

**ACCORD CADRE**  
**AGENCE DE L'EAU RHONE-MEDITERRANEE-CORSE**  
**ZONE ATELIER BASSIN DU RHONE (ZABR)**

-  
**Action n°1**  
-

**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*

**Rapport final – Phase 2**  
**Mars 2008**

**École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE)**

*Didier Graillot, Frédéric Paran, Roland Déchomets, Alix Germain et Marion Dufour*

Centre SITE (Sciences, Informations et Technologies pour l'Environnement)  
158, cours Fauriel - 42 023 Saint-Étienne Cedex 2

**Université Claude Bernard Lyon I (UCBL)**

*Janine Gibert, Pierre Marmonier, David Ferreira, Christophe Piscart et Laurent Simon\**

*Gudrun Bornette, Sara Puijalon et Céline Jezequel\*\**

Laboratoire « Écologie des Hydrosystèmes Fluviaux » UMR CNRS 5023 (EHF)

\*Équipe « Hydrobiologie et Écologie Souterraine »

\*\*Équipe « Écologie des Communautés Végétales »

Bâtiment F.A. FOREL

43, Boulevard du 11 Novembre 1918 - 69 622 Villeurbanne Cedex

**CEMAGREF Lyon**

*Michel Lafont*

UR Bely

3 bis, quai Chauveau - CP 220 - 69 336 Lyon cedex 09

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

**Compagnie Nationale du Rhône  
(CNR)**  
2, rue André Bonin  
69316 Lyon Cedex 04

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



# Fiche signalétique du document

---

*Destinataire du document* : AE-RMC, ZABR

*Cordonnées complètes* :

- Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-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* : Mars 2008

---

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)  
Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés  
Phase 2

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

*Auteurs* :

- EMSE – Centre SITE (Didier Graillot, Frédéric Paron, Roland Déchomets, Alix Germain, Marion Dufour).
- LEHF – Ecologie souterraine (Janine Gibert, Pierre Marmonier, David Ferreira, Christophe Piscart, Laurent Simon) ;
- LEHF – Ecologie végétale (Gudrun Bornette, Sara Puijalon, Céline Jezequel).
- CEMAGREF Lyon – UR Bely (Michel Lafont)

*Données hydrauliques* : en convention avec la CNR.

*Nombres d'exemplaires édités* : 15

*Diffusion* : ZABR

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

*Nombres de pages du rapport hors annexes* : 113

*Nombres d'illustrations hors annexes* : 13 figures, 17 tableaux, 27 cartes, 6 équations

*Nombre d'annexes* : 5

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



# Table des matières synthétique

---

Fiche signalétique du document.....	I
Table des matières synthétique .....	III
Préambule .....	V
Résumé phase 2 .....	VII
Introduction .....	1
<b>1. Partie I - Compléments bibliographiques sur les échanges nappes/rivière (regard international).....</b>	<b>7</b>
1.1. <i>Bilans de masses</i> .....	9
1.2. <i>Mesures de terrains et télédétection</i> .....	9
1.3. <i>Modélisation numérique</i> .....	10
1.4. <i>Conclusion</i> .....	14
<b>2. Partie II - Interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes métriques .....</b>	<b>15</b>
2.1. <i>Métrique hydrophysique</i> .....	17
2.2. <i>Métrique hydrobiologique : végétation aquatique</i> .....	47
2.3. <i>Métrique hydrobiologique : faune souterraine</i> .....	63
2.4. <i>Métrique géochimique</i> .....	69
<b>3. Partie III - Interprétation interdisciplinaire des échanges nappes/Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon .....</b>	<b>75</b>
3.1. <i>Superposition des métriques, croisement des approches et bilan sur le secteur de Brégnier-Cordon</i> .....	77
3.2. <i>Vers des préconisations en matière de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité</i> .....	83
<b>4. Partie IV - Phases ultérieures de travail .....</b>	<b>87</b>
4.1. <i>Régime transitoire, variations hydrologiques et changement climatique</i> .....	89
4.2. <i>Métrique complémentaire : Indicateurs géomorphologiques et paysagers sur les zones d'échange</i> ...	91
4.3. <i>Choix d'un site aval</i> .....	92
4.4. <i>Données complémentaires</i> .....	93
4.5. <i>Fin de la phase 2 et début de la phase 3 (2008-2009)</i> .....	95
4.6. <i>Propositions pour une phase 4 (2010)</i> .....	96
<b>Etablissements partenaires .....</b>	<b>97</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>99</b>
<b>Liste des figures, tableaux, cartes et équations .....</b>	<b>105</b>
<b>Table des matières complète .....</b>	<b>109</b>
<b>Sommaire des annexes .....</b>	<b>113</b>



## Préambule

---

Les ressources mobilisées pour l'accomplissement de cette action de recherche sont les suivantes :

- **Interlocuteur** : L. Cadilhac (AE-RMC).
- **Membres participants** : D. Graillot (ENSM-SE SITE), F. Paran (ENSM-SE SITE), R. Déchomets (ENSM-SE SITE), G. Bornette (EHF ECV Lyon 1), J. Gibert (EHF HBES Lyon 1), P. Marmonier (EHF HBES Lyon 1), C. Piscart (EHF HBES Lyon 1), L. Simon (EHF HBES Lyon 1), Y. Travi (Laboratoire d'hydrogéologie Université d'Avignon).
- **Membres associés** : M. Lafont (CEMAGRF Lyon), E. Leblois (CEMAGREF Lyon), T. Winiarsky (ENTPE Lyon), P. Lachassagne (BRGM), O. Banton (Laboratoire d'hydrogéologie Université d'Avignon), O. Radakovitch (CEREGE).
- **Données** : convention avec la CNR (E. Doutriaux, Y. Taravel). Une grande partie des données hydrauliques et hydrologiques, mobilisées pour l'étude des secteurs de Brégnier-Cordon et de Péage-de-Roussillon, a été mise à disposition de l'ENSM-SE par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). L'obtention et l'utilisation de ces données sont fixées par la convention liant l'EMSE, la CNR et l'AE-RMC.
- **Contacts** : G. Truc (SMBVL), A. Gangloff et A. Citterio (SMIRCLAID), P. Mériaudeau (Maire de Brégnier-Cordon), C. Michelot (BURGEAP), B. Muscat (SHR), M. Krimissa (EDF), V. Vergnaud (LADES), P. Chauve (Université de Besançon), C. Drogue et S. Pistre (Université de Montpellier), M. Dzikowski et J.Y. Josnin (Université de Savoie).
- **Matériel** : matériel de prélèvements et d'analyses biologiques et isotopiques, bases de données, maintenance SIG, maintenance GPS.

Les aides financières obtenues pour la réalisation de l'action de recherche proviennent de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse à hauteur de 50%.

L'action de recherche est en lien avec des travaux connexes : **Géorépertoire ZABR** (intégration des métadonnées liées au projet), **Sites étudiés dans le cadre du programme décennal** comme les îlons de Péage-de-Roussillon (G. Bornette) et le marais Chautagne (J.M. Olivier)], **Thématiques analogues de la ZAL** (un rapprochement avec J.J. Macaire de l'Université de Tours est envisagé).

Le texte de ce rapport a été rédigé principalement par : **ENSM-SE – Centre SITE** (D. Graillot, F. Paran, R. Déchomets, A. Germain, M. Dufour), **EHF HBES Lyon 1** (J. Gibert, P. Marmonier, D. Ferreira, C. Piscart, L. Simon), **EHF ECV Lyon 1** (G. Bornette, S. Puijalon, C. Jezequel). Certaines parties ont été rédigées avec la collaboration d'autres personnes (membres associés, contacts, détenteurs de données) à l'occasion d'entretiens ou de réunions de travail. Quelques travaux d'étudiants contenant des informations sur le sujet ont été exploités, tout au moins en partie : A. Schindler (AE-RMC) ; A. Germain et M. Dufour (ENSM-SE SITE).

Cette action de recherche a été valorisée par des communications et des publications :

- rapport intermédiaire phase 1 (novembre 2006), rapport final phase 1 (avril 2007) et rapport final phase 2 (mars 2008) ;
- fiches de restitution ZABR de la phase 1 (mars 2008) et de la phase 2 (juillet 2008) ;
- communications dans le cadre de la ZABR ;
- communication à la conférence internationale « Modflow and More : Ground water and public policy », Golden (USA, Colorado) (mai 2008) ;
- publication scientifique prévue courant 2008.





## Résumé phase 2

---

Le travail présenté dans ce rapport correspond à la phase 2 (2007-2008) 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) et géochimique (traceurs chimiques) ;
- 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.

Le rapport de la phase 2 de cette action de recherche propose dans une première partie un complément bibliographique international concernant les méthodes hydrophysiques appliquées sur des cours d'eau à l'étranger (ex : USA, Australie, Angleterre, Pays-Bas, Israël...), notamment les bilans de masse, les méthodes de télédétection et la modélisation numérique. Ces méthodes bien que croisées dans certains travaux ne font jamais appel à des indicateurs biologiques.

La deuxième partie expose la méthodologie et les résultats pour chacune des principales 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 spatiale sous SIG. Sur 2 secteurs, celui de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône) et celui de Péage-de-Roussillon (Rhône-Moyen), à partir de données fournies par la CNR entre autres, les apports de nappes sont évalués respectivement à  $0,55\text{m}^3/\text{s}$  et  $0,95\text{m}^3/\text{s}$ .

- 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. Un diagnostic a été réalisé à l'aide de ces organismes sur le secteur de Brégnier-Cordon.

- Sur le même secteur, un premier essai fondé sur la *métrique géochimique* a été initié. Il utilise des traceurs physico-chimiques classiques (ex : conductivité de l'eau, teneurs en nitrates et sulfates) et isotopiques (deutérium et oxygène 18).

Au final, dans une troisième partie, 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 Brégnier-Cordon. Ici, les métriques convergent dans la plupart des cas vers des résultats similaires. Le croisement des métriques permet une évaluation plus robuste des échanges en soulignant les convergences et en distinguant les divergences, divergences qu'il conviendra d'explicitier. 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.

De ces résultats découlent des préconisations en matière de gestion de l'eau et de la biodiversité concernant par exemple la régulation de la thermie de l'eau et le maintien de l'inondation des zones humides en période estivale conditionnant la biodiversité, la protection et l'intensité de prélèvement dans les captages, les potentialités de réalimentation des nappes...

La quatrième et dernière partie envisage les actions futures à conduire dans le cadre de la phase 3 (2008-2009). La question du régime transitoire est abordée sous forme de réflexion pour initier une prise en compte des variations hydrologiques saisonnières et à plus long terme dans un contexte de changement climatique. Une autre réflexion porte sur la question de l'apport des métriques complémentaires, comme des indicateurs géomorphologiques et paysagers, pour l'évaluation des échanges.

Ensuite, le choix d'un site aval est discuté (vraisemblablement le secteur de Donzère-Mondragon sur le Rhône-Aval). Puis, les données complémentaires à acquérir pour la bonne poursuite du projet de recherche sont exposées. Pour terminer, des propositions pour une phase 4, début 2010, sont présentées.



# 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 ZABR.

Ce programme de recherche est actuellement (phase 1 et phase 2) cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC). Des démarches sont en cours pour obtenir des cofinancements auprès de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) et de la région Rhône-Alpes pour la phase 3.

Ce programme correspond à une action de recherche ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône), 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 Centre SITE (Sciences, Informations et Technologies pour l'Environnement) de l'ENSM-SE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne);
- l'UMR 5023 EHF (Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux) de l'Université Lyon I, et plus spécifiquement des équipes « Hydrobiologie et Ecologie Souterraines » et « Ecologie des Communautés Végétales » ;
- le CEMAGREF Lyon ;
- le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon (pour la phase 3).

D'autres partenaires interviennent dans ce programme. Il peut s'agir de chercheurs (ENTPE, Hydrosociétés-Montpellier, Université de Savoie, BRGM), d'institutions (DIREN) 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.

Les paragraphes qui suivent présentent les finalités et les objectifs du projet et sa planification en 5 phases, prévues de 2006 à 2012 suite à la labellisation ZABR effective depuis juin 2005. Le dernier paragraphe expose de manière synthétique le contenu du présent rapport.

## 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.

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.

## 2. Phases de l'étude

Le programme a été planifié sur plusieurs années et découpé en 5 phases. La phase 1 a déjà fait l'objet d'un précédent rapport et d'une fiche de restitution. La phase 2 est l'objet de ce rapport et la phase 3 a été décrite synthétiquement dans une fiche ZABR (Annexes 1). 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, Année 3 (mars 2008-décembre 2009)** : Réalisation d'un second diagnostic qualitatif et quantitatif des échanges sur le secteur du Bas-Rhône sélectionné à la suite des propositions émanant du travail de l'année 2. La visualisation sur support cartographique SIG des résultats afin d'élaborer des critères de sectorisation amont-aval (critères hydrogéologiques, climatiques, anthropiques) sera alors possible. L'étude des échanges se fera selon 2 niveaux :

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. Un travail de modélisation à échelle locale et globale pourra être envisagé si nécessaire. Cette démarche conduira à l'élaboration d'une première ébauche de l'outil d'analyse.

- **Phase 4, Année 4 (janvier 2010- ????)** : L'outil sera testé et ajusté sur de nouveaux secteurs tests, pour au final étendre son exploitation à l'ensemble du cours d'eau. Le travail de diagnostic sera alors réalisé sur l'ensemble du Rhône. L'intégration des informations identifiées au géorépertoire ZABR indiquera les zones à fortes relations et à forts enjeux.

- **Phase 5** : l'analyse des échanges nappes/rivière se fera en focalisant la recherche sur les modalités d'échange en régime transitoire à deux échelles de temps :

. *Les variations saisonnières ont une influence sur les régimes d'écoulement du Rhône et d'alimentation des nappes.* Les échanges identifiés en début de programme n'en tiennent pas compte. Ces échanges ont été évalués dans une première étape à partir de données moyennées. Il s'agit donc d'étudier plus précisément les variations saisonnières des échanges à l'échelle de plusieurs années : c'est la première échelle de temps.

. *La seconde échelle de temps concernerait les scénarios de modifications climatiques qui ont été identifiés jusqu'à présent sur le Rhône compte-tenu des incertitudes liées à ces scénarios.* Des impacts sont possibles sur les réserves d'eau souterraine et leur échange avec le Rhône. Les modifications thermiques résultantes peuvent déjà avoir des répercussions sur la gestion des centrales nucléaires, par exemple, qui nécessiteront davantage d'eau froide surtout à l'étiage. Les eaux souterraines sténothermes pourraient donc avoir un rôle à jouer. Il faudrait en estimer l'importance potentielle. Par ailleurs, les indicateurs biologiques permettant de valider ou de confirmer les échanges pourraient s'en trouver modifiés. Il est cependant encore prématuré de traiter ce problème compte tenu du degré d'avancement du projet.

## 2.1. 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.

De plus, l'étude du secteur test présélectionné (Brégnier-Cordon) a été initiée :

- du point de vue **hydrogéologique**, sur le secteur de Brégnier-Cordon, les sites étudiés montrent des apports souterrains, relativement limités, compris entre 10 et 100 l/s par km de rive étudiée, vers le Rhône et les contre-canaux, là où ils existent. Ces apports représentent un total moyen d'environ 340 l/s pour 7,5km, rives droite et gauche confondues. En termes de fonctionnement du milieu, ceci signifie que les aquifères étudiés ont un rôle mineur vis à vis de leur contribution au débit du Rhône, même à l'étiage. Ici, l'intérêt des alluvions du fleuve est de permettre le prélèvement de volumes importants, bien supérieurs aux apports latéraux des nappes, par réalimentation induite depuis le fleuve. De plus, l'étude des aménagements, notamment les contre-canaux, a montré que plus à l'aval dans le contre-canal de Rossillon (en rive gauche), les apports phréatiques qui rejoindront le Rhône sont plus importants et ont été évalués à 660 l/s/km.

- le travail portant sur les **métriques biologiques**, sur le secteur de Brégnier-Cordon, aboutit à une première sectorisation de la plaine en termes d'influence phréatique, qui est mise en correspondance avec les résultats fournis par l'étude hydrogéologique, et qui tend à démontrer 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. Ce premier travail est précisé dans le présent rapport.

## 2.2. 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 doit conduire à :

- la schématisation des configurations hydrogéologique sur le Rhône-Moyen et le Bas-Rhône ;
- la collecte de données complémentaires ;
- 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 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 (Mississippi, Danube, Columbia river, river Murray, Snake river).

Dans les actions qui restent à mener sur la phase 2, le bilan des données disponibles et des données complémentaires à acquérir est effectué ; ce qui conditionnera aussi le travail de la phase 3.

En ce qui concerne les rendus, 1 comité de suivi plénier et des comités de suivi techniques ont eu lieu.

## 3. Organisation du rapport

Le présent rapport est divisé en 4 grandes parties.

La **première partie** intègre des compléments bibliographiques internationaux sur la question des échanges nappes/rivière du point de vue de la métrique hydraulique. Ces compléments concernent les méthodes de bilans de masse, les mesures de terrain et de télédétection, et la modélisation numérique.

La **seconde partie** propose une interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes métriques utilisées, essentiellement pour le secteur de Brégnier-Cordon.

Pour la métrique hydrophysique sont présentés :

- le complément des schématisations hydrogéologiques étendues à l'ensemble du cours du fleuve Rhône, ainsi que des propositions d'amélioration de ce travail ;
- des résultats complémentaires sur le secteur de Brégnier-Cordon selon les méthodes de l'hydrogéologie quantitative (Loi de Darcy) ;
- les premiers résultats sur la chute de Péage-de-Roussillon selon les mêmes méthodes ;
- les premiers pas d'un travail d'identification et de quantification des échanges nappes/Rhône à l'aide des techniques d'analyse spatiale sous SIG testé sur les secteurs de Brégnier-Cordon et de Péage-de-Roussillon ;
- un bilan des études, méthodes et de l'ensemble des résultats.

Pour la métrique hydrobiologique sont présentés les résultats issus de l'échantillonnage des macrophytes et des invertébrés sur le secteur de Brégnier-Cordon pour l'identification et la quantification des échanges nappes/Rhône.

Pour la métrique géochimique sont présentés de courts compléments bibliographiques sur les méthodes d'identification et de quantification des échanges à partir d'analyses physico-chimiques et isotopiques de l'eau. Cet aspect théorique est illustré par 2 exemples tirés du secteur de Brégnier-Cordon impliquant d'une part des variables physico-chimiques (conductivité de l'eau, teneurs en nitrates et sulfates) et isotopiques (deutérium et oxygène 18).

La **troisième partie** expose un essai d'interprétation interdisciplinaire des résultats des différentes métriques pour l'identification et la quantification des échanges nappes/Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon. Ce travail est fondé sur une analyse croisée des différentes approches. En guise de conclusion, cette partie propose un bilan de la phase 2 de cette action de recherche, ainsi que des préconisations en matière de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité.

La **quatrième partie** envisage de manière plus précise les phases ultérieures de travail concernant :

- la question du régime transitoire et des variations hydrologiques ;
- l'utilisation de métriques complémentaires comme des indicateurs géomorphologiques et paysagers ;
- le choix d'un site aval pour la phase 3 ;
- le développement de la base de données SIG et du tableau des métriques ;
- l'acquisition de données complémentaires ;
- les propositions pour une phase 4.

A terme, cette action de recherche devrait permettre la construction d'un outil pour la mise en place d'une modélisation des échanges nappes/eau superficielle pour une préservation de la ressource en eau et de la biodiversité du bassin du Rhône (Plan Rhône, DCE) tenant compte de l'influence des modifications climatiques et hydrologiques sur les échanges nappes/Rhône.





## **1. Partie I - Compléments bibliographiques sur les échanges nappes/rivière (regard international)**

---

La bibliographie internationale réalisée sur la thématique des interactions nappes/rivière révèle 3 grands groupes de méthodes pour évaluer les échanges eaux superficielles / eaux souterraines :

- celles fondées sur des bilans de masses d'eau et/ou de concentrations de traceurs environnementaux (isotopes, ions) ;
- celles mettant en œuvre des mesures effectuées sur le terrain ou par télédétection (satellite) ;
- celles mobilisant des modèles numériques (différences finies, éléments finis, éléments analytiques).



## 1.1. Bilans de masses

Les méthodes bilans listées lors de ce travail (Tableaux 1 et 2 en Annexe 2) sont utilisées pour analyser les interactions nappes/rivière dans différents pays, Etats-Unis (Bishop Creek, rivière Colombia, rivière Truckee, rivière Snake), Suisse (fleuve Rhône) et Israël (fleuve Jourdain), à différentes échelles (bassins versants, vallées, plaines alluviales) et pour différents types d'aquifères (alluvions, dépôts glaciaires, dépôts lacustres, formations pliocènes, cônes de déjections alluviaux, basaltes). Les systèmes étudiés sont tous modifiés par des activités anthropiques : barrages, production hydroélectrique, pompages (AEP, irrigation, pisciculture), dérivations, digues, STEP...

Le bilan peut être uniquement de type hydrologique, comme dans le travail de Hortness & Vidmar (2004). Dans ce cas, le bilan est fait à partir d'une équation de conservation de masse avec des chroniques de données de débit de rivière et de niveaux d'eau souterraine. Il est ainsi possible d'estimer les quantités d'eau échangées par la nappe et la rivière, à court comme à long terme pour réaliser des comparaisons saisonnières.

Le bilan peut aussi être de type isotopique (Space & al., 1991 ; McCarthy & al., 1992 ; McKenna, 1991), géochimique (Holtzman & al., 2005) ou isotopique/géochimique (Fette & al., 2005). Dans tous les cas, la méthode est fondée sur la recherche de différences de valeurs significatives des traceurs environnementaux dans les objets hydrologiques étudiés (rivières, nappes, lacs...). Les ratios isotopiques mobilisent ici l'oxygène 18 et le deutérium. Ils permettent de déterminer :

- les altitudes de recharges ;
- les secteurs de recharge et décharge et leur variation quantitative dans le temps ;

Les bilans géochimiques quant à eux mobilisent des ions comme les sulfates, les chlorures, le sodium, le calcium... Les différences significatives de concentrations en ions dans les objets hydrologiques permettent de déterminer :

- les différentes sources d'alimentation souterraine ;
- leur variation quantitative dans le temps.

Dans la plupart des cas, les travaux reposent sur un croisement des différents bilans sur un même secteur (Space & al., 1991 ; McKenna & al., 1991 ; Fette & al., 2005 ; Holtzman, 2005). Il est aussi possible de déterminer les réserves de ressources en eau en croisant bilan isotopique et débit (McKenna & al., 1991).

## 1.2. Mesures de terrains et télédétection

Les méthodes fondées sur l'analyse de données de terrain et de télédétection sont issues de publications (Tableau 3 en Annexe 2) portant sur des rivières canadiennes (Big Creek, Big Otter Creek), américaines (Sheep Creek, un affluent du Reynolds Creek) et australiennes (rivière Murray). Le terrain d'étude est comme précédemment d'échelle variable (plaines alluviales, montagnes, vallées), avec différents types d'aquifères (alluvions, basaltes, dépôts glaciaires) et des influences anthropiques (pompages pour AEP et irrigation, changements dans l'occupation des sols par urbanisation, dérivations).

La première étude (Lamontagne & al., 2002) combine l'utilisation de traceurs environnementaux (chlorures, Oxygène 18, Deutérium) et de concentrations en nutriments (ammonium, nitrates) et repose sur la détection de compositions significativement différentes entre eaux souterraines et eaux superficielles. Cette méthode permet de déterminer l'origine et le sens d'écoulement des eaux souterraines, ainsi que les variations saisonnières.

Les 2 études suivantes utilisent des données hydrologiques et physiques. La première (Carey, 2003) détermine le sens des échanges entre eaux souterraines et eaux superficielles en comparant les variations de niveaux d'eau dans la rivière et la nappe, et en s'appuyant sur les variations de température et de conductivité de l'eau. La seconde (Flerchinger, 1992) évalue le temps de réponse de la piézométrie et de la rivière à la fonte des neiges par analyse de corrélation.

La dernière étude (Bobba, 1992) est fondée sur l'analyse de données du satellite LANDSAT. Les eaux souterraines en recharge/décharge/transition ayant des valeurs de rayonnement différentes sur les bandes 7 et 5 de LANDSAT selon la profondeur des eaux souterraines et selon la végétation, il est possible d'étudier les relations nappes/rivière depuis l'espace. La résolution des images LANDSAT est suffisante pour distinguer la forme des parcelles agricoles et des grandes formations géologiques et appréhender l'usage des sols. Il n'est toutefois pas possible de distinguer les maisons individuelles ou de petits objets comme des puits.

### **1.3. Modélisation numérique**

Des méthodes fondées sur les modèles numériques ont été mises en œuvre sur des rivières et des aquifères du monde entier : Slovaquie (Danube), Angleterre (Tamise), Pays-Bas (rivières Vecht et Eem), Etats-Unis (rivière Colombia, Mississipi, rivières Loosahatchie affluent du Mississipi, rivière Savannah, Allequash Creek, Colorado), Australie (rivière Campaspe). Ces modèles numériques sont appliqués à différentes échelles (plaines alluviales, plateaux, vallées, baies, deltas), sur différents types d'aquifères (calcaires, socles, alluvions, fluviaux-glaciaire) libres, captifs, mono-couche ou multi-couches. La plupart des simulations résultantes doivent tenir compte des influences anthropiques (hydroélectricité, réalimentation de nappe, pompages, barrages, dérivations, canaux, déchets nucléaires).

La littérature étudiée (Tableaux 4, 5, 6 et 7 en Annexe 2) montre différents types de modèle 1D, 2D ou 3D en régime permanent ou transitoire. En règle générale, les modélisations sont fondées sur l'équation de continuité, l'équation de diffusivité et la loi de Darcy. Les méthodes de résolution (solutions approchées) peuvent être de type numérique (éléments finis, différences finies) ou analytique (éléments analytiques). Les conditions limites, données d'entrée, de calibrage et de validation sont issues selon le cas de mesures de terrain, de sources bibliographiques ou de résultats de modèles. Ces données sont de types divers : géologique, hydrogéologique (perméabilités), hydrologique (niveaux d'eau, débit), hydraulique (niveaux de nappe, piézométrie de référence), géochimique (oxygène-18, ions chlorure)...

#### *1.3.1. Méthode des différences finies (Finite difference method : FDM)*

Il existe plusieurs logiciels prenant en charge cette méthode. Parmi ceux rencontrés, on peut signaler FLOWNET, MODFLOW ou SECOFLOW\_3D. Certains de ces travaux sont fondés sur des modèles 2D en régime permanent (Schot & al., 1991), d'autres sur des modèles 2D impliquant des volumes et utilisant les résultats de modèles en régime permanent comme conditions limites de modèles en régime transitoire (Peterson R. E. & al., 2001), d'autres encore sur des modèles 3D en régime permanent (Jones 2005 ; Urbano & al., 2006). Ces modèles permettent, selon le cas, de simuler l'impact de pompages sur le niveau d'un aquifère, les effets du niveau (ou débit) d'une rivière ou d'un lac sur les écoulements souterrains, les échanges nappes/rivière et les échanges entre aquifères (ex : relations entre un aquifère alluvial libre et un autre aquifère captif).

Pour terminer sur les différences finies, il est intéressant de signaler l'existence d'un modèle numérique historique interdisciplinaire permettant l'analyse du fonctionnement d'un système aquifère et de réaliser des prédictions (Rushton & al., 1992). Dans ce cas, MODFLOW, qui modélise les écoulements souterrains est combiné avec des équations d'infiltration dans le sol, des équations d'écoulement souterrain reliées au niveau piézométrique et au niveau de la rivière ou des équations de stockage reliées au niveau piézométrique.

#### *1.3.2. Méthode des éléments finis (Finite element method : FEM)*

Cette méthode respecte mieux les différentes structures géométriques des objets hydrologiques. Elle peut être utilisée seule, comme dans les travaux de Balázová & al. (2002) fondés sur le logiciel ANSYS, pour simuler par exemple l'impact de pompages sur le niveau d'un aquifère selon plusieurs scénarios. Elle peut aussi être utilisée en combinaison avec un modèle hydrologique (Chiew & al. (1992) par modéliser la recharge d'un aquifère (Modèle hydrologique Monash Rainfall et modèle semi-3D aux éléments finis AQUIFEM-N).

### 1.3.3. Méthode des éléments analytiques (Analytic element method : AEM)

Cette méthode est utilisée pour modéliser des aquifères de grandes tailles. Les travaux recensés sont issus de laboratoires de recherche aux Pays-Bas et aux Etats-Unis. Parmi les modèles utilisés on peut citer NAGROM (modèle national d'écoulement souterrain hollandais) et GFLOW. Ils sont souvent fondés sur l'hypothèse de Dupuit–Forchheimer ou la loi de Darcy et la condition limite de Cauchy qui décrit les interactions entre eaux souterraines et superficielles. D'autres utilisent des conditions limites non-homogènes modélisées, des « line doublets ».

La condition limite de Cauchy décrit les interactions entre les eaux souterraines (gw) et les eaux superficielles (sw). La formule suivante (Équation 1.) permet de calculer un débit (Q) avec un niveau d'eau superficielle (Hsw), un niveau d'eau souterraine (Hgw) et la résistance au drainage (C) :

$$Q = \frac{(H_{sw} - H_{gw})}{C}$$

Équation 1 : Formule de la condition limite de Cauchy

Dans le cas d'une rivière unique (surface en eau superficielle unique), la formule prend en compte le niveau supérieur de l'aquifère. Dans le cas de plusieurs surfaces en eau superficielle la formule prend en compte le niveau de l'aquifère régional inférieur (captif). Dans ce cas (Figure 1.), le flux de l'aquifère est inclus dans les conditions limites (De Lange, 1999). De Lange (1999) développe une approche pour intégrer toutes les surfaces d'eau en prenant en compte toutes les couches au-dessus de l'aquifère régional comme conditions limites et notamment les surfaces en eaux superficielles, les aquifères phréatiques, les aquitards (l'ensemble est appelé : "top system").

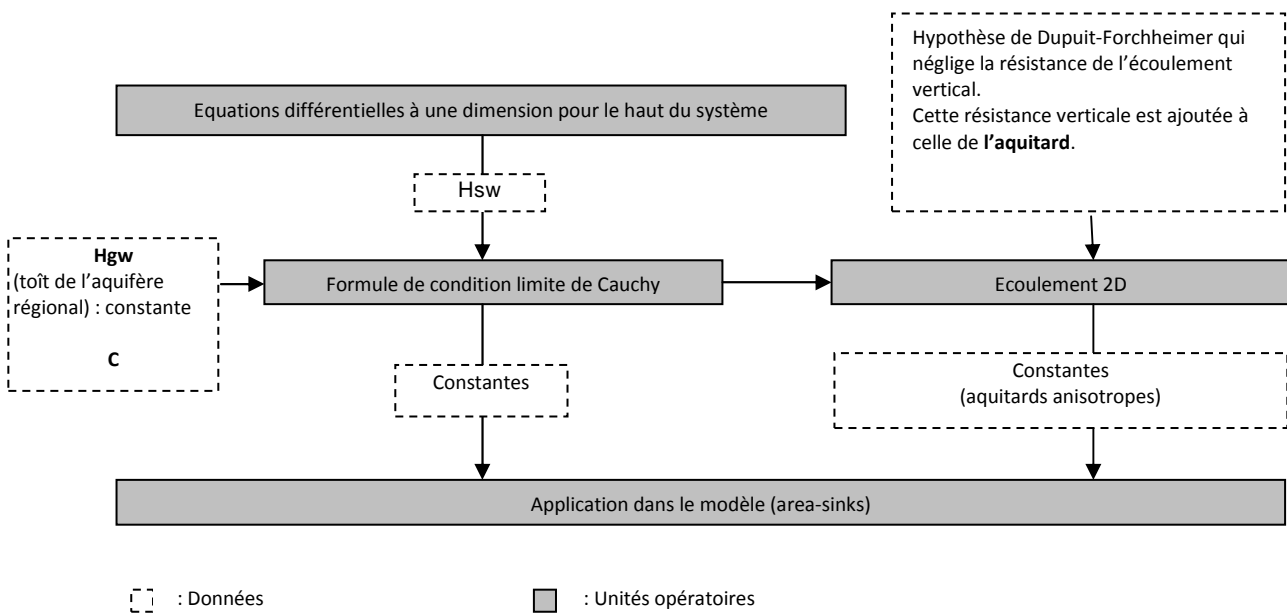


Figure 1 : Structure pour l'application de la condition limite de Cauchy à des surfaces d'eau en relation (d'après de Lange, 1999)

La condition limite de Cauchy pour des surfaces en eau en relation peut être utilisée pour des simulations prenant en compte la zone saturée et la zone non-saturée des aquifères (de Lange, 1999).

Cette approche (Figure 2. ; Figure 3.) est fondée sur deux systèmes d'écoulement incluant les interactions entre eaux de surfaces et eaux superficielles, interactions décrites par la même condition limite de Cauchy, et sur la continuité entre les deux systèmes d'écoulement (bilan hydraulique). Une telle approche nécessite de gérer les changements d'échelles au niveau des paramètres.

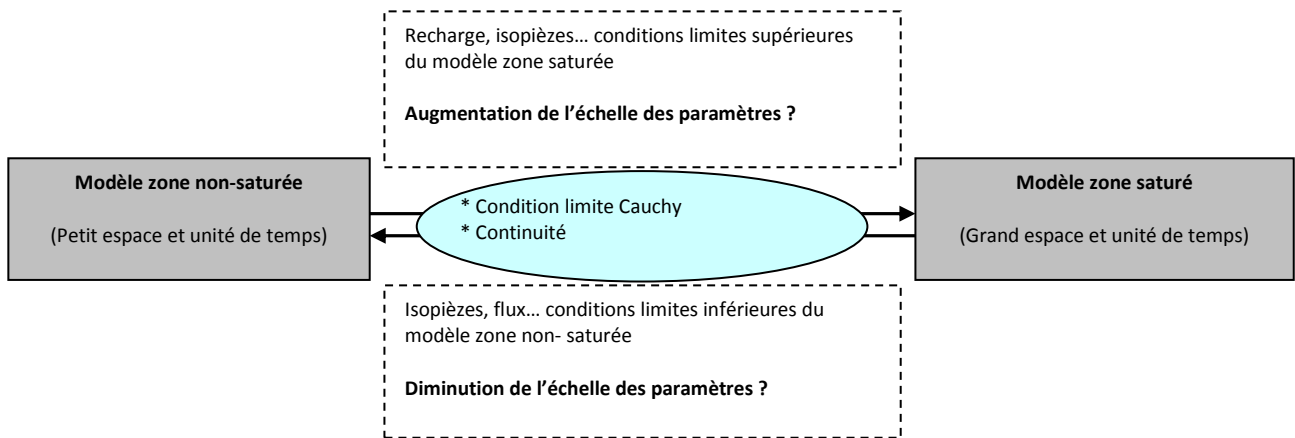


Figure 2 : Diminution/augmentation d'échelle des paramètres de la zone saturée et la zone non-saturée (d'après de Lange, 1999)

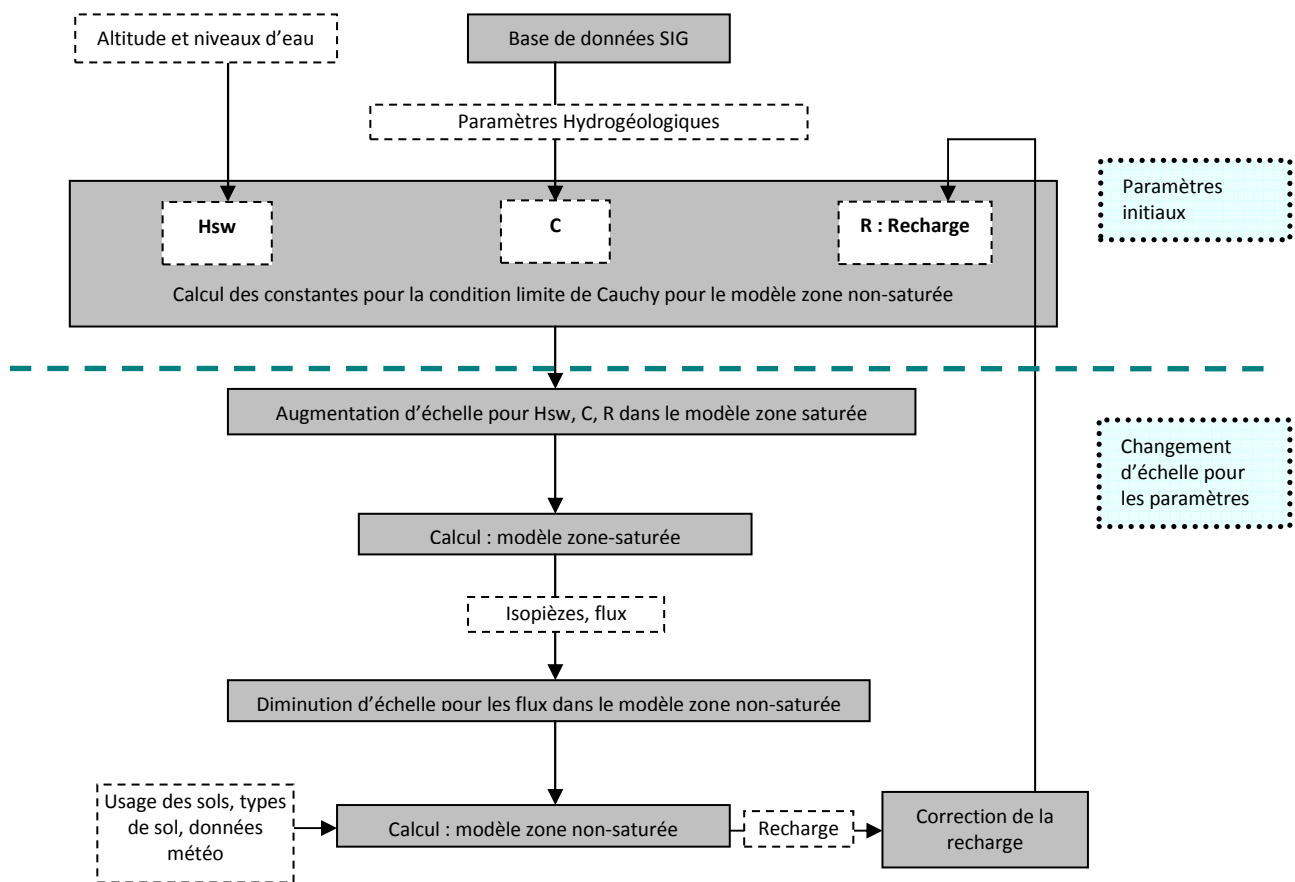


Figure 3 : Méthode de changement d'échelle entre modèles zone saturée et zone non-saturée (d'après de Lange, 1999)

Certaines modélisations sont donc réalisées uniquement à partir de la méthode AEM. Il est ainsi possible de modéliser les interactions nappes/rivière pour des aquifères anisotropes régionaux (de Lange 1999), dans une optique multi-échelles (de Lange, 1996) ou multi-objectifs (Tolika & Paleologos, 2004). Les modèles fondés sur la méthode AEM intègrent souvent des conditions limites globales et locales. Bakker & al. (1999), par exemple, ont pu modéliser un aquifère épais en une seule couche. La méthode MLAEM (Multi layer analytic element model), quant à elle, permet de travailler avec des modèles multi-couches. Par exemple, Moorman (1999) modélise en régime permanent l'influence de bassins de rétention et de rivières sur les écoulements souterrains.

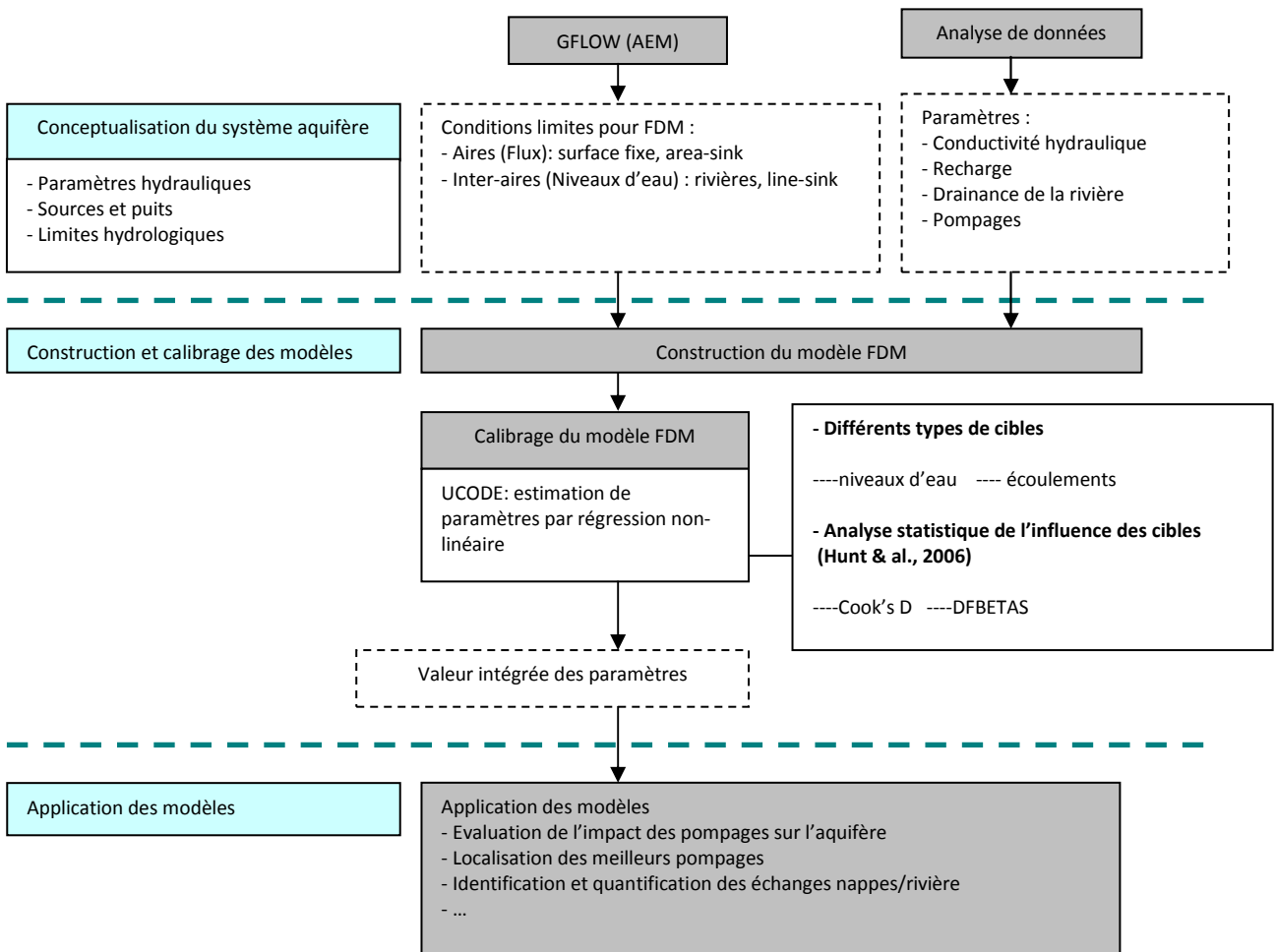


Figure 4 : Couplage FDM et AEM (d'après Hunt & al., 2003)

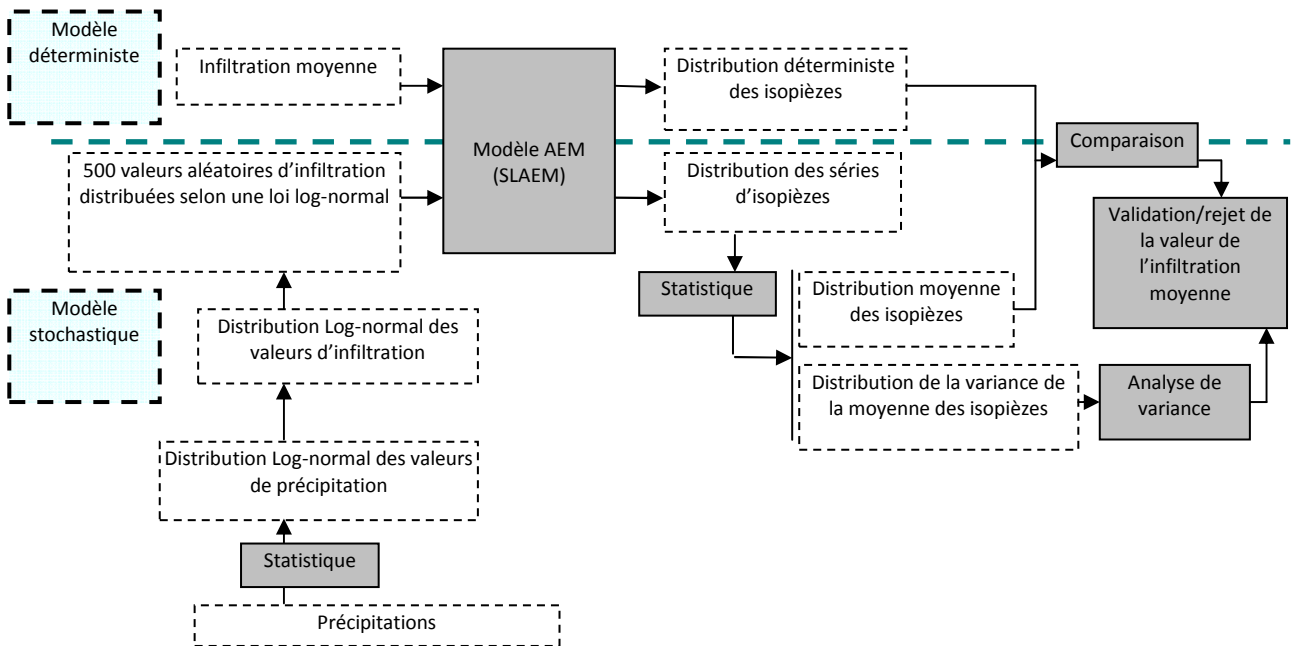


Figure 5 : Analyse stochastique de l'infiltration appliquée à l'AEM (d'après Paleologos & al., 2005)

D'autres modélisations utilisent différents modèles de manière combinée. Vermulst & de Lange (1999) ont effectué une simulation combinée des zones saturées et non-saturées à différentes échelles fondées respectivement sur le modèle MOZART (1D, vertical, zone non-saturée) et le modèle NAGROM (régime permanent, semi-3D, zone saturée) en s'appuyant sur une base de données SIG. Paleologos & al. (2005), quant à eux, ont intégré des concepts stochastiques (modèle statistique pour les précipitations) dans la méthode AEM pour évaluer l'applicabilité à des études globales, régionales ou locales sur l'influence des changements climatiques (influences des précipitations, infiltrations, fuites sur les écoulements souterrains) (Figure 5.).

D'autres encore utilisent la méthode AEM (modèle GFLOW) (Wilsnack & al., 2005) pour obtenir les conditions limites d'une modélisation aux différences finies (modèle MODFLOW) (Figure 4.). En effet, la modélisation AEM permet de simplifier les limites, d'effectuer des tests rapides mais non détaillés. Le calibrage peut être automatisé (Hunt & al., 2006 ; Simpkins, 2006 ; Dripps & al., 2002) par la méthode UCODE (estimation par régression non-linéaire de paramètres). Les simulations peuvent concerner les écoulements souterrains, l'interaction eau souterraine / eau superficielle (quantification de l'alimentation et du drainage) ou l'évaluation des effets d'un programme de gestion des eaux.

## **1.4. Conclusion**

Cet examen bibliographique au niveau international est réalisé pour une période allant de 1990 à 2005. Il ne montre pas de publications spécifiques à l'expérimentation de méthodes associant la biologie (végétale et/ou invertébrés souterrains) à l'analyse hydrogéologique. L'évaluation des échanges nappes/rivière est abordée soit par des méthodes de bilans de masses et d'analyses géochimiques, soit par des techniques de photo-interprétation, soit à l'aide d'outils de modélisation. Le référencement d'expériences menées à l'étranger dans ce domaine sera toutefois complété par les données issues de la conférence internationale MODFLOW organisée en mai 2008 à Golden (Colorado EU). La démarche engagée par la ZABR pour l'Agence de l'eau RMC y sera présentée dans le cadre de la session « Model Application for Decision Making ».

Cette conférence internationale dont la thématique principale est orientée vers l'application des outils de modélisation pour l'évaluation de politiques de gestion de la ressource est un moment privilégié pour faire le point sur cette question au niveau international.



## **2. Partie II - Interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes métriques**

---

Cette partie présente les études réalisées indépendamment pour chacune des différentes métriques, notamment hydrophysique et hydrobiologique, en vue d'identifier et de quantifier les échanges nappes/Rhône. De plus, sont présentés les premiers résultats de la métrique géochimique et une réflexion sur l'apport de données et de métriques complémentaires (géophysique, géomorphologie). Les résultats seront ensuite croisés et interprétés dans la partie 3 de ce rapport.



## 2.1. Métrique hydrophysique

Pour la métrique hydrophysique sont présentés :

- l'état d'avancement du découpage de la vallée du Rhône en fonction des configurations hydrogéologiques, étendu au Moyen-Rhône et au Bas-Rhône, ainsi que les améliorations à apporter à ce travail ;

- l'identification et la quantification des échanges sur le secteur témoin de Brégnier-Cordon (compléments) et de Péage-de-Roussillon (exploitation d'un modèle), ainsi qu'une présentation préliminaire du secteur de Donzère-Mondragon ;

- la méthode d'identification et de quantification des échanges fondée sur l'analyse spatiale sous SIG pour une partie des aquifères de Brégnier-Cordon et de Péage-de-Roussillon ;

- un bilan des résultats et méthodes de la dimension hydrophysique.

### 2.1.1. Configurations hydrogéologiques pour l'analyse des échanges entre le Rhône et ses nappes d'accompagnement : compléments pour le Rhône-moyen et le Rhône-aval.

Dans le rapport phase 1, afin d'identifier les structures géologiques et sédimentaires qui sont le siège d'échanges potentiels avec la nappe alluviale ou le Rhône, nous avons présenté sous la forme de coupes schématiques perpendiculaires au fleuve et à sa vallée, les différentes situations géologiques et hydrogéologiques pouvant exister le long du cours d'eau. Rappelons que ces coupes schématiques n'ont pas vocation à se substituer à des interprétations détaillées de nature géologique, hydrogéologique ou géomorphologique du terrain. Il s'agit simplement de schémas visant à faciliter la visualisation des différentes configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges nappes/rivière en tenant compte des aménagements (quais, contre-canaux, digues, dérivations...). Ces schématisations seront précisées ultérieurement au fur et à mesure de l'étude plus fine des différentes chutes CNR.

#### 2.1.1.1. Sectorisation et codification des configurations hydrogéologiques : rappels et compléments par rapport à la phase 1

Au total, 7 unités d'aménagement CNR (chutes), ici listées de l'amont vers l'aval, ont été traitées sur le Haut-Rhône français (Rapport et Annexes 9, Phase 1) :

- frontière Suisse / barrage de Seyssel ;
- secteur de Chautagne ;
- secteur de Belley ;
- secteur de Brégnier-Cordon ;
- Pont d'Evieu / Sault-Brenaz (Port Lagnieu) ;
- Port Lagnieu / Pont de Jons ;
- Pont de Jons / confluence Rhône-Saône.

Ce travail a été complété pour les chutes CNR situées sur le Rhône-Moyen et le Rhône-Aval, y compris le delta. Au total ce sont 15 secteurs supplémentaires, listés ci-après de l'amont vers l'aval, qui ont été renseignés :

- secteur de Pierre-Bénite ;
- secteur de Vaugris ;
- secteur de Péage-de-Roussillon ;
- secteur de Saint-Vallier ;
- secteur de Bourg-Lès-Valence ;
- secteur de Beauchastel ;
- secteur de Baix-Logis-Neuf ;
- secteur de Montélimar ;
- secteur de Donzère-Mondragon ;
- secteur de Caderousse ;
- secteur d'Avignon ;
- secteur de Vallabrègues ;
- delta (secteur de pallier d'Arles 1, 2 et 3).

Rappelons que ce découpage du fleuve Rhône a nécessité la création d'un code permettant de répertorier et de clarifier les différentes configurations. De plus compte-tenu du grand nombre de formations géologiques rencontrées, il s'est avéré nécessaire de simplifier cette codification en 6 catégories de matériaux parentaux principaux (Tableau 1). Le Tableau 2 rappelle le principe de codification des configurations hydrogéologiques.

Matériaux parentaux	Code
Dépôts alluvions ou glaciaires (ou colluvions)	all
Marnes et roches argileuses	arg
Formations limoneuses	lim
Roches carbonatées (calcaires et dolomies)	cal
Roches sableuses et formations détritiques	sab
Socles cristallins et cristallophylliens	cri

Tableau 1 : Classes de matériaux parentaux et codification

Caractéristiques		Code		
Rive	rive gauche	rg		
	rive droite	rd		
Rhône	Rhône vif	1		
	Rhône endigué ou influencé par un aménagement	2		
	Rhône court-circuité	3		
	canal de dérivation	4		
Digue (ou quai)	présence	dp		
	absence	da		
Contre- canal	présence	ccp		
	absence	cca		
Aquifère de première zone (en contact avec le Rhône) majoritairement de type alluvial			α	
Aquifère de deuxième zone (en contact avec l'aquifère de 1ère zone)			β	
Types de formations	<b>Légende</b>	<b>Classes</b>	<b>Perméabilités approximatives K en m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Légende</b>
	alluvions récentes	all	~10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-3</sup>	1
	alluvions et limons	all-lim	~10 <sup>-3</sup>	2
	alluvions anciennes	all	~10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-4</sup>	3
	loëss et limons	lim	~10 <sup>-4</sup>	4
	fluvio-glaciaires	all	~10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-3</sup>	5
	formations calcaires ou alluvions (indéterminées)	cal-all	/	6
	calcaires compacts	cal	selon fissuration	7
	calcaires karstifiés (jurassique moyen et supérieur, et crétacé à faciès urgoniens)	cal	K non pertinent	8
	calcaires et marnes jurassiques	cal-arg	/ alternance importante	10
	formations marno-calcaire et gréseuse	arg-cal	~10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-5</sup>	11
	molasses miocènes	sab	~10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-6</sup>	12
	moraines argileuses à caillouteuses	arg-sab	~10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-6</sup>	14
	moraines	sab-arg	~10 <sup>-4</sup>	15
	micaschistes	cri	~10 <sup>-7</sup> à 10 <sup>-10</sup>	16
	gneiss, granites, migmatites	cri	~10 <sup>-5</sup> (fissuré) à 10 <sup>-10</sup>	17
	Longueur de la zone	longue (> 1 km)	a	
courte (<1km) ou rétrécissement - élargissement		b		

Tableau 2 : Principe de codification des configurations hydrogéologiques

### 2.1.1.2. Rappel des objectifs et premiers résultats à l'échelle du fleuve Rhône

Le découpage du Rhône en configurations hydrogéologiques sera utile à 2 niveaux :

- 1) identification et hiérarchisation des secteurs aquifères présents sur le cours du fleuve Rhône ;
- 2) vérification de la cohérence locale des échanges calculés pour chaque type de configuration ;

3) vérification de la cohérence globale entre les secteurs où les échanges sont les plus importants et les configurations hydrogéologiques concernées. Ce second niveau de cohérence ne pourra être établi qu'après examen et traitement de plusieurs chutes.

Une vision synthétique de l'ensemble des différentes configurations hydrogéologiques distinguées le long du Rhône français est proposée sous forme de tableau en Annexe 3.

L'ensemble de ce travail de découpage a été saisi sous SIG afin de permettre une représentation cartographique, ou spatialisation, des différentes configurations hydrogéologiques rencontrées sur le fleuve Rhône ; ceci, aussi bien pour les aquifères de première que de seconde zone.

### 2.1.1.3. Développement et perspectives d'améliorations des configurations hydrogéologiques

Ce premier travail d'ordre général donne un aperçu complet des configurations hydrogéologiques qui conditionnent les échanges nappes/Rhône. Il convient désormais de le compléter pour le rendre opérant dans l'interprétation des échanges.

L'amélioration des configurations recouvre 3 aspects :

1. **Affiner la codification**, au besoin et sans trop la compliquer, pour qu'elle décrive au mieux la réalité de terrain.

2. **Compléter et améliorer les schématisations** afin qu'elles représentent au mieux les conditions d'échange en dépassant l'interprétation purement géologique pour une interprétation plus hydrogéologique.

Ces deux premiers aspects doivent conduire à :

- mieux discriminer les formations aquifères des formations non-aquifères. En effet, toutes les formations dans lesquelles s'inscrivent les alluvions du Rhône ne sont pas aquifères, notamment pour les aquifères de seconde zone. Il convient donc de déterminer si ces formations de seconde zone contribuent ou non à l'alimentation directe de la nappe alluviale (aquifère de première zone). Il s'avère nécessaire pour certaines portions du cours du Rhône d'augmenter le nombre de classes de matériaux parentaux certains regroupements actuels pouvant masquer des caractéristiques hydrogéologiques bien différenciés entre certaines formations au potentiel aquifère, et d'autres non-aquifères (ex : CAL, SAB, LIM). Par exemple, le faciès CAL regroupe à la fois des calcaires francs karstifiés présentant des écoulements souterrains de type karstique et des formations marno-calcaires pour lesquelles les écoulements sont majoritairement superficiels (ruissellement). Il conviendra aussi de mieux considérer les apports potentiels en provenance des bassins molassiques (inclus actuellement dans le faciès SAB) qui ont un rôle important dans l'hydrogéologie de toute la vallée du Rhône. Pour finir, le faciès LIM ne représente que la tranche de terrains les plus superficiels, il conviendra donc de s'intéresser aux formations sous-jacentes.

- mieux intégrer les particularités géologiques et hydrogéologiques au niveau de la schématisation des configurations. Ce travail sera réalisé, par exemple, à partir de coupes d'interprétation géologique pour préciser : la profondeur des 2 zones d'aquifères, leur positionnement relatif par rapport au Rhône et certains cas particuliers (ex : cônes de déjection alluviaux ou fluvi-glaciaires, grandes fractures ayant un rôle hydrogéologique (seuils), discordances...). Il faudra aussi tenir compte de la présence ou non des formations argilo marneuses pliocènes comme substratum aux alluvions actuelles (paléo ria du Rhône à l'aval de Givors) en raison de leur rôle limitant les arrivées d'eau en provenance des aquifères encaissants. La question des apports potentiels à la nappe par perte des petits cours d'eau affluent (ex : au pied des petits talwegs en domaine cristallin) devra aussi être intégrée.

3. **Insertion des configurations dans la base de données SIG en cours de construction.** Ce travail passe par l'adaptation de la codification aux normes des tables attributaires des bases de données SIG et par leur intégration cohérente dans le système de gestion de base de données.

Ces 3 tâches seront réalisées au fur et mesure de la progression de l'étude des échanges nappes/Rhône sur les différentes chutes CNR.

De plus, la superposition des configurations hydrogéologiques avec les cartes représentant les échanges nappes/Rhône permettra de vérifier la cohérence locale et globale concernant l'intensité et le sens des échanges en fonction des configurations.

### 2.1.2. Identification et quantification des échanges fondés sur les méthodes quantitatives et la modélisation

Dans cette partie de l'étude, pour plusieurs raisons les débits sont exprimés en m<sup>3</sup>/jour pour une section de 1m<sup>2</sup> et une perméabilité de 10<sup>-3</sup>m/s. En effet, le m<sup>3</sup>/jour est une unité plus facilement manipulable que le m<sup>3</sup>/s car impliquant moins de décimales. De plus, compte-tenu des incertitudes liées à la surface de la section utile pour l'échange, il paraît plus raisonnable dans un premier temps de travailler avec des débits obtenus pour des sections unitaires (1m<sup>2</sup>) et une perméabilité uniforme qui reflètent la valeur du gradient de nappe. La valeur 10<sup>-3</sup>m/s a été sélectionnée car il s'agit d'une valeur compatible avec les aquifères que nous étudions. De plus, pour les 2 secteurs étudiés dans cette partie, Brégnier-Cordon et Péage-de-Roussillon il s'agit d'une valeur pertinente au regard des sources consultées (Rampnoux, 1990 ; BURGEAP, 2007a et 2007b).

Aussi, les résultats issus des méthodes quantitatives et ceux issus des méthodes d'analyse spatiale (paragraphe 2.1.3), en cours d'élaboration, seront plus aisément comparables. Les résultats pourront être aisément affinés si l'on obtient des données plus précises concernant les champs de perméabilités et les surfaces utiles d'échanges. En effet, les tables attributaires des bases de données SIG sont construites avec des champs contenant des informations de nature semblable et homogène. Pour appliquer la Loi de Darcy, sous SIG, il est donc nécessaire d'avoir pour chaque segment de berge :

- un champ pour le gradient de nappe (exprimé en %) ;
- un champ pour la perméabilité (exprimée en m/s) ;
- un champ pour la longueur du segment (exprimée en m) ;
- un champ pour l'épaisseur utile (exprimée en m).

Le débit peut donc être calculé, à partir des données disponibles ou non, en effectuant des opérations sur ces champs. Ce débit peut être obtenu dans différentes unités, pour chaque segment, ou pour l'ensemble du linéaire considéré.

#### 2.1.2.1. Brégnier-Cordon : compléments sur le secteur témoin

Au préalable, il est nécessaire de rappeler que la quantification du débit d'échange entre le Rhône et ses nappes a été calculée avec la Loi de Darcy qui s'exprime de la façon suivante (Équation 2) :

$$q = K.A.i$$

*Équation 2 : Calcul du débit d'échange selon la Loi de Darcy avec la perméabilité de l'aquifère*

Les paramètres de la loi de Darcy sont les suivants :

q : débit en m<sup>3</sup>/s

K : coefficient de perméabilité de l'aquifère en m/s

A : section d'écoulement en m<sup>2</sup>

$i = \frac{dH}{dL}$  : gradient hydraulique ou perte de charge (dH : variation du niveau piézométrique entre 2 points ; dL : distance entre 2 points)

La loi de Darcy peut aussi être utilisée avec la transmissivité (Équation 3) :

$$q = T.L.i$$

*Équation 3 : Calcul du débit d'échange selon la Loi de Darcy avec la transmissivité de l'aquifère*

Les paramètres sont les suivants :

T : coefficient de transmissivité de l'aquifère en m<sup>2</sup>/s ( $T = K.e$  avec e : épaisseur de l'aquifère en m)

L : longueur de berge, en mètres, le long de laquelle le débit d'échange est calculé.

Le sens d'échange est déterminé par interprétation des cartes piézométriques.

Sur ce secteur, les débits de nappe calculés dans le rapport phase 1 à partir de la piézométrie basses-eaux du 7 février 1990 (source : Rampoux, 1992) ont été convertis en  $\text{m}^3/\text{j}$  pour une section de  $1\text{m}^2$  et une perméabilité uniforme de  $10^{-3}\text{m/s}$ . De plus, des débits complémentaires ont été calculés avec la loi de Darcy, exprimée dans la même unité, avec la piézométrie basses-eaux, avant aménagement, du 23 novembre 1978 (source : CNR), ceci afin d'obtenir un ordre de grandeur des débits sur des secteurs pour lesquels nous n'avons pas de piézométrie récente. Les valeurs de débits localisées sur le canal de dérivation et à l'amont du barrage sur le Vieux-Rhône sont à considérer avec précaution du fait de l'augmentation des lignes d'eau du Rhône suite à la construction de l'aménagement. La Carte 1 spatiale ces résultats et le Tableau 3 donne les valeurs de gradients et de débits.

Nom	Date	Rive	PK (km)	Méthode manuelle		Analyse spatiale	
				Gradient (%)	Q : Darcy ( $\text{m}^3/\text{j}/\text{m}^2$ )	Gradient : SIG (%)	Q : SIG ( $\text{m}^3/\text{j}/\text{m}^2$ )
La Charrière	1990-BE	Gauche	113	0,06%	0,05		
Bovinel	1990-BE	Droite	112	0,02%	0,02		
Bovinel	1990-BE	Droite	112	0,02%	0,02		
Bovinel	1990-BE	Droite	110,5	0,20%	0,17		
Bovinel	1990-BE	Droite	109,5	0,16%	0,14		
Les Rubbatiens	1990-BE	Gauche	106,5	0,06%	0,05	0,05%	0,05
Trémurs	1978-BE	Droite	105	0,19%	0,17		
Murs et Géligneux	1978-BE	Droite	103	0,95%	0,82		
St-Genix sur Guiers	1990-BE	Gauche	102,5	0,07%	0,06	0,18%	0,16
St-Genix sur Guiers	1990-BE	Gauche	101,5	0,32%	0,28	0,93%	0,80
St-Genix sur Guiers	1990-BE	Gauche	100	0,21%	0,18	0,79%	0,68
St-Genix sur Guiers	1990-BE	Gauche	99	0,34%	0,29	0,41%	0,35
Saint-Didier	1978-BE	Gauche	99	0,18%	0,15		
Saint-Didier	1978-BE	Gauche	98,5	0,73%	0,63		
Grand Chaiffard	1978-BE	Gauche	96	1,64%	1,42		
Les nappes	1978-BE	Gauche	92	0,67%	0,58		
Pigner	1978-BE	Gauche	90	0,06%	0,05		
La Saugue	1978-BE	Droite	89,5	0,41%	0,35		

Tableau 3 : Débits et gradients de nappe sur le secteur de Brégnier-Cordon

Ce tableau est constitué de la façon suivante :

- Nom : appellation du secteur d'aquifère fondée sur la ville ou le hameau principal du secteur ;
- Date : rappel de l'année de référence pour la piézométrie utilisée et le régime hydrologique (ici BE pour basses-eaux) ;
- Rive : localisation du point de quantification de débit sur la rive gauche ou droite du fleuve ;
- PK : point kilométrique du fleuve exprimé en km ;
- Gradient : gradient de nappe exprimé en % ;
- Q : Darcy : débit de nappe calculé avec la loi de Darcy et exprimé en  $\text{m}^3/\text{jour}$  pour une section de  $1\text{m}^2$  et une perméabilité de  $10^{-3}\text{m/s}$ .

Les deux dernières colonnes du tableau donnent les valeurs de gradients (Gradient : SIG), exprimés en %, et les débits (Q : SIG), exprimés  $\text{m}^3/\text{jour}$  pour une section de  $1\text{m}^2$  et une perméabilité de  $10^{-3}\text{m/s}$ , calculés avec la méthode d'analyse spatiale présentée plus en détail au chapitre 2.1.3.

### Légende

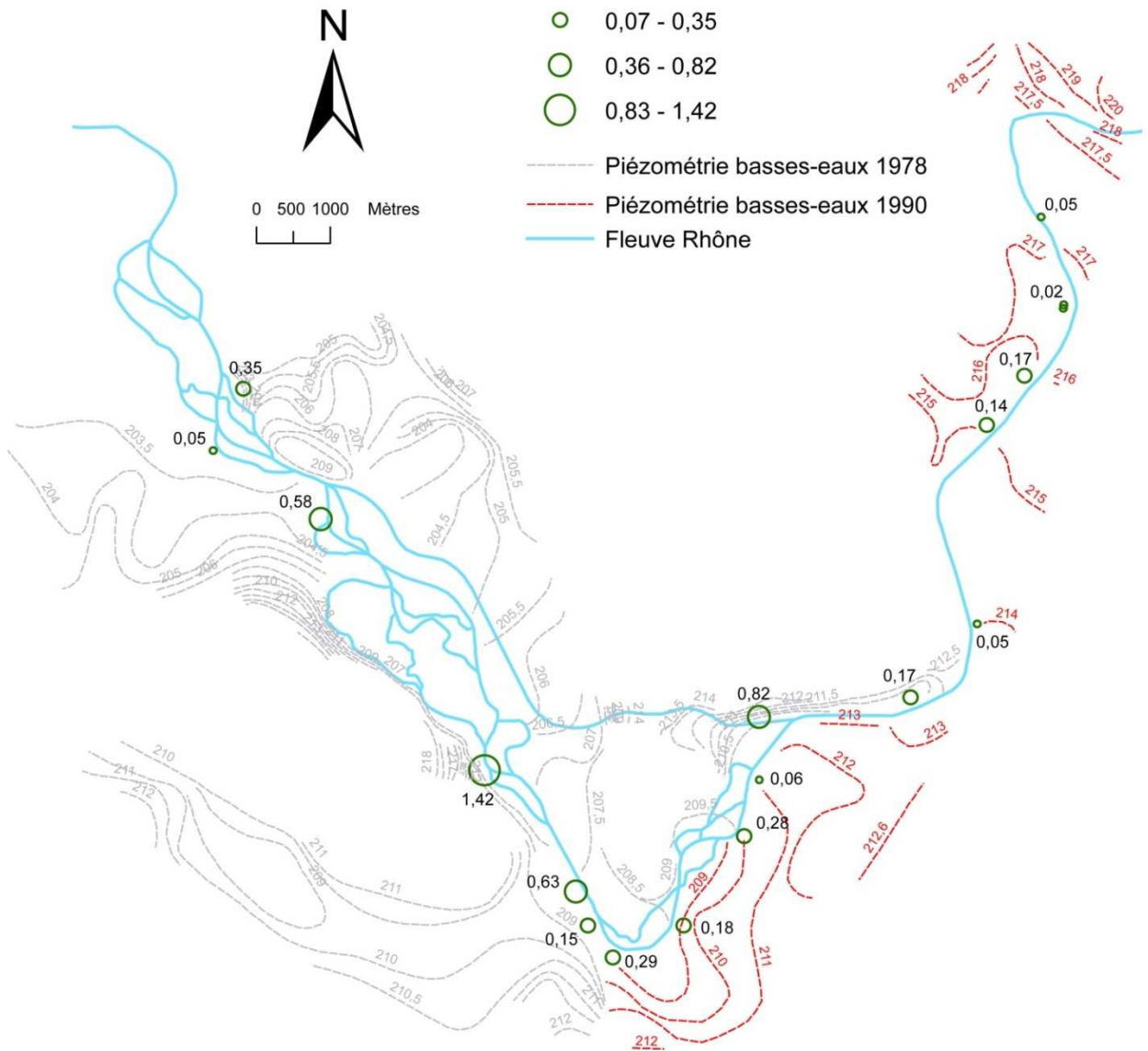
**Debit de nappe**  
 en m<sup>3</sup>/jour pour une section de 1m<sup>2</sup>  
 avec une perméabilité uniforme de 10<sup>-3</sup>m/s

- 0,02 - 0,06
- 0,07 - 0,35
- 0,36 - 0,82
- 0,83 - 1,42

— Piézométrie basses-eaux 1978

- - - Piézométrie basses-eaux 1990

— Fleuve Rhône



Carte 1 : Spatialisation des débits de nappe sur le secteur de Brégnier-Cordon



La Carte 1 spatialise les débits de nappe calculés manuellement à partir de la Loi de Darcy. Dans ce cas, il s'agit de secteur ou le fleuve draine la nappe. Les débits sont représentés par des cercles verts de taille proportionnelle au volume échangé. Le chiffre en noir indique la valeur du volume échangé par unité de surface d'infiltration.

Les chiffres gris et rouges indiquent le niveau de la nappe, en mètres, pour la piézométrie de la même couleur.

### 2.1.2.2. Péage-de-Roussillon : exploitation des résultats d'un modèle

La chute de Péage-de-Roussillon est située à environ 50km à l'aval de Lyon. Elle comprend l'Île de la Platière, les formations alluviales de la rive droite du Vieux-Rhône à Limony et celles de la rive gauche entre le barrage de Saint-Pierre de Bœuf au nord et la restitution à Saint-Rambert d'Albon au sud. Les informations utilisées pour décrire cette unité d'aménagement CNR sont issues de rapports BURGEAP (2007a ; 2007b) qui nous ont été gracieusement communiqués par le SMIRCLAID (Syndicat Mixte Intercommunal du Rhône Court-circuité Loire Ardèche Isère Drôme ; Contacts : Anne Gangloff, Anne Citterio).

Ici, l'idée de départ était de comparer les débits de nappe calculés par le modèle : d'une part à ceux obtenus avec la méthode manuelle déjà utilisée sur Brégnier-Cordon ; d'autre part à ceux obtenus avec la méthode d'analyse spatiale par SIG.

#### 2.1.2.2.1. Localisation et description rapide du site (Carte 2)

Au niveau de Péage-de-Roussillon le régime du Rhône est de type nivo-pluvial avec des hautes-eaux en hiver et au printemps (débit soutenu de mai à juillet dû à la fonte des neiges) et des basses-eaux en été et à l'automne. Les affluents du Rhône sont (du nord vers le sud) : rive gauche, la Sanne (module de 0,196m<sup>3</sup>/s ; 0,14m<sup>3</sup>/s à la confluence avec le Dolon le 10 juin 2005), le Dolon, le ruisseau des Collières (module 2,68m<sup>3</sup>/s ; 1,39m<sup>3</sup>/s le 10 juin 2005) ; en rive droite, le ruisseau de Limony. Les débits caractéristiques du Rhône sont les suivants : module interannuel à Ternay (30 km en amont) : 1040 m<sup>3</sup>/s ; QMNA5 (débit minimal mensuel quinquennal) : 340 à 390 m<sup>3</sup>/s ; Q5 : 3900 m<sup>3</sup>/s ; Q10 : 4000 m<sup>3</sup>/s.

L'aménagement CNR est constitué d'un canal de dérivation de 11,5km de long terminé par un barrage dont la hauteur de chute est de 15,3m pour un tirant d'eau de 11m (cote 143,4m). Le débit maximum turbinable est de 1600 m<sup>3</sup>/s. Au niveau du canal de dérivation, la berge est bétonnée intégralement en rive droite. Sur la rive gauche la berge est aussi bétonnée de Péage-de-Roussillon au port de Salaise-Sablons : le reste est enroché. Le fond du canal, quant à lui est non-bétonné, et vraisemblablement colmaté par des limons. Il est perché par rapport à l'aquifère. Le Vieux-Rhône présente un débit réservé de 10 m<sup>3</sup>/s de septembre à mars et de 20m<sup>3</sup>/s d'avril à août. En cette période le tirant d'eau est de 11m (cote 143,42m NGF en amont et 132,29m NGF en aval). Peu après la restitution, on observe un seuil, le seuil de Peyraud : 131,6m NGF (chute de 2,5m). Au niveau de l'Île de la Platière, les contre-canaux présentent un débit de 2 à 3m<sup>3</sup>/s.

Sur le plan géologique, le substratum de la nappe est constitué de roches pliocènes bleues et localement de granites. A l'ouest, on observe des roches cristallines et à l'est des formations quaternaires glaciaires (moraines sans aquifère étendu et sans continuité hydraulique avec la nappe alluviale du Rhône). Il existe une gouttière (paléo-vallée) depuis La Platière jusqu'au barrage EDF-CNR. Les alluvions sont de 2 types : terrasses fluvio-glaciaires (grossières) et fluviales (sables, galets, localement limons qui les recouvrent sur au maximum 2 à 6m) dont l'épaisseur varie de 20 à 30m. La perméabilité moyenne est de 10<sup>-3</sup>m/s. Des essais de pompage donnent de valeurs approchantes : essais de pompage OSIRIS (6.10<sup>-3</sup> à 14.10<sup>-3</sup>m/s) et essais de pompage à Limony (5.10<sup>-3</sup> à 6,1.10<sup>-3</sup>m/s).

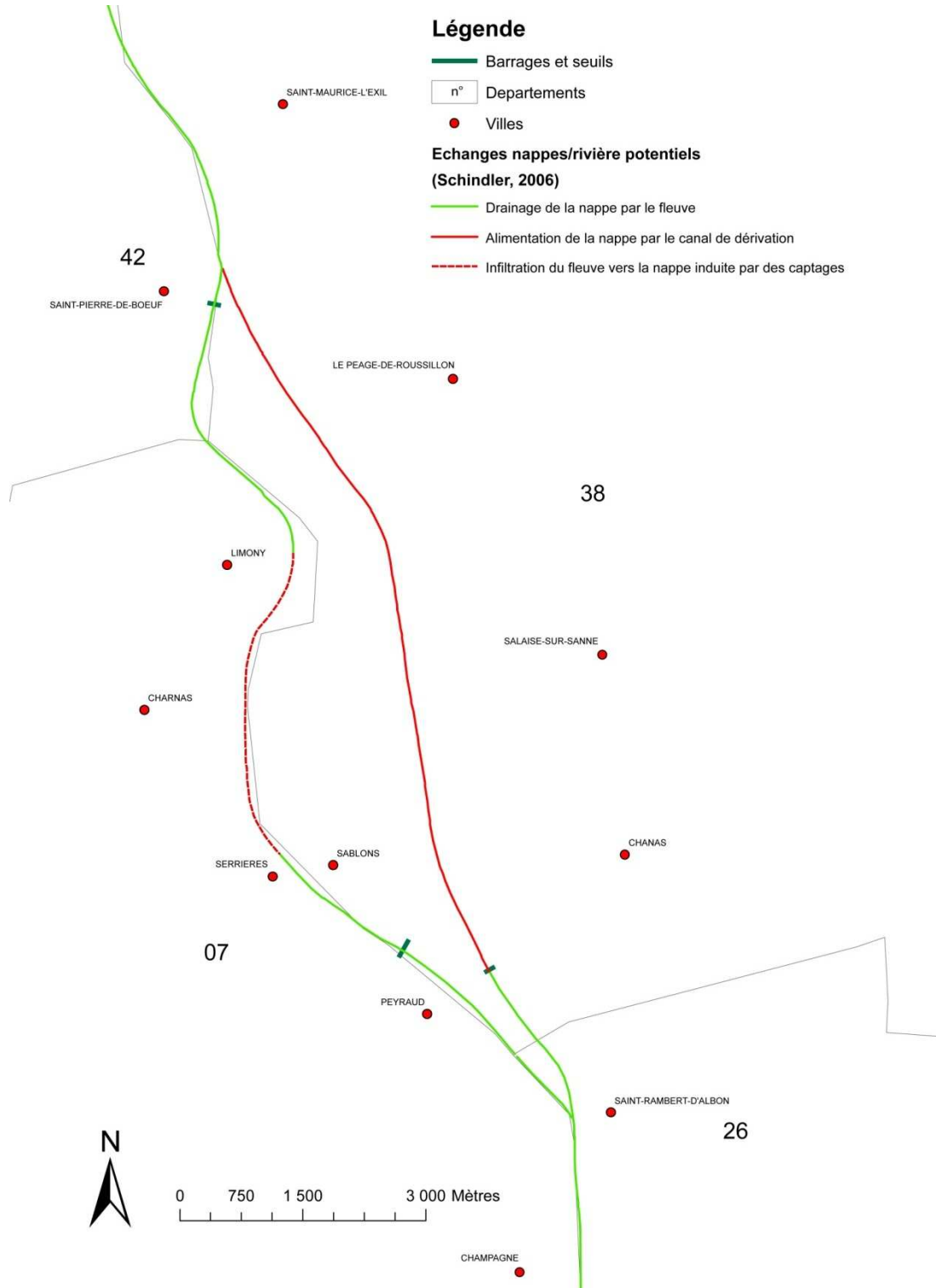
La nappe est alimentée par :

- le Vieux-Rhône au nord et sur le versant ouest de la zone de Limony ;
- les collines morainiques des terrasses würmiennes et post-würmiennes (petits galets et graviers polygéniques, matrice sableuse) au pied de la bordure Est ;
- les vallées de la Sanne et du Dolon qui constituent des apports non-négligeables ;
- la dépression de Bièvre-Valloire au sud qui constitue un apport important (2 à 3m<sup>3</sup>/s) à la nappe du Rhône (alluvions sablo-graveleuses épaisses de 15 à 20m ; succession de nappes fluvio-glaciaires à perméabilités de 10<sup>-3</sup> à 10<sup>-2</sup>m/s).

Sur le secteur de Péage-de-Roussillon les prélèvements dans les eaux superficielles du Rhône sont limités à 3700m<sup>3</sup> en 2004 alors que les prélèvements dans la nappe sont très importants pour atteindre un total d'environ 73 000 000m<sup>3</sup> pour l'année 2003. Ils se répartissent de la façon suivante :

- AEP : 5 000 000m<sup>3</sup> en 2003, commune de Péage-de-Roussillon (SIGEARPE), secteurs de Peyraud et Limony (SIE Annonay-Serrières), commune de Saint-Rambert d'Albon ;
- Industrie : 63 000 000m<sup>3</sup> en 2003, OSIRIS (Péage-de-Roussillon), LINDE gaz (Salaise-sur-Sanne), TREDIPEC-TREDI (Salaise-sur-Sanne), EUROFLOAT (Salaise-sur-Sanne) ;
- Agriculture : 5 300 000m<sup>3</sup>.

Les rejets des STEP sont de 24 600m<sup>3</sup>/an.



Carte 2 : Situation de la chute de Péage-de-Roussillon et hypothèse sur les échanges nappes/Rhône (d'après Schindler, 2006)

La Carte 2 de Péage-de-Roussillon montre que ce secteur se situe à la frontière entre 4 départements (Loire, Isère, Ardèche, Drôme). Comme sur la plupart des chutes, un premier barrage se trouve sur le Vieux-Rhône (au niveau de Saint-Pierre-de-Bœuf) et un second barrage sur le canal de dérivation (au niveau de Chanas). Il existe de plus un seuil au niveau de Peyraud. Selon les hypothèses émises par Schindler, on observe sur la carte que le canal de dérivation alimente la nappe (situation perchée) et qu'une partie du Vieux-Rhône entre Limony et Serrière est soumise à des phénomènes d'infiltration induite par les captages importants. Pour le reste, le Rhône draine la nappe.

#### 2.1.2.2.2. Modèle d'écoulement souterrain de BURGEAP

Selon les documents fournis (BURGEAP, 2007a ; 2007b), le modèle d'écoulement souterrain de BURGEAP est visiblement un modèle aux différences finies de 165 000 mailles régulières (20x23m). Il est fondé sur 60 mesures piézométriques et 28 mesures sur les eaux superficielles (lignes d'eau du Rhône, des lônes, du canal de dérivation et des contre-canaux datées du 10 juin 2005 en période de moyennes-eaux pour environ 35km<sup>2</sup> de surface modélisée. La carte piézométrique construite à partir des valeurs mesurées à cette date montre un écoulement est-nord-est vers ouest-sud-ouest vraisemblablement perturbé par les champs captant. Ces perturbations ne sont pas toutes visibles sur cette carte faute de mesures. Cette carte permet de déduire les échanges suivants :

- Le Vieux-Rhône draine la nappe du barrage Saint-Pierre de Bœuf à Limony / Grange à l'île Sainte), et l'alimente la nappe entre les deux (effet induit des champs captant) ;
- Le canal de dérivation alimente la nappe au travers d'une zone non-saturée ;
- La Sanne et le Dolon (perchés) ont peu d'influence ;
- au niveau de la lône de La Platière on observe une alimentation induite en amont jusqu'à la lône d'Illon, en aval les effets sont moins marqués car le seuil de peyraud remonte la ligne d'eau.

La carte des piézométries calculées par le modèle en régime permanent pour le 10 juin 2005 est fondée sur les paramètres suivants :

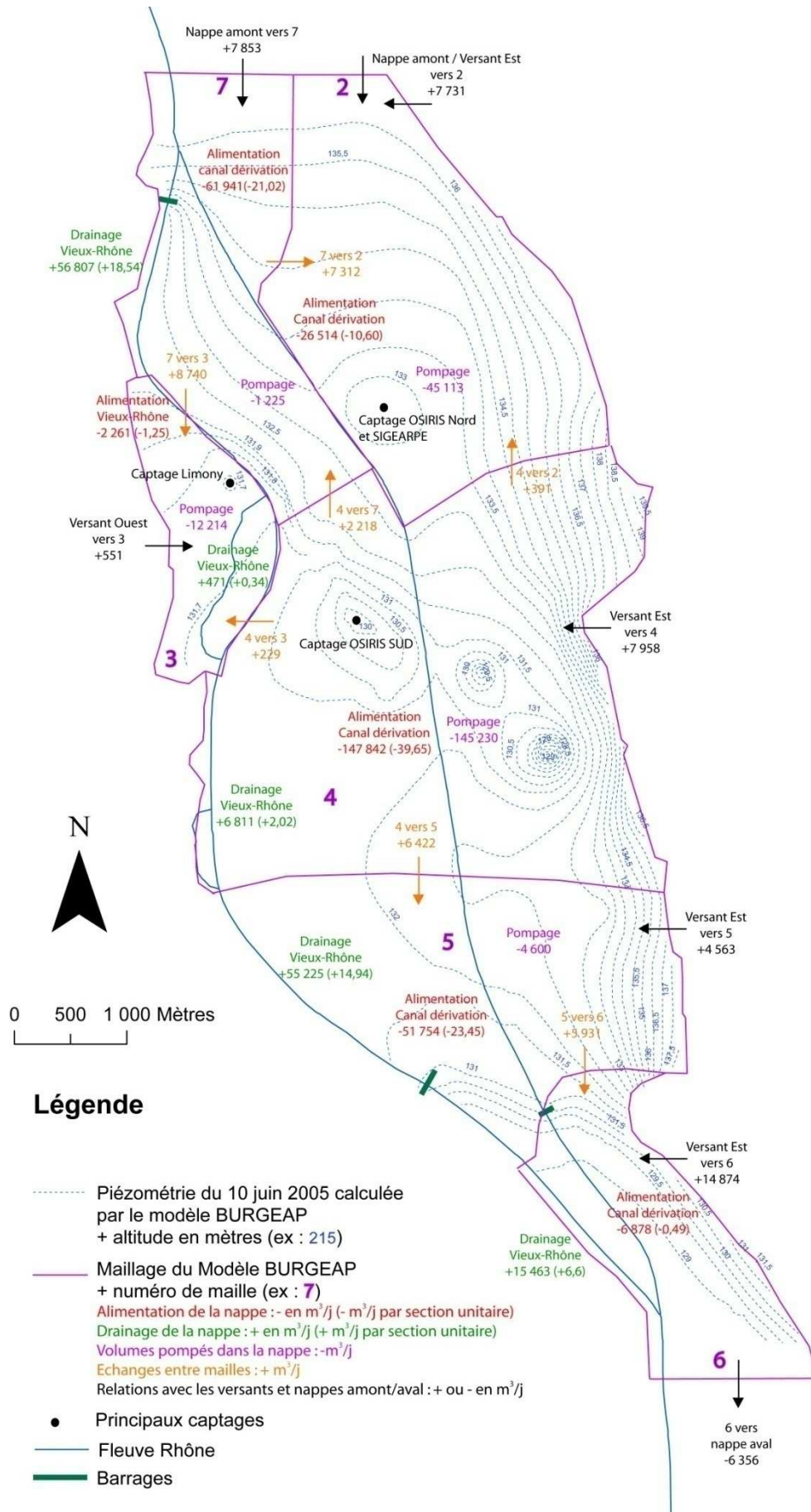
- perméabilités de l'aquifère : comprises entre  $4.10^{-3}$  et  $10^{-2}$ m/s ;
- porosité efficace : 10% ;
- cote du canal de dérivation : 144,4m (tirant d'eau : 11m) ;
- débit du Vieux-Rhône : 20m<sup>3</sup>/s ;
- limites à flux imposés sur les bordures du modèle ;
- limites à potentiel variable selon la charge du Vieux-Rhône et un coefficient d'échange nappe/rivière certainement ajusté en phase de calage du modèle et correspondant à une condition de Cauchy (Rapport Phase 1, Partie 1, p11) ;
- limites à potentiel variable pour modéliser les différents cours d'eau (canal de dérivation, contre-canaux, lônes) alimentant ou drainant la nappe.

La modélisation tient compte de pompages moyens au niveau des champs captant :

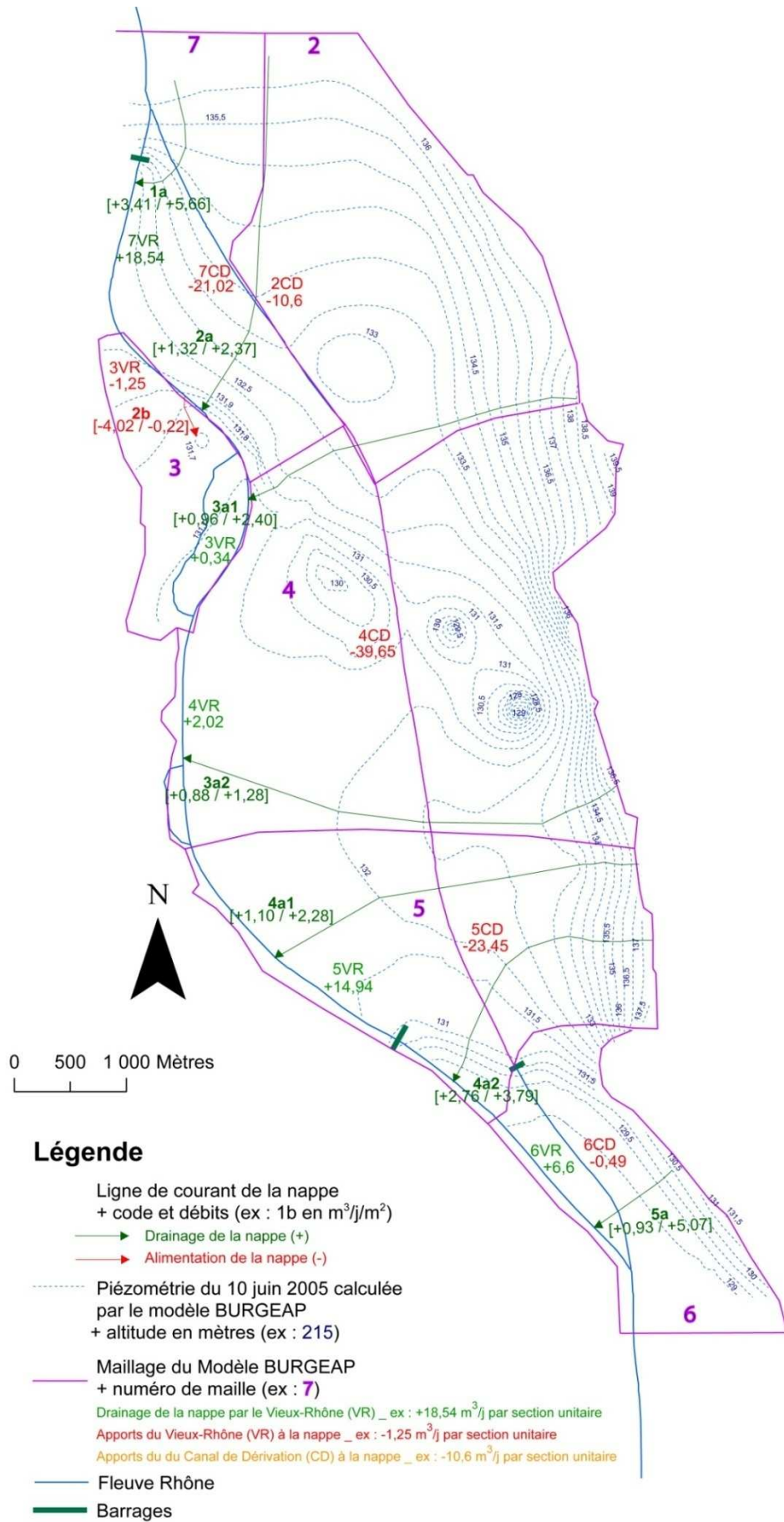
- OSIRIS : 200 000m<sup>3</sup>/jour maximum (captage nord : 633 400m<sup>3</sup>/mois en moyenne ; captage sud : 3 993 000m<sup>3</sup>/mois en moyenne). Ce champ captant est alimenté par les apports par infiltration du canal de dérivation ;
- SIGEARPE (AEP) : 500m<sup>3</sup>/h ; apports du canal de dérivation ;
- Limony (AEP) : 40m<sup>3</sup>/h ; apports du Rhône court-circuité et ruissellement du relief volcanique.

La simulation en régime permanent (précision 0,1 à 0,2m) conduit à l'établissement d'une nouvelle carte piézométrique. Cette piézométrie calculée montre un sens d'écoulement dirigé du nord-est vers le sud-ouest traduisant le drainage de la nappe par le Rhône. Les champs captant modifient la donne par rapport à la piézométrie de référence. Le cône d'appel du captage de Limony s'étend au-delà du Rhône en amont. Il chevauche celui d'OSIRIS sud vers la lône de la Platière et se conjugue à ceux d'OSIRIS nord et du SIGEARPE au niveau du contre-canal en rive droite.

**Globalement, la simulation montre un drainage de la nappe par le Vieux-Rhône (2m<sup>3</sup>/s au total) et une alimentation de la nappe par le canal de dérivation (4m<sup>3</sup>/s au total) sur le secteur modélisé.**



Carte 3 : Piézométrie et débits d'échange calculés par le modèle BURGEAP (d'après BURGEAP, 2005)



Il est possible d'obtenir une vision plus fine des échanges puisque BURGEAP a découpé le secteur en 7 grandes mailles, puis identifier et quantifier les volumes d'eau échangés entre elles. Ces échanges peuvent concerner 2 portions d'aquifère contigu (alluvial ou versant) ou la nappe et un objet hydrologique superficiel (Vieux-Rhône, canal de dérivation ou versant). La Carte 3 présente la piézométrie du 10 juin 2005 calculée par le modèle pour des pompages moyens. Pour chacune des 7 grandes mailles, numérotées de 1 à 7 (en violet), cette carte, construite pour une part selon les tableaux de bilan hydraulique fournis par BURGEAP, localise :

- Les volumes apportés à la nappe (en rouge, signe négatif), exprimés en  $m^3/j$ , en provenance du canal de dérivation, de la nappe amont, des bassins versants ou du Vieux-Rhône. Pour les secteurs impliquant des échanges nappes/rivière les chiffres entre parenthèses indiquent les volumes apportés à la nappe en  $m^3/j$  par section unitaire ;
- Les volumes drainés à la nappe en  $m^3/J$  (en vert, signe positif) par le Vieux-Rhône. Pour les secteurs impliquant des échanges nappes/rivière les chiffres entre parenthèses indiquent les volumes soustraits à la nappe en  $m^3/j$  par section unitaire ;
- Les volumes d'eau échangés entre maille (en orange) exprimés en  $m^3/J$  ;
- Les apports des versants à la nappe et les échanges avec les nappes amont et aval (en noir) exprimés en  $m^3/j$  ;
- Les principaux pompages (points noirs) avec les volumes moyens pompés ( $m^3/j$ ) ;
- Les barrages et seuils (traits verts).

Ces informations confirment les hypothèses d'écoulement (Carte 2) formulées préalablement. Elles précisent et quantifient l'effet important des pompages sur l'aquifère.

Sur le secteur de Péage-de-Roussillon, les résultats d'un modèle BURGEAP (2007a ; 2007b) permettent d'identifier et de quantifier les échanges nappes/Rhône. Ces résultats peuvent être comparés à ceux calculés selon la loi de Darcy (Équation 2 et Équation 3), méthode que nous avons utilisée à Brégnier-Cordon. De plus, comme nous disposons d'une carte du substratum (BURGEAP, 2007a), il est aussi possible de les comparer à ceux obtenus avec de la formule proposée par Kresic (1997) à partir des hypothèses de Dupuit). Cette formule, permet une quantification des écoulements souterrains en tenant compte de l'épaisseur de l'aquifère, dans le cas d'une nappe libre avec un substratum en pente. La formule est la suivante (Équation 4) :

$$q = h_0 \cdot K \cdot i_0$$

Équation 4 : Quantification des écoulements souterrains dans le cas d'une nappe libre avec un substratum en pente (Kresic, 1997)

Les paramètres sont les suivants :

q : débit de l'aquifère en  $m^3/s$

K : perméabilité de l'aquifère en m/s

$i_0$  : gradient du substratum de l'aquifère [ $i_0 = \frac{dz}{dx}$  gradient du substratum avec dz : différence d'altitude et dx : longueur (L)]

$h_0$  : profondeur normale de l'aquifère pour un flux uniforme

La profondeur normale de l'aquifère ( $h_0$ ) dans le cas où la pente du substratum est considérée comme uniforme est calculée selon la formule suivante (Équation 5.) :

$$C = h_0 \cdot \ln\left(\frac{h_2 - h_0}{h_1 - h_0}\right)$$

Équation 5 : Profondeur normale de l'aquifère pour un flux uniforme et une pente sur un substratum uniforme

Les paramètres sont les suivants :

$C$  : constante  $C = i_0 \cdot L + h_1 - h_2$  avec  $h_1$  et  $h_2$  correspondant respectivement à l'épaisseur de l'aquifère en début et en fin de gradient.

Une fois la constante  $C$  calculée, la valeur de  $h_0$  peut être obtenue à l'aide d'abaques ou du solveur d'équation du logiciel Excel.

Le Tableau 4 synthétise l'ensemble des calculs réalisés et des données issues du modèle disponible sur la zone. Il est construit de la façon suivante :

- Code (voir Carte 4) : indicatif du débit calculé avec la Loi de Darcy ou la formule proposée par Krésic au niveau du Vieux-Rhône. La lettre a indique un débit d'échange en rive gauche (ex : 1a), la lettre b en rive droite (ex : 1b). Il n'est pas possible de réaliser un bilan des échanges pour les deux rives en réalisant la somme a plus b (ex : 1a + 1B) car il n'y a pas de piézométrie disponible en rive gauche.

- Rive : localisation du point de quantification de débit sur la rive gauche ou droite du fleuve ;

- PK : point kilométrique du fleuve exprimé en km ;

- Gradient : gradient de nappe exprimé en % ;

- Epaisseur : épaisseur de l'aquifère exprimée en m, déduite avec la carte des niveaux du substratum et la carte piézométrique du 10 juin 2005 issue du modèle BURGEAP (cette carte est utilisée pour le calcul des débits qui suivent) ;

- Q : Darcy (K) : débit de nappe calculé avec la loi de Darcy et exprimé en  $m^3$ /jour pour une section de  $1m^2$  et une perméabilité de  $10^{-3}m/s$  ;

- Q : Darcy (T) : débit de nappe précédent multiplié par l'épaisseur de l'aquifère exprimé en  $m^3$ /j pour une section unitaire ;

- Q : Krésic : débit de nappe calculé à partir de la formule développée par Krésic en  $m^3$ /jour pour une perméabilité de  $10^{-3}m/s$  exprimé en  $m^3$ /j pour une section unitaire ;

- Q : BURGEAP : débit d'échange du modèle BURGEAP exprimé en  $m^3$ /j pour une section unitaire ;

- Code BURGEAP : indique la maille (n°) au niveau de laquelle le Vieux-Rhône (VR) échange avec la nappe (ex : 7VR, échange entre le Vieux-Rhône et la nappe au niveau de la maille n°7).

Les débits positifs indiquent un drainage de la nappe et les débits négatifs une alimentation de la nappe par le fleuve.

Les trois dernières colonnes du tableau donnent les valeurs de gradients (Gradient : SIG), exprimés en %, les débits (Q : SIG K), exprimés  $m^3$ /jour pour une section de  $1m^2$  et une perméabilité de  $10^{-3}m/s$ , et les débits (Q : SIG T) correspondant aux débits précédents multipliés par l'épaisseur l'aquifère. Ces débits sont calculés avec la méthode d'analyse spatiale présentée plus en détail au chapitre 2.1.3.

Code	Rive	PK km	Gradient %	Epaisseur m	Méthode manuelle			Modèle physique		Analyse spatiale		
					Q : Darcy (K) $m^3/j/m^2$	Q : Darcy (T) $m^3/j$	Q : Kresic $m^3/j$	Q : BURGEAP $m^3/j$	Code BURGEAP	Q : SIG (K) $m^3/s$	Q : SIG (T) $m^3/s$	Gradient : SIG %
1a	Gauche	51,25	0,31	12,70	0,27	3,41	5,66			0,57	7,29	0,69
1b	Droite		?		?	?	?					
1a+1b								18,54	7VR			
2a	Gauche	53,75	0,14	11,00	0,12	1,32	2,37	0,34	3VR	0,06	0,63	0,11
2b	Droite	53,25	-0,26	17,70	-0,23	-4,02	-0,22	-1,25	3VR			
3a1	Gauche	55,5	0,25	4,50	0,21	0,96	2,40			0,12	0,53	0,24
3a2	Gauche	57	0,14	7,50	0,12	0,88	1,28			0,01	0,11	0,02
3b	Droite		?		?	?	?					
3a+3b								2,02	4VR			
4a1	Gauche	59	0,14	9,00	0,12	1,10	2,28			0,08	0,70	0,09
4a2	Gauche	61	0,36	9,00	0,31	2,76	3,79			0,60	5,38	0,82
4b	Droite		?		?	?	?					
4a+4b								14,94	5VR			
5a	Gauche	63	0,17	6,50	0,14	0,93	5,07					
5b	Droite		?		?	?	?					
5a+5b								6,6	6VR			

Tableau 4 : Débits d'échanges sur le secteur de Péage-de-Roussillon

Comme nous pouvons le constater, les résultats fournis par le modèle et ceux calculés par ailleurs sont difficilement comparables. En effet, les débits du modèle tiennent compte des échanges avec les 2 rives (ex : 1a + 1b) et nous ne disposons d'aucune valeur calculée manuellement pour la rive droite.

De plus, on n'observe pas de corrélation significative entre les valeurs calculées avec la Loi de Darcy, que ce soit avec la perméabilité ou la transmissivité, et celles calculées selon la formule de Krésic. Ceci peut-être lié à des imprécisions ou des incertitudes sur les altitudes du substratum et/ou sur la piézométrie calculée par le modèle notamment aux limites de l'aquifère proches du versant est. On observe d'ailleurs sur ces secteurs des endroits où l'altitude du substratum est supérieure à celle du niveau piézométrique.

Pour terminer, la Carte 4 localise les différents débits d'échange calculés sur les rives du Vieux-Rhône :

- respectivement en vert et rouge les débits d'échanges calculés par le modèle au niveau du Vieux-Rhône (VR) et du canal de dérivation (CD) en fonction de la maille considérée ;

- en vert, entre crochets, les débits d'échanges calculés tenant compte de l'épaisseur de l'aquifère [Q : Darcy (T) / Q : Kresic]. Cette sélection de débits a été calculée manuellement pour les lignes de courant reportées sur la carte et codées de 1 à 5. La lettre a indique qu'il s'agit de la rive gauche (1a, 2a, 3a1, 3a2, 4a1, 4a2 et 5a) et la lettre b, qu'il s'agit de la rive droite (2b). Sur cette rive, la piézométrie disponible ne permet de calculer le débit qu'à un seul endroit. Sur la carte, les valeurs affichées sur le code indiquent le débit d'échange tenant compte de l'épaisseur de l'aquifère.

**Un bilan des échanges nappes/Rhône est proposé au chapitre 2.1.3.2. Il reprend, synthétise et compare les résultats obtenus sur Brégnier-Cordon et Péage-de-Roussillon à partir des différentes méthodes utilisées ci-avant et développées au chapitre 2.1.3.**

#### 2.1.2.3. Donzère-Mondragon : visite de terrain

Comme cela avait été le cas, avant de commencer l'étude du secteur de Brégnier-Cordon, une visite de terrain interdisciplinaire de 2 journées consécutives a été organisée sur le secteur de Donzère-Mondragon début février 2008. Cette visite a réuni l'ensemble des laboratoires partenaires impliqués.

Lors de ces 2 journées, 37 sites ont été visités et un compte-rendu détaillé a été rédigé (Annexes 5). Après une présentation succincte des caractéristiques hydrogéologiques de la vaste plaine du Tricastin et de ses versants, chaque site est appréhendé et décrit selon différents critères :

- localisation et intérêt du site ;
- configurations hydrogéologiques et géologiques (nature, code, schéma) ;
- mesures physico-chimiques (conductivité et température) ;
- interprétation hydraulique (estimation de débits, connexions...) ;
- interprétation biologique fondée essentiellement sur les macrophytes.

Après les descriptions de sites, des remarques complémentaires sont formulées. Elles concernent :

- les études identifiées sur le secteur en distinguant celles à acquérir et celles déjà acquises ;
- des mesures complémentaires à effectuer à l'avenir dans les domaines hydrogéologiques, géophysiques, isotopiques et biologiques.

Pour terminer, une carte localise les différents sites visités, et un tableau rassemble les mesures physico-chimiques réalisées.

**Une prochaine visite est programmée le 25 avril 2008 avec Y. Tavel de la CNR qui connaît bien le secteur. L'étude proprement dite de la chute de Donzère-Mondragon pourra réellement commencer lorsque que la CNR nous aura transmis les données (voir convention). Compte-tenu de l'étendue de la plaine du Tricastin, de la longueur de l'aménagement et de son ancienneté la CNR dispose essentiellement de données concernant le canal de dérivation. Pour le Vieux-Rhône, elle nous a conseillé de nous tourner vers d'autres sources d'informations : SAUR, ASF, EDF, étude TGV, AREVA, GERFLOR, Syndicats des eaux, collectivités...**



### 2.1.3. Approche des échanges nappes/rivière par analyse spatiale sous SIG

L'identification et la quantification des échanges nappes/Rhône reposent en général sur une méthode manuelle fastidieuse et gourmande en temps de travail si les calculs sont réalisés à la main, puis saisis sous SIG. Cette démarche est de plus entachée d'une part de subjectivité puisque le calcul des débits est effectué pour des zones sélectionnées ne représentant qu'une faible proportion du linéaire de berges. Il est possible de donner plus d'objectivité à cette méthode en élaborant une technique appropriée à partir des fonctions de bases disponibles sous SIG. Il est ainsi envisageable :

- de systématiser et d'automatiser le calcul ;
- d'identifier et de quantifier les échanges nappes/Rhône sur la totalité du linéaire de berges.

Cette méthode permet de mieux représenter la réalité du terrain et d'obtenir plus rapidement des résultats reproductibles de proche en proche sur les secteurs étudiés. L'objectif est ici d'affecter à chaque segment de berge étudié sous SIG une valeur d'angle d'échange entre la nappe et le Rhône compte tenu du sens d'écoulement et une valeur de débit d'échange selon le gradient piézométrique (pente).

Cette méthode d'analyse spatiale a été mise en œuvre avec le logiciel ARCGIS et testée sur le secteur de Brégnier-Cordon en rive gauche sur les portions d'aquifère de Saint-Genix-sur-Guiers et des Rubattiers avec la carte piézométrique basses-eaux du 7 février 1990 (Rampnoux, 1992), et le secteur de Péage-de-Roussillon en rive gauche du Vieux-Rhône avec la piézométrie de référence pompages moyens calculée par le modèle BURGEAP. Elle est fondée sur l'utilisation des boîtes à outils « 3D analysts tools », « Data management tools », « Analysis tools » et la génération de TIN (Triangulated Irregular Network) permettant d'obtenir des valeurs d'altitude (elevation), de pente (slope) et d'angle (aspect).

#### 2.1.3.1. Calcul et représentation de l'angle d'échange entre la nappe et le Rhône par analyse spatiale sous SIG

Le Rhône est en relation avec des aquifères alluviaux sur environ 75% de son cours, rive droite et gauche confondues. Les échanges eaux souterraines/eaux de surface étant au cœur du projet, la méthode mise au point doit être à même de les évaluer de manière suffisamment rigoureuse et détaillée, et doit être reproductible sur les deux rives du fleuve et sur tout l'allongement de son cours en France.

Pour chaque aquifère recensé, cette méthode doit permettre de déterminer le sens de l'échange en chaque point, d'évaluer la quantité échangée d'une manière rigoureuse et de faire un bilan relatif sur toute la longueur de l'interface nappe/rivière. Pour un aquifère alluvial donné, donc sur une extension de quelques kilomètres, on prendra en compte trois ensembles : l'aquifère alluvial, le cours d'eau et leur interface que l'on considèrera être la rive du cours d'eau. Par convention on exprimera en valeurs positives les quantités échangées dans le sens nappe vers rivière et négativement celles en sens inverse.

Il s'agit donc de mettre en œuvre une méthode par analyse spatiale sous SIG pour calculer et représenter l'angle d'échange entre la nappe et le Rhône, pour des aquifères alluviaux, ceci afin de déterminer le potentiel d'échange. Par exemple, si l'échange se fait dans le sens nappe vers Rhône et si le sens d'écoulement de la nappe est perpendiculaire à celui du Rhône, l'échange sera potentiellement important ; si au contraire les 2 écoulements sont parallèles, l'échange sera nul.

Il convient donc de calculer et représenter les sens d'écoulement du fleuve et de la nappe pour connaître l'angle d'échange. La méthode est ici expliquée à l'aide de l'exemple de Brégnier-Cordon. Les résultats obtenus pour Péage-de-Roussillon seront présentés en fin de partie.

Cette méthode est fondée sur l'utilisation des propriétés des TIN (Triangulated Irregular Network). Ils sont utilisés pour générer des surfaces, constituées d'un réseau de triangles irréguliers, à partir de données ponctuelles ou linéaires. Chaque triangle contient une valeur d'altitude, de pente et d'angle.

- **Représentation du sens d'écoulement du Rhône à Brégnier-Cordon**

La couverture de départ est un « shape file » polyligne des berges (lônes ou contre-canaux selon le cas) de la rive gauche du Rhône en contact avec la nappe entre les Rubattiers et Saint-Genix-sur-Guiers. Pour obtenir le sens d'écoulement la démarche, présentée ici de manière simplifiée, est la suivante :

- découpage de la polyligne des berges en petits segments avec la fonction « Split line at vertices » (boîte à outils « Data mangement tools », groupe de fonctions « Features ») ;

- création d'une zone tampon de 100m autour des berges du Rhône avec la fonction « Buffer » (boite à outils « Analysis tools », groupe de fonctions « Proximity ») ;
- génération d'un TIN à partir de la polyligne représentant les berges du Rhône et la limite fixée par la zone tampon avec la fonction « Create TIN » (boite à outil « 3D analyst tools »).

Pour calculer l'orientation des segments on construit un tampon (buffer) de 100 m sur les polygones des rives ; une valeur quelconque (100 par exemple) a été affectée à la ligne limite extérieure du tampon, les rives proprement dites restant à 0. Le TIN circonscrit au fleuve et à la zone tampon donne pour chaque triangle une valeur « aspect » (angle) qui correspond à la perpendiculaire au vecteur de rive local ; la pente est de 100% (45°), dans tout le buffer. L'orientation de chaque vecteur unitaire de rive est calculée par simple soustraction de 90° à l'angle d'orientation.

Au final, chacun des triangles obtenus contient une valeur d'angle, comprise entre 0 et 360° (0-360° pour le nord, 90° pour l'est, 180° pour le sud et 270° pour l'ouest) (Figure 6) perpendiculaire à chaque segment des berges du Rhône (Carte 5). Il convient dès lors de corriger cette valeur d'angle de 90° pour obtenir le sens d'écoulement du Rhône ;

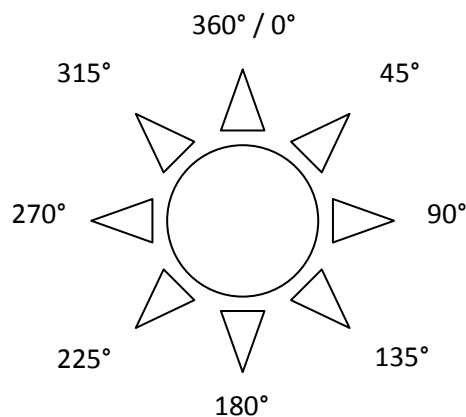


Figure 6 : Cadran de lecture des valeurs d'angle obtenues dans le TIN

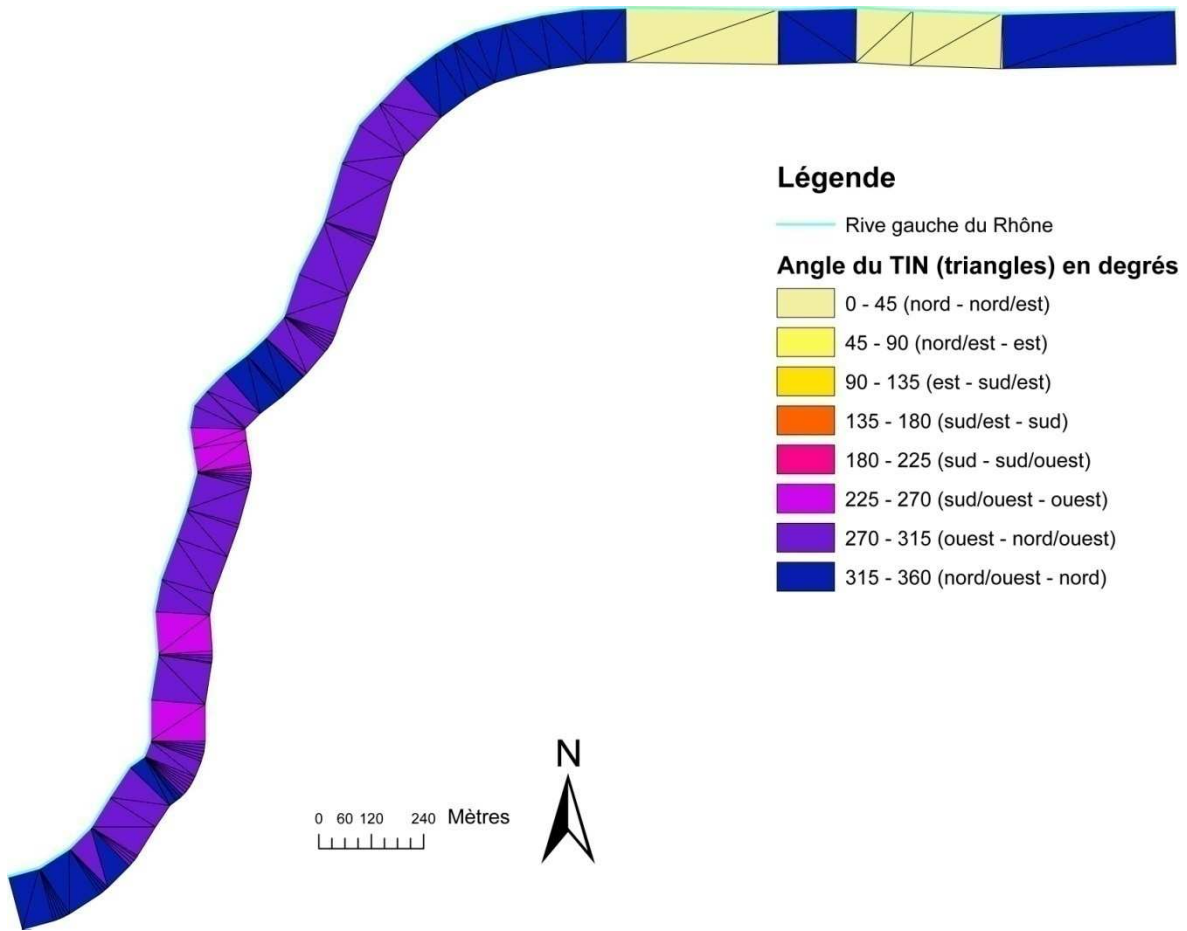
- transformation du TIN en triangle avec la fonction « Tin to triangle » (boite à outils « 3D analyst tools », groupe « Conversion », sous-groupe « From TIN ») pour affecter les valeurs d'angle à chaque polygone triangle ;

- affectation des valeurs d'angles des polygones triangles aux segments de berge avec la fonction « Intersect » (boite à outils « Analysis tools », groupe de fonctions « Overlay ») (Carte 6). Cette dernière opération permet d'obtenir une couverture SIG pour représenter le sens d'écoulement du Rhône. Si le fleuve s'écoule approximativement vers l'ouest, l'angle est d'environ 270° (dans les tons violet et bleu sur la carte), s'il s'écoule approximativement vers le sud, l'angle est d'environ 180° (dans les tons jaune et orange sur la carte). Ce sens est identique à celui que l'on peut interpréter sur une carte topographique quand on connaît la source et l'exutoire d'un fleuve. Si cette lecture est quasi intuitive pour le cerveau humain, elle nécessite, comme nous venons de le voir, plusieurs opérations pour être réalisée sous SIG.

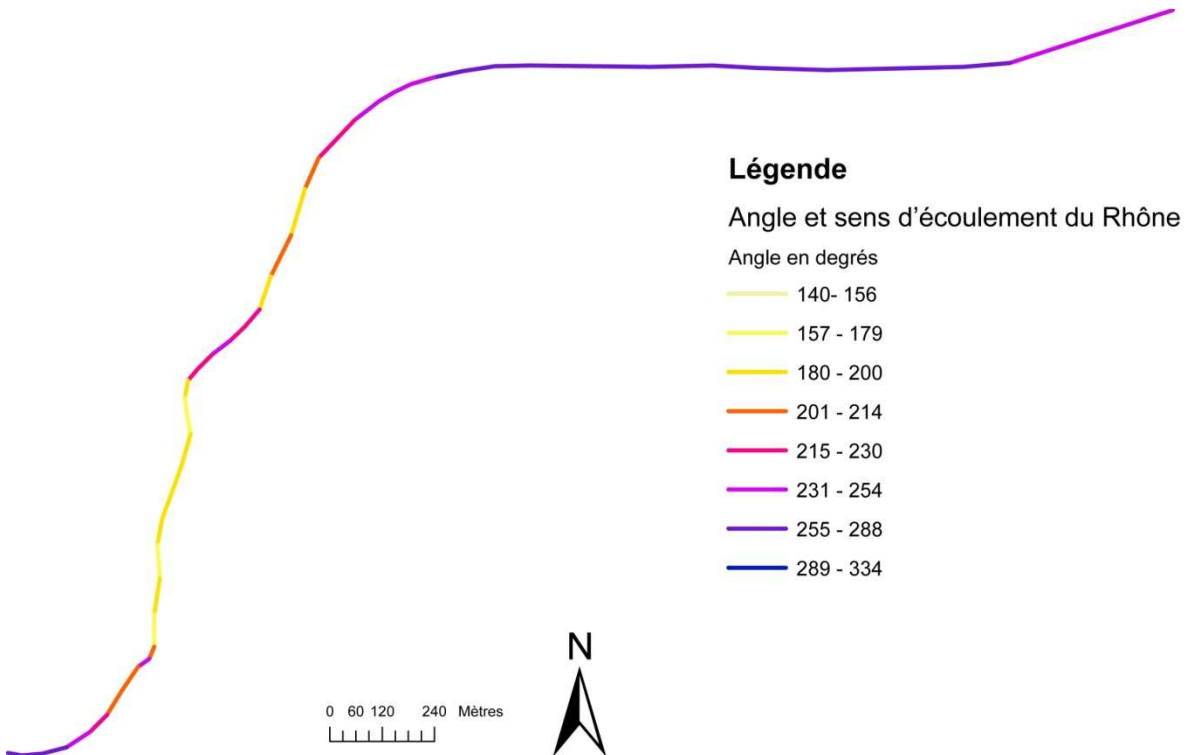
#### • Représentation du sens d'écoulement de la nappe

La couverture de départ est un « shape file » polyligne de la carte piézométrique du 7 février 1990 (basses-eaux) entre les Rubattiers et Saint-Genix-sur-Guiers en rive gauche du Rhône. Il est de plus nécessaire d'utiliser des « shape file » contenant les limites du secteur étudié (polygone), le niveau du Rhône (polyligne) et des courbes piézométriques intermédiaires (polyligne) afin de générer un TIN cohérent avec le comportement de l'aquifère sur le secteur. Pour obtenir le sens d'écoulement de la nappe, la démarche, présentée ici de manière simplifiée, est la suivante :

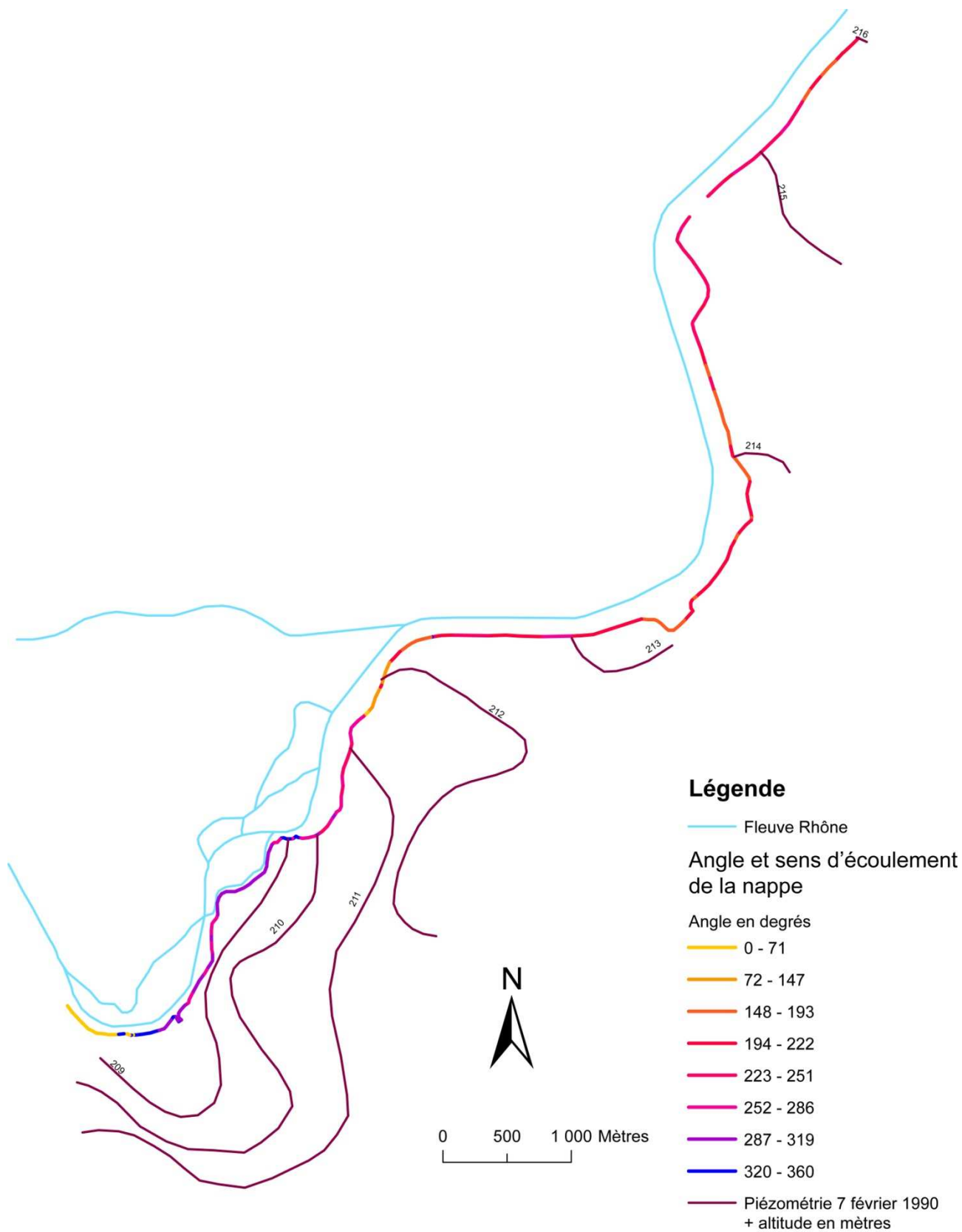
- génération d'un TIN avec les couvertures citées ci-dessus ;
- transformation du TIN en triangle ;
- affectation des valeurs d'angles des polygones triangles aux segments de berge (Carte 7).



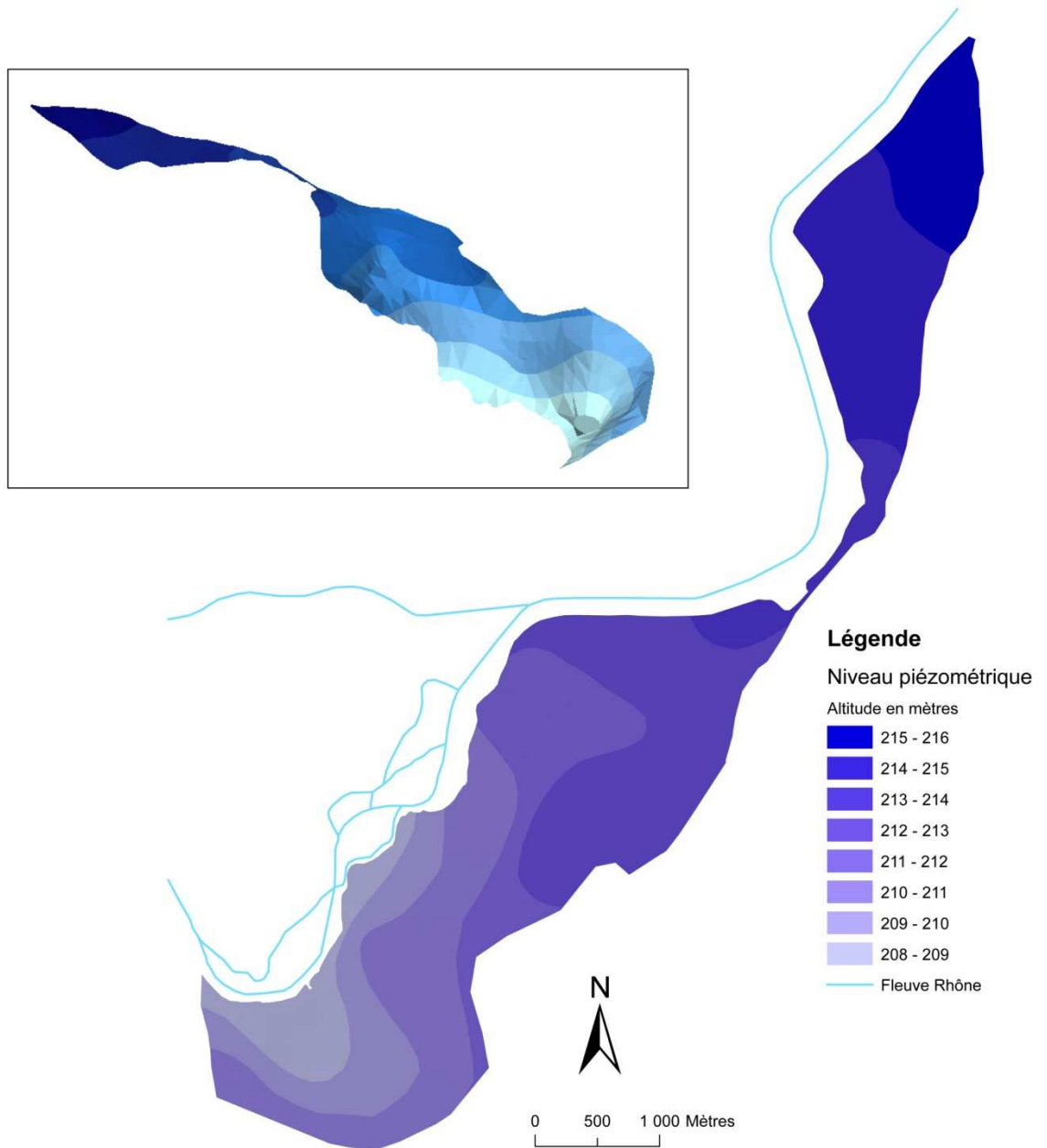
Carte 5 : Portion de TIN en rive gauche du Rhône à Brégnier-Cordon



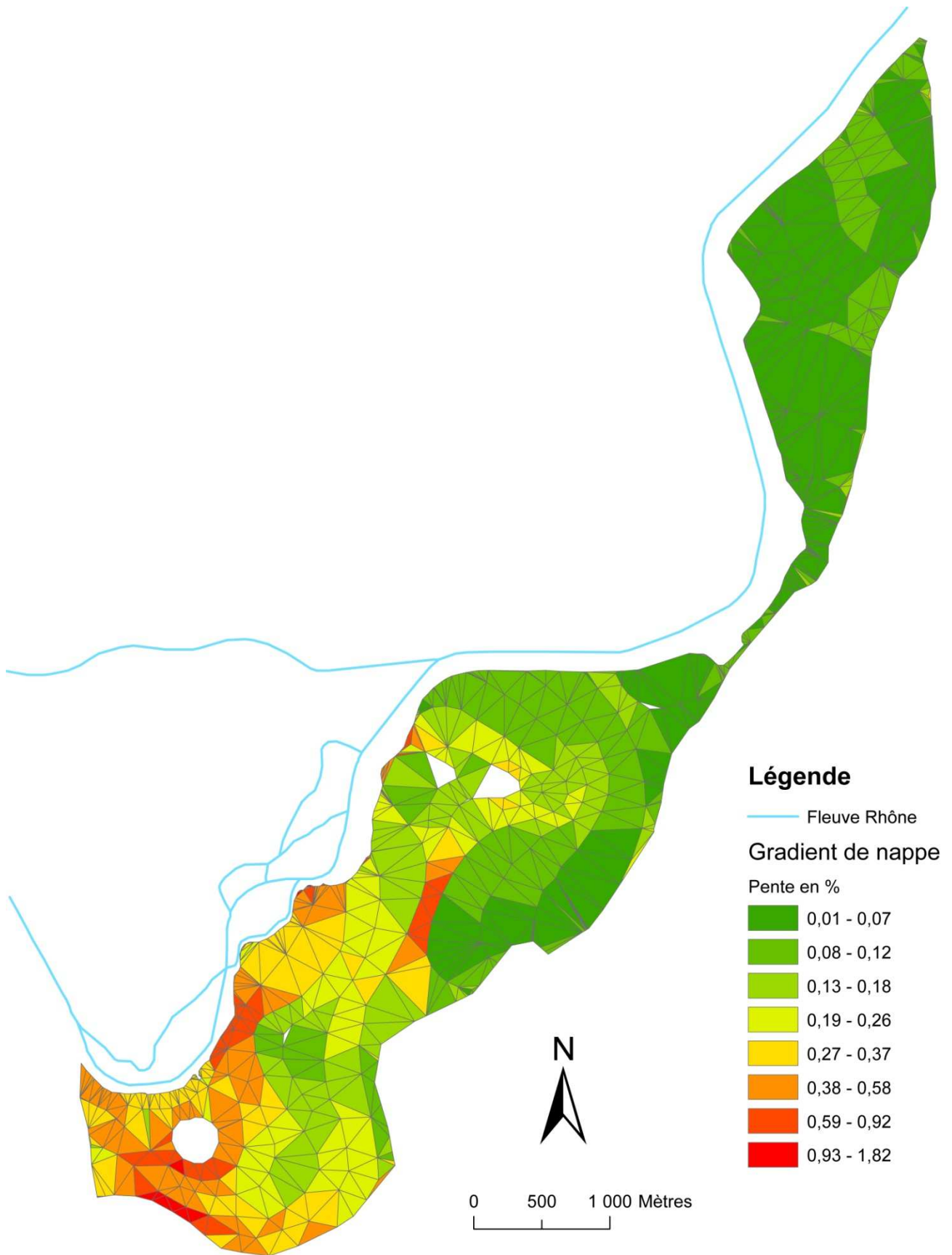
Carte 6 : Sens d'écoulement du Rhône sur une portion de la rive gauche à Brégnier-Cordon



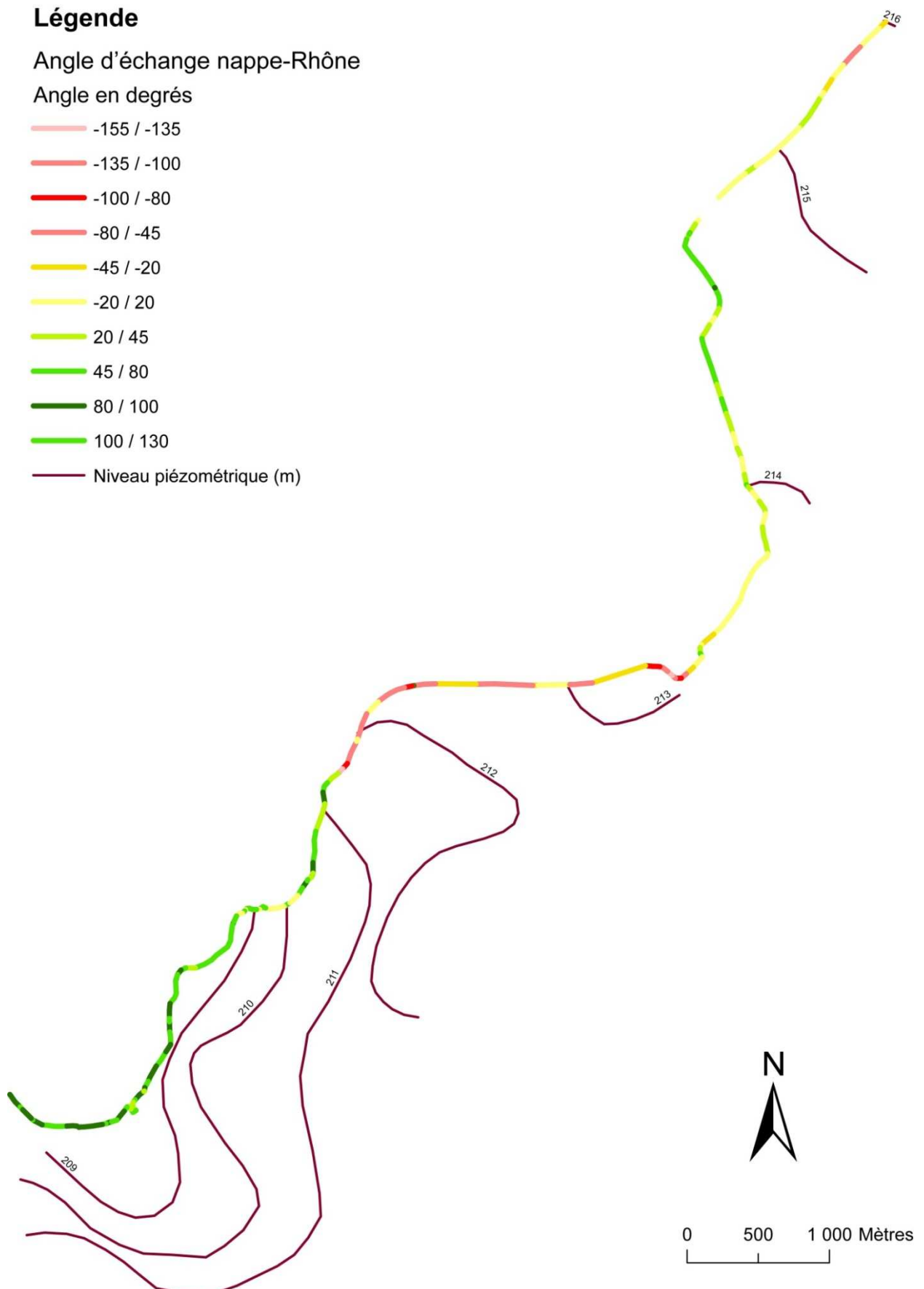
Carte 7 : Angle et sens d'écoulement de la nappe en rive gauche entre Saint-Genix-sur-Guiers et les Rubattiers



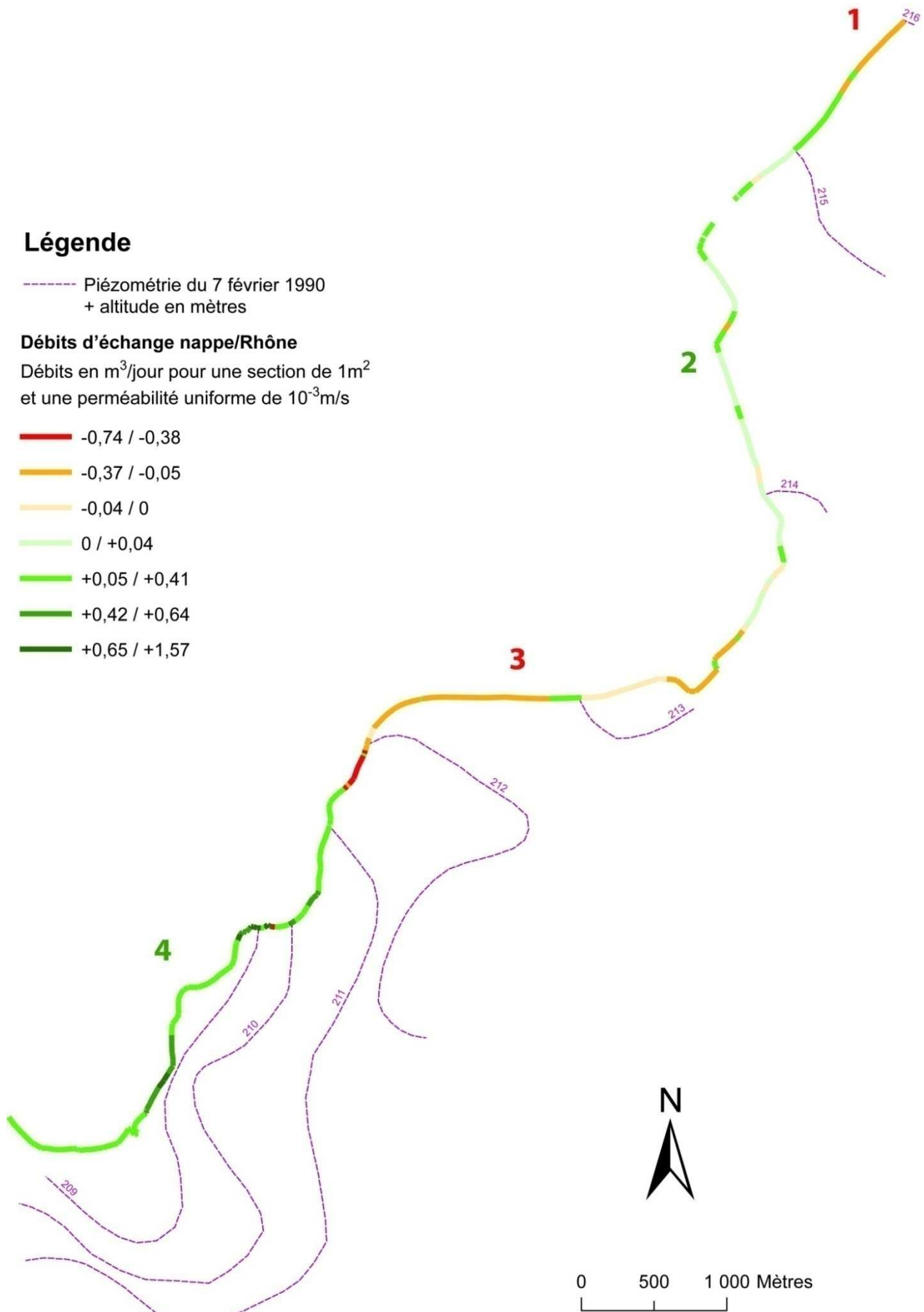
Carte 8 : Représentation du niveau piézométrique de la nappe entre Saint-Genix-sur-Guiers et Les Rubattiers



Carte 9 : Gradients de nappe entre Saint-Genix-sur-Guiers et Les Rubattiers

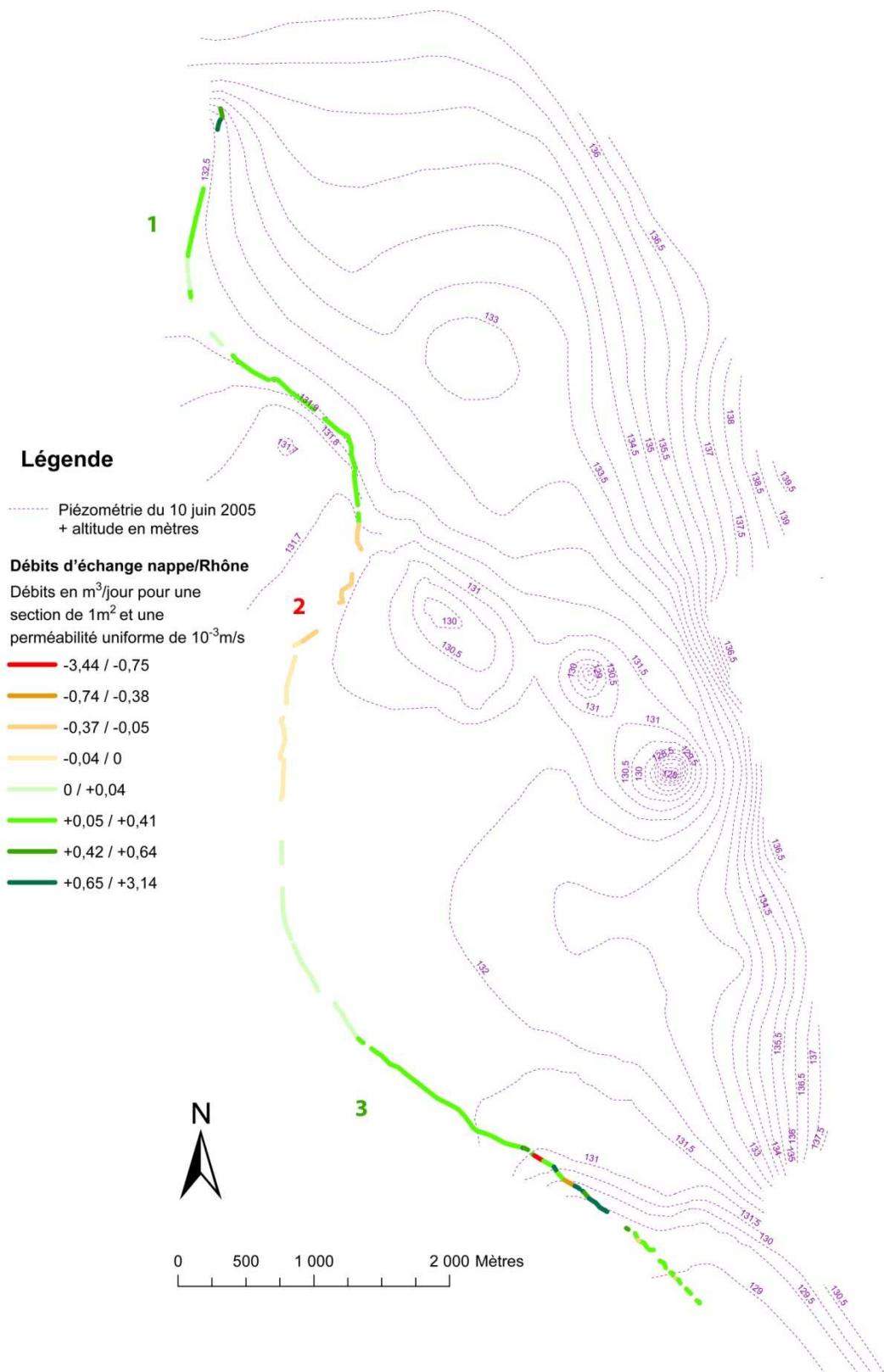


Carte 10 : Valeur de l'angle d'échange entre la nappe et le Rhône à Brégnier-Cordon



Carte 11 : Représentation des débits d'échange nappes/Rhône à Brégnier-Cordon





Cette dernière opération permet d'obtenir une couverture représentant le sens d'écoulement de la nappe au niveau des berges du Rhône. Si la nappe s'écoule approximativement vers le sud-ouest l'angle est d'environ 235° (dans les tons roses sur la carte), si elle s'écoule approximativement vers le nord-ouest l'angle est d'environ 315° (dans les tons violet sur la carte). Le sens d'écoulement de la nappe est le même que celui obtenu après interprétation d'une carte piézométrique : c'est-à-dire perpendiculaire aux isopièzes dans le sens de la pente. Le TIN de la nappe est construit à partir d'une carte piézométrique sur laquelle nous avons dessiné des courbes piézométriques intermédiaires qui ne changent pas le sens d'écoulement. Elles permettent d'affiner la résolution du TIN et d'éviter les secteurs à pente nulle pour lesquels il n'y a pas de valeur d'angle. Malgré cela, il reste au nord du linéaire de berge sur la Carte 7 un segment sans valeur.

Pour la construction du TIN le cône de rabattement induit par le pompage situé à Saint-Genix-sur-Guiers a été pris en compte. On observe ce cône de rabattement sur la Carte 8. Cette carte est générée à partir des valeurs d'altitude du TIN. Il est ainsi possible de créer une carte du niveau piézométrique de la nappe, en 2 ou en 3 dimensions, représenté selon un dégradé de bleu, les zones les plus élevées en bleu foncé et les plus basses en bleu clair. On peut aussi construire une carte des gradients de nappe avec en vert les plus faibles et en rouge les plus forts (Carte 9).

- **Représentation de l'angle d'échange nappes/Rhône à Brégnier-Cordon**

L'angle d'échange nappes/Rhône est obtenu par soustraction de l'angle marquant le sens d'écoulement de la nappe à celui du Rhône (Carte 10). On observe en jaune les secteurs où l'écoulement de la nappe et du Rhône sont quasiment parallèles (de 20° à -20°) et donc les échanges nuls ; en vert les secteurs où le Rhône draine la nappe (en vert foncé les secteurs où le drainage est potentiellement le plus fort pour des angles de 80° à 100°) ; en rouge les secteurs où le Rhône alimente la nappe (en rouge foncé les secteurs où l'alimentation est potentiellement la plus forte pour des angles de -80° à 100°).

- **Représentation des débits d'échange nappes/Rhône à Brégnier-Cordon**

Il est possible de représenter les débits de nappe à l'interface nappes/Rhône à l'aide des gradients contenus dans le TIN de l'aquifère en utilisant la Loi de Darcy. Ils sont ici exprimés en m<sup>3</sup> par jour pour une section de 1m<sup>2</sup> avec une perméabilité uniforme de 10<sup>-3</sup>m/s (Carte 11). Sur la Carte 11 le signe moins (-) indique une alimentation de la nappe par le fleuve et le signe plus (+) un drainage de la nappe par le fleuve. L'intensité du débit dans le cas d'une alimentation est représentée de façon croissante selon un dégradé du orange vers le rouge ; dans le cas d'un drainage selon un dégradé du vert clair au vert foncé. Cette carte montre des résultats conformes à ceux décrits dans le rapport phase 1 (Michal, 1988 ; Rampnoux, 1992) pour une piézométrie basses-eaux, à savoir (les chiffres en couleurs renvoient à la Carte 11) :

- **1** : le Rhône alimente la nappe au nord du secteur des Rubattiers ;
- **2** : le Rhône draine la nappe au sud du secteur des Rubattiers ;
- **3** : le Rhône alimente la nappe entre Leschaux et le canal de dérivation au nord du secteur de Saint-Genix-sur-Guiers ;
- **4** : le Rhône draine la nappe au sud du secteur de Saint-Genix-sur-Guiers.

Ces résultats sont donc conformes avec des études hydrogéologiques réalisées précédemment sur la même piézométrie. Leur précision est supérieure aux hypothèses de Schindler (2006) qui ne considéraient que la tendance générale de drainage de la nappe par le Rhône sur cette zone.

- **Représentation des débits d'échange nappes/Rhône à Péage-de-Roussillon**

Ces résultats sont présentés sur la Carte 12. La légende est la même que sur la Carte 11. On constate à nouveau que les résultats sont conformes aux hypothèses de Schindler (2006) et aux conclusions de BURGEAP (2007a ; 2007b) :

- **1** et **3** : le Rhône draine la nappe ;
- **2** : le Rhône alimente la nappe (Cette alimentation est induite par des pompages qui soustraient de l'eau à la nappe).

On observe sur ce secteur de nombreux segments blancs sur le linéaire du Rhône. Il conviendra donc d'affiner la construction du TIN pour obtenir des résultats continus.

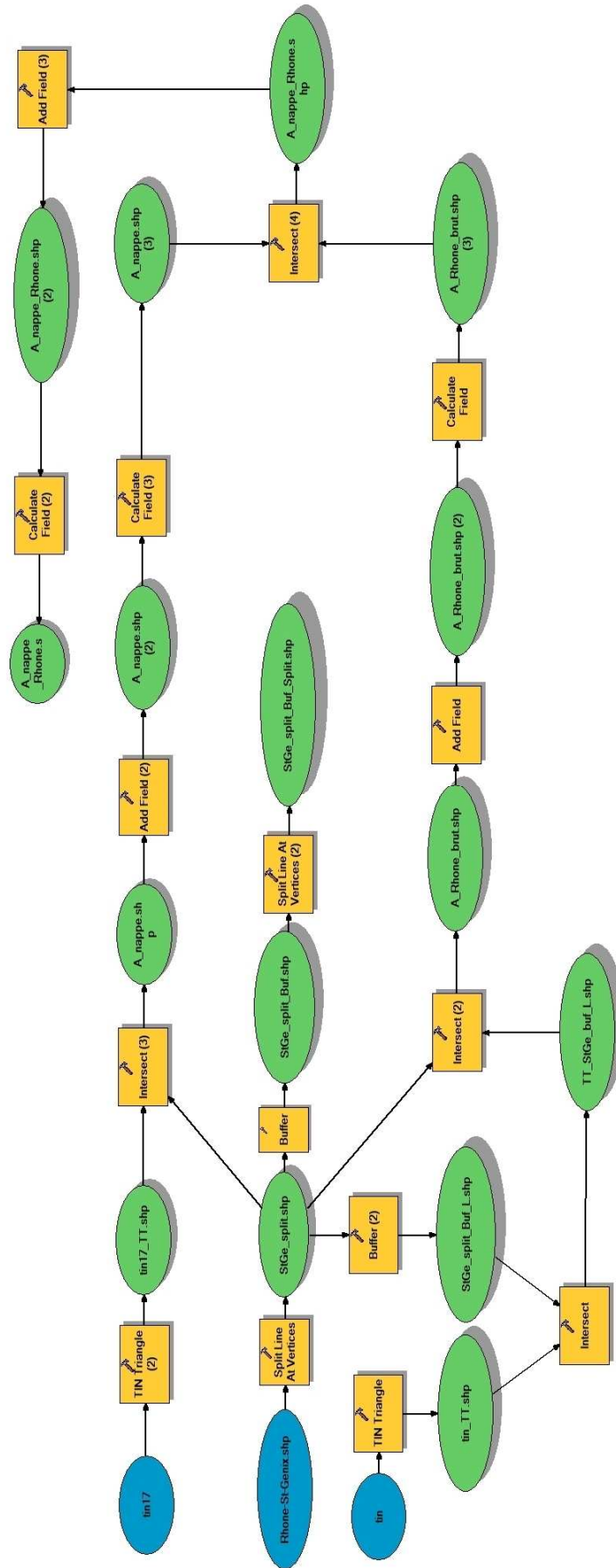


Figure 7 : Modèle graphique pour l'analyse spatiale sous ArcGIS 9.2.

### 2.1.3.2. Vers une automatisation de l'analyse spatiale

Une fois la méthode d'analyse spatiale sous SIG pour l'identification et la quantification des échanges validée, il sera possible d'automatiser une partie des calculs. En effet, ARCGIS (version 9.2.) permet la construction de modèles dynamiques dans lesquels il est possible d'enchaîner les différents traitements et calculs, à partir des fonctions disponibles, sur les couvertures utilisées. Ainsi, à partir des « shape file » ou des TIN de départ, il est possible d'obtenir les couvertures de sortie en exécutant le modèle construit. Le modèle pourra être utilisé sur d'autres secteurs en changeant simplement les données d'entrée. Le modèle dynamique pour la représentation des échanges nappes/Rhône est en cours de construction (Figure 7).

### 2.1.4. Bilan et perspectives sur les échanges nappes/Rhône

Cette dernière partie présente un bilan et les perspectives concernant la partie identification et quantification hydrophysique des échanges nappes/Rhône.

L'approche d'identification et de quantification des échanges nappes/Rhône par analyse spatiale sous SIG a été développée et testée conjointement sur les secteurs de Brégnier-Cordon, comme nous venons de le voir, et de Péage-de-Roussillon. Reste à savoir si les résultats obtenus sont comparables à ceux déterminés manuellement à partir de la Loi de Darcy. Pour ce faire, un test de corrélation a été effectué entre les valeurs obtenues manuellement et celles obtenues par analyse spatiale. La Figure 8 présente la répartition des 2 séries de valeurs (points bleus) et en noir la droite de régression avec son équation et le coefficient de détermination  $R^2$ . Ici, la corrélation entre les deux séries de valeurs est significative ( $r=0,79$ ,  $n=11$ ,  $p<0,05$ ). On peut donc conclure que l'on obtient des résultats similaires avec les deux méthodes.

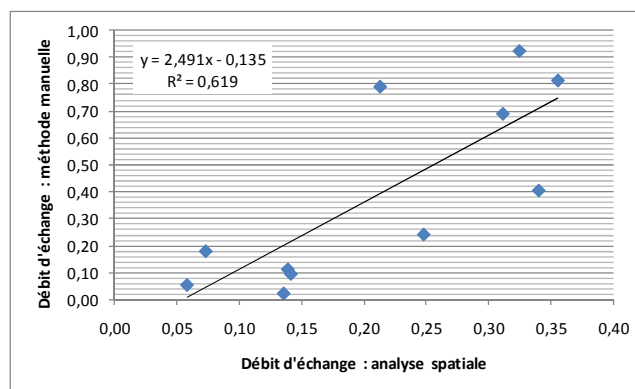


Figure 8 : Comparaison des débits d'échanges obtenus manuellement avec ceux obtenus par analyse spatiale avec la Loi de Darcy sur les secteurs de Brégnier-Cordon et péage-de-Roussillon ( $n=11$ )

Il est possible avec les résultats de l'analyse spatiale de proposer un bilan des échanges sur les portions d'aquifère des deux secteurs étudiés. Ce bilan sera comparé avec ceux déjà obtenus pour Brégnier-Cordon (rapport Phase 1) et Péage-de-Roussillon (BURGEAP, 2007a ; 2007b).

- **Bilan sur Brégnier-Cordon** (Tableau 5)

Pour Brégnier-Cordon, la longueur de berge étudiée (rive gauche) est d'environ 12400m. On observe à partir des résultats de l'analyse spatiale exprimés en  $m^3/j/m^2$  (pour une perméabilité uniforme de  $10^{-3}m/s$ ), que :

- sur environ 4070m le fleuve alimente la nappe à raison de  $410m^3/jour$  ( $\sim 0,005m^3/s$ ) ce qui correspond à un apport total de  $101m^3/jour/km$  ( $\sim 0,001m^3/s/km$ ) ;

- sur environ 8340m le fleuve draine la nappe à raison de  **$1741m^3/jour$**  ( $\sim 0,020m^3/s$ ) ce qui correspond à un apport total de  **$209m^3/jour/km$**  ( $\sim 0,002m^3/s/km$ ). Si l'on pondère ces valeurs en fonction de l'angle d'écoulement nappe/Rhône, le fleuve draine la nappe à raison de  **$1416m^3/j$  ( $170m^3/J/km$ )**.

Notre précédente estimation sur les secteurs de Saint-Genix-sur-Guiers et des Rubattiers (rapport phase 1), donnait des valeurs d'alimentation du fleuve par la nappe correspondant à une valeur de  **$1071m^3/j$  soit**

**128m<sup>3</sup>/j/km** (pour une longueur totale d'environ 8340m). Ces valeurs, bien qu'inférieures aux précédentes, restent du même ordre de grandeur.

Si l'on considère, par hypothèse, une épaisseur utile de 4m et des perméabilités non-uniformes (issues d'essais de pompage ou de la littérature) affectées respectivement à chacun des segments de berge, on obtient à partir des valeurs pondérées un apport de nappe au Rhône compris entre **32 373 et 61 946m<sup>3</sup>/j** (soit pour les 8340m de berge étudiée respectivement **3882 et 7428m<sup>3</sup>/j/km** ou **0,37 et 0,72m<sup>3</sup>/s**).

Brégnier-Cordon Rive gauche PK 111 à 99	Apports moyens de la nappe au Rhône		
	m <sup>3</sup> /j	m <sup>3</sup> /j/km	m <sup>3</sup> /s
Méthode manuelle	1071	128	0,012
Analyse spatiale	1741	209	0,02
Analyse spatiale pondérée avec hypothèses	47 160	5 655	0,55

Tableau 5 : Apports moyens de la nappe au Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon

Péage-de-Roussillon Rive gauche PK 51 à 63	Apports moyens de la nappe au Rhône		
	m <sup>3</sup> /j	m <sup>3</sup> /j/km	m <sup>3</sup> /s
Méthode manuelle	1475	238	0,017
Analyse spatiale	1172	188	0,013
Modèle physique BURGEAP	172 800	27 870	2
Analyse spatiale avec hypothèses	82 040	13 232	0,95

Tableau 6 : Apports moyens de la nappe au Rhône sur le secteur de Péage-de-Roussillon

- **Bilan sur Péage-de-Roussillon** (Tableau 6)

Pour Péage-de-Roussillon, la longueur de berge étudiée (rive gauche) est d'environ 8000m. On observe selon les résultats de l'analyse spatiale que :

- sur environ 1800m le fleuve alimente la nappe à raison de 412m<sup>3</sup>/jour (~0,004m<sup>3</sup>/s) ce qui correspond à un apport total de 224m<sup>3</sup>/jour/km (~0,003m<sup>3</sup>/s/km).

- sur environ 6200m le fleuve draine la nappe à raison de **1172m<sup>3</sup>/jour** (~0,013m<sup>3</sup>/s) ce qui correspond à un apport total de 188m<sup>3</sup>/jour/km (~0,002m<sup>3</sup>/s/km).

Les calculs manuels réalisés avec la Loi de Darcy sur Péage-de-Roussillon donnent des valeurs d'alimentation du fleuve par la nappe comprises entre 940 et 2450m<sup>3</sup>/jour soit une valeur moyenne de **1475m<sup>3</sup>/jour** proche de celle trouvée précédemment pour 6200m de berge.

BURGEAP estime d'après son modèle que l'alimentation totale du Vieux-Rhône par la nappe sur le secteur est d'environ **2m<sup>3</sup>/s**, rives droite et gauche confondues, ce qui représente **172 800m<sup>3</sup>/jour** pour une perméabilité moyenne comprise entre 4.10<sup>-3</sup> et 10<sup>-2</sup>m/s et une surface utile que nous fixerons par hypothèse à 10m (le fleuve est ici plus large et plus profond qu'à Brégnier-Cordon). Corrigé selon ces deux derniers paramètres l'apport moyen de la nappe au fleuve déterminé par analyse spatiale est compris entre **46 880 et 117 200m<sup>3</sup>/jour** (soit **0,54m<sup>3</sup>/s et 1,36m<sup>3</sup>/s**). Ces valeurs sont inférieures à celles calculées par le modèle. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que nos calculs ne tiennent pas compte des apports en rive droite. Toutefois, la majorité des apports se fait en rive gauche.

- **Conclusion**

Les différentes approches utilisées montrent 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. D'autres approches, comme celle de Kresic, semblent trop dépendantes de la précision de données d'entrée (ex : altitudes du substratum) ; données qu'il ne sera pas possible d'obtenir sur tous les secteurs.

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 ;
- de cotes d'altitudes (lignes d'eau) du fleuve, des îlons ou des contre-canaux à la même date ;
- des champs de perméabilités précis pour déduire la perméabilité à l'interface nappe/rivière ;
- des profils bathymétriques et des largeurs du fond du fleuve, des îlon ou des contre-canaux pour estimer au mieux la surface d'échange utile avec la nappe [surface utile = (niveau piézométrique - altitude du fond) + portion de largeur en cas d'alimentation par le fond].

Les calculs des débits et des gradients de nappe réalisés sur Brégnier-Cordon et Péage-de-Roussillon sont empreints d'incertitudes compte-tenu de l'imprécision de données. En effet, les piézométries dont nous disposons ne sont pas 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 pour la surface d'échange utile.

Le Tableau 7 repositionne le travail déjà effectué sur l'ensemble du cours du fleuve.

Localisation	Secteurs (chutes CNR)	Estimation de l'apport de la nappe au Rhône (m <sup>3</sup> /j)	
		Rive gauche	Rive droite
Haut-Rhône	Génissiat	Attente des données CNR courant 2008	
	Seysssel		
	Chautagne-Lavours	En cours (Modèle BURGEAP, attente des données CNR courant 2008)	
	Belley	Attente des données CNR courant 2008	
	Brégnier-Cordon	Apports de la nappe au fleuve du PK 111 à 99 en m <sup>3</sup> /j : [32 373 ; 61 946] : Autres PK en cours	En cours
	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	Apports de la nappe au fleuve du PK 51 à 63 en m <sup>3</sup> /j : [46 880 ; 117 200] : Autres PK en cours	En cours
	Saint-Vallier		
	Bourg-Lès-Valence		
Rhône-Aval	Beauchastel		
	Baix-Logis-Neuf		
	Montélimar		
	Donzère-Mondragon	En cours (Thèse, attente des données CNR courant 2008)	
	Caderousse		
	Avignon		
	Vallabrègues		
	Pallier d'Arles 1		
	Pallier d'Arles 2		
Pallier d'Arles 3			

Tableau 7 : Bilan de la quantification des échanges nappes/Rhône

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.

- **Perspectives**

Cette méthode est encore perfectible. Il est en effet possible d'améliorer les calculs automatiques. Dans les semaines à venir, il conviendra :

- d'affiner la génération des TIN pour supprimer les segments blancs sur les berges ;
  - de généraliser son utilisation quelque soit la berge du fleuve étudiée (actuellement, nous ne l'avons testé que sur la rive gauche) ;
  - de généraliser son utilisation quelque soit l'orientation du sens d'écoulement du fleuve (actuellement, nous ne l'avons testé que pour un écoulement orienté globalement nord sud) ;
  - d'automatiser l'enchaînement des fonctions d'analyse spatiale pour un traitement plus rapide ;
  - 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.

Il conviendra aussi 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.

Le traitement des portions d'aquifère restantes sur Brégnier-Cordon, pour lesquelles nous avons déjà des débits d'échange calculés manuellement, est en cours. Les aquifères de Chautagne-Lavours et de Donzère-Mondragon seront traités dans les mois à venir car nous disposons d'ores et déjà des piézométries. De plus, à chaque fois qu'un secteur aura été modélisé (ex : Chautagne-Lavours) les résultats seront comparés.

Dans l'optique du travail sur les variations saisonnières il conviendra d'obtenir des cartes piézométriques et des lignes d'eau à des dates caractéristiques (ex : basses-eaux, moyennes-eaux, hautes-eaux). Un travail sur les effets potentiels dû aux évolutions climatiques fondés sur les résultats de scénarios (ex : Météo France) pourra utiliser ces dates caractéristiques pour estimer les effets prévus par ces scénarios.

- **Transposabilité de l'analyse spatiale**

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.





## 2.2. Métrique hydrobiologique : végétation aquatique

La phase 2 du projet ZABR vise à réaliser un premier diagnostic qualitatif des échanges sur un secteur du Haut-Rhône, Brégnier-Cordon, avec visualisation sur support cartographique des résultats.

Ce chapitre vise à quantifier les apports d'eau souterraine et leur origine à l'aide des végétaux aquatiques. Les principes de la méthode utilisée et le protocole mis en œuvre dans le cadre de cette étude sont successivement décrits. Dans une troisième partie, les résultats sont présentés, interprétés et discutés. Pour finir, les propositions concernant le choix du secteur test à l'aval de Lyon sont présentées et justifiées.

### 2.2.1. Principes de la méthode de diagnostic (Amoros et al., 2000, Rivoire et Bornette, 2006)

#### 2.2.1.1. Principes généraux

Le but de cette méthode est de fournir, à partir de caractéristiques écologiques (composition des communautés végétales aquatiques) des informations sur le fonctionnement des zones humides. Les groupements végétaux présents dans une zone humide peuvent être associés au degré de trophie des écosystèmes et à l'existence d'apports d'eau souterraine.

Le niveau de ressources disponibles (= trophie) dans le milieu joue un rôle primordial sur la structure et la dynamique des communautés végétales, en conditionnant directement leur composition. Pour des niveaux de ressources élevés, les espèces de grande taille et à croissance rapide sont généralement les plus compétitives, et tendent à dominer les peuplements. Lorsque le niveau de ressources est faible, les espèces capables de supporter ce stress (croissance lente, conservation des ressources, taille plutôt faible) sont majoritaires. Par conséquent, les espèces aquatiques ne sont pas distribuées de manière aléatoire dans les écosystèmes et l'on peut associer la plupart des espèces à des niveaux de ressources donnés.

Les apports d'eaux souterraines agissent souvent sur la qualité de l'eau dans la zone humide, et de ce fait contribuent à l'organisation des communautés végétales. Si les eaux souterraines sont pauvres en nutriments, elles peuvent maintenir des conditions oligotrophes dans le milieu aquatique, même dans un contexte environnemental *a priori* défavorable. De surcroît, parce qu'elles sont sténothermes et fraîches, elles maintiennent des températures plus froides dans la zone humide, limitant la production végétale et notamment la prolifération algale. Elles contribuent aussi à limiter les phénomènes d'anoxie grâce au renouvellement des eaux engendré par le renouvellement permanent de l'eau interstitielle par le soutirage de la nappe. Le débit de ces apports varie selon les altitudes des nappes souterraines, le degré de colmatage du substrat, et selon les caractéristiques physiques de la zone humide, notamment sa pente et sa capacité hydraulique.

Le diagnostic du fonctionnement de la zone humide repose sur les exigences écologiques des espèces végétales aquatiques qui s'y développent. Les exigences des espèces en termes de trophie et d'alimentation en eaux souterraine ont été documentées à partir de données collectées dans un lot de 40 zones humides du Haut-Rhône et de l'Ain. Ces données ont été complétées dans certains cas par des données bibliographiques. Quatre niveaux de trophie sont définis dans cette méthode ; oligotrophe pour des teneurs moyennes en  $[N-NH_4^+]$  et  $[P-PO_4]$  < 40 µg/L, mésotrophe pour des teneurs moyennes comprises entre 40 et 80 µg/L, eutrophe pour des teneurs entre 80 et 250 µg/L et hyper-eutrophe pour des teneurs supérieures.

Les préférences sont définies sur la base de l'existence de relations significatives entre l'abondance des espèces et 1) les paramètres du milieu indicateurs du niveau de trophie (phosphates, ammonium) et 2) la variabilité saisonnière de la température de l'eau, indicatrice de l'importance relative de l'alimentation en eau souterraine. Les données utilisées sont constituées par des relevés floristiques collectés de 1993 à 1999 sur plus de 40 anciens chenaux de l'Ain et du Rhône. Les caractéristiques physico-chimiques des eaux des anciens chenaux de l'Ain et du Rhône ont été mesurées au cours des années 1993 à 1996 (12 campagnes mensuelles de relevés au minimum pour les sites du Rhône, 24 campagnes mensuelles de relevés au minimum pour les sites de l'Ain). Les caractéristiques physico-chimiques des sédiments (teneurs en phosphates) ont été mesurées à raison d'un prélèvement au minimum par zone floristique dans les zones

humides de l'Ain et du Rhône de 1998 à 2000. Les profils écologiques n'ont été réalisés que pour les espèces présentes dans cinq zones humides au minimum (soit plus de 10% des écosystèmes échantillonnés). Les corrélations, tests statistiques et représentations graphiques ont été réalisées avec le logiciel JMP Statistical Discovery Software.

#### 2.2.1.2. Les exigences des espèces vis-à-vis du niveau de trophie

De manière théorique, la distribution des espèces végétales aquatiques est très fortement corrélée au degré de trophie des écosystèmes (Carbiener *et al.*, 1990 ; Robach *et al.*, 1996). Dans les eaux douces, le degré de trophie est en général principalement lié à la quantité d'azote et de phosphore présent dans l'eau. Le phosphore est souvent la ressource limitante en eau douce, l'azote agissant sur les communautés végétales principalement au travers de son action phytotoxique sous sa forme ammoniacale (Onaindia *et al.*, 1996 ; Britto *et al.*, 2001).

La teneur en nutriments dépend du type d'alimentation en eau de la zone humide (eaux provenant de nappes profondes, eaux d'infiltration du cours d'eau, eaux de surface), et de leur qualité. Des teneurs excessives en nutriments témoignent généralement d'une activité anthropique, et ceux-ci peuvent être véhiculés par les nappes phréatiques, par les eaux de ruissellement et les effluents (phosphore et nitrates), ou produits lors de la minéralisation de la matière organique (azote ammoniacal).

La distribution de chaque espèce pour chaque paramètre (ammonium, phosphate), si elle représente une tendance significative, permet de déterminer les classes de ces paramètres pour lesquelles le développement de l'espèce est significativement supérieur aux classes adjacentes, autrement dit, ses préférences écologiques.

Les éléments phosphore et azote ammoniacal ont été analysés séparément, mais ils ont ensuite été regroupés pour bâtir un indice d'eutrophisation « unique ».

En prenant l'exemple du phosphore, la démarche utilisée est la suivante. Les données utilisées concernent 41 lônes de l'Ain et du Rhône. Dans un premier temps, la relation entre l'abondance des espèces et la teneur en phosphates ( $[PO_4^{3-}]$ ) mesurée dans l'eau (valeurs moyennes portant sur au minimum 12 relevés mensuels), et dans le sédiment (valeurs moyennes résultant de la mesure de la concentration du phosphore total dans des échantillons de sédiments collectés au centre du chenal de chaque zone humide, à raison d'au moins 1 point de prélèvement par zone floristique) a été mesurée. Ces deux paramètres ont été standardisés (pour qu'ils aient un poids équivalent) et ajoutés pour fournir un indice global d'eutrophisation de la zone humide par le phosphore. Les valeurs ont été log-transformées pour maximiser la dispersion des points sur le gradient de charge phosphorée. Les valeurs de cet indice « phosphore » ont été divisées en 5 classes regroupant les zones humides présentant des valeurs proches et en optimisant l'homogénéité inter-classes des effectifs. Les 5 classes sont donc constituées en moyennes de 8 zones humides considérées comme proches pour la teneur globale en phosphore.

Dans un deuxième temps, l'abondance moyenne de chaque espèce par classe peut alors être calculée, et la relation entre la distribution de l'espèce et la teneur en phosphore a alors été testée (pour plus de détails sur les méthodes utilisées, voir Rivoire & Bornette 2006).

La même démarche a été appliquée pour l'azote, en se focalisant sur l'azote ammoniacal, cité dans la bibliographie, comme le principal facteur d'eutrophisation des eaux avec le phosphore (Robach *et al.*, 1996 ; Thiebaut et Muller, 1995, 1999). La teneur en azote du sédiment n'a pas été prise en compte, car cette teneur n'est pas liée de manière simple à l'eutrophisation, mais plutôt à la production et à l'accumulation de matière organique. En effet, la concentration en azote dans le sédiment est très fortement corrélée à la teneur en carbone organique, et témoigne par conséquent plus de l'influence des processus allogènes dans l'écosystème, que de son statut trophique (Rostan *et al.*, 1987 ; Schwarz *et al.*, 1996). Seule la concentration en azote ammoniacal  $[NH_4]$  de l'eau a été utilisée en représentant le logarithme pour un meilleur étalement des valeurs. 46 zones humides liées aux alluvions de l'Ain et du Rhône ont été intégrées dans cette analyse (les autres zones humides n'ayant pas de données en  $[NH_4]$ ). De la même façon que précédemment, les écosystèmes ont ensuite été répartis en 4 classes et le caractère non aléatoire de la distribution des abondances moyennes de chaque espèce dans ces différentes classes a été testé.

### 2.2.1.3. Les exigences des espèces vis-à-vis de l'intensité des apports phréatiques

L'apport d'eaux souterraines conditionne fortement les communautés végétales. L'apport d'eaux froides et bien oxygénées limite la production végétale et les phénomènes de compétition. Ainsi, à quantité de nutriments analogue, des eaux souterraines fraîches peuvent maintenir des milieux moins productifs, où peuvent se développer des espèces moins compétitives. L'intensité relative de cette alimentation a été estimée par la variabilité thermique de la zone humide. En effet, lorsque le renouvellement des eaux dans la zone humide est important, ces apports d'eaux phréatiques sténothermes froides vont limiter le réchauffement estival et diminuer la variabilité thermique de l'habitat.

Pour mesurer la variabilité thermique, il est important de travailler sur un cycle annuel complet de relevés, répartis entre toutes les saisons. Les 43 îlons de l'Ain et du Rhône traitées dans cette analyse ont, par conséquent, fait l'objet d'au moins 12 campagnes de prélèvements distribuées sur un cycle annuel. Cependant, certaines ayant été suivies pendant deux cycles annuels ou plus, nous avons en premier lieu vérifié que le nombre de valeurs n'influait pas la variance thermique des sites. D'autre part, la variance étant corrélée à la température de l'eau, pour éviter un effet confondant, l'analyse a été réalisée avec le coefficient de variation de la température (ratio de la variance sur la moyenne des températures).

En adoptant la même démarche que pour les paramètres trophique, les zones humides ont été réparties en 5 classes suivant la valeur du coefficient de variation des températures. L'analyse a alors consisté à rechercher l'existence d'une corrélation significative entre l'abondance de l'espèce et les différentes classes de thermie. Les traitements statistiques suivent le même protocole que celui développé pour l'indice de niveau de trophie (Rivoire et Bornette, 2006).

### 2.2.1.4. Exemple de résultat sur deux espèces végétales à exigences écologiques divergentes

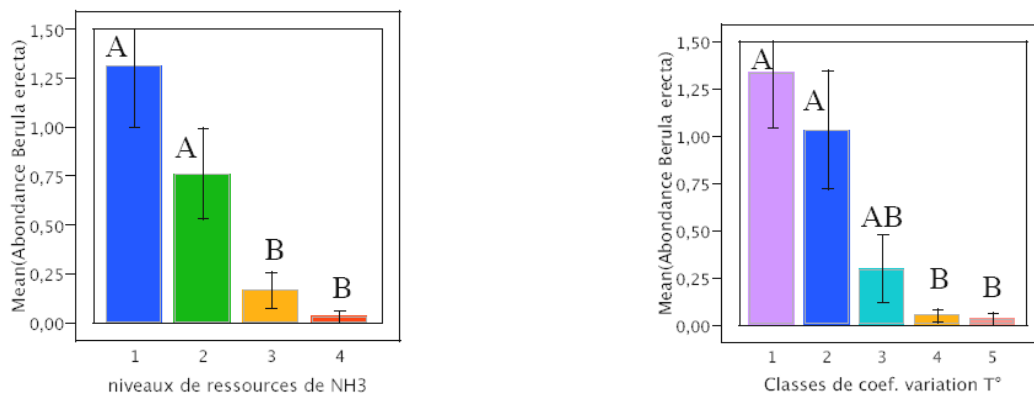


Figure 9 : Abondance moyenne de la *Berula erecta* selon la teneur en NH<sub>3</sub> (graphique de gauche) et l'amplitude des variations thermiques (graphique de droite)

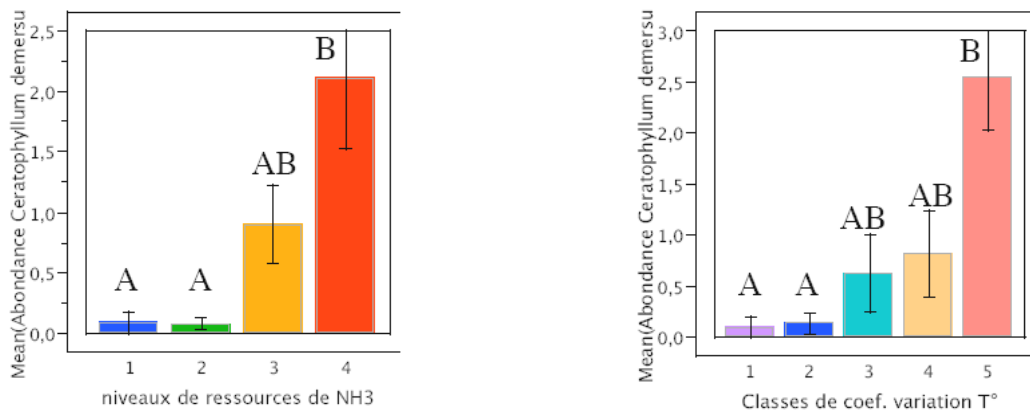


Figure 10 : Abondance moyenne du *Ceratophyllum demersum* selon la teneur en NH<sub>3</sub> (graphique de gauche) et l'amplitude des variations thermiques (graphique de droite).

Les indices de niveau de trophie et d’apports d’eaux souterraines sont complémentaires, comme le montre l’exemple de *Berula erecta*, espèce inféodée aux milieux oligo-mésotrophes à faible coefficient de variation thermique (Figure 9), et de *Ceratophyllum demersum*, espèce liée aux milieux eutrophes à forts coefficients de variation thermique (Figure 10).

Ces résultats permettent de construire la table des exigences écologiques des espèces, qui est utilisée dans le calcul de deux indices, un indice d’eutrophisation relative de la zone humide, et un indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques.

### 2.2.1.5. Méthode de calcul des indices de niveau de trophie et de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques

Pour obtenir l’indice de niveau de trophie, on multiplie l’abondance moyenne de chaque espèce présente dans le relevé avec son code indicateur pour chaque classe de trophie (oligotrophe, mésotrophe, eutrophe et hyper-eutrophe). On effectue ensuite la somme de ces produits pour chaque classe de trophie (Figure 11). Ces valeurs, exprimées en pourcentages, permettent d’estimer le niveau de trophie : la classe présentant le score le plus élevée est considérée comme celle indiquant le niveau de trophie du relevé. Lorsque les scores de deux classes sont très proches, on garde les deux.

Espèces	Abondance	Niveau de trophie			
		Oligotrophe	Mésotrophe	Eutrophe	Hyper-eutro
<i>Lythrum salicaria</i>	0,18	2	3	2	0,5
<i>Phragmites australis</i>	0,54	1	2	2	3
<i>Polygonum hydropiper</i>	0,89	2	2	2	1
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	0,36	3	2	1	1
<i>Zannichellia palustris</i>	0,18	0	2	2	0

×

	Niveau de trophie			
	Oligotrophe	Mésotrophe	Eutrophe	Hyper-eutro
	0,36	0,54	0,36	0,09
	0,54	1,07	1,07	1,61
	1,79	1,79	1,79	0,89
	1,07	0,71	0,36	0,36
	0,00	0,36	0,36	0,00
Somme	3,75	4,46	3,93	2,95
%	24,85	29,59	26,04	19,53

Figure 11 : Exemple de calcul de l’indice de trophie, sur la station Petite Anse des Balmes (Chanay)

Cette station est mésotrophe.

Pour obtenir l’indice de fréquence relative des espèces d’eaux phréatiques, on somme les valeurs indicatrices (oui ou non) des espèces présentes dans un relevé donné (Tableau 8). Cette somme détermine l’intensité des apports phréatiques selon 4 classes (important, moyen, faible, nul).

Les apports sont considérés importants si la somme de la variable « Oui » est strictement supérieure à 9.

Les apports sont considérés moyens si la somme de la variable « Oui » soustraite de la somme de la variable « Non » et de 1 est strictement supérieur à 4.

Les apports sont considérés faibles si la somme de la variable « Oui » soustraite de la somme de la variable « Non » et de 1 est strictement supérieur à 0.

Les apports sont estimés nuls si la somme de la variable « Oui » soustraite de la somme de la variable « Non » et de 1 est égal à 0.

Espèces	Abondance	Alimentation	
		OUI	NON
<i>Lythrum salicaria</i>	0,18	0	0
<i>Phragmites australis</i>	0,54	0	0
<i>Polygonum hydropiper</i>	0,89	0	0
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	0,36	2	0
<i>Zannichellia palustris</i>	0,18	1	0
Somme		3	0

Tableau 8 : Exemple de calcul de l’indice de fréquence relative des espèces d’eaux phréatiques, sur la station Petite Anse des Balmes (Chanay)

Pour cette station, l’indice de fréquence relative des espèces d’eau phréatiques est faible.

### 2.2.2. Méthodologie et caractéristiques des relevés de végétation

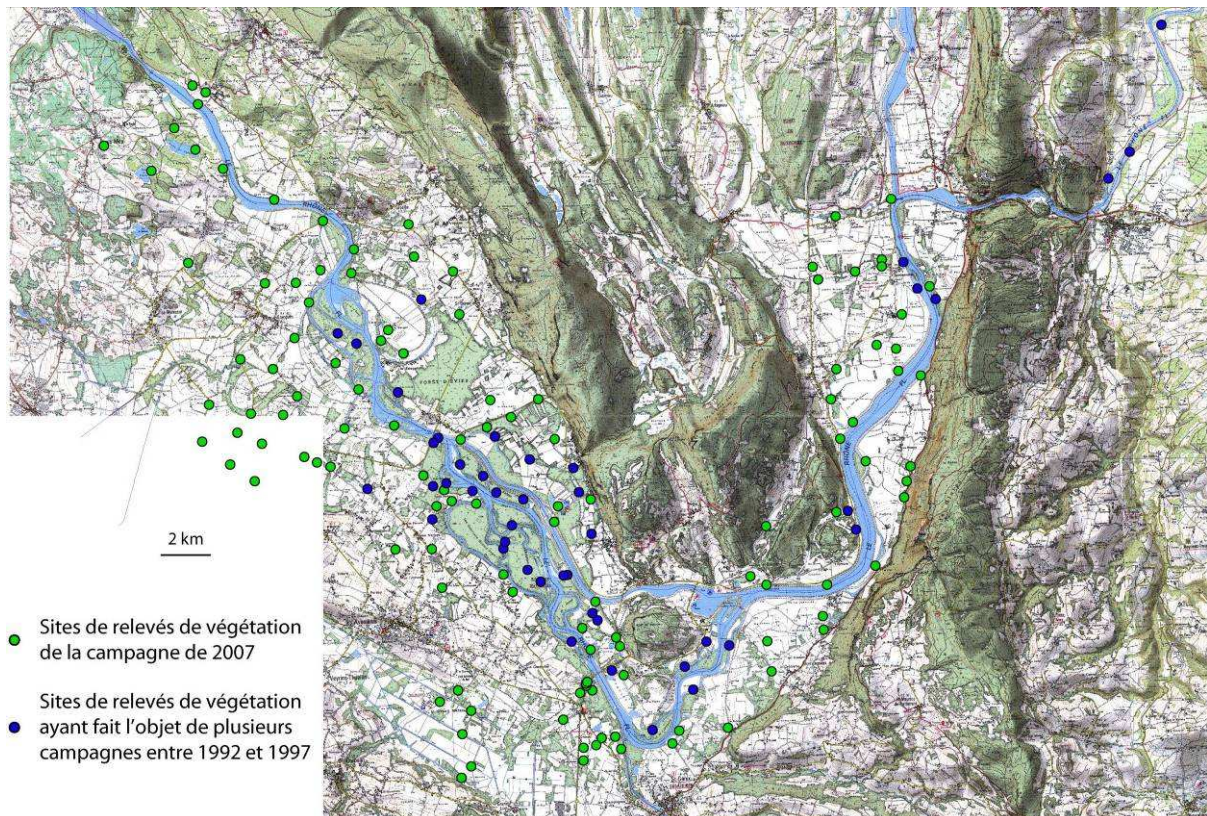
En ce qui concerne le secteur de Brégnier-Cordon, les données pré-existantes, collectées lors d'une précédente étude (Henry et Amoros, 1999), concernaient 41 zones humides fluviales localisées à proximité du cours d'eau. Le nombre de relevés moyens par zone humide était de 14. Sur chaque zone humide, des relevés de végétation aquatique quantitatifs et régulièrement espacés avaient été effectués afin de déterminer la composition et l'abondance relative des espèces.

Ils sont réalisés sur des transects de 2 m de large régulièrement espacés (de 25 à 100 m suivant la dimension du milieu, au minimum 3 transects pour les milieux de petite taille) et disposés perpendiculairement à l'axe d'écoulement de l'ancien chenal. Les espèces végétales présentes sont identifiées sur chacun des transects, et leur abondance est estimée à l'aide du double indice d'abondance et de sociabilité de Braun-Blanquet (1932, Tableau 9). Le premier indice présente l'abondance relative de chaque espèce sur le transect (pourcentage de recouvrement relatif de la surface du transect) et le second indice décrit le mode de répartition de l'espèce sur le transect.

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

Tableau 9 : Les indices de la méthode de Braun-Blanquet

La localisation de ces zones humides ne permettait pas une analyse fine de l'origine et de la quantité des apports phréatiques à l'échelle de l'ensemble du secteur de plaine alluviale étudié, marges comprises. Par conséquent, ces données ont été complétées par un échantillonnage systématique de tous les autres milieux aquatiques du secteur qui a été réalisé pendant l'été 2007 (Carte 13, en vert sur la carte).



Carte 13 : Localisation des milieux aquatiques échantillonnés dans le secteur de Brégnier-Cordon (Ain). Les points bleus localisent les zones humides fluviales échantillonnées de manière approfondie dans le cadre de l'étude menée par Henry et Amoros (1999). Les points verts représentent les milieux aquatiques échantillonnés dans le cadre de la présente étude, et pour lesquels on a appliqué un protocole allégé.

Une campagne de terrain a ainsi été menée sur l'ensemble des milieux aquatiques présents dans le secteur d'étude (zones humides, gravières, cours d'eau), soit environ 120 sites, répartis dans la plaine alluviale et en bordure du cours d'eau (points verts sur la carte). La cartographie d'évaluation des apports s'est ainsi basée sur deux types de relevés. Les méthodes utilisées pour collecter ces deux jeux de données sont différentes, car les délais impartis par l'étude ont imposé l'application d'un protocole allégé dans ce second cas. Durant l'été 2007, un échantillonnage allégé de tous les milieux aquatiques présents dans la plaine a été réalisé (exception faite du cours principal et des zones humides fluviales échantillonnées entre 1997 et 1999 dans l'étude menée par Henry et Amoros). Cet échantillonnage a consisté en un relevé unique dans chaque zone humide. La localisation du relevé a été choisie de manière à fournir une image représentative de la zone humide. Le relevé a ensuite été effectué en utilisant les mêmes techniques que dans le rapport de Henry et Amoros (1999).

### 2.2.3. Présentation des résultats

#### 2.2.3.1. L'intensité des apports phréatiques, estimé par le nombre d'espèces liées aux apports d'eau souterraine

Le nombre d'espèces favorisées par les eaux phréatiques est symbolisé par des cercles de diamètre croissant, proportionnel au nombre d'espèces. Le cercle de plus faible diamètre témoigne de l'absence d'espèces liées aux eaux souterraines dans le site. Ces sites ne sont vraisemblablement pas alimentés par des eaux phréatiques. Le cercle de diamètre supérieur correspond à un nombre d'espèces inféodées aux eaux souterraines inférieur ou égal à 5. Ce site est alimenté par des eaux souterraines, mais leur taux de renouvellement est vraisemblablement faible. Le cercle suivant correspond à un nombre d'espèces inféodées aux eaux souterraines compris entre 5 et 10. Ce site est alimenté par des eaux souterraines, et leur taux de renouvellement est significatif, sans être très élevé. Enfin, le cercle de diamètre maximum correspond à un nombre d'espèces inféodées aux eaux souterraines supérieur à 10. Ce site est fortement alimenté par des eaux souterraines, et leur taux de renouvellement est vraisemblablement élevé. Quatre zones se dégagent en fonction de l'intensité de l'alimentation en eau souterraine (Carte 14), de l'amont vers l'aval :

- une première zone amont se distingue (numéroté 1 sur la carte), délimitée approximativement par les communes de Brens à l'amont et Champagneux à l'aval. Ce secteur se caractérise par des sites dans lesquels la fréquence des espèces liées aux eaux phréatiques est en général faible. Un petit couloir de stations où les apports d'eau souterraine semblent plus importants apparaît en rive droite. Ces stations sont situées en bordure d'un massif karstique qui pourrait les alimenter.

- une seconde zone (numéroté 2 sur la carte), délimitée par les communes de Brégnier-Cordon, d'Aoste à l'amont et des Avenières à l'aval, se caractérise par des sites fortement influencés par les apports d'eaux souterraines, quelle que soit leur position géographique (bordure du karst ou espace de divagation du cours d'eau).

- une troisième zone (numéroté 3 sur la carte), se situant sur les communes du Bouchage, de Brangues et Saint Benoît, se distingue sans que le contexte géomorphologique semble varier. Les zones humides présentent pour la plupart une faible occurrence d'espèces d'eaux phréatiques, témoignant d'une baisse sensible de l'intensité des apports phréatiques par rapport au secteur situé en amont.

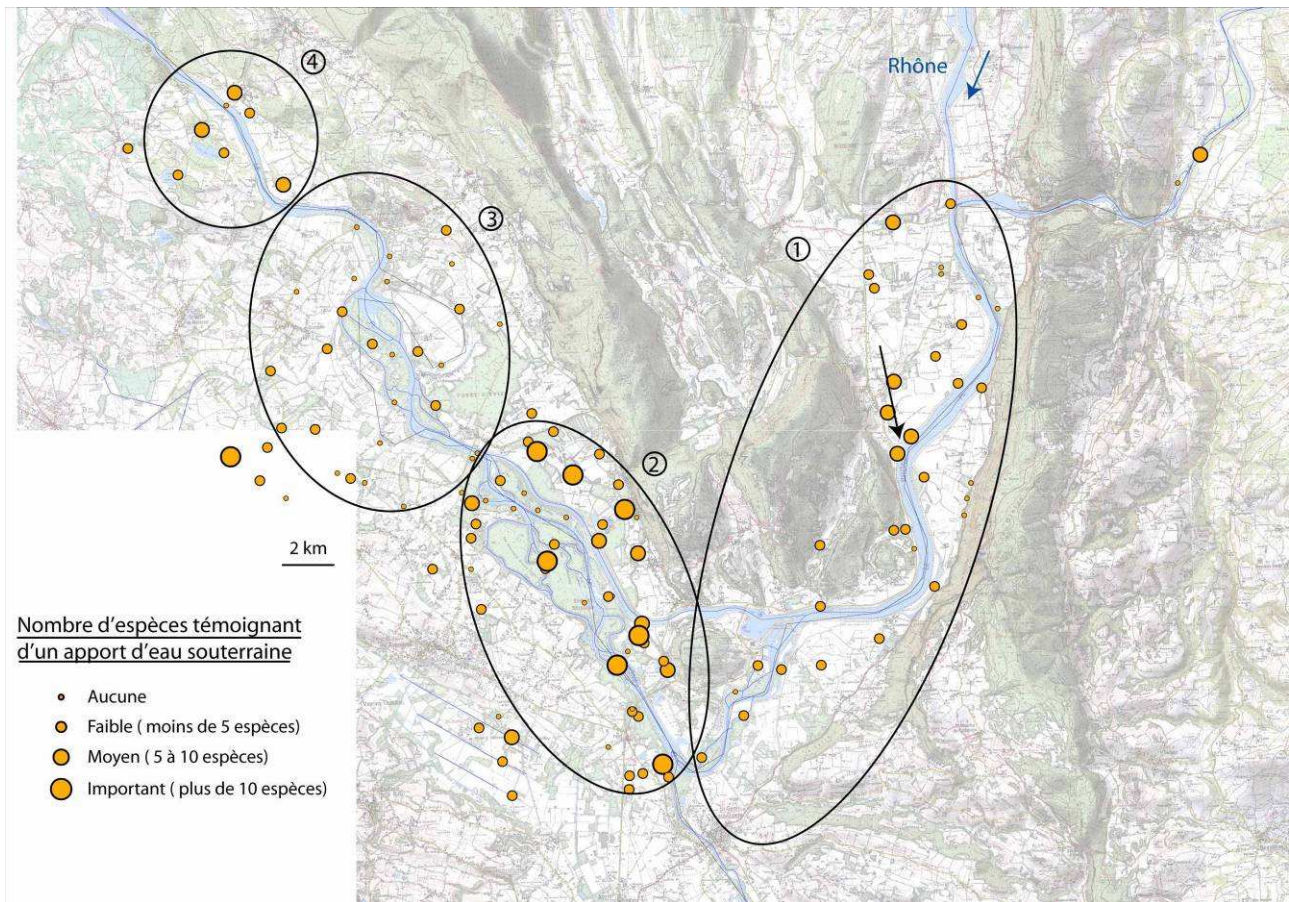
- une quatrième zone (numéroté 4 sur la carte), sur les communes de Lhuis, St Victor de Morestel et Creys-Mepieu, se situe à l'aval du système en tresses de Brégnier-Cordon. Elle se caractérise par des zones humides présentant pour la plupart une fréquence intermédiaire d'espèces témoignant d'apports d'eau phréatique. L'influence des aquifères sur les zones humides de la plaine serait donc supérieure dans ce secteur, comparativement au secteur précédent.

En guise de synthèse, 4 zones s'individualisent en première lecture dans le secteur de Brégnier-Cordon :

- zone 1 (Brens-Champagneux) : apports phréatiques généralement faibles, mis à part un couloir d'alimentation karstique en rive droite. Il y aurait potentiellement deux types d'alimentation phréatique (nappe karstique et nappe de versant).

- zone 2 (Brégnier-Cordon-Les Avenières) : apports phréatiques forts à proximité du cours principal, plus faibles aux marges.

- zone 3 (Bouchage-Brangues) : apports phréatiques faibles.
- zone 4 (Lhuis) : apports phréatiques intermédiaires.



Carte 14 : Estimation de l'intensité des apports phréatiques à partir de relevés de végétation dans les bras morts du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon (Ain)

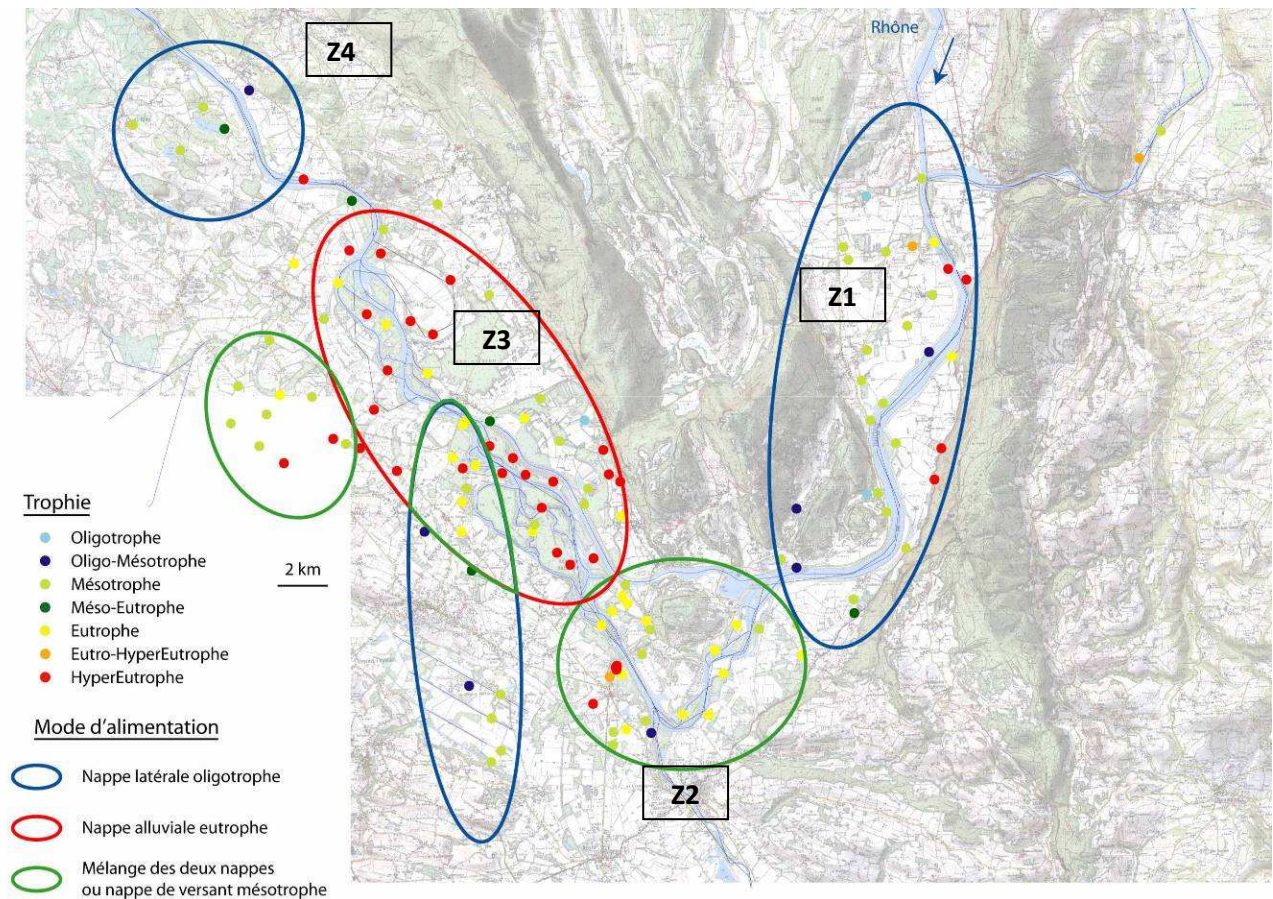
Si cet indice permet d'appréhender l'intensité potentielle des apports, il ne permet pas d'en connaître l'origine (nappe de versant, nappe alluviale). Le second indice, dit de niveau de trophie, permet d'affiner le diagnostic.

### 2.2.3.2. Le niveau de trophie

Trois niveaux de trophie peuvent être extraits de la typologie (oligotrophe, mésotrophe, en bleu et vert, eutrophe, en jaune, hyper-eutrophe, en rouge).

L'observation de la répartition des zones humides des différentes classes trophiques (Carte 15) permet de diviser le secteur de Brégnier-Cordon en quatre zones qui sont, de l'amont vers l'aval :

- zone 1 (Z1) : un espace caractérisé par des zones humides majoritairement mésotrophes, avec quelques point oligotrophes en rive droite, le long du massif karstique, et quelques zones humides hyper-eutrophes en rive gauche.
- zone 2 (Z2) : un secteur majoritairement eutrophe, en rive droite comme en rive gauche, malgré quelques zones humides oligo-mésotrophes en rive gauche.
- zone 3 (Z3) : une zone caractérisée par des sites hyper-eutrophes dans l'ancien secteur de tressage, et plus mésotrophes aux marges. On note 2 sous-zones plus oligotrophes en rive gauche, relativement éloignées du lit mineur.
- zone 4 (Z4) : dans la partie la plus aval, une zone oligo-mésotrophe.



Carte 15 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques de la plaine alluviale du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon (Ain) estimé par les exigences écologiques des espèces végétales composant les peuplements aquatiques.

### 2.2.3.3. Discussion – Interprétation

Suite à l'analyse combinée des cartes issues de l'application de ces deux indices (Carte 16), il est possible de dessiner une cartographie des échanges nappe-rivière à une échelle spatiale assez fine. Le secteur de Brégnier-Cordon est spatialement hétérogène, et cette hétérogénéité est probablement liée 1) au contexte géomorphologique du cours d'eau (incision, exhaussement relatif du lit mineur par rapport à la plaine alluviale), 2) à la présence de massifs karstiques aux marges de la plaine, qui contribuent à alimenter les milieux aquatiques alluviaux, et 3) à l'aménagement hydro-électrique de Brégnier-Cordon, provoquant suivant les secteurs le drainage, ou au contraire la mise en charge, de la nappe alluviale.

En amont (secteur 1), le Rhône s'écoule sur un chenal unique.

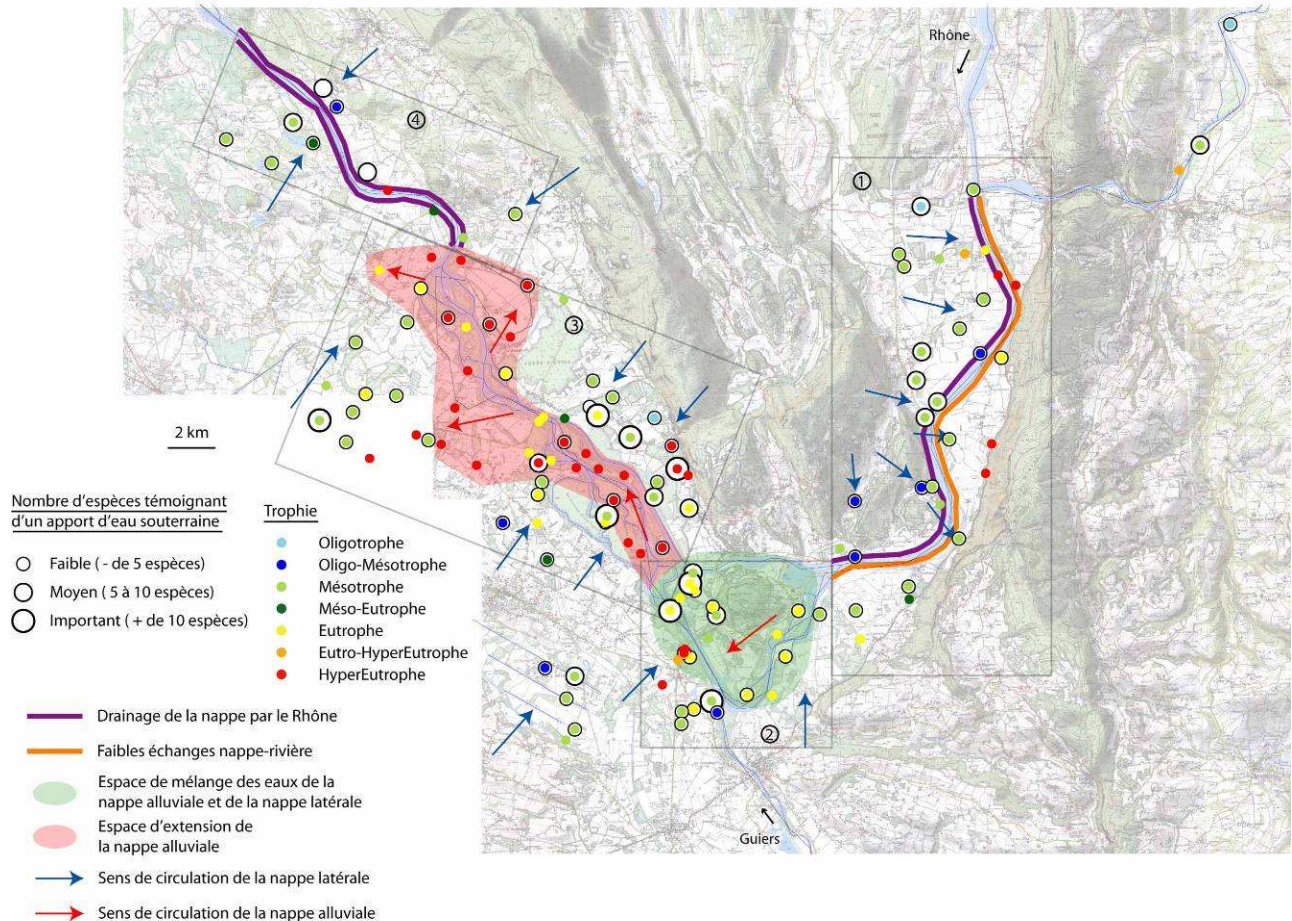
En rive droite, la plupart des milieux aquatiques présents en contrebas du massif karstique jusqu'en bordure du cours d'eau connaissent des conditions trophiques oligo-mésotrophes, avec des débits faibles à moyens. L'absence de points hyper-eutrophes en bordure du cours d'eau indique une influence faible à nulle de la nappe alluviale sur les milieux aquatiques de la plaine, et un drainage de la nappe de versant par le Rhône dans ce secteur. La nappe karstique en rive droite est probablement oligotrophe, et semble étendre son influence jusqu'en marge du cours d'eau. Par conséquent, son altitude est probablement supérieure à celle de la nappe alluviale.

En rive gauche, plusieurs points hyper-eutrophes à débit phréatique nul se distinguent en contrebas d'un versant. Ils semblent indiquer soit 1) l'absence ou la quasi-absence de drainage de l'aquifère karstique par les zones humides de la plaine alluviale (nappes à l'équilibre), et l'influence de la nappe alluviale jusqu'aux marges de la plaine, soit 2) l'existence d'apports karstiques très contaminés. Le niveau du Rhône étant perché dans ce secteur du fait de l'aménagement, il est probable que le drainage des nappes karstiques soit extrêmement limité dans cette zone. Une hypothèse pourrait être que les points oligo-mésotrophes situés en bordure du cours d'eau pourraient être alimentés par la nappe de versant provenant du massif karstique



situé en rive droite, qui s'écoulerait sous le lit du Rhône. Ce phénomène peut se produire si le lit du Rhône est exhaussé et au moins partiellement colmaté. Cette situation se rencontre par exemple dans le secteur de Miribel-Jonage, ou la nappe de l'est Lyonnais s'écoule sous le canal de Jonage (Bornette et Amoros, 1991), et pourrait être identique ici.

Les échanges nappe-rivière dans ce secteur pourraient ainsi être de deux types : en rive droite, drainage de la nappe de versant par le fleuve, et de faibles échanges nappe-rivière en rive gauche.



Carte 16 : Evaluation des échanges nappe-rivière dans le secteur de Brégner-Cordon (Ain), reposant sur la valeur indicatrice des peuplements végétaux aquatiques.

Dans la zone 2, un changement des conditions trophiques apparaît. Les bras morts en bordure du cours d'eau présentent des conditions eutrophes. La nappe alluviale étant vraisemblablement hyper-eutrophe dans le secteur (comme les données concernant la zone 3 semble le démontrer, voir paragraphe suivant), ces caractéristiques trophiques pourraient indiquer soit 1) un drainage d'une nappe latérale eutrophe par les zones humides jusqu'en bordure de cours d'eau, ou 2) un mélange des eaux de la nappe alluviale (hyper-eutrophe) et de la nappe latérale (oligo-mésotrophe). Des points oligo-mésotrophes étant présents aux marges de la plaine, il est probable que la deuxième explication soit la bonne, et que les milieux aquatiques de cette zone soient alimentés conjointement par la nappe alluviale et par une nappe latérale. Plusieurs sites oligo-mésotrophes sont présents au niveau de la confluence du Rhône avec le Guiers. Leur faible trophie, se distinguant de celle des espaces alentour, pourrait être liée à la présence d'apports de la nappe alluviale du Guiers, peut être moins chargée en nutriments que la nappe alluviale du Rhône. On se trouverait par conséquent dans une situation d'alimentation mixte nappe alluviale-nappe latérale en bordure de cours d'eau, et plutôt en situation de drainage des nappes de versant pour les points les plus éloignés.

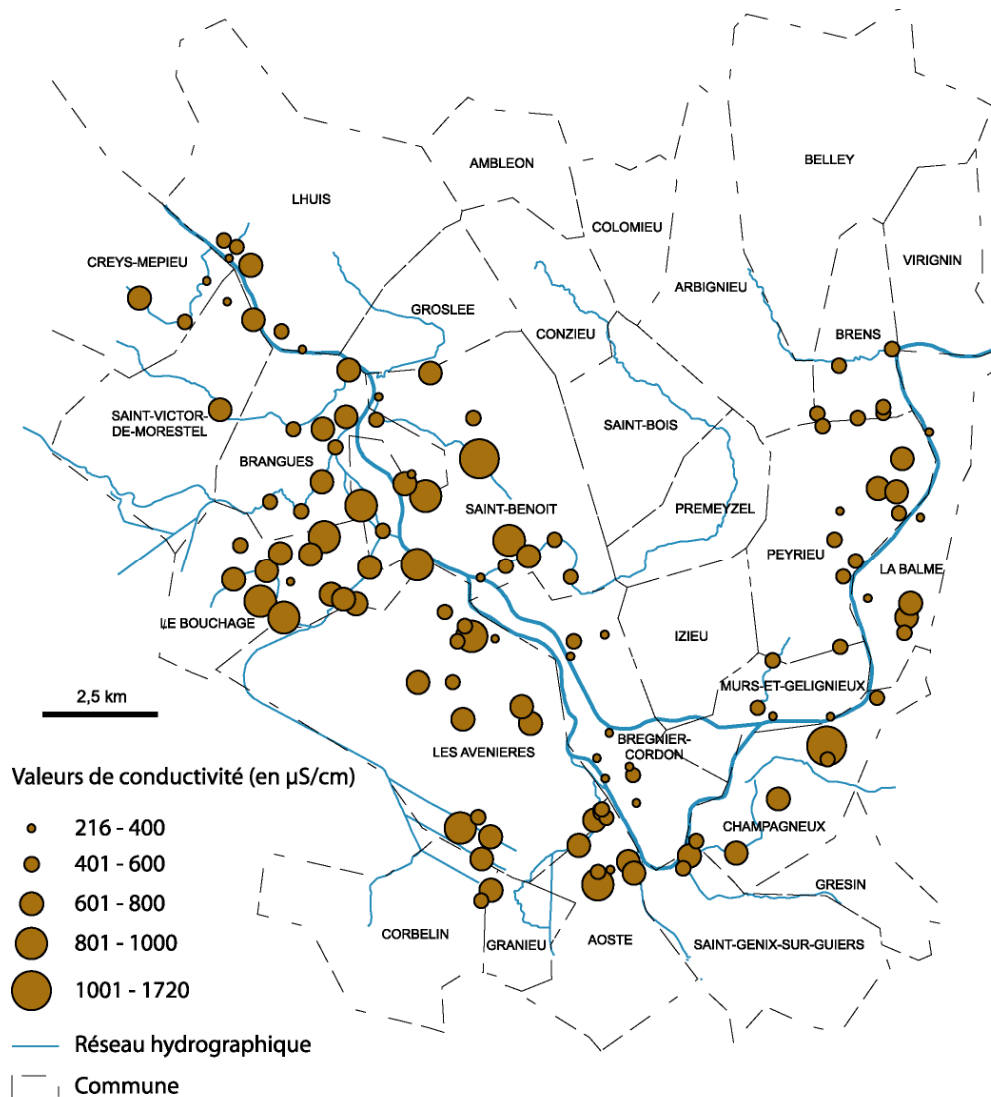
Dans la zone 3, les milieux aquatiques présents dans la zone de tressage de Rhône sont hyper-eutrophes et présentent globalement des indices d'alimentation phréatique nuls à faibles. Ces milieux aquatiques sont

probablement alimentés par la nappe alluviale (hyper-eutrophe). La multiplication des chenaux d'écoulements et des bancs alluviaux favorise en effet l'infiltration de la nappe alluviale dans le substratum sur la bande active du cours d'eau. En marge de la plaine alluviale, des sites moins eutrophes apparaissent, témoignant d'une alimentation mixte de ces sites par la nappe alluviale (hyper-eutrophe) et la nappe latérale (oligo-mésotrophe). Ils présentent également des débits phréatiques importants, montrant des apports potentiellement puissants de la nappe latérale. Les quelques points hyper-eutrophes qui apparaissent en contrebas du massif karstique en rive droite pourraient être des sites soumis à des rejets eutrophisants des communes voisines.

Dans la zone 4, le Rhône retrouve un chenal unique, les milieux aquatiques sont pour la plupart oligo-mésotrophes en bordure du cours d'eau, et sont donc alimentés probablement de manière majoritaire par les nappes de versant. Le Rhône draine donc probablement les nappes latérales dans cette zone. La présence de communautés végétales témoignant d'une alimentation phréatique significative milite en faveur d'un drainage assez important de ces nappes, même à proximité du fleuve. Cela pourrait indiquer une légère incision du cours d'eau, accentuant le drainage de la nappe.

### 2.2.3.4. Pour aller plus loin : Cartographie des valeurs de conductivité et Interpolation des différents indices

#### 2.2.3.4.1. Cartographie des valeurs de conductivité



Carte 17 : Valeurs de conductivité mesurées dans les milieux aquatiques prospectés durant l'été 2007

Des mesures de conductivité ont été réalisées à l'aide d'une sonde multi-paramètres lors de la prospection de terrain réalisée durant l'été 2007 sur les 120 stations d'échantillonnage de la végétation aquatique.

Les résultats sont présentés sous forme de cercles proportionnels. Aucune tendance forte ne peut être dégagée par manque de contraste spatial des valeurs de conductivité (Carte 17). Seul un espace situé en amont et en rive droite se caractérise par une certaine homogénéité, avec des valeurs de conductivité entre 400 et 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (commune de Brens et Peyrieu). Deux valeurs hors normes ont été mesurées (1064  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans un ru proche d'une station d'épuration, Champagneux et 1720  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en aval du village de Saint Benoît).

#### 2.2.3.4.2. Interpolation

L'interpolation est un processus de conversion d'une donnée ponctuelle en une couverture surfacique dans laquelle les nouvelles valeurs seront estimées à partir de la position des données réelles.

La méthode utilisée ici est celle de la Pondération par l'inverse de la distance, à l'aide du logiciel de SIG, ArcGis 9.2.

Elle calcule une valeur pour chaque noeud de la grille par analyse des points avoisinants définis par un rayon de recherche défini. L'interpolation correspond à  $r = 1$  dans l'équation générale ci-dessous (Figure 12) :

$$S_0 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot d_{io}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{io}^{-r}}$$

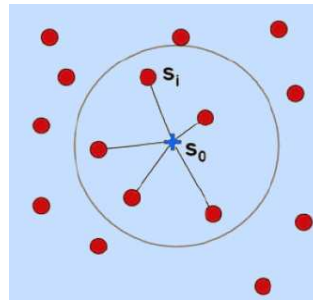


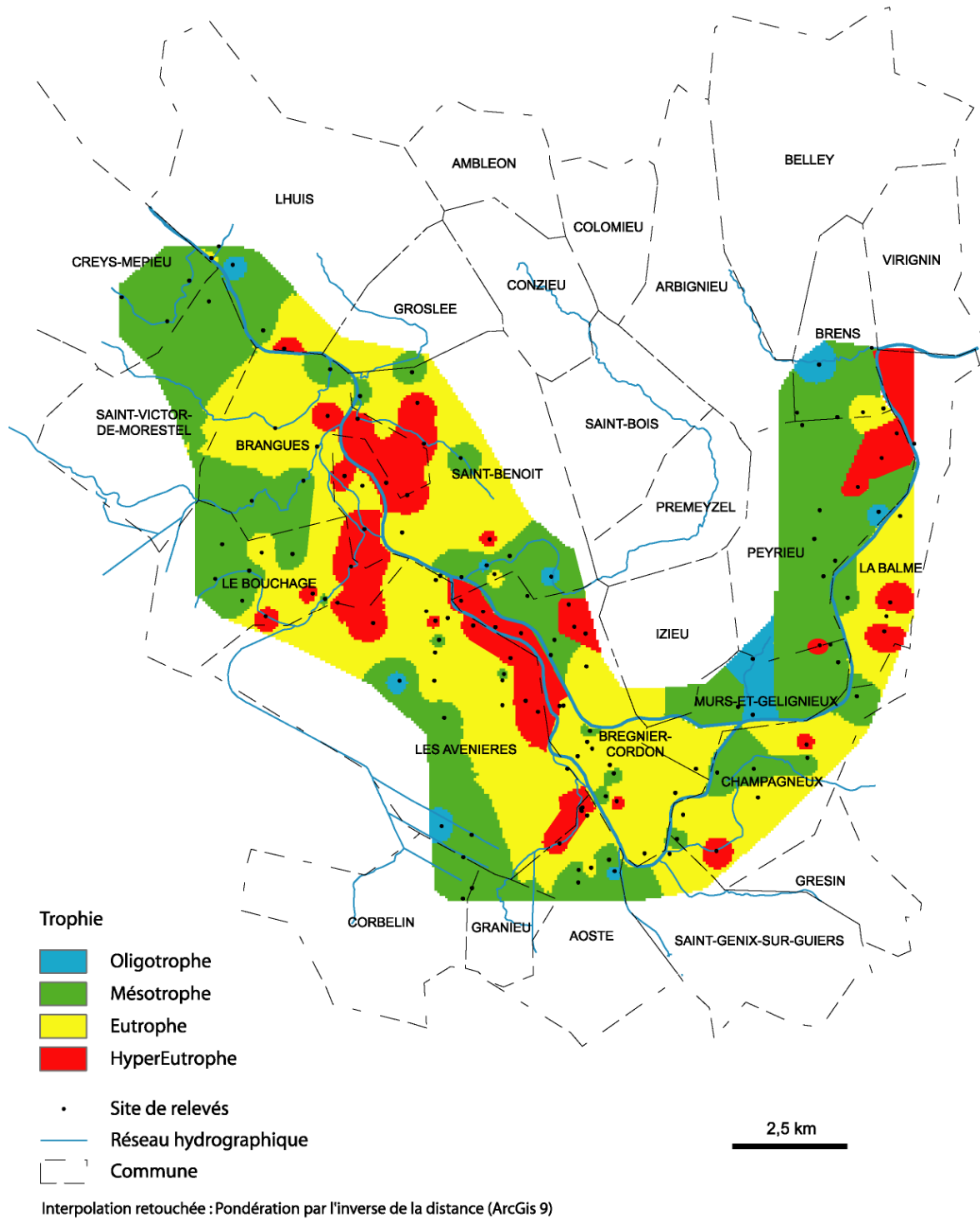
Figure 12 : Formule utilisée dans la méthode d'interpolation de la pondération par l'inverse de la distance (Miserez et Golay, 2007)

La valeur à estimer en un point de la zone d'étude est déterminée à l'aide de la moyenne pondérée des valeurs des points les plus proches. Au début, on mesure donc la distance entre le point recherché et les points connus aux alentours. Dans la suite, le calcul du point recherché se fait grâce à la moyenne des valeurs des points environnants. Ainsi, plus le point à interpoler est proche d'un point dont on connaît la valeur, plus la valeur du point à interpoler sera proche de la valeur connue (Miserez et Golay, 2007).

Cette méthode a été utilisée pour obtenir une représentation surfacique des différentes zones d'échanges identifiées par les valeurs ponctuelles mesurées sur les différents milieux aquatiques échantillonnées. Elle a été appliquée aux données concernant le niveau d'eutrophisation, l'intensité des apports phréatiques, la probabilité d'apports issus de la nappe de versant, le niveau relatif de perturbation et l'existence de processus d'alluvionnement. L'interpolation prend en compte le tracé du cours d'eau du Rhône, et distingue la rive droite de la rive gauche du fleuve.

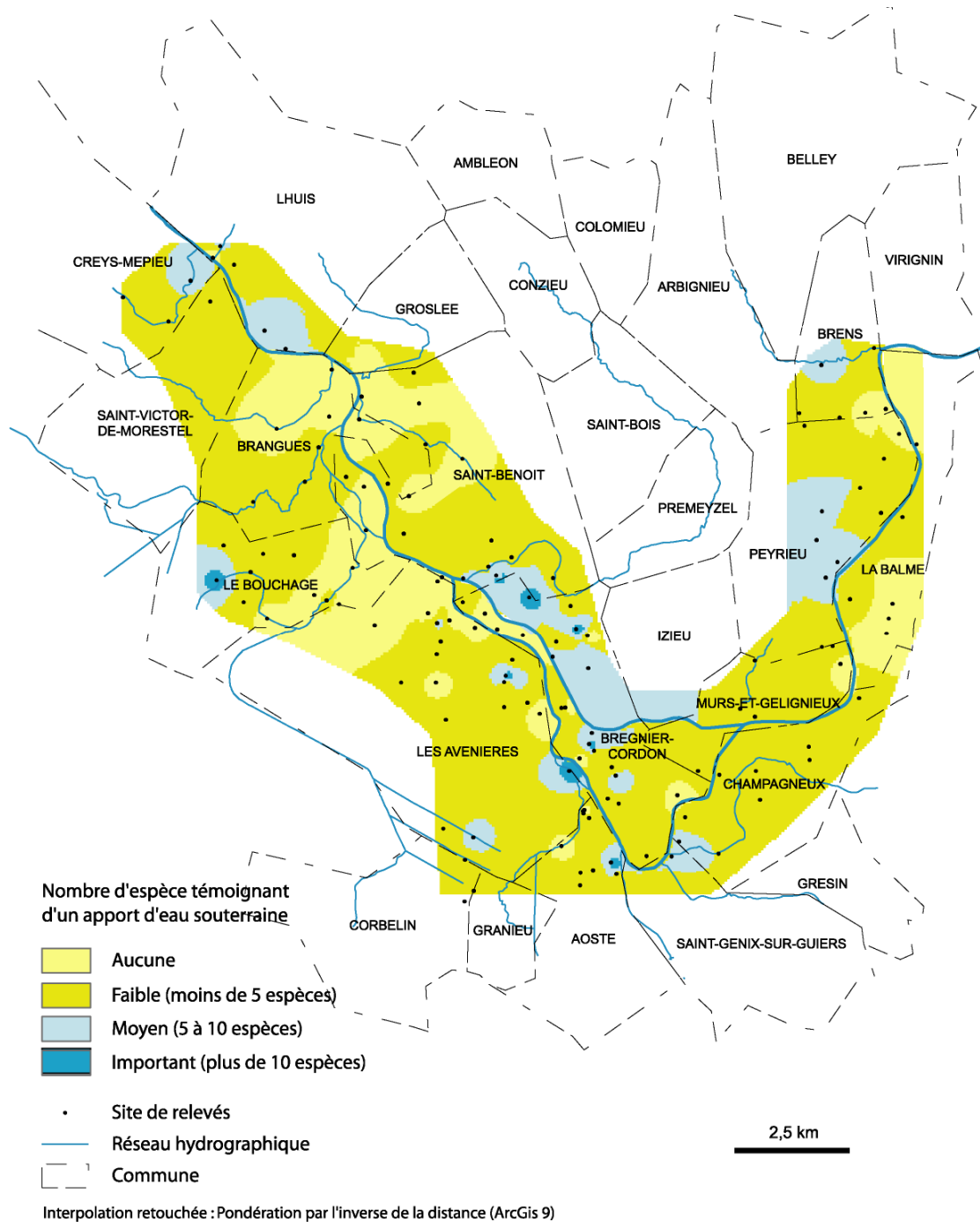
Pour le niveau relatif d'eutrophisation, les enveloppes extraites dans une première étape par analyse visuelle (cf. 2.2.3.2) ressortent de la même manière sous cette représentation (Carte 18).

Un premier espace se dégage à l'amont, en rive droite, avec des zones humides mésotrophes le long du karst, même en bordure immédiate du cours d'eau. La rive gauche s'avère être plutôt eutrophe. Puis, les zones humides deviennent majoritairement eutrophes et hyper-eutrophes, avec des points mésotrophes sur les marges. Enfin, tout à l'aval, on retrouve des zones humides mésotrophes en bordure du cours d'eau.



Carte 18 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon estimé via des relevés de végétation

L'interpolation de l'estimation de l'intensité des apports phréatiques est beaucoup moins parlante que celle de l'eutrophisation. Seuls quelques secteurs, situés en rive droite du cours d'eau et à proximité de confluences entre le Rhône et ses affluents, présentent un nombre d'espèces témoignant d'apports phréatiques moyens à élevés (Carte 19).



Carte 19 : Estimation de l'intensité des apports phréatiques aux milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon à partir de la valeur indicatrice des peuplements végétaux.

Suite à ces résultats, pour pouvoir combiner les informations sur le niveau d'eutrophisation et l'intensité des apports phréatiques, un indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant a été construit (Tableau 10).

Trophie	Apport phréatique
Hyper-Eutrophe = 0	Nul = 0
Eutrophe = 1	Faible = 1
Mésotrophe = 2	Moyen = 2
Oligotrophe = 3	Elevé = 3

Tableau 10 : Codage des indices de trophie et d'apport phréatique pour calculer l'indice d'apports de la nappe de versant

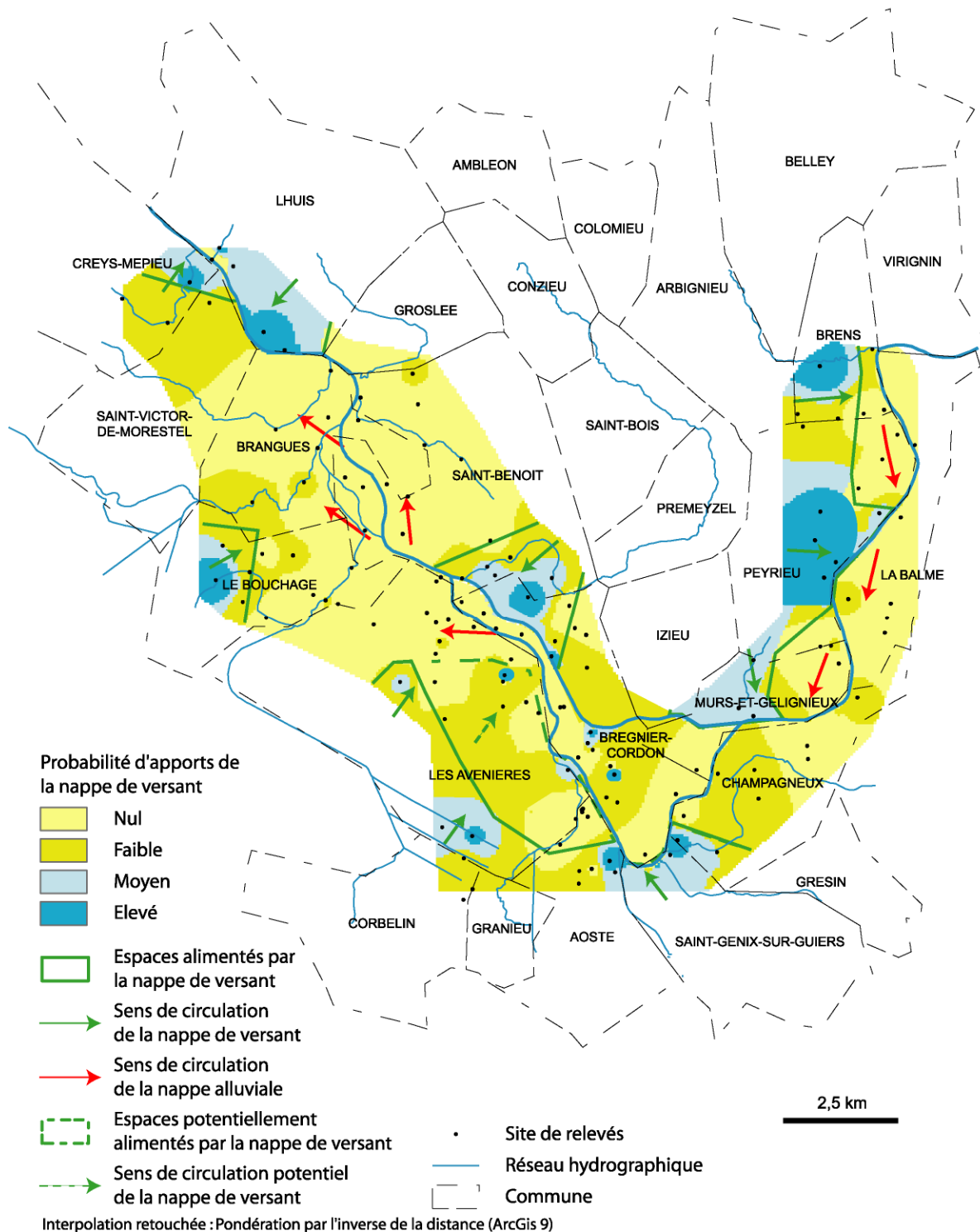
Pour chaque site, les valeurs des deux indices ont été multipliées.

La probabilité d'apports issus de la nappe de versant est nulle pour les sommes 0 et 1.

La probabilité d'apports issus de la nappe de versant est faible pour la somme 2.

La probabilité d'apports issus de la nappe de versant est moyenne pour la somme 3.

La probabilité d'apports issus de la nappe de versant est élevée pour les sommes 4, 6 et 9.



Carte 20 : Probabilité d'apports issus de la nappe de versant dans les milieux aquatiques de la plaine du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon (calculé à partir des indices de trophie et d'apports phréatiques estimés via des relevés de végétation)

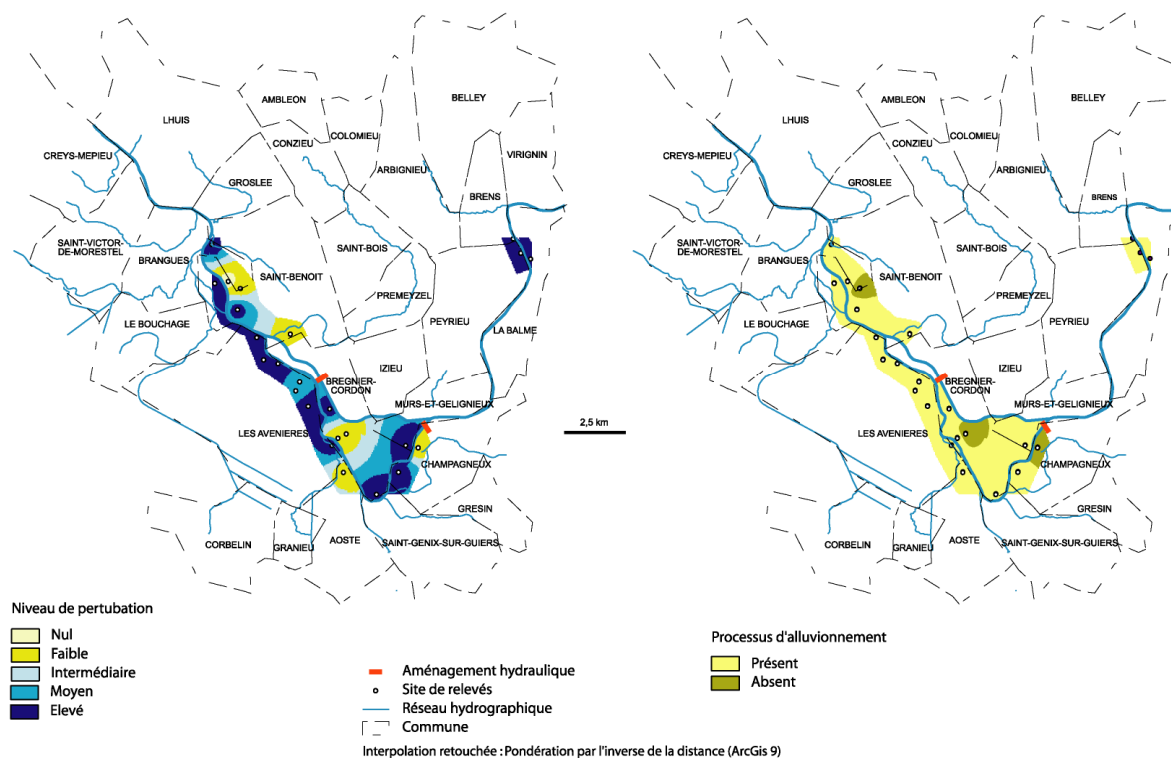
Une distinction existe entre la rive droite, où de grands couloirs de circulation de la nappe de versant jusqu'en bordure du cours d'eau sont visibles (en vert sur la carte), et la rive gauche où les couloirs s'arrêtent sur les marges de la plaine alluviale. Quelques points ponctuels alimentés par la nappe de versant

apparaissent en bordure du Rhône, mais ne permettent pas d'affirmer l'extension du couloir de la nappe jusqu'au cours d'eau (Carte 20). Dans le secteur de tressage du Rhône, l'absence de sites alimentés par la nappe de versant semble montrer l'influence de la nappe alluviale dans cet espace.

La méthode de diagnostic développée dans la première partie, basée ici sur la tolérance des espèces au décapage et au dépôt de sédiment lors de crues, permet également d'estimer le niveau relatif de perturbation et l'existence de processus d'alluvionnement.

Au vu des résultats obtenus sur le niveau de trophie et l'intensité des apports phréatiques, le secteur de tressage du Rhône situé dans le secteur des Avenières devrait se caractériser par une situation d'exhaussement, avec une nappe alluviale perchée. Pour vérifier cette hypothèse, une interpolation des indices de perturbations et d'alluvionnement a été réalisée sur les bras morts de la base de données Rhône. Logiquement, dans un secteur en exhaussement, les bras morts situés en bordure du cours d'eau devraient présenter un niveau de perturbations élevé et des processus d'alluvionnement significatifs.

Les interpolations réalisées ne s'avèrent pas concluantes, en grande partie lié au faible nombre de sites. Une grande majorité des bras morts étudiées présentent un niveau de perturbation élevé et un processus actif d'alluvionnement, et cette situation n'est pas limitée au secteur de tressage (Carte 21).



Carte 21 : Niveau relatif de perturbations et appréciation de l'existence de processus d'alluvionnement dans les bras morts du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon estimé à partir de la valeur indicatrice des peuplements végétaux présents dans les sites.





## 2.3. Métrique hydrobiologique : faune souterraine

### 2.3.1. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques

Les échanges entre nappe souterraine et systèmes fluviaux à travers les sédiments formant le lit des cours d'eau ne se limitent pas à des mouvements d'eau et de solutés, la faune vivant dans les deux systèmes (faune épigée et hypogée) peut elle aussi se déplacer dans les sédiments du lit, migrer activement ou être emportée passivement de la surface vers les interstices ou de habitats profonds vers la sub-surface. Ces déplacements ont été le plus souvent expliqués par l'influence des flux d'eau sur ces organismes : des infiltrations d'eau de surface induisant un export d'organismes superficiels vers l'intérieur des sédiments, des remontés d'eau de nappe conduisant des organismes souterrains à s'installer plus près de la surface (Stanley & Boulton, 1993 ; Boulton et al., 1998).

Cette mobilité des organismes a été particulièrement étudiée chez les invertébrés (Crustacés et Insectes) au cours du temps et des cycles crues-étiages (Dole-Olivier et al., 1997) mais aussi dans l'espace. Ainsi le long de bancs de graviers (Dole-Olivier & Marmonier, 1992) ou le long de chenaux du Rhône (Creuzé des Châtelliers & Reygrobelle, 1990), on peut suivre les successions de zones d'infiltration (downwelling) et de restitution (upwelling) grâce à la composition des assemblages faunistiques interstitiels. A une échelle supérieure, celle d'une plaine alluviale d'un grand fleuve, les travaux sont beaucoup plus rares, les études les plus complètes ont été réalisées sur le Danube (Danielopol, 1984) et sur le Rhône (Dole, 1983). Ainsi dans la plaine alluviale du secteur de Jons, la composition des assemblages collectés dans les premiers mètres sous les paléochenaux abandonnés par le fleuve, sont contrôlés : 1) par l'origine des eaux interstitielles mais aussi 2) par le degré de stabilité du système (proximité du chenal actif et de ses crues, Dole, 1983). Si l'on tient compte de cette distance au chenal principal, on peut alors utiliser la composition et la structure des assemblages pour évaluer l'influence des apports souterrains (Marmonier et al., 1992). C'est à partir de cette constatation que nous avons tenté de localiser les zones d'apport d'eau souterraines sur le secteur de Brégnier-Cordon et d'estimer leur origine et leur intensité.

Afin d'identifier les zones d'échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines, nous avons caractérisé la structuration spatiale de la faune hyporhéique à l'échelle du secteur de Brégnier-Cordon (Annexe 4). Pour cela nous utilisons deux approches complémentaires liées à la présence d'organisme vivant uniquement dans les eaux souterraines (espèces stygobie).

#### • Utilisation de l'ensemble des espèces stygobies pour caractériser la direction et l'intensité des échanges

Cette première approche est basée sur le fait que la présence d'espèce stygobie est liée à une arrivée plus ou moins récente d'eau souterraine. De la même façon la proportion de ces espèces au sein de peuplements constitués à la fois d'espèces stygobies et d'organismes vivants généralement à la surface des sédiments sera corrélée à l'intensité et au sens des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Ainsi, des fortes arrivées d'eaux souterraines entraîneront un plus grand nombre d'espèces stygobie tout en limitant la pénétration d'espèces de surface alors que de faibles arrivées d'eaux souterraines favoriseront la pénétration d'espèces de surface dans les interstices et limiteront la présence d'espèces stygobies. Cette approche faunistique simple peut-être résumée sous la forme d'un indice d'échange des eaux prenant en compte la fréquence des espèces stygobies dans les peuplements, la valeur de l'indice variant en fonction du sens et de l'intensité des échanges.

#### • Recherche d'espèces caractéristiques des différents aquifères

La deuxième approche, complémentaire à la précédente est basée sur le fait que les espèces stygobies possèdent de fortes préférences environnementales et une relativement faible capacité de dispersion des individus dans l'environnement. Ainsi, on observe des cortèges faunistiques différents entre les types habitats (karst, nappe d'accompagnement et milieu hyporhéique des cours d'eaux). Ce phénomène s'explique en partie par la présence de certaines espèces strictement inféodées au karst et à la nappe alluviale profonde, ou au milieu hyporhéiques des cours d'eau en fonction de leur affinité pour des milieux

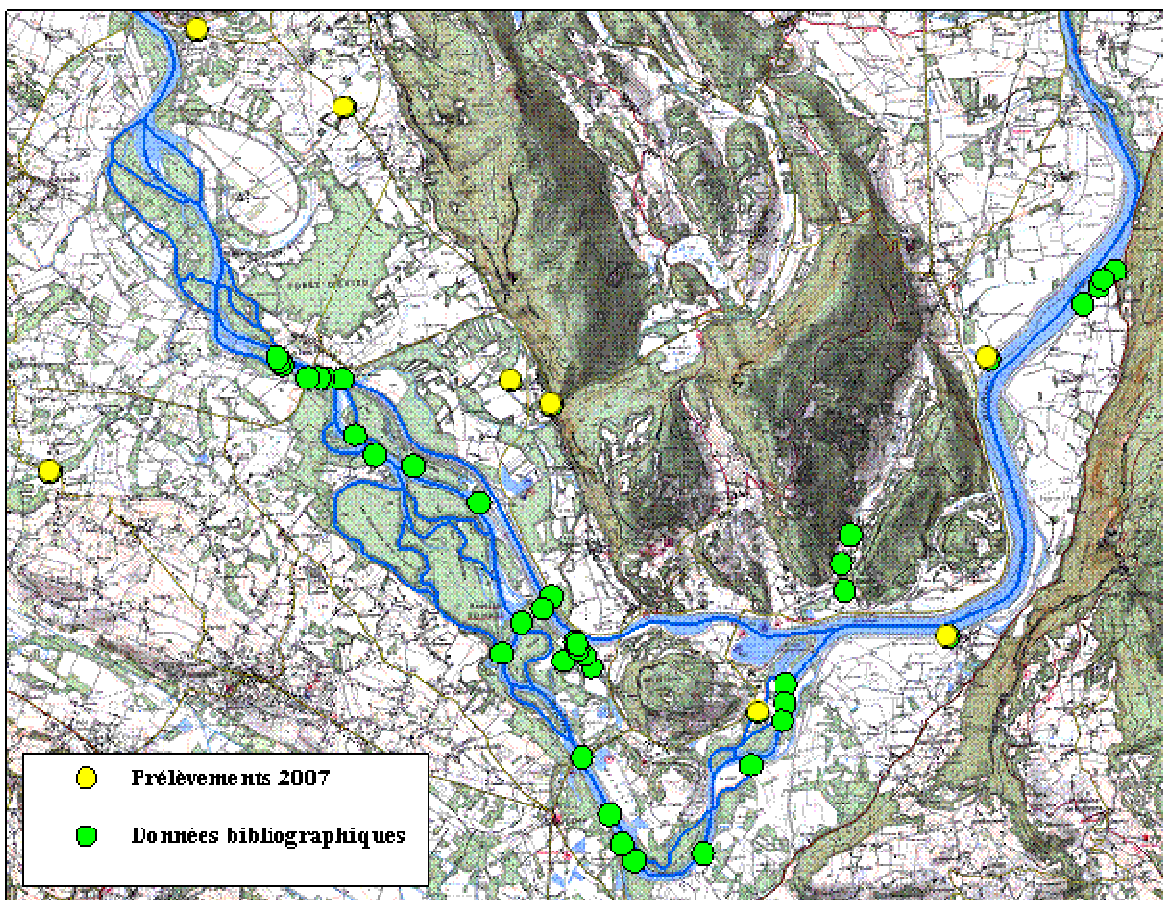
stables d'un point de vue physico-chimique (nappes alluviales profondes), instables (milieux hyporhéiques) ou intermédiaire avec des espèces disponibles de grandes tailles (Karsts).

L'observation de ces espèces, qui ne représentent malheureusement qu'une faible partie des invertébrés du secteur de Brégnier-Cordon peut alors servir à mettre en évidence des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines profondes (d'origines karstiques ou alluviales) et celles provenant du milieu hyporhéique. Par exemple la localisation des espèces indicatrices des nappes profondes met clairement en évidence les arrivées d'eaux souterraines profondes dans le secteur du Mont Cordon.

### 2.3.2. Localisation des prélèvements

Le secteur du Haut-Rhône constitue un des secteurs les plus étudié au cours des dernières décennies. Dans ce secteur, 55 points d'échantillonnage de la faune interstitielle ont été recensés et qui se distribuent de la manière suivante (Carte 22) :

- 9 points échantillonnés dont six stations dans un banc d'alluvions grossiers sur le Rhône au niveau d'Evieu et trois stations d'étude sur le cours d'eau de Murs-et-Géligneux (Martin 1978) ;
- 16 points échantillonnés sur le long du chenal court-circuité du Rhône (Creuzé des Châtelliers 1991) ;
- 12 points échantillonnés dans le chenal sous influence d'une retenue dans le secteur de Brangues entre les ponts d'Evieu et de Groslée (Marmonier et al. 1997) ;
- 5 points échantillonnés dont trois dans un canal de drainage et un dans la lône de Rossillon dans le secteur de Brégnier-Cordon (Claret et al. 1999) ;
- 13 points échantillonnés dans quatre canaux de drainage, un dans le secteur de Belley et trois dans le secteur de Brégnier-Cordon (Marmonier et al. 2000).



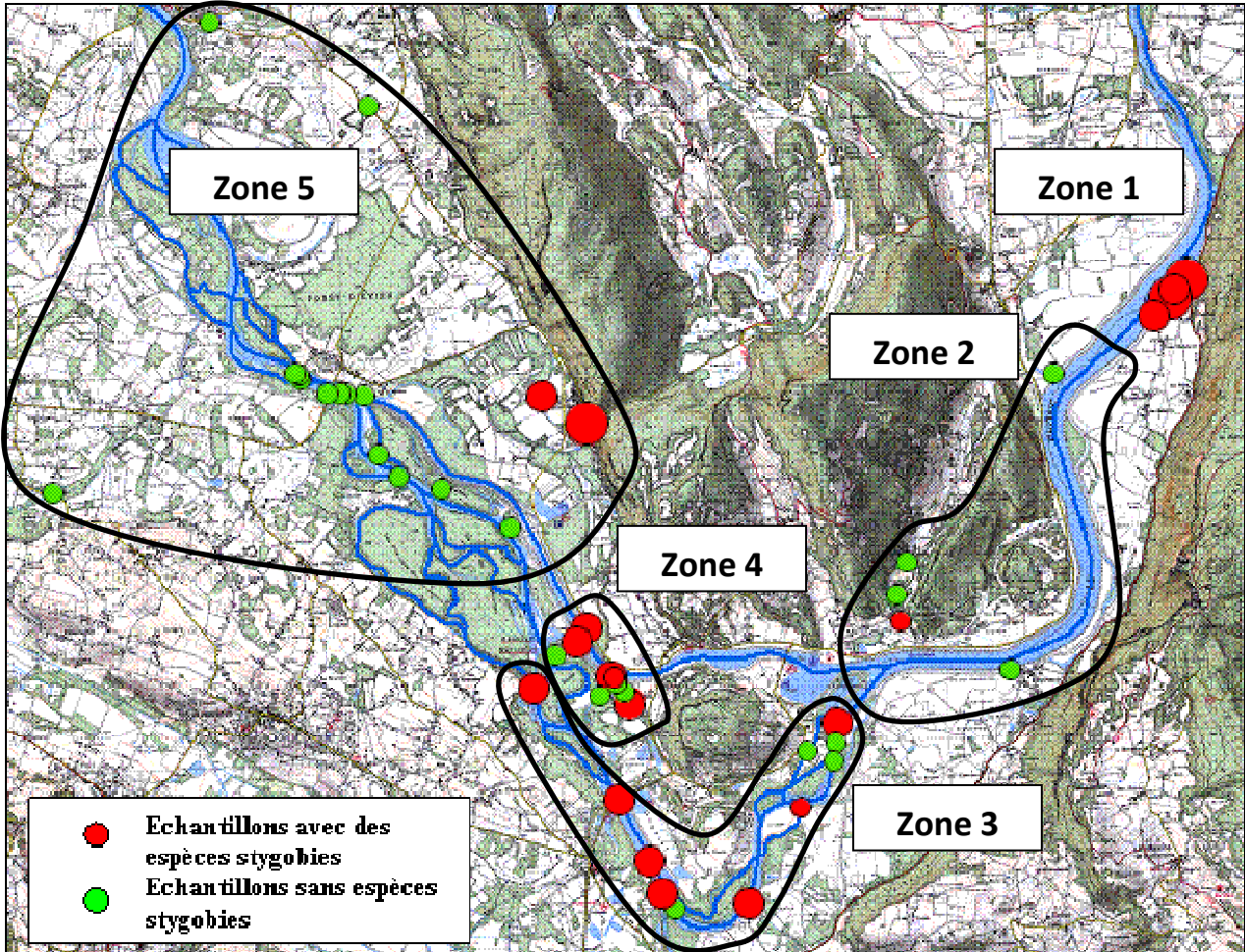
Carte 22 : Localisation des prélèvements sur le secteur de Brégnier-Cordon.

Huit stations complémentaires ont été échantillonnées en zone hyporhéique en octobre 2007 dans les secteurs faiblement ou non échantillonnés auparavant (Carte 22). Ces prélèvements complémentaires ont

permis, grâce à une identification à l'espèce des crustacés copépodes, d'identifier deux nouvelles espèces stygobies (*Acanthocyclops venustus* et *Diacylops belgicus*) non identifiées sur le secteur auparavant.

### 2.3.3. Analyses et interprétation sur le secteur de Brégnier-Cordon

L'interprétation des données faunistiques s'est faite sur la base des prélèvements de 2007 et issue de nos recherches bibliographiques.



Carte 23 : Localisation des espèces stygobies sur les cinq zones de Brégnier-Cordon, la taille des cercles rouges est proportionnelle à la fréquence des espèces stygobies dans les prélèvements.

#### • Observations générales sur l'ensemble du secteur

Sur la base du cumul des données récentes répertoriées (de 1991 à 2007), la richesse en espèces stygobies du secteur de Brégnier-Cordon (12 espèces) est relativement faible par rapport aux secteurs plus en aval du Rhône. Cette faible diversité de la faune stygobie sur le secteur de Brégnier-Cordon est en partie imputée à l'influence destructrice des glaciations du Quaternaire.

La répartition spatiale des espèces stygobies le long du chenal court-circuité du Rhône semble répondre aux caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques locales à savoir la dynamique sédimentaire et le mode de circulation des eaux dans les alluvions. Sur la base de nos observations, cinq secteurs peuvent être identifiés (Carte 23) :

- Un premier secteur (Zone 1) correspondant à la partie en amont du barrage au niveau du lieu dit « Carottes » et allant jusqu'au lieu dit « Les Rubattiers » contenant des échantillons provenant des contres canaux rive gauche de la retenue ;

- Un second secteur (Zone 2) en aval des Rubattiers et jusqu'au barrage comprenant les contres canaux des deux rives et la vallée de la source merveille au nord de Murs-et-Gélignieux ;

- Un troisième secteur (Zone 3) le long du chenal court-circuité du Rhône de l'aval du barrage jusqu'à hauteur de la commune de Brégnier-Cordon (incluant la confluence avec le Guiers) ;

- Un quatrième secteur (Zone 4) correspondant à zone de tresse du Rhône court-circuitée en aval de la commune de Brégnier-Cordon et jusqu'au environ de la commune d'Evieu ;
- Enfin un cinquième (Zone 5) correspondant à la plaine alluviale du Rhône (contre canaux CNR et paléochenaux) situés autour et à l'ouest du Mont Cordon.

• **Zone 1 : Secteur Amont du barrage du lieu dit « Carottes » au lieu dit « les Rubattiers »**

Marmonier et al. (1997) puis Claret et al. (1999) ont observés une proportion importante d'espèces stygobie à l'amont du contre canal rive droite au niveau du lieu dit « Carottes ». Le peuplement stygobie est caractérisé par des taxons de la zone hyporhéique (*Niphargopsis casparyi*, *Niphargus rhenorhodanensis*, *Islamia moquiniana*) et une espèce plus typiquement phréatobie (*Niphargus fontanus*). Il semble donc y avoir un mélange d'eau souterraine en provenance de pertes d'eau superficielle du fleuve à travers la digue du canal d'aménée et d'eau de la nappe plus profonde accompagnant le Rhône.

• **Zone 2 : Secteur Amont du barrage en aval du lieu dit « les Rubattiers »**

Dans ce secteur, que se soit dans le contre-canal en rive droite en aval du lieu dits les Rubattiers, où dans le contre canal rive gauche, nous n'avons pas observés d'espèces stygobie ce qui suggère l'absence où de très faible échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines à l'amont immédiat du Barrage. La pression hydraulique négative à la surface du sédiment occasionnée par l'élévation du niveau du Rhône en amont du barrage ainsi que le colmatage des interstices par une sédimentation accrue due au ralentissement des écoulements des eaux de surface sont sans doute à l'origine de l'absence d'arrivée d'eaux souterraines dans cette partie du secteur de Brégnier-Cordon.

• **Zone 4 : Le chenal court-circuité du Rhône en aval du barrage**

Dans ce secteur court-circuité (donc à stabilité hydrologique faible), plusieurs stations hébergent de la faune stygobie : des stations situées dans la zone de confluence du Guiers mais également deux stations de la zone en aval du barrage. Leur présence traduit un drainage des nappes phréatiques dans ces deux zones dont les débits moyens calculés sont comparables (respectivement  $0,116 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  et  $0,111 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ). Cependant dans ces deux zones, les taxons stygobies récoltés (*Niphargopsis casparyi*, *Niphargus rhenorhodanensis*, *Fabaeformiscandona wegelini*) correspondent tous sans exception à des espèces qui restent inféodées à la frange superficielle du domaine souterrain où les circulations d'eau interstitielle sont intenses, les sédiments bien oxygénés et enrichis en matière organique par l'infiltration des eaux de surface. Leur présence traduit donc une bonne circulation des eaux interstitielles et témoigne également d'une proximité ou d'une influence des eaux de surface (Gibert et al. 1994).

La zone de la confluence du Guiers est caractérisée par une faune interstitielle stygobie plus diversifiée (4 espèces) et plus abondante et apparaît comme la plus dynamique en termes d'échanges entre eaux de surface et eaux souterraines.

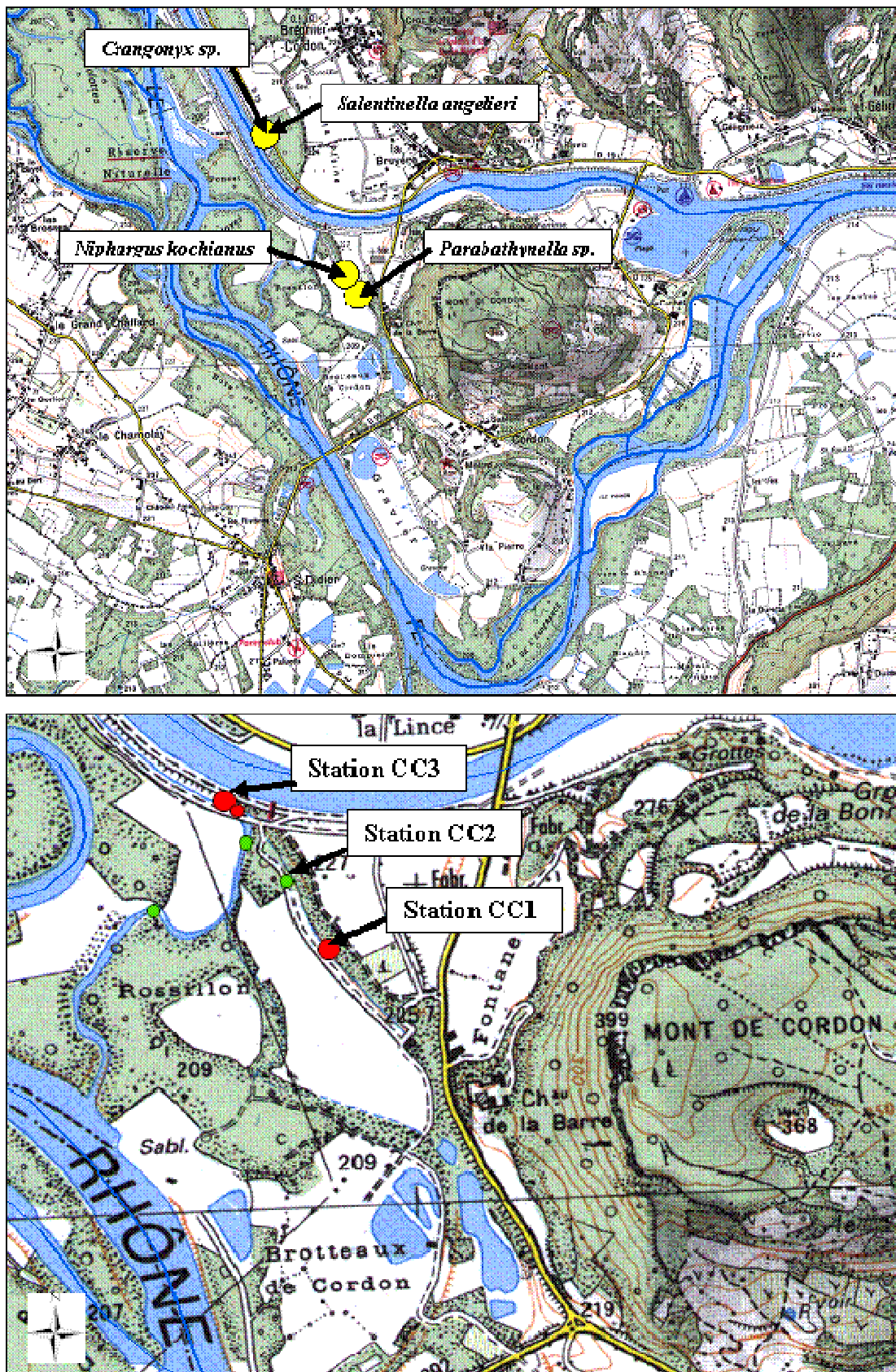
• **Zone 5 : Le secteur aval de Brégnier-Cordon à Evieu**

Dans la partie aval du secteur court-circuité, la faune stygobie quasi-inexistante peut être expliquée par l'élargissement de la bande d'écoulement qui induit un ralentissement des vitesses d'écoulement en surface et une sédimentation de particules fines qui limitent les échanges avec le domaine phréatique et donc la présence d'organismes souterrains. Dans cette zone, trois taxons stygobies (*Acanthocyclops venustus*, *Diacyclops belgicus*, *Fabaeformicandona wegelini*) ont été collectés témoignant d'échanges locaux et ponctuels entre les eaux de surface et les eaux du milieu hyporhéique.

• **Zone 3 : Secteur de la plaine alluviale autour du Mont Cordon**

Dans le contre-canal en rive gauche (à l'ouest du Mont Cordon et en connexion avec la lône de Rossillon), les communautés interstitielles sont marquées par une faune stygobie plus diversifiée en espèces de nappes profondes (Carte 24). La présence de *Niphargus fontanus*, une espèce colonisant aussi bien les aquifères karstiques et alluviaux, dans la partie amont du canal suggèrerait également une alimentation par une eau d'origine karstique (eau du Mont de Cordon ?). Sur le secteur de Brégnier-Cordon, cette espèce a

déjà été trouvée dans la grotte de la cascade de Glandieu située plus en aval en rive droite du canal de dérivation (Reygrobellet et al. 1974).



Carte 24 : Localisation des espèces de nappes profondes alluviales ou karstiques (en haut) et localisation des stations sur le contre canal à l'ouest du Mont Cordon

D'un point de vue hydrogéologique, Creuzé des Châtelliers (1991) note en effet que les eaux du Mont de Cordon, situées au pied de Cordon, communiquent avec la nappe alluviale du Rhône et qu'ainsi la lône de la Morte de la Barre serait alimentée par des eaux d'origine karstique. Cependant, des études faunistiques complémentaires, notamment dans les systèmes karstiques latéraux, sont nécessaires pour étayer cette hypothèse ainsi que la possibilité d'utiliser *N. fontanus* comme descripteur biologique des échanges entre le sous-écoulement du Rhône et les aquifères karstiques. Dans ce cas de figure, les apports identifiés du point de vue hydraulique (Estimation des débits de nappe fondée sur les débits des contre-canaux – apports karstiques du Mont Cordon et du Rhône dans la terrasse wurmienne alimentant le contre-canal de Rossillon) sont confirmés par les données invertébrés.

On observe une forte structuration spatiale de l'amont vers l'aval le long de ce contre canal (Carte 24). En amont (CC1), les communautés interstitielles sont caractérisées par des espèces stygobies de la zone hyporhéique (*Niphargospis casparyi*) et d'autres espèces plus typiquement phréatobies (*Niphargus kochianus*, *Parabathynella sp.*) témoignant d'une alimentation au moins à certaines périodes de l'année par des eaux d'origine profonde et faiblement influencées par les eaux de surface. La présence de taxons stygobies à plus large tolérance (*Niphargus rhenorhodanensis*) dans la partie en aval du canal (CC3) peut indiquer une influence des eaux de surface qui s'infiltrent à travers la digue. Cette hypothèse est confirmée par la colonisation en cette station d'une faune typiquement de surface.

Dans le contre-canal droit (au pied du village de Brégnier), les communautés interstitielles sont caractérisée par la présence de deux espèces phréatobies (*Salentinella angelieri* et *Crangonyx subterraneus*) qui là encore indique des connexions avec les eaux des nappes profondes.

## 2.4. Métrique géochimique

### 2.4.1. Approche physico-chimique des eaux interstitielles peu profondes

L'utilisation de traceurs physico-chimiques pour le repérage des échanges hydrologiques entre un cours d'eau et sa nappe est une méthode classiquement utilisée en hydrogéologie. Ces analyses sont le plus généralement réalisées dans des piézomètres donnant accès à la nappe profonde. L'originalité de l'approche proposée ici est de mener des études équivalentes mais à faible profondeur dans les sédiments, juste au niveau de la zone d'interface entre l'eau superficielle du cours d'eau ou de ses annexes et de la nappe souterraine. Ces mesures devraient a priori nous renseigner sur le sens et l'intensité des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Lors de l'échantillonnage de la faune souterraine, il est classiquement réalisé une caractérisation de la qualité physico-chimique de l'eau interstitielle où vivent ces organismes. Deux types de paramètres sont mesurés dont les utilisations sont différentes et complémentaires :

- Certains ne servent qu'à évaluer la qualité locale de l'habitat des organismes. Il s'agit par exemple des teneurs en **oxygène dissous**, en **matière organique** ou du **pH**. En effet, une eau localement désoxygénée ne permet pas l'installation des organismes les plus exigeants (Malard et Hervant, 1999). De même, un pH trop acide est extrêmement défavorable aux Crustacés qui doivent à chaque mue renouveler leur carapace riche en carbonate de calcium. Ces caractéristiques ne renseignent que sur les conditions régnant localement et les limites à l'implantation d'une faune abondante et diversifiée (Claret *et al.*, 1999), mais ne nous informe en rien sur l'origine des eaux interstitielles, leur lien avec des aquifères profonds par exemple.

- D'autres paramètres physico-chimiques nous renseignent au contraire sur le degré de mélange entre eau de surface et eau souterraine et permettent donc de faire le lien entre composition du peuplement souterrain et origine de l'eau où ils vivent (Dole-Olivier et Marmonier, 1992). Cette information est particulièrement intéressante pour comprendre l'origine de l'eau alimentant des zones humides associées au fleuve et à ses nappes latérales (Marmonier *et al.*, 1992) ou dans le cas de canaux de drainage construits par l'homme et possédant une alimentation mixte (Marmonier *et al.*, 2000).

C'est ce deuxième type d'information que nous souhaitons acquérir dans le cadre de cette action de recherche. Les paramètres pouvant nous renseigner sur l'origine des eaux interstitielles peu profondes sont assez similaires à ceux utilisés pour caractériser les nappes plus profondes. Le plus simple à mesurer est la **conductivité électrique**, qui nous renseigne sur la minéralisation de l'eau ; celle-ci est classiquement beaucoup plus forte dans les eaux souterraines en région calcaire. Il est aussi possible de mesurer les teneurs en certains ions dont l'origine est connue et qui peuvent alors être utilisés comme signature de l'origine fluviale ou souterraine de l'eau interstitielle. Citons par exemple les **sulfates** qui dans le Haut-Rhône proviennent de la dissolution des gypses triasique alpins et signent des apports d'eaux de surface (Marmonier et Dole, 1986) ou les teneurs en **calcium** qui caractérisent l'influence des eaux souterraines (Dole-Olivier et Marmonier, 1992). D'autres paramètres peuvent apporter des renseignements importants, mais leurs teneurs peuvent être modifiées par des activités microbiennes. C'est le cas du **nitrate** qui indique la présence d'apport de nappe contaminée par des activités agricoles, mais qui peut diminuer très rapidement du fait de la mise en place de processus de dénitrification (Clément *et al.*, 2002).

	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Sulfate (mg/l)	Nitrate (mg/l)
Contre-canal C	390 (38)	36,5 (4,8)	3,3 (1,4)
Contre-canal D (partie amont)	405 (30)	34,6 (7,3)	2,7 (2,0)
Contre-canal D (partie aval)	328 (10)	33,9 (7,1)	2,5 (0,9)
K-W test	***	n.s.	n.s.

Tableau 11 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles des contre-canaux C (en rive droite) et D (en rive gauche). Pour ce dernier nous avons distingué la partie en amont alimentée par des eaux provenant de la nappe associée au Mont Cordon et la partie en aval alimentée par des eaux de fuite du canal d'amenée. Valeurs moyenne (ET) sur les années 1995, 96 et 97.

Pour le Haut-Rhône, ces indicateurs ont été calibrés et utilisés sur le secteur de Jons (Marmonier *et al.*, 1992) où les études sur les peuplements souterrains du Rhône ont débuté. Dans le secteur de Brégnier-Cordon, la plupart des échantillons réalisés au cours des années 80 et 90 ont été accompagnés de mesures de conductivité électrique, sulfate et nitrate (Claret *et al.*, 1999 ; Marmonier *et al.*, 2000), mais sans donner de vision très informative de l'origine de l'eau interstitielle des stations prospectées. Ainsi les eaux interstitielles échantillonnées le long des contre-canaux CNR ne diffèrent que très peu pour ces trois paramètres (Tableau 11), seule la conductivité électrique relativement faible dans la partie en aval du contre-canal D traduit correctement les apports d'eau du Rhône. Les diminutions des teneurs en sulfates et nitrates mesurées dans ce même secteur ne sont pas statistiquement significatives.

Dans les futurs travaux qui seront menés dans le cadre de cette action de recherche sur le secteur de Donzère, il conviendra tout de même d'analyser certaines caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles. A la fois pour vérifier que les conditions locales d'oxygénation ou de pH ne limitent pas l'installation de la faune, mais aussi pour savoir si les teneurs en certains ions ne pourraient pas nous informer sur l'origine des eaux interstitielles et étayer ainsi les informations apportées par la faune.

## 2.4.2. Approche isotopique

### 2.4.2.1. Vue d'ensemble du bassin du Rhône

La composition des isotopes stables de l'hydrogène (D/H) et de l'oxygène ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) de l'eau est communément employée pour caractériser et quantifier les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface (e.g. Gonfiantini *et al.*, 1998 ; Walker et Krabbenhoft, 1998). La composition isotopique des eaux souterraines reflète celle des précipitations dans la zone de recharge. La valeur du  $\delta\text{D}^1$  et du  $\delta^{18}\text{O}^2$  des précipitations est fonction de la température de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique : lorsque la température de condensation diminue, les précipitations sont appauvries en D et  $^{18}\text{O}$ . Ainsi, les  $\delta\text{D}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  des précipitations diminuent avec l'altitude et les précipitations hivernales sont appauvries en D et  $^{18}\text{O}$ . La composition isotopique de l'eau des rivières reflète celle des précipitations sur son bassin versant. L'eau des rivières dont le bassin versant est très montagneux est appauvrie en D et  $^{18}\text{O}$  à cause de l'effet de l'altitude. Ainsi, la signature isotopique ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) des eaux de surface et des eaux souterraines permet souvent de déterminer l'origine des différentes masses d'eau et de quantifier les échanges (e.g. Négrel *et al.*, 2003).

Pour quantifier les échanges nappes/rivière de manière simple, il est possible de réaliser un simple bilan de masse. Si l'on connaît le  $\delta\text{D}$  de l'eau de la rivière en amont des échanges supposés ( $\delta\text{D}_r$ ), le  $\delta\text{D}$  de l'eau à l'endroit où mélange nappes/rivière est supposé ( $\delta\text{D}_m$ ), et la composition isotopique de l'eau de la nappe ( $\delta\text{D}_n$ ), il est possible de calculer la fraction d'eau de la rivière ( $f$ ) dans le mélange selon l'équation suivante (Équation 6) :

$$\delta\text{D}_m = f \cdot \delta\text{D}_r + (1 - f) \cdot \delta\text{D}_n$$

Équation 6 : Quantification de la fraction d'eau de rivière (en %) impliquée dans une zone de mélange nappe/rivière

Il est possible de réaliser le même calcul avec le  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux.

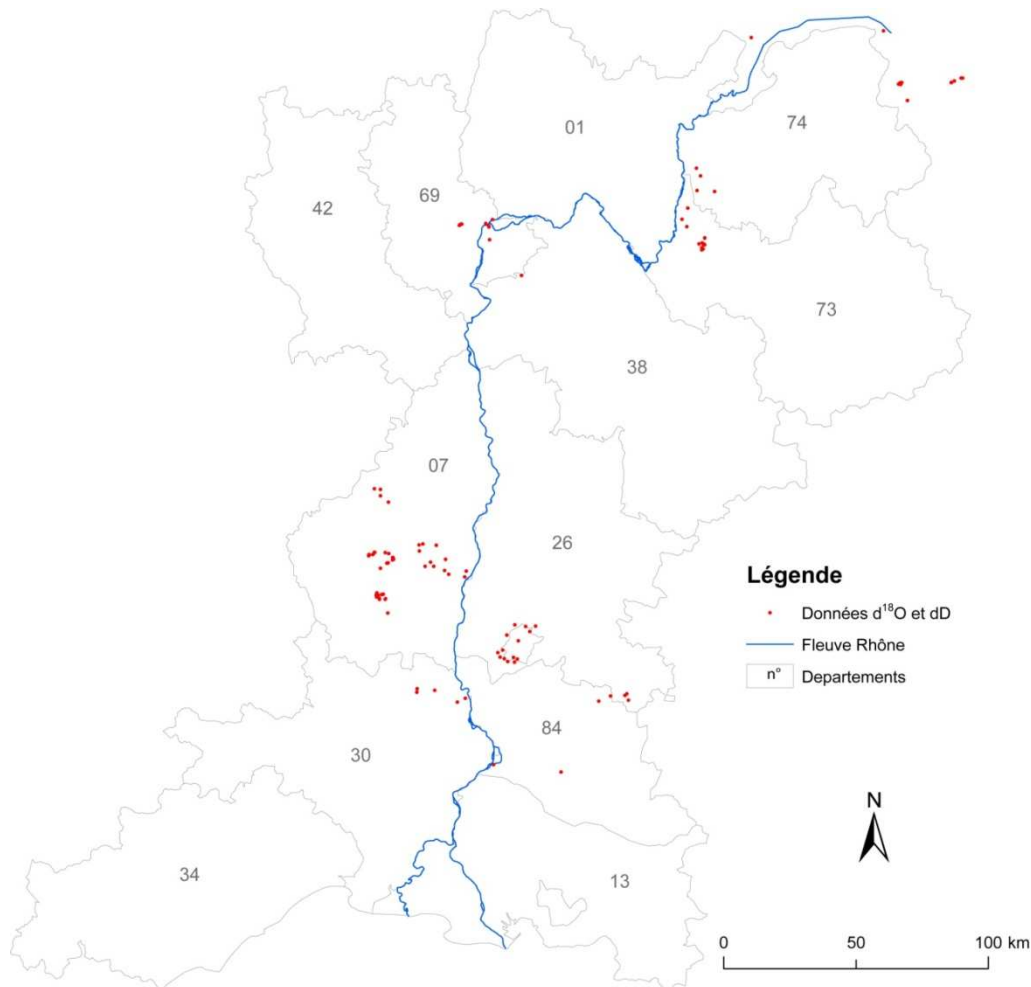
Les données publiées de géochimie isotopique (D/H,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) concernant les eaux souterraines et les eaux de surface du bassin du Rhône sont réparties principalement en Suisse (Schürch et Vuataz, 2000 ; Siwertz, 2003 ; Fette *et al.*, 2005), entre Seyssel et Belley (Ain, Savoie) (BDISO), au voisinage de Lyon (DeBénédictis, 2004 ; BDISO), dans la zone Bollène – Valréas (Drôme, Vaucluse) (Huneau *et al.*, 2001) et dans la région d'Avignon (BDISO). Parmi ces travaux, les données en amont du Lac Léman ont permis de quantifier les

1  $\delta\text{D} = (R/R_{\text{std}} - 1) \times 10^3$  avec R et  $R_{\text{std}}$  les rapports D/H de l'échantillon et d'un standard international (V-SMOW), respectivement.

2  $\delta^{18}\text{O} = (R/R_{\text{std}} - 1) \times 10^3$  avec R et  $R_{\text{std}}$  les rapports  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de l'échantillon et d'un standard international (V-SMOW), respectivement.



échanges entre les eaux souterraines et le Rhône (Schürch et Vuataz, 2000 ; Fette et al., 2005). La composition isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène des eaux du Rhône montre des variations saisonnières importantes ( $\delta^{18}\text{O} \pm 3\text{‰}$ ), avec un appauvrissement en D et  $^{18}\text{O}$  lorsque la contribution de la fonte des neiges est importante. Le  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux du Rhône est généralement plus faible que les précipitations locales : par exemple à Lyon, le Rhône est appauvri en  $^{18}\text{O}$  de 3‰ en moyenne par rapport aux précipitations (F. Martineau, UMR 5125 CNRS, Lyon, données non publiées). Un tel contraste dans les signatures isotopiques et de telles variations saisonnières devraient permettre de quantifier les échanges latéraux entre les eaux souterraines et le Rhône ainsi que l'altitude de recharge de ces apports. La quantification des transferts entre le Rhône et la nappe alluviale est envisageable dans les secteurs où les masses d'eau présentent des compositions isotopiques différentes (Négreil et al., 2003 ; Fette et al., 2005). Les données évoquées dans cette partie sont soit publiées (papiers et thèses) soit disponibles dans la base de données BDISO du BRGM consultable librement (infoterre.brgm.fr). Il existe notamment une thèse (Razafindrakoto S., 1988) soutenue à l'Université d'Avignon concernant les « Teneurs en isotopes stables des précipitations et des eaux souterraines et leurs variations en France ».



Carte 25 : Localisation des données oxygène 18 et deutérium inventoriées à ce jour

Au vue du travail bibliographique effectué, il existe environ 300 données isotopiques sur le bassin du Rhône. Elles concernent la composition en isotopes stables de l'eau (D/H,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), ainsi que la composition isotopique du carbone (rapports  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  du carbone organique et inorganique dissous) et dans une moindre mesure le tritium et le carbone 14. Il n'y a pas de données des isotopes du strontium contrairement à la Loire où elles sont nombreuses. Il n'y a pas de données sur le secteur de Brégnier-Cordon. La Carte 26 spatialise sur le bassin du Rhône les données de  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  recensées actuellement.

Le protocole d'acquisition de données isotopiques pour l'action de recherche est en cours. Il pourrait prendre différentes formes :

- suivi général ;
- concentration des efforts sur un secteur ;
- instantané temporel le long du Rhône à l'été et à l'hiver hydrologique.

#### 2.4.2.2. Le cas de Brégnier-Cordon

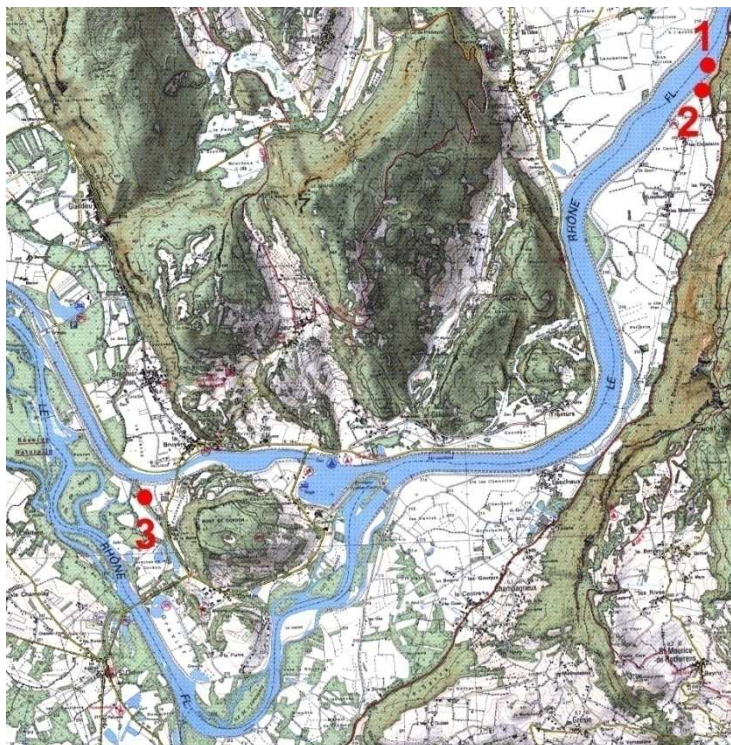
Les analyses d'eau présentées dans le tableau suivant (Tableau 12) ont été effectuées lors d'une sortie de terrain interdisciplinaire à Brégnier-Cordon le 16 mars 2007 (Annexe 12.5. rapport phase 1). Les 3 points de prélèvement sont les suivants (Carte 26) :

- **1** : Fleuve Rhône rive gauche au lieu-dit Les Carottes ;
- **2** : Contre-canal rive gauche au lieu-dit Les Carottes ;
- **3** : Contre-canal rive gauche à l'amont de l'usine hydro-électrique.

	pH	conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	TDS	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	NH <sub>4</sub> mg/l	F mg/l	Li mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	Cl mg/l	NO <sub>3</sub> mg/l	Br mg/l	$\delta\text{D}$ ‰ V-SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ V-SMOW
<b>1</b>	7,65	376	207	29,92	12,29	6,97	1,56	0,11	0,07	0,004	106,20	35,20	10,64	4,26	0,02	-66	-9,1
<b>2</b>	7,71	411	241	34,70	14,71	6,72	1,36	0,09	0,07	0,003	139,00	30,64	9,74	4,25	0,05	-59	-8,3
<b>3</b>	7,63	395	241	27,52	15,97	6,68	1,28	0,11	0,08	0,003	116,40	36,40	10,32	3,95	0,05	-65	-9,0

Tableau 12 : Analyses physico-chimiques et isotopiques à Brégnier-Cordon

Ces résultats semblent indiquer une alimentation des contre-canaux par le Rhône au niveau des points 2 et 3. Toutefois, au niveau du point 2 la valeur  $\delta^{18}\text{O}$  plus faible pourrait laisser penser à une alimentation complémentaire en provenance du massif calcaire ou du sous-écoulement du Rhône. Pour vérifier cette hypothèse avec l'Équation 6, il faudrait connaître, en plus des données présentées dans le Tableau 12, les teneurs isotopiques de l'eau de nappe.



Carte 26 : Localisation des 3 points d'échantillonnage pour analyses physico-chimiques et isotopiques

Au regard de ces premiers résultats, une campagne d'analyse des signatures isotopiques des eaux interstitielles de faible profondeur (-50cm dans les sédiments) et des principaux réservoirs a été réalisée le 20 Mai 2008. Cette période a été choisie car correspondant à la période de fonte des neiges, là où la

signature isotopique des eaux du fleuve est la plus différente de celle des eaux de nappe. Au total 26 échantillons ont été collectés : 4 dans les eaux superficielles du fleuve, 9 dans les interstices des contre-canaux, 3 dans les interstices du chenal court-circuité, 3 dans les eaux souterraines (puits ou sources) du Bugey en rive droite, 3 dans les eaux souterraines du massif calcaire situé en rive gauche, 3 dans les eaux souterraines des collines molassiques situées au Sud du secteur, 1 dans le Guiers (affluent rive gauche) et 1 dans le Gland (affluent rive droite). Les analyses des teneurs en  $^3\text{H}$  et en  $^{18}\text{O}$  sont en cours.



### **3. Partie III - Interprétation interdisciplinaire des échanges nappes/Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon**

---



### 3.1. Superposition des métriques, croisement des approches et bilan sur le secteur de Brégnier-Cordon

L'interprétation interdisciplinaire des échanges nappes/Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon a été effectuée en croisant les résultats obtenus à partir des différentes métriques : hydraulique, hydrobiologique et isotopique.

Les données utilisées pour les différentes métriques sont les suivantes :

- piézométrie basses-eaux avant aménagement de 1978 (hiver) ;
- piézométrie basses-eaux après aménagement de 1990 (hiver) ;
- échantillonnage macrophytes et conductivités basses-eaux de 2007 (été) ;
- échantillonnage invertébrés souterrains et conductivités 1995-2008 (hiver et printemps) ;
- analyses isotopiques moyennes-eaux de 2007 (hiver).

#### 3.1.1. Carte de synthèse par superposition des métriques

La Carte 27 présente la superposition des couches SIG contenant les interprétations des échanges nappes/Rhône réalisées selon les métriques hydrauliques et biologiques pour l'aménagement de Brégnier-Cordon décrites dans la partie 2 de ce rapport. Les résultats ont été agrégés selon un découpage en unités fonctionnelles repérées avec les PK (points kilométriques) pour la rive droite et la rive gauche, de l'amont vers l'aval. Le Rhône est représenté par une ligne blanche.

#### 3.1.2. Tableau de synthèse du croisement des métriques : initiation du tableau des métriques

Le Tableau 14 propose une synthèse de ces résultats selon les unités fonctionnelles (alimentation, drainage ou équilibre) en tant qu'initiation du tableau des métriques. Pour la métrique hydraulique, les valeurs de débit suivies d'une ou deux étoiles sont calculées manuellement à partir de la piézométrie après aménagement (\*) ou avant aménagement (\*\*).

Les autres valeurs sont obtenues par analyse spatiale. Le signe moins indique une alimentation de la nappe par le fleuve. Ce tableau propose 4 gammes de valeurs de débit. Les 2 premières sont calculées pour une perméabilité de  $10^{-3}$  m/s et une épaisseur utile de 1m : Qu en  $\text{m}^3/\text{j}/\text{m}^2$  et Qcu en  $\text{m}^3/\text{j}$  pour la longueur considérée. Les 2 suivantes sont calculées à partir 3 hypothèses :

- l'épaisseur utile est fixée à 4m ;
- les débits sont pondérés par le sinus de l'angle d'échange ;
- la perméabilité est déduite d'essais de pompage effectués dans la nappe à proximité.

On a QuH en  $\text{m}^3/\text{j}$  pour  $4\text{m}^2$  et QcuH en  $\text{m}^3/\text{j}$  pour la longueur considérée. Les valeurs de perméabilité utilisées sont les suivantes (Tableau 13) :

























Rive	PK	Perméabilités en m/s
Droite	114,5 à 108	$5 \cdot 10^{-3}$
Droite	108 à 103	$10^{-3}$ (pas d'essais de pompages connus)
Gauche	115 à 112	$10^{-3}$ (pas d'essais de pompages connus)
Gauche	111 à 106	$5 \cdot 10^{-3}$
Gauche	106 à 102,5	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Gauche	102,5 à 99	$8,5 \cdot 10^{-3}$

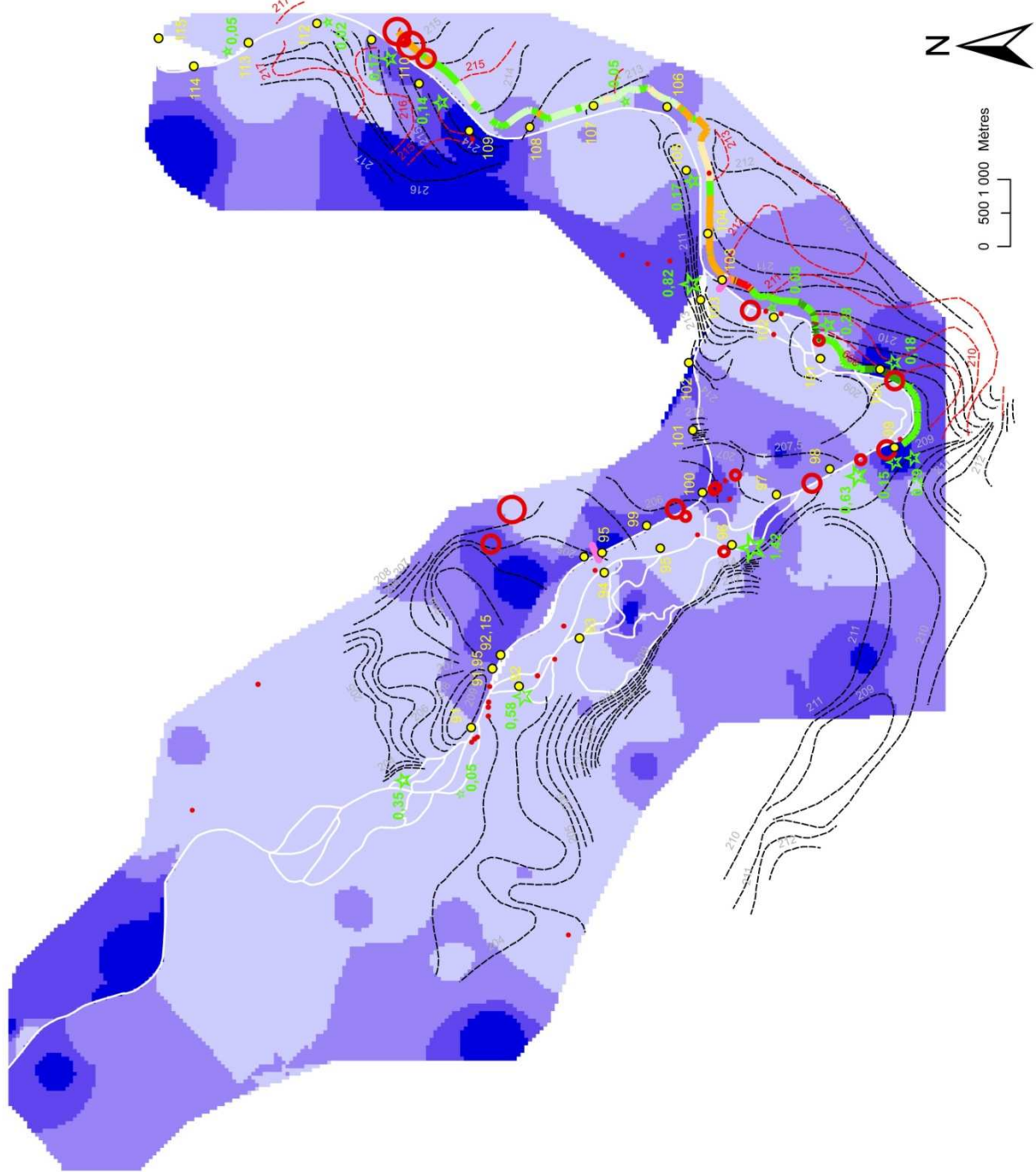
Tableau 13 : Champs de perméabilités à Brégnier-Cordon

#### 3.1.3. Commentaires sur le croisement des métriques

Le Tableau 15 rappelle (voir Rapport phase 1) les valeurs de débits des contre-canaux mesurées par le CNR et les valeurs de débits de fuite des digues calculées par nos soins et converties en  $\text{m}^3/\text{j}$ . Les débits ont été positionnés par rapport au PK, à la rive (gauche ou droite) et à la localisation sur l'aménagement CNR (type).

# Légende

-  Fleuve Rhône
  -  PK
  -  Barrages
- Métrique Hydrophysique**
- Débit de nappe en  $m^3/j/m^2$  (méthode manuelle)**
-  0,02 - 0,06
  -  0,07 - 0,35
  -  0,36 - 0,82
  -  0,83 - 1,42
- Débit de nappe en  $m^3/j/m^2$  (analyse spatiale)**
-  -0,74 / -0,38
  -  -0,37 / -0,05
  -  -0,04 / 0
  -  0 / 0,04
  -  0,05 / 0,41
  -  0,42 / 0,64
  -  0,65 / 1,57
- Métrique hydrobiologique**
-  Piezométrie basses-eaux 1990
  -  Piezométrie basses-eaux 1978
- Macrophytes :**
- Probabilité d'apports de la nappe de versant**
-  Nulle
  -  Faible
  -  Moyenne
  -  Elevée
- Invertébrés souterrains :**
- Espèces stygobies (en %)**
-  0%
  -  1 à 8%
  -  8 à 17%
  -  17 à 25%



Carte 27 : Superposition de l'interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes métriques



Le Tableau 16 propose un bilan des échanges entre les nappes, le Rhône et les contre-canaux en tenant compte des débits de fuite des digues pour les rive droites, les rives gauches et la partie centrale (Mont Cordon) de l'aménagement. Les valeurs, sont des débits exprimés en m<sup>3</sup>/j rapportées à la longueur considérée. Les débits de nappes utilisés tiennent compte des 3 hypothèses précédentes. Ce tableau présente les échanges entre les objets hydrologiques listés dans la première ligne et dans la colonne « Echange ». La dernière ligne présente le total des débits échangés par colonne.

A titre indicatif et afin de mieux cerner les valeurs de débits exprimés en m<sup>3</sup>/j, en période de basses-eaux, le débit du Rhône à Brens est d'environ 160m<sup>3</sup>/s soit 13 824 000m<sup>3</sup>/j et le débit réservé plancher du Vieux-Rhône est de 65m<sup>3</sup>/s soit 5 616 000m<sup>3</sup>/j.

PK	Rive	Type	Hydraulique				Macrophytes	Invertébrés
			Qu m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	Qcu m <sup>3</sup> /j	QuH m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	QcuH m <sup>3</sup> /j		
115_114,5	Droite	Rhône vif	-	-	-	-	Faible, Karst	-
114,5_111	Droite	Rhône vif	0,02*	70	0,40	1401	Nul	-
111_108	Droite	Retenue	0,15*	450	3,00	9009	Moyen à élevé, karst	-
108_105	Droite	Retenue	0,17**	510	0,68	2040	Nul à faible, karst	-
105_103	Droite	Retenue	0,82**	1640	3,28	6560	Faible à moyen, Karst	-
103_100	Droite	Canal de dérivation	-	-	-	-	-	-
100_92	Droite	Canal de dérivation, Restitution	-	-	-	-	Moyen à élevé, nappe du Gland	Alimentation profonde
92_aval	Droite	Restitution, Rhône-Vif	0,35**	-	-	-	Faible à nul	Peu d'apports souterrains
115_112	Gauche	Rhône vif	0,05*	150	0,20	600	Nul	-
112_111	Gauche	Rhône vif	-	-	-	-	Nul	-
111_110	Gauche	Retenue	-0,07	-48	-0,74	-489	Nul, pollution du karst	Echanges importants, alimentation profonde
110_106	Gauche	Retenue	0,05	191	0,43	1790	Nul à faible	-
106_102,5	Gauche	Retenue	-0,11	-362	-0,13	-456	Nul à faible, Fleuve alimente nappe	Le fleuve alimente la nappe
102,5_99	Gauche	Vieux-Rhône	0,37	1550	10,77	45370	Moyen à élevé, phréatique	Le fleuve draine la nappe
99_aval	Gauche	Vieux-Rhône, Rhône-Vif	0,05/1,42**	-	-	-	Faible, couloir d'alimentation, nappe	Couloir d'alimentation, nappe
103_99	Mont Cordon	Vieux-Rhône, Canal de dérivation	-	-	-	-	Résurgence karstique	Résurgence karstique

Tableau 14 : Synthèse de l'interprétation des échanges nappes/Rhône par unités fonctionnelles selon les différentes métriques

PK	Rive	Type	Contre-Canal		Fuites des digues	
			Q : m <sup>3</sup> /s	Q : m <sup>3</sup> /j	Q : m <sup>3</sup> /s/km	Q : m <sup>3</sup> /j
112_109	Droite	Retenue	0,45	38880	-	-
107_103	Droite*	Retenue	0,75	64800	0,168	56900
102,5_101,5	Droite	Canal Dérivation	0,15	12960	-	-
99,5_95	Droite	Canal Dérivation	0,25	21600	0,114	14233
95_94,15	Droite	Restitution	-	-	-	-
111_108	Gauche	Retenue	0,50	43200	0,174	39794
108_106,5	Gauche	Retenue	0,40	34560	0,038	4377
106,5_105,25	Gauche	Retenue	1,10	95040	0,051	7751
105,25_105	Gauche	Retenue	-0,30	-25920	-	-
105_102,5	Gauche*	Retenue	-	-	0,091	13704
103_102,5	Mont Cordon	Vieux-Rhône	-	-	0,758	33008
97_96	Mont Cordon	Lône de Rossillon	0,40	34560	0,426	21127

Tableau 15 : Synthèse des débits des contre-canaux et des débits de fuite des digues

Rive droite							
PK	Echange	Restitution	Dérivation	Vieux-Rhône	Vif/Retenue	Contre-Canal	Pompage
114,5_112	nappe				1 001		
112_111						400	
111_109						6 006	
109_108	nappe				3 003		214
112_109	contre-canal (exutoire) fuites digues				38 880	??	
108_107					680		
107_105	nappe					1 360	
105_103						6 560	
107_103	contre-canal (exutoire) fuites digues			64 800		56 900	
102,5_101,1	contre-canal (exutoire)		12 960				
99,5_94,15	contre-canal (exutoire)	21 600					
99,5_94,15	fuites (digues)					14 233	
100_92	Le Gland	172 800					

Rive gauche							
PK	Echange	Restitution	Dérivation	Vieux-Rhône	Vif/Retenue	Contre-Canal	Pompage
115_112	nappe				600		55
	source				1		
	eaux épuration				17 280		
111_110	Rhône					489	
110_106	nappe					1 790	
106_102,5	Rhône					456	
111_102,5	contre-canal (exutoire)			146 800			
111_102,5	fuites digue (CC)					65 625	
105,5_104,5	contre-canal (pertes)				25 920		
106_102,5	source					1 037	
	nappe			45 370			550
102,5_99	source			12			
	source			46			
	Le Guiers			1 468 800			

Mont Cordon							
PK	Echange	Restitution	Dérivation	Vieux-Rhône	Vif/Retenue	Contre-Canal	Pompage
103_102,5	fuites digues			33 008			
97_96	Lône de Rossilon (exutoire)			34 560			
100	fuites digues					21 127	

194 400      12 960      1 725 828      87 365      154 856      819

Tableau 16 : Synthèse hydrophysique des échanges nappe/Rhône/contre-canaux

### 3.1.3.1. Rive gauche de Brégnier-Cordon

- **PK 115\_112 (Rhône-Vif)** : l'indice macrophyte indique une probabilité d'apport au fleuve par la nappe nulle. Le débit de nappe ponctuel calculé est très faible, de l'ordre de 0,05m<sup>3</sup>/jour/m<sup>2</sup> soit 150m<sup>3</sup>/j (QuH : 0,20m<sup>3</sup>/jour ; QcuH : 600m<sup>3</sup>/j). On note au nord-est de ce secteur, la présence d'une source (source du Lavoir ; aquifère gravitaire ; débit minimum 0,013l/s soit 1,1m<sup>3</sup>/j) sensible aux précipitations et quasiment tarie en basses-eaux. La situation pourrait donc être modifiée en hautes-eaux et/ou en cas d'épisodes pluvieux (Michal, 1988).

Sur ce secteur, un pompage prélève 20 000m<sup>3</sup>/an (55m<sup>3</sup>/j) dans la nappe, ce qui n'est pas négligeable au regard des 50 à 100m<sup>3</sup>/j/km produits par l'aquifère. De plus, l'exutoire des eaux d'épuration de la ville du Bourget-du-Lac contribue au débit du Rhône pour environ 0,2m<sup>3</sup>/s (17 280m<sup>3</sup>/j).

- **PK 112\_111 (Rhône-Vif)** : la probabilité d'apport selon l'indice macrophyte reste nulle.

- **PK 111\_110 (Retenue)** : l'interprétation hydraulique calculée par analyse spatiale indique une alimentation de la nappe par le fleuve pour un débit moyen faible de l'ordre 0,07m<sup>3</sup>/jour/m<sup>2</sup> soit 48m<sup>3</sup>/j (QuH : 0,74m<sup>3</sup>/jour ; QcuH : 489m<sup>3</sup>/j). La métrique « invertébrés souterrains » met en avant des échanges

importants sur ce secteur, avec des apports à la nappe en provenance du Rhône (écoulement superficiel et/ou sous-écoulement souterrain) et d'autres plus profonds en provenance de la nappe d'accompagnement et/ou du karst de versant. La métrique macrophytes, quant à elle, indique des apports nuls de l'aquifère. Les analyses isotopiques tendraient à confirmer les apports karstiques détectés par les invertébrés. Une pollution de l'eau du karst, la rendant eutrophe, combinée à un débit phréatique modéré pourrait expliquer cette contradiction. Des analyses isotopiques complémentaires sur ce secteur seraient les bienvenues pour arrêter un résultat.

- **PK 110\_106 (Retenue)** : sur ce secteur l'indice macrophyte propose un apport de nappe nul à faible, ce qui est confirmé par la métrique hydraulique avec un débit moyen de nappe de l'ordre de  $0,05\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$  soit  $191\text{m}^3/\text{j}$  (QuH :  $0,43\text{m}^3/\text{jour}$  ; QcuH :  $1790\text{m}^3/\text{j}$ ).

- **PK 106\_102,5 (Retenue)** : sur cette zone, les 3 métriques sont en accord et mettent en évidence une alimentation de la nappe par le fleuve. Selon, la métrique hydraulique le débit moyen et de l'ordre  $0,11\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$  soit  $362\text{m}^3/\text{j}$  (QuH :  $0,13\text{m}^3/\text{jour}$  ; QcuH :  $456\text{m}^3/\text{j}$ ). Il existe à l'amont de ce secteur une source karstique (Fontaine du Lion ; débit minimum  $12\text{l/s}$  soit  $1037\text{m}^3/\text{j}$ ) sensible aux précipitations et quasiment tarie en basses-eaux. La situation pourrait donc être modifiée en hautes-eaux et/ou en cas d'épisodes pluvieux (Michal, 1988).

Sur ce secteur, un long contre-canal s'étire du PK 111 à 103. Son exutoire est situé en rive gauche du Vieux-Rhône juste à l'aval du barrage de dérivation. On estime sa contribution au débit du Rhône court-circuité à environ  $146\,880\text{m}^3/\text{j}$ . Sur ce linéaire, les débits de fuite de digues sont évalués à  $65\,625\text{m}^3/\text{j}$  et les apports de nappe (éventuellement du fleuve s'il y a apport par le fond) à  $841\text{m}^3/\text{j}$ .

- **PK 102,5\_99 (Vieux-Rhône)** : ce secteur montre une très bonne convergence de l'interprétation des 3 métriques. Les macrophytes indiquent des apports de nappe moyens à élevés notamment au niveau du PK 100 et du PK 99 (confluence avec le Guiers). Les invertébrés souterrains confirment cette tendance. Le débit moyen de nappe calculée par analyse spatiale est de l'ordre de  $0,37\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$  soit  $1\,550\text{m}^3/\text{j}$  (QuH :  $10,77\text{m}^3/\text{jour}$  ; QcuH :  $45\,370\text{m}^3/\text{j}$ ) avec un débit plus fort au niveau du PK 100.

De plus, il existe deux sources (aquifère gravitaire ; débit minimum  $0,14\text{l/s}$  soit  $12\text{m}^3/\text{j}$  et  $0,52\text{l/s}$  soit  $46\text{m}^3/\text{j}$ ) dont le débit semble trop faible pour avoir une influence sur ce secteur (Michal, 1988). Le Guiers contribue au débit du Rhône pour environ  $17\text{m}^3/\text{s}$  ( $1\,468\,800\text{m}^3/\text{j}$ ). Un pompage en nappe a prélevé  $201\,000\text{m}^3$  en 2006 (soit environ  $550\text{m}^3$  par jour, jusqu'à  $1355\text{m}^3/\text{jour}$  en août 2006) ce qui n'est pas négligeable par rapport au  $368$  à  $10\,774\text{m}^3/\text{j}/\text{km}$  produits par l'aquifère.

- **PK 99\_aval (Vieux-Rhône, Rhône-Vif)** : l'indice macrophyte indique des apports faibles à nuls par une nappe de versant qui n'entre pas dans la plaine. Elle est repoussée aux marges par le fleuve qui est en exhaussement sur ce secteur. On distingue toutefois quelques couloirs d'alimentation par des nappes de versant. Ceci est confirmé par les invertébrés et les calculs de débits (avant aménagement) même s'ils semblent surévalués par endroit (entre  $0,05$  et  $1,42\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ ).

Cette interprétation est confirmée par les travaux de Košmelj (1982) qui montre que l'aquifère en rive gauche à partir du pont d'Evieu sur une largeur de  $1,5\text{km}$  et sur une longueur correspondant à tout le secteur tressé est sous la forte influence du Rhône. Les nappes situées sur le versant, en amont de cette bande de  $1,5\text{km}$ , semblent être sous influence pluviale. La situation pourrait donc être différente en période de hautes-eaux et/ou en cas d'épisodes pluvieux.

### 3.1.3.2. Rive droite de Brégnier-Cordon

- **PK 115\_114,5 (Rhône-Vif)** : les macrophytes indiquent des apports de nappe faibles.

- **PK 114,5\_111 (Rhône-Vif)** : les macrophytes indiquent des apports de nappe nuls. Selon la métrique hydraulique, le débit ponctuel de nappe est très faible et de l'ordre de  $0,02\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ , soit  $70\text{m}^3/\text{j}$  sur la longueur (QuH :  $0,40\text{m}^3/\text{jour}$  ; QcuH :  $1\,401\text{m}^3/\text{j}$ ).

- **PK 111\_108 (Retenue)** : l'indice macrophyte met en évidence des apports karstiques moyens à élevés. Le débit ponctuel moyen de la nappe est de l'ordre de  $0,15\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ , soit  $450\text{m}^3/\text{j}$  sur la longueur (QuH :  $3\text{m}^3/\text{jour}$  ; QcuH :  $9\,009\text{m}^3/\text{j}$ ).

Sur cette portion, un pompage prélève  $78\,000\text{m}^3/\text{an}$  ( $214\text{m}^3/\text{j}$ ) ce qui n'est pas négligeable au regard des  $150$  à  $3\,000\text{m}^3/\text{j}/\text{km}$  que peut produire l'aquifère sur ce secteur.

Entre les PK 112 et 109, un contre-canal draine la nappe, les débits de fuite du Rhône à travers les digues et les apports d'un petit ruisseau. Au PK 109, l'eau du contre-canal est déversée dans le Rhône, en rive droite, par le biais d'une station de relevage au rythme moyen de  $38\,880\text{m}^3/\text{j}$ . Selon nos calculs, l'eau de nappe drainée sur la longueur du contre-canal correspond à un volume de  $6\,406\text{m}^3/\text{j}$  (QcuH). Les autres contributions ne sont pas connues.

- **PK 108-105 (Retenue)** : on observe des apports karstiques nuls à moyens selon les macrophytes. Le débit ponctuel (avant aménagement) était de l'ordre de  $0,17\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$  soit  $510\text{m}^3/\text{jour}$  sur la longueur (QuH :  $0,68\text{m}^3/\text{jour}$  ; QcuH :  $2040\text{m}^3/\text{j}$ ).

- **PK 105\_103 (Retenue)** : l'indice macrophyte distingue un couloir d'alimentation karstique et des apports faibles à moyens. Le débit ponctuel (avant aménagement) était de l'ordre de  $0,82\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$  soit  $1640\text{m}^3/\text{j}$  sur la longueur (QuH :  $3,28\text{m}^3/\text{jour}$  ; QcuH :  $6560\text{m}^3/\text{j}$ ).

Pour ce dernier, si le sens de l'échange est bon, le débit semble surévalué ce qui peut s'expliquer par l'augmentation des lignes d'eau due au barrage.

Entre les PK 107 et 103 un contre-canal draine la nappe à raison de  $7920\text{m}^3/\text{j}$  et les fuites des digues du Rhône pour un total estimé de  $56900\text{m}^3/\text{j}$ . Ce contre-canal passe sous le Rhône par un siphon et son exutoire est situé en rive droite du Vieux-Rhône juste à l'aval du barrage de dérivation. Le volume d'eau restitué est estimé à  $64800\text{m}^3/\text{j}$ .

- **PK 103\_100 (Canal de dérivation)** : pas de données.

Entre les PK 102,5 et 101,5 un contre-canal rejette, selon nos estimations,  $12960\text{m}^3/\text{j}$  dans le canal de dérivation en rive droite.

- **PK 100\_92 (Canal de dérivation, Restitution)** : sur ce secteur l'indice macrophytes évalue les apports de nappes entre moyens et élevés. Il met en évidence un couloir d'alimentation préférentiel au niveau du Gland confirmé par les invertébrés.

Le Gland débit moyen du Gland est estimé de  $2$  à  $5\text{m}^3/\text{s}$  ( $172\,800$  à  $432\,000\text{m}^3/\text{j}$ ).

Entre le PK 99,5 et 94,15 un contre-canal rejette environ  $21600\text{m}^3/\text{j}$  juste à l'aval du barrage-usine du canal de dérivation en rive droite dont approximativement  $14\,233\text{m}^3/\text{j}$  issus des fuites des digues.

- **PK 92\_aval (Restitution, Rhône-Vif)** : sur ce secteur peu d'apports phréatiques selon les invertébrés souterrains et les macrophytes. Pour ces derniers, le fleuve est en exhaussement et alimente la nappe. A l'extrémité aval, on observe le drainage d'une nappe de versant (apport moyen). Le débit ponctuel calculé ( $0,35\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ ) est en désaccord avec les autres métriques, mais il s'agit d'une valeur avant aménagement.

### 3.1.3.3. Entre Rhône court-circuité et canal de dérivation : la zone du Mont Cordon

Il s'agit du secteur situé entre la rive gauche du canal de dérivation et la rive droite du Vieux-Rhône. Les métriques biologiques indiquent des résurgences karstiques profondes en provenance du Mont Cordon, notamment au niveau du PK 100 (Canal de dérivation).

Ce secteur les débits de fuite des digues calculés sont importants : 33 008m<sup>3</sup>/j entre le Vieux-Rhône et le canal de dérivation juste à l'aval du barrage de Champagneux ; 21 127m<sup>3</sup>/j juste à l'aval de l'exutoire de la lône de Rossillon. Cette lône draine un volume d'eau évaluée à 34 560m<sup>3</sup>/j restitué au Vieux-Rhône en rive droite

#### 3.1.4. Bilan du croisement interdisciplinaire

Au final, on observe une bonne convergence des résultats des différentes métriques. Cette convergence est particulièrement bonne pour les trois métriques en rive gauche (PK 106\_103) où le fleuve alimente la nappe, et surtout entre le barrage sur le Vieux-Rhône (PK 103) et la confluence avec le Guiers (PK 99) où le fleuve draine la nappe, avec une bonne correspondance de l'intensité des échanges. De plus, les métriques hydrauliques et biologiques (macrophytes) convergent bien notamment entre les PK 111 et 108. Les métriques macrophytes et invertébrés, quant à elles, convergent bien et plus particulièrement au PK 100 (canal de dérivation rive gauche).

Côté divergences, on observe la principale entre les PK 111 et 110 (Rhône-Vif, rive gauche). Sur ce secteur, il semble indispensable d'acquérir des données géochimiques souterraines pour caractériser l'origine de l'eau et trancher entre les différents indicateurs. Pour le reste, les divergences entre métriques hydrauliques et biologiques sont, semble-t-il, dues à l'utilisation d'une piézométrie avant aménagement pour le calcul des débits, ce qui n'est pas surprenant compte-tenu du changement des lignes d'eau et de l'ancienneté des mesures. Ces divergences portent plus sur l'intensité de l'échange que sur son sens.

**Remarque :** Ces résultats montrent que le pompage AEP de Saint-Genix-sur-Guiers (Puits de la Forêt) est positionné dans une des zones où l'aquifère est le plus productif du secteur. Ce pompage a prélevé environ 201 000m<sup>3</sup> d'eau souterraine en 2006 (soit environ 550m<sup>3</sup> par jour, jusqu'à 1355m<sup>3</sup>/jour en août 2006). Les apports de la nappe dans ce secteur peuvent être évalués au maximum à 10 774m<sup>3</sup>/j sur une distance d'environ 1 km le long du Rhône en rive gauche. Sur le plan opérationnel de la gestion de la ressource, cela impose la plus grande prudence en matière de prélèvements supplémentaires (autres forages ou augmentation des débits de pompage pour répondre à d'éventuels besoins supplémentaires dans ce secteur).

## 3.2. Vers des préconisations en matière de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité

L'identification et la quantification des échanges nappes/Rhône réalisées au cours de ce travail a de multiples conséquences en termes de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité des organismes vivant dans le fleuve, les zones humides associées et les nappes qui alimentent sa plaine alluviale. Nous considérerons ces conséquences en termes de gestion, successivement pour : 1) les apports d'eau souterraine aux chenaux du fleuve ; 2) aux zones humides associées ; et enfin 3) les apports d'eau du fleuve vers l'aquifère alluvial.

### 3.2.1. Les apports d'eau de nappe aux chenaux actifs du fleuve.

Ces échanges entre fleuve et nappe peuvent avoir des conséquences quantitatives et qualitatives importantes pour les eaux de surface des chenaux actifs, particulièrement en étiage estival où ces eaux souterraines contribuent au maintien du débit et au tamponnage thermique des eaux de surface. Ces effets sont surtout sensibles dans les secteurs court-circuités et les bras secondaires. Ces chenaux sont d'une part peu profonds (donc sensibles à l'ensoleillement) et ont d'autre part un débit suffisamment faible pour que des apports souterrains, même réduits, deviennent significatifs. Ces apports d'eau souterraine arrivant directement par le sous-écoulement de ces chenaux ou indirectement par les contre-canaux qui sont restitués en aval du barrage, contrôlent en partie les organismes présents dans ces chenaux. Ces animaux

sont pour la plupart hétérothermes et donc extrêmement sensible aux hausses rapides de la température. Les apports souterrains contribuent donc au maintien d'une faune d'eau froide (psychrophile) dans les chenaux peu profonds du fleuve.

**Exemple :** Les contre-canaux courant en rive droite et gauche du Rhône à l'amont de l'embouchure du canal de dérivation ont le Vieux-Rhône comme exutoire à l'aval du barrage de Champagneux. Ils drainent non seulement l'eau des nappes, mais aussi les fuites des digues et les apports de petits affluents. De plus à l'amont de la confluence du Guiers la lône de Rossillon alimente le Vieux-Rhône. Sur le secteur de Brégnier-cordon, jusqu'à la confluence du Guiers les apports des contre-canaux constituent un soutien d'étiage pour le chenal court-circuité. Leur apport, avec celui des nappes, en basses-eaux représente environ 6% du débit réservé du Vieux-Rhône (65m<sup>3</sup>/s). A titre comparatif, les apports du Guiers en basses-eaux correspondent à 26% du débit du Vieux-Rhône.

**Exemple :** D'un point de vue de la thermique du fleuve, les apports souterrains observés dans le chenal court-circuité du pied du barrage de dérivation jusqu'à l'aval de la confluence avec le Guiers contribuent certainement au maintien de zone d'eau plus froide dans cette partie du fleuve. Ces apports d'eau froide sont le plus souvent sensibles en aval de seuil (de radier) et en aval de banc de graviers où les eaux interstitielles regagnent la surface (zones de "upwelling"). Dans ces secteurs, une diminution du débit des nappes gagnant le chenal (nappe accompagnant le Guiers par exemple) liée à une exploitation trop intensive, aurait sans doute des conséquences biologiques importantes pour les organismes les plus psychrophiles vivant dans le fleuve court-circuité. Il convient donc de veiller à une gestion raisonnée de ces nappes en n'augmentant pas de manière incontrôlée les volumes pompés, notamment sur la zone de Saint-Genix-sur-Guiers.

### *3.2.2. Apports d'eau de nappe dans les zones humides associées au fleuve.*

Les apports d'eau souterraine peuvent aussi avoir une importance essentielle sur le maintien et l'évolution des zones humides associées au fleuve. En effet, une part importante de ces zones humides est alimentée par des eaux souterraines (apports diffus ou sous la forme de sources verticales bien localisées). Ces apports assurent l'existence même de ces zones humides, qui sans eux connaîtraient des assèchements estivaux prolongés, voir disparaîtraient complètement en cas de baisse trop importante des niveaux piézométriques. La survie à long terme de ces systèmes dépendants des apports en eau souterraine (appelés dans les textes communautaires GDE pour "Groundwater dependent ecosystems") exige donc une gestion quantitative stricte des prélèvements dans les nappes, en particulier des prélèvements pour irrigation, qui interviennent souvent à des périodes de l'année où le niveau piézométrique est le plus bas.

Les apports souterrains contribuent aussi à tamponner thermiquement ces systèmes. Ils participent donc au maintien d'une flore et d'une faune préférant les eaux fraîches, ayant généralement une forte valeur patrimoniale. A l'intérieur des sédiments, ces apports souterrains limitent la désoxygénation des sédiments et l'accumulation d'ammonium phytotoxique. Ils permettent ainsi le maintien d'espèces végétales particulières, sensibles à l'anoxie racinaire, et d'une faune interstitielle particulièrement diversifiée dans les sources verticales. Ces organismes possèdent eux-aussi une valeur patrimoniale non négligeable.

Enfin, ces arrivées d'eau souterraines (eau souvent peu chargée en nutriments) ont aussi pour conséquence le maintien de l'oligotrophie de ces zones humides. Certains invertébrés et plantes aquatiques étant connus pour disparaître dès les premiers signes d'enrichissement des eaux en nutriments.

**Exemple :** L'assèchement des zones humides aura un impact plus ou moins important sur leur fonctionnement selon son intensité. Lorsque l'intensité de l'assèchement reste faible, (substrat maintenu humide), l'exondation facilite le piégeage des nutriments et la transformation de l'azote organique en azote gazeux. Ces exondations modérées ne détruisent pas les organes souterrains des végétaux, qui peuvent ainsi recoloniser les zones humides après perturbation. En cas d'assec plus drastique, on observe au contraire dans la littérature une tendance au relargage des nutriments dans les milieux aquatiques, qui peut provoquer des blooms algaux et une eutrophisation des zones humides. Dans les zones humides oligotrophes, l'impact des exondations devrait être modéré. L'impact des assecs pourrait être plus

drastique, car de nombreuses zones humides oligotrophes fonctionnent comme des pièges à nutriments qui sont susceptibles d'être relargués si les apports d'eau souterraine alcaline diminuent, ou si les fluctuations piézométriques augmentent. Dans les zones humides plus eutrophes, l'impact pourrait être d'autant plus important que le milieu aquatique n'est pas drainé de manière significative par un aquifère, susceptible d'exporter les nutriments relargués dans la lame d'eau. Dans le secteur de Brégnier-Cordon, la plupart des zones humides sont mésotrophes à eutrophes. Les plus sensibles aux exondations vis-à-vis de la qualité de l'eau sont celles qui sont partiellement comblées par des limons et des vases, agissant comme des obstacles à l'écoulement phréatique et susceptibles de relarguer des nutriments dans la lame d'eau. Les écosystèmes plus graveleux devraient être moins sensibles à l'eutrophisation lors des assecs, mais leurs communautés vivantes, ne disposant pas de refuges spatiaux dans le sédiment, devraient être plus sensibles à l'effet physique de l'assec.

**Exemple :** Les contre-canaux des aménagements CNR ont pour rôle de drainer les eaux des nappes et du fleuve s'infiltrant au travers des digues du canal d'amenée et de limiter ainsi l'engorgement des sols agricoles les plus proches. Nos travaux ont aussi démontré qu'ils drainent une partie des eaux de la plaine alluviale et pour deux d'entre eux, située à l'Ouest du Mont Cordon, des eaux d'origine plus profonde. Cette origine profonde a été démontrée par la collecte d'organismes phréatobies à une très faible profondeur sous la surface du sédiment (*Parabathynella sp.*, *Crangonyx subterraneus*, *Salentinella argelieri*, *Niphargus fontanus* et *N. kochianus*). Cette faune possède une forte valeur patrimoniale, liée à sa rareté dans ce secteur du Rhône ayant subi les dernières glaciations. Les populations découvertes à Brégnier-Cordon constituent pour ces espèces l'extrême oriental de leur recolonisation du corridor fluvial. Ces organismes sont absents du milieu interstitiel peu profond des paléo-chenaux, sans doute à cause de leur colmatage par les sédiments fins et la matière organique. Dans ce secteur du Rhône, les contre-canaux et les nappes qui les alimentent, représentent donc des systèmes à forte valeur patrimoniale qu'il convient de protéger par une gestion raisonnée des prélèvements d'eau souterraine et en évitant toute implantation d'activité polluante à leur proximité.

### 3.2.3. Les apports d'eau de surface vers la nappe souterraine.

Les eaux souterraines des plaines alluviales de la plupart des grands fleuves européens représentent une ressource importante en termes d'eau potable. Le Rhône ne fait pas exception : de nombreux captages sont implantés dans son lit majeur et alimentent en eaux les principales agglomérations limitrophes. Du point de vue de sa qualité, cette ressource peut être menacée non seulement par les activités humaines se déroulant dans les plaines alluviales elles-mêmes, mais aussi par des pollutions de l'eau du fleuve qui peuvent être transférées vers la nappe à partir des zones où le cours d'eau recharge l'aquifère. Du point de vue de la quantité de la ressource en eau, la recharge de l'aquifère par le fleuve peut au contraire être considérée comme positive car elle contribue au stock d'eau disponible pour exploitation. La localisation et la quantification de ces apports du fleuve vers la nappe sont donc essentielles du point de vue de la gestion de la ressource en eau.

**Exemple :** Sur le secteur de Brégnier-Cordon, le fleuve recharge la nappe en rive gauche en amont du barrage de Champagneux court-circuitant le Vieux-Rhône et à l'amont de la zone du lieu-dit « Les Rubattiers ». Ces zones pourraient, après étude, constituer des sites privilégiés d'implantation de forages pouvant bénéficier de réalimentation par le Rhône.





## 4. Partie IV - Phases ultérieures de travail

---



## 4.1. Régime transitoire, variations hydrologiques et changement climatique

### 4.1.1. Des scénarios pour le changement climatique

Selon le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) (2007a) le réchauffement du système climatique est désormais sans équivoque et très probablement dû à l'augmentation des gaz à effet de serre anthropique. Cette affirmation est fondée sur les observations suivantes :

- Accroissement des températures moyennes mondiales de l'atmosphère (+0,74°C depuis 100 ans, soit +0,13°C par décennie) et de l'océan ;
- Fonte généralisée des neiges et de glaces ;
- Elévation du niveau moyen mondial de la mer (+1,8mm par an de 1961 à 2003).

En outre des changements à long terme du climat ont été observés : changements dans la localisation et la quantité des précipitations, phénomènes extrêmes comme des sécheresses, de fortes précipitations, des vagues de chaleur...

Les projections des changements climatiques futurs sont étudiées sur la base de 4 scénarios principaux dont les caractéristiques sont les suivantes (scénarios **A** : émissions de CO<sub>2</sub> élevées ; scénarios **B** : émissions de CO<sub>2</sub> faibles) :

- **A1** : croissance économique forte, maximum de la population mondiale au milieu du siècle pour décroître ensuite, nouvelles technologies, atténuation des différences économiques régionales. Il y a 3 sous-scénarios : A1FI (forte intensité de combustibles fossiles), A1T (autres sources d'énergie), A1B (équilibre entre les énergies fossiles et les autres).

- **A2** : monde très hétérogène, accroissement continu de la population mondiale, développement et croissance économiques régionaux et hétérogènes.

- **B1** : comme A1, avec technologies propres, utilisation efficiente des ressources, meilleure équité, pas d'initiative supplémentaire pour gérer le climat.

- **B2** : solutions locales, viabilité économique, sociale, environnementale, accroissement de la population mondiale plus faible.

D'une manière générale, le GIEC (2007b) pense que « l'ampleur et la chronologie des impacts qui surviendront finalement varieront avec l'amplitude et la vitesse du changement climatique, les voies de développement et d'adaptation ». Pour l'Europe, par exemple, le GIEC s'attend, entre autres, à une amplification des différences concernant la répartition des biens et des ressources naturelles. On peut s'attendre aussi à une augmentation des inondations, un accroissement de l'érosion, une fonte des glaciers, une diminution de la couverture neigeuse, une diminution des précipitations et à une extension de nombreuses espèces. L'Europe du Sud pourrait être frappée d'une augmentation des risques de sécheresse et à une réduction de la disponibilité en eau mettant en péril la production d'hydroélectricité, l'agriculture, le tourisme.

Concernant la France, MétéoFrance observe une augmentation des températures de l'ordre de 1°C au 20<sup>e</sup> siècle, avec un réchauffement plus marqué au sud. Pour le futur, MétéoFrance a mis en ligne (<http://climat.science-et-vie.com/carte/>) un simulateur permettant de générer des projections, pour la France, issues du modèle climatique Arpège-Climat, fondées sur 2 des scénarios climatiques :

- un scénario dit modéré (B2) qui « parie sur une croissance démographique faible, un réel souci d'équité sociale et de modestes évolutions technologiques » ;

- un scénario dit intensif (A2) qui « fait l'hypothèse d'une croissance démographique soutenue, d'une croissance vigoureuse et de disparités régionales marquées ».

Pour ces deux scénarios, le simulateur génère, pour la période 2050-2099, des projections climatiques par région administrative ou pour un réseau maillé qui découpe le territoire français en environ 360 mailles. Le modèle simule l'évolution de différents paramètres : la température maximale, la température minimale, la pluviométrie, l'ensoleillement et l'humidité du sol. Il fournit des résultats sous forme de valeurs numériques pour chacun des paramètres ou sous formes d'écart par rapport à la situation actuelle.

#### *4.1.2. Changement climatique et ressource en eau sur le bassin du Rhône*

A une échelle plus fine, des projections climatiques ont été effectuées à l'échelle de bassins versants dont celui du Rhône, de la Seine, de l'Adour-Garonne et de petits bassins littoraux méditerranéens (Redaud & al., 2002). Le bassin du Rhône a été étudié dans le cadre des programmes GEWEX Rhône (Global Energy and Water Cycle Experiment) et GICC-Rhône (Gestion et Impacts du Changement Climatique) (GICC, 2002 ; 2005). Ce travail est fondé sur l'hypothèse d'un doublement de la concentration en CO<sub>2</sub> d'ici 2050 (augmentation de 1% par an). Il utilise 4 modèles de circulation générale atmosphérique, dont Arpège, 5 modèles hydrologiques dont Modcou, selon plusieurs scénarios.

Malgré les incertitudes les principaux résultats pour le bassin du Rhône sont les suivants (GICC, 2005) :

- augmentation de la température, augmentation des pluies en hiver et diminution en été ;
- augmentation des hauts débits, alors que les débits moyens et d'étiage diminuent (notamment dans le sud) ;
- modification des régimes influencés par la chute des neiges (réduction du manteau neigeux, fonte précoce) ;
- incertitudes sur les crues (elles augmentent ou diminuent selon les modèles utilisés).

Le travail de Sauquet & al. (2003) tend à confirmer la diminution des basses-eaux, mais souligne que les incertitudes sont grandes et qu'il est difficile, compte-tenu des éléments disponibles d'apporter des éléments pour la gestion de l'eau. Concernant les nappes, Pangalou (2003) montre, encore une fois compte-tenu des incertitudes, que leur contribution au débit du Rhône peut évoluer en fonction des conditions et des scénarios. Tout comme le GICC, ces derniers travaux impliquent entre autres le Cemagref de Lyon et l'École des Mines de Paris. De plus, un travail de doctorat sur la définition d'indicateurs de réponse hydrologique des bassins versants du Rhône aux scénarios de changements climatiques est en cours. Ce sujet initié par le Cemagref de Lyon (E. Leblois) et l'Université Lyon 2 (J.P. Bravard) est mené par Jan Kavan et s'intitule « Évaluation de la fragilité de la ressource superficielle en eau aux fluctuations climatiques ».

#### *4.1.3. Le thème ZABR Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources*

Notre action de recherche échanges nappes/Rhône est en lien avec le thème transversal de la ZABR intitulé « Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources ». Ce thème a fait objet d'une fiche descriptive (Annexes 1). Dans le cadre de cette problématique, un sujet de thèse a été initié sur la définition d'indicateurs de réponse hydrologique des bassins versants du Rhône aux scénarios de changement climatiques. Ce sujet fait l'objet d'une collaboration entre le Cemagref de Lyon (E. Leblois) et l'Université Lyon1 (J.P. Bravard).

La question des modifications hydrologiques que pourraient induire les changements climatiques à l'échelle du bassin du Rhône ne sont pas sans soulever des questions d'ordre sociétales. Des modalités d'adaptation pour l'usage de la ressource devront être trouvées. Ceci nécessite de connaître préalablement la réponse des bassins versants du Rhône aux différents scénarios possibles d'évolution climatique actuellement identifiés. Le Rhône, sur cette question, a ses spécificités par rapport aux autres grands fleuves car il est soumis à un net gradient climatique, il varie en latitude depuis ces zones d'alimentation alpines jusqu'à son exutoire méditerranéen.

Outre les changements climatiques, les variations saisonnières ont aussi une influence sur les régimes d'écoulement du Rhône et d'alimentation des nappes. Il s'agit donc d'étudier plus précisément les variations saisonnières des échanges à l'échelle de plusieurs années et à plus long terme.

Compte-tenu des scénarios de modifications climatiques qui ont été identifiés jusqu'à présent dans la région Rhône-Alpes, et compte-tenu des incertitudes liées à ces scénarios, des impacts sont possibles sur les réserves d'eau souterraine et leur échange avec le Rhône. Les modifications thermiques résultantes peuvent déjà avoir des répercussions sur la gestion des centrales nucléaires, par exemple, qui nécessiteront davantage d'eau froide surtout à l'étiage. Les eaux souterraines sténothermes pourraient donc avoir un rôle à jouer. Il faudrait en estimer l'importance potentielle. Par ailleurs, les indicateurs biologiques permettant de valider ou de confirmer les échanges pourraient s'en trouver modifiés. Au préalable, il faut pouvoir quantifier ces échanges de manière chiffrée et sectorisée.

Ce travail devra être mis en lien avec le projet ANR WETCHANGE sur l'Ain si celui-ci est accepté, et avec le projet « Les invertébrés et les végétaux aquatiques indicateurs de la vulnérabilité des zones humides fluviales. Exemple des étiages sévères induits par le changement global et les activités agricoles » si celui-ci est validé par l'Agence de l'Eau.

La thématique changement climatique constitue un objectif secondaire de ce projet de recherche. Son étude implique de sélectionner un secteur où l'on observe de fortes contributions des eaux souterraines au débit du Rhône, et où les échanges nappes/fleuve sont bien caractérisés et caractéristiques. De plus, il est nécessaire de sélectionner un secteur sur lequel il est possible de faire faire la part entre évolutions climatiques et impacts anthropiques.

#### **4.2. Métrique complémentaire : Indicateurs géomorphologiques et paysagers sur les zones d'échange**

Le Rhône est une rivière récente qui n'a pas encore atteint son profil d'équilibre, et qui se subdivise en 3 unités biogéographiques limitées par la confluence avec la Saône (zone amont correspondant au sud-ouest de la région centre-européenne et zone en aval de Lyon correspondant à la région européenne atlantique), et 100 km environ en aval de Lyon, par la région climatique méditerranéenne. Le Rhône amont se caractérise par une dynamique active jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle, et par une grande diversité de formes fluviales. La plupart des travaux d'endiguements ont eu lieu entre 1880 et 1890, et les grands barrages hydro-électriques ont été édifiés durant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Ce secteur de cours d'eau a subi plusieurs épisodes d'exhaussement (e.g. époque post-glaciaire) en alternance avec des épisodes de méandrage (e.g. époque gallo-romaine) voire d'incision (depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle). Au début du 19<sup>ème</sup> siècle, le Rhône amont présente encore des patrons de formes fluviales contrastés : tressage à Chautagne et à Miribel, anastomose et méandrage en aval de la confluence avec la rivière d'Ain, et parcours linéaire de la gorge de Saint-Alban à Loyettes. Cette diversité résulte de la combinaison de la nature et de la quantité de la charge de fond, et de la pente de la plaine alluviale holocène, le tressage correspondant à un secteur en exhaussement, c'est-à-dire à une charge de fond grossière et abondante et une pente forte. Actuellement, 4 patrons coexistent sur le Haut-Rhône, qui vont structurer les échanges nappes/rivière. Dans le secteur de Brégnier-Cordon à Evieu, on distingue de grands méandres relictuels datant de la période gallo-romaine, du moyen-âge ancien et des 8 et 19<sup>èmes</sup> siècles. Cette section de plaine se caractérise par des sédiments plutôt fins (sables, limons) et une pente faible. Dans ce secteur s'est développé secondairement un style tressé qui a conduit à un exhaussement de la partie médiane de la plaine alluviale, et qui a détruit partiellement les méandres au cours du 17 et 18<sup>ème</sup> siècles. Par conséquent, la plaine dans le secteur de Brégnier-Cordon est constituée aujourd'hui par l'emboîtement de 2 unités géomorphologiques, une unité à tressage mobile et en exhaussement au centre de la plaine qui contribue à alimenter l'aquifère, et une unité plus figée, à méandres et anastomoses, aux marges de la plaine, qui devrait contribuer à drainer les aquifères (latérale ou alluviale). Les endiguements et l'aménagement de Brégnier-Cordon ont entraîné la diminution, voire la cessation de la divagation du lit, et par conséquent : un arrêt de l'exhaussement, des inondations associées et un enfouissement de la nappe d'accompagnement de la rivière d'1 à 2 mètres. Par conséquent, on devrait observer dans ce contexte une simplification fonctionnelle du secteur, une incision du lit mineur et un drainage des aquifères, sauf au droit du canal d'amenée, où la nappe d'accompagnement est probablement encore mise en charge (malgré les contre-canaux) par le fleuve (Bravard & al. 1986 ; Bravard, 1987 ; Bornette & al., 1994). La connaissance de la manière dont se sont organisées les unités géomorphologiques et leur altitude relative permet : 1) de mieux expliquer les patrons d'échange observés à l'échelle du secteur, et 2) de comprendre comment ces patrons ont évolué et sont susceptibles d'évoluer dans le futur.

L'utilisation d'indicateur géomorphologiques faciliterait l'interprétation hydraulique des échanges. Une meilleure appréciation de la profondeur du fleuve et de sa sinuosité permettrait d'améliorer l'estimation des débits d'échange.

Les études menées sur le secteur de Brégnier-Cordon ont mis en évidence que le degré d'incision et d'exhaussement influence fortement les échanges entre le fleuve et sa nappe, du moins dans le chenal court-circuité. En effet, les apports d'eau souterraine les plus importants au Vieux-Rhône sont situés dans la partie en amont du secteur court-circuité (du PK103 au PK99), là où le fleuve semble être en légère incision (il coule majoritairement dans un chenal unique, les sédiments fins sont faiblement représentés...). En aval du PK98 au contraire, les caractéristiques géomorphologiques semblent indiquer que le fleuve est en exhaussement (chenaux multiples, sédiments plus fins...). Dans ce secteur, les apports souterrain sont nuls ou pour le moins extrêmement faibles. Cette caractéristique avait déjà été mise en avant par Creuzé des Châtelliers & Reygrobellet (1990) pour expliquer les échanges d'eau et la composition de la faune interstitielle du chenal court-circuité de Miribel (secteur de Jons) et devrait être testée sur les prochains secteurs d'étude.

### 4.3. Choix d'un site aval

La phase 3 du projet consistera à réaliser un second diagnostic qualitatif et quantitatif des échanges sur un secteur du Bas-Rhône. Tant pour les descripteurs biologiques que géomorphologiques, il est nécessaire de mesurer le degré de robustesse de la méthode dans un contexte climatique et géographique différent. Le caractère méridional de ce second secteur test est donc indispensable. La validation de la méthode de diagnostic passe par le choix d'un site présentant une certaine hétérogénéité fonctionnelle et trophique, pour pouvoir distinguer les apports des aquifères des apports de la nappe alluviale. Enfin, comme il a été montré dans la discussion, le contexte géomorphologique du cours d'eau conditionne en partie les échanges nappe-rivière. Une hétérogénéité importante en termes de faciès (incision/exhaussement) serait également à prendre en compte dans le choix de ce site.

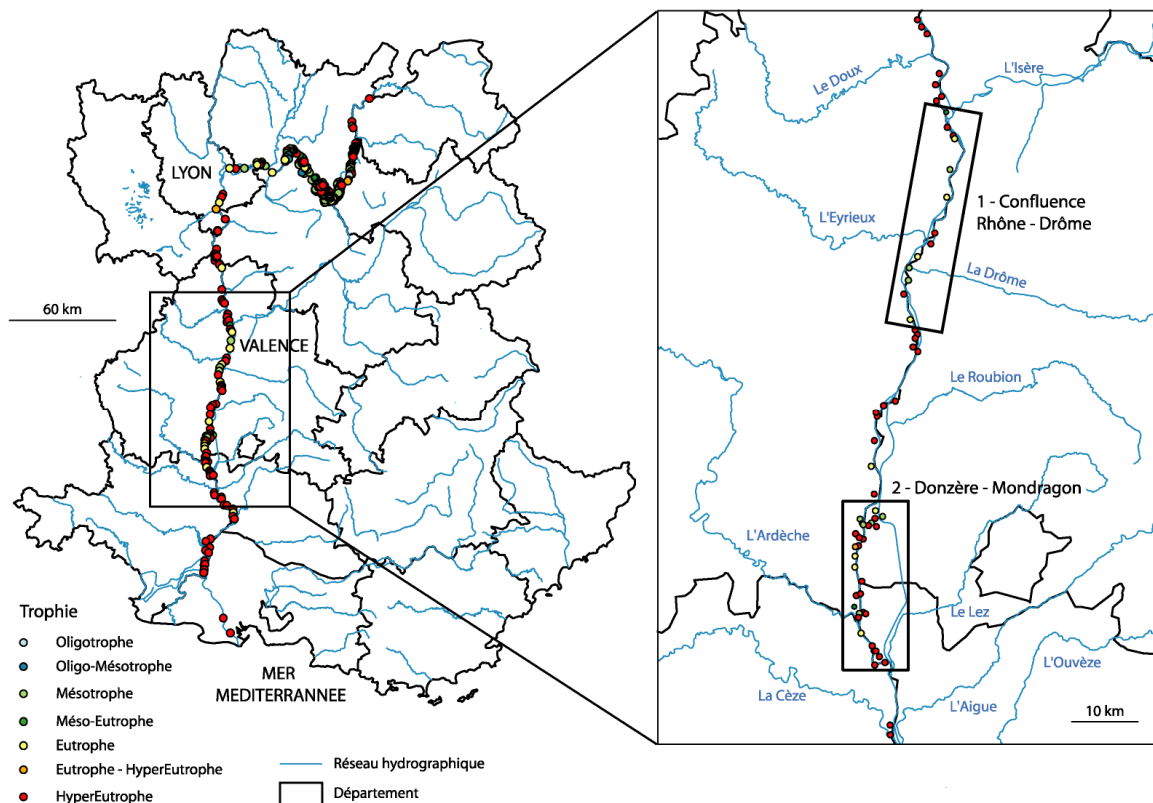


Figure 13 : Représentation de la base de données existante concernant les zones humides fluviales du Rhône. Chaque point correspond à une zone humide, la couleur étant fonction de son niveau de trophie. A droite, un zoom est effectué sur les deux secteurs qui pourraient constituer des sites tests sur le cours méridional du Rhône.

On dispose de données concernant les peuplements végétaux dans les zones humides fluviales sur l'ensemble du Rhône. L'indice trophique de ces zones humides permet de fournir des informations pour le choix d'un site aval. Dans la partie du Rhône qui s'étend du sud de Valence jusqu'à la Méditerranée, deux secteurs présentent les caractéristiques requises en termes d'hétérogénéité des valeurs de trophie dans les

zones humides : 1) le secteur qui s'étend du sud de Valence au nord de la confluence avec le Roubion, et qui inclue la confluence Drôme-Rhône et 2) le secteur de l'aménagement de Donzère-Mondragon. Cependant, le secteur de Donzère a finalement été choisi car il présente des nappes puissantes, permettant de visualiser des situations de drainage important.

#### 4.4. Données complémentaires

Le Tableau 17 dresse un bilan des données recueillies actuellement par unité d'aménagement CNR. On observe :

- 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.

Localisation	Secteurs (chutes)	Hydro		Macrophytes		Invertébrés	
		RD	RG	RD	RG	RD	RG
Haut-Rhône	Génissiat						
	Seysssel						
	Chautagne-Lavours						
	Belley						
	<b>Brégnier-Cordon</b>						
	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						
	<b>Péage-de-Roussillon</b>						
	Saint-Vallier						
	Bourg-Lès-Valence						
Rhône-Aval	Beauchastel						
	Baix-Logis-Neuf						
	Montélimar						
	<b>Donzère-Mondragon</b>						
	Caderousse						
	Avignon						
	Vallabrègues						
	Pallier d'Arles 1						
	Pallier d'Arles 2						
Pallier d'Arles 3							

Tableau 17 : Etat d'avancement par unité d'aménagement CNR (chutes)

##### 4.4.1. Métrique hydraulique

Une partie des données utilisées dans le cadre de cette étude est obtenue en convention avec la CNR. Cette convention prévoit le recueil des données suivantes :

- Contexte géologique (implantation/coupes de sondage) et hydrogéologiques : cartes et chroniques de niveaux piézométriques actuels (ou à défaut plus anciennes) dans la mesure de leur disponibilité ;

- Données bathymétriques disponibles du Rhône et éventuellement de ses affluents ;

- Contrôle pour la surveillance des digues et contre-canaux de la CNR : 1) implantation des stations de jaugeage et éléments de suivi du débit sur les contre-canaux ; 2) profil en long et profil en travers piézométriques jugés représentatifs ;

- Chroniques de débits en différents points représentatifs (données moyennes annuelles) ;
- Lignes d'eau pour des débits moyens annuels et saisonnières dans les Vieux-Rhône et Rhône-Vif.

L'ensemble de ces données est indispensable pour identifier et quantifier les échanges nappes/Rhône, mieux appréhender le contexte et le fonctionnement de l'unité d'aménagement CNR concernée. D'ici septembre 2008, la CNR doit transmettre, par ordre de priorité, les données pour les secteurs de : Donzère-Mondragon, Belley et Génissiat-Seyssel.

Suite au travail effectué sur le secteur de Brégnier-Cordon, il apparaît que les calculs effectués avec la Loi de Darcy imposent un nombre de données d'entrée minimum et indispensables pour une précision satisfaisante dans les calculs. Il s'agit :

- de cartes piézométriques datées et callées NGF (ou des relevés piézométriques suffisamment denses pour construire une carte piézométrique). Des campagnes de mesures piézométriques sont aussi envisagées pour combler les lacunes ;
- de cotes d'altitudes (ligne d'eau) du fleuve, des lômes ou des contre-canaux à la même date ;
- des champs de perméabilités ;
- des profils bathymétriques et des largeurs du fond du fleuve, des lôme ou des contre-canaux pour estimer au mieux la surface d'échange utile avec la nappe [surface utile = (niveau piézométrique - altitude du fond) + portion de largeur en cas d'alimentation par le fond].

Dans l'optique du travail sur les variations saisonnières il conviendra d'obtenir des cartes piézométriques et des lignes d'eau à des dates caractéristiques (ex : basses-eaux, moyennes-eaux, hautes-eaux). A plus long terme, un travail sur les effets potentiels dû aux évolutions climatiques fondés sur les résultats de scénarios (ex : Météo France) pourra utiliser ces dates caractéristiques pour estimer les effets prévus par ces scénarios.

Sur le secteur de Brégnier-Cordon, l'absence de données bathymétriques du Rhône manque cruellement pour estimer la surface d'échange nappes/Rhône utile. De plus, des piézométries après aménagements s'avèrent nécessaires pour confirmer les résultats des métriques biologiques sur le secteur aval de Brégnier-Cordon à partir de la confluence avec le Guiers sur le Vieux-Rhône et du début du Canal de Dérivation (Mont Cordon, canal de dérivation, Vieux-Rhône, Restitution, Rhône-Vif).

#### *4.4.2. Métrique macrophytes*

Outre les données antérieures à l'action de recherche déjà recueillies sur quasiment l'ensemble des chutes CNR, un échantillonnage macrophytes a été réalisé en été 2007 du sud de Chautagne à Brangues). Celles-ci ont été interprétées et confrontées aux données hydrauliques et biologiques sur le secteur de Brégnier-Cordon. L'été 2009 sera consacré à un échantillonnage sur le secteur de Donzère-Mondragon. Sur ce secteur, la confrontation des cortèges floristiques rencontrés avec ceux de Brégnier permettront : 1) d'étendre la méthode aux espèces méridionales rencontrées ; 2) de valider ou de corriger les profils écologiques établis pour les espèces rencontrées sur le Haut-Rhône ; et 3) grâce à la confrontation des résultats avec ceux obtenus pour les autres métriques, d'identifier les limites et les ajustements à apporter à la méthode en situation méditerranéenne de forte eutrophisation, dans un contexte de nappes de versant potentiellement peu alcalines.

#### *4.4.3. Métrique invertébrés souterrains*

Outre les données antérieures à l'action de recherche déjà recueillies sur 6 unités d'aménagement CNR (Chautagne à Jons et Donzère-Mondragon), un échantillonnage « invertébrés souterrains » a été réalisé en hiver 2008 sur le secteur de Brégnier-Cordon). Ces données ont été interprétées et feront l'Objet d'une étude complémentaire en 2008 afin d'actualiser et de clarifier certaines observations antérieures datant de 1996 à 1998 (notamment au niveau des PK110-111 et le secteur du Mont de Cordon).

Actuellement (printemps 2008), un échantillonnage est en cours sur le secteur de Donzère-Mondragon qui sera renouvelé en période de basses eaux (été 2008). Sur ce secteur, l'échantillonnage systématique de la faune invertébrés de l'ensemble des aquifères devrait permettre une plus grande précision de l'indice invertébrés en apportant des informations complémentaires liées à l'origine des eaux, en plus du sens et de



l'intensité des échanges. Le ré-échantillonnage des sites en période de basses eaux permettra également d'étudier la variation saisonnière des échanges sur ce secteur.

#### 4.4.4. Métrique isotopique

Des analyses isotopiques supplémentaires (26 échantillons) ont été réalisées à Brégnier-Cordon pour affiner les interprétations. Elles avaient pour but de caractériser les signatures isotopiques des nappes souterraines (situées au Nord, à l'Est et au Sud du secteur), des eaux du Rhône et d'en déduire le degré de mélange de ces deux types d'eaux dans les interstices des contre-canaux. Les résultats sont en cours d'analyse.

Dans l'année à venir des études comparables devraient être mises en place sur le secteur de Donzère-Mondragon en collaboration avec le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon. L'objectif consiste à caractériser les eaux des nappes et celles du Rhône.

### 4.5. Fin de la phase 2 et début de la phase 3 (2008-2009)

Pour clôturer la phase 2, une réunion de restitution (comité plénier) devrait avoir lieu au mois de juin à Lyon.

En ce qui concerne le volet hydrogéologique, la phase 3 sera principalement consacrée à l'acquisition de données complémentaires sur les autres secteurs du Rhône (données CNR et bibliographiques) mais aussi au traitement de ces données à l'aide des méthodes établies en phase 2 pour calculer les échanges nappes/Rhône sur ces secteurs. En ce qui concerne le volet biologique, la phase 3 portera sur l'étude des mécanismes d'échange sur le secteur témoin du Rhône-Aval sélectionné en phase 2.

Les données à collecter et les travaux à effectuer sont les suivants :

- collecte de données piézométriques complémentaires sur le secteur retenu (Donzère Mondragon) ;
- résultats hydrauliques sur le deuxième secteur test ;
- travail sur les incertitudes concernant les valeurs calculées de gradients et les débits de nappe ;
- estimation des débits de nappe sous réserve de l'obtention des données auprès de la CNR ;
- prise en compte et étude des aquifère de seconde zone selon les différentes métriques ;
- approfondissement bibliographique concernant les métriques invertébrés souterrains, macrophytes et géochimie ;
- identification des données biologiques mobilisables et évaluation quantitative et qualitative des données à collecter ;
- identification des données isotopiques existantes et acquisition de données complémentaires pour discriminer l'origine des eaux présentes dans les nappes (caractérisation des eaux du Rhône et des nappes) ;
- renseignement du tableau des métriques par secteur ;
- collecte de données biologiques complémentaires ;
- codage des métriques biologiques par site ;
- analyse et couplage des résultats biologiques et physiques ;
- sectorisation fonctionnelle quantifiée ;

Cette démarche conduira à l'élaboration d'une première ébauche de l'outil d'analyse, qui sera étendu par étapes à l'ensemble du Rhône à partir de janvier 2010.

Le déroulement prévu de l'étude des secteurs à étudier est effectué selon le découpage et les données CNR sachant que :

- le nombre de chutes CNR total à étudier est de 19 (7 sur le Haut-Rhône, 5 sur le Rhône-Moyen, 7 sur le Rhône-Aval) ;
- le nombre de chutes CNR déjà renseignées par des données est de 2 (Brégnier-Cordon et Péage-de-Roussillon) ;

- le nombre de chutes CNR restant à renseigner est de 16 (la chute de Cusset est gérée par EDF qui est détenteur des données).

A partir de 2008, l'obtention des données CNR devrait se faire par convention au rythme de 4 chutes par an. De septembre 2007 à septembre 2008 il est prévu de renseigner et d'étudier :

- sur le Haut-Rhône : Génissiat et de Seyssel, données manquantes de Chautagne, Belley ;
- sur le Rhône-Moyen : données manquantes de Péage-de-Roussillon ;
- sur le Rhône-Aval : Donzère-Mondragon.

Il restera donc 11 chutes à renseigner et à étudier : Haut-Rhône (Sault-Brénaz) ; Rhône-Moyen (Pierre-Bénite, Vaugris, Saint-Vallier et Bourg-lès-Valence) ; Rhône-Aval (Beauchastel, Baix-Logis-neuf, Montélimar, Caderousse, Avignon-Sauveterre et Vallabrègues).

#### **4.6. Propositions pour une phase 4 (2010)**

Pour la phase 4 (2010) des propositions seront formulées lors du prochain comité de suivi Agence-ZABR le 4 juin. La phase 4 permettra de tester l'outil d'identification et de quantification des échanges nappes/Rhône multi-métriques sur de nouveaux secteurs du fleuve. Le panel de secteurs étudiés permettra une réflexion sur la question des incertitudes liées aux résultats, la détermination des zones à forts enjeux et un premier travail sur la question du régime transitoire.

De plus, cette phase pourra être l'occasion de développer les liens entre l'action de recherche et les thèmes de la ZABR suivants : 1) Flux hydrique, contraintes climatiques, ressources ; 2) Flux polluants ; 3) observatoire sociale du fleuve.

Par ailleurs, l'action de recherche pourrait être consolidée par :

- un Projet Européen en cours d'élaboration avec l'Université de Darmstadt IIB-TUD (Allemagne) et l'Université polytechniques de Timisoara (Roumanie) sur la thématique « Groundwater Monitoring and Risk Management ».

- une Thèse sur la modélisation multi-échelles et multi-domaines des échanges nappes/Rhône avec calibrage biologique. La problématique pourra être la suivante : faut-il pour traiter cette thématique un utiliser un modèle global (ex : analytique) ou un assemblage de modèles locaux (ex : discrets) ?

- une Thèse sur la recherche d'indicateurs de vulnérabilité aux assèchements des zones humides associées au fleuve est en outre en projet.

- le Projet ANR WETCHANGE dont l'objet est l'étude des modifications des communautés de bio-indicateurs d'échanges nappes/rivière et des changements hydrauliques et incidences hydrogéologiques (Capacité de stockage des nappes, alimentation ; Capacité de restitution des nappes, drainage et usages) ; apport de dispositifs de ré-infiltration) dans un contexte de changement climatique.

- le Projet « Les invertébrés et les végétaux aquatiques indicateurs de la vulnérabilité des zones humides fluviales. Exemple des étiages sévères induits par le changement global et les activités agricoles » porté par P. Marmonier et soumis pour financement potentiel à l'Agence de l'Eau RMC.

## Etablissements partenaires

---

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 Laurent, Cottés Laurence, Immediato Frédéric, Lacombe Evelyne, Pelte Thomas, Weingertner Franck, Stroffek Stéphane) ;
- BRGM (Deverly Fabrice, Lachassagne Patrick, Dorfliger Nathalie) ;
- BURGEAP (Michelot Claude) ;
- CEMAGREF Lyon (Lafont Michel, Leblois Etienne) ;
- CEREGE (Olivier Radakovitch) ;
- CG Languedoc-Roussillon (Ingnouf Régis) ;
- CNR (Doutriaux Eric, Taravel Yan) ;
- DDAF Rhône (Perrin Jean-François) ;
- DIREN Languedoc-Roussillon (Chemin Paul) ;
- DIREN Provence Alpes Côte d'Azur (Valencia Guy) ;
- DIREN Rhône-Alpes (Henry de Villeneuve Caroline, Vernay Laurent, Caillot Yvan, Daguillon David) ;
- EDF/LNHE (Krimissa Mohamed, Castaing Patrick) ;
- EMSE – Centre SITE (Graillot Didier, Déchomets Roland, Paron Frédéric, Germain Alix, Dufour Marion) ;
- ENTPE (Winiarski Thierry) ;
- LEHF – écologie souterraine (Gibert Janine, Marmonier Pierre, Simon Laurent, Piscart Christophe, Ferreira David) ;
- LEHF – écologie végétale (Bornette Gudrun, Puijalon Sara, Jezequel Céline) ;
- Région Provence Alpes Côte d'Azur (Gentili Robert) ;
- Région Rhône-Alpes (Clabaut Alain) ;
- SEGAPAL, Miribel (Champion Murielle) ;
- SHR (Bruno Muscat) ;
- SMIRCLAID La Platière (Gangloff Anne) ;
- Université d'Avignon (Banton Olivier, Travi Yves) ;
- Université de Besançon (Chauve Pierre) ;
- Université de Montpellier (Drogue Claude, Jourde Hervé, Pistre Severin) ;
- Université de Savoie (Dzikowski Marc, Josnin Jean-Yves, Nicoud Gérard) ;
- Université de Saint-Etienne (Renac Christophe) ;
- ZABR (Clémens Anne).



## Références bibliographiques

---

### 1. Métrique Hydrophysique

Bakker M., Anderson E.I., Olsthoorn T.N. et Strack O.D.L. (1999) – Regional groundwater modeling of the Yucca Mountain site using analytic elements, *Journal of Hydrology*, 226, 167-178.

Balázsová A., Baroková D., Mikula K., Pfender D. et Šoltész A. (2002) – Numerical modeling of the groundwater flow in the left floodplain area of the Danube river, Proceedings of Algoritmy 2002, Conference on scientific Computing, on line, <http://www.math.sk/mikula/balazova.pdf> (page consultée en novembre 2007).

Bobba A.G., Bukata R.P. et Jerome J.H. (1992) – Digitally processed satellite data as a tool in detecting potential groundwater flow systems, *Journal of Hydrology*, 131, 25-62.

BURGEAP (2007a) – Etude préalable à la restauration de la nappe d'accompagnement du Rhône, Rhône court-circuité de Péage-de-Roussillon, Phase 1 et 2. Rapport d'étude SMIRCLAID (Syndicat Mixte intercommunal du Rhône court-circuité Loire-Ardèche-Isère-Drôme) 24p + figures, tableaux et annexes. RLy.1636a.

BURGEAP (2007b) – Etude préalable à la restauration de la nappe d'accompagnement du Rhône, Rhône court-circuité de Péage-de-Roussillon, Phase 3. Rapport d'étude SMIRCLAID (Syndicat Mixte intercommunal du Rhône court-circuité Loire-Ardèche-Isère-Drôme) 25p + figures, tableaux et annexes. RLy.1842a.

Carey B.M. (2003) – Groundwater/surface water interactions in the upper Sammamish River : a preliminary analysis, Washington State Department of Ecology, Publication No. 03-03-015, on line <http://www.ecy.wa.gov/biblio/0303015.html> (page consultée en novembre 2007).

Chiew F.H.S., McMahon T.A. et O'Neill I.C. (1992) – Estimating groundwater recharge using an integrated surface and groundwater modeling approach, *Journal of Hydrology*, 131, 151-186.

de Lange W.J (1996) –Groundwater modeling of large domains using analytical elements, Doctoral thesis, Delft University of technology, on line <http://www.ifremer.fr/avano/notices/00060/904.htm> (page consultée en novembre 2007).

de Lange W.J. (1999) – A Cauchy boundary condition for the lumped interaction between an arbitrary number of surface waters and a regional aquifer, *Journal of Hydrology*, 226, 250–261.

Dripps W.R., Hunt R. J. et Anderson M.P. (2002) – Use of an analytic element model (GFLOW) coupled to a parameter estimation model (UCODE) to estimate annual groundwater recharge rates in northern Wisconsin. In Proceedings of the 2002 GSA Annual Meeting, October 27-30, Denver, CO.

Fette M.W., Kipfer R., Schubert C.J., Hoehn E. et Wehrli B. (2005) – Assessing river-groundwater exchange in the regulated Rhone River (Switzerland) using stable isotopes and geochemical tracers *Applied Geochemistry*, 20, 701-712.

Flerchinger G.N., Cooley K.R. et Ralston D.R. (1992) – Groundwater response to snowmelt in a mountainous watershed, *Journal of Hydrology*, 133, 293-311.

GICC (2002) Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion. Projet GICC-Rhône, Rapport final de tranche I, ENSMP, BRGM, CEMAGREF, CNRS, EDF, MétéoFrance, 69p.

GICC (2005) Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion. Projet GICC-Rhône, Rapport final révisé, version courte, ENSMP, BRGM,

CEMAGREF, CNRS, EDF, MétéoFrance 23p.

GIEC (2007a) Résumé à l'intention des décideurs – Bilan 2007 des changements climatiques, les bases scientifiques. Traduction de la Contribution du groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 25p.

GIEC (2007b) Résumé à l'intention des décideurs – Bilan des changements climatiques, rapport de synthèse. Traduction de la Contribution au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 37p.

Holtzman R., Shavit U., Segal-Rozenhaimer, Gavrieli I, Marei A., Farber E. et Vengosh A. (2005) – Quantifying ground water inputs along the lower Jordan River, *Journal of Environmental Quality*, 34, 897-906.

Hortness J.E. et Vidmar P. (2004) – Surface-water/Ground-Water interaction along reaches of the Snake River and Henrys Fork, Idaho, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Scientific Investigations Report 2004-5115, on line <http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5115/> (page consultée en novembre 2007).

Hunt R.J., Feinstein D.T., Pint C.D. et Anderson M.P. (2006) – The importance of diverse data types to calibrate a watershed model of the Trout Lake Basin, Northern Wisconsin, USA, *Journal of Hydrology*, 321, 286–296.

Hunt R.J., Saad D.A. et Chapel D.M. (2003) – Numerical Simulation of Ground-Water Flow in La Crosse County, Wisconsin, and into Nearby Pools of the Mississippi River, USGS, Water-Resources Investigations Report 03-4154, on line <http://pubs.usgs.gov/wri/wri034154/> (page consultée en novembre 2007).

Janković I., Suribhatla R., Bakker M. et Bandilla K. (2003) – A new analytic element solution for steady two-dimensional groundwater flow with many elliptical inclusions. In *Proceedings of the 4th International Conference on the Analytic Element Method (ICAEM), November 20-21, St. Etienne, France.*

Johnson, C. et Mifflin M. (2006) – The AEM and regional carbonate aquifer modeling, *Ground Water*, 44 (1), 24–34.

Jones P.M. (2005) - Simulated Effects of Water-Level Changes in the Mississippi River and Pokegama Reservoir on Ground-Water Levels, Grand Rapids Area, Minnesota, U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2005-5139, on line <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5139/> (page consultée en novembre 2007).

Košmelj K. (1982) – Méthodologie pour le traitement des variables hydriques du Haut-Rhône français. Thèse, Grenoble 2, Mathématiques appliquées, Sciences sociales.

Kresic N. (1997) – Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling, ed. CRC Press LLC, New-York.

Lamontagne S., Leaney F. et Herczeg A. (2002) – Streamwater-groundwater interaction : the River Murray at Hattah-Kulkyne Park, Victoria : Summary of results, CSIRO Land and Water Australia, Technical Report 27/02, on line, <http://www.clw.csiro.au/publications/technical2002/tr27-02.pdf> (page consultée en novembre 2007).

McCarthy K., McFarland W., Wilkinson J.M. et White L.D (1992) – The dynamic relationship between ground water and the Colombia River : using deuterium and oxygen-18 as tracers, *Journal of Hydrology*, 135, 1-12.

McKenna S.A., Ingraham N.L., Jacobson R.L. et Cochran G.F. (1991) – A stable isotope study of bank storage mechanisms in the Truckee river basin, *Journal of Hydrology*, 134, 203-219.

Michal P. (1988) – Modes d'alimentation d'une nappe alluviale : nappe de la vallée du Rhône entre La Balme et Saint-Genix-sur-Guiers (Savoie). Thèse de docteur de 3e cycle, option hydrogéologie,

Université scientifique, technologique et médicale de Grenoble.

Moorman J.H.N. (1999) – Analytical element model analysis of the influence of different scenarios for the water level in a future retention basin, *Journal of Hydrology*, 226, 144–151.

Paleologos E.K., Sarris T.S. et Tolika M. (2005) – Integration of an analytic element model in a stochastic analysis of infiltration into a complex unconfined aquifer system, *Journal of Hydroinformatics*, 7, 53-59.

Pangalou D. (2003) Impacts du changement climatique sur la variation des paramètres hydrologiques du bassin versant du Rhône. Rapport de DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, ENSMP, 44.

Peterson R. E. et Connelly M.P. (2001) – Zone of interaction between Hanford site groundwater and adjacent Columbia River, Pacific Northwest national Laboratory, Progress report for the groundwater/river interface task, Science and Technology, Groundwater/Vadose zone integration project, on line, [http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/pnnl-13674.pdf](http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-13674.pdf) (page consultée en novembre 2007).

Redaud J.L., Noilhan J., Gillet M., Huc M. et Begni G. (2002) Changement climatique et impact sur le régime des eaux en France. Document réalisée pour le compte de l'UICN à la demande de la MIES, 41p.

Rushton K.R., Owen M. et Tomlinson L.M. (1992) – The water resources of the great Oolite aquifer in the Thames basin, UK, *Journal of Hydrology*, 132, 225-248.

Sarris T.S., Tolika M. et Paleologos E.K. (2003) – Quantification of the effect of infiltration rate in the Savannah river site, SC using analytic elements. In *Proceedings of the 4th International Conference on the Analytic Element Method (ICAEM)*, November 20-21, St. Etienne, France.

Sauquet E., Leblois E., Renard B., Haond M. et Jouve D. (2003) Examen de la vulnérabilité de la ressource vis-à-vis des fluctuations climatiques, applications aux étiages du bassin du Rhône. Pré-Projet RDT 2003, CEMAGREF Lyon, CNR, 28p.

Schot P.P. et Molenaar A. (1991) – Regional changes in groundwater flow patterns and effects on groundwater composition, *Journal of Hydrology*, 130, 151-170.

Simpkins W.W. (2006) – A multiscale investigation of ground water flow at Clear Lake, Iowa, *Ground Water*, 44 (1), 35–36.

Space M.L., Ingraham N.L. et Hess J.W (1991) – The use of stable isotopes in quantifying groundwater discharge to a partially diverted creek, *Journal of Hydrology*, 129, 175-193.

Stoepker K.E. et de Lange W.J. (2003) – A regional groundwater model in the Danish-German border area. In *Proceedings of the 4th International Conference on the Analytic Element Method (ICAEM)*, November 20-21, Saint-Etienne, France.

Tolika, M. et Paleologos E. K. (2004) – Groundwater modeling of a complex hydrologic system in South Carolina through the use of analytic elements, *J. of Water, Air et Soil Pollution*, 4, 215–226.

Urbano L., Waldron B., Larsen D. et Shook H. (2006) – Groundwater-surfacewater interactions at the transition of an aquifer from unconfined to confined, *Journal of Hydrology*, 321, 200-212.

Vermulst J.A.P.H. et de Lange W.J. (1999) – An analytic-based approach for coupling models for unsaturated and saturated groundwater flow at different scales, *Journal of Hydrology*, 226, 262–273.

Wilsnack M.M., Kelson V.P. et Wittman J.F. (2005) – An application of the analytic element method in modeling Florida Everglades hydrology, *Journal of the American Water Resources Association*, 41(1), 67–76.

Wittman J., Haitjema H.M. et Studebaker L. (1997) – Recycling input data during analytic element

modeling near Indianapolis, Indiana, *Journal of the American Water Resources Association*, 33 (1), 47–54.

## 2. Métrique Hydrobiologique : végétation aquatique

Bornette, G. et Amoros, C. (1991) Aquatic vegetation and hydrology of a braided river floodplain. *Journal of Vegetation Science*, 2, 497-512.

Britto, D.T., Siddiqi, M.Y., Glass, A.D.M., et Kronzucker, H.J. (2001) Futile transmembrane NH<sub>4</sub><sup>+</sup> cycling: a cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 4255-4258.

Carbiener, R., Trémolières, M., Mercier, J.L., et Ortscheit, A. (1990) Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters (Upper Rhine plain, Alsace). *Vegetatio*, 86, 71-88.

Miserez, J.L., Golay F. (2007) Cours de SIG, Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Onaindia, M., de Bikuna, B.G., et Benito, I. (1996) Aquatic Plants in Relation to Environmental Factors in Northern Spain. *Journal of Environmental Management*, 47, 123-137.

Robach, F., Thiébaud, G., Trémolières, M., et Muller, S. (1996) A reference system for continental running waters: plant communities as bioindicators of increasing eutrophication in alkaline and acidic waters in north-east France. *Hydrobiologia*, 340, 67-76.

Rostan, J.C., Amoros, C., et Juget, J. (1987) The organic content of the surficial sediment : a method for the study of ecosystems development in abandoned river channels. *Hydrobiologia*, 148, 45-62.

Schwarz, W.L., Malanson, G.P., et Weirich, F.H. (1996) Effect of landscape position on the sediment chemistry of abandoned-channel wetlands. *Landscape Ecology*, 11, 27-38.

Thiebaut, G. et Muller, S. (1995) Plant communities sequences in relation to eutrophication in weakly mineralized streams in the Northern Vosges. *Acta Botanica Gallica*, 142, 627-638.

Thiebaut, G. et Muller, S. (1999) A macrophyte communities sequence as an indicator of eutrophication and acidification levels in weakly mineralised streams in north-eastern France. *Hydrobiologia*, 410, 17-24.

## 3. Métrique hydrobiologique : invertébrés souterrains

Boulton AJ, Findley S, Marmonier P, Stanley EH, Valett HM. 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29: 59-81.

Claret, C., Marmonier, P., Dole-Olivier, M.J. et Castella, E. 1999. Effects of management works on the interstitial fauna of floodplain aquatic systems (River Rhône, France). *Biodiversity and Conservation*, 8/9, 1179-1204.

Creuzé Des Châtelliers M. & Reygrobellet J.L. (1990) Interactions between geomorphological processes, benthic and hyporheic communities: first results on a by-passed canal of the french Upper Rhône River. *Regulated Rivers: Research & Management*, 5: 139-158.

Creuzé des Châtelliers, M. 1991. Dynamiques de répartition des biocénoses interstitielles du Rhône en relation avec des caractéristiques géomorphologiques (secteurs de Brégnier-Cordon, Miribel-Jonage et Donzère-Mondragon). Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 161 p.



Danielopol D.L. (1984) Ecological investigations on the alluvial sediments of the Danube in the Vienna area - A phreatobiological project. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte*, 22:1755-1761.

Dole M. J. (1983) : Le domaine aquatique souterrain de la plaine alluviale du Rhône à l'est de Lyon : écologie des niveaux supérieurs de la nappe. Th. Doct., Univ. Lyon I, 168 p

Dole-Olivier M. J. & Marmonier P., 1992. Patch distribution on interstitial communities: prevailing factors. *Freshwater Biology*, 27: 177-191.

Dole-Olivier M.-J., Marmonier P. & Befly J.-L. (1997) Response of invertebrates to lotic disturbance: is the hyporheic zone a patchy refugium. *Freshwater Biology*, 37: 257-276.

Gibert, J., Stanford, J.A., Dole-Olivier, M.J. et Ward J.V. 1994. Basic attributes of groundwater ecosystems and prospects for research. In : *Groundwater Ecology*, J. Gibert, D.L. Danielopol et Stanford. J.A. (Eds), Academic Press, San Diego, p. 7-40.

Marmonier P., Dole-Olivier M.J. & Creuzé des Châtelliers M. (1992) Spatial distribution of interstitial assemblages in the floodplain of the Rhône River. *Regulated Rivers*, 7, 75-82

Marmonier, P., Claret, C. et Dole-Olivier, M.J. 2000. Interstitial fauna in newly-created floodplain canals of a large regulated river. *Regulated Rivers: Research and Management*, 16:23-36.

Marmonier, P., Claret, C., Creuzé des Châtelliers, M., Dole-Olivier, M.J. et Gibert, J. 1997. Anthropisation des plaines alluviales et biodiversité des communautés interstitielles. Rapport final pour le Ministère de l'Environnement, Comité « Ecologie et gestion du patrimoine naturel », 91 p.

Martin, D. 1978. Le milieu hyporhéique du Rhône à Evieu (Ain) et d'un cours d'eau du Bas-Bugey (Ain). Rapport technique de DEA Ecologie Fondamentale et Appliquée des Eaux Douces Continentales, Université Lyon 1, 40 p.

Reygrobellet, J.L., Mathieu, J., Laurent, R., Gibert, J. et Renault, P. 1974. Répartition du peuplement par rapport à la géomorphologie de la grotte de la cascade de Glandieu (Ain). *Spelunca Mémoires*, 8, 195-204.

Stanley E.H. & Boulton A.J. (1993) Hydrology and the distribution of hyporheos: perspectives from a mesic river and a desert stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 12: 79-83.

#### **4. Métrique géochimique : physico-chimie classique**

Claret C. Marmonier P., Dole-Olivier M.-J. et Castella E. 1999. Effects of management works on the interstitial fauna of floodplain aquatic systems (river Rhône, France). *Biodiversity et conservation*, 8: 1179-1204.

Clement, J.C., Pinay, G. et Marmonier P. (2002) Three-dimensional and seasonal dynamics of denitrification along catenas in three riparian wetlands with different vegetation cover. *Journal of environmental quality*, 31: 1025-1037.

Dole-Olivier, M.J. et Marmonier, P. 1992 .Ecological requirements of stygofauna in an active channel of the Rhône river. *Stygologia*, 7 : 65-75.

Malard F. et Hervant F. (1999). Oxygen supply and the adaptation of animals in groundwater. *Freshwater biology*, 41: 1-30.

Marmonier P. et M.J. Dole -1986- Les amphipodes des sédiments d'un bras court-circuité du Rhône. *logique de répartition et réaction aux crues. Sciences de l'eau*, 5: 461-486.

Marmonier P., Claret C. et Dole-Olivier M.-J. 2000. Interstitial fauna in newly-created floodplain

canals of a large regulated river. *Regulated rivers*, 16: 23-36.

Marmonier P., Dole-Olivier, M.J. et Creuze des Chatelliers, M. 1992. Spatial distribution of interstitial assemblages in the floodplain of the Rhône river. *Regulated rivers*, 7: 75-82.

## 5. Métrique géochimique : chimie isotopique

BDISO (Banque de données isotopiques): <http://infoterre.brgm.fr>

De Bénédictis, J. (2004) Mesurage de l'infiltration et de l'exfiltration dans les réseaux d'assainissement. PhD. INSA de Lyon, Villeurbanne, France, 331 p.

Fette, M., Kipfer, R., Schubert, C.J., Hoehn, E. and Wehrli, B. (2005) Assessing river-groundwater exchange in the regulated Rhone River (Switzerland) using stable isotopes and geochemical tracers. *Applied Geochemistry* 20, 701-712.

Gonfiantini, R., Fröhlich, K., Araguás-Araguás, L. and Rozanski, K. (1995) Isotopes in groundwater hydrology. In: *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Kendall C. and McDonnell J.J. (Eds.), Elsevier science, Amsterdam, pp. 203-246.

Huneau, F., Blavoux, B and Bellion, Y. (2000) Différences entre vitesses hydrauliques et vitesses radiométriques des eaux d'un réservoir profond: proposition d'explication pour l'aquifère miocène du bassin de Valréas (Sud-Est de la France). *C. R. Acad. Sci. Paris* 333, 163-170.

Négrel, Ph., Petelet-Giraud, E., Barbier, J. and Gautier, E. (2003) Surface water-groundwater interactions in an alluvial plain: Chemical and isotopic systematics, *Journal of Hydrology* 277, 248-267.

Schürch, M. and Vuataz, F.D. (2000) Groundwater components in the alluvial aquifer of the alpine Rhone River valley, Bois de Finges area, Wallis Canton, Switzerland. *Hydrogeology Journal* 8, 549-563.

Walker, J.F. and Krabbenhoft, D.P. (1995) Groundwater and surface-water interactions in riparian and lake dominated systems. In: *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Kendall C. and McDonnell J.J. (Eds.), Elsevier science, Amsterdam, pp. 203-246.

## 6. Métrique complémentaire indicateurs géomorphologiques

Bornette, G., Amoros, C., & Collilieux, G. (1994) Role of seepage supply in the aquatic vegetation dynamics in former river channels: prediction testing using a hydroelectric construction. *Environmental Management*, 18, 223-234.

Bravard, J.P. (1987) *Le Rhône, du Léman à Lyon*. La Manufacture, Lyon.

Bravard, J.P., Amoros, C., & Pautou, G. (1986) Impact of civil engineering works on the successions of communities in a fluvial system. *Oikos*, 47, 92-111.

# Liste des figures, tableaux, cartes et équations

## 1. Liste des figures

Figure 1 : Structure pour l'application de la condition limite de Cauchy à des surfaces d'eau en relation (d'après de Lange, 1999) .....	11
Figure 2 : Diminution/augmentation d'échelle des paramètres de la zone saturée et la zone non-saturée (d'après de Lange, 1999) .....	12
Figure 3 : Méthode de changement d'échelle entre modèles zone saturée et zone non-saturée (d'après de Lange, 1999) .....	12
Figure 4 : Couplage FDM et AEM (d'après Hunt & al., 2003) .....	13
Figure 5 : Analyse stochastique de l'infiltration appliquée à l'AEM (d'après Paleologos & al., 2005).....	13
Figure 6 : Cadran de lecture des valeurs d'angle obtenues dans le TIN.....	32
Figure 7 : Modèle graphique pour l'analyse spatiale sous ArcGIS 9.2. ....	41
Figure 8 : Comparaison des débits d'échanges obtenus manuellement avec ceux obtenus par analyse spatiale avec la Loi de Darcy sur les secteurs de Brégnier-Cordon et péage-de-Roussillon (n=11)...	42
Figure 9 : Abondance moyenne de la <i>Berula erecta</i> selon la teneur en NH <sub>3</sub> (graphique de gauche) et l'amplitude des variations thermiques (graphique de droite) .....	49
Figure 10 : Abondance moyenne du <i>Ceratophyllum demersum</i> selon la teneur en NH <sub>3</sub> (graphique de gauche) et l'amplitude des variations thermiques (graphique de droite). ....	49
Figure 11 : Exemple de calcul de l'indice de trophie, sur la station Petite Anse des Balmes (Chanay) .....	50
Figure 12 : Formule utilisée dans la méthode d'interpolation de la pondération par l'inverse de la distance (Miserez et Golay, 2007).....	57
Figure 13 : Représentation de la base de données existante concernant les zones humides fluviales du Rhône. Chaque point correspond à une zone humide, la couleur étant fonction de son niveau de trophie. A droite, un zoom est effectué sur les deux secteurs qui pourraient constituer des sites tests sur le cours méridional du Rhône. ....	92

## 2. Liste des tableaux

Tableau 1 : Classes de matériaux parentaux et codification .....	18
Tableau 2 : Principe de codification des configurations hydrogéologiques.....	18
Tableau 3 : Débits et gradients de nappe sur le secteur de Brégnier-Cordon .....	21
Tableau 4 : Débits d'échanges sur le secteur de Péage-de-Roussillon.....	29
Tableau 5 : Apports moyens de la nappe au Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon .....	43
Tableau 6 : Apports moyens de la nappe au Rhône sur le secteur de Péage-de-Roussillon.....	43
Tableau 7 : Bilan de la quantification des échanges nappes/Rhône .....	44
Tableau 8 : Exemple de calcul de l'indice de fréquence relative des espèces d'eaux phréatiques, sur la station Petite Anse des Balmes (Chanay) .....	50
Tableau 9 : Les indices de la méthode de Braun-Blauquet .....	51
Tableau 10 : Codage des indices de trophie et d'apport phréatique pour calculer l'indice d'apports de la nappe de versant .....	59
Tableau 11 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles des contre-canaux C (en rive droite) et D (en rive gauche). Pour ce dernier nous avons distingué la partie en amont alimentée par des eaux provenant de la nappe associée au Mont Cordon et la partie en aval alimentée par des eaux de fuite du canal d'aménée. Valeurs moyenne (ET) sur les années 1995, 96 et 97.....	69
Tableau 12 : Analyses physico-chimiques et isotopiques à Brégnier-Cordon.....	72
Tableau 13 : Champs de perméabilités à Brégnier-Cordon.....	77

Tableau 14 : Synthèse de l'interprétation des échanges nappes/Rhône par unités fonctionnelles selon les différentes métriques.....	79
Tableau 15 : Synthèse des débits des contre-canaux et des débits de fuite des digues.....	79
Tableau 16 : Synthèse hydrophysique des échanges nappe/Rhône/contre-canaux.....	80
Tableau 17 : Etat d'avancement par unité d'aménagement CNR (chutes).....	93

### 3. Liste des cartes

Carte 1 : Spatialisation des débits de nappe sur le secteur de Brégnier-Cordon.....	22
Carte 2 : Situation de la chute de Péage-de-Roussillon et hypothèse sur les échanges nappes/Rhône (d'après Schindler, 2006).....	24
Carte 3 : Piézométrie et débits d'échange calculés par le modèle BURGEAP (d'après BURGEAP, 2005).....	26
Carte 4 : Débits d'échanges nappe/rivière comparés.....	27
Carte 5 : Portion de TIN en rive gauche du Rhône à Brégnier-Cordon.....	33
Carte 6 : Sens d'écoulement du Rhône sur une portion de la rive gauche à Brégnier-Cordon.....	33
Carte 7 : Angle et sens d'écoulement de la nappe en rive gauche entre Saint-Genix-sur-Guiers et les Rubattiers.....	34
Carte 8 : Représentation du niveau piézométrique de la nappe entre Saint-Genix-sur-Guiers et Les Rubattiers.....	35
Carte 9 : Gradients de nappe entre Saint-Genix-sur-Guiers et Les Rubattiers.....	36
Carte 10 : Valeur de l'angle d'échange entre la nappe et le Rhône à Brégnier-Cordon.....	37
Carte 11 : Représentation des débits d'échange nappes/Rhône à Brégnier-Cordon.....	38
Carte 12 : Représentation des débits d'échanges nappe-Rhône à Péage-de-Roussillon en rive gauche.....	39
Carte 13 : Localisation des milieux aquatiques échantillonnés dans le secteur de Brégnier-Cordon (Ain). Les points bleus localisent les zones humides fluviales échantillonnées de manière approfondie dans le cadre de l'étude menée par Henry et Amoros (1999). Les points verts représentent les milieux aquatiques échantillonnés dans le cadre de la présente étude, et pour lesquels on a appliqué un protocole allégé.....	51
Carte 14 : Estimation de l'intensité des apports phréatiques à partir de relevés de végétation dans les bras morts du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon (Ain).....	53
Carte 15 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques de la plaine alluviale du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon (Ain) estimé par les exigences écologiques des espèces végétales composant les peuplements aquatiques.....	54
Carte 16 : Evaluation des échanges nappe-rivière dans le secteur de Brégnier-Cordon (Ain), reposant sur la valeur indicatrice des peuplements végétaux aquatiques.....	55
Carte 17 : Valeurs de conductivité mesurées dans les milieux aquatiques prospectés durant l'été 2007.....	56
Carte 18 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon estimé via des relevés de végétation.....	58
Carte 19 : Estimation de l'intensité des apports phréatiques aux milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon à partir de la valeur indicatrice des peuplements végétaux.....	59
Carte 20 : Probabilité d'apports issus de la nappe de versant dans les milieux aquatiques de la plaine du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon (calculé à partir des indices de trophie et d'apports phréatiques estimés via des relevés de végétation).....	60
Carte 21 : Niveau relatif de perturbations et appréciation de l'existence de processus d'alluvionnement dans les bras morts du Rhône dans le secteur de Brégnier-Cordon estimé à partir de la valeur indicatrice des peuplements végétaux présents dans les sites.....	61
Carte 22 : Localisation des prélèvements sur le secteur de Brégnier-Cordon.....	64
Carte 23 : Localisation des espèces stygobies sur les cinq zones de Brégnier-Cordon, la taille des cercles rouges est proportionnelle à la fréquence des espèces stygobies dans les prélèvements.....	65

Carte 24 : Localisation des espèces de nappes profondes alluviales ou karstiques (en haut) et localisation des stations sur le contre canal à l'ouest du Mont Cordon.....	67
Carte 25 : Localisation des données oxygène 18 et deutérium inventoriées à ce jour.....	71
Carte 26 : Localisation des 3 points d'échantillonnage pour analyses physico-chimiques et isotopiques .....	72
Carte 27 : Superposition de l'interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes métriques .	78

#### 4. Liste des équations

Équation 1 : Formule de la condition limite de Cauchy.....	11
Équation 2 : Calcul du débit d'échange selon la Loi de Darcy avec la perméabilité de l'aquifère .....	20
Équation 3 : Calcul du débit d'échange selon la Loi de Darcy avec la transmissivité de l'aquifère .....	20
Équation 4 : Quantification des écoulements souterrains dans le cas d'une nappe libre avec un substratum en pente (Kresic, 1997).....	28
Équation 5 : Profondeur normale de l'aquifère pour un flux uniforme et une pente sur un substratum uniforme .....	28
Équation 6 : Quantification de la fraction d'eau de rivière (en %) impliquée dans une zone de mélange nappe/ rivière .....	70



# Table des matières complète

Fiche signalétique du document.....	I
Table des matières synthétique .....	III
Préambule .....	V
Résumé phase 2 .....	VII
Introduction.....	1
1. Finalités opérationnelles, objectifs et méthodologie .....	1
2. Phases de l'étude.....	2
2.1. Phase 1 (2006-2007) et premiers résultats.....	3
2.2. Phase 2 (2007-2008) .....	4
3. Organisation du rapport .....	4
<b>1. Partie I - Compléments bibliographiques sur les échanges nappes/rivière (regard international).....</b>	<b>7</b>
1.1. Bilans de masses .....	9
1.2. Mesures de terrains et télédétection.....	9
1.3. Modélisation numérique .....	10
1.3.1. Méthode des différences finies (Finite difference method : FDM) .....	10
1.3.2. Méthode des éléments finis (Finite element method : FEM) .....	10
1.3.3. Méthode des éléments analytiques (Analytic element method : AEM).....	11
1.4. Conclusion.....	14
<b>2. Partie II - Interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes métriques .....</b>	<b>15</b>
2.1. Métrique hydrophysique .....	17
2.1.1. Configurations hydrogéologiques pour l'analyse des échanges entre le Rhône et ses nappes d'accompagnement : compléments pour le Rhône-moyen et le Rhône-aval. ....	17
2.1.1.1. Sectorisation et codification des configurations hydrogéologiques : rappels et compléments par rapport à la phase 1 .....	17
2.1.1.2. Rappel des objectifs et premiers résultats à l'échelle du fleuve Rhône.....	18
2.1.1.3. Développement et perspectives d'améliorations des configurations hydrogéologiques .....	19
2.1.2. Identification et quantification des échanges fondés sur les méthodes quantitatives et la modélisation .....	20
2.1.2.1. Brégnier-Cordon : compléments sur le secteur témoin .....	20
2.1.2.2. Péage-de-Roussillon : exploitation des résultats d'un modèle .....	23
2.1.2.2.1. Localisation et description rapide du site (Carte 2).....	23
2.1.2.2.2. Modèle d'écoulement souterrain de BURGEAP.....	25
2.1.2.3. Donzère-Mondragon : visite de terrain .....	30
2.1.3. Approche des échanges nappes/rivière par analyse spatiale sous SIG .....	31
2.1.3.1. Calcul et représentation de l'angle d'échange entre la nappe et le Rhône par analyse spatiale sous SIG.....	31
2.1.3.2. Vers une automatisation de l'analyse spatiale.....	42
2.1.4. Bilan et perspectives sur les échanges nappes/Rhône .....	42
2.2. Métrique hydrobiologique : végétation aquatique .....	47
2.2.1. Principes de la méthode de diagnostic (Amoros et al., 2000, Rivoire et Bornette, 2006) .....	47
2.2.1.1. Principes généraux .....	47
2.2.1.2. Les exigences des espèces vis-à-vis du niveau de trophie .....	48
2.2.1.3. Les exigences des espèces vis-à-vis de l'intensité des apports phréatiques .....	49
2.2.1.4. Exemple de résultat sur deux espèces végétales à exigences écologiques divergentes.....	49
2.2.1.5. Méthode de calcul des indices de niveau de trophie et de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques.....	50
2.2.2. Méthodologie et caractéristiques des relevés de végétation .....	51

2.2.3. Présentation des résultats.....	52
2.2.3.1. L'intensité des apports phréatiques, estimé par le nombre d'espèces liées aux apports d'eau souterraine .....	52
2.2.3.2. Le niveau de trophie.....	53
2.2.3.3. Discussion – Interprétation .....	54
2.2.3.4. Pour aller plus loin : Cartographie des valeurs de conductivité et Interpolation des différents indices.....	56
2.2.3.4.1. Cartographie des valeurs de conductivité.....	56
2.2.3.4.2. Interpolation .....	57
2.3. Métrique hydrobiologique : faune souterraine.....	63
2.3.1. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques .....	63
2.3.2. Localisation des prélèvements.....	64
2.3.3. Analyses et interprétation sur le secteur de Brégnier-Cordon .....	65
2.4. Métrique géochimique .....	69
2.4.1. Approche physico-chimique des eaux interstitielles peu profondes .....	69
2.4.2. Approche isotopique .....	70
2.4.2.1. Vue d'ensemble du bassin du Rhône .....	70
2.4.2.2. Le cas de Brégnier-Cordon .....	72
<b>3. Partie III - Interprétation interdisciplinaire des échanges nappes/Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon.....</b>	<b>75</b>
3.1. Superposition des métriques, croisement des approches et bilan sur le secteur de Brégnier-Cordon.....	77
3.1.1. Carte de synthèse par superposition des métriques.....	77
3.1.2. Tableau de synthèse du croisement des métriques : initiation du tableau des métriques .....	77
3.1.3. Commentaires sur le croisement des métriques.....	77
3.1.3.1. Rive gauche de Brégnier-Cordon.....	80
3.1.3.2. Rive droite de Brégnier-Cordon.....	81
3.1.3.3. Entre Rhône court-circuité et canal de dérivation : la zone du Mont Cordon .....	83
3.1.4. Bilan du croisement interdisciplinaire.....	83
3.2. Vers des préconisations en matière de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité.....	83
3.2.1. Les apports d'eau de nappe aux chenaux actifs du fleuve.....	83
3.2.2. Apports d'eau de nappe dans les zones humides associées au fleuve. ....	84
3.2.3. Les apports d'eau de surface vers la nappe souterraine.....	85
<b>4. Partie IV - Phases ultérieures de travail .....</b>	<b>87</b>
4.1. Régime transitoire, variations hydrologiques et changement climatique.....	89
4.1.1. Des scénarios pour le changement climatique .....	89
4.1.2. Changement climatique et ressource en eau sur le bassin du Rhône .....	90
4.1.3. Le thème ZABR Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources.....	90
4.2. Métrique complémentaire : Indicateurs géomorphologiques et paysagers sur les zones d'échange ...	91
4.3. Choix d'un site aval .....	92
4.4. Données complémentaires .....	93
4.4.1. Métrique hydraulique.....	93
4.4.2. Métrique macrophytes.....	94
4.4.3. Métrique invertébrés souterrains.....	94
4.4.4. Métrique isotopique .....	95
4.5. Fin de la phase 2 et début de la phase 3 (2008-2009) .....	95
4.6. Propositions pour une phase 4 (2010).....	96
<b>Etablissements partenaires .....</b>	<b>97</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>99</b>
1. Métrique Hydrophysique .....	99
2. Métrique Hydrobiologique : végétation aquatique.....	102
3. Métrique hydrobiologique : invertébrés souterrains .....	102
4. Métrique géochimique : physico-chimie classique .....	103



5.	<i>Métrie géochimique : chimie isotopique</i> .....	104
6.	<i>Métrie complémentaire indicateurs géomorphologiques</i> .....	104
<b>Liste des figures, tableaux, cartes et équations</b> .....		<b>105</b>
1.	<i>Liste des figures</i> .....	105
2.	<i>Liste des tableaux</i> .....	105
3.	<i>Liste des cartes</i> .....	106
4.	<i>Liste des équations</i> .....	107
<b>Table des matières complète</b> .....		<b>109</b>
<b>Sommaire des annexes</b> .....		<b>113</b>



## Sommaire des annexes

---

<b>1. Annexes 1 : Fiches ZABR .....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Fiche action recherche valorisation – Phase 1 (2006-2007).....</i>	1
1.2. <i>Fiche action recherche valorisation - Phase 2 (2007-2008) .....</i>	4
1.3. <i>Fiche action recherche valorisation - Phase 3 (2008-2009) .....</i>	7
1.4. <i>Fiche de restitution ZABR – Phase 1 (2006-2007) .....</i>	13
1.5. <i>Rapport scientifique : Thème: Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources en eau, Activités 2005-2007 et projection 2008 .....</i>	15
<b>2. Annexes 2 : Compléments bibliographiques sur les échanges nappes/rivière (regard international) – tableaux de synthèse .....</b>	<b>21</b>
2.1. <i>Tableau 1. Méthode de bilans de masses (isotopes stables, traceurs géochimiques, volume d'eau) – 1/2.....</i>	21
2.2. <i>Tableau 2. Méthode de bilans de masses (isotopes stables, traceurs géochimiques, volume d'eau) – 2/2.....</i>	23
2.3. <i>Tableau 4. Modèles numériques (FDM/FEM) – 1/2 .....</i>	26
2.4. <i>Tableau 5. Modèles numériques (FDM/FEM) – 2/2 .....</i>	28
2.5. <i>Tableau 6. Modèles numériques (AEM) – 1/2.....</i>	30
2.6. <i>Tableau 7. Modèles numériques (AEM) – 2/2.....</i>	32
<b>3. Annexe 3 : Synthèse des configurations hydrogéologiques.....</b>	<b>35</b>
<b>4. Annexe 4 : Liste des taxons invertébrés observés sur le secteur de la réserve naturelle nationale du Haut Rhône.....</b>	<b>37</b>
<b>5. Annexes 5 : Compte-rendu de terrains et de réunions .....</b>	<b>41</b>
5.1. <i>Compte-rendu rapide : réunion technique du 7 décembre 2007 .....</i>	41
5.2. <i>Compte rendu de la mission du 28 et 29 juin 2007 : visite de terrain des confluences avec le Berre et le Roubion (Drôme -Vaucluse) et rencontre avec le vice-président du SMBVL .....</i>	44
5.3. <i>Compte rendu sortie Donzère Mondragon – 7 et 8 février 2008 .....</i>	55



**ACCORD CADRE**  
**AGENCE DE L'EAU RHONE-MEDITERRANEE-CORSE**  
**ZONE ATELIER BASSIN DU RHONE (ZABR)**

-  
**Action n°1**  
-

**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*

**Rapport final – Phase 2 ANNEXES**  
**Mars 2008**

**École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE)**

*Didier Graillot, Frédéric Paran, Roland Déchomets, Alix Germain et Marion Dufour*

Centre SITE (Sciences, Informations et Technologies pour l'Environnement)  
158, cours Fauriel - 42 023 Saint-Étienne Cedex 2

**Université Claude Bernard Lyon I (UCBL)**

*Janine Gibert, Pierre Marmonier, David Ferreira, Christophe Piscart et Laurent Simon\**

*Gudrun Bornette, Sara Puijalon et Céline Jezequel\*\**

Laboratoire « Écologie des Hydrosystèmes Fluviaux » UMR CNRS 5023 (EHF)

\*Équipe « Hydrobiologie et Écologie Souterraine »

\*\*Équipe « Écologie des Communautés Végétales »

Bâtiment F.A. FOREL

43, Boulevard du 11 Novembre 1918 - 69 622 Villeurbanne Cedex

**CEMAGREF Lyon**

*Michel Lafont*

UR Bely

3 bis, quai Chauveau - CP 220 - 69 336 Lyon cedex 09

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

**Compagnie Nationale du Rhône  
(CNR)**  
2, rue André Bonin  
69316 Lyon Cedex 04

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



# Table des matières

---

<b>1. Annexes 1 : Fiches ZABR</b> .....	<b>1</b>
1.1. <i>Fiche action recherche valorisation – Phase 1 (2006-2007)</i> .....	1
1.2. <i>Fiche action recherche valorisation - Phase 2 (2007-2008)</i> .....	4
1.3. <i>Fiche action recherche valorisation - Phase 3 (2008-2009)</i> .....	7
1.4. <i>Fiche de restitution ZABR – Phase 1 (2006-2007)</i> .....	13
1.5. <i>Rapport scientifique : Thème: Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources en eau, Activités 2005-2007 et projection 2008</i> .....	15
<b>2. Annexes 2 : Compléments bibliographiques sur les échanges nappes/rivière (regard international) – tableaux de synthèse</b> .....	<b>21</b>
2.1. <i>Tableau 1. Méthode de bilans de masses (isotopes stables, traceurs géochimiques, volume d'eau) – 1/2</i> .....	21
2.2. <i>Tableau 2. Méthode de bilans de masses (isotopes stables, traceurs géochimiques, volume d'eau) – 2/2</i> .....	23
2.3. <i>Tableau 4. Modèles numériques (FDM/FEM) – 1/2</i> .....	26
2.4. <i>Tableau 5. Modèles numériques (FDM/FEM) – 2/2</i> .....	28
2.5. <i>Tableau 6. Modèles numériques (AEM) – 1/2</i> .....	30
2.6. <i>Tableau 7. Modèles numériques (AEM) – 2/2</i> .....	32
<b>3. Annexe 3 : Synthèse des configurations hydrogéologiques</b> .....	<b>35</b>
<b>4. Annexe 4 : Liste des taxons invertébrés observés sur le secteur de la réserve naturelle nationale du Haut Rhône.</b> .....	<b>37</b>
<b>5. Annexes 5 : Compte-rendu de terrains et de réunions</b> .....	<b>41</b>
5.1. <i>Compte-rendu rapide : réunion technique du 7 décembre 2007</i> .....	41
5.2. <i>Compte rendu de la mission du 28 et 29 juin 2007 : visite de terrain des confluences avec le Berre et le Roubion (Drôme -Vaucluse) et rencontre avec le vice-président du SMBVL</i> .....	44
5.3. <i>Compte rendu sortie Donzère Mondragon – 7 et 8 février 2008</i> .....	55





# 1. Annexes 1 : Fiches ZABR

---

## 1.1. Fiche action recherche valorisation – Phase 1 (2006-2007)

### Type d'action :

- Action labellisée ZABR :  Date de labellisation : juin 2005

Titre : Action A11 - Evaluation de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), en priorité du point de vue quantitatif : Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Phase 2

Personne responsable : D. Graillot – Centre SITE, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2.

E-Mail : [graillot@emse.fr](mailto:graillot@emse.fr) ; Téléphone : 04-77-42-01-30 ; Fax : 04-77-42-66-33

Thème de rattachement : Groupe de travail n°2 de la ZABR

Site de rattachement : aucun en particulier , peut concerner plusieurs sites le long du Rhône

### Equipes de recherche « ZABR » concernées :

Centre SITE ENSM-SE

UMR 5023 EHF Lyon I

UR Bely CEMAGREF Lyon

### Autres partenaires :

- Recherche : BRGM, Universités de Chambéry, Avignon, Montpellier et Toulouse
- Institutionnel : Agence de l'Eau RMC, DIREN
- Privé : EDF, CNR, VNF

### Finalités opérationnelles :

Mise en œuvre d'un outil pour la caractérisation des échanges entre les principaux cours d'eau du bassin du Rhône et leurs aquifères superficiels dans une optique de préservation de la ressource en eau et de la biodiversité.

### Objectifs et méthodologie :

Il s'agit à terme de proposer un outil interdisciplinaire pour la caractérisation et l'évaluation, tant qualitative que quantitative, des échanges entre les principaux cours d'eau du bassin du Rhône et leurs aquifères superficiels. Un tel outil contribuera à la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité sur le bassin du Rhône et pourra être mobilisé par exemple dans des contextes de gestion équilibrée et de conflits d'usage de la ressource.

Les premières phases de l'étude (2005- 2008) comportent :

- a. La 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, physico-chimiques, et biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes) pour la caractérisation des échanges nappe/rivière en tenant compte des influences anthropiques.

## Rapport ZABR – Phase 2

b. La réalisation d'un premier diagnostic qualitatif des échanges avec visualisation sur support cartographique SIG des premiers résultats afin d'élaborer des critères de sectorisation amont-aval et de définir les zones prioritaires à étudier pour ensuite, dans une seconde phase, envisager l'acquisition de données complémentaires.

c. L'intégration des informations identifiées au géorépertoire ZABR indiquant les zones à fortes relations et à forts enjeux.

d. L'étude des échanges secteurs par secteurs en se basant sur la sectorisation du fonctionnement hydraulique liée aux interactions entre les nappes d'accompagnement du Rhône et le fleuve en exploitant les données complémentaires acquises en seconde phase (2007-2008).

Les phases suivantes (2008-2010) conduiront à l'élaboration de l'outil d'analyse, à son test et son ajustement sur les secteurs tests, pour au final étendre son exploitation pour caractériser les échanges des principaux cours d'eau de l'ensemble du bassin du Rhône. Un travail de modélisation à échelle locale et globale pourra être envisagé si nécessaire.

### Description sommaire de l'étude ou de l'action de valorisation :

#### *Résumé de la phase 1 (2005-2006)*

Synthèse bibliographique interdisciplinaire en matière d'échanges nappe/rivière

Recensement des données existantes (géomorphologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, physico-chimiques, hydrobiologiques, aménagements et usages anthropiques)

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)

Identification des zones à fortes relations d'échange et à forts enjeux de préservation sur la base des indicateurs hydrologiques et biologiques.

Identification spatiale des secteurs dans lesquels les peuplements végétaux témoignent d'une forte-intermédiaire-faible- connectivité des eaux superficielles avec les aquifères, avec origine des apports.

Etude d'un secteur témoin non anthropisé pour l'étude des mécanismes d'échange sur le Rhône amont

Réunions de travail interdisciplinaire

#### *Phase 2 (2006-2007) faisant l'objet de la présente demande d'aide*

Etude par secteurs et acquisition de données complémentaires hydrologiques, physico-chimiques et biologiques sur les secteurs mal couverts en données (confluences affluents du Rhône en liaison avec des connexions aquifères) en coopération avec le Cemagref de Lyon.

Recensement et exploitation des données géochimiques en coopération avec l'université d'Avignon

Test et ajustement de l'outil de synthèse cartographique sur le secteur test défini en première phase et d'autres à définir en accord avec l'agence de l'eau (Ile de la Platière par exemple,...) et intégrant des phénomènes anthropiques (prélèvements, ouvrages, canaux, contre-canaux)

Quantification des échanges pour les secteurs où le permettent les données (test des méthodes d'analyses corollaires et spectrales, test des bilans hydrologiques, comparaison)

Réunions de travail interdisciplinaire

Intégration des résultats obtenus dans le géorépertoire ZABR et identification des zones à fortes relations et à forts enjeux

#### Moyens mobilisés :

- Humains : D. Graillot, J. Gibert, G. Bornette, M. Lafont, R. Déchomets, D. Ferreira, F. Paran, S. Puijalon
- Matériel : logiciel d'analyses corollaires et spectrales, matériel de prélèvements et d'analyses biologiques, SIG et bases de données
- données : données CNR et EDF (débits), banque Hydro, ADES

Date de début : octobre 2006

Date de fin prévue : octobre 2007

Résultats scientifiques attendus :

Mise en œuvre d'un outil interdisciplinaire d'évaluation des échanges nappe/rivière tenant compte des influences anthropiques.

Résultats acquis :

Première visualisation des échanges qualitatifs nappe/rivière sur le fleuve Rhône et les principaux affluents (stage Agence de l'Eau, ces résultats restent à valider et à compléter).

Publications scientifiques :

- rapport de recherche ZABR agence de l'eau remis à l'agence le 15 novembre 2006

Perspectives :

Mobilisation de l'outil pour une préservation de la ressource en eau et de la biodiversité du bassin du Rhône

Aides obtenues :

Agence de l'Eau à hauteur de 50%

Travaux connexes :

Géorépertoire ZABR

## 1.2. Fiche action recherche valorisation - Phase 2 (2007-2008)

### Type d'action :

- Action labellisée ZABR :  Date de labellisation : juin 2005

Titre : Action A11 - 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), en priorité du point de vue quantitatif : Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels - Phase 2 (année 2).

Personne responsable : Didier Graillot – Centre SITE, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne Cedex 2.

E-Mail : [graillot@emse.fr](mailto:graillot@emse.fr) ; Téléphone : 04-77-42-01-30 ; Fax : 04-77-42-66-33

Thème de rattachement : Groupe de travail n°2 de la ZABR.

Site de rattachement : principalement Axe Rhône/Saône et Zones Humides mais peut concerner d'autres sites le long du Rhône.

Partenaire financeur : Agence de l'Eau RMC.

Equipes de recherche « ZABR » concernées :

- Centre SITE ENSM-SE ;
- UMR 5023 EHF Lyon I ;
- UR Bely CEMAGREF Lyon.

Autres partenaires :

- Recherche : Universités d'Avignon, Chambéry, Montpellier ;
- Institution : DIREN ;
- Privé : CNR, EDF.

Finalités opérationnelles :

Mise en œuvre d'un outil pour la caractérisation des échanges entre le Rhône et ses aquifères superficiels dans une optique de préservation de la ressource en eau et de la biodiversité.

Objectifs et méthodologie :

Il s'agit à terme de proposer un outil interdisciplinaire pour la caractérisation et l'évaluation, tant qualitative que quantitative, des échanges entre le Rhône et ses aquifères superficiels. Un tel outil contribuera à la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité sur le bassin du Rhône et pourra être mobilisé par exemple dans des contextes de gestion équilibrée et de conflits d'usage de la ressource.

Les premières phases de l'étude (2006- 2008) comportent :

- La 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 nappe/rivière en tenant compte des influences anthropiques.

- La réalisation d'un premier diagnostic qualitatif des échanges avec visualisation sur support cartographique SIG des premiers résultats afin d'élaborer des critères de sectorisation amont-aval et de

définir les zones prioritaires à étudier pour ensuite, dans une seconde phase, envisager l'acquisition de données complémentaires.

- L'intégration des informations identifiées au géorépertoire ZABR indiquant les zones à fortes relations et à forts enjeux.

- L'étude des échanges se fera selon 2 niveaux : 1) une analyse corrélative inter-sites qui cherchera le lien statistique entre les différentes dimensions ou métriques (hydraulique, biologique, géochimique) ; 2) une recherche de la cohérence entre les typologies de secteurs fonctionnels mises en place dans les différentes métriques. Cette démarche constitue la première étape de la construction de l'outil. Elle sera réalisée dans une première étape sur les secteurs suffisamment documentés. Pour ceux qui ne le seraient pas des données complémentaires seront acquises en seconde phase (2007-2008).

Les phases suivantes (2008-2010) conduiront à l'élaboration de l'outil d'analyse, à son test et son ajustement sur les secteurs tests, pour au final étendre son exploitation pour caractériser les échanges nappes/fleuve Rhône. Un travail de modélisation à échelle locale et globale pourra être envisagé si nécessaire.

#### Description sommaire de l'étude ou de l'action de valorisation :

##### *Résumé de la phase 1 (2006-2007) :*

- Synthèse bibliographique interdisciplinaire en matière d'échanges nappes/rivière ;
- Recensement des données existantes (géomorphologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, physico-chimiques, hydrobiologiques, aménagements et usages anthropiques) ;
- 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) ;
- Construction de la base de données SIG ;
- Sélection d'un secteur témoin relativement peu anthropisé pour l'étude des mécanismes d'échange sur le Rhône amont (Brégnier-Cordon) ;
- Premiers résultats hydrauliques sur Brégnier-Cordon ;
- Réunions de travail interdisciplinaire.

##### *Phase 2 (2007-2008) faisant l'objet de la présente demande d'aide (résultats attendus et principales étapes)*

##### Sur le secteur de Brégnier-Cordon :

- conception de la tableau des métriques par site ;
- collecte de données complémentaires ;
- codage des métriques par site ;
- analyse des résultats inter-sites ;
- sectorisation fonctionnelle quantifiée et perspectives.

##### Sur le Haut-Rhône (Lac Léman à Lyon) :

- calcul des gradients hydrauliques et des débits de nappe sous réserve de l'obtention des données auprès de la CNR ;
- identification des données biologiques mobilisables et évaluation quantitative et qualitative des données à collecter ;
- identification des données isotopiques existantes ;
- identification des données et méthodes de photo-interprétation des échanges

Proposition de critères de classement pour le choix d'un site aval en fonction des données disponibles (hydraulique, biologique, isotopiques)

Réflexion sur l'analyse des échanges en régime transitoire dans un contexte de changement climatique

Intégration des résultats obtenus dans le géorépertoire ZABR

## Rapport ZABR – Phase 2

Réunions de travail interdisciplinaire

Comité de suivi plénier

Comités de suivi technique

### Phase suivante (2008-2009) :

Sur le secteur Haut-Rhône du Lac Léman à Lyon :

- conception de la tableau des métriques par site ;
- collecte de données complémentaires ;
- codage des métriques par site ;
- analyse des résultats inter-sites ;
- sectorisation fonctionnelle quantifiée et perspectives.

Sur le secteur aval sélectionné :

- calcul des gradients hydrauliques et des débits de nappe sous réserve de l'obtention des données auprès de la CNR ;
- identification des données biologiques mobilisables et évaluation quantitative et qualitative des données à collecter ;
- identification des données isotopiques existantes.

Début de thèse sur une approche de modélisation globale des échanges

### Moyens mobilisés :

- Humains : D. Graillot, J. Gibert, G. Bornette, M. Lafont, R. Déchomets, D. Ferreira, F. Paran ;
- Matériel : logiciel d'analyses corollaires et spectrales, matériel de prélèvements et d'analyses biologiques, SIG et bases de données ;
- Données : données CNR et EDF (débits), banque Hydro, ADES.

Date de début de la phase 2 : mars 2007.

Date de fin prévue de la phase 2 : mars 2008.

### Publications :

- rapport intermédiaire phase 1 remis à l'agence de l'eau en novembre 2006 ;
- rapport final phase 1 remis à l'agence de l'eau remis en mai 2007 ;
- publication de vulgarisation en cours de finalisation (Revue des Professionnels de l'eau) ;
- publication scientifique prévue courant 2008 (Environmental management).

### Perspectives :

Outil pour la mise en place d'une modélisation des échanges nappes/eau superficielle pour une préservation de la ressource en eau et de la biodiversité du bassin du Rhône (Plan Rhône, DCE).

### Budget global du projet (2007-2008):

Voir annexe.

Aides obtenues : Agence de l'Eau à hauteur de 50%.

Travaux connexes : Géorépertoire ZABR.

### 1.3. Fiche action recherche valorisation - Phase 3 (2008-2009)

#### Type d'action :

- Action labellisée ZABR :  Date de labellisation : juin 2005

Titre : Action A11 - 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). Influence des variations saisonnières sur les échanges - Phase 3 (2008-2009).

Personne responsable : Didier Graillot – Centre SITE, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne Cedex 2.

E-Mail : [graillot@emse.fr](mailto:graillot@emse.fr) ; Téléphone : 04-77-42-01-30 ; Fax : 04-77-42-66-33

Thème de rattachement : Groupe de travail n°2 de la ZABR.

Site de rattachement : principalement Axe Rhône/Saône et Zones Humides mais peut concerner d'autres sites le long du Rhône.

Partenaire financeur : Agence de l'Eau RMC (à partir de 2008 le projet pourrait prendre une dimension européenne : un financement de l'Europe dans le cadre du 7<sup>e</sup> PCRD (FP7 environnement – monitoring des eaux souterraines) et une labellisation ZABR sont actuellement à l'étude).

#### Equipes de recherche « ZABR » concernées :

- Centre SITE ENSM-SE ;
- UMR 5023 EHF Lyon I ;
- CEMAGREF Lyon ;
- Université d'Avignon (Laboratoire d'hydrogéologie).

#### Autres partenaires :

- Recherche : ENTPE, Hydrosociences-Montpellier, Univ. Savoie, (+ partenaires académiques européens) ;
- Institution : DIREN ;
- Privé : CNR, EDF.

#### Finalités opérationnelles :

Se doter d'un d'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.

#### Objectifs et méthodologie :

Ce programme de recherche a pour objectif de caractériser les échanges hydrauliques existants entre 1) le Rhône, ses annexes fluviales, les contre-canaux, et 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.

## Rapport ZABR – Phase 2

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 ;
- 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 ;
- à l'inverse 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.

Les premières phases de l'étude (2006- 2008) comportent :

- La 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.

- La réalisation d'un premier diagnostic qualitatif des échanges avec visualisation sur support cartographique SIG des premiers résultats afin d'élaborer des critères de sectorisation amont-aval (critères hydrogéologiques, climatiques, anthropiques) et de définir les zones prioritaires à étudier pour ensuite, dans une seconde phase, envisager l'acquisition de données complémentaires.

- L'intégration des informations identifiées au géorépertoire ZABR indiquant les zones à fortes relations et à forts enjeux.

- L'étude des échanges se fera selon 2 niveaux :

1) une **analyse corrélative inter-sites** 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 démarche constitue la première étape de la construction de l'outil. Elle sera réalisée dans une première étape sur les secteurs suffisamment documentés. Pour ceux qui ne le seraient pas des données complémentaires seront acquises en seconde phase (2007-2008).

Les phases suivantes (2008-2012) conduiront à l'élaboration de l'outil d'analyse, à son test et son ajustement sur les secteurs tests, pour au final étendre son exploitation pour caractériser les échanges nappes/fleuve Rhône. Un travail de modélisation à échelle locale et globale pourra être envisagé si nécessaire.

**Pour la phase 3**, l'analyse des échanges nappes-rivières se fera en focalisant la recherche sur les modalités d'échange en régime transitoire à deux échelles de temps :

1) Les **variations saisonnières** ont une influence sur les régimes d'écoulement du Rhône et d'alimentation des nappes. Les échanges identifiés en début de programme n'en tiennent pas compte. Ces échanges ont été évalués dans une première étape à partir de données moyennées. Il s'agit donc d'étudier plus précisément les variations saisonnières des échanges à l'échelle de plusieurs années : c'est la première échelle de temps (contributions possibles de C. Drogue et A. Margat).

2) La seconde échelle de temps concernerait les scénarios de **modifications climatiques** qui ont été identifiés jusqu'à présent sur le Rhône compte-tenu des incertitudes liées à ces scénarios. Des impacts sont possibles sur les réserves d'eau souterraine et leur échange avec le Rhône. Les modifications thermiques résultantes peuvent déjà avoir des répercussions sur la gestion des centrales nucléaires, par exemple, qui



nécessiteront davantage d'eau froide surtout à l'étiage. Les eaux souterraines sténothermes pourraient donc avoir un rôle à jouer. Il faudrait en estimer l'importance potentielle. Par ailleurs, les indicateurs biologiques permettant de valider ou de confirmer les échanges pourraient s'en trouver modifiés. Il est cependant encore prématuré de traiter ce problème compte tenu du degré d'avancement du projet. Cette première investigation s'effectuera en concertation avec le projet ZABR « Approche multi-compartiments du changement climatique sur les zones humides fluviales – altération de la biodiversité liées au changement climatique ».

Description sommaire de l'étude ou de l'action de valorisation :

*Résumé des phases 1 et 2 (2006-2007) :*

- Synthèse bibliographique interdisciplinaire en matière d'échanges nappes/rivière ;
- Recensement des données existantes (géomorphologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, physico-chimiques, hydrobiologiques, aménagements et usages anthropiques) ;
- 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) ;
- Construction de la base de données SIG ;
- Sélection d'un secteur témoin relativement peu anthropisé pour l'étude des mécanismes d'échange sur le Rhône amont (Brégnier-Cordon) ;
- Premiers résultats hydrauliques sur Brégnier-Cordon ;
  - . Conception du tableau des métriques par site ;
  - . Collecte de données complémentaires ;
  - . Codage des métriques par site ;
  - . Analyse des résultats inter-sites ;
  - . Sectorisation fonctionnelle quantifiée et perspectives.

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 accords sur les secteurs où la comparaison est possible ;
- les données d'invertébrés souterrains apportent des informations sur des secteurs dépourvus de données hydrauliques et de végétation ;
- les données de végétation apportent des informations complémentaires sur la pollution de l'eau.

Sur le secteur de Brégnier-Cordon, les sites étudiés montrent des apports souterrains, relativement limités, compris entre 11 et 116 l/s par km, 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 termes de gestion, ceci signifie que les aquifères étudiés ne représentent pas une réserve stratégique en eau souterraine pouvant faire l'objet de captages supplémentaires. Il est cependant nécessaire de la protéger des pollutions de versant ayant été mises en évidence par les indicateurs végétaux et les mesures de conductivité. L'étude des aménagements, notamment les contre-canaux, a montré que plus à l'aval dans le contre-canal de Rossillon, les apports phréatiques qui rejoindront le Rhône sont plus importants et ont été évalués à 660 l/s/km. Bien sûr ce type de synthèse est à pondérer en fonction de la densité des données disponibles dans chacun des domaines.

- Sur le Haut-Rhône (Lac Léman à Lyon) :
  - . Calcul des gradients hydrauliques et des débits de nappe sous réserve de l'obtention des données auprès de la CNR ;
  - . Identification des données biologiques mobilisables et évaluation quantitative et qualitative des données à collecter ;
  - . Identification des données isotopiques existantes ;

## Rapport ZABR – Phase 2

. Identification des données et méthodes de photo-interprétation des échanges.

- Proposition de critères de classement pour le choix d'un site aval en fonction des données disponibles (hydraulique, biologique, isotopiques) ;
- Réflexion sur l'analyse des échanges en régime transitoire dans un contexte de changement climatique ;
- Analyse bibliographique internationale sur la modélisation des échanges nappe-rivière (Mississippi, Danube, Columbia river, river Murray, Snake river) ;
- Intégration des résultats obtenus dans le géorépertoire ZABR.

Dans les actions qui restent à mener sur phase 2, le bilan des données disponibles et des données complémentaires à acquérir (CDC et chiffrage acquisition de données complémentaires) sera effectué ; ce qui conditionnera aussi le travail de la phase 3.

- 2 Comités de suivi pléniers ;
- Comités de suivi technique.

### *Phase suivante (2008-2009) – Actions de la phase 3*

La phase 3 sera principalement consacrée à l'acquisition de données complémentaires sur les autres secteurs du Rhône (données CNR et bibliographiques) mais aussi au traitement de ces données à l'aide des méthodes établies en phase 2 pour calculer les échanges nappes/ Rhône sur ces secteurs.

#### *1) Développement de la méthodologie d'évaluation des échanges*

Sur le secteur Haut-Rhône du Lac Léman à Lyon :

- conception du tableau des métriques par site ;
- collecte de données piézométriques complémentaires sur la chute de Donzère-Mondragon (à l'étude) ;
- codage des métriques par site ;
- analyse des résultats inter-sites ;
- sectorisation fonctionnelle quantifiée et perspectives.

Sur le secteur aval sélectionné (chute de Donzère-Mondragon, bassin versant du Lez, confluence Roubion Rhône,...) :

- calcul des gradients hydrauliques et des débits de nappe sous réserve de l'obtention des données auprès de la CNR ;
- identification des données biologiques mobilisables et évaluation quantitative et qualitative des données à collecter ;
- identification des données isotopiques existantes et traitement des couples deutérium/ oxygène 18 pour en déduire les temps de séjour des eaux souterraines en nappe et les altitudes de recharge ;
- influence sur les échanges.

## Déroulement prévu de l'étude des secteurs à étudier selon le découpage CNR

(en lien avec les sites du programme décennal recoupant nos secteurs)

Nombre de chutes CNR total à étudier : 19 (7 sur le Haut-Rhône, 5 sur le Rhône moyen, 7 sur le Rhône aval)  
 Nombre de chutes CNR déjà renseignées par des données : 2 (Brégnier-Cordon et Péage-de-Roussillon)  
 Nombre de chutes CNR restant à renseigner : 16 (la chute de Cusset est gérée par EDF qui est détenteur des données).

A partir de 2008, l'obtention des données CNR devrait au rythme de 4 chutes par an. De septembre 2007 à septembre 2008 il est prévu de renseigner et d'étudier :

- sur le Haut-Rhône : Génissiat et de Seyssel ; données manquantes de Chautagne ; Belley.
- sur le Rhône-Moyen : données manquantes de Péage-de-Roussillon
- sur le Rhône-Aval : Donzère-Mondragon.

Il restera donc 11 chutes à renseigner et à étudier : Haut-Rhône (Sault-Brénaz) ; Rhône-Moyen (Pierre-Bénite, Vaugris, Saint-Vallier et Bourg-lès-Valence) ; Rhône-Aval (Beauchastel, Baix-Logis-neuf, Montélimar, Caderousse, Avignon-Sauveterre et Vallabrègues).

### 2) Début d'une thèse sur une approche de modélisation globale des échanges

Ce travail de modélisation valorisera les résultats obtenus pour chaque secteur étudié dans les phases précédentes. Le modèle sera fondé sur une approche multi-échelles (multi-nesting) et calibré à l'aide d'indicateurs biologiques. Il intégrera les processus transitoires (variations saisonnières) en matière d'échanges compte-tenu des sectorisations identifiées dans les phases précédentes.

Sur la base de l'analyse bibliographique internationale réalisée sur le thème de la modélisation des échanges nappes-rivières, il s'agira de développer une stratégie de modélisation à l'échelle du bassin compte-tenu de l'existence de plusieurs modèles partiels, compte-tenu de l'expérience déjà réalisée par le CIG (Modcou). Cette stratégie pourrait consister par exemple à valider un modèle analytique global à l'aide de modèles partiels déjà existants.

### Ressources mobilisables :

- **Humains** : D. Graillot, F. Paran, J. Gibert, G. Bornette, Y. Travi, E. Leblois, M. Lafont, R. Déchomets, P. Marmonnier, T. Winiarsky; G. Truc (SMBVL) ;
- **Matériel** : matériel de prélèvements et d'analyses biologiques et isotopiques, bases de données, maintenance SIG, maintenance GPS ;
- **Données** : photographies aériennes, données CNR et EDF (débits), banque Hydro, ADES, Modèles thermiques Météo-France (Arpège), interfaces (pre et post processing) pour modélisation hydrodynamique d'écoulements souterrains (Modflow, MLAEM).

Date de début de la phase 3 : mars 2008.

Date de fin prévue de la phase 3 : décembre 2009.

### Publications :

- rapport intermédiaire phases 1 (nov. 2006) et 2 remis à l'agence (fin 2007);
- fiche de restitution de la phase 1 en cours de validation ;
- publication de vulgarisation en cours de finalisation (Revue des Professionnels de l'eau) ;
- publication scientifique prévue courant 2008 (Environmental management).

Perspectives :

Outil pour la mise en place d'une modélisation des échanges nappes/eau superficielle pour une préservation de la ressource en eau et de la biodiversité du bassin du Rhône (Plan Rhône, DCE). Influence des modifications climatiques et hydrologiques sur les échanges nappes/Rhône.

Budget global du projet (2008-2009):

(voir feuille de calcul Excel et tableau Word)

Thèse de doctorat en sciences et génie de l'environnement (6 mois).

Aides obtenues : Agence de l'Eau à hauteur de 50%, possibilité de consolidation via un projet européen dans le cadre du 7<sup>e</sup> PCRD (2007-2013) FP7 environnement sur le monitoring des eaux souterraines incluant les échanges nappe-rivière (Groundwater Monitoring and Risk Management) en collaboration avec la TUDarmstadt (IIB department) en Allemagne (Hessisches Ried), l'université de Timisoara en Roumanie (rivière Mures), l'Hessen wasser (agence de l'eau de l'Hessen), et l'EWR.

Travaux connexes :

- Intégrer les métadonnées liées au projet dans le **Géorépertoire ZABR** ;
- Projet ZABR (G. Bornette) « **Approche multi-compartiments du changement climatique sur les zones humides fluviales – altération de la biodiversité liées au changement climatique** » ;
- Créer des liens entre nos Relations entre les secteurs étudiés et les **sites étudiés dans le cadre du programme décennal** [ex : lônes de Péage-de-Roussillon (G. Bornette) ; Chautagne (J.M. Olivier)] ;
- Rapprochement avec les thématiques analogues de la **ZAL** (J.J. Macaire - Université de Tours).

## 1.4. Fiche de restitution ZABR – Phase 1 (2006-2007)

**ZABR**  
Zone Atelier Bassin du Rhône

## Évaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface : Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels

### Action de recherche n°11 - Phase 1 : 2006/2007

#### Résumé:

Cette action de recherche vise à l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des échanges nappes/rivière, tenant compte des influences anthropiques et s'appuyant sur la complémentarité de méthodes hydrophysiques, hydrobiologiques et hydrochimiques. Elle doit aboutir à la mise en œuvre d'un outil pour la protection de la ressource en eau et de la biodiversité du fleuve Rhône.

#### Contexte :

Cette recherche est en lien avec le Plan Rhône 2, volet « ressource et biodiversité », pour la caractérisation des milieux aquatiques. La question de la qualité de l'eau y est centrale, d'autant que la nouvelle Loi sur l'eau prévoit l'identification des ressources stratégiques. App associée d'une priorisation de cet usage. La question de la vulnérabilité des ressources est aussi prépondérante. A l'échelle du Rhône, il va s'agir de déterminer quels secteurs dépendent de la nappe et/ou du fleuve, et de considérer le devenir de la ressource sur le long terme aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif.

Etant donné le caractère fortement anthropisé du Rhône, la préservation du patrimoine lié à ses aquifères représente un enjeu important. Cette action de recherche est conçue de manière à répondre aux attentes l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse dont il ressort un besoin évident en termes de connaissance et de caractérisation des échanges entre : 1) le Rhône, ses annexes fluviales, les contre-canaux et 2) les nappes alluviales et autres aquifères en connexion avec le corridor alluvial. Il convient dès lors de développer une méthodologie, voire un outil, permettant de caractériser ces échanges.

Les connaissances scientifiques à mobiliser sont nombreuses, mais éparpillées, parfois anciennes et relèvent de disciplines séparées. Pour mieux comprendre les mécanismes d'échange, il devient indispensable d'associer les méthodes qui peuvent être mobilisées dans ce domaine (écologie des végétaux aquatiques, biodiversité taxonomique et fonctionnelle des communautés d'invertébrés souterrains, modèles hydrodynamiques, hydrogéochimie...) en relation avec les conditions de milieux (qualité et origine des aquifères, capacités d'échanges...).

#### Contacts:

**Didier GRAILLOT et Frédéric PARAN**  
Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne (ENSM-SE)  
Centre SITE  
158, cours Fauriel  
42 023 Saint-Etienne Cedex 2  
E-Mail : graillot@emse.fr ; Tél : 04 77 42 01 30 ; Fax : 04 77 42 66 33

#### Cadre d'utilisation:

En termes de transférabilité à l'échelle du fleuve, cette méthodologie sera mobilisée sur d'autres aménagements. CNR. A terme, il conviendra de réaliser des bilans et de vérifier la cohérence des résultats sur des tronçons plus longs associant plusieurs de ces aménagements. L'étude des échanges se fera selon 2 niveaux : 1) une analyse corrélatrice inter-sites 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 démarche constitue la première étape de la construction de l'outil.

Les phases suivantes (2008-2012) conduiront à l'élaboration d'une méthodologie d'analyse, voire d'un outil, à son test et son ajustement, pour au final étendre son exploitation pour caractériser les échanges nappes/Rhône. Un travail de modélisation à échelle locale et globale pourra être envisagé si nécessaire.

L'utilisation des résultats de cette recherche passe par la structuration des données (hydrophysiques, hydrobiologiques, hydrochimiques) de telle manière que l'on puisse aisément y accéder et en gérer les principales caractéristiques, en particulier la qualité en fonction de leur origine et de la faire évoluer au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données. S'agissant de données géographiquement distribuées, le système de gestion de base de données le mieux adapté pour le faire est un SIG. Le système doit permettre également d'effectuer des calculs à partir des données de base, calculs pouvant être mis à jour en cas de modification des données et permettre d'éventuelles modifications et ajouts importants sans avoir à remettre en cause toute la structure et les requêtes préprogrammées des utilisateurs.

#### Référence:

Barnette G., Deschamps R., Ferreira D., Germain A., Gilbert J., Graillet D., Lafont M., Paron F. & Pujalon S. (2007) - Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport final phase 1 (année 1), Action de recherche valorisation ZABR n°11, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), CEMAGREF Lyon, 175p. + Annexes (1339.), mai 2007.

FICHE ZABR N° 1

**Objectifs (phase 1):**

Il s'agit donc de proposer une méthodologie interdisciplinaire, puis un outil, pour la caractérisation et l'évaluation, tant qualitative, que quantitative, des échanges nappes/Rhône. La mise en œuvre est déclinée en différents objectifs :

- inventaire des documents et données existantes pour rédiger une synthèse interdisciplinaire intégrant les aspects quantitatifs et qualitatifs le long du Rhône, et constituer une base de données ;
- diagnostic qualitatif des échanges avec visualisation sur support cartographique SIG des premiers résultats afin d'élaborer des cartières de sectorisation amont-aval et de définir les zones prioritaires à étudier ;
- intégration des informations identifiées au géorépertoire ZABR ;
- sélection d'un secteur d'étude suffisamment documenté comme premier pas dans la construction de l'outil.

**Intérêt opérationnel:**

Ce travail de mise en œuvre méthodologique contribuera à la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité sur le bassin du Rhône et pourra être mobilisé par exemple dans des contextes de gestion équilibrée et de résolution de conflits d'usage sur la ressource.

**Principaux résultats (phase 1):**

1. État actuel des méthodes et connaissances pour l'évaluation des relations d'échange entre le fleuve Rhône et ses nappes d'accompagnement  
L'approche bibliographique montre tout l'intérêt d'une évaluation multidimensionnelle des échanges nappes/rivière. En effet, les méthodes quantitatives physiques d'évaluation des échanges produisent des résultats dont il est difficile de contrôler l'incertitude. Le croisement avec les dimensions hydrobiologiques et hydrochimiques devient très intéressant pour valider ou infirmer les relations d'échange. Les sources de données et références répertoriées ont été intégrées dans une base de données, disponible sur CD-ROM, contenant environ 500 entrées en phase de saisie dans le géorépertoire ZABR.
2. Sectorisation du cours du Rhône du lac Léman au delta de Camargue  
Cette sectorisation a été établie tout au long du Rhône français en combinant des critères géographiques, anthropiques, climatiques, hydrogéologique... Ce travail a permis d'aboutir à :
  - une schématisation des différentes configurations hydrogéologiques sur le Haut-Rhône pour faciliter l'analyse des échanges ;
  - des hypothèses d'échange nappes/Rhône par secteur qu'il conviendra de valider.
3. Sélection d'un secteur test : l'aménagement CNR (Compagnie Nationale du Rhône) de Brégnier-Cordon (Ain, France)  
Ce secteur a été sélectionné à partir de 3 critères de choix principaux :
  - il est relativement peu anthropisé même si les ouvrages CNR y sont présents ;
  - il existe des données sur les plans hydrauliques (données fournies par la CNR dans le cadre d'une convention CNR/ENSM-SE signée en janvier 2007) et biologiques (invertébrés souterrains et végétation aquatique) ;
  - il s'agit d'un secteur où des hypothèses sur les échanges nappes/Rhône ont été pré-identifiées à grande échelle.

L'ensemble des informations hydrauliques (gradients hydrauliques de nappe, débits des contre-canaux, débits du Rhône et des affluents, débits de fuite des digues...), physico-chimiques (conductivité) et biologiques (données d'invertébrés souterrains et de macrophytes) acquises entre les pk 106 et 98,5 (soit 7,5 km) à partir des différentes sources (données bibliographiques, calculs, mesures, prélèvements) propose en première approche des résultats cohérents concernant l'identification des échanges. Les données hydrauliques permettent de calculer des apports souterrains, relativement limités, compris entre 11 et 116 l/s par km de berge, vers le Rhône et les contre-canaux, là où ils existent. Ces apports représentent un total d'environ 340 l/s pour 7,5 km. Ils ne représentent pas une réserve stratégique en eau souterraine pouvant faire l'objet de captages supplémentaires. Il est cependant nécessaire de la protéger des pollutions de versant ayant été mises en évidence par les indicateurs végétaux et les mesures de conductivité.

**4. Vers la phase 2...**

Ce premier travail, réalisé sur un secteur de taille réduite comme celui de Brégnier-Cordon est donc encourageant. Il a permis d'initier l'étude des mécanismes d'échanges de façon interdisciplinaire en se confrontant au terrain. Le diagnostic de Brégnier-Cordon sera complété lors de la phase 2, pendant laquelle un nouveau secteur sera sélectionné sur le Bas-Rhône.  
Par la suite, pour chaque secteur étudié, si les différents points de vue (hydraulique et biologique) sont cohérents, il sera possible d'évaluer le sens de l'échange entre la nappe et le fleuve et son intensité. Par la même occasion, s'il s'agit de zones plus anthropisées, des paramètres de qualité (pollution de la nappe vers la rivière ou inversement) seront déduits. Si les différents points de vue ne convergent pas vers une même évaluation des échanges, un ré-examen des données sera nécessaire (évaluation des erreurs de mesure de débit, condition d'échantillonnage des données biologiques...). Des données complémentaires devront alors être acquises (ex : hydrochimie isotopique). Sur le plan hydraulique, un modèle physique pourra être mobilisé, s'il existe, pour obtenir une autre source d'information.  
Dans la prochaine phase de travail, il est également important de tester l'apport de la géochimie qui permettra de connaître l'origine des eaux souterraines et leur temps de séjour dans les nappes. Ce sont des paramètres qui doivent être cohérents avec les interactions identifiées à l'aide des méthodes physiques et biologiques.



Le Rhône et un contre-canal sur la Chute CNR de Brégnier-Cordon (Source : R. Déchomets, ENSM-SE)

## **1.5. Rapport scientifique : Thème: Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources en eau, Activités 2005-2007 et projection 2008**

### 1. Personnes responsables :

Les responsables de ce thème de la ZABR sont :

- Etienne Leblois pour la partie flux hydriques et contraintes climatiques - Cemagref Lyon
- Didier Graillot pour la partie flux hydriques et ressources en eau – Centre SITE, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.

### 2. Présentation générale:

Ce thème mis en place en 2006 est relativement nouveau à la ZABR, les résultats obtenus en terme de production scientifique ne sont donc pas encore très importants. Plusieurs projets sont en cours de démarrage. On notera en particulier :

- un travail de doctorat sur la définition d'indicateurs de réponse hydrologique des bassins versants du Rhône aux scénarios de changements climatiques. Ce sujet a été initié par le Cemagref de Lyon (E. Leblois) et l'Université Lyon1 (J.P. Bravard)
- un programme de recherche pour l'évaluation des relations hydrauliques entre les nappes phréatiques et le fleuve Rhône. Ce projet se développe en collaboration avec l'Agence de l'Eau RMC, la CNR. Il a été initié par L'Ecole des mines de Saint-Etienne (D. Graillot et F. Paran et l'UMR 5023 EHF Lyon I (J. Gibert et G. Bornette).

### 3. Partenariats scientifiques

Les équipes de recherche « ZABR » concernées par ce thème de recherche sont :

- le CEMAGREF Lyon
- le Centre SITE ENSM-SE ;
- l'UMR 5023 EHF Lyon I ;
- l'ENTPE, Hydrosociences-Montpellier, BRGM
- l'Université d'Avignon (Laboratoire d'hydrogéologie)

L'Université d'Avignon et le pôle Hydrosociences de Montpellier ne font pas encore partie de la ZABR mais sont impliqués dans le projet développé par la ZABR avec l'Agence de l'eau.

### 4. Spécificités du thème

Il s'agit d'un thème très interdisciplinaire. L'évaluation des flux hydriques fait intervenir l'hydrologie de surface et l'hydrologie souterraine, mais aussi la biologie. Dans certaines conditions, la présence d'indicateurs biologiques (micro-invertébrés et végétation aquatique) est en corrélation avec la nature et la provenance des flux hydriques (milieu phréatique, eaux de surface). La géochimie peut représenter une autre discipline pertinente pour l'analyse des flux hydriques de surface ou souterrains. L'analyse de ces flux est importante pour identifier, par exemple, les zones où la ressource en eau est vulnérable.

La question de modifications hydrologiques que pourraient induire les changements climatiques à l'échelle du bassin du Rhône ne sont pas sans soulever des questions d'ordre sociétales. Des modalités d'adaptation pour l'usage de la ressource devront être trouvées. Ceci nécessite de connaître préalablement la réponse des bassins versants du Rhône aux différents scénarios possibles d'évolution climatique actuellement identifiés. Le Rhône est un fleuve dont le cours varie en latitude depuis ces zones d'alimentation alpines jusqu'à son exutoire méditerranéen.

#### 4.1. Flux hydriques, ressources en eau

Un des axes de recherche essentiel de ce thème de la ZABR est consacré à l'évaluation des échanges hydrauliques existant entre les rivières et leurs nappes d'accompagnement. Une application au cas du

Fleuve Rhône est en cours de développement pour évaluer la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides).

Ce programme de la ZABR labellisé en juin 2005 est rattaché à plusieurs sites de la ZABR, principalement l'axe Rhône/Saône et Zones Humides mais peut concerner d'autres sites le long du Rhône (sites du programme décennal).

#### 4.1.1. Objectifs, méthodologie et résultats attendus :

Ce programme de recherche a pour objectif de caractériser les échanges hydrauliques existants entre 1) le Rhône, ses annexes fluviales, les contre-canaux, et 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 attendus doivent fournir 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.

#### 4.1.2. Premiers résultats obtenus

Ce programme de recherche comporte plusieurs phases. La première (2006-2007) a permis de réaliser 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.

La seconde phase (2007 - 2008) doit aboutir à un premier diagnostic qualitatif 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. Dans cette seconde phase, la méthodologie a déjà été appliquée sur un secteur du Rhône à l'amont de Lyon : Brégnier-Cordon. 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'analyse hydrogéologique (métriques hydrauliques), et qui démontre la grande sensibilité des métriques biologiques à l'origine et l'importance relative des apports phréatiques.

Ces premiers résultats 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.

#### 4.1.3. Projections 2008 et plus

Les phases de travail ultérieures seront consacrées à un diagnostic qualitatif des échanges sur un secteur du bas-Rhône. L'étude des échanges se fera selon 2 niveaux : 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. Un travail de modélisation à échelle locale et globale pourra être envisagé si nécessaire. Cette démarche conduira à l'élaboration d'une première ébauche de l'outil d'analyse, qui sera étendu par étapes à l'ensemble du Rhône à partir de janvier 2010.

#### *\*vers une approche de modélisation globale des échanges*

Un tel travail de modélisation valorisera les résultats obtenus pour chaque secteur étudié dans les phases précédentes. Le modèle sera fondé sur une approche multi-échelles (multi-nesting) et calibrer à l'aide d'indicateurs biologiques. Il intégrera les processus transitoires (variations saisonnières) en matière d'échanges compte-tenu des sectorisations identifiées dans les phases précédentes. Sur la base de l'analyse bibliographique internationale réalisée sur le thème de la modélisation des échanges nappe-rivières, il s'agira de développer une stratégie de modélisation à l'échelle du bassin compte-tenu de l'existence de plusieurs modèles partiels, compte-tenu de l'expérience déjà réalisée par le CIG (Modcou). Cette stratégie pourrait consister, par exemple, à valider un modèle analytique global à l'aide de modèles partiels déjà existants.

## 4.2. Flux hydriques, contraintes climatiques

Le Rhône, sur cette question, a ces spécificités par rapport aux autres grands fleuves car il est soumis à un net gradient climatique. Ce sous-thème s'inscrit dans la démarche de porter à connaissance des travaux réalisés par la ZABR autour de la problématique « changement climatique » :

- projet Gewex-Rhône sous égide PNEDC-PNRH,
- projet GICC-Rhône, soutenu par le MATE.

Dans le cadre de cette problématique, un sujet de thèse a été initié sur la définition d'indicateurs de réponse hydrologique des bassins versants du Rhône aux scénarios de changement climatiques. Ce sujet fait l'objet d'une collaboration entre le Cemagref de Lyon (E. Leblois) et l'Université Lyon1 (J.P. Bravard)

Les variations saisonnières ont une influence sur les régimes d'écoulement du Rhône et d'alimentation des nappes. Il s'agit donc d'étudier plus précisément les variations saisonnières des échanges à l'échelle de plusieurs années et à plus long terme.

Compte tenu des scénarios de modifications climatiques qui ont été identifiés jusqu'à présent dans la région Rhône-Alpes, et compte-tenu des incertitudes liées à ces scénarios, des impacts sont possibles sur les réserves d'eau souterraine et leur échange avec le Rhône. Les modifications thermiques résultantes peuvent déjà avoir des répercussions sur la gestion des centrales nucléaires, par exemple, qui nécessiteront davantage d'eau froide surtout à l'étiage. Les eaux souterraines sténothermes pourraient donc avoir un rôle à jouer. Il faudrait en estimer l'importance potentielle. Par ailleurs, les indicateurs biologiques permettant de valider ou de confirmer les échanges pourraient s'en trouver modifiés.

### 5. L'implication du thème dans un dispositif de suivi à long terme

Ce thème de recherche de la ZABR s'inscrit dans le dispositif de suivi du Rhône (Plan Rhône 2). Le projet sur les échanges nappes/Rhône a été labellisé Plan Rhône à la CTTI de septembre 2007. Le volet qualité des eaux, ressource et biodiversité du contrat interrégional Plan Rhône est en connexion avec ce projet et donc avec le thème de la ZABR Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources en eau. Ce volet piloté par l'Agence de l'Eau RMC et la DIREN comporte un programme d'actions de protection des ressources stratégiques pour l'eau potable.

Un certain nombre de travaux connexes sont liés à ce thème en particulier le projet ZABR proposé par G. Bornette & P. Marmonier sur l'approche multi-compartiments du changement climatique sur les zones humides fluviales et intégrant l'altération de la biodiversité liées au changement climatique. L'intégration des descripteurs de données (métadonnées) mobilisées pour traiter ce thème représente une activité transversale liée au projet de Géorépertoire de la ZABR.

### 6. Articulation avec le schéma de cohérence ZABR

Le thème de la ZABR « Flux hydriques, contraintes climatiques, ressources » est abordé de façon interdisciplinaire avec l'étude des relations entre hydrologie, hydrogéologie, géomorphologie, biologie, (communautés aquatiques et invertébrés souterrains), usages anthropiques et perception des milieux. Il s'agit donc d'un thème fédérateur regroupant plusieurs équipes de recherche de la ZABR.

Les recherches actions de ce thème sont liées au Plan Rhône et à l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR en prenant en compte les caractéristiques régionales dans la gestion des hydrosystèmes. Ces recherches s'articulent autour du corridor fluvial et des affluents du Rhône. Le bassin versant du Rhône est donc abordé à différentes échelles emboîtées de temps et d'espace (BV Rhône, affluents, corridor). Les recherches réalisées dans le cadre de ce thème sont cohérentes avec la démarche ZABR dans la mesure où il s'agit d'approfondir les recherches sur les services écologiques rendus par les écosystèmes aquatiques en prenant en compte des paramètres économiques liés à la disponibilité des flux d'eau, les pressions anthropiques (demandes en eau, aménagements).

Dans le cadre de l'articulation de ces travaux avec ceux conduits dans la ZABR dans le cadre des sites et des autres thèmes, des liens entre les secteurs étudiés et ceux étudiés dans le cadre du programme décennal [ex : îlons de Péage-de-Roussillon (G. Bornette) ; Chautagne (J.M. Olivier)] seront établis. A plus grande échelle, un rapprochement avec les thématiques analogues de la ZAL (Université de Tours) sera établi dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature (PLGN3). Ce thème de la ZABR est donc vecteur de liens à construire entre la ZABR, et d'autres ZA (ZAL et ORME) et participe ainsi à la structuration régionale de la recherche dans le domaine.

### 7. Production scientifique (2005-2007)

\*flux hydriques, ressources en eau

#### Articles en revues:4

BATTON-HUBERT M., DECHOMETTS R., GRAILLOT D. (2006) Bases théoriques des méthodes et outils d'aide à la décision territoriale – Conditions d'utilisation pratiques. *Numéro spécial de la revue IGAT, Aide à la décision pour l'aménagement du territoire: méthodes et outils* Hermès – Lavoisier, 2006 pp. 275-300.

GRAILLOT D.(2006) Conditionnement des outils d'aide à la décision territoriale par simulation de projet. *Numéro spécial de la revue IGAT, Aide à la décision pour l'aménagement du territoire: méthodes et outils* Hermès – Lavoisier, 2006 pp. 303-319.

PARAN F. et SEBASTIEN L. (2006) Plate-forme pédagogique d'aide à la négociation pour une intégration sociale et environnementale des gravières sur un territoire : un défi original et novateur. Supplément à Mines et Carrières, *Revue de la Société de l'Industrie Minérale (SIM)*, 2006 (25), pp. 19-26.

MIMOUN D. Evaluation du potentiel écologique des carrières en eau, *Revue Mines & Carrières* n°124, Mars 2006, pp. 13-16

Une publication scientifique sur le thème des échanges nappes/rivières est prévue courant 2008 dans la revue *Environmental management*.

#### Communications dans des congrès avec actes :6

DAUVERGNE F., MIMOUN D. Comparison of the vector and the grid based approaches for the groundwater modeling. Proceedings AIH International Symposium – Aquifer Systems Management -, Topics in Geological and hydrogeological modeling, Dijon, Juin 2006.

DAUVERGNE F, GRAILLOT D. *Discretization support system for groundwater modeling based on analytic elements*. Proceedings of the 5th International Conference on the Analytic Element Method, Kansas State University, 14-17 May 2006.

GRAILLOT D., BATTON-HUBERT M. *GIS and geodatabases for groundwater flow modeling*. Proceedings of the 5th International Conference on the Analytic Element Method, Kansas State University, 14-17 May 2006.

PIATYSZEK E., GRAILLOT D., TARDY A., PERRIN J.F., BARBET D., *The “géo répertoire” of the Rhone Basin data : a hydro-socio-economical metadata web site relating to the ZABR scientific programs and data*, 6eme international conference. European Water Ressources Association, Menton, 7-10 september 2005

D. Graillot, F. Paran, R. Déchomets, J. Gibert, D. Ferreira, G. Bornette, S. Puijalon (Avril 2007). Evaluation des échanges nappes/rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Rapport de Recherche ZABR Agence de l'Eau, phase 1167 p., annexes 154p.

A. Germain (septembre 2007). Réalisation de configurations hydrogéologiques et calcul de débits de nappes dans le cadre de l'évaluation des échanges entre nappes et fleuve Rhône, rapport de Master SEIU, 57p.

#### Thèses : 2

DAUVERGNE F., *Méthodes de discrétisation pour la modélisation par éléments analytiques en hydrogéologie quantitative* Saint-Etienne, décembre 2006

PARAN F., *Représentation territoriale pour la gestion équilibrée d'un patrimoine écologique et anthropique dans le domaine de l'eau*, Saint-Etienne, décembre 2005

#### Article de vulgarisation, brèves scientifiques :1

Soumis à la revue des professionnels de l'eau : D. Graillot, F. Paran, R. Déchomets, J. Gibert, D. Ferreira, G. Bornette, S. Puijalon (2007). Un projet de recherche pour mieux connaître les relations d'échange entre le fleuve Rhône et les nappes phréatiques et mieux gérer le patrimoine Eau

#### Rapport de recherche : 1

D. Graillot, F. Paran, R. Déchomets, J. Gibert, D. Ferreira, G. Bornette, S. Puijalon (2007), Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface – Application au fleuve Rhône, Rapport final phase 1 167p., annexes 154p.

#### \*contraintes climatiques

Leblois E. (2006) L'eau convoitée du Rhône. La Recherche n°399 (juillet-août). pp38-41 ;

#### 8. Partenariats avec entreprises et collectivités

Le programme de recherche sur l'évaluation des échanges entre le Rhône et ses nappes d'accompagnement est développé grâce au soutien financier de l'Agence de l'Eau RMC, Région PACA. Des

## Rapport ZABR – Phase 2

partenariats restent à établir plus précisément avec les exploitants de granulat établis le long du Rhône comme Cemex France. Les autres partenaires de ce programme de recherche sont la DIREN, la CNR, EDF.

### *Projet Européen FP7 Environnement*

A la suite du lancement du programme de recherche Environnement dans le cadre du 7<sup>e</sup> PCRD (2007-2013), un projet de recherche sur le monitoring des eaux souterraines incluant les échanges nappes-rivière (Groundwater Monitoring and Risk Management) pourrait être conduit en collaboration avec la TUDarmstadt (IIB department) en Allemagne (Hessisches Ried), l'université de Timisoara en Roumanie (rivière Mures), l'Hessen wasser (agence de l'eau de l'Hessen), et l'EWR.

## 2. Annexes 2 : Compléments bibliographiques sur les échanges nappes/rivière (regard international) – tableaux de synthèse

2.1. Tableau 1. Méthode de bilans de masses (isotopes stables, traceurs géochimiques, volume d'eau) – 1/2

	<u>Cas 1</u>	<u>Cas 2</u>	<u>Cas 3</u>
Source	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>
Nom de la rivière	Bishop Creek	Columbia River	Truckee River
Localisation	Californie, USA	Portland, USA	Californie, USA
Longueur	200km	-	200km
Type bassin	Vallée	Bassin	Bassin
Surface du bassin	400 km <sup>2</sup>	-	7 070 km <sup>2</sup>
Altitude	3 000 m	-	2 100m
Débit de la rivière	Contrôlé, inférieur au débit naturel	-	-
Crues	-	-	-
Précipitations	-	-	190mm (pluie principalement) à l'aval du bassin, 800mm (neige principalement) à l'amont du bassin
Niveau aquifère	-	-	60m (profondeur)
Type aquifère	-	Gravier (15m~65m d'épaisseur)	Amont du bassin : dépôts glaciaires Aval du bassin : formations pliocènes (roches sableuses et argileuses d'une épaisseur de 900m maximum), cônes de déjection alluviaux à flanc de montagne, dépôts lacustres dans les vallées
Végétation	-	-	-
Activités humaines	3 réservoirs, 6 usines hydroélectriques	Pompage dans l'aquifère pour l'AEP (municipalité)	4 réservoirs et 3 lacs sur le cours de la rivière dont les exutoires sont contrôlés
Densité points de mesures	4 sources et 3 puits, 28 stations de jaugeage	12 puits échantillonnés pour 1.5 km <sup>2</sup>	16 points pour les eaux superficielles et 7 points pour les eaux souterraines, 6 échantillonneurs (neige)
Période de mesure	1986.5~1987.10 (années de sécheresse)	1990	1988~1989 (années de sécheresse)
Méthode d'étude	ratios isotopiques	Analyse des ratios isotopiques : O-18, H-2	Analyse des ratios isotopiques : O-18, H-2 Calcul de bilan de masse
Choix de la méthode	Différence significative des ratios isotopiques entre lac amont, rivière Bishop Creek et eaux souterraines Le débit d'alimentation de la rivière par les eaux souterraines est suffisant pour créer une différence de ratio isotopique significative Amélioration de la précision de la comparaison à l'aide de débitmètres (conditions : forte rugosité de chenal, basses eaux)	Forte densité de puits et de piézomètres ; La rivière Columbia a une signature isotopique qui se distingue facilement des eaux souterraines	Différence significative des ratios isotopiques entre lac amont, rivière Truckee et neige
Equations	Balance isotopique	Balance isotopique	Balance isotopique
Points clefs	Quantification de l'alimentation de la rivière par les eaux souterraines	Détermination du taux d'alimentation de l'aquifère par la rivière fondée sur une approche théorique validée par des données	L'alimentation principale de la rivière est déterminée à l'aide du ratio isotopique de différentes masses d'eaux et de son changement au cours du temps. Le temps de réponse du ratio isotopique de la rivière en tenant compte du temps de décharge des lacs amont indique les secteurs de stockage de la ressource

## Rapport ZABR – Phase 2

	<u>Cas 1</u>	<u>Cas 2</u>	<u>Cas 3</u>
<b>Source</b>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>
<b>Nom de la rivière</b>	Bishop Creek	Columbia River	Truckee River
			Les réserves de ressource en eau sont quantifiées à l'aide d'un bilan isotopique croisé avec des valeurs de débit
<b>Auteur/date</b>	Space M.L. & al. (1991) / Desert Research Institute	McCarthy K.. & al. (1992) / US Geological Survey	McKenna, S.A. & al. (1991) / Desert Research Institute

## 2.2. Tableau 2. Méthode de bilans de masses (isotopes stables, traceurs géochimiques, volume d'eau) – 2/2

	Cas 4	Cas 5	Case 6
Source	<i>Applied Geochemistry</i>	<a href="http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5115/">http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5115/</a>	<i>Journal of Environmental Quality</i>
Nom de la rivière	Fleuve Rhône (Suisse)	Snake River	Jordan River
Localisation	Suisse (sud-ouest)	Idaho, USA	Israël
Longueur	5 km	500 km	105 km
Type bassin	Alpes centrales, plaine alluviale	Plaine	Vallée
Surface bassin	5 220 km <sup>2</sup>	30 000 km <sup>2</sup>	15 000 km <sup>2</sup>
Altitude	2300m (4000→ 1700m)	-	-
Débit de la rivière	Qmax: 300 m <sup>3</sup> /s en été (78% débit naturel, 22% pour l'hydroélectricité) ; Qmin: 120m <sup>3</sup> /s en hiver (principalement pour l'hydroélectricité)	Moyenne : 400 m <sup>3</sup> /s	Débit diminué par des dérivations
Crues	Grosse crue en 2000	-	-
Précipitations	-	200-360mm (principalement en été)	75% de la moyenne annuelle pour la période d'étude
Niveau aquifère	-	-	-
Type aquifère	alluvial libre (sable et gravier), épaisseur ~30-35m	Sédiments et basaltes	-
Végétation	38% rochers et glaciers, 46% forêt et pâturage, 16 % terres agricoles	-	Agriculture principalement
Activités humaines	Plusieurs grandes usines hydroélectriques, aménagements contre les crues, nombreuses mares	Pompages en eaux souterraines pour irrigation et AEP, nombreux barrages et dérivations de la rivière	Effluents de STEP, pompages et dérivations pour pisciculture et irrigation
Densité points de mesures	5 puits, 9 stations de jaugeage et 6 stations météo sur ~ 10 km <sup>2</sup>	1350 puits, 18 stations de jaugeage	7 points pour les eaux souterraines, 37 pour les eaux superficielles
Période de mesure	2001-2003	2001-2002	1999-2001
Méthode d'étude	Analyse des isotopes stables, géochimies (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) et traceurs (T/3He)	Equation de conservation de masse (données des stations de jaugeage, effet Doppler)	Bilans hydrologiques et géochimiques fondés sur des données de terrains
Choix de la méthode	L'altitude de recharge est déterminée en utilisant le δ <sup>18</sup> O La présence d'anhydrite de gypse et de dolomite provoque un enrichissement des eaux souterraines et des sources en SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> qui peut être utilisé pour déterminer et quantifier les exfiltrations de l'aquifère vers la rivière	Nombreuses données de terrain issues de puits et de station de jaugeage Chroniques de données de débit (USGS)	Différence entre la chimie des eaux souterraines et superficielles
Equations	Bilan isotopique	Bilan hydrologique	Bilans hydrologiques et chimiques
Points clefs	Les variations saisonnières des concentrations en SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> dans la rivière montrent une forte recharge en hiver La quantification de l'alimentation souterraine de la rivière est faite avec un bilan de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> L'altitude d'alimentation souterraine de la rivière est déterminée avec un bilan isotopique ratios/altitude	Estimation des gains et des pertes d'eau de la rivière ; Comparaison saisonnière et à long terme des gains et pertes d'eau de la rivière	L'alimentation souterraine de la rivière est quantifiée avec un bilan hydrologique et des données de terrain Des analyses géochimiques (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> , Na, Ca) indiquent différentes sources d'alimentation souterraine (infiltrations dues à l'irrigation, aquifères profonds, saumure, pluie)
Auteur/date	Fette M.W. (2005) / Swiss federal institute of technology Zurich	Hortness J.E. (2004) / U.S. Geological Survey	Holtzman R. (2005) / Israel Institute of Technology, Israel

Tableau 3. Observations et mesures de terrains, télédétection – 1/1

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
<b>Source</b>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology,</i>	<a href="http://ecystage.ecy.wa.gov/pubs/0303015.pdf">http://ecystage.ecy.wa.gov/pubs/0303015.pdf</a>	<a href="http://www.clw.csiro.au/publications/technical2002/tr27-02.pdf">http://www.clw.csiro.au/publications/technical2002/tr27-02.pdf</a>
<b>Nom de la rivière</b>	Big Creek & Big Otter Creek	Upper Sheep Creek (affluents de Reynolds Creek)	Sammamish River	River Murray
<b>Localisation</b>	Sud du Canada	Idaho, USA	Washington, USA	Victoria, Australie
<b>Longueur</b>	50 km	750m	14 miles=22.5km	-
<b>Type bassin</b>	Large plaine	Montagne	Vallée	Plaine alluviale
<b>Surface bassin</b>	Big Creek: 700km <sup>2</sup> Big Otter Creek: 690km <sup>2</sup>	0.26km <sup>2</sup>	-	-
<b>Altitude</b>	-	196m (2036→1840m)	-	-
<b>Débit de la rivière</b>	-	-	Annuel : 311 cfs (~9m <sup>3</sup> /s); Minimum: 70 cfs (Aout)(~2m <sup>3</sup> /s)	-
<b>Crues</b>	-	-	-	10000-20000MLd <sup>-1</sup> (période d'étude)
<b>Précipitations</b>	Moyenne annuelle : 780mm	508mm (neige principalement)	-	-
<b>Niveau aquifère</b>	-	-	-	-
<b>Type aquifère</b>	Plaine d'épandage (sable et gravier) d'une épaisseur de plusieurs dizaine de pieds	Sols limoneux (0.3-3.0m); aquifère basaltique libre très fracturé et altéré (0.6-5.5m) Aquifère captif basaltique altéré (3.5-11.0m)	Alluvion et dépôts de retrait des glaciers (Vashon) (20-100 ft)	-
<b>Végétation</b>	Végétation naturelle et cultures	Sauge, graminées, dicotylédones	Terres agricoles, prairies	Forêt alluviale et eucalyptus
<b>Activités humaines</b>	Pompage d'eau souterraine pour AEP et irrigation	-	Formation de méandres et de bras morts dus à la diminution du débit de la rivière ; Changement dans l'occupation des sols du corridor : urbanisation des secteurs de forêt	Les dérivations provoquent de bas débits en été
<b>Densité points de mesures</b>	-	36 piézomètres, 3 collecteurs de fonte des neiges, 6 barrage sur 26ha	9 mini-piézomètres sur 6 miles (9.6km) le long de la rivière	5-7 piézomètres sur les berges de la rivière (2 sites)
<b>Période de mesure</b>	1973-1976	1986~1987	Août 2001-Novembre (basses eaux)	Mars 1999-2000
<b>Méthode d'étude</b>	Analyse digitale des données LANDSAT (band 5 & band 7)	Analyse de données de terrain (piézomètres, barrages, collecteurs d'eau de fonte des neiges) : comparaison temps de réponse des piézomètres	Comparaison de niveaux d'eau dans des mini-piézomètres avec les variations de niveau de la rivière	Analyse de traceurs environnementaux (Cl <sup>-1</sup> , O-18, H-2) et de nutriments (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , TDP) dans des piézomètres
<b>Choix de la méthode</b>	Les données satellites traitées selon un processus approprié permettent d'obtenir des informations satisfaisantes concernant les interactions eaux souterraines / eaux superficielles	Une étude détaillée réalisée en 1984 a fourni de nombreuses données à partir d'un réseau d'instruments de mesures : piézomètres, collecteur d'eau de fonte des neiges, barrages, stations de jaugeage, stations météo	Le Site est équipé de mini-piézomètres installés lors d'une étude précédente. La direction du flux est déterminée en comparant le niveau dans les mini-piézomètres et le niveau de la rivière	Réseau de surveillance dense sur l'aire d'étude (monitoring) ; L'eau souterraine salée à une composition significativement différente de l'eau de surface
<b>Théorie</b>	Les eaux souterraines en recharge/décharge/transitions ont des valeurs de rayonnement différentes sur les bandes 7 et 5 de LANDSAT selon la profondeur des eaux souterraines et selon la	Evaluation du temps de réponse de la piézométrie et du de la rivière à la fonte des neiges par analyse de corrélation.	Les échanges nappes/rievière (alimentation ou drainage) sont déterminés à partir des niveaux enregistrés dans la nappe (mini-piézomètres) et dans la rivière	Analyse des variations spatiales et temporelles des niveaux de la nappe et de la rivière à partir de mesures Analyse des changements spatiaux et temporels au niveau des concentrations des traceurs, de la physico-



	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
<b>Source</b>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology,</i>	<a href="http://ecystage.ecy.wa.gov/pubs/0303015.pdf">http://ecystage.ecy.wa.gov/pubs/0303015.pdf</a>	<a href="http://www.clw.csiro.au/publications/technical2002/tr27-02.pdf">http://www.clw.csiro.au/publications/technical2002/tr27-02.pdf</a>
<b>Nom de la rivière</b>	Big Creek & Big Otter Creek	Upper Sheep Creek (affluents de Reynolds Creek)	Sammamish River	River Murray
	végétation			chimie et des nutriments dans les eaux souterraines et la rivière
<b>Points clefs</b>	La bande 7 est utilisée pour déterminer le régime des eaux souterraines en hiver. Les bandes 5 et 7 sont utilisées pour l'été car la végétation complique l'analyse.	L'analyse de la réponse des eaux souterraines et de la rivière à la fonte des neiges dépend de la surface enneigée et de l'épaisseur de neige.	Le sens des échanges entre eaux souterraines et eaux superficielles est déterminé avec les variations de niveaux d'eau, de température de l'eau, et de conductivité de l'eau.	Origine et sens d'écoulement des eaux souterraines dans la plaine alluviale; Analyse des concentrations en nutriments dans les eaux souterraines à différents niveaux d'eau du cycle hydrologique
<b>Auteur/date</b>	Bobba A.G. & al. (1992) / National Water Research Institute	Flerchinger G.N. & al. (1992) / USDA Agriculture Research Service	Carey B.M. (2003) / Department of Ecology, Washington State	Lamontagne & al. (2002) / CSIRO Land and Water

## 2.3. Tableau 4. Modèles numériques (FDM/FEM) – 1/2

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Source	<a href="http://www.math.sk/mikula/balazova.pdf">http://www.math.sk/mikula/balazova.pdf</a>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	<a href="http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-13674.pdf">http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-13674.pdf</a>
Nom de la rivière	Danube	Affluents de la Tamise	Rivière Vecht	Rivière Columbia
Localisation	Slovaquie	Northern Cotswold, U.K	Pays-Bas (centre)	Hanford Site, Washington, USA
Longueur	-	100km	18km	-
Type bassin	Plaine alluviale	Plateau	Plaine alluviale	Vallée
Surface bassin	62km <sup>2</sup> pour cette étude	600 km <sup>2</sup>	300 km <sup>2</sup>	-
Altitude	-	-	-	116-130m
Débit de la rivière	Danube : 200 m <sup>3</sup> /s Dérivation : 28m <sup>3</sup> /s Canal (hydroélectricité) : 1500 m <sup>3</sup> /s	20-150 megalitres par jour	-	-
Crues	-	-	-	21,000 m <sup>3</sup> /s (crue historique, 1894)
Précipitations	500-2000 mm	-	-	-
Niveau aquifère	-	-	-	-
Type aquifère	-	Calcaire (fracturé, faillé, non continu, libre ou captif)	Alluvial (sables et graviers, épaisseur : 150-200m ) Fluviaux-glaciaire (sables et graviers) et couches d'argiles (épaisseur :~50m)	Graviers (2-6m d'épaisseur) (forte conductivité hydraulique : 15 à 1800 mètres par jour)
Végétation	400 ha de forêts alluviales (~6.4%)	-	Terres agricoles	-
Activités humaines	Hydroélectricité (canal), adduction d'eau, réalimentation de la nappe	Pompage en aquifère captif pour l'AEP	Pompage en eau souterraine pour l'AEP : 15.6*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	Barrage
Densité points de mesures	-	-	-	30 puits équipés (monitoring) sur 900 000 m <sup>2</sup>
Période de mesure	1987-1992	1975-1979	1986.5~1987.10	1998
Méthode d'étude	Eléments finis (logiciel : ANSYS software)	Mesures de terrain, modélisation mathématique	Modèle 2D d'écoulement souterrain aux différences finies en régime permanent (FLOWNET)	Modèle d'écoulement 2D pour une section transversale (Subsurface Transport Over Multiple Phases) fondé sur des intégrales de volume et une approche aux différences finies
Choix de la méthode	Géométrie complexe du secteur d'étude : rivière avec barrage, canal (hydroélectricité), système de dérivation, en cascade. La discrétisation selon la méthode des éléments finis permet de respecter les différentes structures géométriques.	Compte-tenu de la complexité du système aquifère, une approche multidisciplinaire fondée sur une analyse détaillée de l'hydrologie et de l'hydrogéologie du système combinée à un modèle mathématique a été retenue	La zone d'étude est une section verticale hétérogène et anisotrope	Améliorer un modèle existant pour une zone en interaction avec la rivière
Equations	Equation de continuité, Loi de darcy → équation non-linéaires de Boussinesq (2D)	Equation d'infiltration dans le sol ; Equation d'écoulement souterrain reliée au niveau piézométrique et au niveau de la rivière Equation de stockage reliée au niveau piézométrique Loi de Darcy : échange entre l'aquifère libre et l'aquifère captif sous-jacent	Equation de continuité et loi de Darcy	Modèle existant
Conditions limites	Définies par mesures géologiques	-	Flux nul aux limites, piézométrie de référence	Flux nul aux limites (est et ouest) ;

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
<b>Source</b>	<a href="http://www.math.sk/mikula/balazova.pdf">http://www.math.sk/mikula/balazova.pdf</a>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	<a href="http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-13674.pdf">http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-13674.pdf</a>
<b>Nom de la rivière</b>	Danube	Affluents de la Tamise	Rivière Vecht	Rivière Columbia
				Débit de recharge naturel
<b>Données d'entrée</b>	-	Mesures	Piézométrie de référence	Modèle en régime permanent pour obtenir les conditions initiales d'un modèle en régime transitoire
<b>Calibrage</b>	-	Données de terrain	Piézométrie de référence / Traceurs (O-18, Cl <sup>-</sup> )	Niveaux piézométriques dans les puits
<b>Points clefs</b>	Simulation de l'impact de pompages sur le niveau de l'eau selon 2 scénarios (avec ou sans barrage souterrain) en rive gauche de la plaine alluvial du Danube	Analyse du système aquifère Calcul des différents paramètres (voir équations); Prédiction du débit de la rivière	Simulation des changements dans l'écoulement souterrains dus aux pompages	Les variations du niveau de la rivière influences le débit et le sens d'écoulement de l'eau souterraine La décharge de l'aquifère a lieu près des berges Il y a un mélange d'eau souterraine et d'eau superficielle infiltrée (rivière) / permet une dilution de la pollution des eaux superficielles
<b>Auteur/date</b>	A. Balazova A. & al. (2002) / Slovak Univ. of Tech. in Bratislava	Rushton K.R. & al. (1992) / University of Birmingham	Schot P. P. & al. (1991) / University of Utrecht	Peterson R. E. & al. (2001) / U.S. Department of Energy

## 2.4. Tableau 5. Modèles numériques (FDM/FEM) – 2/2

	Cas 5	Cas 6	Cas 7
Source	<a href="http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5139/">http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5139/</a>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>
Nom de la rivière	Mississippi	Rivière Loosahatchie (Affluent du Mississippi)	Rivière Campaspe
Localisation	Grand Rapids. Minnesota, USA	Ouest Tennessee, USA	Sud-est de l'Australie
Longueur	3705 km	30km	100 km
Type bassin	-	Baie	Plaine alluviale
Surface bassin	3 - 4.5 million km <sup>2</sup>	50 km <sup>2</sup>	2130km <sup>2</sup>
Altitude	75m	-	-
Débit de la rivière	-	-	Moyenne annuelle : 200 000 megalitres par an
Crues	-	-	-
Précipitations	Moyenne annuelle : ~700mm	-	Amont rivière : 650mm ; Aval rivière : 450mm
Niveau aquifère	-	-	-
Type aquifère	Fluviaux-glaciaire	L'aquifère étudié est composé d'un aquifère supérieur libre et d'un aquifère inférieur captif (sable, dépôts alluvionnaires et fluviaux)	Libre : argile, sable (épaisseur 0-80m) Captif : gravier et sable (épaisseur : 0-40m)
Végétation	-	-	Terres agricoles
Activités humaines	Les niveaux d'eau sont contrôlés par 6 barrages (hautes-eaux en été, basses-eaux en hiver) ; extraction d'eau souterraine pour adduction eau potable	Rivière canalisée aux berges abruptes	Barrage à l'amont, dérivation pour l'irrigation (68000 megalitres par an extrait des eaux superficielles et 8000 dans les eaux souterraines)
Densité points de mesures	-	8 points de mesure du débit de la rivière sur 7 km	11 stations météo (pluie), 4 stations de jaugeage (débit), puits et piézomètres
Période de mesure	2002	Sep. 2003 (débits)	1973-1976
Méthode d'étude	Modèle 3D (MODFLOW, différences finies, régime permanent)	Modèle numérique (SECOFLOW_3D) fondé sur la méthode des différences finies	Modèle intégrant : Modèle Monash Rainfall-Runoff (pas journalier); Modèle Semi-3D aux éléments finis (AQUIFEM-N)
Choix de la méthode	Modèle existant sur la zone d'étude	Pour étudier les patrons régionaux d'alimentation de la rivière par les eaux souterraines et les échanges entre aquifère libre et captif	Comparaison du modèle intégré à un autre modèle de surface prenant en charge les interactions eaux souterraines/ eaux superficielles
Equations	Equation de continuité et loi de Darcy	Equation de continuité et loi de darcy	Equation de continuité et loi de darcy
Conditions limites	Niveaux des lacs de barrage, flux aux limites obtenus par MODFLOW	Conditions limites supérieures du modèle non fixées ; Zéro flux latéral et inférieur	Flux zéro aux limites, piézométrie de référence
Données d'entrée	Base de données nationale	Simulation de base fondée sur les propriétés physiques de l'aquifère libre et une estimation de la conductivité de l'aquifère captive (5 fois plus faible). Test de sensibilité pour évaluer les effets des variations des propriétés physiques Comparaison des résultats calculés et des mesures de terrain	Niveaux de l'aquifère, épaisseur, pompages, niveaux de la rivière...
Calibrage	-	Débit mesuré de la rivière	Débits de la rivière, niveaux piézométriques dans des puits
Points clefs	Simulation des effets des variations de niveau dans la rivière et les lacs de barrage sur les eaux souterraines Les effets sur les eaux souterraines diminuent avec l'augmentation de la distance à la rivière et aux lacs La profondeur, la surface et la conductivité de l'aquifère contrôlent les variations piézométriques	Modélisation des interactions entre eaux superficielles et eaux souterraines tenant compte des échanges à l'interface aquifère libre/aquifère captif Les propriétés et la géométrie de l'aquifère captif sont d'importances dans la modélisation des interactions	Calibration et vérification du modèle intégré par comparaison avec le modèle de surface Modélisation de la recharge de l'aquifère

	<b>Cas 5</b>	<b>Cas 6</b>	<b>Cas 7</b>
<b>Source</b>	<a href="http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5139/">http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5139/</a>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>
<b>Nom de la rivière</b>	Mississippi	Rivière Loosahatchie (Affluent du Mississippi)	Rivière Campaspe
<b>Auteur/date</b>	Jones P.M. (2005) / U.S. Department of the Interior	Urbano L. (2006) / University of Memphis	Chiew F. H. &al. (1992) / University of Melbourne

## 2.5. Tableau 6. Modèles numériques (AEM) – 1/2

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
<b>Nom de la rivière</b>	Delta côtier	Echelle nationale	Rivières Vecht et Eem	Echelle nationale
<b>Source</b>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Mémoire de thèse</i>
<b>Localisation</b>	Pays-Bas	Pays-Bas	Amsterdam, Pays-Bas	Pays-Bas
<b>Longueur</b>	-	-	-	-
<b>Type bassin</b>	Delta côtier	-	Plaine alluviale	-
<b>Surface bassin</b>	25*40 km pour cette étude	-	25*15 km	-
<b>Altitude</b>	-	-	-	-
<b>Débit de la rivière</b>	-	-	-	-
<b>Crue</b>	-	-	-	-
<b>Précipitation</b>	-	-	-	-
<b>Niveau aquifère</b>	-	-	-	-
<b>Type aquifère</b>	-	-	Supérieur : sables fluviaux (150–200m d'épaisseur) Inférieur : fluviaux glaciaire et sables éoliens	-
<b>Végétation</b>	-	-	-	-
<b>Activités humaines</b>	Canal (hydroélectricité), adduction d'eau, structure d'alimentation du canal de dérivation, réalimentation des eaux souterraines	-	Pompages pour l'AEP, lac réservoir (couche inférieure : sable et tourbe)	-
<b>Densité points de mesures</b>	-	-	75 puits dans le premier aquifère et 28 dans le second	-
<b>Période de mesure</b>	1987-1992	-	Depuis 1985	-
<b>Modèle</b>	Modèle fonctionnant avec la condition limite de Cauchy / surface arbitraire, nombre de surfaces en eau arbitraires	Modèles d'écoulement souterrain hollandais : - Mozart : 1D, vertical, zone non-saturée - Nagrom : régime permanent, semi-3D, zone saturée, méthode des éléments analytiques	Modèle multicouches fondé sur les éléments analytiques (Multi layer analytic element model - MLAEM)	NAGROM : modèle national d'écoulement souterrain hollandais
<b>Choix de la méthode</b>	Modèle permettant de simuler les interactions entre les surfaces en eau arbitraires et un aquifère régional	Simulation combinée des zones saturées et non-saturées à différentes échelles	Modèle en régime permanent pour les lacs de la rivière Vecht (partie du modèle d'écoulement souterrain national)	-
<b>Equations</b>	Hypothèse de Dupuit–Forchheimer, semi-2D	--	-	-
<b>Conditions limites</b>	Condition limite de Cauchy : pour décrire les interactions entre eaux souterraines et superficielles	Condition limite de Cauchy calculée à partir de données SIG	Conditions limites non-homogènes modélisées par des « line doublets »	-
<b>Points clefs</b>	Dérivation et interprétation des constantes de la condition limite de Cauchy Application à un modèle 2D pour un aquifère supérieur anisotrope et régional Simple expression des constantes, interprétation facile des comportements Utilisation pour des aquifères phréatiques anisotropes Non applicable comme condition limite du toit de l'aquifère	Modèle couplé pour zone saturée et zone non-saturée à différentes échelles spatiales et temporelles Résultats à différentes échelles, conditions limites de Cauchy, base de données SIG Utilisation des 2 modèles hollandais (Mozart et Nagrom) en association avec une base de données SIG	MLAEM permet de simuler les écoulements souterrains proches d'un futur bassin de rétention selon les grandes divisions régionales de l'aquifère Les détails du calibrage sont explicités Les résultats révèlent l'influence hydrologique spatiale des niveaux d'eau dans les bassins de rétention	Modèle souterrain à grande échelle : NAGROM Description de modèle AEM Couplage de différents modèles souterrains à différentes échelles Modélisation des interactions eaux souterraines / eaux superficielles avec la condition limite de Cauchy Théorie de base pour la détermination de la distance moyenne des surfaces en eaux arbitraires pour utiliser la condition limite de Cauchy

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
<b>Nom de la rivière</b>	Delta côtier	Echelle nationale	Rivières Vecht et Eem	Echelle nationale
<b>Auteur/date</b>	De Lange W.J. (1999) Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment,	Vermulst J.A.P.H. & de Lange (1999) Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment,	Moorman J.H.N. (1999) Amsterdam Water Supply	de Lange W.J. (1996) Delft univ. of Technology

## 2.6. Tableau 7. Modèles numériques (AEM) – 2/2

	Cas 5	Cas 6	Cas 7	Cas 8
<b>Nom de la rivière</b>	Rivière Savannah	Allequash Creek, grand bassin versant du bassin Trout Lake	Mississippi	Humboldt. Colorado, Virgin and Sevier Rivers
<b>Source</b>	<i>Journal of Hydroinformatics</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	<i>Rapport</i>	<i>Journal of Hydrology</i>
<b>Localisation</b>	Caroline du Sud, USA	Wisconsin, USA	Wisconsin, USA	Yucca Mountain site, Californie, USA
<b>Longueur</b>	-	-	~50km	-
<b>Type bassin</b>	Plaine alluviale	-	Vallée	Bassin versant
<b>Surface bassin</b>	27km <sup>2</sup>	10500 ha (Trout Lake)	~50*50km <sup>2</sup>	250*250km <sup>2</sup>
<b>Altitude</b>	-	490—>520 m	-	-
<b>Débit de la rivière</b>	-	-	-	-
<b>Crue</b>	-	-	-	-
<b>Précipitation</b>	490mm	790 mm	-	-
<b>Niveau aquifère</b>	-	-	-	-
<b>Type aquifère</b>	3 niveaux d'aquifère	Fluviaux-glaciaires (sable et gravier) / épaisseur : 40–60m	Aquifère superficiel (sable, gravier) Aquifère supérieur de socle (roches sableuses, dolomites) Aquifère inférieur de socle (riches sableuses)	Séquences de roches carbonatées (épaisseur : 5000m)
<b>Végétation</b>	-	-	-	-
<b>Activités humaines</b>	Production de matière nucléaire et déchets contaminant l'eau souterraine	-	Pompages AEP	Site d'enfouissement de déchets nucléaires
<b>Densité points de mesures</b>	667 puits équipés	-	178 forages	-
<b>Période de mesure</b>	-	2001	50 ans	-
<b>Modèle</b>	- Modèle simple couche fondé sur la méthode des éléments analytiques - Modèle statistique pour les précipitations	MODFLOW : modélisation de l'aquifère GFLOW : obtention des conditions limites	MODFLOW : modèle GFLOW : conditions limites	MLAEM—Modèle régional d'écoulement souterrain (aquifère épais, mono-couche)
<b>Choix de la méthode</b>	Tester l'intégration de concepts stochastiques dans la méthode AEM et évaluer l'applicabilité à des études globales, régionales ou locales sur l'influence des changements climatiques	Modèles préexistants sur le secteur d'étude	Modèles préexistants	Tester si un aquifère épais peut être modélisé en une seule couche Incorporer des conditions limites hydrogéologiques distantes et locales (détaillées) dans un même modèle
<b>Equations</b>	-	-	-	Hypothèses de Dupuit–Forchheimer
<b>Conditions limites</b>	-	-	-	-
<b>Points clefs</b>	L'influence des précipitations sur les eaux souterraines est étudiée avec la méthode AEM combinée à une analyse stochastique des précipitations SLAEM est utilisée en tenant compte des infiltrations, des fuites, des précipitations considérées comme des variables aléatoires La modélisation tient compte de l'incertitude sur les paramètres	Décrit les informations utilisées pour améliorer le calibrage du modèle d'écoulement à l'échelle du bassin versant Calibrage automatisé fondé sur une estimation par régression non-linéaire de 11 paramètres (UCODE) Résultats : les données et mesures n'ont pas toutes la même importance pour le calibrage du modèle. Certaines sont très importantes (écoulement souterrain, profondeur des pompages). La plus grosse influence concerne	Simulation de l'écoulement souterrain Simulation de l'interaction eau souterraine / eau superficielle (quantification de l'alimentation et du drainage) Développement d'un modèle pour évaluer les effets d'un programme de gestion des eaux	L'écoulement souterrain a pu être modélisé de manière précise avec une seule couche et une conductivité hydraulique constante Le modèle fondé sur la méthode AEM intègre conditions limites globales et locales Le modèle est fondé sur des conditions limites réelles



	Cas 5	Cas 6	Cas 7	Cas 8
<b>Nom de la rivière</b>	Rivière Savannah	Allequash Creek, grand bassin versant du bassin Trout Lake	Mississippi	Humboldt, Colorado, Virgin and Sevier Rivers
		l'écoulement souterrain à l'exutoire.		
<b>Auteur/date</b>	Paleologos E.K. & al. (2005) University of South Carolina	Hunt R.J. & al. (2006) US Geological Survey	Hunt R.J. & al. (2003) U.S. Geological Survey	Bakker M. & al. (1999) University of Nebraska



### 3. Annexe 3 : Synthèse des configurations hydrogéologiques

Rhône		Rhône sans aménagement				Rhône avec aménagement				
Longueur (km)	%	Code matériaux parentaux	Longueur (km)	%	Situation	Code aquifère	Situation	Longueur (km)	%	
375,8	26,1	all	31,7	5,9	1, 3	$\alpha 1$	1, 2, 3, 4	344,1	38,1	
					1, 3	$\alpha 3$	2, 3, 4			
					2	$\alpha 5$	4			
71,8	5,0	all / all	9,8	1,8	1, 2, 3	$\alpha 1$ - $\beta 3$	1, 2, 3, 4	62,1	6,9	
					1, 2	$\alpha 1$ - $\beta 4$	2			
						$\alpha 1$ - $\beta 5$	2, 4			
13,7	1,0	all / all-lim	2,3	0,4	1, 3	$\alpha 1$ - $\beta 2$	1, 2, 3	11,4	1,3	
129,3	9,0	all / arg-cal	16,6	3,1	1, 2, 3	$\alpha 1$ - $\beta 11$	1, 2, 3, 4	112,7	12,5	
16,7	1,2	all / arg-sab	11,9	2,2	1, 3	$\alpha 1$ - $\beta 14$	1, 2	4,9	0,5	
61,6	4,3	all / cal	35,0	6,5	1, 3	$\alpha 1$ - $\beta 7$	2, 3, 4	26,6	2,9	
					1, 2, 3	$\alpha 1$ - $\beta 8$				
37,1	2,6	all / cal-all	7,9	1,5	3	$\alpha 1$ - $\beta 6$	1, 2, 3, 4	29,3	3,2	
75,1	5,2	all / cal-arg	30,9	5,8	1, 2, 3	$\alpha 1$ - $\beta 10$	1, 2, 4	44,2	4,9	
56,1	3,9	all / cal-sab	53,5	10,0	1, 2	$\alpha 1$ - $\beta 9$	2	2,5	0,3	
102,0	7,1	all / cri	60,4	11,3	1, 2	$\alpha 1$ - $\beta 16$	2, 4	41,6	4,6	
						$\alpha 1$ - $\beta 17$	2			
					1, 2, 3	$\alpha 1$ - $\beta 18$	1, 2, 4			
					1, 2, 3	$\alpha 1$ - $\beta 19$	2			
19,8	1,4	all / lim	4,5	0,8	1, 2	$\alpha 1$ - $\beta 4$	4	15,3	1,7	
85,8	6,0	all / sab	47,2	8,8	1, 2, 3	$\alpha 1$ - $\beta 12$	1, 2, 3, 4	38,6	4,3	
147,8	10,3	all-lim	65,4	12,2	2	$\alpha 2$	2	82,4	9,1	
6,1	0,4	all-lim / all	5,6	1,0	2	$\alpha 2$ - $\beta 1$	2	0,5	0,1	
47,6	3,3	all-lim / cal	24,0	4,5	2	$\alpha 2$ - $\beta 7$	2	23,6	2,6	
16,5	1,1	arg-cal	12,6	2,3	1, 3	$\alpha 11$	2, 4	3,9	0,4	
59,0	4,1	arg-sab	43,5	8,1	2, 3	$\alpha 14$	4	15,5	1,7	
2,7	0,2	arg-sab / all	2,7	0,5	2	$\alpha 14$ - $\beta 1$				
42,9	3,0	arg-sab / cal-arg	31,3	5,8	1, 2	$\alpha 14$ - $\beta 10$	4	11,6	1,3	
5,5	0,4	cal	5,5	1,0	3	$\alpha 7$				
1,5	0,1	cal-all				$\alpha 6$	4	1,5	0,2	
1,0	0,1	cal-all / cal	1,0	0,2	3	$\alpha 6$ - $\beta 8$				
8,8	0,6	cal-arg	1,7	0,3	1	$\alpha 10$	4	7,1	0,8	
2,2	0,2	cal-arg / cal				$\alpha 10$ - $\beta 7$	4	2,2	0,2	
17,3	1,2	cal-sab	11,6	2,2	1, 2	$\alpha 9$	2, 4	5,8	0,6	
2,9	0,2	cal-sab / cri				$\alpha 9$ - $\beta 16$	1	2,9	0,3	
5,7	0,4	cri	1,0	0,2	2		$\alpha 16$	1	4,8	0,5
							$\alpha 17$	3		
							$\alpha 19$	2		
1,5	0,1	cri / sab	1,5	0,3	1	$\alpha 18$ - $\beta 12$				
7,9	0,5	lim				$\alpha 4$	2	7,9	0,9	
5,6	0,4	sab	5,6	1,0	1	$\alpha 12$				
					2	$\alpha 13$				
2,7	0,2	sab-arg	2,7	0,5	3	$\alpha 15$				
8,8	0,6	sab-arg / cal	8,8	1,6	3	$\alpha 15$ - $\beta 7$				
1439km	100%		536km	100%				903km	100%	



## 4. Annexe 4 : Liste des taxons invertébrés observés sur le secteur de la réserve naturelle nationale du Haut Rhône.

Les espèces stygobies sont marquées d'un \*.

Phylum	Classe	Famille	Espèce	Rhône et affluents	Lônes et paléoméandres	Contres-Canaux
Cnidaires	Hydrozoaires	Hydridae	Hydra	1	1	
Nématodes					1	1
Tardigrade					1	1
Plathelminthes	Turbellariés	Dugesidae	<i>Dugesia sp</i>	1		1
Plathelminthes	Turbellariés	Dugesidae	<i>Dugesia gonocephala</i>		1	
Plathelminthes	Turbellariés	Planariidae	<i>Polycelis sp.</i>	1		1
Annélides	Oligochètes				1	1
Annélides	Achètes	Erpobdellidae	<i>Erpobdella sp.</i>	1		
Annélides	Achètes	Glossiphoniidae	<i>Helobdella sp.</i>	1		
Annélides	Achètes	Glossiphoniidae	<i>Glossiphonia sp.</i>	1	1	1
Mollusques	Bivalves	Dreissenidae	<i>Dreissena polymorpha</i>	1		
Mollusques	Bivalves	Pisidiidae	<i>Sphaerium corneum</i>	1		
Mollusques	Bivalves	Pisidiidae	<i>Pisidium sp.</i>		1	1
Mollusques	Bivalves	Pisidiidae	<i>Pisidium casertanum</i>	1		
Mollusques	Bivalves	Pisidiidae	<i>Pisidium subtruncatum</i>	1		
Mollusques	Bivalves	Pisidiidae	<i>Pisidium henslowanum</i>	1		
Mollusques	Gastéropodes	Ancylidae	<i>Ancylus fluviatilis</i>			1
Mollusques	Gastéropodes	Bityniidae	<i>Bithynia tentaculata</i>			1
Mollusques	Gastéropodes	Hydrobiidae	<i>Islamia moquiniana*</i>	1		1
Mollusques	Gastéropodes	Hydrobiidae	<i>Potamopyrgus antipodarum</i>	1		1
Mollusques	Gastéropodes	Limneadae	<i>Radix sp.</i>			1
Mollusques	Gastéropodes	Physidae	<i>Physa fontinalis</i>	1		
Mollusques	Gastéropodes	Physidae	<i>Physella acuta</i>			1
Mollusques	Gastéropodes	Planorbidae	<i>Planorbis planorbis</i>		1	1
Mollusques	Gastéropodes	Planorbidae	<i>Planorbis carinatus</i>			1
Mollusques	Gastéropodes	Planorbidae	<i>Hippeutis complanatus</i>		1	
Mollusques	Gastéropodes	Valvatidae	<i>Valvata cristata</i>	1	1	
Crustacés	Branchiopodes	Bosminidae	<i>Bosmina longirostris</i>	1		
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Alona guttata</i>			1
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Alona quadrangularis</i>		1	1
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Alona rectangula</i>		1	
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Biapertura affinis</i>		1	1
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Biapertura minutissimus</i>		1	
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Chydorus sphaericus</i>		1	1
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Leydigia leydigi</i>	1		
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Leydigia quadrangularis</i>		1	
Crustacés	Branchiopodes	Chydoridae	<i>Pleuroxus laevis</i>	1		
Crustacés	Branchiopodes	Daphniidae	<i>Simocephalus exspinosus</i>	1	1	
Crustacés	Branchiopodes	Macrothricidae	<i>Ilicryptus sordidus</i>	1		
Crustacés	Cyclopides	Cyclopidae		1	1	1
Crustacés	Cyclopides	Cyclopidae	<i>Acanthocyclops venustus*</i>	1		

Rapport ZABR – Phase 2

Phylum	Classe	Famille	Espèce	Rhône et affluents	Lônes et paléoméandres	Contres-Canaux
Crustacés	Cyclopidés	Cyclopidae	<i>Diacyclops belgicus*</i>	1		
Crustacés	Harpacticidés			1	1	1
Crustacés	Ostracodes	Candonidae	<i>Candona candida</i>		1	1
Crustacés	Ostracodes	Candonidae	<i>Candona neglecta</i>	1		
Crustacés	Ostracodes	Candonidae	<i>Cryptocandona vavrai</i>	1		1
Crustacés	Ostracodes	Candonidae	<i>Fabaeformiscandona wegelini*</i>	1		
Crustacés	Ostracodes	Candonidae	<i>Pseudocandona albicans</i>		1	1
Crustacés	Ostracodes	Candonidae	<i>Pseudocandona marchica</i>	1		1
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Cyclocypris ovum</i>		1	
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>	1	1	
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Herpetocypris reptans</i>			1
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Ilyocypris bradyi</i>	1		
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Ilyocypris sp.</i>		1	
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Limnocythere inopinata</i>	1		
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Potamocypris sp.</i>		1	
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Potamocypris variegata</i>			1
Crustacés	Ostracodes	Cyprididae	<i>Prionocypris zenkeri</i>		1	1
Crustacés	Syncarides	Parabathynellidae	<i>Parabathynella sp.*</i>			1
Crustacés	Amphipodes	Crangonyctidae	<i>Crangonyx pseudogracilis</i>		1	
Crustacés	Amphipodes	Crangonyctidae	<i>Crangonyx subterraneus*</i>			1
Crustacés	Amphipodes	Gammaridae	<i>Gammarus fossarum</i>	1	1	1
Crustacés	Amphipodes	Gammaridae	<i>Gammarus pulex</i>	1	1	1
Crustacés	Amphipodes	Niphargidae	<i>Niphargopsis casparyi*</i>	1		1
Crustacés	Amphipodes	Niphargidae	<i>Niphargus fontanus*</i>			1
Crustacés	Amphipodes	Niphargidae	<i>Niphargus kochianus*</i>			1
Crustacés	Amphipodes	Niphargidae	<i>Niphargus rhenorhodanensis*</i>	1	1	1
Crustacés	Amphipodes	Salentinellidae	<i>Salentinella angelieri*</i>			1
Crustacés	Isopodes	Asellidae	<i>Asellus aquaticus</i>		1	1
Arthropodes	Arachnides				1	1
Arthropodes	Insectes	Nemouridae	<i>Protonemura sp.</i>			1
Arthropodes	Insectes	Baetidae	<i>Baetis sp.</i>	1	1	1
Arthropodes	Insectes	Caenidae	<i>Caenis sp.</i>		1	1
Arthropodes	Insectes	Ephemerellidae	<i>Ephemerella ignita</i>			1
Arthropodes	Insectes	Ephemeridae	<i>Ephemera sp.</i>		1	1
Arthropodes	Insectes	Heptageniidae	<i>Rhitrogena sp.</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Potamanthidae	<i>Potamanthus luteus</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Corduliidae	<i>Sympetrum sp.</i>			1
Arthropodes	Insectes	Platycnemiidae	<i>Platycnemis pennipes</i>		1	
Arthropodes	Insectes	Goeridae	<i>Silo pallipes</i>			1
Arthropodes	Insectes	Hydropsychidae	<i>Hydropsyche contubernalis</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Hydropsychidae	<i>Hydropsyche modesta</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Leptoceridae	<i>Athripsodes sp.</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Leptoceridae				1
Arthropodes	Insectes	Leptoceridae	<i>Mystacides azurea</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Limnephilidae				1
Arthropodes	Insectes	Odontoceridae	<i>Odontocerum albicorne</i>			1
Arthropodes	Insectes	Psychomyiidae	<i>Psychomyia pusilla</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Sericostomatidae	<i>Sericostoma sp.</i>			1

Phylum	Classe	Famille	Espèce	Rhône et affluents	Lônes et paléoméandres	Contres-Canaux
Arthropodes	Insectes	Curculionidae	<i>Anisus sp.</i>		1	
Arthropodes	Insectes	Dryopidae	<i>Dryops sp.</i>	1		
Arthropodes	Insectes	Dytiscidae	<i>Hydroporus sp.</i>			1
Arthropodes	Insectes	Elmidae	<i>Elmis maugetii</i>			1
Arthropodes	Insectes	Elmidae	<i>Esolus paralellepipedus</i>	1		1
Arthropodes	Insectes	Elmidae	<i>Limnius volcknari</i>			1
Arthropodes	Insectes	Halplidae	<i>Halplus fluviatilis</i>		1	
Arthropodes	Insectes	Halplidae	<i>Halplus lineatocollis</i>		1	
Arthropodes	Insectes	Histeridae	<i>Laccobius striatulus</i>		1	
Arthropodes	Insectes	Ceratopogonidae	<i>Ceratopogoninae</i>		1	1
Arthropodes	Insectes	Chironomidae		1	1	1
Arthropodes	Insectes	Empididae			1	1
Arthropodes	Insectes	Empididae	<i>Atalantinae</i>			1
Arthropodes	Insectes	Psychodidae				1
Arthropodes	Insectes	Simulidae				1
Arthropodes	Insectes	Tabanidae				1
Arthropodes	Insectes	Tipulidae			1	1





## 5. Annexes 5 : Compte-rendu de terrains et de réunions

### 5.1. Compte-rendu rapide : réunion technique du 7 décembre 2007

**Personnes présentes :** Patrick Lachassagne (BRGM), Pierre Marmonier (EHF-Lyon 1), Christophe Piscart, Laurent Simon (EHF-Lyon 1), Gudrun Bornette (EHF-Lyon 1), Céline Jezequel (EHF-Lyon 1), Michel Lafont (CEMAGREF-Lyon), Didier Graillet (SITE-EMSE), Roland Déchomets (SITE-EMSE), Frédéric Paron (SITE-EMSE).

#### Rappel de l'ordre du jour

1. Présentation du programme de recherche à P. Lachassagne et P. Marmonier, discussion ;
2. Fiche de restitution année 1 (phase 1) ;
3. Rapport année 2 (phase 2)
4. Point sur les données isotopiques (Laurent Simon) ;
5. Divers :
  - financement région PACA ; contribution possible de l'université d'Avignon ;
  - sortie terrain de janvier à Donzère ;
  - connexion avec le projet européen GMRM ;
  - avancement d'une publication (conférence Modflow ; Water management...);
  - organisation d'une réunion plénière à Grillon (Vaucluse).

#### Points importants :

- Demander une autorisation d'accès aux piézomètres de la CNR (EMSE);
- Partage des couvertures SIG ;
- Sortie terrain à Donzère-Mondragon (fixer 2 journée sur les 6, 7, 8 février) ;
- Proposer le plan du rapport phase 2 avant les vacances de Noël.

#### 1. Présentation du programme de recherche à P. Lachassagne et discussion

Suite à la présentation de l'action de recherche, de la méthodologie interdisciplinaire impliquant plusieurs métriques et les premiers résultats sur Brégner-Cordon les points suivants ont été évoqués :

- Tester une sectorisation des débits de nappe en fonction des unités paysagères ;
- Définir l'échelle de travail plus précisément (à faire en fonction du travail en cours sur Brégner-Cordon) ;
- Calculer des débits de nappe à partir de piézométries plus récentes et postérieures à l'aménagement de la lône de Rossillon (des données piézométriques sont à récupérer auprès de G. Bornette) ;
- Demander à la CNR s'il est possible d'accéder à leurs piézomètres pour effectuer une campagne de relevés piézométriques ;
- Etudier la géologie et la lithologie du secteur de Brégner-Cordon afin de pouvoir utiliser des traceurs chimiques (ex : sulfates dans un contexte d'évaporite, conductivité...).

#### 2. Fiche de restitution année 1 (phase 1)

Cette fiche est validée. Il faut toutefois préciser qu'une partie du travail présenté est en cours et ajouter quelques illustrations avant de la faire parvenir à la ZABR.

### 3. Rapport année 2 (phase 2) – (voir plan)

Une première ébauche de plan détaillé sera fixée avant les vacances de Noël. Les contributions complémentaires (plan de sous-parties) attendues sont les suivantes :

- P. Marmonier : 2.2.1. Physico-chimie classique, 3.2.1. Approche physico-chimique (carbonate/sulfate, conductivité) et 4.3. Vers des préconisations en matière de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité
- L. Simon : 2.2.2. Chimie isotopique ;
- G. Bornette : 3.2.1. Approche physico-chimique (difficultés d'interprétation) à compléter par EMSE ;
- C. Piscart : 3.4. Métrique hydrobiologique : faune souterraine.

De plus, il a été convenu de partager les fichiers SIG déjà réalisés pour les différentes métriques (envoi des fichiers SIG de G. Bornette, L. Simon et C. Piscart à R. Déchomets ([dechomet@emse.fr](mailto:dechomet@emse.fr)) en fichier attaché par e-mail).

### 4. Point sur les données isotopiques (Laurent Simon)

Au vue du travail bibliographique effectué, il existe environ 300 données isotopiques sur le bassin du Rhône. Elles concernent le deutérium, l'oxygène 18 (précision des mesures de l'ordre de 0,2 à 0,1‰), l'oxygène 16, le carbone 13 et dans une moindre mesure le tritium et le carbone 14. Il n'y a pas de données strontium contrairement à la Loire où elles sont nombreuses.

Il n'y a pas de données sur le secteur de Brégnier-Cordon. Les données sont principalement réparties :

- en Suisse ;
- entre Chautagne et Belley (lac du Bourget) – eaux profondes ;
- sur le secteur de Lyon ;
- sur les secteurs de Valréas (eaux âgées de 30000 ans), Avignon, Montpellier.

Dans les secteurs où les nappes alluviales sont en équilibre avec le Rhône, les isotopes apportent peu d'informations. Ils peuvent renseigner sur des apports latéraux d'altitude. Il y a une saisonnalité des teneurs en isotopes ( $\pm 6\%$  en un été et un hiver hydrologique). L'été hydrologique présente de plus forts contrastes.

Le protocole d'acquisition de données pourrait prendre différentes formes :

- suivi général;
- concentration des efforts sur un secteur ;
- instantané temporel le long du Rhône à l'été et à l'hiver hydrologique.

### 5 Prélèvements de terrain

C. Piscart va se rendre sur le secteur de Brégnier Cordon le 17 décembre prochain pour y effectuer des prélèvements d'invertébrés. Avec R. Déchomets, ils vont essayer de s'y rendre ensemble pour un repérage GPS et des mesures piézométriques complémentaires.

### 6 Divers

- *financement région PACA ; contribution possible de l'université d'Avignon*

Dossiers en cours. Le financement de la région PACA pourrait représenter 10% du coût total du projet.

Pour l'année 2009, un financement de soutien pourrait être demandé au Cluster par l'intermédiaire de la ZABR. La demande est à effectuer en oct/nov 2008.

- *sortie terrain dans le secteur de Donzère-Mondragon*

Il est prévu 2 journées pour cette sortie. Outre, les visites de terrain il est prévu de travailler à la rédaction du rapport.

Les dates retenues seraient les 6, 7 et 8 février à confirmer avec les disponibilités de L. Cadilhac (réservation d'un gîte).

- *connexion avec le projet européen GMRM*

Envoi de la maquette de projet a G. Bornette (DG)

## **5.2. Compte rendu de la mission du 28 et 29 juin 2007 : visite de terrain des confluences avec le Berre et le Roubion (Drôme -Vaucluse) et rencontre avec le vice-président du SMBVL**

### **Personnes présentes :**

Laurent CADILHAC (Agence de l'Eau), Georges TRUC (Vice-président du Syndicat Mixte du Bassin Versant du Lez - Hydrogéologue)

Didier GRAILLOT (SITE-EMSE), Frédéric PARAN (SITE-EMSE), Alix GERMAIN (Stagiaire Master, SITE-EMSE).

La mission s'est déroulée trois temps :

- 28 juin, visite de la confluence du Roubion avec le canal de dérivation Rhône et d'un secteur de gravières aménagées (Base de loisir de Montmellian) proche du Vieux-Rhône (chute CNR de Montélimar),
- 29 juin matin, réunion avec Mr TRUC afin de présenter l'action de recherche ZABR « Echanges nappes/Rhône) et recueillir des informations (données, références bibliographiques, connaissances) concernant la région (département Drôme, Vaucluse),
- 29 juin après-midi, visite sur la chute CNR de Donzère-Mondragon au niveau de la confluence du Vieux-Rhône et du Berre, afin d'observer les îles des Iles Margerites.

### **I. Objectif de la visite de terrain**

Cette visite de terrain permettait d'examiner deux sites de confluence du Rhône avec deux affluents dans le but de sélectionner un nouveau secteur d'étude pour l'action de recherche « Echanges nappes-Rhône ». Le premier site sélectionné était celui de Brégnier-Cordon au niveau du Haut Rhône.

La rencontre avec Mr TRUC, vice président du SMBVL-Hydrogéologue, nous a éclairé sur le fonctionnement hydraulique de la région. De plus, il nous a transmis les références de dossiers de projet et études réalisées.

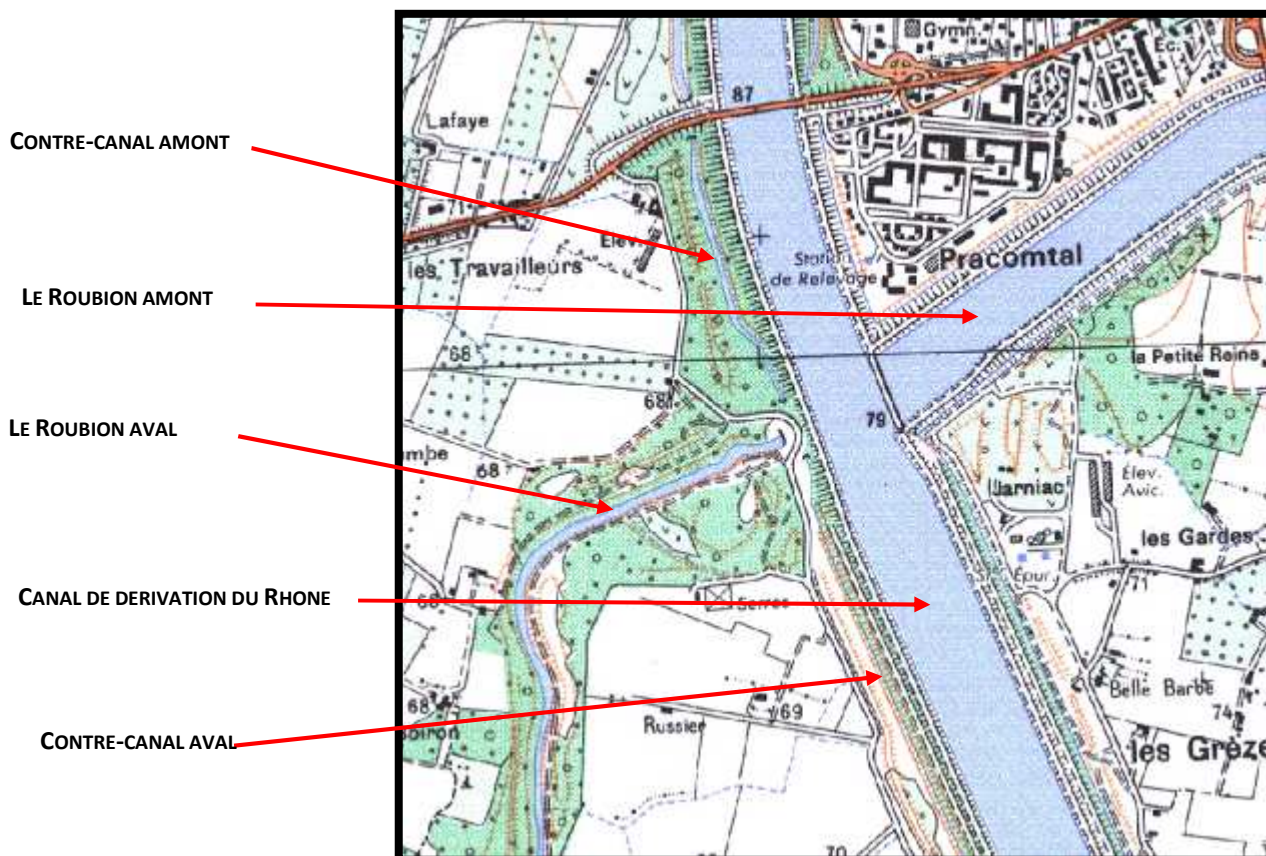
**Ce compte rendu dresse la liste des différentes informations recueillies lors de l'entretien avec Mr TRUC. Il est convenu qu'il nous fasse parvenir les documents dont il dispose pour mi-juillet.**

## **II. VISITE DE SITES**

### *II. 1. VISITE DU 28 JUIN*

Cette carte permet de repérer dans l'espace les différents ouvrages qui se situent au niveau de la chute de Montélimar et en particulier à la confluence entre le Roubion et le canal de dérivation.

La visite de terrain a permis de visualiser les données de la carte, qui lors des analyses auraient été mal interprétées.



Carte de situation des aménagements pour la visite du 28 juin

### Le Roubion aval

Le Roubion, à ce niveau est complètement réaménagé. Le sens d'écoulement est indiqué sur la photographie ci-contre par une flèche bleue. Le débit n'est pas facilement déductible. Le lit a une largeur d'environ 15m. Une échelle limnimétrique est présente. La hauteur affichée était de 4 le jour de la visite (graduation tous les 10 cm). La hauteur de berges est d'environ 6 mètres. A ce niveau, la végétation aquatique y est abondante avec la présence de macrophytes, phragmites, cyperus et myriophylles.



Vue des aménagements sur le Roubion

On observe deux sorties d'eaux latérales. Ces arrivées d'eaux se trouvent à environ 20-30 cm du miroir de l'eau. Le débit est estimé : en rive gauche :  $80 \text{ l.s}^{-1}$  ; en rive droite :  $30 \text{ l.s}^{-1}$ . En rive droite, il peut s'agir d'une ouverture qui vient du contre canal amont.

Au dessus se trouvent deux regard (4m X 8m) qui sont vides et contenant des déchets. L'eau qui alimente le Roubion arrive sous le siphon, à partir d'un déversoir situé au départ du contre-canal aval. Cependant, on suppose qu'il y a des arrivées d'eaux de nappes, le débit du Roubion étant visiblement bien supérieur à 110 l.s<sup>-1</sup>. On observe à environ 300 mètres en aval, un seuil d'une hauteur d'environ 1 m.

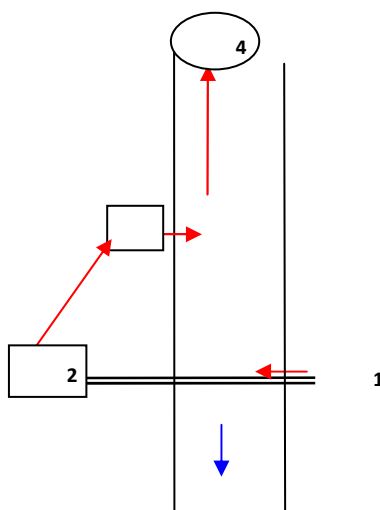
### Contre canal aval - RI des Crèzes

On observe plusieurs dispositifs sur le début de tronçon du contre canal.

D'après les observations faites sur le site, on suppose que : une partie de l'eau du canal est prélevée par l'intermédiaire d'un tuyau [1] qui traverse le contre canal. Il passe par une station de pompage [2], puis est reversé dans le contre canal tout en passant par un poste [3] (probablement un regard de contrôle). Ensuite, une partie de l'eau rejetée est transmise vers le Roubion via un déversoir [4] puis un système de siphon. L'autre partie de cette eau forme de le débit du contre canal

Il existe à cet endroit une station de jaugeage noté : **SJ 157930 D**. Il existe aussi une échelle limnimétrique numérotée **E 157950 D** affichant la valeur de 3,5 ce jour (graduation tous les 10 cm).

Ce schéma permet de récapituler le transfert de l'eau du canal de dérivation jusqu'au contre canal et au Roubion.



*Représentation simplifié des aménagements sur le contre canal aval*

Les photographies suivantes donnent une idée plus précise de l'ensemble de ces ouvrages sur le contre canal.



*Vue des aménagements sur le contre canal aval*

Contre canal amont

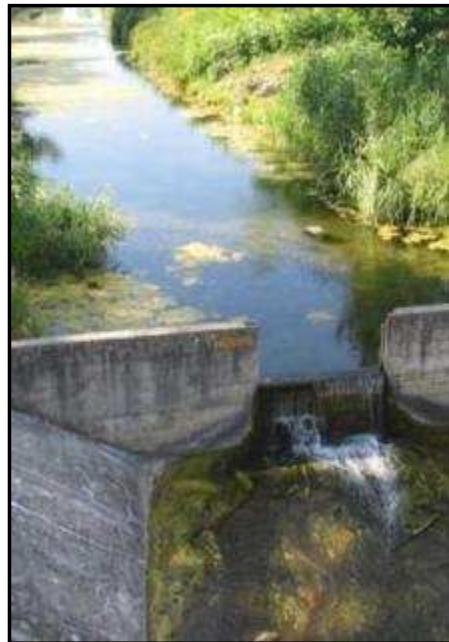
Au niveau de ce contre canal, on observe un déversoir de type rectangulaire.

Le débit approximatif a été calculé à l'aide de la formule :

$Q = H^n$  avec  $Q$ , le débit en  $m^3.s^{-1}$

$H$ , la hauteur d'eau au niveau du seuil

$n$ , le coefficient de  $\frac{1}{2}$  pour un déversoir de type rectangulaire



*Vue des aménagements du contre canal amont (photo de gauche)*

*Vue du déversoir rectangulaire du contre-canal amont (photo de droite)*

Nous avons estimé la hauteur d'eau au seuil à environ 10cm. Le débit approximatif calculé par la formule du déversoir est donc de  $33 \text{ l.s}^{-1}$ . Nous pouvons observer que les eaux de ce contre canal rejoignent ensuite le Roubion par l'arrivée latérale observée en rive droite du Roubion. Peu avant ce déversoir, on observe en rive droite une échelle limnimétrique qui indique une hauteur de 1.50m ce jour (graduation tous les 10 cm). En rive gauche, on observe deux piézomètres qui se situent en face de l'échelle. Il existe à cet endroit une station de jaugeage noté : **SJ 157800 D**.



*Vue des piézomètres*

### Canal de dérivation

A l'ouest de Montélimar, le Roubion arrive en rive gauche du canal de dérivation. Contrairement à ce qui est visible sur les cartes, il se jette directement dans le canal. Il n'y a pas de seuil visible. Le canal de dérivation, avec ses digues bétonnées, est surélevé par rapport à la cote topographique de la plaine. La nappe alluviale ne doit donc pas alimenter le canal.



*Vue du canal de dérivation et de la confluence avec le Roubion sous le pont*

### Base de Loisirs.

La base de loisirs, située à proximité du Rhône est constituée de plans d'eau aménagés de profondeur indéterminée. Il s'agit d'anciennes gravières exploitées par la société Morillon-Corvol.



*Carte de situation de la base de loisirs*

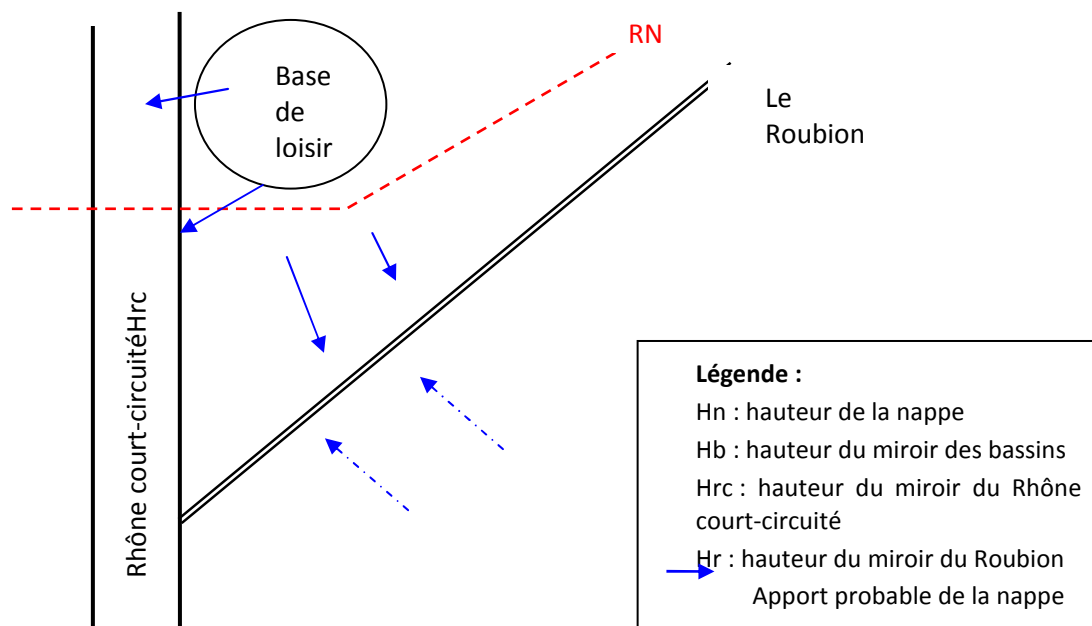
Visiblement, le niveau des plans d'eau est supérieur (d'un à deux mètres) au niveau du Rhône court-circuité. Nous pouvons donc supposer que la nappe alluviale alimente le Roubion ainsi que du Rhône dans ce secteur. Le faible gradient conduirait à une alimentation plutôt faible malgré une perméabilité du sol élevée. En effet, on a un sol visiblement fait d'alluvions caillouteuses. Ceci coïncide avec les données géologiques référencées sous ArcGis. La vue que nous avons du Rhône à cet endroit, montre un fleuve court-circuité, qui présente de nombreux bancs de galets mais aussi plusieurs petits îlots.

### Bilan

Nous avons réalisé un schéma susceptible de représenter les différents apports de la nappe. Il semblerait que les plans d'eau de la base de loisir soient à peu près au même niveau que la nappe alluviale. Bien évidemment, ce schéma n'est qu'une supposition et devra être validé ou infirmé par les données plus



précises de la CNR dans ce secteur et des relevés GPS complémentaires. Cette visite de terrain est un préliminaire indispensable au traitement géomatique de données des ouvrages et de piézomètres pour le calcul des échanges.

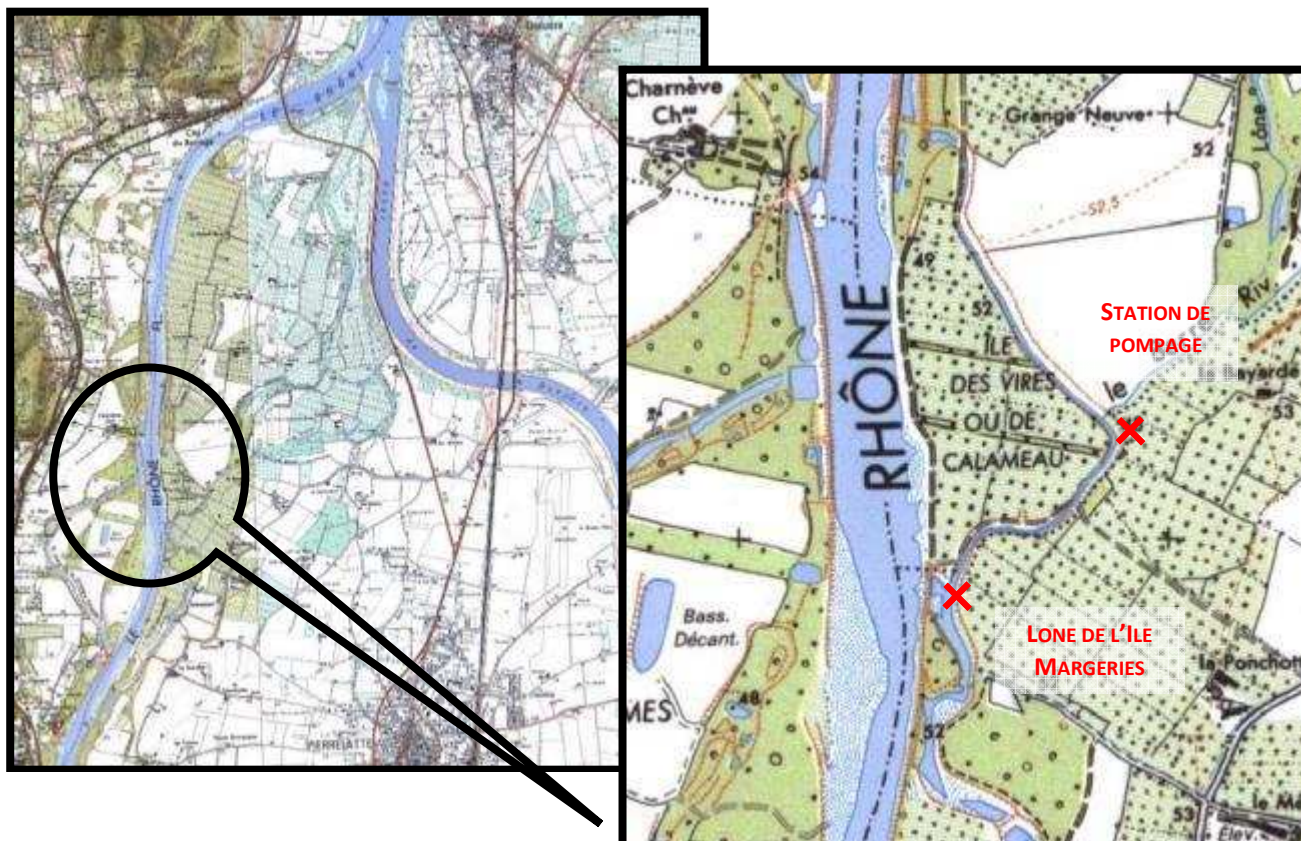


Représentation des apports éventuels de la nappe

On a :  $H_n > H_{rc}$  (on suppose que la différence de hauteur entre la nappe et le Rhône court-circuité est de 2 mètres maximum) ;  $H_n > H_r$  ;  $H_{rc} = H_r$  (à la confluence)

## II. 2. VISITE DU 29 JUIN

Ceci est un plan permettant de se repérer les visites sur la chute de Donzère-Mondragon.



Carte de situation de la visite du 29 juin

### La station des Trois Vergers

Il existe de nombreuses stations de pompage pour irriguer les champs environnants. La station des Trois Vergers comporte :

- deux manomètres dont un cassé. Celui en fonctionnement montre une pression de 5 bars (70 PSI) à ce jour. Cette donnée peut être erronée vu le mauvais entretien de la station et sa dégradation
- un débitmètre à diaphragme (à confirmer)
- un poste comportant un local machine ainsi qu'une armoire électrique de mise en route des pompes, reliée à une ligne haute tension EDF

Il n'y a pas d'autres éléments qui puissent nous indiquer l'utilisation de cette station ou leurs propriétaires.

### Lône des Iles Margerites

Nous avons observé la lône de Lascombe. Elle est alimentée par le Berre

Cette lône présente un débit assez important avec une eau relativement limpide ainsi qu'un grande biodiversité



*Vue de la lône de Lascombe*

Des données complémentaires s'avèrent nécessaires pour identifier la nature des échanges nappes-lônes-Rhône dans ce secteur. On peut citer l'étude Nitrates réalisée par le bureau d'étude GEO+ pour le Conseil Général (1999)

### **III. Rencontre avec Mr Georges TRUC, vice-président du SMBVL**

La rencontre s'est effectuée au Syndicat Mixte du Bassin Versant du Lez (SMBVL) situé à Grillon (Vaucluse) à quelques kilomètres de Valréas. Elle avait pour objectif d'obtenir des informations sur les différentes caractéristiques hydrogéologiques de la région, ainsi que les études qui ont été préalablement menées. Ces données doivent nous permettre de choisir un nouveau secteur d'étude mais aussi de l'appréhender de la meilleure façon possible avec des renseignements sur le fonctionnement hydraulique des sites. Dans un premier temps, nous avons présenté l'ensemble du projet ZABR « Echanges nappes/Rhône ».

La commune de Grillon est équipée d'une salle de conférence qu'elle prête gracieusement. Il serait envisageable d'y organiser une prochaine réunion du comité de suivi plénier « Echange nappes/Rhône » à cet endroit.

D'après Mr TRUC, il semblerait, qu'il n'y ait plus de création d'information depuis plusieurs années. Sinon, ces créations sont ponctuelles.

Afin de répertorier ces données et les références communiquées par Mr TRUC, nous avons réalisé un tableau synthétique.

ZONE GEOGRAPHIQUE CONCERNEE	INTITULE DE L'INFORMATION	DESCRIPTIF	AUTEUR ET DATE MODALITES D'ACCES ET DE TRANSMISSION
<b>I.</b> <b>Aval de Donzère</b>	I.1 Synthèse hydrogéologique	Différents travaux ont été entrepris dans le champ de captage de Monas sur un aquifère situé entre le contre canal et sa retenue, afin de réaliser une synthèse hydraulique. Il s'agit du captage de l'Ile Saint-Georges. Le captage influence la nappe située de l'autre côté du canal de dérivation de la même façon ; le cône de rabattement passe donc sous le canal de dérivation. Il y a à cet endroit un paléo-chenal du Rhône.	Commandé par le syndicat du Rhône Aigues-Ouvèze
	I.2 Etude sur les formations karstifiées du site de Margoule	Il s'agit du site souterrain des déchets de l'ANDRA. Très peu de choses sont encore connues, mais des analyses piézométriques ont été réalisées	Réalisé par le bureau d'étude Diastratar en 1999 (Serge FERRY). Etude remise au SITE par l'Agence de l'Eau (4/7/07)
	I.3 Etude piézométrique	Etude demandée pour la construction de la ligne TGV Méditerranée. Périodiquement ; le contre canal ne joue plus son rôle lors de période de basses eaux (il est shunté) On a donc une inversion du sens de la nappe  O18 dans le Rhône : -7‰ ou 9‰ ??  Au niveau du champ de captage des Angles, des forages ont été réalisés au nord du pont sur lequel passe le TGV. ON se situe sur le massif du crétacé (massif de Pujaut) où aucun ruissellement n'est observé. On a donc une infiltration avec restitution cachée et ce sûrement au niveau des alluvions. L'alimentation du champ de captage vient de l'infiltration dans le massif. Ceci vient en contradiction avec la modélisation BRGM où le massif de Pujaut est considéré comme une condition limite imperméable. Une étude géochimique a montré que le champ de captage était alimenté par le Rhône et par le massif crétacé.  Au niveau de la nappe de Malataverne, la ligne TGV passe sur des poches karstiques, ce qui a nécessité des injections de béton importantes. Il y a à cet endroit un ancien cours du Rhône pliocène (Paléo-Rhône).	Demandé par la SNCF en 1999  Mr Yves BILLAUD : karstologue. Travail sur l'archéologie sous lacustre. Connaissances sur le Massif Montilien en particulier. Contact à Annecy
<b>II</b> <b>Bassin versant du Lez : Contrat de rivière</b>	Demande d'étude et données diverses	Il s'agit d'une demande du SMBVL afin d'avoir une réponse cohérente au problème de la gestion équilibrée de la ressource en eau superficielle et souterraine. Comment déterminer et gérer les échanges avec la nappe (montrer l'importance des nappes pour les cours d'eau du bassin	Demandé par le Syndicat Mixte du Bassin Versant du Lez (durée de 18 mois ??)  Réalisé par les bureaux d'étude

		<p>versant pour une meilleure gestion) ? Il va s'agir aussi de mieux connaître la nappe miocène (est-elle totalement drainée par les cours d'eau ? recharge-t-elle en partie des horizons crétacés qui s'écoulent par ailleurs ?)</p> <p>Les données acquises au cours de cette étude peuvent être utilisées pour mieux expliquer le fonctionnement du Lez et identifier les échanges nappes-rivière au niveau de sa confluence avec le Rhône</p>	Hydiad et Idées-Eaux (Banton, Faure)
<p><b>III</b> <b>Bassin versant du Grand Delta (Rhône moyen et aval)</b></p>	Mise en place de radars	<p>D'ici 2008-2009, des radars seront installés sous les ponts afin d'avoir des données sur les crues (hauteurs et débits d'eau). Le début des travaux devrait commencer d'ici 1 mois.</p>	<p>Mise en place par le Service de Prévision de Crues (SPC) de Nîmes (Grisan)</p> <p>Accès au public</p>
<p><b>IV</b> <b>Le Lauzon</b></p>	Données géologiques	<p>Il y a des difficultés de différenciation entre le pliocène et le miocène à certains endroits.</p> <p>Dans ce secteur, on se trouve sur du Crétacé (Turonien) riche en arrivées d'eaux. Au niveau de Mons, le Lauzon passe en siphon sous un contre-canal du Rhône La question est de savoir s'il y a des apports d'eau du bassin versant du Lez qui pourraient être absorbées par le Massif de Chau.</p> <p>On sait qu'il y a un apport par le bassin versant souterrain mais on ne connaît pas sa capacité de restitution.</p> <p>Dans ce secteur, on se trouve dans un cloisonnement de pliocène argileux où se répertorient de nombreux forages.</p>	Etude pour la société Salade-Minute
<p><b>V</b> <b>Est lyonnais</b></p>	Forages et données géologiques	<p>Dans le couloir de Mezieux dans l'Est Lyonnais, des travaux de forages ont été réalisés dans un sol très caillouteux.</p> <p>Situé dans le littoral Miocène, on a retrouvé dans des carrières un couloir ou cordon de galets perforés qui proviendraient du fluvio-glaciaire. On suppose donc que la source est proximale. Ceci pourrait correspondre à un cordon pliocène</p> <p>La géologie de l'est-lyonnais est peu connue</p>	<p>Travail réalisé pour la société Shadmint</p> <p>J.L. Pradel (aquifor) - hydroforage</p>
<p><b>VI</b> <b>Bassin de Valréas</b></p>	Analyses souterraines	<p>Des analyses iode/sodium ont été réalisées au niveau du miocène. L'anomalie de concentration en sodium serait due à la mer miocène qui a permis aux argiles de le piéger.</p> <p>On retrouve des phénomènes d'affaissement néo-tectonique qui correspondent au tassement des matériaux, à leur compaction actuelle.</p>	Thèse de Miniot (Unaux ??)

		Des analyses géothermiques ont été réalisées au niveau des bancs de pliocènes. On a 1 à 2°C de plus par rapport au degré géothermique (anomalie thermique). Il s'agit de phénomènes de géotechnie mais surtout dus à la continuité de la compaction des formations miocènes	
<b>VII</b> <b>Bassin de</b> <b>Carpentras</b>	VII.1 Thèse	Horst avec drainage miocène	Mr FAURE Guy
	VII.2 Recensement des forages et usages	On recense environ 1,5 forages réalisés chaque semaine. En effet, ils sont construits pour l'usage domestique essentiellement. Ils ne nécessitent qu'une déclaration en mairie. Pour l'instant, il n'y a pas de gestion de ces forages. De plus, il n'existe pas d'outils juridiques qui pourraient obliger leurs fermetures. La neutralisation des ouvrages est difficile, mais elle est parfois nécessaire car certains constituent un point d'entrée privilégiée des contaminations dans l'aquifère. De plus, ces forages sont facilement réalisables et peuvent descendre jusqu'à 80 mètres de profondeur.  D'ici 2 à 3 ans il sera possible d'avoir des données exploitables mais que faire en attendant ?	Mr GARGNON Lucien à Nyons
	VII.3 Etude de forages	Des études chroniques de 15 forages artésiens ont été effectuées. La charge était de 15 mètres environ. Ce forage permettait donc à la population environnante de disposer de l'eau courante. Entre 1930 et aujourd'hui, la charge de la nappe du Contoi a perdu entre 15 et 18 mètres.	Etude de Mr Maurice GIGNOUX  Thèse de Guy FAURE  Thèse de Mr ROUDIER
	VII.4 Etude piézométrique	Une chronique piézométrique existe depuis 1977 au niveau d'une zone de sables blancs. Bien que le cycle soit déprimé et qu'il y ait ensuite recharge de la nappe, on observe une baisse de la hauteur piézométrique de celle-ci.  La corrélation avec la pluviométrie affirme en ce sens. Des analyses au carbone 14 montrent que les eaux profondes sont âgées de plus de 2000 ans.	
<b>VIII</b> <b>Syndicat du</b> <b>Rhône-Ventou</b>	Usage de l'eau	On compte, dans cette zone, 2 millions de m <sup>3</sup> d'eau prélevée essentiellement pour l'AEP.  Le CG du Vaucluse est un gros acteur de l'eau. Il avait envisagé une charte de l'eau (préservation de la ressource et diminution des pompages) qui n'a pas vu le jour car génératrice de conflits. En effet, il y a une importante influence des maraîchers. Il est un niveau d'exigences en terme de qualité de l'eau de plus en plus important. La	

		consommation est évaluée entre 50 et 60m <sup>3</sup> /heure pour chaque serre. On estime que sur le bassin de miocène de Carpentras la consommation en eau souterraine est de 3 à 4 m <sup>3</sup> /s.	
<b>IX La confluence Ouvèze - Rhône</b>	Relation d'échange et données sur le Rhône	<p>Il y a de bonnes relations d'échanges entre le Rhône et la nappe (condition sub-naturelles à Vallabrègues ce qui n'est pas le cas ailleurs dans le secteur). Une étude menée dans le cadre d'une pollution au pesticide (SNPE) dans la nappe a montré que la pollution avançait à une vitesse de 11 m/jour.</p> <p>Au niveau de Sorgue, le Rhône est à un débit réservé de 800 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Le barrage empêche le charriage ainsi que l'érosion. On a donc un colmatage des digues (berges) et une accumulation de vase qui s'auto compacte (épaisseur 1m en 4 ou 5 ans). Au-dessus se trouve un tapis de mollusques dont le byssus forme un piège à sédiments. On observe une augmentation de la densité de dreissena.</p> <p>Pour les dragueurs (dragage Fourneau), il s'agit du « béton du Rhône ».</p>	
<b>X Plaine de l'Erain</b>	Piézométrie	Etude piézométrique sur la plaine alluvionnaire de l'Erain.	Commandée par la DDA en 1970

*Récapitulatif des données récoltées lors de la réunion avec Mr TRUC*

Les informations mentionnées en I, III, IV, V et X sont prioritaires pour le projet échanges nappes-Rhône et qui pourraient être transmises pour le 15 juillet. Les autres ont été retranscrites à titre d'informations complémentaires.

Autres informations plus sommaires :

On observe une dilution des nitrates dans le Rhône,

Le champ de captage de Nîmes provient d'une alimentation en eaux souterraines au ¾ issue du Massif des Jonquères St Vincent,

Il n'y a pas de données sur Donzère,

Il existe un puit pour l'adduction en eau potable à Malataverne,

Une mission de qualité de l'eau qui a été entreprise avec des données hydrobiologiques sur un pas de temps mensuel,

Il faut faire attention les nivellements donnés par la CNR (données de 1970 environ)

Les études isotopiques fondées sur le tritium sont impossibles compte-tenu des « bouffées tritiées » observées dans le Rhône au niveau de la centrale nucléaire de Tricastin.

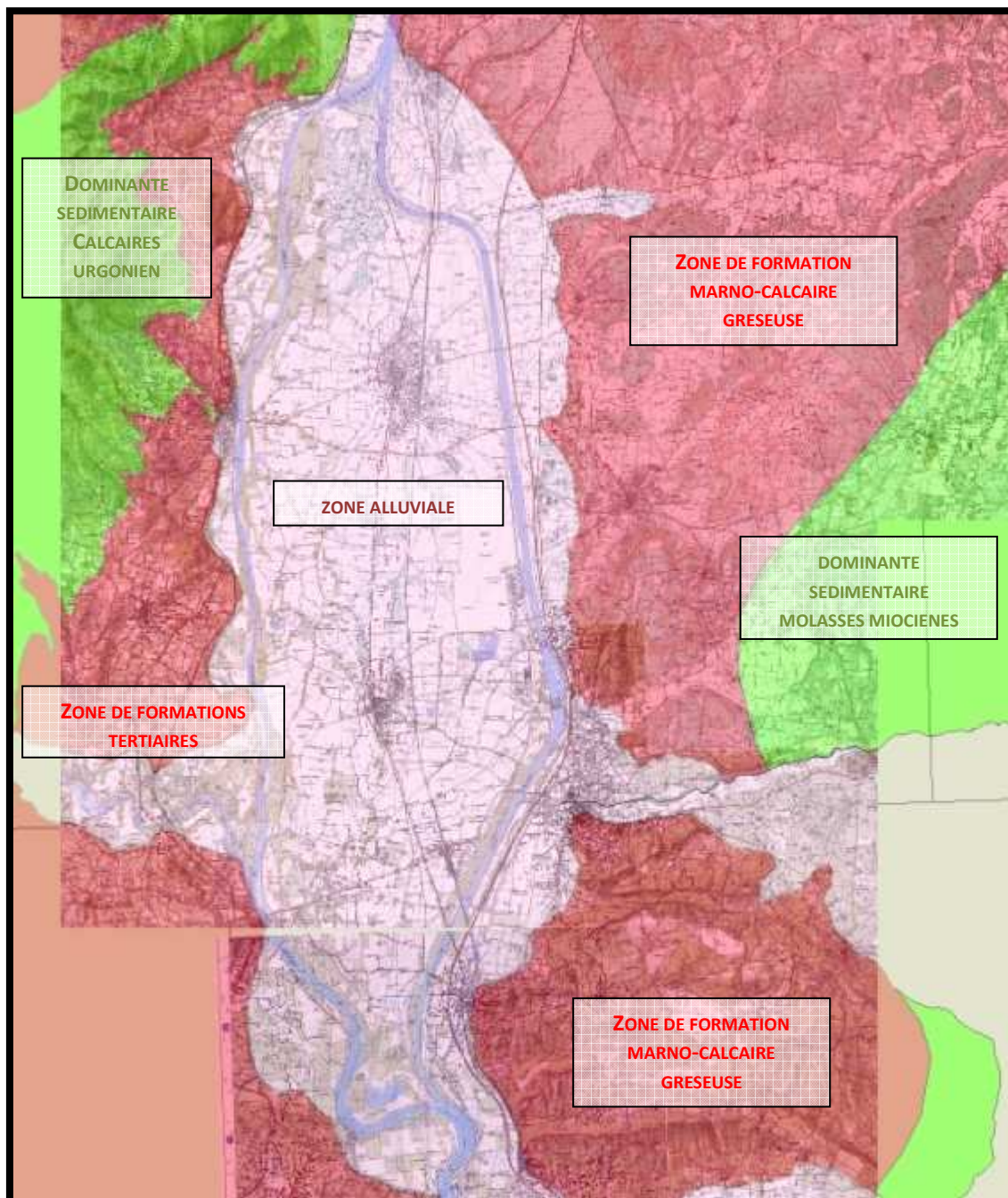
### 5.3. Compte rendu sortie Donzère Mondragon – 7 et 8 février 2008

Lors de ces deux journées de terrain, la plaine de Donzère Mondragon et ses pourtours ont été sillonnés. Tous les sites prospectés ont fait l'objet de mesure de **conductivité** et de **température**, ainsi que de **relevés de végétation** lorsqu'elle était présente. Quelques **relevés piézométriques** ont pu être effectués dans la nappe. Une carte de localisation des sites, un tableau récapitulant les résultats des mesures et une carte de la conductivité sont ajoutés à la fin de ce compte rendu.

Les sites prospectés sont numérotés de **0 à 36**.

Les observations faites sur chaque site sont regroupées par métriques : **physico-chimie**, **hydraulique**, **biologie** (végétaux aquatiques). De plus des informations sur la **géologie** et **l'hydrogéologie** sont fournies pour chaque site.

*Précision sur les grandes formations hydrogéologiques du secteur de Donzère-Mondragon*



La carte ci-dessus montre les principales formations hydrogéologiques identifiables sur le secteur de Donzère-Mondragon :

- une zone de **formations alluviales [code  $\alpha 1$ ]**, au centre, qui constitue la plaine du Tricastin, qui déborde en rive droite du Vieux-Rhône et en rive gauche du canal de dérivation et au niveau des principaux affluents (La berre, le Lez, l'Ardèche) ;

- une zone de **formations marno-calcaires gréseuses [code  $\beta 11$ ]** (imperméable localement aquifère, libre et captif associés majoritairement libre) à l'est, qui s'étend tout le long de la zone alluviale en rive gauche du canal de dérivation ;

- une zone de **formations molasses miocènes [pas de code car en troisième zone]** (dominante sédimentaire, libre et captif associés majoritairement captif), à l'est, qui coupe en deux la formation marno-calcaire gréseuse précédente ;

- une zone de **formations tertiaires [code  $\alpha 6$  ou  $\beta 6$ ]** (imperméable localement aquifère, libre et captif associés majoritairement libre) à l'ouest, en rive droite du Vieux-Rhône ;

- une petite zone de formations **calcaires à faciès Urgoniens [code  $\beta 8$ ]** (dominante sédimentaire, libre seul), au nord-ouest, en rive droite du Vieux-Rhône.

## Première journée : Jeudi 7 février 2008

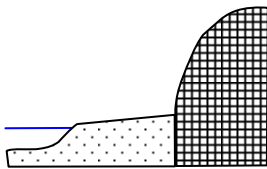
### **0. Affleurement (rive droite) aval du barrage sur le Vieux-Rhône**

*\*Intérêt du site :*

Affleurement de substratum calcaire, barrage sur le Vieux Rhône

En rive droite, il y a un affleurement calcaire (pendage sud-ouest).

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RD-2-DA-CCA- $\alpha 1b$ - $\beta 8$**

**$\alpha 1$  :** Alluvions récentes (Fz)

**$\beta 8$  :** Calcaires Urgonien (n4U)

Le point 0 est situé dans les alluvions récentes.

*\*Physico-chimie :*

Une première mesure a été réalisée dans le Vieux-Rhône, immédiatement après la séparation de l'écoulement en deux chenaux, en amont du secteur d'étude :

Conductivité (Cd) : **468  $\mu\text{S.cm}^{-1}$**

Température (T°C) : **8 °C**

*\*Hydraulique :*

On observe 2 apports latéraux en rive droite :

- 1 rejet/apport estimé à **200l/s** (origine ? trop plein du barrage ? section 2m.)

- 1 rejet/apport estimé à **20l/s** (odeur ?).

En rive gauche, une autre chute plus importante en dérivation du barrage

*\*Biologie :*

Pas de végétaux aquatiques observés



## 1. Contre-canal en rive droite

### \*Intérêt du site :

Amont du point 0

### \*Configuration hydrogéologique et géologie :

Le point 1 est situé dans le même contexte que le point 0.

### \*Physico-chimie :

**Cd : 510  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 11,2**

### \*Hydraulique :

Le contre-canal serait-il alimenté par les sous-écoulements du Rhône et par la nappe de versant ?  
Le contre-canal présente un niveau constant et un passage en siphon à l'amont.

### \*Biologie

La végétation indique la présence d'apports phréatiques et de conditions mésotrophes

*Nasturtium officinale* 1

*Callitriche platycarpa* 3

*Lemna minuscula* 2

*Elodea canadensis* 3

*Berula erecta* 1

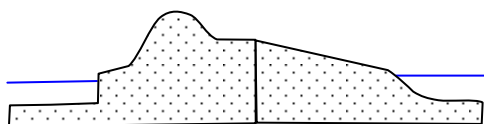
*Groenlandia densa* 1

## 2. Lône de Saint-Ferréol

### \*Intérêt du site :

Site en plaine alluviale, ancien bras du Rhône, accès à la nappe en plaine alluviale

### \*Configuration hydrogéologique et géologie :



**Code : RD-4-DP-CCA- $\alpha$ 1**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fz)

Le point 2 est situé dans les alluvions récentes.

### \*Physico-chimie :

**Cd : 510  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 12,4**

### \*Hydraulique :

Le long du canal de dérivation pas de contre canal observé, lône du Bayard

Dans ce secteur deux piézomètres estampilles CNR fermés à clé ont été repérés :

Au niveau de la lône de Saint-Ferréol, on observe un débit estimé à **400l/s** section de jaugeage trapézoïdale. Station SJ173760D et TC19. (SJ pour station de jaugeage)

### \*Biologie :

*Myriophyllum spicatum* 1

*Potamogeton coloratus* 1

La lône est alimentée par le canal de Pierrelatte qui passe en siphon sous le canal de dérivation (nappe en rive gauche et prise d'eau dans le Rhône ?) : l'eau y est potentiellement polluée (l'indice est limité car les effectifs de la végétation sont extrêmement faibles), eau phréatique de bonne qualité

### 3. Lône Pascal (Bayard)

*\*Intérêt du site :*

Site en plaine alluviale, ancien bras du Rhône, accès à la nappe en plaine alluviale

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 3 est situé dans le même contexte que le point 2.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 460  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 10**

*\*Hydraulique :*

La lône est alimentée par le canal de Pierrelatte qui passe en siphon sous le canal de dérivation (nappe en rive gauche et prise d'eau dans le Rhône ?). La lône est probablement aussi alimentée par les fuites du contre canal.

Le ruisseau de la Berre est à sec, suite à la redirection des écoulements du canal de Pierrelatte en direction de la partie nord de la plaine et de la lône de Ferréol.

Le fond de la lône est colmaté, le débit y est faible. Il n'est pas certain qu'elle est en contact avec la nappe. Un dosage isotopique permettrait de déterminer la part des apports de nappe et des apports de fuite du canal de dérivation.

*\*Biologie :*

*Berula erecta* 2

*Mentha aquatica* 2

*Ranunculus sceleratus* 2

*Callitriche platycarpa* 1

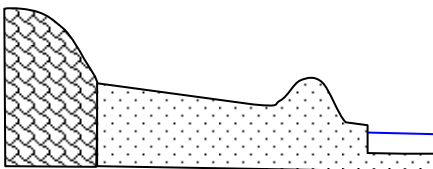
Cependant, la valeur de conductivité mesurée entre en contradiction relative avec les peuplements végétaux observés, plutôt témoins d'eau souterraine de bonne qualité.

### 4. Canal de Pierrelatte aval

*\*Intérêt du site :*

Canal de Pierrelatte (partie sud)

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RG-4-DP-CCA- $\alpha$ 1- $\beta$ 11**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fz)

**$\beta$ 11** : Formations marno-calcaires et gréseuses

La carte géologique précise que l'aquifère de première zone est divisé en 2 formations : alluvions récentes (Fz) et alluvions de basse terrasse, Würm (Fy3R). L'aquifère de deuxième zone débute par des alluvions de moyenne terrasse, Riss est codé (Fy2R).

Le point 4 est situé dans les alluvions récentes.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 610  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 14,4**

*\*Hydraulique :*

Le niveau d'eau dans le canal semble en équilibre avec la nappe (**Q=150l/s**).

*\*Biologie :*

*Callitriche platycarpa 4*

Le canal est alimenté par des eaux souterraines mésotrophes : nappe en rive gauche et prise d'eau dans le Rhône.

## 5. Canal de Pierrelatte centre

*\*Intérêt du site :*

Canal suite en remontant à l'amont

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 5 est situé dans le même contexte que le point 4, se ce n'est que la zone alluviale est de largeur plus réduite..

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 590  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 13**

*\*Hydraulique :*

RAS

*\*Biologie :*

Présence d'algues filamenteuses

## 6. Canal de Pierrelatte amont

*\*Intérêt du site :*

Canal suite en remontant à l'amont presque à la confluence avec le Rhône, à l'aval du défilé de Donzère, apports des massifs calcaires ?

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 6 est situé dans le même contexte que les points 4 et 5 ; la zone alluviale est très mince à cet endroit. Etant en zone limite, ici l'aquifère de seconde zone peut aussi être du calcaire Urgonien (n4U) ou marneux (g2)..

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 450  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 12**

*\*Hydraulique :*

Présence d'un ancien système de connexion avec le Rhône (vanne à guillotine – prise d'eau ? siphon ?).

*\*Biologie :*

*Callitriche platycarpa 1*

Le canal est alimenté par des eaux mésotrophes, mais la végétation est en très mauvais état : le Rhône est-il dominant dans l'alimentation ? Une campagne de relevé de végétation en période estivale permettra de lever les ambiguïtés.

La conductivité augmente au fur et à mesure que l'on va vers l'aval dans le canal de Pierrelatte (points 4, 5 et 6) : cela sous-tendrait une augmentation de l'influence des apports phréatiques dans le cours d'eau ?

## 7. Plan d'eau et exutoire en rive gauche le long de l'autoroute

*\*Intérêt du site :*

Apports potentiels des versants, massifs calcaires par forçément karstifiés

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 7 est situé dans une formation de troisième zone codée Fy2R (Alluvions de moyenne terrasse, Riss). La configuration hydrogéologique de première et seconde zone est identique aux points 4, 5 et 6.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 730  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 9,4**

*\*Hydraulique :*

Présence d'un caniveau drainant de l'eau du massif calcaire, drainage des eaux de pluie de l'autoroute.

*\*Biologie :*

*Typha sp. 3*

*Phragmites australis 4*

Pas de diagnostic possible avec la végétation

## 8. Ruisseau au pied de la garde d'Adhémar

*\*Intérêt du site :*

Apports souterrains des versants ? point de vue d'ensemble

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 8 est situé dans un aquifère de seconde zone de type  $\beta 11$  et plus précisément dans une formation pliocène codée P (marne). L'aquifère de première zone est de type  $\alpha 1$  (alluvions de basse terrasse, Würm, Fy3R).

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 685  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  T°C : 9,9**

*\*Hydraulique :*

Ruisseau observé, débit estimé à **150l/s**.

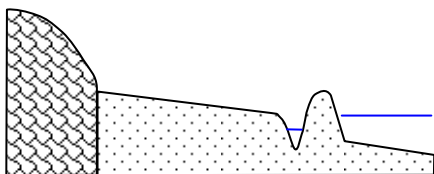
*\*Biologie :*

*Berula erecta 4*

## 9. Contre canal du Rhône en rive gauche du canal d'aménée

*\*Intérêt du site :*

Repérage siphon, contre canaux

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :***Code : RG-4-DP-CCP- $\alpha$ 1- $\beta$ 11** **$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fz) **$\beta$ 11** : Formations marno-calcaires et gréseuses

Le point 9 est situé dans les alluvions de basse terrasse (Fy3R). L'aquifère de seconde zone débute par des alluvions de moyenne terrasse, Riss (Fy2R) et des formations pliocènes (P).

*\*Physico-chimie :***Cd : 550  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup> T°C : 13,2***\*Hydraulique :*

Au niveau du pont entre Pierrelatte et la Garde d'Adhémar, on observe au PK178,5 (PK178605) un piézomètre de digue (1785CG). De part et d'autre d'un seuil, l'échelle limnimétrique E178500G donne un niveau de 5,5m sur le contre-canal, l'échelle E178490 un niveau de 6m. Attention au niveau de référence des échelles les échelles semblent décalées.

*\*Biologie :*

Pas de végétation, mesure en aval d'une petite retenue.

## 10. Contre canal du Rhône en rive gauche du canal d'amenée, 100 m en amont de la petite retenue :

*\*Intérêt du site :**\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 10 se trouve dans la même situation que le point 9.

*\*Physico-chimie :***Cd : 505  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup> T°C : 9,9***\*Hydraulique :**\*Biologie :*

En moins de 200 m, la conductivité augmente de 50  $\mu$ S/cm<sup>-1</sup> et la température augmente de 3 °C sur le même contre canal. Le seuil séparant les deux points de mesure jouerait-il un rôle, en accentuant le drainage de la nappe en aval ?

## 11. Contre canal du Rhône en rive droite

*\*Intérêt du site :**\*Configuration hydrogéologique et géologie :***Code : RD-4-DP-CCP- $\alpha$ 1** **$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fz)

Le point 11 est situé dans les alluvions récentes.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 440  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 12,4**

*\*Hydraulique :*

*\*Biologie :*

*Sparganium ?*

*Berula erecta*

## **12. Prise d'eau dans le canal**

*\*Intérêt du site :*

Alimentation du contre-canal à partir du canal de dérivation PK 178500 en face du point 10

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 12 est dans la même situation que le point 11.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 454  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 8,2**

*\*Hydraulique :*

Débit estimé à **100l/s** sur un déversoir rectangulaire (h= 0,2, L= 1,5m)

*\*Biologie :*

## **13. Ruisseau Les Echaravelles, en rive gauche du canal**

*\*Intérêt du site :*

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 13 est dans la même situation que les points 9 et 10, à la différence qu'il se situe très proche de l'interface entre l'aquifère de première et de seconde zone. On observe des alluvions récentes (Fz) dans cette dernière zone (ruisseau des Echaravelles).

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 867  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 8,3**

*\*Hydraulique :*

*\*Biologie :*

*Berula erecta 5*

La très forte valeur de conductivité mesurée serait-elle influencée par des cultures agricoles environnantes ?

## **14. Contre canal en rive gauche, en amont d'un seuil**

*\*Intérêt du site :*

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 14 se situe dans la même configuration que les points 9 et 10, avec le même arrière plan que le point 13.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 588  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 11,2**

*\*Hydraulique*

*\*Biologie :*

*Potamogeton pectinatus 5*

Eaux eutrophes

## 15. Contre canal en rive gauche, en aval d'un seuil

*\*Intérêt du site :*

Siphon

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 15 est dans la même situation que le point 14.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 680  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 11,5**

*\*Hydraulique :*

Zone complexe avec siphon, une partie du débit du contre-canal part en siphon sous le canal de dérivation, l'autre continue dans un contre-canal en rive gauche. Station de jaugeage SJ181470G.

*\*Biologie :*

*Berula erecta 1*

*Nasturtium officinale 1*

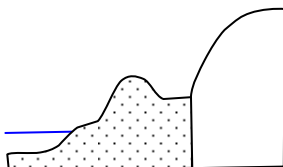
La conductivité se met également à augmenter de manière conséquente sur une petite distance (points 14 et 15), avec une modification de la végétation, plutôt indicatrice d'apports phréatiques en aval. La température reste stable.

## 16. Gravière en rive droite du vieux Rhône

*\*Intérêt du site :*

Aval du barrage sur la Vieux Rhône en rive droite

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RD-3-DP-CCA- $\alpha$ 1- $\beta$ 6**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fza)

**$\beta$ 6** : Formations tertiaires.

Le point 16 est situé dans les alluvions fluviales de très basses terrasses. L'aquifère de première zone comprend aussi des alluvions des basses terrasses

(Fy). L'aquifère de seconde zone est diversifié : Albien (n7a), Gargasien (n6), Barrémo-Bédoulien (n6), colluvions à matrice fine (CA)...

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 567  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 7,3**

*\*Hydraulique :*

*\*Biologie :*

## **17. Puits dans une ferme, Chasserates/Montmal**

*\*Intérêt du site :*

Niveau de nappe, puits avec pompage par éolienne

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 17 est dans la même situation que le point 16.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 680  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 13,3**

La nappe située en rive droite à cet endroit présente des températures aux alentours de 14°C.

*\*Hydraulique :*

Mesure du niveau de la nappe : 3,85m NGF.

*\*Biologie :*

Sans objet

## **18. La Conche**

*\*Intérêt du site :*

Affluent du Rhône en RD

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 18 est dans la même situation que les points 16 et 17.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 490  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 9,8**

*\*Hydraulique :*

Cours d'eau probablement temporaire. Présence d'algues filamenteuses

Contribution sans doute négligeable à la nappe ou au Rhône en période de basses eaux

*\*Biologie :*

Pas d'espèces observées



## 19. Lône de la Conche (en aval du cours d'eau)

*\*Intérêt du site :*

Suite Conche

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 19 est dans la même situation que les points 16,17, 18.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 490  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 9,8**

*\*Hydraulique :*

La lône se situe sur des dalles calcaires. Méandrage de la Conche : débit faible estimé à **30l/s**, symptomatique d'une faible épaisseur de nappe et d'apports faibles. Les écoulements peuvent s'effectuer dans l'aquifère de seconde zone en profondeur car relié à la nappe de surface.

*\*Biologie :*

*Berula erecta*

*Mentha aquatica*

*Nasturtium officinale*

## 20. Amont de la lône de la Conche : à sec (non noté sur la carte)

*\*Intérêt du site :*

Suite Conche

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Albien gréseux.

*\*Physico-chimie :*

*\*Hydraulique :*

*\*Biologie :*

## 21. L'Ellieux à Saint-Montant

*\*Intérêt du site :*

Point situé à l'aval de la source de la conche

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 21 est situé dans un secteur de troisième zone de calcaire à faciès Urgoniens (n5b : Bédoulien supérieur).

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 494  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 13,4**

*\*Hydraulique :*

Débit > à 5l/s

*\*Biologie :*

*Berula erecta 1*

## **22. Source amont de l'Ellieux (grotte, Saint Montant)**

*\*Intérêt du site :*

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 22 est dans la même situation que le point 21. Le pendage du calcaire Urgonien est orienté ouest (35°).

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 484  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 13,7**

*\*Hydraulique :*

Petite résurgence karstique dont le débit est estimé à **5l/s**, sortie de grotte qui au bout d'une dizaine de mètres se termine par un siphon. Le cours d'eau n'est pratiquement jamais en crue. L'exutoire du karst à cet endroit se situe donc sous le niveau du cours d'eau. A l'amont de ce point le cours d'eau est à sec

*Biologie :*

Pas de végétaux aquatiques observés

## **23. Lône de la Grange écrasée centre**

*\*Intérêt du site :*

Grande lône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie*

Le point 23 est dans la même situation que les points 16, 17, 18, 19.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 580  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 8,5**

*\*Hydraulique :*

Pas d'écoulement. Apports plutôt superficiels avec petits apports de nappe

*\*Biologie :*

*Milieu méso-eutrophe*

*Berula erecta*

*Veronica beccabunga*

*Myriophyllum sp.*

## **24. Lône de la Grange écrasée amont**

*\*Intérêt du site :*

Suite lône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 24 est dans la même situation que les points 16, 17, 18, 19, 23.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 330  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 6,2**

*\*Hydraulique :*

Lône assez profonde, apports phréatiques, la baisse de conductivité pouvant correspondre à un mélange possible avec des eaux de surface

*\*Biologie :*

Aucune végétation

## **25. Lône de la Grange écrasée aval**

*\*Intérêt du site :*

Suite lône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 25 est dans la même situation que les points 16, 17, 18, 19, 23, 24.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 448  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 8**

*\*Hydraulique :*

On observe une variation des valeurs de conductivité, faible à l'amont, forte au niveau intermédiaire et moyenne à l'aval. Cette lône serait-elle alimentée par la nappe au niveau intermédiaire, et influencée par le Rhône à l'amont et à l'aval ?

*\*Biologie :*

Pas d'observation

## **26. Rhône à l'embouchure avec la lône de la Grange écrasée**

*\*Intérêt du site :*

Confluence lône Rhône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 26 est dans la même situation que les points 16, 17, 18, 19, 23, 24, 25.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 445  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 8,8**

*\*Hydraulique :*

Débit à l'exutoire de la lône estimé à 10l/s. présence d'un seuil. Cette lône qui semble déconnectée du Rhône sur la carte communique quand même avec le Rhône en s'infiltrant à travers le seuil.

*\*Biologie :*

Pas d'observation

## 27. Bras est de la lône de la Grange écrasée

*\*Intérêt du site :*

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 27 est dans la même situation que les points 16, 17, 18, 19, 23, 24, 25, 26.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 402  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 9,3**

*\*Hydraulique :*

Il y a une légère dilution de l'eau de la lône.

Le niveau du Rhône est environ 2,5m plus bas que le niveau de la lône.

*\*Biologie :*

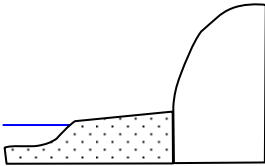
Pas d'observation non plus

## 28. Source de Tournes (Bourg Saint Andéol)

*\*Intérêt du site :*

Résurgence karstique bien connue avec sa vasque

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RD-3-DA-CCA- $\alpha$ 1- $\beta$ 6**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fza)

**$\beta$ 6** : Formations tertiaires.

Le point 26 est situé à la limite entre les formations tertiaires de seconde zone, des alluvions et les calcaires Urgoniens de troisième zone.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 568  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 13,4**

*\*Hydraulique :*

Débit de la résurgence estimé à **400l/s** drainant un impluvium d'environ 40 km<sup>2</sup>

Se reporter aux travaux de L. Belleville 86. Thèse de Ludovic Mocochoin (géographie) en relation avec le remblaiement pliocène marin sous les alluvions.

Cette zone serait à prospecter par géophysique pour mieux identifier les structures géologiques car la Tourne devient à sec à l'aval (pont des amoureux ?) avant sa confluence avec le Rhône.

*\*Biologie :*

Toujours pas d'observation

## 29. Source Nord de Tournes

*\*Intérêt du site :*

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 29 est dans la même situation que le point 28.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 568  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 13,4**

*\*Hydraulique :*

*\*Biologie :*

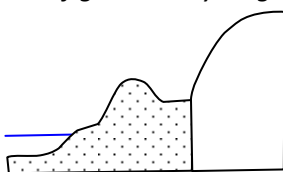
*Samolus valerandi 1*

### 30. Lône de la Tuilerie

*\*Intérêt du site :*

Accès au Rhône, 3 puits repérés dans la plaine

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RD-3-DP-CCA- $\alpha$ 1- $\beta$ 6**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fza)

**$\beta$ 6** : Formations tertiaires.

Le point 30 est situé dans les alluvions fluviales des très basses terrasses. L'aquifère de seconde zone est codé Fy (Alluvions des basses terrasses).

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 746  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 9,7**

Conductivité élevée, la plus forte enregistrée sur le site

*\*Hydraulique :*

Mesure piézométrique en Puits (N4418.024 ; E00438.602) se situant dans le Pliocène marin-lacustre, argiles sableuses.

Niveau de la nappe : 5,68-0,40 de margelle = 5,28m sous le niveau du sol

1,7m de hauteur d'eau, 1,5m de diamètre, capacité 3m<sup>3</sup> avec temps de remontée au niveau initial de 45 minutes, maintien du niveau d'eau à l'étiage

Un autre puits identique se trouve à 10 m environ mais sec

Zone d'hétérogénéités argileuses (tuileries)

Présence d'anciennes mines de lignite dans le cénomanien: galerie à 50m de profondeur. La lignite pourrait correspondre à des apports quaternaires

Présence d'une nappe captive (forage à 45m, remontée à 6m au dessus du niveau du sol)

Boutasses observées en surface dans la plaine (pluie 3 jours avant)

Cette zone serait à prospecter par géophysique pour mieux identifier les structures hydrogéologiques qui semblent assez complexes à cet endroit. Mesures physico-chimiques complémentaires dans les puits observés et mesures isotopiques dans les puits et dans la lône pour identifier la provenance des écoulements.

*\*Biologie :*

*Phragmite australis 3*

*Typha latifolia 3*

### 31. Bord du Rhône, en rive droite

*\*Intérêt du site :*

Casiers Girardon

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 31 est dans la même situation que le point 30, mais en bord de Rhône.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 560  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 12,4**

*\*Hydraulique :*

*\*Biologie :*

### 32. Lit du Rhône en rive droite

*\*Intérêt du site :*

Plaine alluviale le long du Rhône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 32 est dans la même situation que le point 31.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 459  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 8,8**

*\*Hydraulique :*

*\*Biologie :*

*Ranunculus fluitans 3*

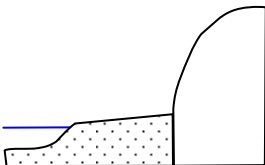
Eaux eutrophes à hyper eutrophes

### 33. Casiers Girardon, en aval de la lône de la République

*\*Intérêt du site :*

Plaine alluviale le long du Rhône, lône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RD-3-DA-CCA- $\alpha$ 1- $\beta$ 6**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fz)

**$\beta$ 6** : Formations tertiaires.

Le point 33 est dans le lit du Rhône.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 492  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 9,5**

*\*Hydraulique :*

Niveau d'eau dans le Rhône environ 4 m sous la côte du sol

*\*Biologie :*

### 34. Rhône, en face de la lône de la République

*\*Intérêt du site :*

Plaine alluviale le long du Rhône, PK 196, Rhône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

Le point 34 est situé comme le point 33.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 190  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 7,4**

*\*Hydraulique :*

Forte diminution de la conductivité liée à l'influence probable de l'Ardèche qui se jette à l'amont. Influence du barrage de la chute suivante, aucun courant, zone d'expansion des crues, incision du lit.

*\*Biologie :*

*Elodea canadensis* 3

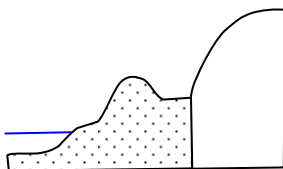
Eaux mésotrophes

### 35. Lône du carré, confluence avec l'Ardèche

*\*Intérêt du site :*

Lône

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RD-3-DP-CCA- $\alpha$ 1- $\beta$ 6**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fz)

**$\beta$ 6** : Formations tertiaires.

Le point 30 est situé dans les alluvions récentes.

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 132  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  T°C : 7,2**

*\*Hydraulique :*

Observations de 2 vasques circulaires en continuité avec la lône probablement formées au cours du comblement de la lône par apport de sédiments.

Très faible valeur de conductivité, influence des eaux de surface (Ardèche). Comme la lône ne semble pas connectée à l'Ardèche, il peut s'agir de sous-écoulements de l'Ardèche dans la nappe.

*\*Biologie :*

Pas d'observation

A l'aval de la confluence avec l'Ardèche, il n'y a pas d'espèce typique des eaux souterraines dans le chenal.

### **35bis. Plaine entre l’Ardèche et le Rhône au niveau de la confluence (non noté sur la carte)**

*\*Intérêt du site :*

Puits dans la nappe (N4417179 ; E00438486)

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*

*\*Physico-chimie :*

*\*Hydraulique :*

Niveau d’eau dans la nappe mesuré à **4,33 m** de profondeur

*\*Biologie :*

Pas d’observation

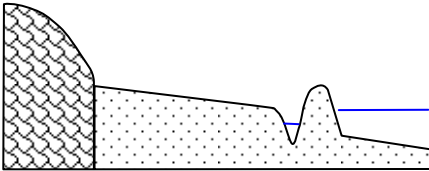
Cette zone serait à revisiter (influence du seuil de l’Ardèche sur l’alimentation de la nappe) et à éventuellement à prospecter par géophysique pour mieux identifier les structures hydrogéologiques repérées sur la carte à cet endroit (cônes de déjection)

### **36. Contre canal en rive gauche, qui récupère le Lèze à l’aval de l’usine Blondel**

*\*Intérêt du site :*

Bassins de réinfiltration des eaux de contre canal ou du Lez en nappe

*\*Configuration hydrogéologique et géologie :*



**Code : RG-4-DP-CCP- $\alpha$ 1- $\beta$ 11**

**$\alpha$ 1** : Alluvions récentes (Fz)

**$\beta$ 11** : Formations marno-calcaires et gréseuses

Le point 36 est situé dans les alluvions de basse terrasse (Fy3R).

*\*Physico-chimie :*

**Cd : 460  $\mu$ S/cm<sup>-1</sup> T°C : 8,7**

*\*Hydraulique :*

Bassins d’infiltration dans la nappe circulaires anciens et nouveaux,

Une visite complémentaire est nécessaire avec prospection géophysique pour mieux identifier les zones de réinfiltration

*\*Biologie :*

Pas de végétation observée



## **Remarques complémentaires :**

### ***\*Etudes identifiées concernant le site de Donzère Mondragon***

A récupérer :

- Un suivi isotopique et piézométrique est effectué depuis plusieurs années sur la plaine de Mornas.
- Thèse de Ludovic Mocochoin (géographie) en relation avec le remblaiement pliocène marin sous les alluvions sur le site de la résurgence de Tourne en RD du Rhône.

Déjà acquises :

- Une étude GEOPLUS nitrates a été réalisée dans le secteur de Donzère dans la plaine du Tricastin. L'analyse physico-chimique des nappes montre qu'elles sont très chargées en nitrates en rive gauche.
- Thèse de Bernard Guégan : Tritium et bilan hydrogéologique en cas de pollution de nappe alluviale du Rhône entre Donzère (Drôme) et Mondragon (Vaucluse) - 1972

## **Propositions pour des visites et mesures complémentaires :**

### ***\*Dans le domaine de l'hydrogéologie/ Géophysique :***

- Au niveau du canal de dérivation :

Au sud du point 36 Usine Blondel, zones de réinfiltration d'eaux superficielles (contre-canal) dans la nappe.

- En rive droite du Rhône

Au point 28 prospection par radar géophysique pour mieux identifier les structures géologiques perte de la Tourne avant sa confluence avec le Rhône

Au point 30 prospection par radar des structures hydrogéologiques (nappe perchée, captives, rôle des cavités de lignite,

Au point 35, confluence Rhône-Ardèche à prospecter par géophysique pour mieux identifier les structures hydrogéologiques repérées sur la carte à cet endroit (cônes de déjection)

- Entre le canal et le Vieux-Rhône

Au niveau du point 3 lône Pascal ou Bayard, un dosage isotopique permettrait de déterminer la part des apports de nappe et des apports de fuite du canal de dérivation.

### ***\*Campagne de prélèvements pour analyse isotopique***

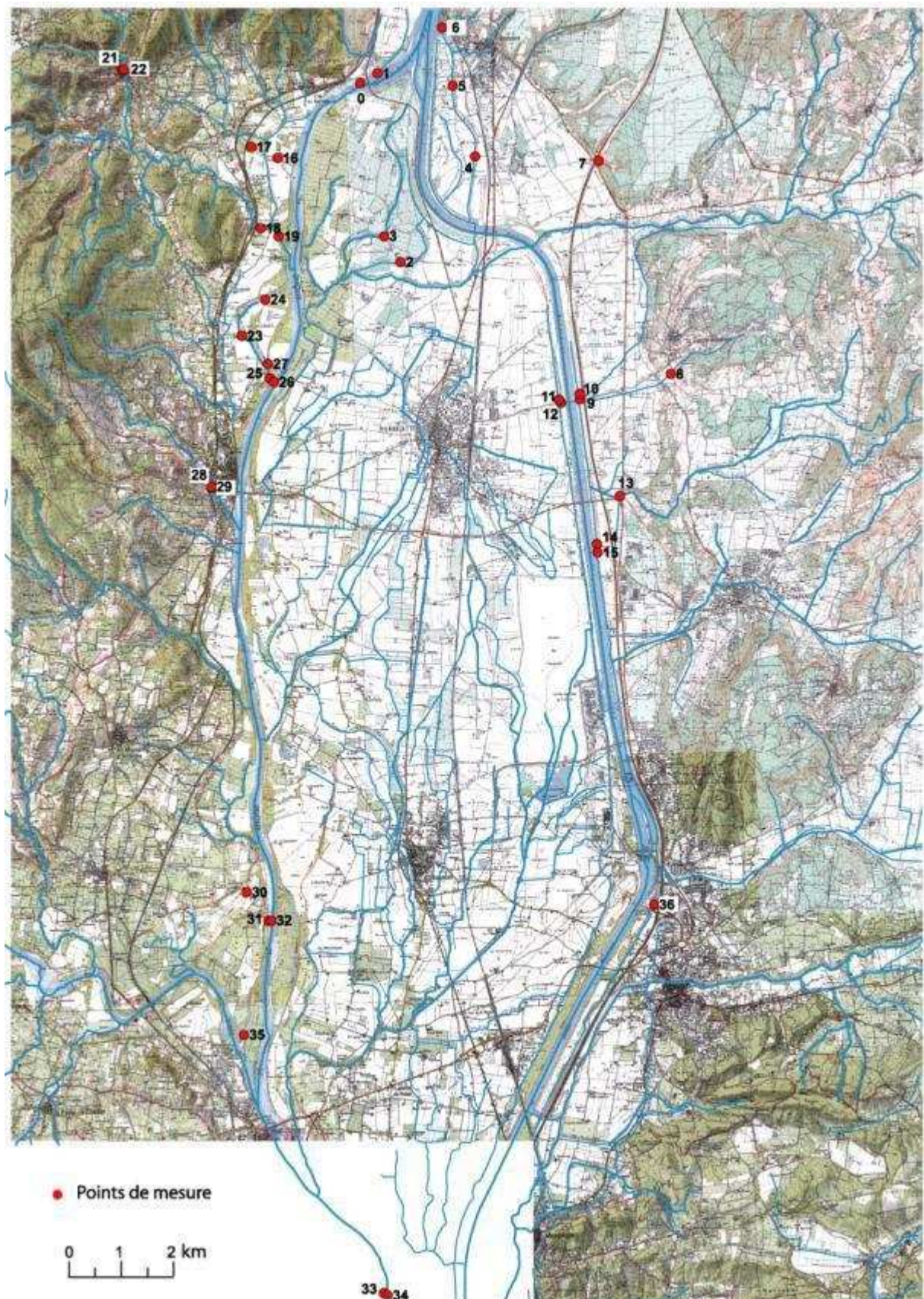
De façon plus générale et systématique une campagne de prélèvement pour analyse isotopique serait à effectuer d'une part en rive droite du Rhône et dans les puits repérés pour mieux identifier l'origine des apports éventuels de versants et d'autre part en rive gauche du canal de dérivation.

*A compléter par Y. Travi et O. Banton dans le cadre de la contribution d'Avignon au projet (Plan Rhône PACA)*

### ***\*Campagne de prélèvements biologiques***

A compléter par LEHF

### ***\*Visite complémentaire prévue avec Y. Taravel de la CNR selon disponibilités***



Localisation et numérotation des points de mesure de la conductivité et de la température lors de la campagne de terrain des 7 et 8 février 2008 dans le secteur de Donzère Mondragon

Site	Nom du Site	Conductivité	Température
7 février 2008		(en $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ )	(en $^{\circ}\text{C}$ )
0	Rhône	468	8,00
1	Contre canal rive droite	510	11,20
2	Lône de Saint Ferreol	510	12,40
3	Lône de Pascal	460	10,00
4	Canal de Pierrelate aval	610	14,40
5	Canal de Pierrelate centre	590	13,00
6	Canal de Pierrelate amont	450	12,00
7	Plan eau et exutoire RG Autoroute	730	8,70
8	Ruisseau au pied de la Garde d'Adhémar	685	9,90
9	Contre canal RG	550	13,20
10	Contre canal RG aval retenue	505	9,50
11	Contre canal RD	440	12,40
12	Prise d'eau du canal	454	8,20
13	Ruisseau Echaravelles	867	8,30
14	Contre canal RG Fenouillet	588	11,20
15	Contre canal RG aval seuil Fenouillet	680	11,50
8 février 2008			
16	Gravière RD Vieux Rhône	567	7,30
17	Puits Ferme Chasserates	680	13,30
18	La Conche	490	9,80
19	Lône de la conche	490	9,80
21	Ellieux Saint Montant	494	13,40
22	Source amont Ellieux Saint Montant	484	13,70
23	Lône de la Grange écrasée centre	587	9,00
24	Lône Grange écrasée amont	330	6,20
25	Lône Grange écrasée aval	448	8,00
26	Rhône embouchure lône Grange écrasée	445	8,80
27	Bras est Grange écrasée	402	9,30
28	Source de Tournes (Bourg Saint Andéol)	568	13,40
29	Source nord de Tournes	568	13,40
30	Lône de la tuilerie	746	9,70
31	Bord du Rhône RD	560	12,40
32	Lit du Rhône RD	452	8,80
33	Casiers girardon aval lône République	492	9,50
34	Rhône au niveau lône République	190	7,40
35	Lône du Carré	132	7,20
36	Contre canal RG Lèze	460	8,70

Mesures de conductivité (en  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ ) et de températures réalisées lors de la campagne de terrain des 7 et 8 février 2008 dans le secteur de Donzère Mondragon

