés souterrains</i>	13
1.3. <i>Mises à jour de la typologie schématiques des échanges nappes/rivière</i>	15
1.4. <i>Mises à jour du diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières</i>	23
2. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux : diagnostic multi-métriques	31
2.1. <i>Métrique hydraulique</i>	31
2.1.1. Données	31
2.1.2. Chute CNR de Beauchastel.....	31
2.1.3. Situation hydrologique	31
2.1.4. Entités hydrogéologiques	33
2.1.5. Caractérisation des échanges nappes/rivières	33
2.1.5.1. Secteur Guilherand – Rive droite – octobre 1985 (2 ^e quinzaine).....	33
2.1.5.2. Secteur de Beauchastel – 26-30 septembre 2003 – basses-eaux	36
2.1.5.3. Secteur de Beauchastel – 1 juin 2007 – moyennes-eaux humides	38
2.1.5.4. Bilan	40
2.2. <i>Métrique invertébrés souterrains</i>	43
2.2.1. Méthode de caractérisation des origines hydrauliques par leurs signatures faunistiques.....	43
2.2.2. Stations échantillonnées	43
2.2.3. Analyse et interprétation des échanges sur le secteur Beauchastel à partir des invertébrés	44
2.2.4. Analyse et interprétation des caractéristiques physico-chimiques sur le secteur Beauchastel.....	47
2.2.5. Conclusions.....	47
2.3. <i>Métrique macrophytes</i>	49
2.3.1. Campagne de terrain :	49

Table des matières complète

2.3.2. Résultats de la métrique végétation aquatique	49
2.3.3. Interprétation des résultats	50
2.4. <i>Synthèse des échanges sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux en période moyennes-eaux</i>	57
2.4.1. Superposition spatiale des métriques	57
2.4.2. Tableaux de croisement des métriques	57
2.4.3. Spatialisation du diagnostic synthétique	57
3. Caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Péage-de-Roussillon : approches pour un diagnostic en régime transitoire (travail de thèse de Eric Lalot : 2010-2013).....	63
3.1. <i>Objectifs et zone d'étude</i>	63
3.1.1. Objectif	63
3.1.2. Zone d'étude	64
3.2. <i>Données et instrumentation</i>	66
3.2.1. Données existantes.....	66
3.2.2. Choix d'une zone d'étude préférentielle	67
3.2.3. Instrumentation	68
3.3. <i>Méthodes</i>	70
3.3.1. Traitement des données.....	71
3.3.1.1. Détection des données aberrantes.....	71
3.3.1.2. Reconstitution des données manquantes	72
3.3.2. Analyses comportementales.....	73
3.3.2.1. Analyse en Composantes Principales.....	73
3.3.2.2. Groupement par comportement	74
3.3.3. Analyses corrélatoires et spectrales	74
3.3.4. Modélisation numérique déterministe.....	75
3.3.4.1. Modélisation des écoulements surfaciques.....	75
3.3.4.2. Modélisation des écoulements souterrains.....	76
3.4. <i>Résultats</i>	77
3.4.1. Analyses comportementales.....	77
3.4.1.1. Analyse en Composantes Principales.....	77
3.4.1.2. Groupement par comportement	82
3.4.2. Analyses corrélatoires et spectrales	83
3.4.3. Modélisation numérique déterministe.....	85
3.4.3.1. Modélisation des écoulements surfaciques.....	85
3.4.3.2. Modélisation des écoulements souterrains.....	86
3.5. <i>Conclusion et perspectives</i>	88
PARTIE II – Plan/maquette du guide méthodologique de caractérisation des échanges nappes/rivière en milieu alluvionnaire	91
1. Résumé de la démarche	91
2. Présentation synthétique du guide méthodologique	91
2.1. <i>Contexte et objectif préalable à l'élaboration du guide méthodologique</i>	91
2.2. <i>Contenu du guide méthodologique</i>	93
2.2.1. Plan du guide	93
2.2.2. Principe de la démarche	93
2.2.3. Cheminement dans le guide	94
2.3. <i>Perspectives</i>	94
3. Etat d'avancement du guide méthodologique	94
3.1. <i>Généralités et points à ne pas oublier</i>	94
3.2. <i>Chapitre 1 – Les échanges nappes/rivière en milieu alluvionnaire</i>	95
3.3. <i>Chapitre 2 – Principe généraux de la démarche et résumé</i>	95

3.4. Chapitre 3 – Avancer dans l'évaluation des échanges nappes/rivière	96
3.5. Chapitre 4 – Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière	98
3.6. Chapitre 5 – Conclure sur les échanges nappes/rivière	98
4. Annexes du guide méthodologique : sommaire	100
CONCLUSION.....	101
1. Efficacité des descripteurs	101
1.1. <i>Hydraulique</i>	101
1.1.1. Une méthode simple avec un nombre de données d'entrée minimum	101
1.1.2. Une méthode qui présente de nombreux avantages	101
1.1.3. Une méthode qui nécessite la prise en compte des incertitudes	102
1.1.4. Une méthode où des développements sont encore possibles	102
1.2. <i>Invertébrés</i>	102
1.2.1. Les invertébrés, des indicateurs de l'origine de l'eau baignant les sédiments des cours d'eau	102
1.2.2. Avantages de la méthode invertébrés.....	103
1.2.3. Limites de la méthode invertébrés	103
1.3. <i>Macrophytes et physico-chimie</i>	103
1.3.1. L'approche physico-chimique, un indicateur des échanges nappe/rivière à améliorer	103
1.3.2. Amélioration possible de la méthode physico-chimique	104
1.3.3. Physico-chimique et macrophytes, des méthodes complémentaires	104
1.4. <i>Croisement des métriques</i>	104
2. Bilan par chute CNR.....	105
3. Applicabilité et pertinence de la méthode	107
4. Vers un guide méthodologique.....	108
PERSPECTIVES : PLANIFICATION DE LA PHASE 5 (JANVIER 2013 – DECEMBRE 2014).....	109
1. Approfondissement méthodologique : transposabilité de la méthodologie d'évaluation des échanges	109
2. Instrumentation complémentaire	109
3. Constitution du guide méthodologique final	110
PARTENAIRES ET CORRESPONDANTS	111
BIBLIOGRAPHIE.....	113
LISTE DES FIGURES, TABLEAUX, EQUATIONS, CARTES ET PHOTOGRAPHIES	117
1. Liste des figures	117
2. Liste des tableaux	118
3. Liste des équations	119
4. Liste des cartes	120
TABLE DES MATIERES COMPLETE.....	121
TABLE DES MATIERES DES ANNEXES	125

TABLE DES MATIERES DES ANNEXES

1. Annexes 1 : Fiches projets	1
1.1. Fiche action recherche valorisation n° A11 – Phase 1 (2006-2007)	1
1.2. Fiche action recherche valorisation n° A11 – Phase 2 (2007-2008)	5
1.3. Fiche action recherche valorisation n° A1 – Phase 3 (2008-2010)	9
1.4. Fiche action recherche valorisation n° A9 – Phase 4 (2010-2012)	17
1.5. Fiche action recherche valorisation n° A9 – Phase 5 (2012-2014)	27
2. Annexes 2 : Fiches de synthèse	35
2.1. Phase 1 – (2006-2007)	35
2.2. Phase 2 – (2007-2008)	37
2.3. Phase 3 – (2008-2010)	39
3. Annexes 3 : Compte-rendu de terrains et de réunions	41
3.1. 12 janvier 2010 : CR de la réunion à la CNR	41
3.2. 19 janvier 2010 : CR de la réunion au SMIRCLAID	45
3.3. 10 février 2010 : CR de la réunion au SIGEARPE	49
3.4. 29 juin 2010 : CR de la sortie terrain – Aygues-Rhône	51
3.5. 22 novembre 2010 : CR de la réunion à la CNR	57
3.6. 14 février 2011 : CR du comité technique – Université Lyon I	61
3.7. 16 mars 2011 : CR de la réunion à la RN de la Platière	65
3.8. 27 avril 2011 : CR de la sortie terrain – Rhône-Ardèche	69
3.9. 28 avril 2011 : CR de la sortie terrain – Beauchastel/ Rhône-Eyrieux	73
3.10. 15 septembre 2011 : CR du comité technique – Université Lyon I	89
3.11. 30 septembre 2011 : CR du comité technique – Université Lyon I	93
3.12. 21 février 2012 : CR comité technique - Université Lyon I	97
3.13. 16 octobre 2012 : CR comité technique - Université Lyon I	103
4. Annexe 4 : Tableau de la physico-chimie des eaux de surface et interstitielles du secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux	107
5. Annexes 5 : Guide méthodologique	109
Organisation des éléments issus des rapports précédent dans le plan du guide	
1. Chapitre 1 – Les échanges nappes/rivière en milieu alluvionnaire	111
1.1. Enjeux (DCE,...)	111
1.2. Vers des préconisations en matière de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité	112
1.3. Fonctionnement (schémas, configurations,...)	114
1.4. Panorama des méthodes existantes	122
2. Chapitre 2 – Principe généraux de la démarche et résumé	145
2.1. Evaluation qualitative des échanges	145
2.2. Evaluation de la quantité d'eau échangée	145

Table des matières complète	
2.3. <i>Évaluation de la qualité de l'eau</i>	145
2.4. <i>Présentation des outils</i>	145
2.5. <i>Cheminement dans le guide</i>	143
3. Chapitre 3 – Avancer dans l'évaluation des échanges nappes/rivière	147
3.1. <i>Définition de la zone de travail</i>	147
3.2. <i>Définir les objectifs</i>	148
3.3. <i>Sélection au préalable</i>	148
3.4. <i>Données</i>	152
4. Chapitre 4 – Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière	155
4.1. <i>Protocole</i>	155
4.2. <i>Calcul et interprétation</i>	155
5. Chapitre 5 – Conclure sur les échanges nappes/rivière	157
5.1. <i>Tableau des résultats par métrique</i>	157
5.2. <i>Tableau de synthèse comparatif</i>	160
5.3. <i>Cartographie des résultats synthétiques</i>	161
5.4. <i>Métriques complémentaires</i>	163
6. Annexes du guide méthodologique	165
6.1. <i>Sommaire des annexes</i>	165
6.2. <i>A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN</i>	165
6.3. <i>A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation</i>	175
6.4. <i>A3. BIO A : Invertébrés souterrains</i>	181
6.5. <i>A4. BIO V : macrophytes</i>	185
6.6. <i>A5. Bases de données utiles et consultables</i>	191
6.7. <i>A6. Estimation des coûts et des difficultés (homme/jour), des difficultés et limites d'utilisation du guide</i>	193
6.8. <i>A7. Personnes ressources et compétences</i>	195

