

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

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

Rapport final Phase 4 (2010-2012) - ANNEXES

Action n° 9 du Programme 2008 au titre de l'accord
cadre Agence de l'Eau ZABR

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

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

Décembre 2012

Table des matières

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

3.	Chapitre 3 – Avancer dans l'évaluation des échanges nappes/rivière.....	147
3.1.	<i>Définition de la zone de travail.....</i>	<i>147</i>
3.2.	<i>Définir les objectifs.....</i>	<i>148</i>
3.3.	<i>Sélection au préalable.....</i>	<i>148</i>
3.4.	<i>Données.....</i>	<i>152</i>
4.	Chapitre 4 – Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière	155
4.1.	<i>Protocole</i>	<i>155</i>
4.2.	<i>Calcul et interprétation</i>	<i>155</i>
5.	Chapitre 5 – Conclure sur les échanges nappes/rivière.....	157
5.1.	<i>Tableau des résultats par métrique</i>	<i>157</i>
5.2.	<i>Tableau de synthèse comparatif.....</i>	<i>160</i>
5.3.	<i>Cartographie des résultats synthétiques.....</i>	<i>161</i>
5.4.	<i>Métriques complémentaires.....</i>	<i>163</i>
6.	Annexes du guide méthodologique.....	165
6.1.	<i>Sommaire des annexes</i>	<i>165</i>
6.2.	<i>A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN.....</i>	<i>167</i>
6.3.	<i>A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation</i>	<i>175</i>
6.4.	<i>A3. BIO A : Invertébrés souterrains</i>	<i>181</i>
6.5.	<i>A4. BIO V : macrophytes.....</i>	<i>185</i>
6.6.	<i>A5. Bases de données utiles et consultables</i>	<i>191</i>
6.7.	<i>A6. Estimation des coûts et des difficultés (homme/jour), des difficultés et limites d'utilisation du guide</i>	<i>193</i>
6.8.	<i>A7. Personnes ressources et compétences</i>	<i>195</i>

1. Annexes 1 : Fiches projets

1.1. Fiche action recherche valorisation n°A11 – 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 ; 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.

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

ZABR

ZONE ATELIER BASSIN DU RHONE
RHONE BASIN LONG TERM ENVIRONMENTAL RESEARCH

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 n°A11 – 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 ; 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 du tableau des métriques par site ;
- collecte de données complémentaires ;
- codage des métriques par site ;
- analyse des résultats inter-sites ;

ZABR

ZONE ATELIER BASSIN DU RHONE
RHONE BASIN LONG TERM ENVIRONMENTAL RESEARCH

- 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

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 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.

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 n°A1 – Phase 3 (2008-2010)

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 ; 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^e 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.

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. Droque 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 ;
- . 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 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.

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^e PCRD (2007-2013) FP7 environnement sur le monitoring des eaux

ZABR

ZONE ATELIER BASSIN DU RHONE
RHONE BASIN LONG TERM ENVIRONMENTAL RESEARCH

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 : lînes 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 action recherche valorisation n°A9 – Phase 4 (2010-2012)

Titre du projet : ACTION 9

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 contacts entre masses d'eau d'origines différentes et des régimes transitoires. **Phase 4 (2010-2011).**

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 ; Téléphone : 04-77-42-01-30 ; Fax : 04-77-42-66-33

Equipes de recherche « ZABR » concernées :

(Préciser le domaine et le pourcentage respectif de leur contribution)

- Centre SITE (Sciences, Informations et Technologies pour l'Environnement) de l'ENSM-SE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne)

Domaine : Hydrogéologie et hydraulique – Pourcentage de contribution : 40%

- UMR 5023 EHF (Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux) de l'Université Lyon I :

* Equipe Hydrobiologie et Ecologie Souterraines

Domaine : Ecologie et Hydrobiologie – Pourcentage de contribution : 30%

* Equipe Ecologie des Communautés Végétales

Domaine : Ecologie et Hydrobiologie – Pourcentage de contribution : 30%

Autres partenaires :

(Préciser leur degré d'implication et leur accord)

- Recherche :

* Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon (UAPV) : chimie isotopique, convention PACA pour le secteur de Donzère-Mondragon (à renouveler pour le secteur d'Orange/Avignon)

* ENTPE Lyon : méthodes géophysiques (radar), pas d'accord écrit, participation ponctuelle

* UMR CNRS Paléoenvironnement et paléosciences : analyses isotopiques

- Institutionnel :

* CNR : convention pour la mise à disposition de données

Thème de rattachement ZABR :

(Un échange ou une information du responsable du thème est souhaité)

Changements climatiques et ressource (D. Graillot, impliqué dans l'action 1, et E. Leblois)

Des liens secondaires pourraient être envisagés avec les thèmes :

- Flux polluants, écotoxicologie, écosystèmes (Y. Perrodin) / influence des échanges nappes/Rhône sur les pollutions
- Observation sociale du fleuve et gouvernance (A. Vincent) / perception des pollutions

Thème de rattachement Agence de l'Eau :

Ce projet de recherche est en lien avec l'axe thématique 1 « risques environnementaux et vulnérabilité des milieux » du nouvel accord cadre. Ce thème souligne notamment les besoins en connaissance au niveau des zones d'interface (échanges eaux souterraines/eaux superficielles) en résonnance avec l'orientation fondamentale du SDAGE OF 7 « équilibre quantitatif : évolution quantitative des ressources superficielles et souterraines ». Une telle problématique est aussi formulée en termes des besoins et attentes du Plan Rhône volet 3 « qualité des eaux, ressources et biodiversité : compréhension des échanges entre fleuve et aquifères ». La compréhension des échanges nappes/Rhône répond bien à ce besoin de connaissance des interfaces qui a été souligné au cours de la réunion Agence de l'Eau/ZABR dédiée au développement du Plan Rhône le 19 Mai 2009. De plus, ce projet de recherche aborde les questions concernant « les changements globaux » et « la prospective changement climatique » en s'intéressant surtout à l'influence des régimes transitoires au pas de temps saisonniers sur les échanges nappes/fleuve.

Site de rattachement ZABR :

(Un échange ou une information du responsable de site est souhaité)

- Axe « Corridor » Rhône Saône (J.M. Olivier et J.P. Bravard)
- Zones humides du Rhône (G. Bornette, impliquée dans l'action 1)

Finalités et attendus opérationnels (1/2p) :

(Ceux ci seront de deux ordres, scientifiques et opérationnels)

Indiquer quelle partie de programme pourrait faire l'objet de publications scientifiques

Il s'agit de développer 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.

- Finalités scientifiques :

Il s'agit de proposer un outil interdisciplinaire pour l'identification et l'évaluation, tant qualitative que quantitative (caractérisation), 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.

- Finalités opérationnelles :

Les résultats obtenus fourniront des éléments d'informations appréciables pour la préservation des enjeux alimentation en eau pour usages anthropiques (ex : AEP, dimensionnement des captages, réalimentation de nappe...) et alimentation des milieux aquatiques superficiels par les eaux souterraines (ex : maintien de débit et tamponnage thermique des eaux de surface, limitation de l'assèchement estival, maintien de milieux oligotrophes...) 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.

Une publication portant sur les aspects méthodologiques et les premiers résultats sur Brégnier-Cordon est en cours de rédaction (Revue visée : Water research).

Objectifs et méthodologie (1p) :

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

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

L'outil, élaboré lors des phases 1, 2 et 3, sera testé et ajusté, lors de cette phase 4, sur de nouveaux secteurs tests, pour au final être généralisé avant d'étudier les modalités de transfert de la méthodologie dans une phase ultérieure. L'intégration des informations identifiées au géorépertoire ZABR indiquera les zones à fortes relations et à forts enjeux pour mieux cerner les ressources stratégiques et vulnérables le long du Rhône.

Le programme a originellement été planifié sur plusieurs années et découpé en 5 phases. La phase 1 et la phase 2 ont déjà fait l'objet d'un précédent rapport et d'une fiche de restitution. La phase 3 est en cours.

A. Rappel des tâches effectuées lors des phases (1, 2 et 3) précédentes :

Phase 1 (mars 2006 – mars 2007) : une synthèse bibliographique interdisciplinaire en matière d'échanges nappes/rivière et un recensement des données existantes ont abouti :

- à plusieurs sectorisations du fleuve Rhône en fonction des données existantes et à des hypothèses concernant l'identification des échanges nappes/Rhône;
- à la schématisation des configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent ces échanges sur le Haut-Rhône ;
- à une visualisation des informations obtenues avec un SIG et à la construction de la base de données SIG ;
- au choix d'un secteur test, **la chute de Brégnier-Cordon.**

Phase 2 (mars 2007 – mars 2008) : le choix du secteur témoin présélectionné (Brégnier-Cordon) dans la phase 1 a été validé. Ce secteur, qui avait été proposé du fait de son caractère relativement

peu anthropisé pour l'étude des mécanismes d'échange sur le Rhône-Amont, s'est avéré en réalité plus complexe. Cette phase 2 a conduit :

- à la schématisation des configurations hydrogéologique sur le Rhône-Moyen et le Bas-Rhône et à la collecte de données complémentaires ;
- au développement d'une méthode d'analyse spatiale sous SIG de caractérisation des échanges ;
- à l'initiation du tableau d'interprétation des résultats par métriques et de la codification des métriques ;
- à l'analyse des résultats inter-sites et à une sectorisation fonctionnelle quantifiée sur Brégnier-Cordon.

La phase 2 comprend également :

- l'estimation des débits de nappe sur le secteur de Péage-de-Roussillon ;
- 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 (**Donzère-Mondragon**) en fonction des données disponibles (hydraulique, biologique, isotopique)

La phase 2 comporte aussi une réflexion sur l'analyse des échanges en régime transitoire dans un contexte de changement climatique et une analyse bibliographique internationale sur la modélisation des échanges nappes/rivière.

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

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

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

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

Pour ces deux premières phases, les rapports et les fiches de restitution ont été finalisés. De plus, deux comités pléniers de restitution ont été organisés.

Phase 3 en cours (mars 2008 – décembre 2009) : le choix du secteur témoin aval a été validé (Donzère-Mondragon). De plus des études complémentaires sont engagées sur le secteur de Brégnier-Cordon, notamment avec la métrique isotopique. Sur Donzère-Mondragon, l'étude des échanges est effectuée selon 2 niveaux à partir des méthodes mises au point lors des phases précédentes: 1) une analyse corrélative inter-sites d'échantillonnage qui cherchera le lien statistique entre les différentes métriques (hydraulique, biologique, géochimique) ; 2) une recherche de la

cohérence entre les typologies de secteurs fonctionnels mises en place dans les différentes métriques.

Cette étude a conduit à acquérir de nouvelles données :

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

Comme dans la phase 2, le tableau des métriques sera renseigné, les résultats issus des différentes métriques analysés et couplés pour aboutir à une sectorisation fonctionnelle quantifiée. De plus, l'analyse intégrera de manière globale les résultats de Donzère-Mondragon, de Brégnier-Cordon et de Péage-de-Roussillon. Il conviendra alors de mener une réflexion sur la méthodologie, non seulement sur les secteurs ou sites où l'on dispose de toutes les métriques, mais aussi sur les secteurs ou sites où certaines sont manquantes. Cette démarche conduira à l'élaboration d'une première ébauche de l'outil d'analyse.

Comme lors des deux premières phases, un comité plénier sera organisé lorsque le rapport sera rédigé pour clôturer la phase 3 et initier la phase 4.

B. Les principales tâches à effectuer lors de la phase 4 (janvier 2010 – décembre 2011) sont les suivantes :

1. Etude synchrone multi-échelle et multi-métrique des échanges nappes/Rhône et entre masses d'eau souterraines différentes

a. Confluence Ardèche/Rhône

- i. Exploitation de l'étude piézométrique réalisée durant la phase 3
- ii. Caractérisation hydro_SIG des échanges
- iii. Prélèvement d'invertébrés en fonction des résultats hydro
- iv. Prélèvement macrophytes en fonction des lônes échantillonnables
- v. Finalisation et exploitation du diagnostic isotopique initié en phase 3 par le laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon

b. Terrasses d'Orange/Avignon

- i. Visite de terrain, bibliographie, recueil des données et modèles existant
- ii. Campagne de relevés piézométriques si l'existant est insuffisant
- iii. Caractérisation hydro_SIG des échanges
- iv. Prélèvement invertébrés en fonction des résultats hydro
- v. Prélèvement macrophytes en fonction des lônes échantillonnables
- vi. Diagnostic isotopique (laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon, financements complémentaires à prévoir)

L'enjeu de cette tâche est organisationnel. Il va s'agir de coordonner dans le temps et spatialement les campagnes de terrains des laboratoires de recherche impliqués afin de procéder de façon synchronisée à une analyse pertinente des échanges sur des masses d'eaux différentes.

2. Echanges en régime transitoire

- a. Eléments méthodologiques*
- b. Recherche d'un site pertinent où l'alternance dans le temps du sens des échanges nappes/fleuve est avérée (Jons, Plaine de Peraut, Brégnier-Cordon...)*
- c. Visite de terrain, bibliographie, recueil des données et modèles existants*
- d. Recherche de piézomètres*
- e. Campagne de mesure, équipement (suivi continu)*
- f. Premières mesures et ajustements méthodologiques*

L'enjeu de cette tâche est technique et méthodologique. Il va s'agir de sélectionner et d'équiper le secteur le plus adapté sur le cours du Rhône pour étudier l'influence des régimes transitoires saisonniers sur les échanges nappes/fleuve.

3. Mise en place d'une Database commune cohérente avec la nomenclature de Database existantes (ex : code BSS)

L'enjeu de cette tâche va consister à harmoniser les données de chaque équipe de recherche afin de construire une base de données non seulement spatiale mais aussi temporelle. Son organisation devra permettre une valorisation efficace des résultats. Son extension à l'ensemble du cours du Rhône nécessitera un financement complémentaire par le Plan Rhône.

4. Valorisation résultats

- a. Identification des contextes hydrauliques sur lesquels les métriques sont pertinentes (seules ou combinées) : protocole méthodologique d'évaluation des échanges*
- b. Vers une sortie opérationnelle d'aide à la décision (outil)*

A plus court terme, les résultats acquis lors des phases 1 et 2 et ceux à venir, concernant la phase 3 ont été, ou seront, valorisés de différentes façons :

- Rapports phases 1 et 2 ; fiches de restitution phases 1 et 2 accessibles en ligne sur le site de la ZABR ; Comités pléniers phases 1 et 2 pour lesquels des participants nombreux et variés ont été invités (BRGM, CNR, EDF, SMIRCLAID, SEGAPAL, SHR, BURGEAP, AE-RMC, ZABR, Plan Rhône, DDAF, MISE, DIREN, CEMAGREF, Université Lyon 1, ENSM-SE, CEREGE, ENTPE, Universités d'Avignon, de Besançon, de Montpellier et de Savoie, Régions RA et PACA...). Le triptyque rapport, fiche de restitution et comité pléniers sera reconduit pour les phases 3 et 4.

- Communications à des colloques (voir détail en annexe 1) : MODFLOW (Golden, Colorado, USA, 2008), IIT-GEM (Delhi, Inde, 2008), GFHN (Avignon, 2008), ESRI (Versailles, 2008), ESC IV (Lans en Vercors, 2008)

- Publications en revues (voir détail en annexe 1) : Géomatique expert (2008). Une publication commune concernant la présentation de la méthodologie interdisciplinaire est en cours de rédaction (Water research).

L'enjeu de cette tâche est le développement de la sortie opérationnelle du projet de recherche.

5. Thèse EMSE (octobre 2010 – décembre 2013) : modélisation multi métrique et emboîté des échanges nappe /rivières avec application sur le Rhône

(1 descriptif du sujet de thèse à finaliser est proposé en annexe 2 à la fiche)

C. Anticipation sur les tâches à effectuer en phase 5 (2012-2014)

La phase 5 devra être une phase de valorisation des résultats acquis lors des 4 phases précédentes et du travail de thèse. L'outil opérationnel d'aide à la décision sera finalisé. De plus, sa mise en œuvre devra tenir compte de la réflexion engagée en phase 4 sur les conditions de transférabilité de l'outil intégrant :

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

Budget global du projet, durée et aide annuelle demandée : *détailler les postes selon le modèle proposé*

Durée : 2 ans (2010-2011)

Subvention demandée : environ 78 000 € (50% du coût total).

Des financements complémentaires ou extérieurs seront nécessaires pour le diagnostic isotopique sur le secteur d'Avignon/Orange. Un soutien de la région PACA, dans le cadre du Plan Rhône, pourra être sollicité.

Quelle(s) parties du projet retireriez-vous si le budget alloué est de 75 % ? de 50% de l'aide demandée ?

La demande de subvention correspond à 50% du budget total.

ANNEXE 1 : Communications et publications

Publications

GRAILLOT D., PARAN F., BORNETTE G., MARMONNIER P., PISCARD C. & CADILHAC L. (en cours de rédaction) Coupling groundwater modeling with biology to identify strategic water resources (revue visée : Water Research)

PARAN F., DECHOMETS R. & GRAILLOT D., Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale. Géomatique expert, 2008 (64), pp. 73-79.

Communications

PARAN F., DECHOMETS R. & GRAILLOT D., Les relations usages des sols/ressources en eaux souterraines envisagées selon une double perspective dans le cas d'échanges nappes/rivière - Application au fleuve Rhône. In Actes des 33e journées scientifique du GFHN « Impact de l'usage du sol sur les ressources en eau souterraines », organisées l'EmmaH et le GFHN, Université d'Avignon, Novembre, 2008, 6p.

PARAN F., DECHOMETS R. & GRAILLOT D., Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale, Contexte de données fragmentées et hétérogènes, application au fleuve Rhône – zones alluviales. In. Actes de la conférence francophone ESRI « SIG 2008 », organisée par ESRI, Versailles, Octobre, 2008, 9p. (CD-ROM)

+ Poster dans le Recueil de cartes ESRI 2008, volume 5 coédité avec HP France et l'IGN

GRAILLOT D., PARAN F., MIMOUN D., BORNETTE G., GIBERT J. & CADILHAC L., *Spatial Analysis to Model Interactions between Surface and Groundwater and to identify strategic water resources*. IIT-GEM applied research seminar in engineering & technology 24th-26th September 2008 IIT Delhi.

GIBERT J. & MARMONIER P., (2008) *Research from Subterranean Ecology and Hydrobiology research group at University Lyon1*. IV European Speleological Congress, Lans-en-Vercors FRANCE, 23-30 August 2008.

GRAILLOT D., PARAN F., MIMOUN D., BORNETTE G., GIBERT J. & CADILHAC L., *Coupling groundwater modeling with biology to identify strategic water resources*. In. *Proceedings of the conference "ModFlow and More: Ground Water and Public Policy"*, organisée par Colorado School of Mines, Golden, USA, May 2008, pp209-213.

ANNEXE 2 : Sujet de thèse

Intitulé du sujet de thèse : Modélisation emboîtée multi-échelle et validation multi métrique des échanges nappes rivière – Application au Rhône

Laboratoire d'accueil	SITE (Sciences Information et technologie pour l'Environnement)
Directeur de thèse	Direction : Didier Graillot ENSM-SE Co-direction : Djamel Mimoun CR, ENSM-SE, Centre SITE
Laboratoire de rattachement	Centre SITE ENSM-SE
Autres membres de l'encadrement	F. Paran, Y. Travy, L. Simon, P. Marmonier, G. Bornette, L. Cadilhac
Nomenclature ministérielle	DS3 (http://dr.education.fr/SIREDO/DS_RSD_SD)

A1. Présentation du sujet et objectifs

Actuellement une réflexion doit être engagée sur la façon de modéliser des systèmes aquifères alluviaux superficiels à grande échelle connectés à un système hydrographique principal et secondaire. Lorsque sur ce type d'aquifères, des modélisations partielles existent déjà : doit-on utiliser les modèles existants et trouver le moyen de les lier entre eux, ou au contraire doit-on mettre en œuvre une modélisation à échelle plus globale voire simplifiée validée par des modélisations plus fines sur des secteurs clefs ? L'objet de la thèse s'intéresse à la seconde solution pour laquelle on peut envisager 2 possibilités.

La première possibilité consiste à utiliser une fonction SIG d'analyse spatiale à grande échelle permettant de calculer automatiquement les gradients hydrauliques de nappes correspondant aux différentes configurations d'échange. Mais cette première solution n'est pas conçue pour une compréhension plus fine des écoulements. Elle est fondée sur une analyse géométrique des niveaux piézométriques.

La seconde correspond à une technique de modélisation à grande échelle fondée sur une méthode par éléments analytiques permettant de définir les conditions limites géométriques et hydrauliques sans discrétiser en mailles fines l'ensemble de la zone. Cette méthode est fondée sur la théorie du potentiel complexe et le principe de superposition des écoulements. Les valeurs de potentiel calculées seront comparées aux résultats obtenus par modélisation locale (éléments finis ou différences finies) compte-tenu des paramètres de calage et des données introduites dans les modèles au moment de leur élaboration ou de leur dernière utilisation. Cette stratégie calée à l'échelle locale pour certains tronçons à déterminer (accessibilité des données de l'hydrosystème) sera comparée au calcul de gradients. Les métriques biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes) seront utilisées, là où elles existent, en tant que critère de validation supplémentaire et en particulier en cas de divergence des résultats.

L'analyse de la cohérence entre les résultats du modèle global et ceux des modèles locaux, fera l'objet d'une validation complémentaire à partir des données géochimiques et isotopiques (^{18}O , ^2H , traceurs de solutés ou radioactifs) le long du réseau hydrographique et dans les systèmes aquifères. Il s'agira de valider à partir des résultats des modèles et des indicateurs isotopiques les mécanismes

d'échange entre les nappes et le fleuve (débits contributifs, vitesses d'écoulement, gradients, temps de séjours, localisation des zones de recharge). Une réflexion sur la notion de régime transitoire des échanges nappes/ rivières sera à développer en cours de thèse.

A2. Profil du candidat

- Titulaire d'un Master recherche en Sciences de l'environnement : Mécanique des fluides et Mathématiques appliquées, modélisation des écoulements souterrains (méthodes numériques discrètes, méthodes analytiques), Hydrogéologie et géochimie

- Inscription : à l'ENSM-SE dans le cadre de l'Ecole Doctorale de Saint-Etienne

- Financement : coût 120 k€ sur 3ans. **En cas d'accord de l'Ecole doctorale de Saint-Etienne**, le financement de la thèse est assuré par l'ENSM-SE pour trois (3) ans.

1.5. Fiche action recherche valorisation n°A9 – Phase 5 (2012-2014)

Titre du projet : ACTION 9

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) **Phase 5 (2012-2014).**

Personne responsable : Didier Graillot – Département Géosciences et Environnement, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne Cedex 2.
E-mail : graillot@emse.fr ; Téléphone : 04-77-42-01-30 ; Fax : 04-77-42-66-33

Correspondant Agence de l'eau RMC : Laurent Cadilhac

Equipes de recherche « ZABR » concernées :

(Préciser le domaine et le pourcentage respectif de leur contribution)

- Département Géosciences et Environnement de l'ENSM-SE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne)

Domaine : Hydrogéologie et Géomatique – Pourcentage de contribution : 40%

- UMR 5023 Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA)
* Equipe Ecologie, Evolution, Ecosystèmes Souterrains (E3S) de l'Université Lyon I :

Pourcentage de contribution : 25%

* Equipe Ecologie des Communautés Végétales

Domaine : Ecologie et Hydrobiologie – Pourcentage de contribution : 25%

* Equipe IPE Impacts des polluants sur les Ecosystèmes, contribution pour les méthodes géophysiques.

Autres partenaires :

- Université Jean Monnet, faculté des sciences, LMV/TLCNRS UMR 6524 (10% géochimie, isotopes)

- UMR 5600 – ENS pour la partie thermie infrarouge

- Institutionnel : CNR : convention pour la mise à disposition de données

Thème de rattachement ZABR :

(Un échange ou une information du responsable du thème est souhaité)

Changements climatiques et ressources (D. Graillot, C. Piscart)

Thème de rattachement Agence de l'Eau :

Ce projet de recherche est en lien avec l'axe thématique 1 « risques environnementaux et vulnérabilité des milieux » du nouvel accord cadre. Ce thème souligne notamment les besoins en connaissance au niveau des zones d'interface (échanges eaux souterraines/eaux superficielles) en résonance avec l'orientation fondamentale du SDAGE OF 7 « équilibre quantitatif : évolution quantitative des ressources superficielles et souterraines ». Une telle problématique est aussi

formulée en termes des besoins et attentes du Plan Rhône volet 3 « qualité des eaux, ressources et biodiversité : compréhension des échanges entre fleuve et aquifères ».

Site de rattachement ZABR :

(Un échange ou une information du responsable de site est souhaité)

- Axe « Corridor » Rhône Saône
- Zones humides du Rhône

Finalités et attendus opérationnels :

(Ceux ci seront de deux ordres, scientifiques et opérationnels)

Indiquer quelle partie de programme pourrait faire l'objet de publications scientifiques

Il s'agit de développer un guide méthodologique 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.

- Finalités scientifiques :

Il s'agit de finaliser un outil interdisciplinaire pour l'identification et l'évaluation, tant qualitative que quantitative (caractérisation), 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, cet outil 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.

Sur le plan scientifique, l'enjeu consiste à disposer d'un outil de synthèse permettant de confronter sur les sites d'étude du programme différentes métriques hydrologique, biologique, géochimique en matière d'échanges nappe / Rhône. La comparaison de ces différentes métriques doit aboutir soit à la validation qualitative des échanges permettant un calcul quantifié des débits correspondant soit à une recherche d'informations et de mesures complémentaires en cas de non cohérence entre les différentes métriques.

- Finalités opérationnelles :

Les résultats obtenus fourniront des éléments d'informations appréciables pour la préservation des enjeux alimentation en eau pour usages anthropiques (ex : AEP, dimensionnement des captages, réalimentation de nappe...) et alimentation des milieux aquatiques superficiels par les eaux souterraines (ex : maintien de débit et tamponnage thermique des eaux de surface, limitation de l'assèchement estival, maintien de milieux oligotrophes...) 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.

Objectifs et méthodologie:

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

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

La méthodologie élaborée lors des phases 1, 2 et 3 et 4 a été testée et ajustée sur plusieurs secteurs tests et ses conditions d'application sur d'autres secteurs seront déterminés dans cette dernière phase 5.

L'objectif final est d'aboutir à l'édition d'un guide méthodologique pour l'évaluation des échanges nappe/Rhône en zone alluviale à destination des gestionnaires.

A. Rappel des résultats obtenus au cours des phases précédentes (1 à 4) :

Rappel des résultats de la phase 1 (mars 2006 – mars 2007) :

- synthèse bibliographique interdisciplinaire en matière d'échanges nappes/rivière
- recensement des données existantes ont abouti :
- sectorisations du fleuve Rhône
- hypothèses d'échanges nappes/Rhône
- schématisation des configurations hydrogéologiques d'échanges sur le Haut-Rhône
- visualisation sous SIG et à la construction de la base de données SIG
- choix d'un secteur test, la chute de Brégnier-Cordon.

Rappel des résultats de la phase 2 (mars 2007 – mars 2008) :

- validation du secteur témoin présélectionné (Brégnier-Cordon) dans la phase 1
- schématisation des configurations hydrogéologique sur le Rhône-Moyen et le Bas-Rhône et à la collecte de données complémentaires ;
- développement d'une méthode d'analyse spatiale sous SIG de caractérisation des échanges ;
- initiation du tableau d'interprétation des résultats par métriques et de la codification des métriques ;
- analyse des résultats inter-sites et à une sectorisation fonctionnelle quantifiée sur Brégnier-Cordon.
- estimation des débits de nappe sur le secteur de Péage-de-Roussillon ;
- identification des données biologiques
- proposition d'un site aval (Donzère-Mondragon) en fonction des données disponibles (hydraulique, biologique, isotopique)
- réflexion sur l'analyse des échanges en régime transitoire dans un contexte de changement climatique et une analyse bibliographique internationale sur la modélisation des échanges nappes/rivière.

- quantification des apports souterrains sur le secteur de Brégnier-Cordon : environ 340 l/s pour 7,5km avec les premiers croisements de résultats hydrauliques et biologiques globalement en accord sur les zones où la comparaison est possible
- organisation de deux comités pléniers de restitution

Rappel des résultats de la phase 3 (mars 2008 – décembre 2009) :

- * Acquisition de nouvelles données :
 - hydrauliques, piézométriques ;
 - biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes) ;
 - isotopiques et physico-chimiques.
- * Développement méthodologique :
 - choix du secteur témoin aval validé (Donzère-Mondragon).
 - études complémentaires engagées sur le secteur de Brégnier-Cordon, notamment avec la métrique isotopique
 - analyse corrélative inter-sites avec lien statistique entre les différentes métriques (hydraulique, biologique, géochimique)
 - typologies des échanges selon les différentes métriques et sectorisation fonctionnelle quantifiée
 - organisation d'un comité plénier pour clôturer la phase 3 et initier la phase 4.

Résultats de la phase 4 (janvier 2010 – décembre 2012)

1. Etude synchrone multi-échelle et multi-métrique des échanges nappes/Rhône et entre masses d'eau souterraines différentes

Confluence Ardèche/Rhône

- Exploitation de l'étude piézométrique réalisée durant la phase 3
- Caractérisation hydro_SIG des échanges
- Prélèvement d'invertébrés en fonction des résultats hydro
- Prélèvement macrophytes en fonction des lônes échantillonnables
- Finalisation et exploitation du diagnostic isotopique initié en phase 3 par le laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon

2. Echanges en régime transitoire

Le secteur le plus adapté pour étudier l'influence des régimes transitoires saisonniers sur les échanges nappes/fleuve était celui de Donzère-Mondragon.

- a. Eléments méthodologiques
- b. Traitement en régime transitoire à partir des données piézométriques différentes sur un même site (hautes eaux et basses eaux)
- c. Comparaison avec les résultats de modèles existants
- d. Campagnes de mesures complémentaires et équipement de piézomètres en sondes de niveau à enregistrement continu

3. Résultats obtenus dans le cadre de la thèse d'Eric Lalot

Comme prévu, L'EMSE a initié sur cette thématique un sujet de thèse d'octobre 2010 à décembre 2013 intitulé : Approche spatio-temporelle pour la modélisation et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières – Application au Rhône. Il s'agit au travers de différents types d'outils - modèles déterministes, modèles boîte noire et analyse multi-variée spatiale – d'analyser leurs complémentarités dans la compréhension des échanges nappe-rivière en régime transitoire et de proposer une exploitation opérationnelle des résultats obtenus.

L'un des résultats intéressants obtenus à l'issue de la première année et utile dans le cadre du guide méthodologique consiste à pouvoir reconstituer des chroniques de données hydrologiques (niveaux d'eau en rivière, niveaux piézométriques en nappe) lorsqu'elles sont incomplètes ou insuffisantes pour calculer les débits d'échange. Cette reconstitution se fait par analyse corrélatoire à l'aide de modèles autorégressifs en prenant en compte la valeur des hauteurs d'eau en nappe ou en rivière en dehors des périodes pour lesquelles on ne dispose pas de données. Ces tests ont porté sur la zone de Péage de Roussillon sur laquelle 6 enregistreurs en continu ont été installés en plus des données mises à disposition par les autres partenaires en particulier le Smirclaid et la CNR. Une analyse en composantes principales spatialisée des signaux de nappe a été réalisée à partir des données reconstituées et complétées et met en évidence les zones de la nappe influencées par le RCC et celles qui sont influencées davantage par les pompes. Ce site relativement anthropisé (pompes pour l'AEP, l'irrigation et l'approvisionnement en eau industrielle) fait l'objet d'un projet de restauration de l'Île de la Platière ; une vingtaine de profils en travers des l'Îles le long du RCC a été réalisée pour prendre en compte leur rôle dans les mécanismes d'échanges. Il s'agit d'une allocation doctorale financée par l'EMSE. Le rapport d'avancement du travail de thèse a été communiqué à l'agence de l'eau.

4. Mise en place d'une Database commune cohérente avec la nomenclature de Database existantes et ébauche du guide méthodologique pour d'évaluation des échanges nappe/rivières appliquée aux zones alluviales du Rhône

Les données de chaque équipe de recherche ont été introduites dans une base de données spatio-temporelle à caractère général (format Excel) qui trouvera sa place dans le guide méthodologique. L'intégration des connaissances acquises en matière d'évaluation des échanges nappe/rivières dans un outil d'aide à la décision a fait l'objet au cours de cette phase 4 d'une réflexion approfondie. Il s'agit de constituer un guide méthodologique aidant l'utilisateur à cheminer progressivement dans les étapes de l'évaluation en fonction de son profil et du contexte qui correspond à sa demande en s'appuyant sur des exemples (sites qui ont été étudiés dans le cadre du programme dans les phases précédentes). La technique choisie est celle de la théorie des graphes qui permet de représenter de façon très structurée les différentes étapes de l'évaluation (nœuds du graphe), le parcours dans le graphe dépendant du contexte (besoin d'une évaluation qualitative ou quantitative des échanges, données disponibles, objectifs, moyens).

Une première version du guide méthodologique sera contenue dans le rapport de la phase 4

5. Gouvernance/ animation et valorisation résultats

Cette activité a fait l'objet de comités techniques, d'interventions et de communications sur le projet et de réunions avec les gestionnaires impliqués dans la problématique des échanges nappe/rivière dans le cadre de projets de gestion de la ressource (AEP, restauration de l'Îles,...).

5.1. Comités techniques

- 27 et 28/4/2011: terrain avec L. Cadilhac
- 15/9/2011: avancement du projet et présentation de la thèse E. Lalot, avec L.

Cadilhac

- 30/9/2011: méthodologie d'élaboration du guide pour l'évaluation des échanges
- 21/2/2012: suite élaboration du guide + préparation phase 5 avec L. Cadilhac

Au total 4 comités techniques dont 3 avec l'agence (les CR: 5 fichiers pdf ont été transmis à L. Cadilhac et la ZABR le 25/1/2012 téléchargeables)

5.2. Interventions sur le projet (valorisation)

- séminaire eau/territoire/société 19/8/2011
- présentation du projet à l'OHM 6/9/2011
- séminaire Hydro Agence RMC 22/9/2011
- séminaire inter-ZA Rennes 6/10/2011
- présentation du projet au colloque E3D à Agadir (Maroc) en mars 2012
- communication au congrès international de l'EGU à Vienne en Autriche en avril 2012

Au total 6 interventions/présentations

- communications au colloque IS River en juin 2012

5.3. Réunions avec les partenaires et gestionnaires impliqués dans le projet

- SMIRCLAID 19/1/2011 et 15/2/2012
- CNR janvier et mars 2011
- Syndicats des eaux (SIGEARP, ...) printemps 2011
- OSIRIS mai 2011
- Réserve de la Platière 3 et 24 octobre 2011
- présentation du projet au Smirclaid le 9 mai 2012

au total: 8 réunions

Sur le plan de la valorisation scientifique, une publication sur le sujet synthétisant la méthodologie d'évaluation des échanges nappe/rivières appliquée au Rhône et les résultats obtenus est en cours de soumission dans une revue de rang A comme Journal of Hydrology ou Water resources management.

B. Principales tâches à effectuer pour la phase 5 (janvier 2013 – décembre 2014) :

Trois étapes principales composent cette phase 5 :

- Approfondissement méthodologique
- Instrumentation complémentaire
- Constitution du guide méthodologique final

a) **Approfondissement méthodologique : transposabilité de la méthodologie d'évaluation des échanges**

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

b) **Instrumentation complémentaire**

Des compléments en matière de mesures piézométriques sur des sites déjà investigués sont nécessaires afin de mieux maîtriser les incertitudes de mesures et leur impact dans l'évaluation des échanges. Ces mesures seront utiles pour établir l'efficacité des méthodes de réconciliation de

données de hauteurs d'eau en nappe ou en rivière mises en œuvre dans la thèse d'E. Lalot. En effet, il est important de pouvoir utiliser les données existantes pour évaluer les échanges nappe/Rhône même si celles-ci ne sont pas tout à fait complètes ou présentent quelques incohérences (défaut capteurs, problème de nivellement, données manquantes).

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

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

c) Constitution du guide méthodologique final

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

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

Cette 3^e tâche (c) comporte :

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

Budget

Budget global du projet, durée et aide annuelle demandée : *détailler les postes selon le modèle proposé*

Durée: 2 ans (2013-2014)

Coût total : 119 665 €

Subvention demandée : **60 698 € sur 2 ans** (50,7% du coût total) hors coûts liés à la métrique thermique déjà prévus dans la fiche ZABR Imagerie infrarouge thermique aéroportée et modélisation hydrogéologique portée par Hervé Piegay.

2. Annexes 2 : Fiches de synthèse

2.1. 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 AEP assortie 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 milieu (qualité et origine des aquifères, capacités d'échanges...).

Contacts:
Didier GRALLOTT et Frédéric PARAN
École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne (ENSM-SE)
Centre SITE
158, cours Fauriel
42 023 Saint-Étienne Cedex 2
E-Mail : grailott@emse.fr ; tél : 04 77 42 01 30 ; Fax : 04 77 42 66 33

Fiche ZABR N° 1

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.

Références:
Bonnefille G., Douchamps R., Ferreira D., Germain A., Gheret J., Grailott D., Lafont M., Paron F. & Pujalon S. (2007) - 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 à ses aquifères superficiels. Rapport final phase 1 (année 1), Action de recherche valorisation ZABR n°11, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), CEMAGREF Lyon, 17pp. + Annexes (133p.), mai 2007.

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 critères 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, hydrogéologiques... 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 ou 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)

2.2. Phase 2 – (2007-2008)

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

Phase 2 : 2007-2008

Résumé :

Cette action de recherche vise à l'élaboration d'une méthodologie de caractérisation 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 s'inscrit dans le volet « ressource et biodiversité » du Plan Rhône 2, qui vise à une 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 AEP assortie d'une priorisation de cet usage. La question de la vulnérabilité des ressources est donc essentielle. A l'échelle du Rhône, il va s'agir de déterminer sur quels secteurs les apports de la nappe et/ou infiltrations venant du fleuve sont prépondérants, 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 de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse qui révèlent 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 éparées, 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

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

Centre SITE

158, cours Fauriel 42 023 Saint-Étienne Cedex 2

E-Mail : graillo@ense.fr ; Tél : 04 77 42 01 30 ; Fax : 04 77 42 66 33

FICHE ZABR N°1

Cadre d'utilisation :

En termes de transférabilité à l'échelle du fleuve, cette méthodologie commence à être utilisée sur d'autres aménagements CNR. A terme, il est prévu de réaliser des bilans et de vérifier la cohérence des résultats sur des tronçons plus longs du Rhône associant plusieurs de ces aménagements. L'étude des échanges est effectuée 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 validation de l'outil.

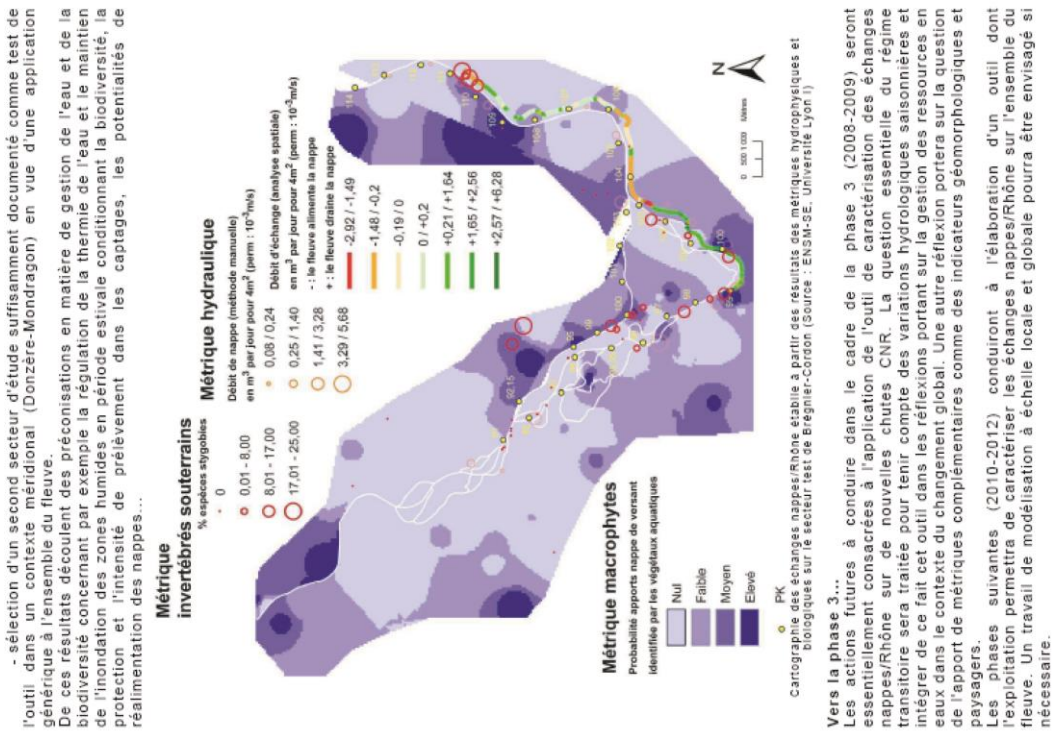
L'utilisation des résultats de cette recherche passe par la structuration des données (hydrophysiques, hydrobiologiques, hydrochimiques) de telle manière que l'on puisse aisément y accéder et en gérer les principales caractéristiques, en particulier la qualité en fonction de leur origine et de la faire 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.

L'outil, ainsi constitué, pourrait être utilisé sur les rivières du bassin du Rhône ou appliqué aux cours d'eau d'autres grands bassins versants (ex : Loire), par les gestionnaires impliqués. La transférabilité sera facilitée par les liens existants ou potentiels avec d'autres projets de recherche : Projet Européen (Allemagne/Roumanie), thématiques analogues de la Zone Atelier Loire et du Plan Loire Grandeur nature (Bassin de la Loire), thème ZABR « Flux polluant » (Bassin du Rhône), ANR Wetchange (rivière Ain / Rhône), Sites du P10 (ex : secteur de Donzère-Mondragon / Rhône) autres actions de recherche ZABR (ex : secteur de Jons / Rhône).

Références :

Bornette G., Dechomets R., Ferreira D., Germain A., Graillet D., Jézéquel C., Lafont M., Marmonier P., Paron F., Picart C., Pujalon S., Simon L. (2007 et 2008). Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des infiltrations dans l'alimentation des eaux de surface du Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapports finaux phases 1 et 2. Action recherche valorisation ZABR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), CEMAGREF Lyon. 167p. + Annexes (rapport phase 1 : 2007) ; 129p + Annexes (rapport phase 2 : 2008).

Graillet D., Paron F., Mimoun D., Bornette G., Gilbert J. & Cadilhac L. (2008). Coupling groundwater modeling with biology to identify strategic water resources. Proceedings of the conference 'ModFlow and More : Ground Water and Public Policy', organisée par Colorado School of Mines, Golden, USA, May 2008, pp209-213.



Objectifs (phase 2) :

Lors de la phase 2 du projet une méthodologie interdisciplinaire pour l'identification et l'évaluation des échanges nappes/Rhône a été développée. La mise en œuvre de l'outil d'analyse hydrogéométrique qui en est issu a permis de traiter un secteur test sur le Rhône à l'amont de Lyon (Brégnier-Cordon). La méthodologie interdisciplinaire de caractérisation des échanges repose sur :

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

La phase 2 est déclinée en 3 principaux objectifs :

- 1) Réaliser 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 ;
- 2) Mettre au point la méthodologie de caractérisation des échanges à partir des métriques hydrophysiques et biologiques :
 - métrique hydrophysique : à partir des configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges et de l'hydrologie quantitative, notamment la Loi de Darcy, et les techniques d'analyse spatiale sous SIG ;
 - métrique hydrobiologique : à partir de deux types d'indicateurs : 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 ; d'autre part, les invertébrés souterrains marqueurs des arrivées d'eau de la nappe ;
- 3) Superposer et croiser, à l'aide du SIG, les différentes métriques sur le secteur de Brégnier-Cordon pour une caractérisation plus robuste des échanges en expliquant les convergences et/ou les divergences.

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. 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. Ce programme s'inscrit dans le Plan Rhône et bénéficie à ce titre d'un soutien de la Région PACA.

Principaux résultats (Phase 2) :

- 1) Poursuite de l'inventaire des données et connaissances
Une synthèse interdisciplinaire intégrant les aspects quantitatifs et qualitatifs le long du Rhône a été rédigée, permettant de constituer ainsi une base de données. Cette synthèse a été complétée au niveau international pour l'étude des échanges nappes/rivière sur d'autres grands cours d'eau.
- 2) Diagnostic qualitatif et quantitatif des échanges avec visualisation sur support cartographique SIG des premiers résultats :
 - sur 2 secteurs, celui de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône) (voir figure) et celui de Péage-de-Roussillon (Rhône-Moyen), à partir de données fournies par la CNR entre autres, des apports de nappes évalués respectivement à 0,55m³/s et 0,95m³/s ;
 - intégration des informations identifiées au géorépartiteur ZABR ;

2.3. Phase 3 – (2008-2010)

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 aux aquifères associés
Influence des variations saisonnières sur les échanges

Phase 3 : 2008-2010

Résumé :

Cette action de recherche vise à l'élaboration d'une méthode de caractérisation 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 :

Ce projet de recherche est en lien avec l'axe thématique «risques environnementaux et vulnérabilité des milieux» de l'accord cadre Agence de l'Eau/LABR. Ce thème souligne les besoins en connaissance au niveau des zones d'interface (échanges eaux souterraines/eaux superficielles) en résonance avec l'orientation fondamentale du SDAGE «équilibre quantitatif : évolution quantitative des ressources superficielles et souterraines». Ces besoins sont aussi affirmés dans le Plan Rhône sous le volet «qualité des eaux, ressources et biodiversité : compréhension des échanges entre fleuve et aquifères». La compréhension des échanges nappes/Rhône répond bien à ce besoin de connaissance des interfaces qui a été souligné au cours de la réunion Agence de l'Eau/LABR dédiée au développement du Plan Rhône le 19 mai 2009.

Etant donné le caractère fortement anthropisé du Rhône, la préservation du patrimoine lié à ses aquifères représente un enjeu important. Il va s'agir de caractériser les 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 des méthodes, voire un outil, permettant de caractériser ces échanges.

Les connaissances scientifiques à mobiliser sont nombreuses, mais éparpillées, parfois anciennes et relevant 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, biodiversité taxonomique et fonctionnelle, modèles hydrodynamiques, hydrogéochimie...) en relation avec les conditions de milieux (qualité et origine des aquifères, capacités d'échanges...).

Contacts :

Didier GRAILLOT et Frédéric PARAN
École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE)
Centre SITE
158, cours Fauriel 42 023 Saint-Étienne Cedex 2
E-Mail : graillo@ense.fr ; Tél : 04 77 42 01 30 ; Fax : 04 77 42 66 30

Fiche ZABR N.º 9

Cadre et perspectives d'utilisation :

La méthode mise au point sur les sites de Brégnier-Cordon et de Peage-de-Roussillon a pu désormais être testée et utilisée sur plusieurs aménagements CNR. Il est désormais nécessaire de réaliser des bilans et de vérifier la cohérence des résultats sur des tronçons plus étendus le long du Rhône associant plusieurs de ces aménagements. L'étude des échanges sera effectuée 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 constituera la première étape de la validation de l'outil. Une seconde étape consistera à vérifier l'effet des variations saisonnières sur les échanges.

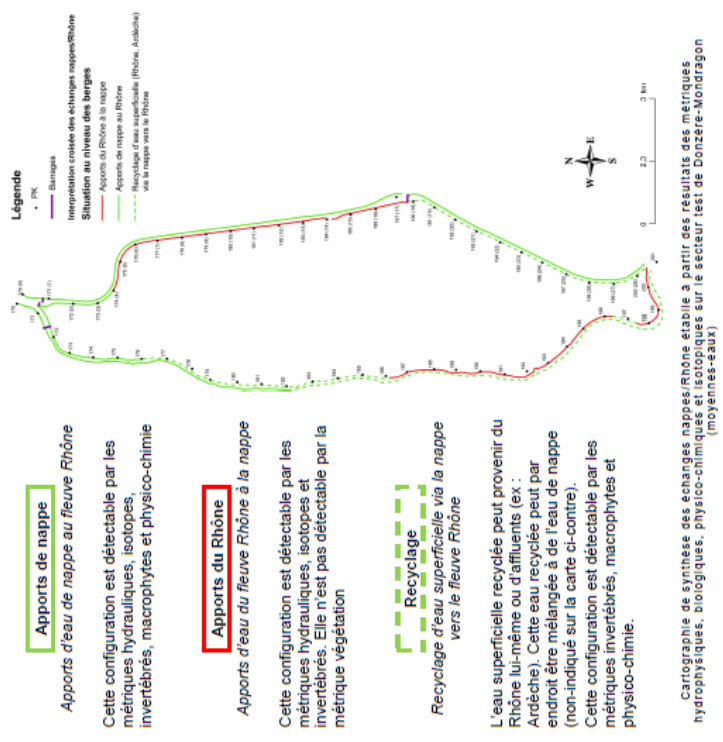
L'utilisation des résultats de cette recherche nécessite de structurer l'ensemble des données de telle manière que l'on puisse aisément y accéder, en gérer les principales caractéristiques (notamment la qualité des données) et en assurer l'évolution au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données. Pour des données géographiquement distribuées, le système de gestion de base de données le mieux adapté est un SIG. Un tel système doit permettre également d'effectuer des calculs à partir des données de base, les calculs pouvant être mis à jour en cas de modification ou d'ajout de données.

L'outil, ainsi constitué, aura vocation à être utilisé sur d'autres rivières du bassin du Rhône ou appliqué aux cours d'eau d'autres grands bassins versants (ex : Loire, Seine), par les gestionnaires simplifiés. La transférabilité sera facilitée par les liens existants ou potentiels avec d'autres projets de recherche : thématiques analogues de la ZAL et du PLGN 3 (Bassin de la Loire), projet international sur la gestion quantitative de la ressource en eau souterraine de l'ONEMA (lien avec le PIREN Seine), thème ZABR « Flux polluant » (Bassin du Rhône), ANR Wetchange (rivière Ain / Rhône), Sites du P10.

Références :

- Baillet H., Bornette O., Dechomats R., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Gralliot C., Lacroix M., Leclercq S., Lhuissier Y., Maréchal P., Merle G., Monod H., Rodriguez C., Simon L., Travi Y. (2007, 2008 et 2010) - Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapports finales phases 1, 2 et 3 Action de recherche valorisation IZB-Agence de l'Eau Rhône-Alpes-Loire-Ecole Supérieure de Lyon (EUSL)-Mars 2009. Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), CEMAENGREF Lyon.

- Graillot D., Paron F., Mimoun D., Bonnette G., Gibert J. & Cadilhac L. (2008). Coupling groundwater modeling with biology to identify strategic water resources. In: Proceedings of the conference "ModFlow and More: Ground Water and Public Policy", organisée par Colorado School of Mines, Golden, USA, May 2008, pp209-213.



Vers la phase 4 (2010-2012)
Cette nouvelle phase de travail comportera les tâches suivantes :
- Etude synchrone multi-échelle et multi-métrique des échanges nappes/Rhône et entre masses d'eau souterraines différentes (confluence Rhône/Ardèche et Rhône/Aygues)
- Etude des échanges nappes/rivière en régime transitoire
- Mise en place d'une Database commune cohérente avec la nomenclature de Database existantes (ex : code BSS)
- Valorisation résultats (protocole méthodologique d'évaluation des échanges, premiers pas vers un outil opérationnel)
- Démarrage d'un travail de thèse sur des questions de modélisation à échelle locale et globale et prise en compte du régime transitoire.

La phase 5 (2012-2014) conduira à l'élaboration d'un outil dont l'exploitation permettra de caractériser les échanges nappes/Rhône sur l'ensemble du fleuve. En complément du travail précédemment réalisé, un volet concernant la caractérisation du rôle des berges dans le transport des solutés (aspects qualitatifs) pourrait être envisagé.

Objectifs (phase 3) :
La phase 1 a consisté au préalable à dresser un inventaire (bibliographie, données...) des connaissances tout au long du fleuve Rhône. Elle a conduit à initier une méthode interdisciplinaire pour la caractérisation des échanges nappes/Rhône et à sélectionner un secteur test : la chute CNR de Brégnier-Cordon (Rhône amont).
La phase 2 a permis de :
1) Réaliser un complément bibliographique international concernant les méthodes hydrophysiques appliquées sur des cours d'eau à l'étranger ;
2) Mettre au point la méthode de caractérisation des échanges nappes/rivières à partir de différentes métriques sur le secteur test sélectionné (Brégnier-Cordon) :
- métrique hydrophysique : caractérisation de échanges fondé sur une méthode d'analyse SIG ;
- métrique hydrobiologique : évaluation des échanges à partir des végétaux aquatiques, ou macrophytes, et des invertébrés souterrains ;
- métrique géochimique à partir des traceurs physico-chimiques classiques et isotopiques ;
3) Superposer et croiser, à l'aide du SIG, les différentes métriques sur le secteur de Brégnier-Cordon pour une caractérisation plus robuste des échanges mis en évidence en phase 1 en expliquant les convergences et/ou les divergences.

Pour la phase 3 le choix a été fait de travailler sur un nouveau secteur différent dans ses caractéristiques des deux secteurs étudiés précédemment et représentatif du fleuve pour la partie aval : la chute CNR de Donzère-Mondragon. La méthode mise en œuvre en phase 2 a été à nouveau utilisée. De plus, l'étude s'est aussi intéressée à évaluer l'impact des variations saisonnières sur les échanges nappes/rivière.

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. 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. Ce programme est labellisé Plan Rhône et il bénéficie à ce titre d'un soutien financier complémentaire de la Région PACA.

Principaux résultats (Phase 3) :
1) **Poursuite de l'inventaire et de l'acquisition de données et connaissances**
Une partie des données hydraulique est obtenue dans le cadre d'une convention avec la CNR.
2) **Diagnostic qualitatif et quantitatif des échanges avec visualisation sur support cartographique SIG des premiers résultats**
La carte présentée ci-après synthétise le diagnostic fonctionnel spatialisé des échanges nappes/Rhône réalisée à l'aide des différentes métriques impliquées aussi bien en rive gauche qu'en rive droite sur le Vieux-Rhône et le canal de dérivation de chute de Donzère-Mondragon. Les schémas accompagnant cette carte décrivent plus précisément les différentes situations observées.
3) **Etude des variations saisonnières**
Les variations saisonnières des échanges ont été appréhendées, notamment, à partir de 4 cartes piézométriques rendant compte d'états (saisons) hydrologiques de l'hydrosystème nappes/Rhône différents. Du point de vue hydraulique, on observe que les échanges sont plus intenses en moyennes-eaux et plus faibles en hautes-eaux. De plus, le sens de l'échange peut s'inverser d'une saison à l'autre sur certains secteurs.

3. Annexes 3 :Compte-rendu de terrains et de réunions

3.1. 12 janvier 2010 : CR de la réunion à la CNR

**Compte rendu de la réunion à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) –Direction
régionale de Vienne
Mercredi 12 janvier 2010**

Sont présents :

- De la CNR : Laffont Philippe, David Ferry
- De l'ENSM-SE : Batton-Hubert Mireille, Paran Frédéric, Lalot Eric

La réunion a duré 2h30-3h et a eu lieu au siège de la CNR à Ampuis.

Rappel ordre du jour :

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR, par le centre SITE de l'Ecole des Mines
2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot
3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse
4. Discussion autour de ces données
5. Bilan

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône), par le centre SITE de l'Ecole des Mines

En ce qui concerne le premier point, Frédéric Paran a expliqué le travail portant sur le Rhône, dans lequel le centre SITE s'est engagé, dans le cadre de la ZABR. Il a explicité les différentes approches considérées, pour l'étude de la caractérisation des échanges nappe-rivière : analyse SIG de la piézométrie et traceurs biologiques des échanges. Ces approches sont appliquées à différents tronçons du Rhône. Les deux principaux secteurs étudiés jusqu'à présent ont été ceux de Brégnier-Cordon et de Donzère–Mondragon.

Ces travaux ont été labélisés plan Rhône.

2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot

Le sujet de thèse d'Eric Lalot porte sur l'approche spatio-temporelle pour la caractérisation et la modélisation de la dynamique des échanges nappes/rivière (application au Rhône). Il s'agira, dans un premier temps, de décrire les échanges nappes/rivières, en régime transitoire, à l'aide d'une analyse corrélative et spectrale des signaux de hauteurs d'eau au sein des deux entités. Un deuxième objectif consistera à étudier la dimension spatiale des échanges. Une modélisation aux éléments analytiques, à grande échelle, est prévue. Il est ensuite envisagé de la raccorder à une modélisation effectuée à l'aide d'un schéma discrétisé et réalisée sur une zone de taille plus réduite. Un des buts de la thèse est en effet de déterminer s'il est possible d'utiliser des modèles locaux (préexistants) afin d'intégrer des informations locales au sein de modèles régionaux. Ces différentes méthodes pourront, en outre, être comparées à des données biologiques et géochimiques là où elles existent.

Cette thèse a pour but d'améliorer les connaissances qui existent sur les relations nappes-rivières, ce qui pourra être utile à des gestionnaires. La CNR précise, par exemple, qu'elle doit fournir des

études d'impact des dragages qu'elle effectue, sur la qualité de la nappe. L'accident de Chavanay a également mis en valeur l'importance de débits de fuite au niveau d'une digue.

3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse

La zone d'étude prévue (définie par l'agence de l'eau) est celle située le long du Rhône, au voisinage de Péage-de-Roussillon. Deux grands types de données sont nécessaires, dans le cadre de cette thèse :

- Des hauteurs d'eau en nappe alluviale, au voisinage du Rhône, si possible selon un transect perpendiculaire au cours d'eau (données voisines)
- La côte des lignes d'eau (principalement pour le vieux Rhône)

Idéalement ces données doivent être synchrones, fiables, les pas de temps entre les mesures doivent être réduits (journaliers ou moins, surtout dans le cas de la ligne d'eau) et la durée des mesures doit être de l'ordre d'une année au moins.

4. Discussion autour des données, notamment par rapport à ce que la CNR peut mettre à notre disposition

Lors de la phase 1 du projet ZABR, le secteur de Péage de Roussillon avait déjà été considéré, mais il avait été abandonné par la suite, pour des raisons de manque relatif de données biologiques. A ce titre la CNR avait déjà fourni un certain nombre de données :

- Informations sur les digues, emplacements des ouvrages
- Hauteurs de la ligne d'eau du Rhône pour des débits de 10 et 20 m³/s
- Hauteurs d'eau et débits dans les contre canaux
- Cartes piézométriques de la nappe avant aménagements

Au préalable, la CNR nous informe qu'elle ne dispose pas de données interconnectées dans le temps.

La CNR indique que les données de hauteurs d'eau sont assez peu fiables. L'**incertitude** n'est jamais inférieure à 5 à 10 cm sur les hauteurs d'eau et à 10% sur les débits. Les mesures de hauteurs d'eau dans le Rhône sont plus fiables que les mesures de débits, les débits étant estimés à partir des mesures de hauteur. Des dérives existent fréquemment au niveau des appareils de mesures. Pour les données anciennes, ces dérives étaient corrigées en appliquant une correction linéaire sur la donnée, à partir de la différence notée entre l'observation sur le terrain et la mesure automatique. Aujourd'hui, les données ne sont plus corrigées, afin de laisser à l'utilisateur le choix de la méthode de correction. Par ailleurs les données d'élévation, même actuelles, sont exprimées par rapport au niveau de référence ancien de l'IGN : NGF ortho au lieu du NGF 69 qui correspond à la norme actuelle.

La CNR indique que des **piézomètres en nappe alluviale** ont été implantés dans les années 1970-1980, pour suivre les variations de la nappe après la phase de travaux. Ces piézomètres sont, relevés trimestriellement. Certains ont été retirés. Trois piézomètres seulement sont instrumentés en continu dans la nappe. Il s'agit des piézomètres P224, P292 et P280 qui se situent aux environs du centre de l'île de la Platière, et au voisinage de la lône de même nom. La CNR dispose par contre de très nombreux piézomètres au niveau des digues.

Les piézomètres en plaine alluviale ne sont pas relevés lorsque celle-ci est inondée.

En ce qui concerne la **ligne d'eau** dans le fleuve et les différents canaux, il n'existe des données que pour certaines valeurs de débits. Les lignes d'eau aux débits de 10 et 20 m³/s ont été mesurées. Des lignes d'eau aux débits de 54 et 75 m³/s ont été calculées et ont déjà été

transmises par la CNR. Ces lignes d'eau ont été calculées dans l'optique d'une augmentation du débit réservé du Vieux Rhône jusqu'à un vingtième du débit interannuel. Cela fait d'ailleurs l'objet d'une étude du secteur de la part du CNRS. Il existerait également des lignes d'eau mesurées pour des débits de crue de l'ordre de 2700 et 4200 m³/s.

Il existe en revanche des données continues de hauteur d'eau, en aval et en amont du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf. Les données à l'amont sont mesurées à 100 m du barrage et enregistrent, de fait, les vagues dues au barrage. Ces données sont disponibles au pas de temps de 10 minutes.

M. Laffont et D. Ferry font remarquer que le débit du vieux Rhône peut parfois être important, même en l'absence de crue. Si un problème de turbine est détecté au niveau du barrage de Sablon, la fermeture de la turbine entraîne une diminution du débit du Rhône canalisé et par suite une augmentation du débit du vieux Rhône.

Ils ont également expliqué que, lors des épisodes de crues, la plaine peut être inondée en rive droite du Rhône canalisé et en amont du bassin de Saint-Pierre-de-Bœuf. L'eau contourne en effet les digues et s'infiltre notamment par le siphon situé sous le Rhône canalisé. Ce siphon sert habituellement à évacuer l'eau des contre-canaux, en rive gauche du contre canal, ainsi que les rejets du groupe Osiris.

Des données géologiques, sont également présentes à la CNR. Toutefois la recherche de ces dernières représenterait un important travail de recherche.

5. Bilan

La CNR est prête à mettre à la disposition de l'Ecole des Mines les données de hauteurs d'eau dont elle dispose. Cependant, M. Laffont et M. Ferry expliquent que le SMIRCLAID dispose a priori déjà des données de hauteurs d'eau de la CNR en nappe alluviale. Par ailleurs, d'autres intervenants, comme le GIE OSIRIS ou la réserve de la Platière, semblent disposer de nombreuses données piézométriques. Il paraît donc plus judicieux de leurs demander d'abord les données dont ils disposent, afin, dans un premier temps, de pouvoir choisir une période d'étude au vu des données disponibles. Puis, s'il manque des données, il sera possible à l'Ecole des Mines de récupérer, auprès de la CNR, les données correspondant à la période choisie. Il est toutefois noté que la CNR dispose, seule, des données de hauteurs d'eau dans la rivière en aval et en amont des barrages. Ces données seront donc fournies suite au choix de la période d'étude. Elles devront néanmoins être interprétées avec prudence.

Par ailleurs, une instrumentation de piézomètres est prévue par l'Ecole des Mines. La pose des capteurs devra se faire avec l'accord de la CNR. La période de mesure s'étendra au maximum jusqu'à fin 2012, dans le cadre de la thèse de M. Lalot (d'une durée de 3 ans).

Une réunion entre le centre SITE et SMIRCLAID est prévue mercredi 19 janvier. De plus une date de réunion avec le GIE OSIRIS devrait être fixée dans les prochains jours.

3.2. 19 janvier 2010 : CR de la réunion au SMIRCLAID

**Compte rendu de la réunion au
Syndicat Mixte du Rhône Court circuité Loire Ardèche Isère Drôme (SMIRCLAID)
Sablons - Mercredi 19 janvier 2010**

Sont présents :

- Du SMIRCLAID : Pierre-François Delsouc (Chargé de Mission) et Roberte Di Bin (Présidente)
- De l'ENSM-SE : Paran Frédéric, Lalot Eric

La réunion a duré 3h et a eu lieu au siège du SMIRCLAID à Sablons.

Rappel ordre du jour :

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR, par l'UR SEPIT de l'Ecole des Mines – présentation de l'Ecole
2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot
3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse
4. Présentation des attentes du SMIRCLAID
5. Discussion autour des données disponibles, ou à rechercher
6. Bilan

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône), par le centre SITE de l'Ecole des Mines – Présentation de l'Ecole

Frédéric Paran a commencé par présenter l'Ecole des Mines l'UR SEPIT (Institut Henry Fayol) : les thématiques abordées par le laboratoire tournent autour de l'environnement, de l'entreprise et du territoire.

Il a ensuite expliqué le travail portant sur le Rhône, dans lequel l'UR SEPIT s'est engagée, dans le cadre de la ZABR (début en 2006, fin prévue en 2012 ou 2015). Il a explicité les approches considérées, par les différents laboratoires impliqués, pour l'étude de la caractérisation des échanges nappes-rivière : analyse SIG de la piézométrie et traceurs biologiques et géochimiques des échanges. Ces approches sont appliquées à différents tronçons du Rhône et une confrontation entre les différentes métriques est réalisée. Les deux principaux secteurs étudiés jusqu'à présent ont été ceux de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône) et de Donzère-Mondragon (Bas-Rhône). Dans le cadre de ces travaux la zone de Péage-de-Roussillon a, un temps, été envisagée et des données avait déjà été fournies par le SMIRCLAID à cette occasion.

Ces travaux ont été labellisés plan Rhône.

2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot

Le sujet de thèse d'Eric Lalot porte sur l'approche spatio-temporelle pour la caractérisation et la modélisation de la dynamique des échanges nappes/rivière (application au Rhône). Il s'agira, dans un premier temps, de décrire les échanges nappes/rivières, en régime transitoire, à l'aide d'une analyse corrélative et spectrale des signaux de hauteurs d'eau au sein des deux entités. Un deuxième objectif consistera à étudier la dimension spatiale des échanges. Une modélisation aux éléments analytiques, à grande échelle, est prévue. Il est ensuite envisagé de la raccorder à une modélisation, effectuée à l'aide d'un schéma discrétisé, et réalisée sur une zone de taille plus réduite. Un des buts de la thèse est en effet de déterminer s'il est possible d'utiliser des modèles

locaux (préexistants) afin d'intégrer des informations locales au sein de modèles régionaux. Ces différentes méthodes pourront, en outre, être comparées à des données biologiques et géochimiques là où elles existent.

Cette thèse a pour but d'améliorer les connaissances qui existent sur les relations nappes-rivières, ce qui pourra être utile à des gestionnaires.

3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse

La zone d'étude prévue (définie par l'agence de l'eau) est celle située le long du Rhône, au voisinage de Péage-de-Roussillon et de l'île de la Platière. Deux grands types de données sont notamment nécessaires, dans le cadre de cette thèse :

- Des hauteurs d'eau en nappe alluviale, au voisinage du Rhône, si possible selon un transect perpendiculaire au cours d'eau (données voisines)
- Des données de volumes prélevés en nappe (et éventuellement injectés)

Idéalement ces données doivent être synchrones, fiables, les pas de temps entre les mesures doivent être réduits (journaliers ou moins, surtout dans le cas de la ligne d'eau) et la durée des mesures doit être de l'ordre d'une année au moins.

4. Présentation des attentes du SMIRCLAID

Dans le cadre du SDAGE, l'un des objectifs du SMIRCLAID va être d'estimer des volumes prélevables en nappe, ainsi que des moyens de contrôle du niveau de la nappe. Des niveaux piézométriques d'alerte (NPA) doivent ainsi être déterminés en un certain nombre de points de références qui seront instrumentés. Ces niveaux seront déterminés par le SMIRCLAID après concertation avec les différents partenaires : celui-ci a en effet un rôle de médiation.

Le syndicat aurait donc besoin, dans un premier temps, de mieux caractériser le comportement piézométrique de la nappe. Il est, à ce titre, particulièrement intéressé par la délimitation des zones d'influences des différents pompages et par une vérification de la pertinence des données disponibles : élimination des valeurs aberrantes, vérification des niveaux NGF,... La détermination des bornes de fluctuation de la nappe alluviale serait également utile, en vue de la détermination des niveaux piézométriques d'alerte. Un des buts est effectivement de déterminer les valeurs maximales de débits pompés en nappe qui permettraient une certaine stabilité des niveaux et une faible perturbation du système.

Au final, il s'agit pour le SMIRCLAID de garantir une gestion équilibrée quantitative de la ressource en eau (mesures de prévention, préconisations de gestion, gestion des autorisations de pompage industriel et/ou agricole).

Le premier objectif du SMIRCLAID est, par conséquent, de recueillir les données des différents intervenants. L'interprétation de ces mesures est ensuite envisagée.

5. Discussion autour des données, notamment par rapport à ce que le SMIRCLAID peut mettre à notre disposition

Le SMIRCLAID a prévu un travail de recueil des données fournies par les différents acteurs de la zone couverte par le syndicat. Les principaux intervenants et détenteurs de données sont :

- La CNR
- La réserve naturelle
- Les groupements industriels (Osiris, TREDI,...)
- Les syndicats d'eau potable (SIGEARPE, ASA – contact : Marc Boissonet,...)
- Les agriculteurs
- DDT
- AE-RMC

Ce travail a, semble-t-il, déjà été fait pour l'année 2009. Il devrait bientôt se poursuivre pour l'année 2010.

Les différentes mesures d'élévation du niveau de la nappe semblent présenter des incertitudes élevées. Les pas de temps entre les mesures sont souvent importants : trimestriels ou mensuels. Ils diffèrent, en outre, entre les différentes entités qui instrumentent le niveau d'eau. Des « trous » existent également dans les données.

Il existe aussi au SMIRCLAID une version du dernier rapport du BURGEAP, sur l'établissement d'un modèle en régime transitoire. Le modèle lui-même est peut être disponible mais ce sera à vérifier.

5. Bilan

L'établissement d'une convention a été envisagé entre le SMIRCLAID et l'Ecole des Mines de Saint-Etienne. Le SMIRCLAID se chargerait de centraliser les données des différents intervenants : débits pompés, niveaux d'eau mesurés. Ces données correspondraient à une période récente (2006-2010 ?). Le SMIRCLAID fournirait ensuite ces données ainsi que les éventuelles métadonnées et études associées à l'Ecole des Mines en échange de leur interprétation effectuée dans le cadre du travail de thèse d'E. Lalot.

Eric Lalot, dans le cadre de sa thèse déterminera, dans un premier temps, la période qui se prête le plus à l'étude envisagée. Sur cette période, les données nécessiteront un traitement en vue de la modélisation. Des interprétations devront, à ce titre, être réalisées : validation des données, détection des différentes influences sur les niveaux piézométriques,... Ces interprétations seront alors communiquées au SMIRCLAID selon les termes prévus dans la convention envisagée. Il pourrait s'agir d'interpréter les variations de niveaux de nappe en fonction des usages, prélèvements, entrée et sorties sur la zone alluviale de Péage-de-Roussillon. Ce travail d'interprétation, déjà prévu dans le travail de thèse, pourra s'appuyer sur ce cas d'application associé à des enjeux territoriaux forts, par rapport à la ressource en eau. Ces enjeux impliquent de nombreux acteurs (industries, entreprises, collectivités territoriales, syndicats, réserve naturelle...) et se déclinent à différentes échelles, du global au local (DCE eau, SDAGE, conflits d'usages locaux), d'autant que le secteur est considéré comme stratégique concernant l'AEP. Des échanges réguliers entre le SMIRCLAID et le doctorant seront donc indispensables afin : 1) définir au mieux les besoins du SMIRCLAID, 2) cerner au mieux les enjeux à considérer sur le secteur, 3) suivre l'évolution de ces enjeux dans le temps.

Toutefois, seuls les pompages et piézomètres, en nappe, inclus dans la zone alluviale pourront être pris en compte dans le travail de thèse. Celui-ci s'intéresse en effet principalement au voisinage du fleuve Rhône, bien que toute la plaine alluviale soit considérée. Par ailleurs l'Ecole des Mines ne donnera a priori pas de préconisation en vue de l'établissement des niveaux piézométriques d'alerte.

Le SMIRCLAID va consulter ses différents partenaires pour déterminer si une convention peut être envisagée avec l'Ecole des Mines et devrait donner sa réponse d'ici un mois. Il semble de plus que le SMIRCLAID a déjà été en convention avec l'Ecole des Mines. Le cas échéant, ce document pourrait servir de modèle pour la rédaction de la convention envisagée. Le SMIRCLAID va également déterminer plus précisément le type exact de traitement qu'il souhaite voir effectuer sur les données.

3.3. 10 février 2010 : CR de la réunion au SIGEARPE

Compte rendu de la réunion au SIGEARPE Mercredi 10 février 2010
--

Sont présents :

- Du Sigearpe : Laurent Gouilloud (directeur des services techniques)
- De l'ENSM-SE : Lalot Eric

La réunion a duré 1h30 et a eu lieu au siège du Sigearpe à Péage-de-Roussillon.

Rappel ordre du jour :

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR, par l'UR SEPIT de l'Ecole des Mines – présentation de l'Ecole
2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot
3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse
4. Discussion autour des données disponibles, du format de ces données et visite du site de pompage
5. Bilan

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône), par le centre SITE de l'Ecole des Mines – Présentation de l'Ecole

J'ai expliqué le travail portant sur le Rhône, dans lequel l'UR SEPIT s'est engagée, dans le cadre de la ZABR (début en 2006, fin prévue en 2012 ou 2015). J'ai explicité les approches considérées, par les différents laboratoires impliqués, pour l'étude de la caractérisation des échanges nappes-rivière : analyse SIG de la piézométrie et traceurs biologiques et géochimiques des échanges. Ces approches sont appliquées à différents tronçons du Rhône et une confrontation entre les différentes métriques est réalisée. Les deux principaux secteurs étudiés jusqu'à présent ont été ceux de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône) et de Donzère-Mondragon (Bas-Rhône). Dans le cadre de ces travaux la zone de Péage-de-Roussillon a, un temps, été envisagée et des données avait déjà été fournies par le SMIRCLAID à cette occasion.

Ces travaux ont été labellisés plan Rhône.

2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot

Le sujet de thèse porte sur l'approche spatio-temporelle pour la caractérisation et la modélisation de la dynamique des échanges nappes/rivière (application au Rhône). Il s'agira, dans un premier temps, de décrire les échanges nappes/rivières, en régime transitoire, à l'aide d'une analyse corrélative et spectrale des signaux de hauteurs d'eau au sein des deux entités. Un deuxième objectif consistera à étudier la dimension spatiale des échanges. Une modélisation aux éléments analytiques, à grande échelle, est prévue. Il est ensuite envisagé de la raccorder à une modélisation, effectuée à l'aide d'un schéma discrétisé, et réalisée sur une zone de taille plus réduite. Un des buts de la thèse est en effet de déterminer s'il est possible d'utiliser des modèles locaux (préexistants) afin d'intégrer des informations locales au sein de modèles régionaux. Ces différentes méthodes pourront, en outre, être comparées à des données biologiques et géochimiques là où elles existent.

Cette thèse a pour but d'améliorer les connaissances qui existent sur les relations nappes-rivières, ce qui pourra être utile à des gestionnaires.

3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse

La zone d'étude prévue (définie par l'agence de l'eau) est celle située le long du Rhône, au voisinage de Péage-de-Roussillon et de l'île de la Platière. Deux grands types de données sont notamment nécessaires, dans le cadre de cette thèse :

- Des hauteurs d'eau en nappe alluviale, au voisinage du Rhône, si possible selon un transect perpendiculaire au cours d'eau (données voisines)
- Des données de volumes prélevés en nappe (et éventuellement injectés)
- Eventuellement des données de qualités des eaux

Idéalement ces données doivent être synchrones, fiables, les pas de temps entre les mesures doivent être réduits (journaliers ou moins, surtout dans le cas de la ligne d'eau) et la durée des mesures doit être de l'ordre d'une année au moins.

5. Discussion autour des données et du format de ces données

Au niveau des 3 puits des îles qui appartiennent au SIGEARPE, les niveaux d'eau sont mesurés en permanence depuis au moins une dizaine d'année, avec un pas de temps de l'ordre de 15 minutes. Ces données sont fiables et réalisées au niveau des 3 puits. Ces données ne sont par contre disponibles sous forme exploitable informatiquement que depuis le mois de septembre 2010. **Auparavant ces données étaient stockées sous forme papier et enregistrées sur des bandes magnétiques (cela reste toutefois à vérifier).**

A une dizaine de mètres de ces 3 puits se trouvent, respectivement, 3 piézomètres. Des campagnes de mesures ont également eu lieu au sein de ces piézomètres, à diverses périodes. Les 3 puits captant du SIGEARPE ont fait l'objet de l'Etude 2007 du Bugeap qui avait pour objectif de déterminer l'impact de l'ajout d'un autre puits (qui prélèverait 500 m³/h supplémentaires) sur le niveau d'eau de la réserve de la Platière.

Il existe des données de volumes prélevés. Pour le moment les puits prélèvent entre 150 et 200 m³/h chacun. Le Sigearpe dispose en réserve de moins d'une journée d'eau, ce qui explique sa volonté d'agrandir son réservoir et d'augmenter sa production. Ces données de pompages sont disponibles avec un pas de temps au moins journaliers pour chacun des différents puits.

Des données de qualité sont également disponibles au Sigearpe avec des mesures notamment de taux de nitrates,... Il y a entre 10 et 15 mesures de qualité par ans. Une corrélation des paramètres qualité avec les niveaux de nappe observés intéresserait le Sigearpe.

Il existe le même type de données mais avec une densité moindre pour les deux sources exploitées par le Sigearpe.

5. Bilan

Le Sigearpe est d'accord pour mettre à la disposition de l'Ecole des Mines les données précédemment citées. Ces données sont publiques. Il précise que le Bugeap est probablement l'un des plus gros détenteurs de données sur la zone d'étude, en compagnie de la réserve de la Platière. Il faudra juste envoyer un mail précisant les données que l'on veut, puis venir chercher ces données.

3.4. 29 juin 2010 : CR de la sortie terrain – Aygues-Rhône

Sortie terrain du 29 juin 2010

Confluence Aygues/Rhône – Phase 4

Présents : Laurent Cadilhac (AE-RMC), Pierre Marmonier (EHF-HBES), Christophe Piscart (EHF-HBES), Yves Travi (UAPV-LH), Seifu Kebede (UAPV-LH), Didier Graillot (ENSMSE-SITE), Frédéric Paron (ENSMSE-SITE)

Objectif : Prise de contact avec la zone d'étude de la phase 4

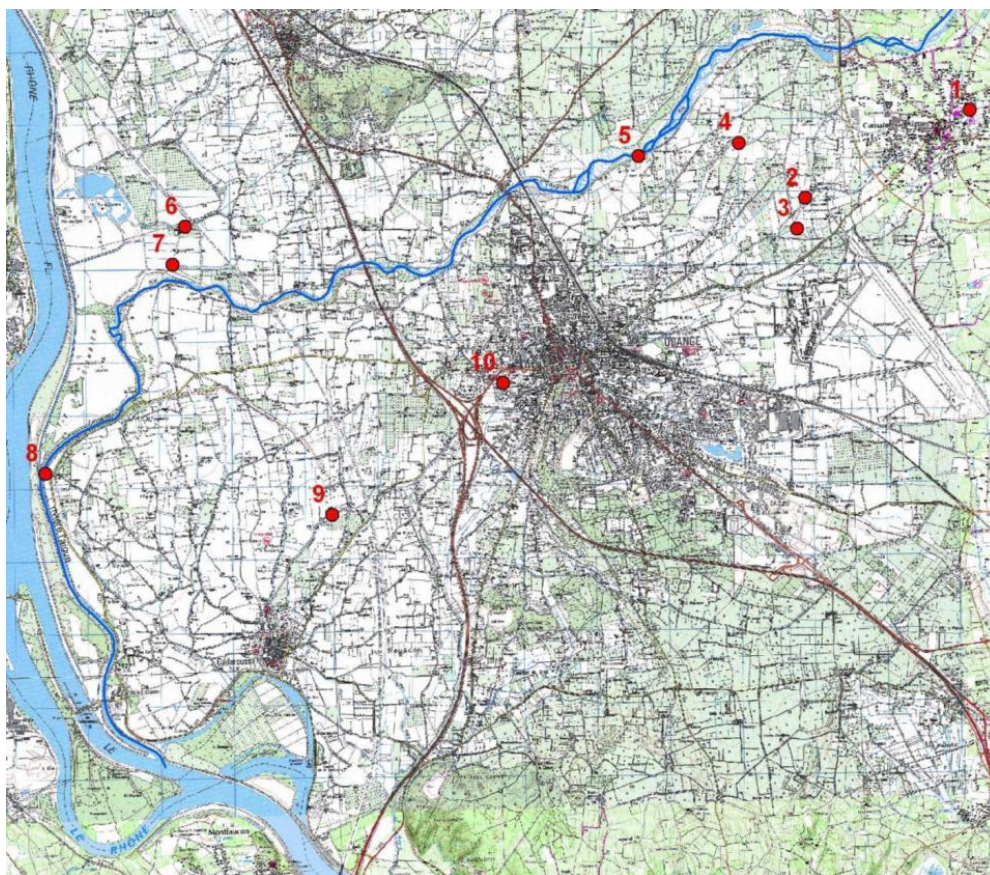
Secteur : Confluence Aygues/Rhône (Vaucluse, PACA)

Débit de l'Aygues à Orange : $7,82\text{m}^3/\text{s}$ (29 juin 2010 à 12h30)

Débit du Rhône à Viviers : $1260\text{m}^3/\text{s}$ (débit moyen journalier le 2 juillet à 10h20)

Sur la journée, 10 sites ont été visités (voir carte). Du point de vue géologique, ils sont situés soit en :

- Fy : Alluvions anciennes (Würm)
- Fz : Formations superficielles (Alluvions modernes post-würmien)



1. La Rigolle (Camaret-sur-Aygues)

Géologie : limite entre Fz et Fy

Cours d'eau le plus proche : Mayre d'Ancione

Distance à l'Aygues : 1100m

Point coté le plus proche : 70 à 74m

On note la présence de 2 puits distants de 200m. D'après la propriétaire du gîte le niveau d'eau dans ces puits est à -6m et -11m. Le puits ayant le niveau le plus profond est le plus proche de l'Aygues. Il semble de plus que la plupart des maisons sont alimentées en eau par des forages.

2. Blanchissage/Goumare (Camaret-sur-Aygués)

Géologie : Fz (langue sur Fy)

Cours d'eau le plus proche : Mayre de Cagnan

Distance à l'Aygués : 2100m

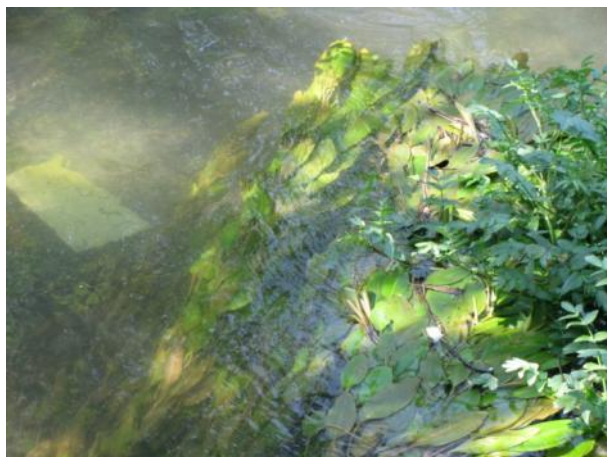
Point côté le plus proche : 55 à 58m

Mesures dans un fossé le long de la route :

- Conductivité : 610 μ S/cm

- Température : 18°C

Le débit est estimé entre 300 et 400l/s.



3. La Mezarde (Orange)

Géologie : Fz (langue sur Fy)

Cours d'eau le plus proche : Mayre de Cagnan

Distance à l'Aygués : 2300m

Point côté le plus proche : 55 à 58m

La carte IGN indique une source. Celle-ci était à sec lors de notre passage. Il est possible que la zone soit humide en hiver ou lors d'épisodes pluvieux.

4. La Blissonne (Orange)

Géologie : Limite entre Fz et Fy

Cours d'eau le plus proche : Mayre de Merderic

Distance à l'Aygués : 900m

Point côté le plus proche : 58m

La source indiquée sur la carte IGN n'a pas été localisée et le cours d'eau (fossé) était à sec.

5. Haut Abrian/Aygués (Orange)

Géologie : Cours de l'Aygués en Fz cerné de Fy

Cours d'eau le plus proche : Aygués

Distance à l'Aygués : 0m

Point côté le plus proche : 52m

L'Aygués se trouve environ 2,5m en dessous de la route (repère : 1092 SIAA Arpentage).

Les alluvions sont constituées de galets plus ou moins homométriques sans granoclassement. La matrice est composée de sédiments argilo-sableux.

Mesures dans l'Aygués :

- Conductivité : 420 μ S/cm

- Température : 23,5°C

- pH : 8,2

L'Aygués est colmatée (présence de fines) et eutrophisée (pH élevé et présence d'algues filamenteuses).



6. La Cigalière/Mayre des Laurons (Orange)

Géologie : Fz

Cours d'eau le plus proche : Mayre des Laurons

Distance à l'Aygues : 800m

Point côté le plus proche : 34m

La Mayre présente sur la carte IGN est en fait un petit fossé avec peu d'eau.

7. La Cigalière/Aygues (Orange)

Géologie : Fz

Cours d'eau le plus proche : Aygues

Distance à l'Aygues : 0m

Point côté le plus proche : 34m

Mesures dans l'Aygues :

- Conductivité : 421 μ S/cm
- Température : 26,4°C
- pH : 8,6

8. Confluence Aygues/Contre-canal du Rhône (Caderousse)

Géologie : Fz

Cours d'eau le plus proche : Aygues/Canal de dérivation du Rhône/Contre-canal du Rhône

Distance à l'Aygue : 0m

Point coté le plus proche : 31m

Mesures dans l'Aygue :

- Conductivité : 412 μ S/cm
- Température : 26,4°C
- pH : 8,2
- Niveau : -1m (échelle CNR)

Mesures dans le contre-canal :

- Conductivité : 458 μ S/cm
- Température : 20,7°C
- pH : 7,96



9. Les Prés/ Sainte-Marie/ La Marclade (Caderousse)

Géologie : Fz

Cours d'eau le plus proche : Fossé de Lamajeone

Distance à l'Aygue : 3200m

Point coté le plus proche : 28m

Mesure dans le fossé de Lamajeone :

- Conductivité : 550 μ S/cm
- Température : 20,5°C
- Coordonnées : 4°46'0''E ; 44°7'8''N

Mesure dans le puits de monsieur Rousset :

- Conductivité : 555 μ S/cm
- Température : 15,5°C
- pH : 7,7
- Niveau : -1m
- Altitude puits : 27m



10. Rivière la Meyne/Piscine (Orange)

Géologie : Fz

Cours d'eau le plus proche : La Meyne

Distance à l'Aygues : 1800m

Point côté le plus proche : 38 à 45m

Mesures dans la Meyne :

- Conductivité : 615 μ S/cm
- Température : 22,2°C

Mesures dans un affluent busé souterrain de la Meyne :

- Conductivité : 653 μ S/cm
- Température : 18,8°C



11. Bonus



3.5. 22 novembre 2010 : CR de la réunion à la CNR

Compte rendu de la réunion à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) Lundi 22 novembre 2010

Sont présents :

- De la CNR : Doutriaux Eric, Taravel Yann, Zylberblat Marc
- De l'ENSM-SE : Batton-Hubert Mireille, Paron Frédéric, Lalot Eric

La réunion a duré 1 h-1h30 et a eu lieu au siège de la CNR à Lyon.

Rappel ordre du jour :

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR, par le centre SITE de l'Ecole des Mines
2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot
3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse
4. Discussion autour de ces données, notamment par rapport à ce que la CNR peut mettre à notre disposition
5. Points divers

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR, par le centre SITE de l'Ecole des Mines

En ce qui concerne le premier point, Frédéric Paron a rappelé l'état d'avancement du projet sur l'étude relations nappes/rivières dans le cadre de la ZABR. Il a expliqué rapidement les différentes approches considérées : analyse SIG de la piézométrie et traceurs biologiques des échanges. Ces approches sont appliquées à différents tronçons du Rhône. La version définitive du rapport de la phase 3 du projet (sur Donzère-Mondragon) devrait être sortie pour janvier. Elle sera transmise à la CNR.

2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot

Le sujet de thèse d'Eric Lalot porte sur l'approche spatio-temporelle pour la caractérisation et la modélisation de la dynamique des échanges nappe/rivière (application au Rhône). Il s'agit, dans un premier temps, de décrire les échanges nappes/rivières, en régime transitoire, à l'aide d'une analyse corrélative et spectrale des signaux de hauteurs d'eau au sein des deux entités. Le deuxième objectif consiste à étudier la dimension spatiale des échanges. Une modélisation aux éléments analytiques, à grande échelle, sera réalisée. Elle sera raccordée à une modélisation effectuée à l'aide d'un schéma discrétisé et réalisée sur une zone de taille plus réduite. Un des buts de la thèse est en effet de déterminer s'il est possible d'utiliser des modèles locaux (préexistants) afin d'intégrer des informations locales au sein de modèles régionaux. Ces différentes méthodes seront, en outre, comparées à des données biologiques et géochimiques là où elles existent. Cette thèse a pour but d'améliorer les connaissances qui existent sur les relations nappes-rivières, ce qui pourra être utile à des gestionnaires.

3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse

La zone d'étude prévue (définie par l'agence de l'eau) est celle située le long du Rhône, au voisinage de Péage-de-Roussillon. Dans le cadre du sujet de thèse, 3 principaux types de données sont nécessaires :

- Des hauteurs d'eau en nappe alluviale, au voisinage du Rhône, si possible selon un transect perpendiculaire au cours d'eau (données voisines)
 - La côte des lignes d'eau
 - La côte des Thalwegs de ces cours d'eau ainsi que des profils en travers

Idéalement les données doivent être synchrones, fiables, les pas de temps entre les mesures doivent être réduits (journaliers ou moins, surtout dans le cas de la ligne d'eau) et la durée des mesures doit être de l'ordre d'une année.

4. Discussion autour de ces données, notamment par rapport à ce que la CNR peut mettre à notre disposition

En première réaction, la CNR nous indique que les données simultanées n'existent pas en l'état. Il faudra donc construire le jeu de données à partir de données issues de différentes sources.

La CNR indique que des **piézomètres en nappe alluviale** ont été implantés dans les années 1970-1980, pour suivre les variations de la nappe après la phase de travaux. Ces piézomètres étaient, semble-t-il, relevés trimestriellement. Certains ont été retirés. Au début des années 1990 de nouveaux piézomètres ont été introduits et suivis, dans le cadre d'un projet de réhabilitation des lônes : les données sont a priori disponibles auprès de la réserve naturelle de l'île de la Platière. Les contacts et sources de données pour obtenir des données de nappe sont les suivants :

- Réserve naturelle de l'île de la Platière (Bernard Pont)
- Syndicat intercommunal (SMIRCLAID)
- DREAL
- Syndicat AEP de Péage-de-Roussillon (Champ captant des îles – SIGEARPE – Laurent Gouilloud)
- Captage industriels (Plate-forme OSIRIS – Philippe Streff)
- BD ADES / AE-RMC
- Suivi des sites prioritaires ZABR (Brégnier-Cordon et Péage de Roussillon)
- Etudes des lônes (projet d'installation de piézomètres – Hervé Piegay)

En ce qui concerne la **ligne d'eau** dans le fleuve et les différents canaux, il existe une étude globale du Rhône qui comporte ces données (lignes d'eau en crues importantes). Il semble qu'un calcul des lignes d'eau en amont du seuil de Peyraud ait également été réalisé (lignes d'eau en crues faibles). Les données provenant des limnigraphes installés le long des cours d'eau ne pourront être mises à disposition que sous la forme de données journalières moyennées. Le débit du vieux Rhône ne diffère, selon la CNR, du débit réservé, qu'une soixantaine de jours par ans. Une étude sur l'augmentation du débit réservé a été réalisée (ZABR – Jean-Michel Olivier)

Les contacts et sources de données pour obtenir des données de débit et/ou de ligne d'eau sont les suivants :

- CNR (barrage de Saint-Pierre de Boeuf)
- Banque Hydro / AE-RMC (peu pertinent si la station la plus proche est Ternay)
- Etude global
- Etude Horizon 1994 (B. Pont)
- Etude CNR (réhabilitation du vieux-Rhône en amont du seuil de Peyraud)

L'altitude du thalweg du Rhône, pour la zone de Péage-de-Roussillon, est aussi disponible à la CNR. Ces données sont issues de l'étude globale.

5. Points divers

La convention avec la CNR pour le partage de donnée a été envoyée à l'ENSM-SE pour signature.

Pour toutes visites ou interventions sur la chute de Péage de Roussillon, il est nécessaire d'informer Philippe Laffont (04 26 10 24 15). Il serait profitable de prévoir une visite de terrain avec lui.

Dans l'optique d'installer des enregistreurs de niveau de nappe automatique, la CNR nous a transmis les informations suivantes concernant le matériel installé sur Donzère-Mondragon.

Les dispositifs d'acquisition automatique de données sont fournies par HYDREKA (M. CHENEVET - 06 61 38 11 69 ou M. JOLIVET). Il s'agit d'enregistreurs de type OCTOPUS et des cellules de pression 0–1bar pour le suivi piézométrique en continue :

- avec acquisition directe
- avec acquisition GSM

Il faut prévoir en plus la connectique (sondes implantées entre 10 et 15 m de profondeur). S'il s'agit du choix du GSM, il faut prévoir la carte SIM et l'abonnement correspondant.

Le prix hors logiciel, carte SIM, abonnement et installation sur site était (en 2007) d'environ 2 000 € HT tout compris.

Par ailleurs le piézomètre devra être équipé d'un boîtier de protection de l'appareillage à mettre en place sur le tube.

Autre caractéristique : avec une mesure toutes les heures l'autonomie est de l'ordre de 7 ans et demi.

6. Conclusion

La CNR peut fournir à l'Ecole des Mines un certains nombre de données, surtout en ce qui concerne la côte les lignes d'eau et la cote du thalweg. Des interrogations subsistent néanmoins quant à la nature exacte de ces données (densité et localisation des mesures, pas de temps,...). Il semble envisageable que l'Ecole des Mines instrumente des piézomètres qui appartiennent à la CNR.

Des rencontres et visites de terrains avec les différents contacts devront être planifiées.

3.6.14 février 2011 : CR du comité technique – Université Lyon I

Comité technique du 14 février 2011 Université Lyon I

Echanges nappes/Rhône

Présents : Laurent Cadilhac (AE-RMC), Pierre Marmonier (LEHNA-HBES), Christophe Piscart (LEHNA-HBES), Gudrun Bornette (LEHNA-ECV), Safia Bechar (LEHNA-ECV), Didier Graillot (ENSM-SE-UR SEPIT), Eric Lalot (ENSM-SE-UR SEPIT), Frédéric Paran (ENSM-SE-UR SEPIT)

Rappel de l'ordre du jour :

1. Bilan de la phase 3
2. Lancement de la phase 4
3. Thèse d'Eric Lalot

1. Clôture de la phase 3

1.1. Rapport de la phase 3

Le rapport de la phase 3 a été validé. Suite au comité technique, le rapport a été transmis au format pdf aux membres et aux personnes invités au dernier comité plénier du projet (7 juin 2010). Il a aussi été transmis à Anne Clémens qui se chargera de mettre le rapport en téléchargements sur le site de la ZABR.

De plus, il est prévu de tirer des exemplaires papiers du rapport.

1.2. Bilan de la phase 3, retour d'expérience et valorisation

Il est prévu de présenter les résultats définitifs de la phase 3 lors d'une réunion qui sera planifiée en juin ou septembre dans le cadre du Plan Rhône.

Les fonds de carte du rapport phase 3 ont été réalisés à partir de la bdrhfv1. Pour la suite, il conviendra d'utiliser le nouveau référentiel des entités hydrogéologiques.

Afin de faciliter le dialogue et la compréhension interdisciplinaire et le croisement des métriques, il est prévu de rédiger un glossaire contenant la ou les définitions des termes importants utilisés dans le projet (ex : nappe de versant, zone hyporhéique, sous-écoulement,...).

Il apparaît nécessaire de réaliser une meilleure description géologique et hydrogéologique des sites étudiés pour faciliter le croisement interdisciplinaire des métriques.

1.3. Article

Suite au comité technique, les dernières modifications seront effectuées sur l'article méthodologique en cours. Après correction de l'anglais par une société spécialisée, il sera soumis à la revue Water Research.

2. Lancement de la phase 4

2.1. Echéance et planification

Le rapport final de la phase 4 est à rendre avant décembre 2012.

Le plan du guide technique est à rendre pour juin 2012.

La campagne piézométrique à la confluence Rhône-Ardèche sous-traitée à un bureau d'étude est prévue en mars 2011. Les coordonnées des puits et les contacts (propriétaires) recueillis par le bureau d'étude seront à transmettre à l'équipe « invertébrés souterrains » afin de faciliter leur travail de terrain si possible avant juin 2011. En effet, si le nombre de puits identifiés est suffisant du côté de Pont-Saint-Esprit ce n'est pas le cas pour la plaine nord Ardèche.

Des sorties terrain ont été planifiées :

- Confluence Rhône-Ardèche : 27 ou 29 avril 2011 (métrique hydraulique)
- **Beauchastel / Confluence Rhône-Drôme : jeudi 28 avril 2011 (métriques hydraulique et biologiques)**

2.2. Choix du nouveau terrain d'étude

- Confluence Rhône-Aygues, Caderousse

Ce secteur a déjà fait l'objet d'une sortie de terrain le 29 juin 2010.

Du point de vue hydraulique ces spécificités sont les suivantes :

- Aygues aval, entre Rhône et Aygues : les limons superficiels (environ 5m d'épaisseur) mettent en charge la nappe
- Aygues moyen, zone de tressage : il y a des pertes de la rivière vers la nappe (cône de déjection, sédiments grossiers sous les limons)
- Aygues amont, Sainte-Cécile les Vignes : zone de débordement, remontée du pliocène

Du point de vue faunistique ces spécificités sont les suivantes :

- faune typique de la vallée du Rhône
- faune non encore spécifique de la zone méditerranéenne
- travail de thèse sur les rivières en tresse de Cécile Capderrey

Du point de vue isotopique ces spécificités sont les suivantes :

- le radon est un bon traceur des échanges nappe/ rivière sur la zone

Sur ce secteur le problème est de distinguer les apports liés au Rhône et ceux liés à l'Aygues. Les limons superficiels présents en bordure du Rhône posent un problème pour l'échantillonnage faunistique et floristique.

Les limons superficiels sont présents en bordure de Rhône depuis Pierrelatte jusqu'à Beaucaire ce qui rend la caractérisation des échanges nappes/Rhône délicates sur le Rhône aval. C'est le cas des secteurs suivants qui n'ont pas été retenus comme zone d'étude pour la phase 4 :

- Confluence Rhône-Ouvèze, plaine de Sorgues : de plus il y a sur ce secteur une forte pollution aux pesticides
- Confluence Rhône-Durance

Les échanges nappes/ rivière sur le secteur de la confluence Rhône-Aygues, Caderousse seront donc caractérisés uniquement à l'aide des métriques hydraulique (existence de cartes piézométriques) et isotopique. L'équipe d'Avignon a prévu une campagne de 10 points de mesures sur le secteur de l'Aygues à la confluence avec le Rhône.

- Confluence Rhône-Drôme, Beauchastel

Après examen et discussion les échanges nappe/Rhône seront caractérisés du point de vue biologique sur ce secteur. Ils le seront du point de vue hydraulique sous réserve de l'existence de cartes ou de relevés piézométriques. Ces données piézométriques seront recherchées notamment auprès de la CNR.

Ce secteur présente la particularité d'être sous l'influence de formations basaltiques et calcaires.

Une sortie terrain sur ce secteur a été programmée le 28 avril 2011.

Les données CNR seront donc demandées :

- **en premier lieu et en priorité pour la chute de Beauchastel**
- **en second lieu pour la chute de Caderousse.**

2.3. Préfiguration de l'outil de caractérisation des échanges nappes/ rivière

Il s'agira d'un guide technique et méthodologique d'environ 100p.

Le plan de ce guide devra être établi pour juin 2012.

3. Thèse d'Eric Lalot

Eric Lalot a présenté les éléments liés au démarrage de son sujet de thèse (octobre 2010) portant sur la modélisation multi-échelles des échanges nappes/rivière. Le secteur d'étude sélectionné est Péage-de-Roussillon.

Outre l'approche méthodologique, le travail de recherche et de recueil de données a été présenté. Les interlocuteurs suivants ont été rencontrés ou seront rencontrés : CNR (convention : hauteurs d'eau du fleuve, piézométries) SMIRCLAID (convention en cours : données et modèle BURGEAP, centralisation des données piézométriques du secteur), SIGEARP (prélèvements d'eau de nappe), OSIRIS (prélèvements d'eau de nappe), RN Platière (convention à prévoir : piézométrie, enregistrement en continu), ASA...

De plus, le MNT de la vallée du Rhône de l'IGN a été acheté.

Trois études intéressantes récupérables à l'AE-RMC ont été évoquées :

- Etude CPGF Horizon 1995
- Etude Bièvre-Valloire 2010 (contact : syndicat qui gère le SAGE local)
- Etude du captage d'Albon ??

Concernant l'instrumentation du site, l'AE-RMC peut mettre à notre disposition 2 enregistreurs Orphimède.

3.7. 16 mars 2011 : CR de la réunion à la RN de la Platière

Compte rendu de la réunion à la Réserve naturelle de la Platière – Marais des Oves Mercredi 16 mars 2011

Sont présents :

- De la Réserve : Pont Bernard,
- De l'ENSM-SE : Paron Frédéric, Lalot Eric

La réunion a duré 3h et a eu lieu à la ferme des Oves à Péage-De-Roussillon.

Rappel ordre du jour :

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR, par le centre SITE de l'Ecole des Mines
2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot
3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse
4. Discussion autour de ces données
5. Bilan

1. Rappel des travaux effectués sur le Rhône, dans le cadre de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône), par le centre SITE de l'Ecole des Mines

En ce qui concerne le premier point, Frédéric Paron a expliqué le travail portant sur le Rhône, dans lequel le centre SITE s'est engagé, dans le cadre de la ZABR. Il a explicité les différentes approches considérées, pour l'étude de la caractérisation des échanges nappe-rivière : analyse SIG de la piézométrie et traceurs biologiques (macrophytes et invertébrés souterrains) des échanges. Ces approches sont appliquées et confrontées sur différents tronçons du Rhône. Les deux principaux secteurs étudiés jusqu'à présent ont été ceux de Brégnier-Cordon et de Donzère-Mondragon. La phase 4 du projet aura lieu sur le secteur compris au voisinage de la confluence avec la Drôme et l'Eyrieux.

2. Présentation du sujet de thèse d'Eric Lalot

Le sujet de thèse d'Eric Lalot porte sur l'approche spatio-temporelle pour la caractérisation et la modélisation de la dynamique des échanges nappes/rivière (application au Rhône). Il s'agira, dans un premier temps, de décrire les échanges nappes/rivières, en régime transitoire, à l'aide d'une analyse corrélative et spectrale des signaux de hauteurs d'eau au sein des deux entités. Un deuxième objectif consistera à étudier la dimension spatiale des échanges. Une modélisation aux éléments analytiques, à grande échelle, est envisagée. Il est ensuite envisagé de la raccorder à une modélisation effectuée à l'aide d'un schéma discrétisé et réalisée sur une zone de taille plus réduite. Un des buts de la thèse est en effet de déterminer s'il est possible d'utiliser des modèles locaux (préexistants) afin d'intégrer des informations locales au sein de modèles régionaux. Ces différentes méthodes pourront, en outre, être comparées à des données biologiques et géochimiques là où elles existent.

Cette thèse a pour but d'améliorer les connaissances qui existent sur les relations nappes-rivières, ce qui pourra être utile à des gestionnaires. M. Bernard Pont a notamment fait remarquer qu'il est particulièrement intéressé par l'évaluation de l'impact du colmatage du canal de dérivation sur le débit de fuite vers la nappe et la lône de la Platière.

3. Présentation des données nécessaires à la réalisation de la thèse

La zone d'étude prévue (définie par l'agence de l'eau) est celle située le long du Rhône, au voisinage de Péage-de-Roussillon, et comprend la plaine alluviale qui se situe entre Condrieu et Andancette. Plusieurs types de données sont nécessaires, dans le cadre de cette thèse. Ainsi on trouve dans l'ordre de priorité :

- Les hauteurs d'eau en nappe alluviale
- La côte des lignes d'eau pour le vieux Rhône, les lônes, les contre-canaux,...
- Des données géomorphologiques
- Des données sur les invertébrés souterrains et les macrophytes

Idéalement les données de hauteur d'eau doivent être synchrones, fiables, les pas de temps entre les mesures doivent être réduits (journaliers ou moins, surtout dans le cas de la ligne d'eau) et la durée des mesures doit être de l'ordre de quelques années au moins.

Dans le cadre de la thèse, l'Ecole des Mines est particulièrement intéressée par des suivis piézométriques qui seraient fait suivant une section perpendiculaire au cours d'eau (données voisines).

4. Discussion autour des données, notamment par rapport à ce que la Réserve pourrait mettre à notre disposition suite à l'établissement d'une convention

En ce qui concerne les **données de hauteur d'eau**, la Réserve dispose d'un certain nombre de piézomètres mais la majorité des mesures qu'elle effectue à lieu au sein de piézomètres et de puits appartenant à d'autres intervenants, comme la CNR ou le syndicat d'eau potable de Limony. La Réserve a effectué un suivi bimensuel au niveau d'une vingtaine d'ouvrages situés sur l'île de la Platière dans les années 1990 et, ce, jusqu'au début des années 2000. Depuis lors le suivi a été étendu à d'autres ouvrages (30 à 40) mais il s'effectue de manière mensuelle, d'Avril à Septembre. La Réserve indique que les niveaux NGF des piézomètres peuvent souffrir d'imprécision et que la précision n'est jamais centimétrique. La cohérence globale des données est néanmoins vérifiée. De 1992 à 2002 deux points ont été instrumentés au niveau de la lône de la Platière, avec un enregistreur de niveau d'eau dans la lône couplé à un capteur de hauteur piézométrique situé au voisinage. Un autre site a été instrumenté par la suite, toujours sur cette lône, mais les mesures ont été arrêtées en 2007.

M. Bernard Pont a explicité le fonctionnement hydrogéologique de l'île de la Platière et plus particulièrement de la Réserve Naturelle. La réserve est en effet particulièrement intéressée par l'observation des fluctuations de hauteur de la nappe qui peuvent être mises en relation avec des modifications du fonctionnement du système.

Ainsi il a été possible d'observer la diminution des apports à la nappe, et au contre-canal, qui est due au colmatage progressif du canal de dérivation. L'effet des pompes d'OSIRIS était, peu après la réalisation de l'ouvrage CNR, masqué en partie par le débit de fuite du canal. Mais le débit au niveau du siphon est progressivement passé de 5 m³/s à 500 l/s. Cela a conduit à une baisse de la nappe phréatique et à un colmatage et à un dénoisement des lônes.

En 1992 a été mise en place une réalimentation artificielle de la lône de la Platière à partir de l'eau du canal de dérivation, afin de contrebalancer ce phénomène. La lône du noyé a également été remise en eau par la suite, grâce à une augmentation du débit de 1 à 1,5 m³/s. En parallèle une diminution des prélèvements d'Osiris a eu lieu dans la zone sud.

Les différents aménagements réalisés ont permis une remontée moyenne de 1 m de la nappe phréatique. Il a notamment été observé que pendant l'été les volumes prélevés par OSIRIS diminuent, ce qui entraîne une hausse de la nappe phréatique. Des transects ont également été

réalisés au nord de l'île de la Platière pour mieux comprendre la piézométrie lors de certains épisodes de crue.

En ce qui concerne les hauteurs d'eau au niveau du Rhône, des lônes ou des contre-canaux, des mesures sont régulièrement effectuées lors de campagnes de terrain. Des cartographies de zones inondées avec distinction des zones de remontée de nappe et d'alimentation superficielle ont été menées.

Des données **géomorphologiques** sont également détenues par la Réserve Naturelle. 600 sondages pédologiques ont été réalisés afin de mesurer l'épaisseur de la couche des alluvions au-dessus des graviers.

La Réserve dispose de nombreuses données **biologiques**, notamment sur la répartition des peuplements de macrophytes. Des relevés de végétation macrophytes sont en effet effectués tous les 1 à 5 ans au niveau des lônes et des contre-canaux.

Les invertébrés souterrains ont par contre été moins étudiés. Quelques prélèvements d'invertébrés souterrain ont néanmoins été réalisés en 1990 au niveau des lônes, ainsi que par M. Creuzé des Châtelliers au sein des puits d'OSIRIS.

Des mesures de nitrates ont permis de mettre en évidence le faible taux de nitrate au sein de la plaine alluviale avec des concentrations beaucoup plus élevées dans les nappes de versant.

5. Bilan

La Réserve serait prête à mettre à la disposition de l'Ecole des Mines, dans le cadre de la thèse et du projet ZABR, les différentes données énumérées précédemment et dont elle dispose. Cette mise à disposition de donnée devra faire l'objet d'une convention.

Les données issues des enregistreurs piézométriques seraient disponibles sous forme de fichier .txt. Les mesures issues des campagnes manuelles sont intégrées dans une base access.

La Réserve a par ailleurs fourni le contact de M. Bruno Eysseric du syndicat d'eau potable d'Annonay Serrière pour les données piézométriques sur le secteur de Limony et celui de M. Jean-Paul Bravard, de l'université de Lyon, pour les données géomorphologiques sur la zone.

3.8. 27 avril 2011 : CR de la sortie de terrain – Rhône-Ardèche

Sortie de terrain Confluence Rhône-Ardèche 27 avril 2011

Présents : Didier Graillot (ENSM-SE) et Frédéric Paron (ENSM-SE)

L'objectif de la journée a consisté à repérer des puits à la confluence Rhône-Ardèche dans la zone des alluvions récentes et de relever des niveaux d'eau de nappe.

Pour la journée du 27 avril 2011 la Banque Hydro nous donne les informations suivantes pour les débits des cours d'eau concernés aux stations de mesure les plus proches (les débits sont donnés en m³/s accompagnés de la hauteur entre parenthèses).

Heure	Rhône à Viviers	Rhône à Pont-Saint-Esprit	Rhône à Bourg Saint-Andéol	Ardèche à Sauze
9h00	825	102 (1,56)	56 (0,24)	15 (0,06)
13h00	958	103 (1,58)	56 (0,24)	14 (0,03)
18h00	701	103 (1,58)	56 (0,24)	14 (0,02)

Situation hydrologique : basses-eaux

Les lieux suivants sont tous localisés en rive gauche de l'Ardèche (voir carte ci-après en fin de compte-rendu).

La cote NGF la plus proche du lieu est donnée à partir de la carte IGN 1 :25 000^e.

Géologie :

- Fza : alluvions des terrasses inférieures de l'Ardèche (bord Ardèche jusqu'au Rhône)
- Fy : alluvions des moyennes terrasses
- Formations encaissantes : Calcaires

1. Restaurant « Les Flots bleus » : Echelle limnimétrique

Niveau de l'Ardèche lu sur l'échelle : -0,5m (13h00)

Hauteur maximum de l'échelle : 3,55m (environ 50cm au-dessus du sol) – Marnage : 30cm

Côte NGF la plus proche du haut de l'échelle : 41m légèrement à l'amont

Niveau estimé de l'Ardèche : 37,45m

2. Puits particulier proche d'une maison

Puits bétonnée cerclé de fer – Pas de système de pompage opérationnel

Puits à sec (profondeur : 4,99m)

Cote NGF la plus proche : 43m

3. Le Castellans (Croix) : forage pour l'irrigation

Pas de possibilité de faire passer la sonde – Au dire de l'agriculteur le niveau de nappe est à environ 6m.

Cote NGF la plus proche : 44m

Niveau estimé de la nappe : 38m

35. Ile du carrée : Puits

L'accès au puits 35 dont le niveau avait été relevé en février 2008 n'est plus possible.

Il serait possible d'aller relever ce puits en passant en canoë par l'Ardèche puis en remontant la lône à pied.

4. La Tuilerie : échelle limnimétrique

Niveau lu sur l'échelle : 35cm – Hauteur max : 90cm

Cote NGF la plus proche : 45m

5. La Tuilerie : forage pour l'irrigation (M. Chavaret)

Niveau de la nappe : 4,84m

Cote NGF la plus proche : 45m

Il y a de plus potentiellement une cote marquée à côté du puits sur 4 parpaings : 44,43m

Niveau estimée de la nappe : 39,59m

6. Proche de La Tapy (300m) : forage pour l'irrigation (M. Chavaret)

Niveau de la nappe : 5,2m

Pompage activé depuis le lundi précédent : 50m³/h

Cote NGF la plus proche : 44m

Niveau estimée de la nappe : 38,8m

Nous avons informé monsieur Chavaret que des prélèvements d'invertébrés se feront plus tard.

7. Cabane en béton (sous la ligne électrique) : forage pour l'irrigation

Niveau de la nappe : 3,97m

Cote NGF la plus proche : 44m

Niveau estimé de la nappe : 40,03

8. Le Bordalet : forage pour l'irrigation

Niveau de la nappe : 5,40 (ajout de 70cm pour retrouver le niveau de la route)

Cote NGF la plus proche : 48m

Niveau estimé de la nappe : 42,60m

9. Proche Les Biordonnes : gros puits (diamètre 120cm)

Niveau de la nappe : 4m

Cote NGF la plus proche : 47m

Niveau estimé de la nappe : 43m

10. Proche La Bégude et La Poudrière : puits

Gros puits (diamètre 120cm).

Niveau non mesuré (situé sur les moyennes terrasses)

Travail restant à effectuer :

- Prospection sur la rive droite de l'Ardèche
- Mesure du point 35
- Mesure du point 10
- Mesure d'une hauteur de l'Ardèche (Pont de Saint-Martin)
- Transmettre la localisation des puits au BE qui réalisera la piézométrie et l'UMR 5023 pour le prélèvement des invertébrés.

La carte ci-dessus localise :

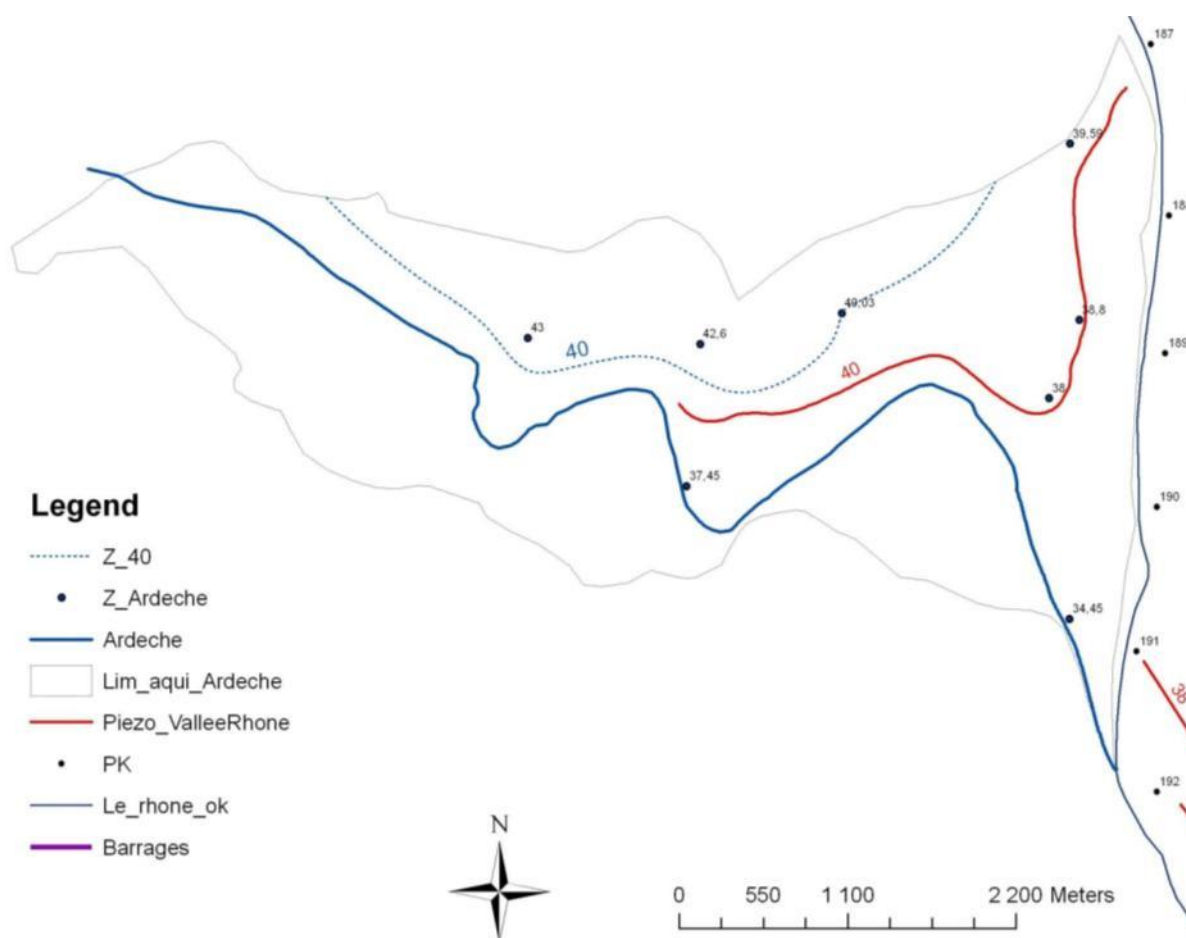
- les niveaux d'eau estimés de la nappe et de l'Ardèche le 27 avril 2011 (points noir avec cote « Z_Ardèche »)
- le tracé de l'Ardèche (ligne bleue épaisse « Ardèche »)
- le tracé du Rhône (ligne bleue fine « Le_Rhône-ok »)
- la limite de la nappe (ligne grise « Lim_aqui_Ardèche »)
- la courbe piezo non datée du RGM (en rouge « Piezo_ValléeRhône »)
- la courbe piezo calculée vite fait par interpolation à partir des niveaux estimés de la nappe et de l'Ardèche le 27 avril 2011 (Pointillés bleus « Z_40 »)

On constate que le niveau de la nappe estimé le 27 avril 2011 est plus bas que pour la piezo BRGM.

Le gradient de nappe (i) au niveau du point où l'on a estimé le niveau de l'Ardèche (37,45m) est de l'ordre de :

$$i = 0,052\%$$

$$\text{Avec : } \Delta H \sim 40 - 37,45 = 2,55 \text{ et } d \sim 700\text{m}$$





Carte de localisation des stations visitées à la confluence Rhône/Ardèche

3.9. 28 avril 2011 : CR de la sortie de terrain – Beauchastel/Rhône-Eyrieux

Sortie de terrain Chute CNR de Beauchastel – Confluence Rhône-Eyrieux 28 avril 2011

Présents : Laurent Cadilhac (AE-RMC), Gudrun Bornette (UMR 5023), Pierre Marmonier (UMR 5023), Christophe Piscart (UMR 5023), Didier Graillot (ENSM-SE) et Frédéric Paron (ENSM-SE)

L'objectif de la journée a consisté à effectuer un premier diagnostic des échanges nappes/rivières sur le secteur.

Pour la journée du 28 avril 2011 la Banque Hydro nous donne les informations suivantes pour les débits des cours d'eau concernés aux stations de mesure les plus proches (les débits sont donnés en m³/s accompagnés de la hauteur entre parenthèses).

Heure	Rhône à Valence	Eyrieux à Les Ollières
9h00	471 (2,35)	6 (0,06)
13h00	351 (2,34)	6 (0,05)
18h00	350 (2,33)	5 (0,05)

Les stations suivantes numérotées de 1 à 17 sont tous localisés sur les cartes ci-après et sur la carte de localisation générale en fin de documents.

La cote NGF la plus proche du lieu est donné à partir de la carte IGN 1 :25 000^e.

1. Eyrieux – Rive droite de l'Eyrieux – Le Garry (Beauchastel)

Cote NGF la plus proche : 102m

Géologie :

- Fz : alluvions fluviales récentes (cours de l'Eyrieux et mince bande de par et d'autre)
- FY : Alluvions des basses-terrasses wurmiennes (entre FZ et la route)
- Formations encaissantes : Micachistes et gneiss fin à biotite et muscovite

La rive droite est fortement érodée. Il y a un dénivelé d'au moins 3m entre le niveau de la plaine et les plages de galets. La coupe révélée par l'érosion est approximativement la suivantes (du haut vers le bas) :

- 20cm de sol
- 20cm de galets fluviaux dans une matrice sablo-argileuse
- 2 à 3m de sable fin.

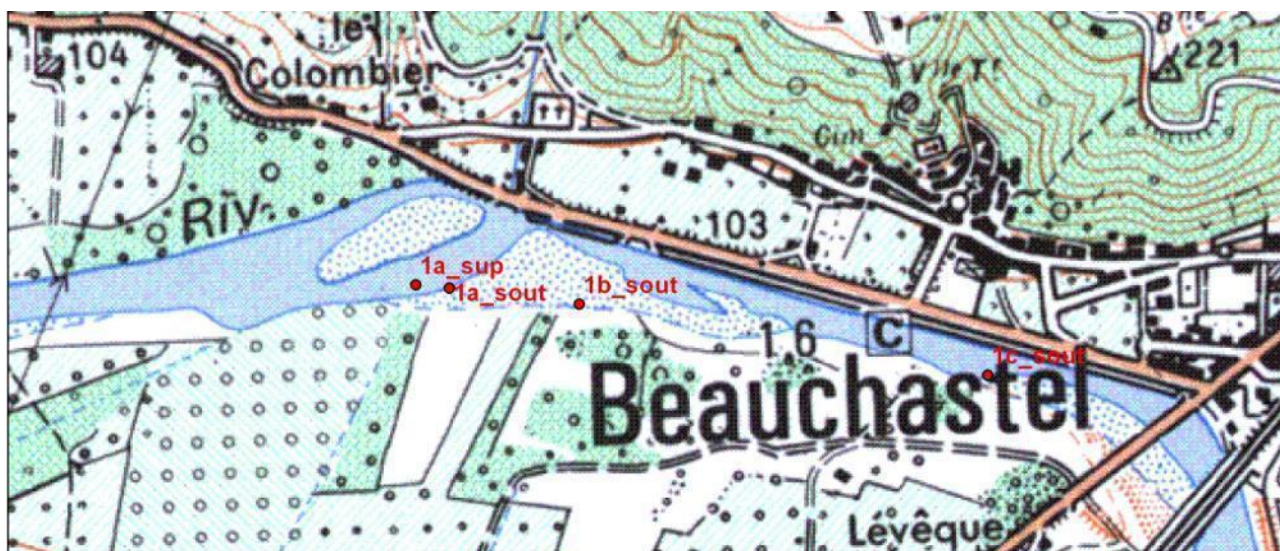
Le fond de la rivière est pavé à cet endroit de galets (calcaires, granites, basaltes, gneiss...) assez gros recouvert de micro-algues. Il y a par endroit des dépôts de sables.

Le tableau suivant résume les valeurs des paramètres mesurées dans les échantillons d'eaux superficielles et souterraines. Les eaux souterraines ont été prélevées à 25cm de profondeur à environ 50cm de la berge (ce qui sera le cas pour tous les prélèvements d'eau souterraine effectuées ce jour-là sauf indication contraire).

Les stations échantillonnées sont les suivantes (voir carte ci-après) :

- **1a** : amont d'un enrochement (signature de l'eau superficielle)
- **1b** : aval du même enrochement à quelques dizaines de mètres (signature de l'eau souterraine)
- **1c** : base de convexité quelques centaines de mètres du pont de Beauchastel – présence de dépôts sableux parmi les galets.

Stations de l'amont vers l'aval	Ecoulement	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T °C	pH
1a	Superficiel	85	17,4	8
1a	Souterrain	155	17	6,91
1b	Souterrain	120	16	
1c	Souterrain	136	15	



Carte de localisation des stations prospectées (1a à 1c)



Berges érodées de l'Yrieux et dépôts de galets



Coupe des berges de l'Yrieux révélée par l'érosion



Les biologistes au travail sur les plages de galets (à droite : station 1a)

Les valeurs de conductivités sont globalement faibles. Les eaux souterraines ont une conductivité plus forte (120 à 155 μ S/cm) que les eaux superficielles (85 μ S/cm).
Sur ce secteur la nappe semble alimenter l'Eyrieux.

2. Eyrieux – Rive droite de l'Eyrieux – Clessac (Saint-Laurent du Pape)

Cote NGF la plus proche : 109m

Géologie :

- Fz : alluvions fluviales récentes (cours de l'Eyrieux jusqu'à la route)
- FY : Alluvions des basses-terrasses wurmiennes (entre FZ et le GR)
- Formations encaissantes : Micachistes et gneiss fin à biotite et muscovite

A cet endroit l'aspect de la rivière et des berges est sensiblement le même malgré une position plus à l'amont.

Le tableau suivant résume les valeurs des paramètres mesurées dans les échantillons d'eaux superficielles et souterraines. Les eaux souterraines ont été prélevées à 25cm de profondeur à environ 50cm de la berge ou dans des puits.

Station de l'amont vers l'aval	Ecoulement	Conductivité (μ S/cm)	T °C
2a	Souterrain / Puits	135	13,5
2b	Souterrain / Puits	80	12,8
2c	Superficielle / Eyrieux	81	17,5
2d	Souterrain / Eyrieux	121	19
2e	Souterrain / Eyrieux	88,5	15,2
2f1	Souterrain / Eyrieux	165	16,3
2f2	Souterrain / Eyrieux	170	15,7

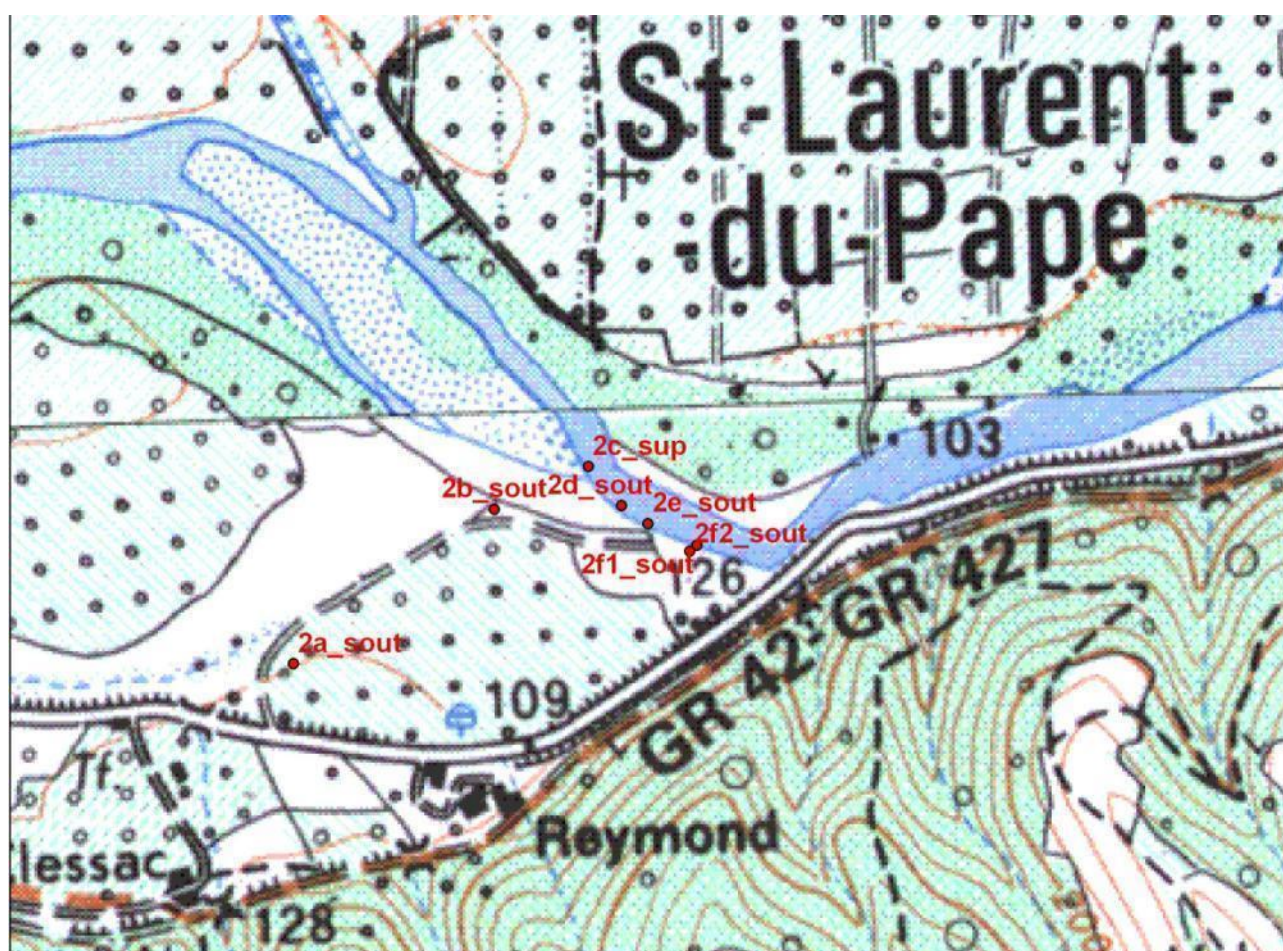
Les stations échantillonnées sont les suivantes (voir carte ci-après) :

- **2a** : pompage pour l'irrigation des arbres fruitiers (eau à signature souterraine)
- **2b** : pompage pour l'irrigation des arbres fruitiers, proche d'une éolienne (eau à signature superficielle, alimentation de nappe par l'Eyrieux induite par le pompage)
- **2c** : signature de l'eau superficielle
- **2d** : signature de l'eau souterraine (prélèvement dans une base de convexité face à un mur de galet sur la rive opposée)
- **2e** : signature de l'eau superficielle bien que le prélèvement a été effectué en souterrain
- **2f1** : signature de l'eau souterraine (passage d'une ancienne lône)
- **2f2** : idem mais à 1m du bord



Puits et éolienne (station 2b) / Base de convexité (station 2d)

Sur ce secteur la nappe semble alimenter majoritairement l'Eyrieux sauf en 2b (effet du captage) et en 2e ou localement de l'eau superficielle s'infiltré.



Carte de localisation des stations prospectées (2a à 2f2)

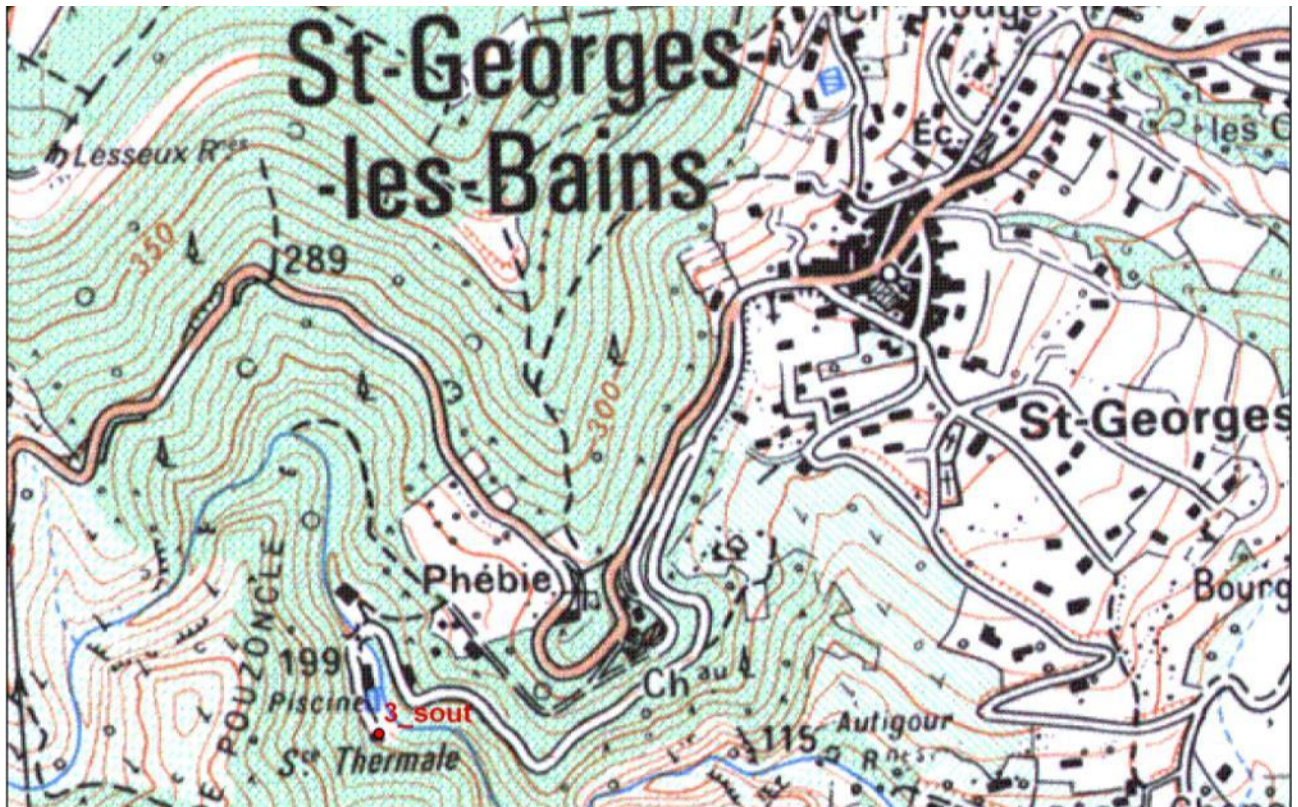
3. Le Turzon – Rive droite du Turzon – Source Thermale (Saint-Georges les Bains)

Cote NGF la plus proche : 199m

Géologie : Granite calco-alkalin à grains moyen, porphyroïde, à biotite

Des mesures effectuées dans de l'eau souterraine filtrant du rocher dans un petit bassin à l'intérieur d'une maison en ruine donnent les résultats suivants :

- conductivité : 65 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- température : 11,5°C



Carte de localisation de la station prospectée (3)



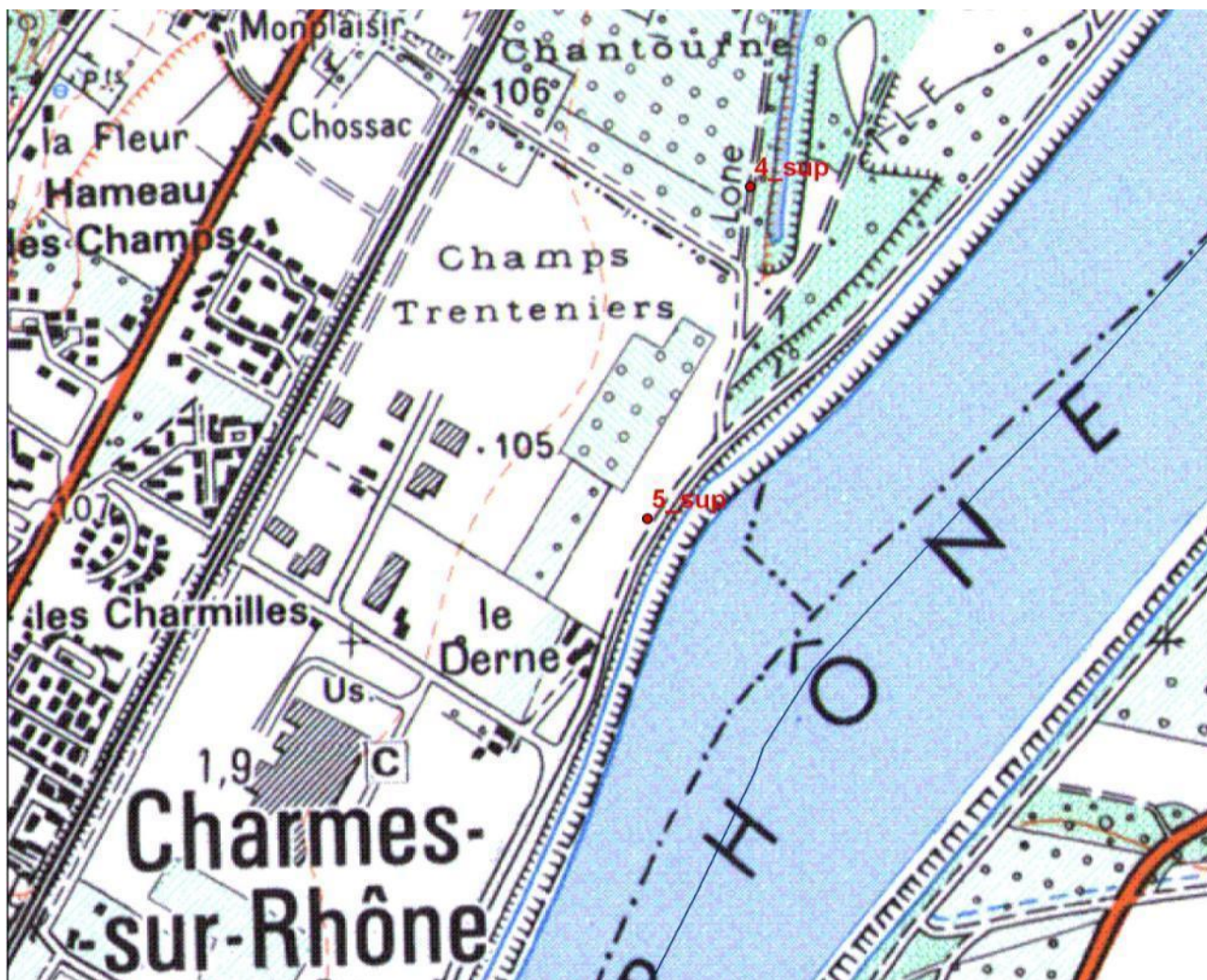
Le lit rocheux du Turzon

4. Lône de l'Ove – Rive droite du Rhône – Chantourne (Charmes sur Rhône)

Cote NGF la plus proche : 99m à 106m

Géologie :

- Fy : Alluvions de basses terrasses wurmiennes
- Formations encaissantes complexes (Loess et terrasses mindeliennes sur granite calco-alcalin)



Carte de localisation des stations prospectées (4 et 5)

Il s'agit d'une lône eutrophe couverte de lentilles d'eau et dans laquelle il n'a pas été jugé utile de faire des prélèvements. La lône est en contrebas par rapport au chemin.

5. Contre-canal – Rive droite du Rhône – Le Derne (Charmes sur Rhône)

Cote NGF la plus proche : 105m

Géologie :

- Fy : Alluvions de basses terrasses wurmiennes
- Formations encaissantes complexes (Loess et terrasses mindeliennes sur granite calco-alcalin)

Ce contre-canal est situé plusieurs mètres en contrebas par rapport au chemin. Le Rhône dans le canal de dérivation est perché par rapport à la plaine.

La végétation aquatique présente laisse à penser que le contre canal est alimenté par de l'eau phréatique polluée. Il y a des algues fixées sur la végétation. Toutefois, la conductivité est plutôt caractéristique de l'eau du Rhône (environ 450µS/cm ; mesurée à 478µS/cm station 6).



Vues du contre-canal

Canal de dérivation – eau superficielle		
Physico-chimie	Végétation aquatique	Invertébrés aquatiques
- Conductivité : 460µS/cm - Température : 16,5°C	- Potamot crépu - Myriophylle - Nasturtium - Lemna	- <i>Gammarus Pullex</i> - <i>Asellus aquaticus</i>

6. Ruisseau de Lambert – Rive gauche du Rhône – Ferme Lazare (Etoile sur Rhône)

Cote NGF la plus proche : 101m

Géologie :

- FZ : alluvions fluviales récentes
- Formations encaissantes : Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes

Le ruisseau est encaissé dans la plaine d'environ 1 à 2m. Le sédiment qui compose le fond du lit est fin : sable et limon légèrement argileux.

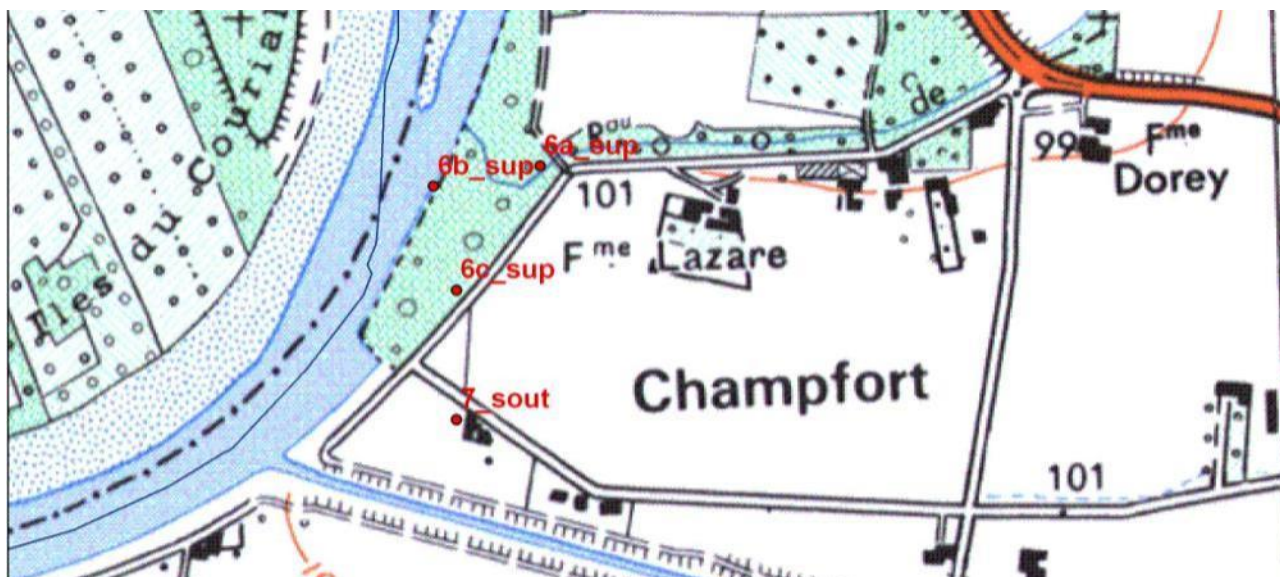
Des prélèvements d'eau ont été effectués dans les eaux superficielles du ruisseau (6a) et du Rhône proche (6b). Au niveau de la confluence ruisseau de Lambert/ Rhône il y a environ 50cm de vase qui dégage une odeur anoxique et des bulles de gaz (H₂S).

Il y a de plus une échelle limnométrique de la CNR au PK 120,5 (6c). Le niveau du Rhône était à environ 50cm en dessous du zéro de l'échelle. Le haut de l'échelle est à 7m (environ 1m au-dessous du haut de la digue).

Niveau du Rhône estimé : 92,50m

Station de l'amont vers l'aval	Ecoulement	Conductivité (µS/cm)	T °C
6a	Superficiel / Ruisseau de Lambert	590	14,7
6b	Superficiel / Rhône	478	18,5

Compte-tenu de sa conductivité, le ruisseau semble drainer des eaux souterraines.



Carte de localisation des stations prospectées (6a à 7)



Le Rhône et le barrage de dérivation – Echelle limnimétrique

7. Puits dans une maison – Rive gauche du Rhône – Champfort (Etoile sur Rhône)

Cote NGF la plus proche : 101m

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes (le puits est situé à la limite avec les alluvions fluviales récentes)

Les valeurs relevées dans ce puits sont les suivantes :

- Conductivité : $620\mu\text{S}/\text{cm}$
- Température : $14,5^\circ\text{C}$
- Niveau d'eau : 6,80

Niveau de nappe estimée : 94,20m (compte-tenu du niveau estimé du Rhône au point 6c, ce dernier draine la nappe).

On peut estimer le gradient de nappe (i) entre le puits et le Rhône :

$i = 0,75\%$

avec : $\Delta H \sim 94,20 - 92,50 = 1,7\text{m}$ et $d \sim 150\text{m}$

8. Puits dans un champ – Rive gauche du Rhône– Josserands (Etoile sur Rhône)

Cote NGF la plus proche : 98m et 100m

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes

Niveau d'eau : 3,05

Niveau de nappe estimée : 95,95

9. Puits dans un champ – Rive gauche du Rhône – Le Cerisier (Etoile sur Rhône)

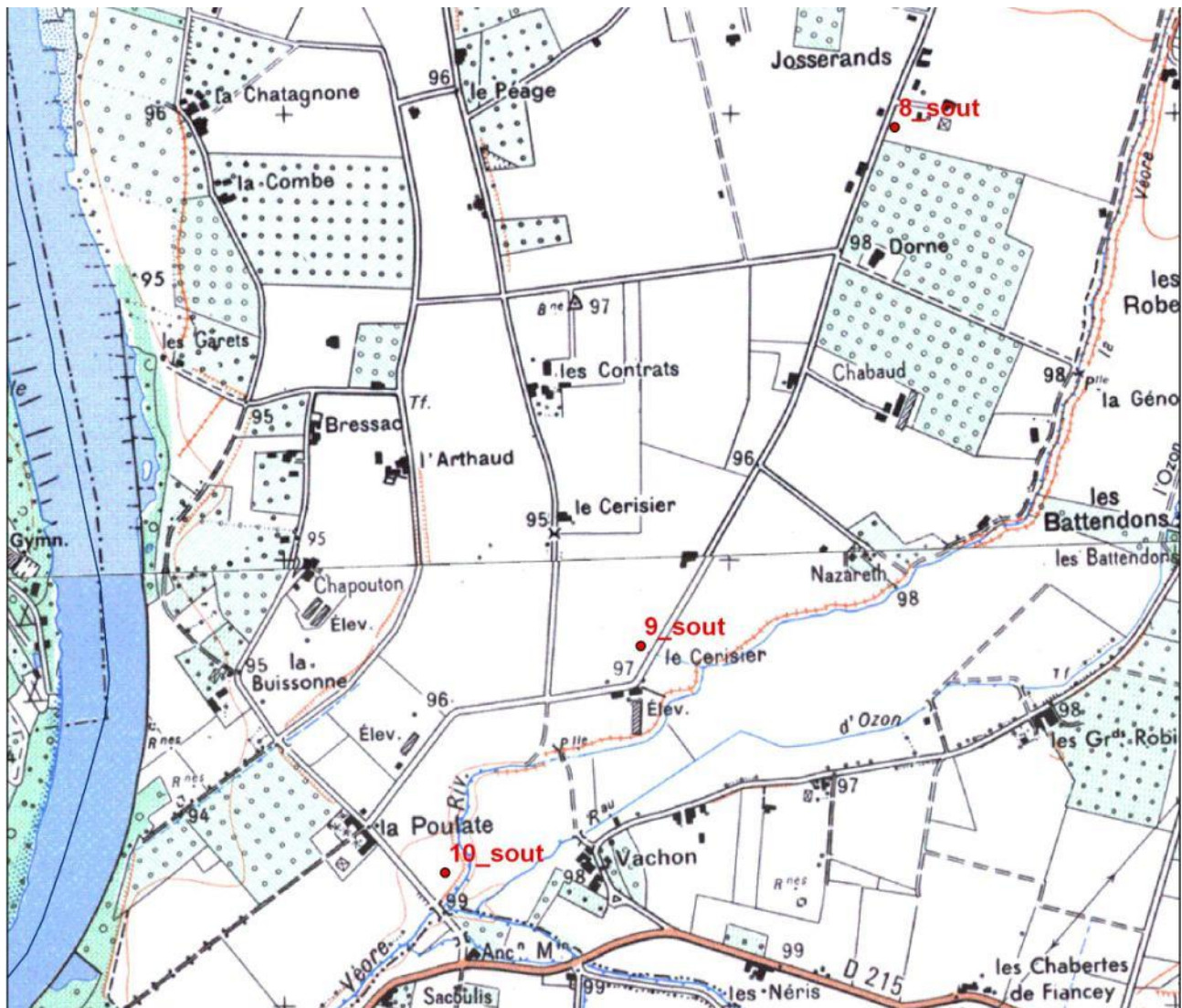
Cote NGF la plus proche : 97m

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes

Niveau d'eau : 2,96

Niveau de nappe estimée : 94,04



Carte de localisation des stations prospectées (8 à 10)

10. Autres puits – Rive gauche du Rhône ((Etoile sur Rhône)

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes ou alluvions récentes

D'autres puits ont été repérés le long de la route :

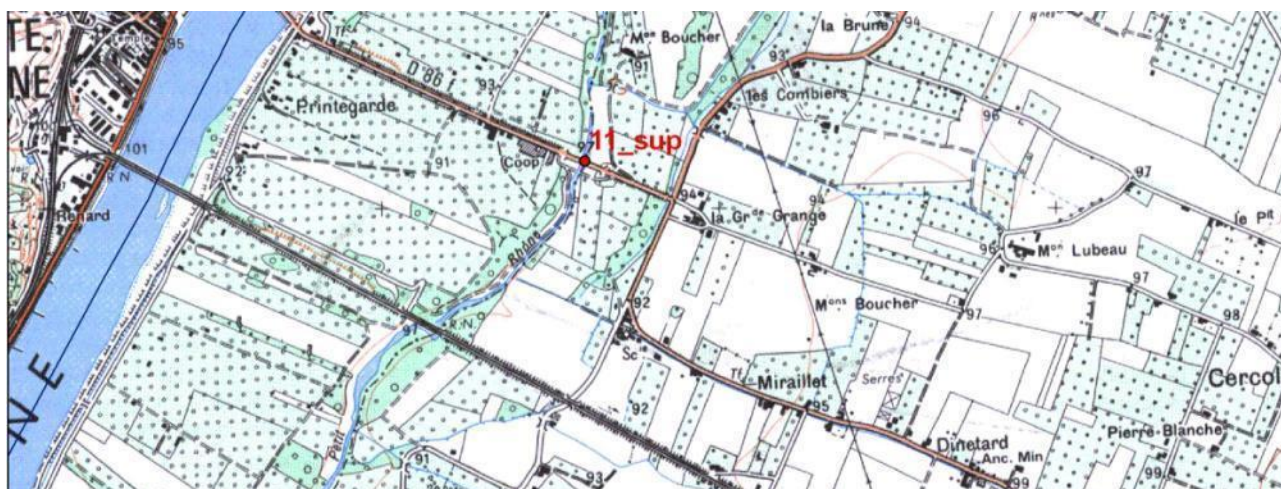
- avant le pont sur la Véore (La Poulate) / la rivière est encaissée d'environ 4m par rapport à la route (nappe perchée ?)
- zone de puits le long de la D215 et piézo CNR avant le pont sur la Lône du Petit-Rhône

11. Lône du Petit-Rhône – Rive gauche du Rhône – Pont (coop.) (Livron sur Drôme)

Cote NGF la plus proche : 97m

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes ou alluvions récentes



Carte de localisation de la station prospectée (11)

Les valeurs mesurées dans l'eau de cette lône sont les suivantes :

- Conductivité : 630 μ S/cm
- Température : 14,2°C

On note la présence de végétation aquatique :

- Berula
- Cresson
- Callitriche
- Veronica
- Fougère aquatique (Azolla ?)

La conductivité mesurée dans cette lône témoigne d'apports phréatiques importants. Il faudrait s'assurer que cette lône n'est pas connectée au Rhône à l'amont.



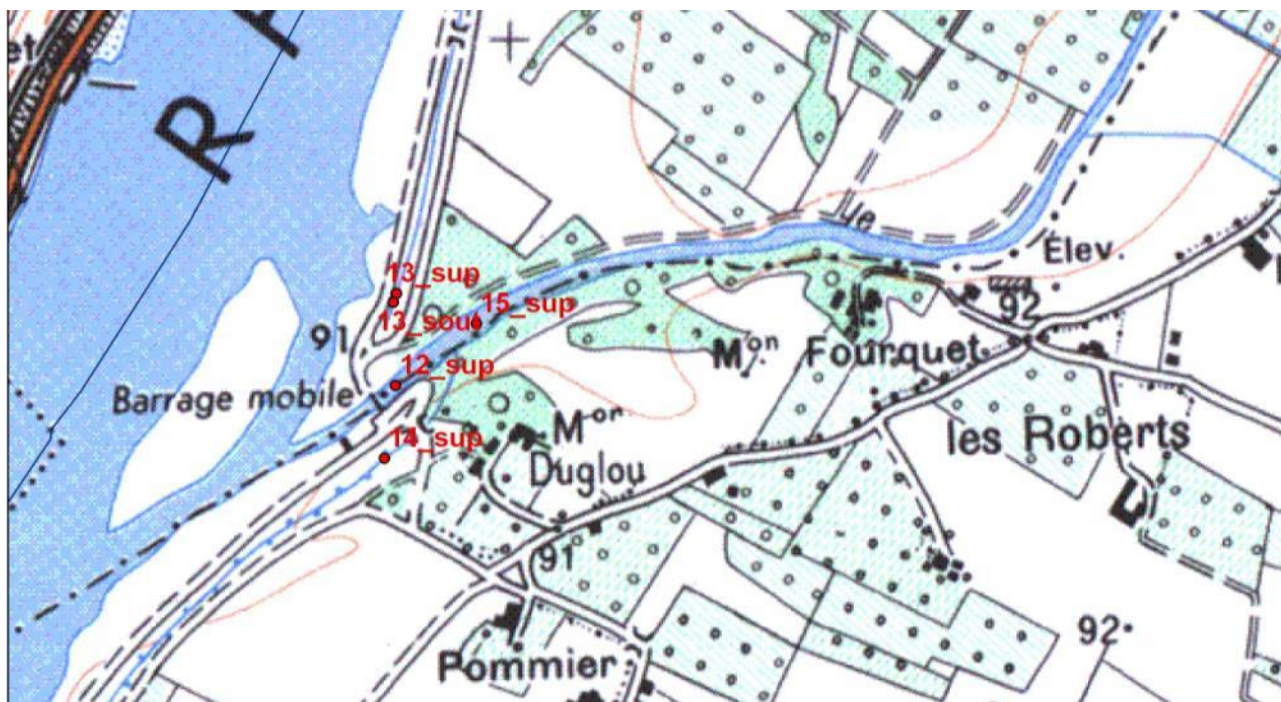
Vue d'ensemble de la lône – Genre Azolla ? en gros plan

12. Lône du Petit-Rhône – Rive gauche du Rhône – Barrage mobile (Livron sur Drôme)

Cote NGF la plus proche : 91m

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes ou alluvions récentes



Carte de localisation des stations prospectées (12 à 15)

Les valeurs relevées dans la lône au pied du barrage mobile sont les suivantes :

- conductivité : 460 μ S/cm
- Température : 14,6°C

Le niveau du Rhône est situé 2 à 3 m au dessus du niveau de la lône (présence de lorons dans la lône sans doute liés à une mise en charge par le Rhône situé au-dessus).



Barrage mobile / Lône du Petit-Rhône au pied du barrage mobile (12)

13. Contre-canal amont (rive droite de la lône) – Rive gauche du Rhône – Barrage Mobile (Livron sur Drôme)

Cote NGF la plus proche : 91m

PK le plus proche : 130

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes ou alluvions récentes

Les valeurs relevées dans l'eau du contre canal sont les suivantes :

Stations	Ecoulement	Conductivité (μS/cm)	T °C	pH
13_sup	Superficiel	465	13,6	
13_sout	Souterrain (pompage difficile)	430	16	

Invertébrés présents :

- *Gammarus pulex*
- *Gammarus bresili*

Végétation aquatique présente :

- *Berula*

14. Contre-canal aval (rive gauche de la lône) – Rive gauche du Rhône – Barrage mobile (Livron sur Drôme)

Cote NGF la plus proche : 91m

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes ou alluvions récentes

Les valeurs relevées dans l'eau du contre-canal sont les suivantes :

- Conductivité : 486μS/cm
- Echelle : 52cm (le zéro est au fond du contre-canal)

15. Lône du Petit-Rhône (amont confluence contre-canal) – Rive gauche du Rhône – Barrage mobile (Livron sur Drôme)

Cote NGF la plus proche : 91m

Géologie :

- Limons superficiels de faible épaisseur sur basses terrasses wurmiennes ou alluvions récentes

Les valeurs relevées dans l'eau de la lône sont les suivantes :

- Conductivité : 500 μ S/cm
- Température : 15,9°C

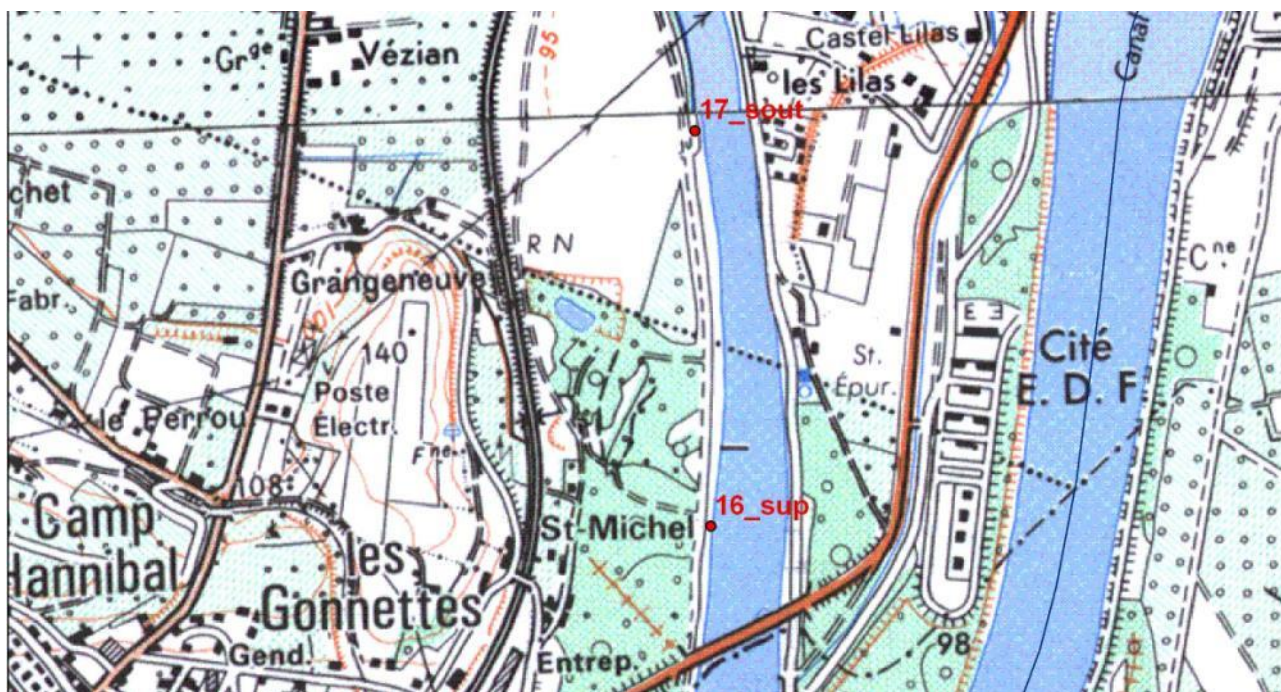
Compte-tenu de leurs valeurs de conductivités proches de celle du Rhône, les stations 12, 13, 14 et 15 semblent influencées par des eaux superficielles en provenance du Rhône y compris la station sur la lône du Petit-Rhône (15).

16. Eyrieux – Rive droite de l'Eyrieux – Saint-Michel (La Voulte sur Rhône)

Cote NGF la plus proche : 93m

Les valeurs relevées dans l'Eyrieux sont les suivantes :

Stations	Ecoulement	Conductivité (μ S/cm)	T °C	pH
16_sup	Superficiel	91	17	
16_sout	Souterrain (pompage impossible)	?	?	



Carte de localisation des stations prospectées (16 à 17)

17. Eyrieux – Rive droite de l'Eyrieux – Saint-Michel/Vézian (Beauchastel)

Cote NGF la plus proche : 93m

Les valeurs relevées dans l'écoulement souterrain de l'Eyrieux sont les suivantes :

- Conductivité : 239 μ S/cm
- Température : 17,9°C

Cette dernière mesure semble confirmer les apports d'eau souterraine dans l'Eyrieux au niveau d'un bac de sable fin.



Banc de sable fin sur l'Eyrieux

BILAN :

1. Les situations sont diversifiées et intéressantes du point de vue des échanges nappe/Rivière on distingue :

- Gorges de l'Eyrieux et confluence avec le Rhône : Configuration de petite plaine d'alluvions fluviales récentes encaissées dans des gorges de roches métamorphiques (micaschistes)
La nappe alluviale semble alimenter majoritairement l'Eyrieux en basses-eaux.

- Plan d'eau du Rhône à l'amont du barrage de dérivation : Configuration de petites plaines alluviales récentes en bord de Rhône et d'alluvions de basses terrasses wurmiennes réduites. Les formations encaissantes sont diversifiées et complexes : Loess et terrasses mindeliennes sur granite calcaire).

Présence d'une lône eutrophe avec contre-canaux et potentiel alimentation souterraines de ces derniers par les terrasses en basses-eaux

- Vieux-Rhône amont et lône : Configuration de petites plaines alluviales récentes en bord de Rhône et d'alluvions de basses terrasses wurmiennes étendues sous limons (nappes alluviales et de terrasses).

La lône et le Vieux-Rhône semblent drainer les eaux souterraines en basses-eaux.

- Vieux-Rhône aval et lône dans la queue de remous de l'ouvrage suivant (contre-canal) : Configuration de petites plaines alluviales récentes en bord de Rhône et d'alluvions de basses terrasses wurmiennes étendues sous limons.

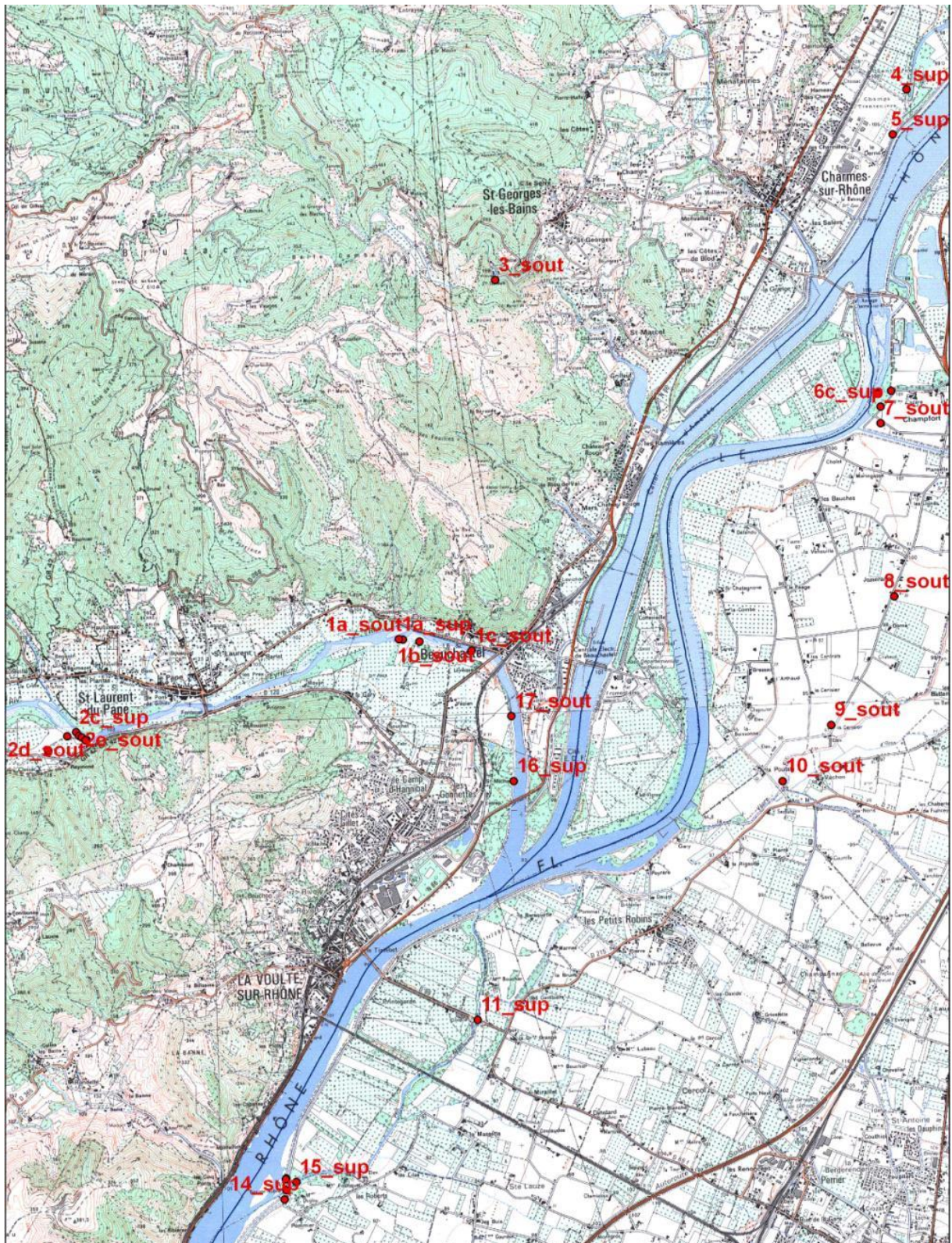
La lône semble potentiellement alimentées par des eaux souterraines et superficielles (la proportion d'eau superficielle augmentant vers l'aval ; celle d'eau souterraine vers l'amont)

2. On souligne le manque de données piézométriques et d'étude sur le secteur :

- en attente données CNR
- en attente données BRGM via l'AE-RMC
- autres ??

3. Prévoir une réunion de travail (Comité technique) avant ou pendant l'été :

- pour confirmer le choix du secteur d'étude
- pour établir un plan d'action pour poursuivre les mesures de terrain selon les différentes métriques



Carte de localisation générale des stations visitées
 (les stations 12 et 13 qui n'apparaissent pas sont situées au niveau des stations 14 et 15)

3.10.15 septembre 2011 : CR du comité technique – Université Lyon I

Comité technique du 15 septembre 2011 Université Lyon I

Echanges nappes/Rhône – Projet « Eau-Sout' »

Présents : Laurent Cadilhac (AE-RMC), Pierre Marmonier (LEHNA-HBES), Christophe Piscart (LEHNA-HBES), Gudrun Bornette (LEHNA-ECV), Florent Arthaud (LEHNA-ECV), Ian Overton (Univ. Adélaïde-CSIRO - Australie), Didier Graillot (ENSMSE-GEOenvironnement), Eric Lalot (ENSMSE- GEOenvironnement), Frédéric Paran (ENSMSE- GEOenvironnement)

Rappel de l'ordre du jour :

1. Distribution du rapport phase 3 version papier
2. Point rapide sur les présentations du séminaire hydrogéomorphologie AE-RMC du 22/09
3. Planification du prochain Comité Plénier
4. Point sur l'avancement de la thèse de Eric Lalot
5. Présentation des travaux de Ian Overton
6. Phase 4
7. Points divers

1. Distribution du rapport phase 3 version papier

Le rapport phase 3 version papier (+ Annexes et Atlas cartographique) a été remis aux présents. Il reste 1 exemplaire à remettre à Y. Travi et 2 exemplaires pour la CNR (Y. Taravel et E. Doutriaux). La phase 3 est donc définitivement clôturée.

2. Point rapide sur les présentations du séminaire hydrogéomorphologie AE-RMC du 22/09

Les diapositives préparées par P. Marmonier et de D. Graillot pour le séminaire ont été passées en revue. Les modifications nécessaires y ont été apportées.

3. Planification du prochain Comité Plénier

Le prochain Comité Plénier est à planifier pour l'hiver 2012/2013.

4. Point sur l'avancement de la thèse de Eric Lalot

Suite à la présentation de E. Lalot les questions suivantes ont été abordées :

- Un « arrêté pompage » va bientôt sortir pour diminuer les quantités d'eau extraites au niveau des pompages OSIRIS

- Le modèle élaboré dans le cadre de cette thèse sera transposable à d'autres sites sous réserve de disponibilité des données
- Les 6 sondes commandées devraient être livrées dans les jours qui viennent. En plus de cette sonde, L. Cadilhac peut mettre à notre disposition 1 sonde supplémentaire appartenant à l'AE-RMC
- Les ouvrages équipés avec ces sondes devront être définis en relation avec L. Cadilhac. Un secteur situé à l'amont des pompes du SIGEARP est pressenti

5. Présentation des travaux de Ian Overton (Univ. Adélaïde – CSIRO - Australie)

I. Overton a présenté ces travaux sur la Murray River en Australie. Il a une approche de géographe mobilisant des « modèles » pluridisciplinaires. Sa présentation a abordé entre autres les points suivants :

- Surexploitation de la ressource en eau (irrigation) sur la rivière Murray et impacts sur les débits
- Confrontation de l'usage agricole de l'eau et des besoins des milieux naturels
- Modèles ressources eau-poissons
- Problématique de salinisation
- Services rendus par les écosystèmes

La présence de I. Overton en France (jusqu'à avril-juin 2012) pourrait être l'occasion de monter des projets de recherche communs, notamment des projets européens.

6. Phase 4

6.1. Publication

La publication méthodologique a été soumise dans la revue internationale *Water Research* fin août 2011.

6.2. Retour sur la visite de terrain à Beauchastel

Le secteur de Beauchastel est validé en tant que terrain d'étude pour la phase 4. Le rapport final de cette phase est attendu en décembre 2012. Les travaux devraient se dérouler comme suit :

Hydraulique :

- Acquisition des données CNR (reçues depuis août 2011)
- Première caractérisation des échanges au plus tard pour février/mars 2012 (à transmettre à C. Piscart dès réalisation)
- Prévoir une campagne piézométrique avec les élèves de l'Ecole des Mines
- Prévoir un stage d'élève de l'Ecole des Mines pour améliorer la méthode actuelle (prise en compte des incertitudes et des contraintes d'interpolation)
- Diagnostic définitif des échanges à fournir au plus tard à l'automne 2012

Invertébrés :

- Campagne d'échantillonnage au printemps 2012
- Diagnostic définitif des échanges à fournir au plus tard à l'automne 2012

Macrophytes :

- Campagne d'échantillonnage à l'été 2012
- Diagnostic définitif des échanges à fournir au plus tard à l'automne 2012

Croisement des métriques :

- Les diagnostics individuels de chaque métrique devront être fournis en septembre 2012
- Une réunion de diagnostic commun devra être organisée en septembre/octobre 2012

6.3. Point sur la confluence Rhône/Ardèche (Donzère-Mondragon)

Pour ce secteur :

- le diagnostic isotopique est en cours de rédaction (Y. Travi)
- la campagne piézométrique devrait être lancée en octobre 2011 par l'AE-RMC
- le diagnostic hydraulique des échanges sera réalisé sur la base de cette piézométrie
- l'échantillonnage d'invertébrés est rendu difficile par manque de puits connus. De plus, les premiers résultats indiquent peu d'apports d'eau souterraine du versant de l'Ardèche. Une autre campagne de prélèvement est prévue en octobre/novembre 2011 (résultat en août 2012)

6.4. Point sur l'organisation du travail – Croisement des métriques

Une étude de la corrélation entre métriques sera réalisée par F. Paran. Pour cela il est nécessaire de lui faire parvenir :

- des données SIG d'indice macrophyte de probabilité d'apport phréatique sur Donzère-Mondragon (G. Bornette)
- des données SIG de spatialisation des coordonnées factorielles de l'ACP pour la chimie des eaux (G. Bornette)
- des données d'indice invertébré (C. Piscart)

6.5. Point sur le guide méthodologique/technique

Un premier jet de la maquette/plan du guide est attendu pour décembre 2011. Une version définitive sera produite dans le rapport de décembre 2012.

CONCEPT ET OBJECTIF DU GUIDE

Ce guide doit répondre à la question suivante : *Quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappes/Rhône ?*

DESTINATION DU GUIDE

Ce guide est destiné à l'usage des techniciens de l'eau : *SAGE, Contrats rivières, Agences de l'Eau, Bureaux d'études, ONEMA, DREAL...*

EXEMPLES SUR LESQUELS S'APPUYER

A titre d'exemple, il sera possible pour la création de ce guide de s'inspirer :

- du guide pour la restauration hydromorphologique des rivières (AE-RMC),

<http://www.eaurmc.fr/actualites-de-lagence-de-leau/detail-de-lactualite/article/un-nouveau-guide-pour-la-restauration-hydromorphologique-des-rivieres.html>

- des cahiers techniques de Rhône-Alpes (CREN)

<http://sitecren.cenrhonealpes.org/index.php/editiontech>

CONTENU ET ORGANISATION

Pour le contenu du guide (environ 50p), il s'agit d'exploiter en priorité ce qui a déjà été rédigé dans le cadre des trois rapports résultant du projet. Ce contenu devra bien sûr être réorganisé et complété selon les objectifs du guide :

- intégration de schémas de synthèse
- le cheminement de l'utilisateur dans le guide pourra être organisé selon un graphe avec renvois aux pages du guide)
- intégration d'une clef de détermination des invertébrés souterrains et des macrophytes
- conseils pour trancher lorsqu'il s'agit de choisir entre plusieurs méthodes ou entre les diagnostics issus de différentes méthodes
- description approfondie des différentes méthodes (coût, temps...)
- annexes techniques à prévoir en fonction des réponses à apporter aux utilisateurs et de son profil

Une réunion de travail est prévue le 30 septembre 2011 à 14h30 à Lyon pour élaborer un premier jet de la maquette/plan du guide méthodologique. Pour le bon déroulement de cette réunion il faut prévoir le matériel suivant :

- des post-it de différentes couleurs (commande passée par Z. Mazer)
- des marqueurs de différentes couleurs
- un ou deux appareils photo numérique

3.11.30 septembre 2011 : CR du comité technique – Université Lyon I

**Comité technique du 30 septembre 2011
Université Lyon I**

**Préparation du Guide méthodologique
Plan/Maquette**

Echanges nappes/Rhône – Projet « Eau-Sout' »

Présents : Pierre Marmonier (LEHNA-HBES), Gudrun Bornette (LEHNA-ECV), Florent Arthaud (LEHNA-ECV), Didier Graillot (ENSMSE-GEOenvironnement), Frédéric Paran (ENSMSE- GEOenvironnement)

Excusés : Laurent Cadilhac (AE-RMC), Christophe Piscart (LEHNA-HBES)

Ordre du jour :

1. Rappel des éléments discutés lors du précédent comité technique (15 septembre 2011)
2. Plan du guide
3. Annexes du guide
4. Schéma de la démarche (actions usager)
5. Graphe de cheminement général

1. RAPPEL des éléments discutés lors du précédent comité technique (15 septembre 2011)

- Concept et objectif du guide

Ce guide doit répondre à la question suivante : *Quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappes/Rhône ?*

- Destination du guide

Ce guide est destiné à l'usage des techniciens de l'eau : *SAGE, Contrats rivières, Agences de l'Eau, Bureaux d'études, ONEMA, DREAL...*

- Exemples sur lesquels s'appuyer

A titre d'exemple, il sera possible pour la création de ce guide de s'inspirer :

- du guide pour la restauration hydromorphologique des rivières (AE-RMC),

<http://www.eaurmc.fr/actualites-de-lagence-de-leau/detail-de-lactualite/article/un-nouveau-guide-pour-la-restauration-hydromorphologique-des-rivieres.html>

- des cahiers techniques de Rhône-Alpes (CREN)

<http://sitecren.cenrhonealpes.org/index.php/editiontech>

- contenu et organisation

Pour le contenu du guide (environ 50p), il s'agit d'exploiter en priorité ce qui a déjà été rédigé dans le cadre des trois rapports résultant du projet. Ce contenu devra bien sûr être réorganisé et complété selon les objectifs du guide :

- intégration de schémas de synthèse
- le cheminement de l'utilisateur dans le guide pourra être organisé selon un graphe avec renvois aux pages du guide)
- intégration d'une clef de détermination des invertébrés souterrains et des macrophytes
- conseils pour trancher lorsqu'il s'agit de choisir entre plusieurs méthodes ou entre les diagnostics issus de différentes méthodes
- description approfondie des différentes méthodes (coût, temps...)
- annexes techniques à prévoir en fonction des réponses à apporter aux utilisateurs et de son profil

2. PLAN DU GUIDE

Introduction (Chapitres 1 et 2)

Chapitre 1. Les échanges nappe/rivière sur le Rhône

- 1.1. Enjeux
- 1.2. Fonctionnement

Chapitre 2. Principe et résumé de la démarche

- 2.1. Evaluation qualitative des échanges (direction, sens, origine)
- 2.2. Evaluation de la quantité d'eau échangée (volume, contribution)
- 2.3. Evaluation de la qualité de l'eau

Démarche (Chapitres 3, 4 et 5 - Actions usager, Schéma 1)

Chapitre 3. Avancer dans l'évaluation

Ce qu'il faut pour évaluer les échanges

- 3.1. Définir les objectifs
- 3.2. Sélection au préalable
 - 3.2.1. Sélection de l'échelle (temps, espace)
 - 3.2.2. Sélection des métriques (atouts, limites)
- 3.3. Données existantes / Données manquantes

Chapitre 4. Mesurer et calculer

Comment évaluer les échanges (soi-même, sous-traitance ?)

- 4.1. Protocole
- 4.2. Calcul et interprétation

Chapitre 5. Conclure sur les échanges

Que peut-on tirer des mesures et calculs ?

- 5.1. Comment synthétiser ?
 - 5.1.1. Qualitativement
 - 5.1.2. Quantitativement
- 5.2. Comment être sûr ? (Evaluation de l'incertitude)
- 5.3. Pour cartographier

3. ANNEXES DU GUIDE

A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN

1. Lecture de cartes piézométriques / Loi de Darcy
2. Fabriquer une carte piézométrique
3. Générer un modèle TIN (analyse SIG)

A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation

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

A3. BIO A : Invertébrés

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

A4. BIO V : macrophytes

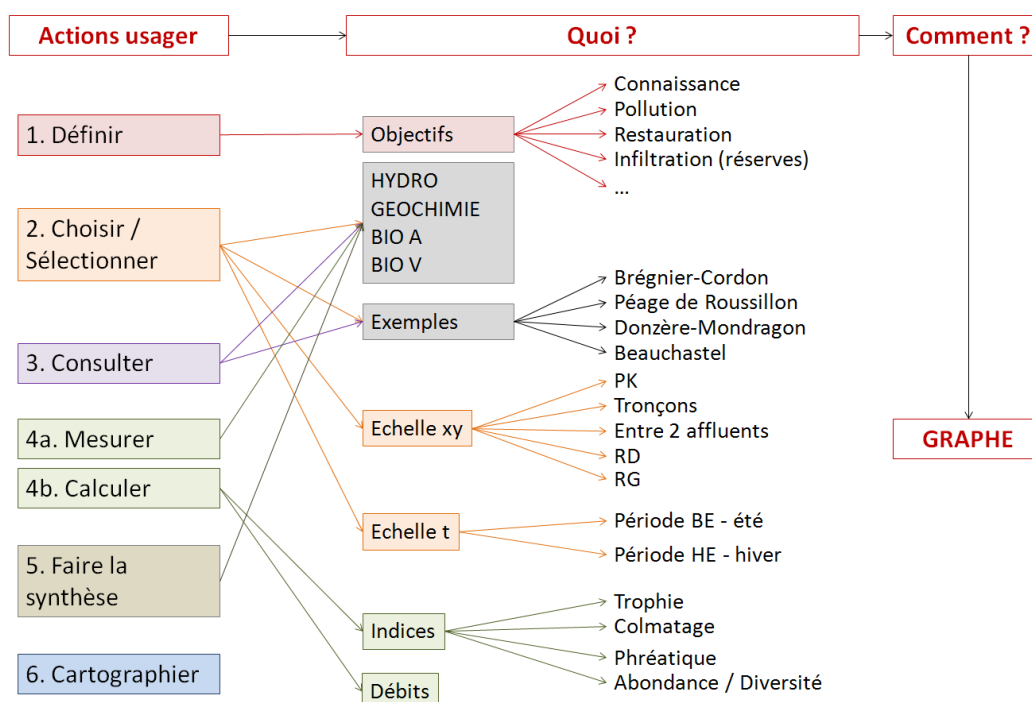
1. Echantillonnage
2. Identification (clef simplifiée)
3. Calculs des indices (trophie, apport phréatique, alluvionnement, global)

A5. Bases de données utiles et consultables

A6. Estimation des coûts et des difficultés

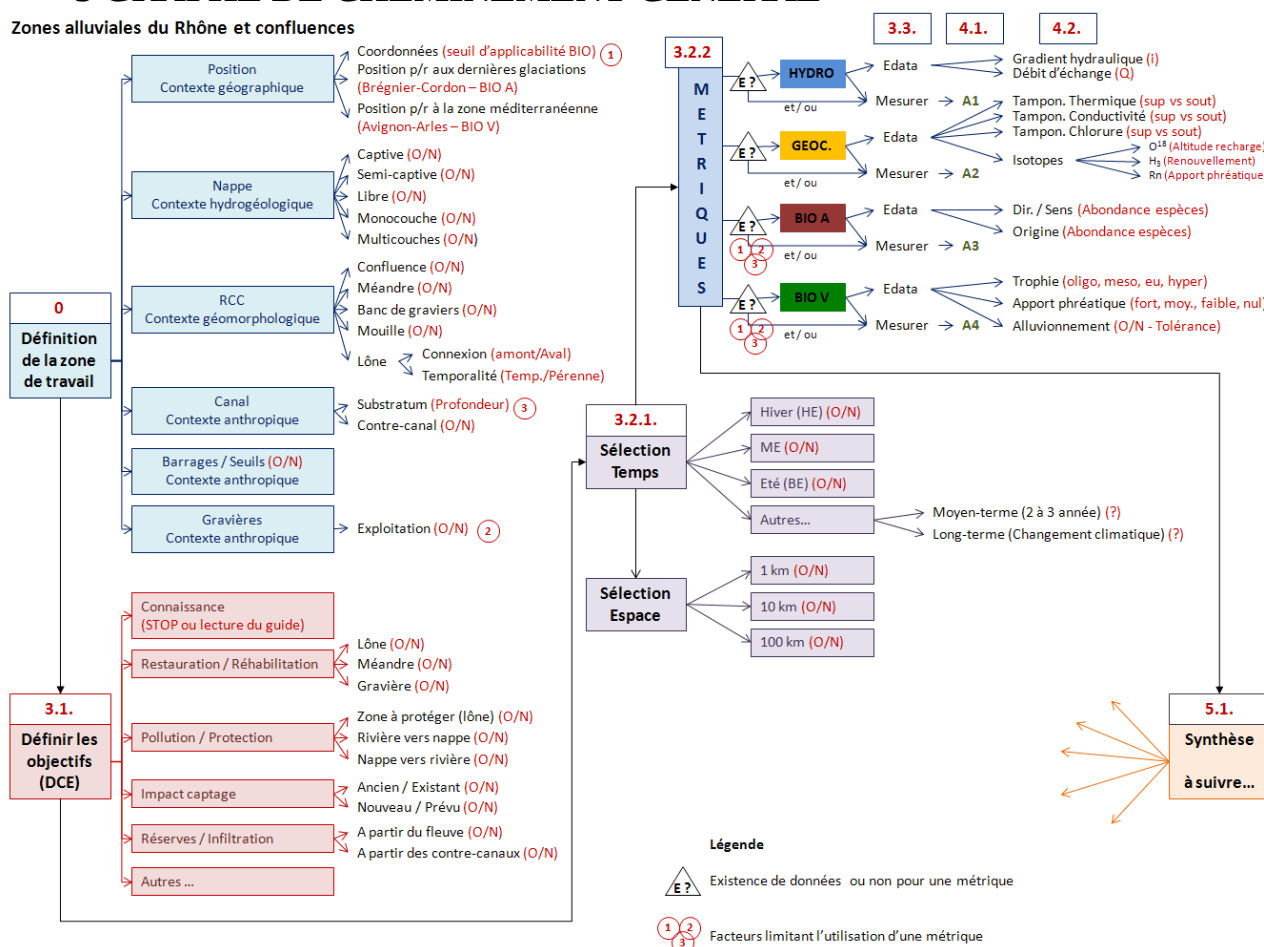
4. SCHEMA DE LA DEMARCHE (actions usager)

DEMARCHE



5 GRAPHE DE CHEMINEMENT GENERAL

Zones alluviales du Rhône et confluences



3.12.21 février 2012 : CR comité technique - Université Lyon I

Comité technique du 21 février 2012 Université Lyon I

Préparation du Guide méthodologique : Plan/Maquette Livrable de la phase 4 et contenu d'une phase 5

Echanges nappes/Rhône – Projet « Eau-Sout' »

Présents : Laurent Cadilhac (AE-RMC), Pierre Marmonier (LEHNA-HBES), Christophe Piscart (LEHNA-HBES), Gudrun Bornette (LEHNA-ECV), Florent Arthaud (LEHNA-ECV), Didier Graillot (ENSMSE- GéoSciences et Environnement), Frédéric Paron (ENSMSE- GéoSciences et Environnement), Eric Lalot (ENSMSE-GéoSciences et Environnement)

Ordre du jour :

- a. Validation du plan du guide (5 chapitres et 6 annexes)
- b. Validation du schéma de la démarche en lien avec le plan du guide
- c. Reprise du graphe de cheminement général
- d. Approfondissement de l'étape 5 "Comment conclure sur les échanges ?", "Comment synthétiser les diagnostics et s'en sortir en cas de contradiction ?"
- e. Positionnement des sondes de pressions à enregistrement continu sur Péage-de-Roussillon (Thèse Eric Lalot)
- f. Divers (problème avec la région PACA, rapport phase 4 pour décembre 2012, maquette du guide intégrée au rapport, avancement du travail sur Beauchastel, prévoyons-nous une phase 5 ?)

A. Phase 5

Lors de la phase 5 du projet « eau sout » les tâches suivantes devront être réamisées :

- édition du guide méthodologique
- test de la méthode de caractérisation des échanges sur un autres cours d'eau que le Rhône (Saône, Durance, Doubs,...) / choix du site (de préférence un site avec des gravières)
- acquisition de données et d'image Infrarouges thermiques

B. Phase 4

Un premier jet du rapport devra être rédigé pour octobre 2012. La version définitive devra être rendue en décembre 2012.

Ce rapport contiendra :

- la caractérisation multimétrique des échanges sur le secteur de Beauchastel
- la maquette du guide méthodologique
- avancement thèse Eric Lalot / reconstitution de données

La publication sera soumise dans Journal of hydrology

C. Guide méthodologique

1. RAPPEL des éléments discutés lors des 2 précédents comités technique concernant le guide méthodologique et modifications apportées (15 et 30 septembre 2011)

- Concept et objectif du guide

Ce guide doit répondre à la question suivante : *Quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappes/rivière ? Comment procéder et marche à suivre pour caractériser les échanges nappes/rivière ?*

- Destination du guide

Ce guide est destiné à l'usage des techniciens de l'eau : SAGE, Contrats de milieux (rivières, étangs, nappes), Agences de l'Eau, Bureaux d'études, ONEMA, administrations (DREAL...), collectivités territoriales (Conseil généraux,...).

- Exemples sur lesquels s'appuyer

A titre d'exemple, il sera possible pour la création de ce guide de s'inspirer :

- du guide pour la restauration hydromorphologique des rivières (AE-RMC),

<http://www.eaurmc.fr/actualites-de-lagence-de-leau/detail-de-lactualite/article/un-nouveau-guide-pour-la-restauration-hydromorphologique-des-rivieres.html>

- des cahiers techniques de Rhône-Alpes (CREN)

<http://sitecren.cenrhonealpes.org/index.php/editiontech>

- Etude échanges nappes/étangs en Corse

- contenu et organisation

Pour le contenu du guide (environ 50p), il s'agit d'exploiter en priorité ce qui a déjà été rédigé dans le cadre des trois rapports résultant du projet. Ce contenu devra bien sûr être réorganisé et complété selon les objectifs du guide :

- intégration de schémas de synthèse
- le cheminement de l'utilisateur dans le guide pourra être organisé selon un graphe avec renvois aux pages du guide)

- intégration d'une clef de détermination des invertébrés souterrains (stylobies) et des macrophytes (à voir)

- conseils pour trancher lorsqu'il s'agit de choisir entre plusieurs méthodes ou entre les diagnostics issus de différentes méthodes

- description approfondie des différentes méthodes (coût, temps...)

- encarts « warning ! »

- avertissements concernant les contextes où le guide fonctionne bien et ceux où il ne fonctionne pas
- limites du guide / nécessité de faire appel à des compétences extérieures
- annexes techniques à prévoir en fonction des réponses à apporter aux utilisateurs et de son profil

2. PLAN DU GUIDE

Introduction (Chapitres 1 et 2)

Chapitre 1. Les échanges nappe/rivière en milieux alluvionnaires

1.1. Enjeux (DCE,...)

Exemple : Impact d'état d'un milieu sur un autre (règle DCE / Bon état ; Règles d'évaluation de l'état des milieux / cf. Guide de bon état version 2011)

1.2. Fonctionnement (schémas, configurations,...)

Chapitre 2. Principes généraux et résumé de la démarche

2.1. Evaluation qualitative des échanges (direction, sens, origine)

2.2. Evaluation de la quantité d'eau échangée (volume, contribution)

2.3. Evaluation de la qualité de l'eau

2.4. Présentation des outils (Schéma de principe)

Démarche (Chapitres 3, 4 et 5 - Actions usager, Schéma 1)

Chapitre 3. Avancer dans l'évaluation

Ce qu'il faut pour évaluer les échanges

3.1. Définir les objectifs

3.2. Sélection au préalable

3.2.1. Sélection de l'échelle (temps, espace)

3.2.2. Sélection des outils (atouts, limites selon les objectifs et les échelles

spatiotemporelles pertinentes) /

Tableau de décision explicatif indiquant le potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivière de chacune des métriques en fonction des objectifs et de l'échelle spatiotemporelle

Métrique	Qualitatif	Quantitatif	Echelle
Invertébrés	-	+	++

Exemple de principe

3.3. Données existantes (pertinence, qualité,...) / Données manquantes / Reconstitution de données (cf : travail de thèse d'Eric Lalot)

Chapitre 4. Mise en œuvre des différentes méthodes

Comment évaluer les échanges (soi-même, sous-traitance ?)

4.1. Protocole (ou renvoi aux annexes)

4.2. Calcul et interprétation (ou renvoi aux annexes)

Chapitre 5. Conclure sur les échanges

Que peut-on tirer des mesures et calculs ? Comment synthétiser ?

5.1. Tableau des résultats par métrique (qualitativement et quantitativement)

5.2. Tableau de synthèse comparatif / Prise en compte de l'incertitude

2 solutions :

- pondération en fonction de la fiabilité de la métrique (de 0 à 3 par exemple)

- penalty theory : attribuer un nombre de points de pénalité en fonction du problème rencontré et l'ôter à un nombre de points maximum déterminés a priori (par exemple 5 points)

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

Exemple de principe

5.3. Cartographie des résultats synthétiques

3. ANNEXES DU GUIDE

A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN

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

A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation

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

A3. BIO A : Invertébrés

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

A4. BIO V : macrophytes

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

Pour les annexes A1 à A4 inclure :

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

A5. Bases de données utiles et consultables

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

A7. Personnes ressources et compétences

Annuaire de compétences à mettre à jour tous les 3 ans

4. SCHEMA DE LA DEMARCHE (actions usager)

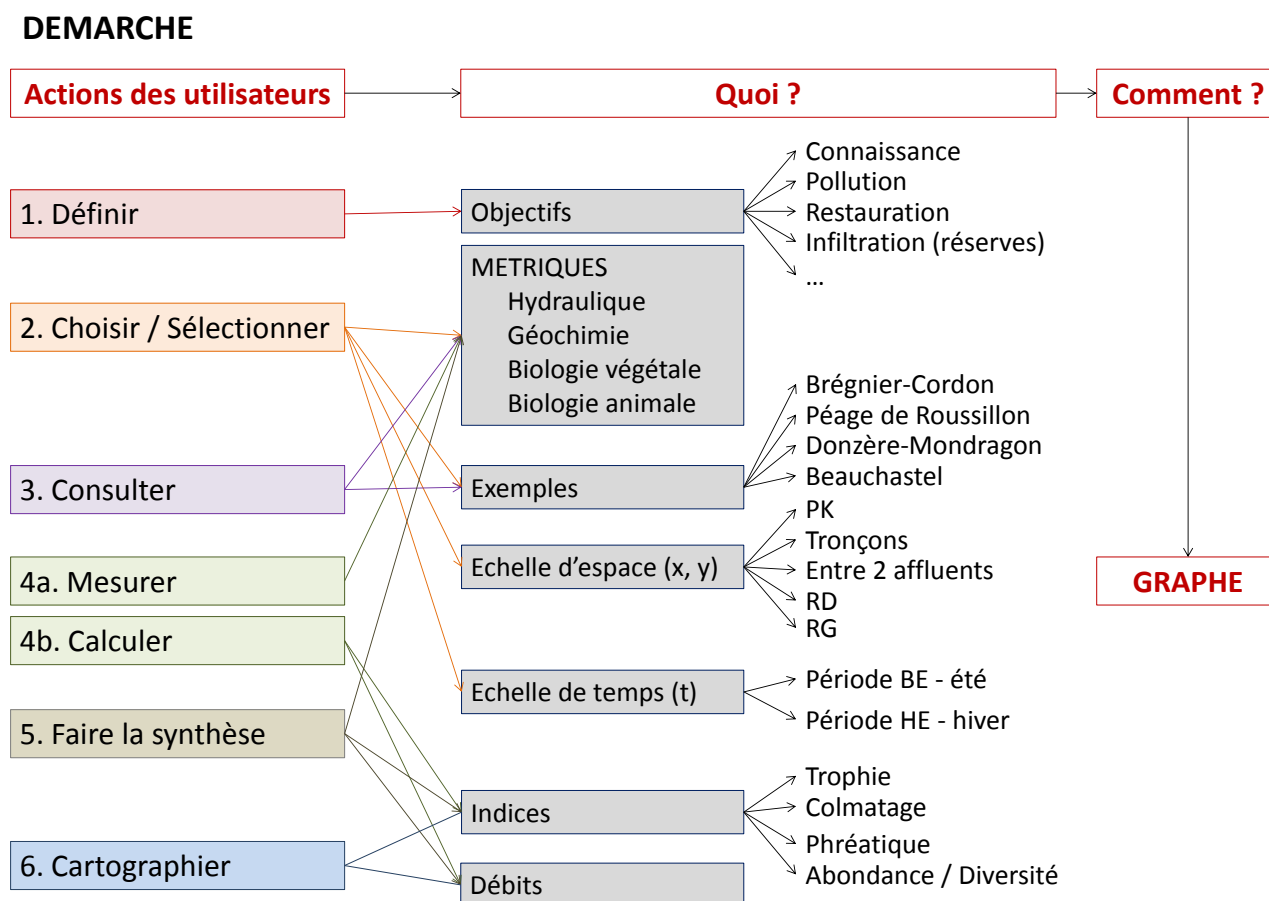
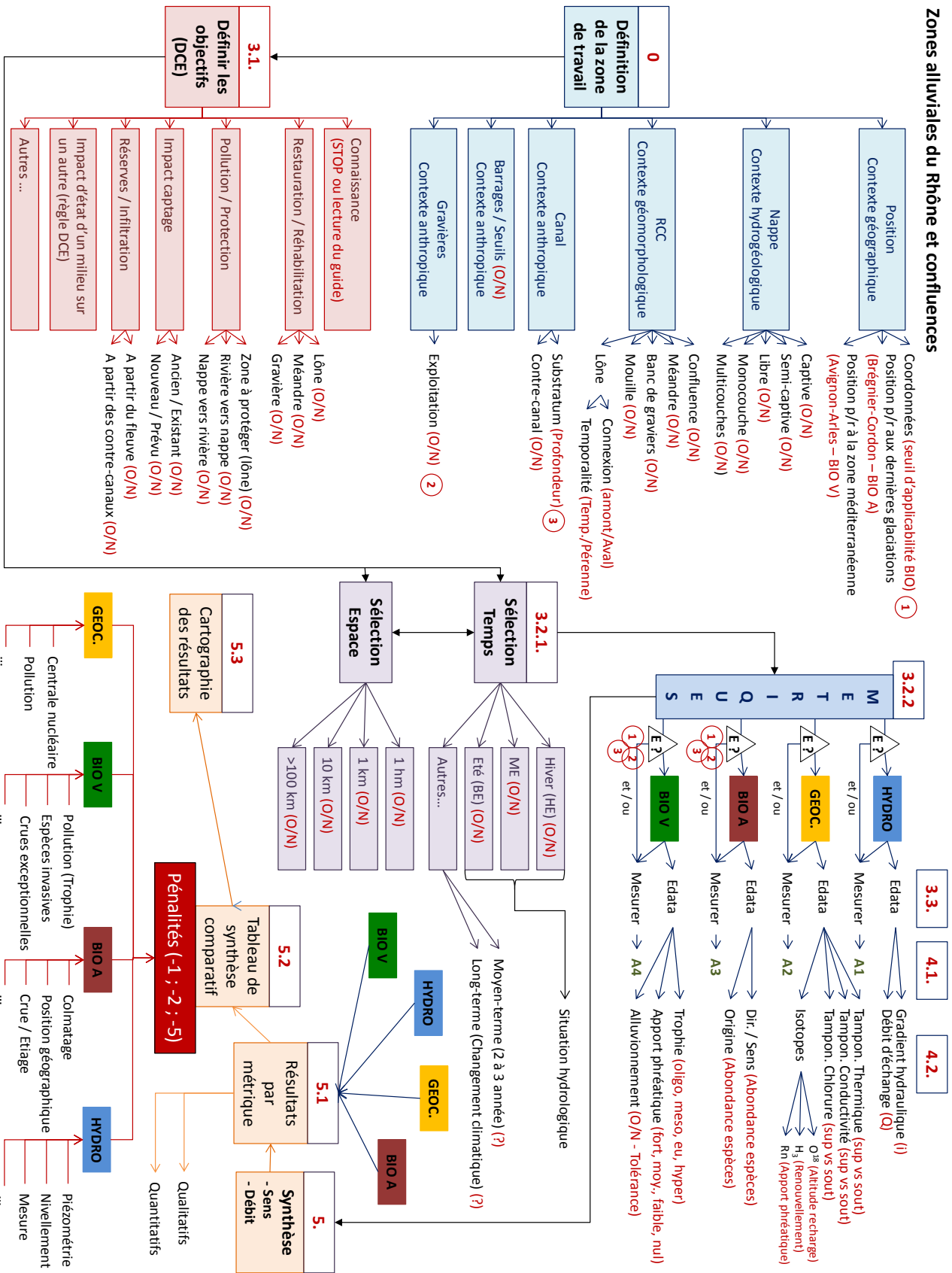


Schéma 1 : Démarche

Les informations de ce graphes seront utilisées en bandeau dans le guide comme marqueur de progression.

5 GRAPHE DE CHEMINEMENT GENERAL



3.13.16 octobre 2012 : CR comité technique - Université Lyon I

Comité technique du 16 octobre 2012 Université Lyon I

Echanges nappes/Rhône – Projet « Eau-Sout' »

Présents : Laurent Cadilhac (AE-RMC), Pierre Marmonier (LEHNA-HBES), Christophe Piscart (LEHNA-HBES), Mathilde Novel (LEHNA-HBES), Gudrun Bornette (LEHNA-ECV), Florent Arthaud (Université de Savoie-Carrel), Didier Graillot (ENSMSE-GSE), Eric Lalot (ENSMSE-GSE), Frédéric Paran (ENSMSE- GSE)

Rappel de l'ordre du jour :

1. Compléments de diagnostic des échanges nappes/rivières à la confluence Rhône/Ardèche
2. Diagnostic des échanges nappes/rivières sur le secteur de Beauchastel
3. Guide méthodologique / Présentation de l'avancement de la rédaction du guide :
 - éléments disponibles dans les rapports précédents et déjà intégrés
 - compléments à rédiger
4. Phase 5

La prochaine réunion de travail est prévue le **vendredi 9 novembre 2012 à 14h00 à Lyon** afin de réaliser le croisement des métriques pour la caractérisation des échanges nappe/Rhône sur les secteurs de Beauchastel et de Donzère-Mondragon (Confluence Rhône-Ardèche). Au moins une semaine avant cette date, merci de transmettre à F. Paran :

- les grilles de comparaisons des métriques complétées (invertébrés et macrophytes)
- les parties « invertébrés » et « macrophytes » rédigées pour le rapport

Un Comité Plénier pour présenter la phase 4 du projet est prévue fin janvier/début février 2013.

Merci de compléter le doodle : <http://doodle.com/kwrcackd4ym7kkwu>

Eléments déjà transmis par e-mail le 16 octobre 2012 :

- Version de travail du rapport phase 4
- 1 fichier : ZABR_Rapport_Phase_4_oct_2012_V4coco.doc
- Grilles de comparaison des métriques pour Donzère-Mondragon et Beauchastel
- 2 fichiers : Croisement_métriques_Beauchastel.xls et Croisement_métriques_DM_Ardeche.xls
- Couvertures SIG des PK et du fleuve Rhône
- 2 fichiers : PK.shp et Fleuve_Rhone.shp

1. Contenu du rapport phase 4

Le rapport de la phase 4 du projet « Eau sout » contiendra :

- un complément de diagnostic des échanges nappes/rivières à la confluence Rhône/Ardèche (Donzère-Mondragon)
- un diagnostic des échanges nappes/rivières sur le secteur de Beauchastel
- un état d'avancement du travail de thèse d'Eric Lalot
- une présentation synthétique du guide méthodologique

Les annexes de ce rapport incluront :

- une maquette du guide méthodologique
- les fiches projets des 5 phases
- les fiches de synthèse phases 1 à 3
- les comptes-rendus de réunions et de terrain de la phase 4

2. Compléments de diagnostic des échanges nappes/rivières à la confluence Rhône/Ardèche (Donzère-Mondragon et diagnostic des échanges nappes/rivières sur le secteur de Beauchastel

Les travaux de caractérisation des échanges nappes/rivières sont bien avancés pour les trois métriques impliquées (hydro, invertébrés, macrophytes). Des documents de synthèses ont déjà été rédigés pour chacune d'entre elles.

Après présentation rapide des résultats et comparaison à la volée, les diagnostics paraissent cohérents les uns avec les autres. Reste à le confirmer par une réelle comparaison des métriques.

La comparaison des métriques sera effectuée comme en phase à l'aide de grilles. Il conviendra de les compléter avec le type de milieu (contre-canal, Vieux-Rhône, canal de dérivation, lône, gravière...).

De plus, dans le cas où il y a signature d'eau du Rhône il conviendra de faire la distinction entre recyclage sur de courte distance et reprise du sous-écoulement sur de plus grandes distance.

Il est proposé de distinguer 2 termes :

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

Il conviendra aussi de mettre au point et de tester la méthode de pondération (ou pénalité) pour aboutir au diagnostic de synthèse.

Ce travail sera effectué lors de la prochaine réunion (9 novembre 2012). Au moins une semaine avant cette date, merci de transmettre à F. Paran :

- les grilles de comparaisons des métriques complétées (invertébrés et macrophytes)
- les parties « invertébrés » et « macrophytes » rédigées pour le rapport

3. Guide méthodologique « bassin du Rhône » / Présentation de l'avancement de la rédaction du guide

Compte-tenu de la proximité thématique du guide méthodologique « bassin du Rhône » de caractérisation de échanges nappes/rivière en milieu alluvial avec le « guide national » réalisé en parallèle pour l'ONEMA, il convient de rédiger une notice exposant les différences entre les deux guides.

La sortie du guide national ONEMA est prévue en 2015, alors que celle du guide bassin est prévue en 2014. En conséquence la rédaction du guide bassin doit être bouclée à l'automne 2013. C'est à cette période que devrait avoir lieu la soutenance de thèse de Eric Lalot.

En plus de ce qui avait été décidé, le guide devra contenir un paragraphe concernant les conséquences fonctionnelles des échanges nappes/rivières sur la gestion des ressources en eau et la biodiversité (généraliser cette partie au-delà du fleuve Rhône). Cette partie sera ajoutée en fin de chapitre 5 (5.5. si l'on suit la numérotation actuelle).

Une autre modification concerne l'actuel chapitre 2.3. « Evaluation de la qualité de l'eau » qui sera renommée « Exploitation des données de qualité »/

L. Cadilhac souligne l'importance de :

- comparer les résultats de quantification des échanges nappes/rivières du modèle développé par Eric Lalot avec ceux obtenus par analyse géomatique
- bien souligner les biais, incertitudes liées à chacune des métriques

En l'état, une première maquette du guide méthodologique contient :

- une présentation synthétique du guide méthodologique
- un graphe de cheminement dans le guide
- un plan détaillé
- un repositionnement des éléments rédigés dans les rapports phases 1, 2 et 3 assortis d'un commentaire sur les éléments à synthétiser et les compléments à rédiger

Par rapport à l'état actuel du rapport, les éléments de contenus du guide seront renvoyés en annexe. Seul une présentation synthétique du guide sera incluse dans le corps principal du rapport.

4. Comité plénier phase 4

Un Comité Plénier pour présenter la phase 4 du projet est prévue fin janvier/début février 2013.

Merci de compléter le doodle : <http://doodle.com/kwrcackd4ym7kkwu>

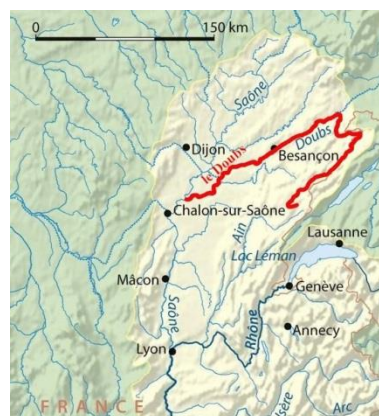
5. Phase 5

Repères de la phase 5 :

- fin de rédaction du guide méthodologique : automne 2013
- soutenance de thèse prévue d'Eric Lalot : automne 2013
- édition du guide méthodologique : 2014

Le nouveau secteur d'étude sélectionné est le secteur correspondant aux confluences Saône/Doubs et Doubs / Loue. Une reconnaissance de terrain est à programmer.

Carte : http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Le_Doubs_%28carte%29.jpg



4. Annexe 4 : Tableau de la physico-chimie des eaux de surface et interstitielles du secteur de Beauchastel

Stations	Longitude X (Lambert II étendu, mètres)	Latitude Y (Lambert II étendu, mètres)	Température (°C) Surface	Température (°C) Interstitiel	Conductivité (µS/cm) Surface	Conductivité (µS/cm) Interstitiel	pH Surface	pH Interstitiel	Oxygène (mg/L) Surface	Oxygène (mg/L) Interstitiel	Concentration en nitrates (mg/L) - Surface	Concentration en nitrates (mg/L) - Interstitiel	Concentration en silice (mg/L) - Surface	Concentration en silice (mg/L) - Interstitiel
Ag1	799081.59	1984362.85	19.7	20.4	513	503	7.2	6.98	10.19	7.84	9.487	7.879	0.913	0.889
Ag2	793781.89	1980623.4	16.6	16.7	510	567	6.55	6.42	10.4	7.11	3.384	5.674	0.625	1.089
CCD1	797879.36	1987081.04	15.6	15.4	437	415	7.1	7.43	3.1	1.72	2.104	1.577	1.177	1.185
CCD2	797893.03	1986648.48	15.3	16.6	429	428	7.4	7.67	2.36	4.81	4.494	2.715	1.177	1.121
CCD3	796578.4	1985728.77	15.1	15.8	450	420	6.5	6.58	4.38	5.89	4.536	2.616	0.913	1.161
CCD4	796004.51	1984717.71	17.8	16.1	425	408	6.52	6.28	10.09	0.17	4.564	3.811	0.985	0.817
CCD5	795567.83	1983681.37	18.3	18.9	439	419	6.6	6.84	10.24	2.74	4.28	4.607	0.937	0.993
CCD6	795401.54	1983124.1	16.2	16.3	447	446	6.5	6.56	4.82	6.68	4.067	3.185	1.081	1.089
CCD7	795286.23	1982486.69	15.9	16.5	446	445	6.66	6.71	5.22	7.93	3.171	3.327	1.177	1.081
CCG1	798419.98	1987100.65	16.8	17.2	473	460	7.8	7.57	7.95	4.56	3.982	3.868	1.442	1.249
CCG3	796104.88	1984035.95	19.8	18.9	404	419	6.37	6.6	5.25	4.11	1.037	1.179	1.201	1.157
ED1	794933.21	1983156.81	21.2	18.9	95.3	302	5.9	5.94	8.64	6.01	2.53	12.972	0.409	1.666
ED2	793669.11	1983658.58	22	21.1	91.4	101	6.41	6.01	9.19	5.32	1.634	1.947	1.177	1.362
ED3	794336.52	1983603.11	23	22	72.2	120	7.32	6.34	10.82	5.99	0.695	1.193	1.273	1.241
EG1	794789.98	1983497.77	26.8	23.2	93.6	106.5	7.67	5.87	10.78	4.31	2.488	0.823	1.201	1.33
EG2	794299.91	1983635.14	25.8	22.6	92.3	91.8	7.86	5.93	10.25	5.85	1.805	1.691	1.249	1.362
EG3	790913.58	1982897.52	23.7	17.1	90.7	120.4	7.53	5.65	10.16	7.23	2.829	4.038	1.634	1.394
Le Bayon	786708.05	1981894.91	20	18.7	159	182	6.81	6.17	9.24	5.13	1.933	1.435	1.225	1.322
R1	798368.63	1986550.06	15.4	15.9	494	460	6.6	6.54	4.03	7	2.317	4.209	1.081	1.065
R2	798192.51	1985957.69	19.4	20.1	391	477	7.05	6.54	9.64	5.7	2.445	2.132	0.721	0.905
See Bannerol	791515.22	1983909.05	19.2	18.6	448.5	446.5			3.85	3.86	8.761	8.719	0.553	1.886
See Beraude	794427.4	1986116.09	15.1	15.4	194.1	197.8			8.5	7.19	5.731	4.209	1.682	1.722
See Crotte	789952.43	1984355.46	21.7	20.8	211	1361			4.37	1.16	3.128	3.612	0.937	2.635
See Fiquière	789595.54	1984798.72	21.4	20.7	402	434			1.91	1.25	2.829	2.744	2.09	2.547
See Thouat	791897.21	1984265.62	21.9	20.7	357	374			3.8	0.71	6.499	4.366	3.003	5.166

5. Annexes 5 : Guide méthodologique

Organisation des éléments issus des rapports précédent dans le plan du guide

Annotation et truc à faire

CODE couleur dans le rapport :

- Rapport phase 1
- Rapport phase 2
- Rapport phase 3
- Rapport phase 4 (éléments nouveaux tirés d'ailleurs)

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

1.1. Enjeux (DCE,...)

Rechercher les informations

Exemple : Impact d'état d'un milieu sur un autre (règle DCE / Bon état (quantité, qualité, biodiversité) ; Règles d'évaluation de l'état des milieux / cf. Guide de bon état version 2011)

Bourdin L., Stroffek S., Bouni C., Narcy J.B. et Dudour M. (2011) Guide technique SDAGE - Restauration hydromorphologique et territoires : concevoir pour négocier, Comité de bassin Rhône Méditerranée, AE-RMC, DREAL-RA, 108p.

<http://www.eaurmc.fr/espace-dinformation/guides-acteurs-de-leau/agir-sur-lhydromorphologie-des-milieux-aquatiques.html>

Document d'aide à la conception et la négociation des projets de restauration hydromorphologique visant à soutenir le bon état écologique des cours d'eau. 108 pages - Avril 2011

- Réserve naturelle
- Energie (Barrages, Centrales nucléaires)
- Industrie (Chimie,...)
- Agriculture (Irrigation)
- Eau potable

(20) L'état quantitatif d'une masse d'eau souterraine peut avoir une incidence sur la qualité écologique des eaux de surface et des écosystèmes terrestres associés à cette masse d'eau souterraine. P5

19) «état d'une eau souterraine»: l'expression générale de l'état d'une masse d'eau souterraine, déterminé par la plus mauvaise valeur de son état quantitatif et de son état chimique;

20) «bon état d'une eau souterraine»: l'état atteint par une masse d'eau souterraine lorsque son état quantitatif et son état chimique sont au moins «bons».

21) «état écologique»: l'expression de la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés aux eaux de surface, classé conformément à l'annexe V;

22) «bon état écologique»: l'état d'une masse d'eau de surface, classé conformément à l'annexe V;

23) «bon potentiel écologique»: l'état d'une masse d'eau fortement modifiée ou artificielle, classé conformément aux dispositions pertinentes de l'annexe V; P12

Bon état

Objectif à atteindre pour l'ensemble des eaux en 2015, conformément à la directive * cadre sur l'eau 2000/60/CE, sauf en cas de report de délai * ou de définition * d'un objectif moins strict *. Le bon état d'une eau de surface est atteint lorsque son état écologique et son état chimique sont au moins "bons". Le bon état d'une eau souterraine est atteint lorsque son état quantitatif et son état chimique sont au moins "bons". <http://www.glossaire.eaufrance.fr>

Ce projet de recherche est en lien avec l'axe thématique 1 « risques environnementaux et vulnérabilité des milieux » du nouvel accord cadre. Ce thème souligne notamment les besoins en connaissance au niveau des zones d'interface (échanges eaux souterraines/eaux superficielles) en résonnance avec l'orientation fondamentale du SDAGE OF 7 « équilibre quantitatif : évolution quantitative des ressources superficielles et souterraines ». Une telle problématique est aussi formulée en termes des besoins et attentes du Plan Rhône volet 3 « qualité des eaux, ressources et biodiversité : compréhension des échanges entre fleuve et aquifères ». La compréhension des échanges nappes/Rhône répond bien à ce besoin de connaissance des interfaces qui a été souligné au cours de la réunion Agence de l'Eau/ZABR dédiée au développement du Plan Rhône le 19 Mai 2009. De plus, ce projet de recherche aborde les questions concernant « les changements globaux » et « la prospective changement climatique » en s'intéressant surtout à l'influence des régimes transitoires au pas de temps saisonniers sur les échanges nappes/fleuve.

1.2. 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.

1.2.1. 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 ($65\text{m}^3/\text{s}$). 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.

1.2.2. 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.

1.2.3. 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 Champagnieux 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.

1.3. Fonctionnement (schémas, configurations,...)

A synthétiser

Des relations fréquentes...

- eaux de surface alimentant les nappes
- eaux superficielles drainant les nappes

...et variables...

- dans l'espace
- dans le temps (saison, changement climatique)

Inversion du sens de l'échange en hautes-eaux et basses-eaux

...parfois perturbée par des ouvrages et/ou des aménagements

Pompes, barrages, ouvrages...

Etat des eaux souterraines et superficielles souvent lié...

...en quantité et en qualité

Dans certains cas, il n'y a pas de relation

1.3.1. Typologie des aquifères en connexion avec le Rhône

Si l'on se réfère au bilan hydrologique français dressé par Margat & Roux (2006a) on constate que le stock d'eau souterraine est évalué à 1000km³ alors que celui des eaux de surface (lacs et barrages) à seulement 7km³. L'apport des pluies efficaces (pluies totales-évapotranspiration) est évalué à 170 km³/an dont 70 contribuent au ruissellement de surface et 100 à l'écoulement souterrain retardé.

Ce sont ces eaux qui alimentent les aquifères. Ces réservoirs conducteurs d'eau peuvent être envisagés de différentes façons (Margat & Roux, 2006b) :

- selon leurs propriétés intrinsèques qui conditionnent la quantité d'eau emmagasinée [dimensions (étendue, volume), porosité, perméabilité], la capacité de stockage (volume, porosité efficace) et la capacité à transmettre les flux ou transmissivité (épaisseur, perméabilité) ;
- selon la catégorie de réservoirs : 1) aquifères homogènes ou continus à perméabilité d'interstice [nappes alluviales (sables, graviers, grès...), nappes de bassins sédimentaires à vitesse d'écoulement lente et régulière], 2) aquifères hétérogènes ou discontinus à perméabilité de fissure (calcaires, roches volcaniques, granitiques ou gréseuses) ;
- selon leur dynamique : nappes libres peu profondes (phréatiques) ou nappes captives (piégées) ;
- selon la vitesse d'écoulement des eaux : 0,5 à 2km par an (1 à 5m par jour) pour les nappes d'alluvions des grandes vallées types Rhône, 30 à 300km par an (100 à 1000m par jour) pour les nappes d'alluvions grossières des vallées alpines, 1 à plusieurs dizaines de kilomètres par jour pour les aquifères karstiques.

Parmi tous les aquifères français, environ 200 sont qualifiés d'importance régionale car ils ont une taille supérieure à 100km². De plus, il existe différents type d'aquifères : les aquifères de socle, les aquifères karstiques, les aquifères alluviaux que l'on peut rencontrer tout au long de la vallée du Rhône¹. Ceux-ci varient par leurs caractéristiques, les moyens d'investigation possibles et leur vulnérabilité.

1.3.2. 4.1. Aquifères de socle

Les aquifères de socle (ou aquifères fissurés ou aquifères discontinus) sont aujourd'hui qualifiés d'aquifères continus stratiformes liés à l'altération de roches cristallines, plutoniques ou métamorphiques (Lachassane & Wyns, 2006). La productivité de ces aquifères est toujours modeste. Ils sont structurés selon le modèle suivant (du bas vers le haut):

- substratum rocheux sain : perméabilités élevées localement (fractures, débit de plusieurs m³/heure), faible capacité de stockage (porosité efficace $\ll 10^{-4}$).
- horizon intermédiaire fissuré-altéré de 50m d'épaisseur environ : les fissures subhorizontales dans les granites constituent des venues d'eau (perméabilité $>10^{-5}$ m/s), c'est le nombre de fractures qui conditionne la productivité d'un forage, les petites fractures sont à l'origine d'une perméabilité de bloc (5.10^{-8} m/s) plus forte que la perméabilité de la matrice (10^{-14} à 10^{-19} m/s). Ces blocs assurent 90% de l'emmagasinement total et 10% est assuré par les fractures perméables.
- formations meubles d'altération (altérites) d'une épaisseur de 0 à plusieurs dizaines de mètres : présence d'argile et faible perméabilité relative et capacité significative d'emmagasinement (fonction capacitive).

On observe que l'horizon fissuré-altéré est presque toujours saturé d'eau et contribue à 80% du stockage (20% pour les altérites). Si les altérites ont été déblayées par l'érosion (massifs anciens) ce type d'aquifère possède une faible capacité de stockage. Dans les massifs à fort relief on peut être en présence de sources à forts débits.

Classiquement, l'investigation de ce type d'aquifères est fondée sur l'analyse statistique de résultats de forages. Associées au modèle précédent, les analyses permettent de dresser la cartographie des altérites et de la zone fissurée, et d'effectuer une caractérisation déterministe des potentialités des aquifères s'appuyant sur des approches géologiques, géomorphologiques, et géophysiques. Il existe aussi des

¹ Il existe aussi des aquifères volcaniques et des aquifères littoraux que nous laisserons de côté dans un premier temps compte-tenu de leur rareté le long du cours du Rhône.

méthodes multi-critères (lithologie du substratum, géométrie des altérites et de l'horizon fissuré-altéré, profondeur du niveau piézométrique, morphologie, fracturation) pour évaluer les potentialités des aquifères de socle.

La caractérisation des couloirs tectoniques peut être quant à elle effectuée à l'aide de :

- prospections émanométriques radon (les teneurs en radon dans les gaz du sol permettent de détecter les zones fracturées du substratum cristallin, zone de dégazage préférentielle de la croûte terrestre) ;
- méthodes géophysiques : électriques ou électromagnétiques (sondages électriques, traînés ou panneaux électriques (VLF, MTA) pour détecter dans les secteurs fracturés les structures conductrices (failles) ; méthode RMP (Résonance Magnétique Protonique) pour caractériser la puissance, la porosité efficace et donc la capacité de stockage.

Selon Lachassagne & Wyns (2006) il n'existe pas actuellement d'outil de modélisation hydrogéologique discrétisé fiable pour les aquifères de socle. Des travaux sont toutefois engagés sur la modélisation hydrologique à l'échelle de bassin versant (ex : TOPMODEL) et sur des modèles maillés multicouches (différences finies ou éléments finis).

1.3.3. 4.2. Aquifères karstiques

Les aquifères karstiques sont, comme leur nom l'indique, caractéristiques du karst : « paysage particulier créé par l'eau et dans lequel l'eau circule de façon spécifique ou complexe » (Bakalowicz, 2006). Dans les régions karstiques, l'eau est souvent absente du sol car les perméabilités sont grandes et l'accumulation se produit dans les profondeurs, puis il y a émergence au niveau de sources. En France, la loi est sévère concernant l'exploitation des eaux du karst. Elles sont donc peu exploitées. Le karst représente 35% des eaux souterraines en France et 30% de l'eau potable, mais les prélèvements agricoles et industriels semblent mal évalués.

Les aquifères karstiques sont caractérisés par le schéma fonctionnel suivant :

- zone d'infiltration : infiltration différée par stockage vers la surface (épikarst), infiltration lente (fissures fines), infiltration rapide (fractures larges), infiltration concentrée et rapide (alimentation par des rivières des terrains non karstiques) ;
- zone noyée : drainage (réseau de conduits hiérarchisé), stockage (vides karstiques, zones fissurées).

Classiquement, les méthodes d'investigation des aquifères karstiques reposent sur des traceurs chimiques comme les sels dissous, les isotopes constitutifs de la molécule d'eau (oxygène 18, deutérium, tritium), les éléments dissous (carbone 13, carbone 14, azote 15, Soufre 34) qui permettent d'évaluer les conditions d'écoulements ou des temps de transfert. D'une manière générale, la vitesse dans les conduits est de l'ordre de 100m/heure, 1000m/heure en crue. Elle est le plus souvent comprise entre 10 et 100m/heure. Les méthodes d'études diffèrent selon que le karst est peu transformé ou profondément transformé. Il est possible de procéder à des analyses d'hydrogramme (récession) ou à des colorations et traçages artificiels (fluorescéine). La méthode multi-critères EPIK permet quant à elle d'évaluer la vulnérabilité de l'épikarst.

1.3.4. 4.3. Aquifères alluviaux

Les aquifères alluviaux sont ceux qui nous intéressent le plus dans le cadre de cette étude. Selon Collin (2006), les alluvions sont des roches meubles, de nature pétrographique variée et de granulométrie hétérogène. Leur mise en place est due à des phénomènes hydrauliques. La majorité des alluvions est d'origine fluvio-glaciaire et l'alluvionnement n'est pas majoritairement un phénomène actuel.

Le profil de l'alluvionnement est généralement semblable partout (profil hydrodynamique régulier au long du cours des fleuves, pentes des alluvions, surface supérieure et ligne d'eau) sauf :

- dans les dépressions dues aux « coupes de gouge » imprimées dans les formations tendres par les lobes des glaciers (ex : molasse du Bas-Dauphiné) ;
- lors du remplissage des cavités laissées par les glaciers en amont de verrous de roches dures (ex : défilés du Rhône) ;

- lors d'alluvionnement par subsidence du tréfonds (origine néo-tectonique par dissolution des formations salifères ; ex : Jura) ;
- lors des oscillations du niveau des mers et transgression marine (ex : vallée du Rhône).

L'étude des nappes alluviales conduit à considérer l'importance des relations entre l'aquifère et d'autres entités. Il peut s'agir de relations avec :

- les terrains encaissants (latéraux) :
 - . si ces terrains sont perméables et bons aquifères, alors il y a un débit significatif des nappes de versants (évaluation par : jaugeages différentiels du cours d'eau sur une zone dépourvue d'affluents, repérage des turbulences, analyses géochimiques isotopiques).
 - . si les berges des paléo-vallées sont constituées de marnes ou d'argiles, la nappe alluviale ne dépend que du cours d'eau sur le plan hydrodynamique (faible gradient hydraulique : 10^{-3} à 10^{-4}), et la chimie de l'eau de nappe peut être très différente de celle de l'eau de la rivière.
- le substratum,
- le cours d'eau.

Certains aquifères alluviaux présentent des particularités :

- ceux dont la partie supérieure est constituée de matériaux grossiers (ex : Côtes-du-Rhône) ;
- ceux issus d'une fin d'alluvionnement progressive générant des entrelacs de méandres tour à tour abandonnés et comblés de matière organique (ex : lônes de Lyon) ;
- ceux constituant des systèmes aquifères en terrasse (ex : entre Lyon et Valence).

Dans les aquifères alluviaux, les propriétés hydrauliques dépendent de la granulométrie. La formule de Hallen-Hazen relie la perméabilité à la taille des grains: $K(\text{cm/s}) = 100 D_{10}^2$ (D_{10} : diamètre des 10% des grains les plus fins exprimé en cm). Si cette formule fonctionne bien pour les sables éoliens (homogènes, propres, triés), elle n'est pas adaptée pour les alluvions fluviales. On utilise alors le coefficient d'uniformité (D_{10}/D_{60}) pour obtenir une perméabilité significative en hydrogéologie. Au final, la perméabilité des alluvions (coefficient de Darcy) est comprise entre 10^{-2} et 10^{-5}m/s , et la fourchette la plus fréquente est de 10^{-3} à 10^{-4}m/s . Dans ces milieux, la porosité totale varie de 10 à 20%, et la porosité efficace ou coefficient d'emménagement de 5 à 10%.

La prospection des aquifères alluviaux peut être réalisée grâce à différentes méthodes :

- prospection hydrogéologique : sondages mécaniques (coûteux), géophysiques : électrique, ou sismique, Résonance Magnétique Protonique (seule méthode actuelle qui permet de « voir » l'eau) ;
- prospection hydrodynamique : essais de pompage, suivi piézométrique, modélisation ;
- étude du fonctionnement hydrodynamique du couple nappe-rivière : fondé sur l'évaluation de la diffusivité (Diffusivité : $D=T/S$ avec T : transmissivité ; S : emmagasinement) pour des rivières à fond et berge peu ou pas colmatés et grossièrement rectiligne. Le suivi du niveau piézométrique de la nappe et de la ligne d'un cours d'eau lors des crues, permet de connaître l'onde de propagation d'une onde de crue dans la plaine alluviale.
- suivi hydrocynétique (traceur, le meilleur est le suivi d'une grosse pollution en temps réel).

Les nappes alluviales peuvent présenter des comportements différents :

- drain d'écoulement préférentiel vers le milieu superficiel qui recueille les flux ;
- milieu perméable connecté à la rivière pouvant recueillir par infiltration une partie de l'eau de la rivière, comme à l'entrée d'un méandre par exemple ;
- combinaison des deux.

Les nappes alluviales sont réceptacles et mandataires des eaux des formations adjacentes et des eaux de surface. Elles sont parcourues par des flux supérieurs à celui qu'elles auraient sans la contribution des formations adjacentes, ce qui leur permet de soutenir un étiage. A ce propos, la Formule de JACOB et la théorie des images permettent le calcul de distances d'influence, de débits, de durées de pompage pour éviter des problèmes à l'étiage.

La vulnérabilité des nappes alluviales varie en fonction du type de polluant et de la nature de la couverture et du sol :

- des alluvions caillouteuses sans sol ni limon présentent un risque maximal pour toutes les substances ;
- une couverture sol et limon non saturée retarde une pollution par les hydrocarbures mais pas une pollution contenant des organo-halogénés ou des électrolytes anioniques ;
- une bonne capacité d'échanges cationique (calcite, certaines argiles, matières organique) retient les métaux ;
- le phénomène de réalimentation par les berges d'un cours d'eau pollué est limité par le colmatage des berges anthropisées ;
- les barrages, écluses et digues sont responsables du colmatage et provoquent des échanges dans le sens rivière-nappe (les secteurs naturels avec alternance recharge décharge ne sont pas colmatés).

Selon Roux (2006b) la vulnérabilité des aquifères aux pollutions est de 2 types :

- vulnérabilité intrinsèque : « représente les caractéristiques du milieu naturel (aquifère, couverture du sol, zone non-saturée ; facilité d'accès de la pollution) qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ». Cette définition ressemble à celle donnée par Margat (1988)² ;
- vulnérabilité spécifique : « définit la vulnérabilité à un polluant ou à un groupe de polluants » prend en compte les spécificités des polluants en relation avec la vulnérabilité intrinsèque.

La vulnérabilité étudie les pollutions venant du sol et leur propagation verticale, la propagation horizontale est du domaine du risque. Elle peut être définie selon plusieurs critères :

- critères de surface : topographie, pédologie ;
- critères zone non-saturée : profondeur nappe, battement ou hydromorphie, perméabilité verticale, structure ;
- critères zone saturée : type de nappe, structure, épaisseur, paramètres hydrodynamiques, relations nappes-cours d'eau, recharge.

D'une manière générale, les nappes alluviales sont soumises à une grande vulnérabilité (absence de protection, faible profondeur, risque de propagation rapide de la pollution des cours d'eau). Elles sont plus vulnérables en été car les transferts d'eau augmentent avec la température de l'eau (Anus, 1998).

Ces notions sont intéressantes à prendre en compte, dans la mesure où une des finalités de ce programme porte sur la qualité des eaux de nappes connectées au Rhône.

1.3.5. Définition des situations d'échange

Les situations d'échanges entre la nappe et le Rhône peuvent être différentes. Ce paragraphe dresse la liste des échanges possibles.

². Margat (1988) définit la vulnérabilité de l'eau souterraine aux pollutions comme un « défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales ». Selon cet auteur, la vulnérabilité dépend uniquement de variables intrinsèques et non pas du degré d'exposition au risque. Elle est composite et s'évalue à partir de 2 critères selon : 1) la facilité et la rapidité avec laquelle une pollution atteint l'eau souterraine et 2) la difficulté de régénération de la qualité de l'eau souterraine.

A l'échelle de la vallée du Rhône, la question de la vulnérabilité des ressources est prépondérante. Il va s'agir de déterminer quels secteurs dépendent de la nappe et/ou du Rhône, et de considérer le devenir de la ressource sur le long terme aussi bien en termes de qualité que de quantité.

1.3.5.1. II.2.2.1. Echanges inexistants, très faibles, indirects ou équilibre

On distinguera d'abord les situations dans lesquelles il y a peu ou pas de relations hydrodynamiques (Schindler, 2006) :

- Nappe peu ou pas développée : le cours d'eau circule sur des formations peu perméables ou imperméables sans nappe phréatique ;
- Colmatage du lit et des berges : lorsque le cours d'eau circule lentement (courant faible) le dépôt de fines particules rend le lit et les berges imperméables. Les vitesses d'écoulement peuvent être ralenties par des aménagements. Ceux-ci peuvent aussi empêcher le changement de sens saisonnier des relations ce qui favorise le colmatage. Un colmatage peut déconnecter verticalement la rivière et la nappe en provoquant l'apparition d'une zone non-saturée entre les deux.
- Apports indirects : il s'agit d'apports par ruissellement de nappes contenues dans des formations latérales qui ne sont pas en contact avec le cours d'eau constituant le niveau de base.
- Ecoulement de l'aquifère parallèle au cours d'eau ;
- Cours d'eau en équilibre avec la nappe.

1.3.5.2. II.2.2.2. Echanges nappe/cours d'eau

Dans le cas où les relations hydrodynamiques existent, on distinguera les cas suivants (Danneville, 1997 ; Schindler, 2006 ; Anus, 1998) :

- nappe alimentant le cours d'eau : lorsque le niveau piézométrique est situé au-dessus du niveau du cours d'eau ;
- cours d'eau alimentant la nappe : lorsque le niveau piézométrique est inférieur au niveau du cours d'eau ;
- Relations mixtes : lorsque les deux rives du cours d'eau ne se comportent pas de la même façon, l'une drainant la nappe et l'autre alimentant.

1.3.5.3. II.2.2.3. Eléments de perturbations des échanges nappe/cours d'eau

Plusieurs facteurs peuvent entraîner des modifications des relations hydrodynamiques (Schindler, 2006 ; Anus, 1998) :

- Variation de la position relative du cours d'eau et de la nappe : l'intensité des échanges peut varier selon que le cours d'eau est entièrement inclus dans l'aquifère ou partiellement inclus dans celui-ci, s'il coule sur le substratum par exemple. De plus, un cours d'eau peut être en situation perchée par rapport à la nappe et son infiltration verticale dans la zone non-saturée de l'aquifère alimente la nappe ;
- Variations spatiales : le sens et l'intensité des échanges peuvent changer le long d'un cours d'eau. Ceci peut se produire lorsque l'hétérogénéité de la perméabilité des alluvions est suffisamment importante pour faire varier le niveau de la nappe. Le méandrage et les goullets d'étranglement des nappes alluviales induisent aussi des variations du sens des échanges ;
- Variations temporelles saisonnières : selon les conditions climatiques saisonnières le sens des échanges peut changer. Par exemple, la rivière peut alimenter la nappe en saison humide et la drainer en saison sèche. Il y a donc une inversion saisonnière de l'hydraulicité ;
- Variations temporelles à long terme : changements climatiques ;
- Apports d'aquifères adjacents : l'apport de réservoirs adjacents peut soutenir le niveau d'une nappe alluviale.
- Modifications anthropiques :

. Ouvrages au « fil de l'eau » et contre-canaux : les contre-canaux ont été construits pour drainer l'eau du cours d'eau s'infiltrant à travers les digues et limiter l'élévation du niveau des nappes phréatiques adjacentes. Ils sont de plus alimentés par les eaux du bassin versant. Pour améliorer l'efficacité des contre-canaux, des forages de décompression permettent d'évacuer vers la surface les eaux de la nappe sous pression hydrodynamique et de la stabiliser au niveau désiré. Au contraire, s'il y a un risque d'abaissement trop important de la nappe, celui-ci peut être corrigé grâce à des puits de réalimentation ou de petits ouvrages de contrôle des niveaux (vannes, pale-plates). A l'échelle d'un

aménagement, on observe que la nappe est plus élevée que son niveau naturel à l'amont de la chute et moins élevé en aval ce qui influe sur les sens d'échange nappe/rivière.

. Pompage : ces derniers peuvent provoquer des phénomènes de réalimentation induite s'ils sont implantés à proximité du cours d'eau et créent un gradient hydraulique entre celui-ci et le point de pompage. Si initialement la rivière alimente la nappe ceci peut provoquer un abaissement de la nappe. Si au contraire la nappe alimente la rivière ceci peut réduire, supprimer ou inverser le flux.

. Réalimentation artificielle des aquifères : il s'agit d'injection d'eau dans la nappe qui font varier sont niveau.

1.3.6. II.3. Hypothèses de travail sur les relations d'échange nappe/fleuve Rhône et bilan

1.3.6.1. II.3.1. Hypothèses de travail et sectorisation sur le cours du Rhône³

Dans son étude des relations nappe-rivière sur le bassin Rhône-Méditerranée, Schindler (2006) propose une sectorisation du Rhône et de certains de ses affluents principaux. Le fleuve est ainsi divisé en 47 tronçons lithologiques et en 36 tronçons pour les relations d'échanges. Ce travail a été réalisé uniquement sur la base d'une analyse bibliographique et cartographique. Les hypothèses proposées sont intéressantes car elles distinguent la rive gauche et la rive droite, et elles prennent en compte certains aménagements ainsi que les variations saisonnières.

Les relations nappe/rivière ont été interprétées et codifiées de la façon suivante :

- **D** : Drainage de la nappe par le cours d'eau ;
- **P** : Perte du cours d'eau au profit de la nappe ;
- **N** : Equilibre entre la nappe et le cours d'eau ou échanges inexistant ;
- **S** : Variations saisonnières, le cours d'eau en situation d'étiage draine la nappe et l'alimente en période de hautes eaux ;
- **I** : Infiltration induite par un champ captant ;
- **ID** : Infiltration induite en rive droite, drainage en rive gauche ;
- **DI** : Infiltration induite en rive gauche, drainage en rive droite ;
- **PS** : Alimentation de la nappe en rive droite, variations saisonnières en rive gauche ;
- **PD** : Alimentation naturelle en rive droite, drainage de la nappe en rive gauche.

1.3.7. Caractérisation des relations d'échange

1.3.7.1. II.2.1. Configurations hydrogéologiques pour l'analyse des échanges entre le Rhône et ses nappes d'accompagnement

Afin de faciliter la lecture des échanges entre les nappes et le Rhône, nous avons réalisé des coupes schématiques des rives du Rhône sur des critères géologiques et hydrogéologiques. Ces coupes schématiques n'ont pas vocation à se substituer à des interprétations géologiques, hydrogéologiques ou géomorphologiques du terrain. Il s'agit de simplement de schémas visant à faciliter la visualisation des différentes configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges nappes/rivière. Ces schématisations seront précisées ultérieurement au fur et à mesure de l'étude des chutes.

Le désir de gestion et de contrôle du Rhône par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) ont conduit à la construction de digues, contre-canaux ou encore d'une mise en quai complète du Rhône (en particulier dans les grandes villes). Ces aménagements sont très importants car ils ont pour rôle

³ Partie rédigée sur la base du rapport de Schindler A. (2006) Etude des relations nappe-rivière, Bassin Rhône-Méditerranée. Rapport de licence, Agence de l'eau RMC, Université Lyon 1, 70p.

essentiel d'absorber et de drainer les eaux de fuite des digues ainsi que de récupérer (ou réguler) les eaux de drainage de la nappe.

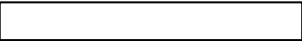
Les échanges nappe-fleuve sont fortement influencés par les caractéristiques géologiques des nappes aquifères mais aussi par ces aménagements. Compte tenu des données disponibles nous avons distingué deux zones :

- un premier aquifère, souvent de type alluvial, qui est en contact avec le Rhône voire sous le Rhône (aquifère de première zone)
- un deuxième aquifère qui est en contact avec le précédent (aquifère de seconde zone)

1.3.7.2. II.2.1.1. Principe de codification :

1.3.8. Schématisation des situations d'échange

Les codes retenus sont les suivants :

-  : Pas de données disponibles ou exploitables.

-  **Apports de nappe** : apports de nappe au fleuve Rhône (Figure 1 et Figure 2). Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, isotopes, invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

Figure 1 : Apports de nappe au fleuve : vue 3D

Figure 2 : Apports de nappe au fleuve : représentation simplifiée

-  **Apports du Rhône** : apports du fleuve Rhône à la nappe (Figure 3 et Figure 4). Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, isotopes et invertébrés. Elle n'est pas détectable par la métrique végétation.

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

Figure 4 : Apports du fleuve à la nappe : représentation simplifiée

-  **Recyclage** : contribution d'eaux superficielles (d'un fleuve ou d'une rivière, par exemple l'Ardèche ou le Rhône) à l'alimentation du Rhône via la nappe (Figure 5 et Figure 6). Cette configuration est détectable par les métriques invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

Figure 5 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : vue 3D

Figure 6 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : représentation simplifiée

-  **Mélange** : apports mélangés d'eau superficielle recyclée (via la nappe) et de nappe au fleuve (Figure 7 et Figure 8). Cette configuration est détectable par les invertébrés, les macrophytes et la physico-chimie.

Figure 7 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : vue 3D

Figure 8 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : représentation simplifiée

- **Pas d'échange** : pas d'apport de la nappe au fleuve (Figure 9 et Figure 10), par exemple, cas où l'écoulement de la nappe est parallèle au fleuve. Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

Figure 9 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : vue 3D

Figure 10 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : représentation simplifiée

- **Colmatage** : colmatage entre la nappe et le fleuve (Figure 11 et Figure 12), cas par exemple, où les berges sont colmatées. Cette configuration est détectable par les métriques isotopes et invertébrés.

Figure 11 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : vue 3D

Figure 12 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : représentation simplifiée

1.4. Panorama des méthodes existantes

A synthétiser

Analyse géométrique

- ARCGIS – ArcInfo 9.3
- 3D analyst
- Spatial analyst

Modèles hydrodynamiques

- Différences finies
- Éléments finis
- Éléments analytiques

Modèles, bilans et statistiques

- Bilan de masse entre 2 sections de rivière
- Analyse spectrale et corrélatoire
- Bilan géochimique et isotopique

Mesure de terrain, échantillonnage

- Mesure du flux à l'interface
- Mesure du flux dans un puits en nappe
- Mesures géochimiques
- Marqueurs biologiques (végétation, invertébrés,...)

1.4.1. (I.1.1.) Hydrophysique : bilans, formules, modèles et statistiques

1.4.1.1. (I.1.1.1.) Outils et méthodes d'évaluation des relations nappe-rivières

L'alimentation des aquifères se fait majoritairement par les précipitations efficaces, et dans une moindre mesure par l'infiltration des cours d'eau. Ce type d'alimentation est difficile à quantifier et dépend de différents facteurs :

- *la nature du cours d'eau* : régime du cours d'eau (fréquence et durée des crues), débit des eaux (des débits faibles et réguliers produisent une meilleure alimentation que des débits forts), température des eaux (l'infiltration augmente avec la température), la teneur en matière en suspension (le colmatage du lit et des berges diminue la perméabilité des sédiments) ;
- *la structure du lit et des berges* : profondeur et largeur (surface d'infiltration), épaisseur de la couche colmatante, conductivité hydraulique des sédiments ;
- *les conditions hydrodynamiques de l'aquifère* : structure de l'aquifère (homogénéité, stratification), limites du système (naturelles ou artificielles en cas de pompage et de réalimentation induite), variation de la perméabilité de l'aquifère, nature géologique de l'aquifère, base perméable ou imperméable de l'aquifère (substratum).

A priori, plusieurs approches relativement simples sont possibles à condition de disposer des données hydrauliques suivantes : hauteurs et débits du cours d'eau, piézométrie, topographie, profils en long et en travers...

- *Données disponibles : débits dans la rivière et les affluents, quelques hauteurs d'eau dans la nappe*

La première approche consiste à raisonner à partir des débits du Rhône. On peut ici appliquer le même principe que précédemment, tout en étant moins gêné par la topographie car la section d'écoulement (profil en travers) est déjà intégrée, puisqu'on raisonne en débit. Il faut toutefois tenir compte des débits des affluents lorsqu'ils sont jaugés. Cette méthode bilan est explicitée au paragraphe (I.1.1.4. (Méthodes et bilans statistiques)). L'applicabilité au Rhône de méthodes de bilan n'est pas aussi simple compte-tenu du rôle des ouvrages sur le Rhône, surtout à l'aval de Lyon. L'incertitude et l'incomplétude sur les données hydrauliques (erreur fréquente de 20% sur les débits aux stations de mesure) imposent d'avoir recours à d'autres méthodes et mécanismes d'évaluation des échanges qui font appel à des organismes biologiques (paragraphe **Erreur! Source du renvoi introuvable.**Hydrobiologie : Invertébrés souterrains et **Erreur! Source du renvoi introuvable.**Hydrobiologie : Macrophytes) ou à des méthodes hydrochimiques (paragraphe Hydrochimie : physico-chimie classique et isotopique).

- *Données disponibles : carte piézométrique, perméabilité de la nappe, section d'écoulement*

La seconde approche nécessite de disposer de suffisamment de mesures de niveau de nappe, auquel cas il est alors possible de construire des cartes piézométriques. Il devient alors plus facile de préciser le sens des échanges et de les évaluer de manière quantitative. C'est ce principe que nous avons utilisé pour le secteur de Brégnier-Cordon (Partie III. Application sur un site test : la chute CNR de Brégnier-Cordon) à l'aide la formule de Darcy explicitée au paragraphe suivant. Nous l'avons associée à une méthode d'évaluation des échanges fondée sur l'étude des débits des contre-canaux réceptacles privilégiés des eaux de nappes, sachant que les contre-canaux reçoivent aussi les eaux du Rhône percolant dans les digues (débit de fuite quantifiable avec l'approche Darcy), les eaux de ruissellement et les eaux de petits affluents.

Ces approches sont complémentaires. Toutefois, d'autres approches utilisées sur d'autres fleuves et cours d'eau méritent d'être examinées. On peut citer par exemple la thermométrie, le rayonnement infrarouge (photographies aériennes), la chimie isotopique, et des méthodes de bilans par analyses spectrales et corrélatoires expliquées au paragraphe (I.1.1.4. (Méthodes et bilans statistiques)) mais dont l'applicabilité au cas du Rhône n'est pas évidente.

L'évaluation des relations et des échanges nappe/rivière peut donc être approchée de différentes manières. Il est possible de mobiliser des méthodes quantitatives fondées sur des formules et solutions analytiques d'équations issues de l'hydrogéologie quantitative (Houdaille & de Marsily, 1969 ; Castany, 1990 ; de Marsily, 1981 ; Anus, 1998 ; Michal, 1988 ; Hantush, 1965 ; Bouchard, 1985 ; Peaudecerf, 1970, 1973 ; Durbec & al., 1991 ; Beraud & al., 1975, 1976 ; Carry, 1971), des modèles simplifiés implémentés sous SIG (ArcGISTM, module DarcyFlow), des modèles hydrogéologiques (Poligot-Pitsch, 2002 ; Triganon & al., 2003 ; Golaz & al., 1998 ; Dauvergne, 2003 ; Mimoun, 2004) et des méthodes bilans et statistiques (Danneville, 1997 ; Larocque & al., 1998 ; Mangin, 1984 ; Rambert, 1971). Ces méthodes ont été appliquées sur différents aquifères français et étrangers, à différentes échelles, allant de la nappe au bassin versant : la Garonne de ses sources à la confluence du Tarn (Danneville, 1997), la nappe de l'Hérault (Dubois, 1988), le Ried de Colmar (Esteves, 1988 ; Esteves & Ackerer, 1988), la plaine de l'Isère dans l'ombilic de Grenoble (Fourneaux, 1975), le bassin versant de la Nema au Sénégal (Lienou, 1996), la nappe alluviale du Rhin (Migayrou, 1975) ou enfin le bassin de l'île Domaniale en Alsace (Zilliox, 1989).

1.4.1.2. (I.1.1.2). Méthodes quantitatives : formules et solutions analytiques, modèles simplifiés

Des formules de base de l'hydrodynamique (Darcy, Dupuit) permettent de calculer des caractéristiques hydrodynamiques, des débits et niveau des nappes. Des méthodes plus élaborées (Hantush, Peaudecerf, Beraud,...) sont davantage appliquées aux phénomènes d'infiltration et de drainance qui pourront intervenir ultérieurement dans l'évaluation des échanges nappes/rivière (Annexe 5).

Dans cette partie nous présenterons uniquement la formule de Darcy qui sera mobilisée pour le calcul des débits de nappe sur le secteur de Brégnier-Cordon (Partie III. Application sur un site test : la chute CNR de Brégnier-Cordon). La formule de Darcy est la suivante :

$$Q = K.A. \frac{dH}{dL} \text{ avec :}$$

Q : débit en m³/s

K : perméabilité en m/s

A : section d'écoulement en m²

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

Dans un premier temps, nous utiliserons cette approche pour calculer les débits de nappe. Il existe toutefois d'autres méthodes de calcul, mais celles-ci nécessitent davantage de données (essais de pompage, chroniques de débits, chroniques piézométriques, suivi de crues...).

1.4.1.3. I.1.1.3. Modélisation des échanges nappes-rivière

D'une manière générale, les modèles hydrogéologiques sont des outils qui permettent de rendre compte de phénomènes naturels ou anthropiques (inondations, pollutions,...). Il s'agit de modèles destinés à représenter le comportement des écoulements en rivière, en nappe ou en canal, les phénomènes de pollution de l'eau. Les modèles mathématiques dits déterministes fonctionnent à partir d'équations différentielles aux dérivées partielles. Les méthodes de résolution font appel à des schémas de discrétisation numérique : 1) aux différences finies (méthode répandue), 2) aux éléments finis, 3) de façon purement analytique lorsque la résolution des équations ne se fait plus numériquement.

Il faut s'assurer de la qualité des données qui seront introduites dans ces modèles, car la qualité des résultats en dépend très fortement (propagation des erreurs). Il existe plusieurs logiciels pour construire

des modèles hydrogéologiques et hydrologiques : Modflow, Feeflow, Newsam, Aquifer test, ... pour les écoulements souterrains : Caredas, Hydroworks,... pour les écoulements en canaux)⁴.

Ces modèles comportementaux de type déterministe peuvent être eux-mêmes composés de plusieurs entités. Par exemple, la modélisation des hydrosystèmes fait intervenir un modèle hydraulique pour l'écoulement des eaux superficielles (fleuve), un modèle hydrodynamique pour l'écoulement des eaux souterraines (nappe phréatique), un modèle de bassin pour les plans d'eau (lacs, étangs, gravières). Ces trois modèles sont interfaçables pour tenir compte des échanges entre les différents éléments de l'hydrosystème. Ce type de modèle permet de simuler le fonctionnement de l'hydrosystème modifié par différentes actions anthropiques comme l'exploitation de granulats ou les pollutions. La simulation de scénarios d'évolution permet d'apprécier l'influence de futurs plans d'aménagement sur l'hydrosystème. Les modèles hydrauliques et hydrodynamiques, couplés à une base de données géographiques de type SIG, simulent la réponse de l'aquifère à l'aménagement, mettant ainsi en évidence les paramètres clés à prendre en compte (dimensionnement par exemple). Les résultats produits par ce type de modèle proposent une représentation physique de la ressource en eau, à partir d'objets hydrologiques pour visualiser les relations d'échanges (flux) entre ces objets et les bilans hydrologiques.

Il existe plusieurs méthodes de modélisation mathématique des écoulements avec lesquelles on peut tenter d'améliorer les représentations cartographiques. Parmi elles, on peut citer les modèles mathématiques aux différences finies avec un maillage régulier ou irrégulier pour mieux représenter les objets hydrologiques (Mimoun, 2004), et des modèles mathématiques par éléments analytiques qui permettent de prendre en compte encore plus exactement la forme des objets hydrologiques (ex : contours curvilinéaires des nappes, des lacs, des cours d'eau,...) et donc la réalité de terrain (Dauvergne & al., 2003).

L'évaluation quantitative des échanges entre écoulements de surface et souterrains fait l'objet d'une activité de modélisation relativement importante. Ceci, dans un but de compréhension et d'analyse des phénomènes d'échange ou pour prévoir leur évolution par simulation. Cette évaluation s'inscrit le plus souvent dans un cadre de modélisation de systèmes aquifères. L'analyse bibliographique de ces modèles conduit à distinguer :

- 1 – la nature ou le type de modèle développé (déterministe, stochastique),
- 2 – les données qu'il utilise en entrée,
- 3 – les résultats produits,
- 4 – le principe de modélisation (discrétisation, résolution numérique, mode de calibration),
- 5 – le domaine d'usage (simulation, gestion, aide à la décision, analyse du comportement des hydrosystèmes, caractère expérimental) et l'utilisateur,
- 6 – le calcul des échanges avec un cours d'eau lorsque l'aquifère est connecté à un écoulement superficiel
- 7 – les logiciels utilisés pour le prétraitement (organisation des données, articulation avec 1 SIG) ou le post-traitement (visualisation) avec leurs avantages ou leurs inconvénients,
- 8 – enfin, les références (auteurs, date, publication, documentation)

Les modèles couplés eaux souterraines – eaux de surface peuvent être utilisés pour évaluer les échanges nappes-rivières. Il s'agit de modèles combinant les écoulements sur les bassins versants, leur infiltration dans le milieu souterrain et leur connexion éventuelle avec un cours d'eau.

Modèles couplés eau souterraine-écoulement en rivière

⁴ www.waterloohydrogeologic.com ; www.scisoftware.com

Le principe du couplage est dit externe car il se fait par échange de fichiers, les résultats du module « eau souterraine » étant introduits en tant que données dans le « module rivière » ou réciproquement. Les données échangées sont : le flux sortant ou entrant après calcul de l'écoulement souterrain, les hauteurs d'eau calculées par le module « eau de surface » et introduites en conditions limites dans le module « eau souterraine ».

Le couplage est réalisé par l'interface entre les deux domaines et par conséquent par l'intermédiaire des conditions aux limites. L'eau libre agit sur l'écoulement souterrain comme une condition de Dirichlet (hauteur imposée). L'écoulement souterrain agit sur l'eau libre par le biais d'une condition de Neuman (débit imposé normal aux berges). Le caractère dynamique de l'échange peut faire intervenir des conditions de suintement.

Le principal problème qui subsiste est celui du temps puisque les temps caractéristiques des deux types d'écoulement sont très différents (de l'ordre du dm/s pour l'eau de surface, de quelques mm/s dans les nappes).

Le module « rivière » : Il est fondé sur la dérivation des équations de St-Venant (qui peuvent être simplifiées pour modéliser le ruissellement provenant des bassins versant et se propageant dans le cours d'eau).

Le module « écoulements souterrains » : Il utilise généralement les équations d'écoulement en milieu poreux selon les cas non saturé et/ou saturé.

On y retrouve l'équation de Darcy combinée avec l'expression de la conservation de la masse pour obtenir l'équation générale de diffusivité qui est ensuite discrétisée en 2D ou 3D selon le maillage du domaine étudié. Cependant l'équation de Darcy n'étant pas valable au-dessus d'une certaine vitesse qui n'est plus liée au gradient hydraulique (pour un nombre de Reynolds $1 < Re < 10$), on utilise la relation de Forchheimer. On obtient l'équation d'écoulement en milieu poreux pour la zone non saturée dont la forme variationnelle peut faire l'objet d'une modélisation aux éléments finis si le sol n'est pas homogène (les différences finies peuvent suffire si l'aquifère est homogène sur la portion du domaine étudié). Les conditions aux limites de type Dirichlet, Neuman et Cauchy sont définies :

- Dirichlet : pour imposer la charge piézométrique, le long d'un contact avec un plan d'eau, une rivière,
- Neuman : pour représenter une partie de contour imperméable en imposant le flux qui le traverse,
- Cauchy : spécifiant que le flux traversant un contour dépend de la charge piézométrique sur ce contour (contact nappe-rivière, ou nappe-canal dont l'étanchéité peut varier).

Généralement, les hauteurs d'eau sont imposées à l'amont et à l'aval du cours d'eau. Les apports des affluents ou torrents sont représentés par des débits imposés (Q imposés). L'équation de Richards peut être également utilisée dans les modèles pour la modélisation des écoulements à la fois dans la zone non saturée et dans la zone saturée (thèse Lemacha, 2006). En général, le cours d'eau est représentée par des mailles rivières telles que $Q \text{ échange} = C (H_r - H_n)$ avec C conducteur, paramètre de calage au même titre que la perméabilité K . Le calage est effectué sur le mode essai-erreur en comparant données observées et calculées (Q rivière ou hauteur de nappe).

Ce type de couplage a été utilisé pour évaluer l'influence des remontées de nappe dues aux crues de la Loire aval par exemple (Poligot-Pitsch, 2002) en ayant recours à :

- une modélisation aux éléments finis 2D et 3D développée sur Matlab de l'écoulement souterrain en régime stationnaire et transitoire (logiciel NSAT) ;
- au progiciel CESAR (mailleur 2D et 3D), et au logiciel d'éléments finis SEEP/W de Géoslop-International pour la modélisation des infiltrations.

Conclusion :

L'applicabilité de ce type de couplage semble théoriquement possible mais difficilement réalisable à l'échelle d'un bassin versant comme le Rhône. La disponibilité de nombreuses données est nécessaire et dépend de la nature du couplage : 2D souterrain – 1D surface, 3D souterrain – 2D surface.

Les difficultés rencontrées concernent essentiellement la construction du maillage à l'échelle d'un bassin versant comme le Rhône, et des problèmes de convergence dus à la taille des mailles.

L'opération de calage est délicate puisqu'elle fait intervenir plusieurs paramètres (K et C) ainsi que des jeux de données différents (débits en rivières et hauteurs de nappes).

Les avantages des systèmes aux éléments finis sont la prise en compte des hétérogénéités de l'aquifère grâce aux éléments finis par rapport à MODFLOW ou MARTHE (BRGM) fonctionnant aux différences définies.

Les modèles en 1D d'écoulement de surface aux éléments finis nécessitent des simplifications et ne fonctionnent que pour des hauteurs d'eau faibles (1m maximum) avec fond plat, pente simple, pente double ou cuvette comme dans les écoulements en canal. Enfin, le choix du pas de temps reste problématique, et l'influence de l'érosion et de la stabilité des berges n'est pas prise en compte. La prise en compte de contre-canaux ou de barrages (modélisation de l'avancement du front d'eau par courbe de remous) le long du cours d'eau n'est pas toujours prévue.

Finalement, le calcul des échanges sur les mailles du modèle en connexion avec la rivière se fait par calage des conducteurs qui permettent de calculer les débits d'échange. Cela est possible puisque cette maille est en équilibre avec les autres du fait de la propagation du calcul dans tout le maillage.

Les équations mathématiques qui interviennent dans les différents modèles, les schémas de résolution numérique utilisés sont décrits dans les références bibliographiques consultées (Poligot-Pitsch, 2002 ; Triganon & al., 2003 ; Golaz, Gomez & Ledoux, 1998 ; Dauvergne, 2003 ; Mimoun, 2004).

Le degré d'opérationnalité de ces modèles peut être évalué sur des critères assez simples :

- performance : dépend de la qualité des données (résolution). Ils sont très efficaces sur le plan informatique car le temps de calcul est réduit pour les simulations ;
- alimentation en données : le modèle doit être calé ou calibré par rapport à des mesures de terrain sinon il ne peut pas permettre d'effectuer des simulations. Les données sont aussi essentielles pour fixer les conditions limites, géométriques, et hydrodynamiques indispensables à la construction du modèle. Finalement, il faut savoir identifier les paramètres de sensibilité du modèle qui permettent d'aboutir à son calage qui peut être complété à l'aide de paramètres qui ne sont plus de nature purement physique mais également biologique (bio-indicateurs végétaux ou animaux) ;
- simplicité d'utilisation : l'utilisation de ce type de modèle nécessite une formation appropriée ;
- réalisme : ces modèles constituent des outils permettant d'étudier les mécanismes physiques impliqués (ex : échanges nappe/rivière) mais aussi de simuler des impacts d'aménagements hydrauliques. Leur utilisation combinée avec des SIG permet d'en prédéterminer le fonctionnement et la visualisation spatiale des résultats ;
- crédibilité : ces modèles constituent des argumentaires spatiaux peu convaincants pour des non-spécialistes en hydraulique et nécessitent d'être comparés avec d'autres données, biologiques par exemple pour des modèles d'écoulement.

1.4.2. (1.1.1.4.) Méthodes bilans et statistiques

Le travail de Danneville (1997) propose une qualification et une quantification des apports souterrains provenant des aquifères en étiage sur tout un cycle hydrologique. Cette méthode nécessite :

- de nombreuses données, comme les débits moyens journaliers, les précipitations journalières sur des périodes longues, tant sur le fleuve que sur ses affluents, afin de pouvoir étudier des cycles hydrologiques secs et humides ;
- une bonne connaissance des modifications anthropiques tels les barrages énergétiques, les canaux, les prélèvements (AEP, irrigation, industries) ;
- la réalisation de schémas hydrauliques tenant compte des entrées et des sorties d'eau naturelles et artificielles (contribution aux débits des affluents, des canaux, dérivation, exutoires...) ;
- une décomposition hydrodynamique des hydrogrammes en fonction du comportement des aquifères pour déterminer leurs apports aux eaux de surface ;
- une étude des courbes de tarissement pour une quantification des réserves souterraines.

Contribution des affluents au débit du fleuve

Au départ, il est nécessaire de construire le schéma hydraulique et de reconstituer les débits naturels. Pour cela, il faut tenir compte :

- des barrages : il y a en effet une différence entre débit mesuré et débit naturel au niveau des barrages en fonction de leurs capacités de stockage et de déstockage. Il est important de comparer les deux types de débits pour connaître l'impact des aménagements. Sur un cycle hydrologique, l'effet du barrage est souvent nul (sauf s'il est soumis à des prélèvements), par contre il est très important au pas de temps mensuel ;
- des canaux : les débits prélevés et les débits rendus font varier le débit naturel ;
- des prélèvements : AEP (sources, puits, forage, prise en rivière), industriels, et agricoles (nappe libre, rivière en période estivale). Le plus souvent, ce type de prélèvements est sous-estimé. Il est possible de réévaluer les captages en fonction de la surface irriguée. D'une manière générale les captages en nappe et en rivière ne sont pas tous connus.

La contribution des affluents au débit du fleuve peut être évaluée à l'aide des débits moyens journaliers sur différentes échelles de temps :

- sur des périodes longues (15 ans) pour le calcul des apports moyens ou débits moyens journaliers pluriannuels, car ils gommant l'influence des barrages et des ouvrages. Il est ainsi important de connaître la date d'installation des ouvrages pour éviter des problèmes sur les calculs des débits ;
- sur les cycles hydrologiques (1 an ou plus), avec au moins un cycle sec et un cycle humide (hautes-eaux et basses-eaux). L'étude peut se faire à partir d'une année sèche (faible pluviométrie) et d'une année humide (forte pluviométrie) en considérant la pluviométrie moyenne journalière sur le cycle ;
- sur des périodes mensuelles (hautes-eaux et basses-eaux). L'étude des apports en période d'étiage est intéressante car ces apports sont alors essentiellement souterrains, sauf en cas de pluie estivale. Ici, la distribution des apports révèle les principales zones de réserves souterraines. Les apports en période de hautes-eaux permettent de discriminer les apports souterrains des apports dus au ruissellement.

En conclusion, l'utilisation des débits issus des chroniques de cycles hydrologiques ou mensuels permet de quantifier les apports qu'un fleuve reçoit de ses affluents, et d'estimer l'influence des variations climatiques interannuelles sur les débits moyens. Sur des périodes longues (pluriannuelles), il apparaît que l'influence des prélèvements pour des canaux n'est pas négligeable, au contraire de l'influence des barrages. Il est aussi possible de mettre en évidence les zones régulatrices des bassins en comparant les cycles hydrologiques et les débits mensuels. Un travail sur les débits d'étiage permet de mettre en évidence la répartition des réserves souterraines.

Contribution des eaux souterraines aux débits des eaux de surface

L'étude de Danneville (1997) tient compte du comportement différent des aquifères alluviaux et karstiques.

~ Détermination des apports des aquifères alluviaux

Les aquifères alluviaux étant généralement des nappes libres associées à un cours d'eau, les échanges ont lieu dans deux sens, soit la rivière a un rôle drainant, soit la rivière à un rôle d'alimentation.

L'étude de ces apports peut se faire selon plusieurs méthodes :

- *utilisation des pluies efficaces* (fraction de précipitation intervenant dans la recharge de l'aquifère) fondée sur un bilan hydrique annuel intégrant : précipitation, l'ETP (Evapotranspiration Potentielle), l'ETR (Evapotranspiration Réelle), la RFU (Réserve Facilement Utilisable). Ici, le problème est qu'il faut supposer que la nappe a un comportement dynamique saisonnier, ce qui n'est pas toujours le cas. En effet, une partie des pluies peut servir à la recharge de la nappe suite à des cycles déficitaires.

- *utilisation des stations hydrométriques* (en amont et en aval de la nappe) en effectuant une soustraction des débits entre deux stations hydrométriques placées en amont et en aval de la nappe alluviale. Si l'on travaille sur des stations proches, il est possible d'utiliser un pas journalier. Si l'on travaille sur des stations éloignées, il est préférable d'utiliser un pas hebdomadaire, mensuel ou annuel en raison du déphasage entre les deux hydrogrammes).

Cette méthode est possible sur des secteurs où la nappe couvre toute la superficie du bassin entre les deux stations. Il est aussi nécessaire d'avoir des chroniques de débits sur une période identique, et de s'assurer de la sensibilité des stations par analyses corrélatoires et spectrales.

- *utilisation de relevés piézométriques à un instant donné* fondée sur les cartes piézométriques hautes-eaux et basses-eaux (évolution du niveau de la nappe et des réserves) et le coefficient d'emmagasinement par pompage d'essai (évaluation du volume des réserves). Un enregistrement continu sur un point permet de déduire la variation des réserves sur un aquifère homogène, continu, avec transmissivité unique. Sinon, il est nécessaire d'avoir un enregistrement sur plusieurs points. Cette méthode permet de déterminer les apports potentiels de la nappe au réseau hydrographique de façon permanente.

- *décomposition de l'hydrogramme* fondé sur sa séparation en une partie souterraine et une partie de ruissellement de manière graphique. Cette méthode, appelée aussi analyse spectrale et corrélatoire, nécessite une bonne connaissance du bassin hydrogéologique.

Ce type d'étude nécessite le recueil de nombreuses données : surface du bassin, nature des formations géologiques, nature des alluvions (épaisseurs mouillées, transmissivités), modes d'alimentation (précipitation, autres aquifères, eaux de surface), niveaux piézométriques (sens d'écoulement), coefficient de tarissement.

Si les débits ne sont pas utilisables (déphasage des chroniques, imprécision des mesures, corrélation trop forte entre les débits de deux stations trop proches), il est possible d'utiliser une analyse corrélatoire et spectrale des hydrogrammes pour estimer de manière qualitative si la nappe alimente la rivière. La quantification des échanges nécessite des mesures piézométriques.

Il existe des logiciels pour réaliser ces analyses :

- 1) Stochastos (CNRS Moulis) : pour l'étude de chroniques et analyses corrélatoires et spectrales (ACS) ;
- 2) Recess (CNRS Moulis) : pour l'analyse de la décrue et du tarissement des hydrogrammes (coefficient de tarissement, volume de tarissement, coefficient de la décrue).

Selon Mangin (1984), l'étude de séries chronologiques de données (pluies, débits, niveaux d'eau...) constitue un moyen de décrire les aquifères. Ces données sont complexes à étudier car elles sont à la fois structurées (dépendantes dans le temps) et aléatoires. Il s'agit de variables régionalisées. Elles peuvent être traitées par des méthodes fondées sur des modèles visant à prévoir, contrôler des données ou reconstituer des valeurs manquantes. Parmi ces modèles, on peut citer celui de Box & Jenkins utilisé par Košmelj (1982) pour caractériser et étudier les relations des nappes de Brégner-Cordon (Partie III. Application sur un site test : la chute CNR de Brégner-Cordon). Toutefois, avant d'élaborer des prévisions, il est nécessaire de connaître la structure et le fonctionnement des systèmes aquifères étudiés. Pour cela, il est possible de s'appuyer sur des méthodes géostatistiques comme l'analyse des courbes de récession, des débits classés, des niveaux piézométriques, de la caractérisation de la pluviométrie ou les analyses corrélatoires et spectrales.

Les analyses corrélatoires, fondées sur l'étude de corrélogrammes, permettent de mettre « en évidence la dépendance d'événements entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grand ; il traduit par

conséquent la mémoire du système⁵ ». D'un autre côté, « l'approche spectrale est duale de l'approche corrélatoire, elle exprime dans le domaine fréquentiel ce dont le corrélogramme rend compte dans le domaine temporel » (Mangin, 1998). De telles analyses peuvent être aussi utilisées pour traiter des données comme la température ou la chimie des eaux.

~ Détermination des apports des aquifères karstiques (Larocque & al., 1998)

Ce travail d'étude fonctionnelle des aquifères karstiques nécessitent aussi de nombreuses données : coefficient de compacité, volume dynamique moyen (volume des réserves souterraines), altitude, débits moyens interannuels (Q_{mi}) pour distinguer les périodes pluvieuses, coefficient de tarissement pour estimer le volume des réserves souterraines, débits moyens par cycle (Q_{mc}).

Les bassins karstiques sont étudiés en tant que systèmes hydrologiques avec signal d'entrée (précipitations) et signal de sortie (débits). Ces signaux sont étudiés avec des analyses corrélatoires et des analyses spectrales. Ces analyses permettent de mettre en évidence : le pouvoir régulateur d'un karst ou d'un bassin, l'importance des réserves, la mémoire du bassin. L'étude de tarissement permet d'identifier des réservoirs souterrains mal connus et sous-estimés.

~ Bilan

On peut ainsi comparer le comportement dynamique des aquifères karstiques et poreux et des systèmes hydrologiques de surface grâce à des corrélogrammes. Ils permettent de mettre en évidence le rôle régulateur des systèmes hydrologiques et des nappes alluviales, plus important que celui des karsts. Le cycle saisonnier est bien marqué pour ces derniers, plus que pour les aquifères poreux. De manière générale, une baisse régulière de la piézométrie peut montrer des prélèvements humains.

On peut aussi relier les réserves souterraines à la variabilité des effets du climat sur les écoulements grâce à des analyses corrélatoires et spectrales, en séparant fonction de transit (écoulement de l'eau par un drain dans les aquifères karstiques, écoulement de l'eau par la rivière dans les systèmes hydrologiques de surface) et fonction captive (systèmes annexes dans les karsts, eaux souterraines et neige pour les systèmes de surface).

L'évaluation des réserves se fait en fonction de chroniques de débit. Un travail sur des chroniques de 15 ans produit des résultats satisfaisants. Les corrélogrammes permettent de classer les bassins selon qu'ils ont des réserves neigeuses dominantes, des réserves souterraines et neigeuses importantes, des réserves souterraines importantes, des réserves souterraines plus faibles, ou enfin aucune réserve.

L'étude de la tendance de l'évolution des débits, et la comparaison avec l'évolution de la pluviométrie, permet de voir l'importance des prélèvements humains. On utilise des moyennes mobiles pour évaluer les tendances. La dynamique des bassins est plus ou moins sensible aux conditions climatiques, et ceci est lié au rôle régulateur des réservoirs neigeux et souterrains. Il existe ainsi des rivières sans réserve notable, ou avec des réserves uniquement souterraines et/ou neigeuses.

L'estimation des apports souterrains et des réserves souterraines sur des bassins nécessite de travailler sur des cycles hydrologiques, sur le volume de tarissement pour les aquifères poreux (période longue de récession des débits après crue sur une période de calcul de 20 ans au moins) et sur le volume dynamique plutôt que de tarissement en aquifères karstiques. Ce type de calcul est réalisé grâce à la formule de Maillet. Il est ainsi possible d'évaluer le volume des réserves souterraines et leur évolution dans le temps. Le tarissement peut être influencé par les aménagements, la neige, la pluie, et doit donc être corrigé en conséquence. De plus, il faut penser que l'écoulement souterrain existe aussi pendant la phase de décrue, et que le volume réel est donc toujours supérieur au volume de tarissement.

⁵ Ceci est surtout vrai pour les systèmes karstiques qui sont des systèmes à mémoires liées à l'importance des réserves et à la nature de l'aquifère.

La décomposition hydrodynamique de l'hydrogramme d'une crue simple peut se faire selon plusieurs méthodes : les méthodes classiques (Castany), les méthodes semi-logarithmiques, et la méthode Langbein. Danneville (1997) propose quant à lui une nouvelle méthode tenant compte des aménagements (détournement d'eau ou modification du régime par stockage/déstockage) et de la fonte des neiges. Le travail est effectué sur un hydrogramme où on retire le débit correspondant à la fonte des neiges et corrigé en fonction des débits dus aux aménagements. La décomposition de l'hydrogramme en une composante souterraine et en un ruissellement est réalisée par extrapolation de la courbe de tarissement jusqu'au pic de crue (pour les aquifères à réaction rapide) ou un mois après le pic de crue (pour les aquifères poreux).

Ces méthodes présentent leurs limites. Elles sont surtout valables sur des tronçons où la nappe alimente la rivière. En effet, les bilans ne tiennent pas compte de la recharge des aquifères alluviaux par la rivière ou le fleuve. De plus, elles ne sont sans doute pas très utilisables pour des fleuves où les débits sont trop importants par rapport aux apports potentiels des nappes. Sur le Rhône, leur utilisation en aval de la confluence avec la Saône semble compromise. Ceci reste à confirmer dans les prochaines étapes du travail. Par contre, l'apport des méthodes hydrochimiques mérite d'être examiné car elles peuvent produire des résultats intéressants des échanges nappe/rivière.

1.4.3. 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, pompes (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).

1.4.4. 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.

1.4.5. 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)...

1.4.5.1. 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.

1.4.5.2. 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).

1.4.5.2.1. 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 13), le flux de l'aquifère est inclus dans les conditions limites (De Lange, 1999). De Lange (1999) développe une approche pour intégrer toute 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 13 (Figure_4): 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 14 ; Figure 15) 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 14 (Figure_5) : Diminution/augmentation d'échelle des paramètres de la zone saturée et la zone non-saturée (d'après de Lange, 1999)

Figure 15 (Figure_6) : 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.

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 17).

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 16). 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.

Figure 16 (Figure_7) : Couplage FDM et AEM (d'après Hunt & al., 2003)

Figure 17 (Figure_8) : Analyse stochastique de l'infiltration appliquée à l'AEM (d'après Paleologos & al., 2005)

1.4.5.3. 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.

1.4.6. (I.1.2.) Hydrobiologie : invertébrés souterrains

Dans le but de repérer, puis de cartographier les circulations d'eaux souterraines dont l'observation directe est impossible, Marmonier (1988) s'est attaché à rechercher des descripteurs de fonctionnement hydrologique choisis dans la physico-chimie des eaux interstitielles, de la granulométrie et de la physico-chimie des sédiments ainsi que dans la faune interstitielle.

Sur le secteur amont du Canal de Miribel, trois groupes de paramètres chimiques des eaux interstitielles ont ainsi été identifiés : 1) les sulfates qui permettent de localiser les zones d'infiltration d'eau superficielle où ils atteignent des valeurs proches de celles mesurées dans le Rhône, 2) la conductivité, la dureté, l'alcalinité et la teneur en silice qui permettent de localiser les zones de transformation physico-chimiques des eaux au contact des sédiments et d'estimer leur trajet parcouru depuis leur infiltration, et 3) les nitrates, qui permettent de localiser les arrivées d'eaux souterraines provenant de la rive (si cette dernière est assez oxygénée pour interdire tout processus dénitrifiant) ou de la profondeur des sédiments. En revanche, l'utilisation de la granulométrie et de la physico-chimie des sédiments semble interdire tout choix de descripteurs fiables.

Figure 18 (Figure_1)° Liste ordonnée de la faune stygobie du Rhône à l'amont de Lyon. L'ordination proposée correspond à la fois aux gradients verticaux, transversaux et longitudinaux (D'après Dole-Olivier et al. 1993).

Mais plus que les facteurs abiotiques, ce sont les descripteurs biotiques, à savoir les organismes, qui fournissent le plus de renseignements permettant la reconstitution des circulations d'eau dans le milieu interstitiel. Toutefois, Marmonier (1988) souligne qu'il serait indispensable de conserver les descripteurs biotiques et abiotiques, la redondance et la complémentarité des informations qu'ils apportent renforçant les images des échanges entre eaux superficielles et souterraines. La priorité étant donnée pour le moment au rassemblement des données faunistiques, les données physico-chimiques des eaux interstitielles seront considérées ultérieurement. L'intégration de ce type de données dans la base est souhaitable à moyen et long terme.

La relation très claire existant entre l'origine et le mode de circulation des eaux dans les sédiments, et la structuration spatio-temporelle des peuplements interstitiels à différentes échelles a permis d'envisager la possibilité d'utiliser les taxons stygobies comme descripteurs biologiques des échanges entre eaux de surface et eaux souterraines (Ginet 1982, Marmonier 1988). Dans cette perspective, Dole-Olivier et al. (1993) ont proposé, pour le secteur Rhône en amont de Lyon, une liste de 15 taxons stygobies ordonnés selon un gradient croissant de sensibilité aux fluctuations environnementales dans les trois dimensions spatiales de l'hydrosystème fluvial (Figure 18).

Tableau 1 (Tableau_1) Informations apportées par les quatre espèces de Candoninae stygobies (Crustacés Ostracodes) des plaines alluviales de l'Ain et du Rhône (D'après Marmonier 1988).

Présentant des valences écologiques différentes (ex. Ostracodes Candoninae : Tableau 1), ces taxons permettent, d'une part, le repérage des circulations souterraines en apportant des informations sur l'origine de l'eau interstitielle et l'importance des échanges entre le cours d'eau et sa nappe, et d'autre part, leur sensibilité aux crues en fait de bons indicateurs de mesure du degré de stabilité physique du milieu. En fonction de leurs valences écologiques, ces taxons stygobies regroupent (Marmonier 1988, Dole-Olivier et al. 1993) :

- des organismes sensibles aux caractéristiques du sédiment (ex. granulométrie, teneur en matière organique) dans les zones d'infiltration des eaux de surface ou de zones d'arrivées d'eaux souterraines. Par exemple, les espèces stygobies telles que *Fabaeformiscandona wegelini* et *Niphargopsis casparyi*, sont presque uniquement trouvées en amont de bancs de graviers dans le chenal actif du Rhône, où les circulations d'eau sont intenses, les sédiments bien oxygénés et enrichis en matière organique par les arrivées d'eau superficielle. Au contraire, d'autres espèces qualifiées de phréatobies telles *Proasellus walteri*

et *Pseudocandona zschokkei* se développent préférentiellement dans les zones aval de banc de graviers où les teneurs en oxygène et en matière organique ainsi que les densités de prédateurs (ex. *Niphargus* sp.) sont plus faibles. D'autres espèces phréatobies, plus rares et plus sensibles à la stabilité physique des sédiments telles *Microcharon reginae* et *Schellencandona triquetra*, ne développent pas de populations stables à de faibles profondeurs dans le chenal actif du Rhône, mais colonisent préférentiellement les habitats interstitiels à forte stabilité physique telles les annexes les plus éloignées du chenal actif et donc isolées du réseau hydrographique de surface.

- des organismes sensibles aux caractéristiques hydrauliques quelles que soient les caractéristiques du sédiment. Par exemple, les genres *Salentinella* sp. et *Parastenocaris* sp. sont caractéristiques des zones d'arrivées des eaux souterraines, leurs distributions spatio-temporelles étant étroitement liées aux zones de circulation ou d'apport des eaux phréatiques.

- des organismes ubiquistes tel *Niphargus rheinorhodanensis*, une des rares espèces stygobies trouvée dans tous les types d'eaux souterraines (hyporhéique, phréatique et karstique) et parfois dans le milieu benthique.

Il convient de rappeler ici que les descripteurs de fonctionnement n'ont souvent de valeur que dans un système donné. La faune stygobie peut ne pas être toujours aussi diversifiée (ex. secteur de Donzère-Mondragon) que dans la plaine alluviale de l'Est lyonnais et des études comparatives dans d'autres secteurs du Rhône (ou dans d'autres fleuves) seront certainement nécessaires afin de vérifier l'efficacité des descripteurs faunistiques utilisés. De plus, la faune stygobie est généralement caractérisée par un fort degré d'endémisme, les espèces pouvant être limitées à un seul aquifère (Dole-Olivier et al. 2005, Ferreira 2005). Par exemple, au niveau du secteur de Miribel-Jonage, les aquifères fluviaux des rives droite et gauche du Rhône contiennent respectivement 29 et 21 espèces avec seulement 16 espèces en commun (Ferreira, données non publiées). Parmi les espèces interstitielles, les oligochètes présentent globalement un degré élevé d'ubiquité et d'eurytopie (Lafont 1989). A ce titre, la distribution spatiale des Oligochètes est peu dépendante du contexte éco-régional autorisant des études comparatives entre sites géographiquement éloignées (Lafont et Vivier 2006).

Compte tenu de l'importance des eaux souterraines dans la dynamique de leur répartition, les oligochètes ont fait, depuis la fin des années 1980, l'objet d'un travail de recherche spécifique visant au développement d'un outil fiable de description biologique du degré de pollution des eaux et des sédiments (Lafont 1989). Le développement de ce travail a, entre autres, conduit Lafont et al. (1992) au développement du concept d'*Active Exchange Describers* (AED). **Ce concept s'appuie sur la relation étroite existante entre les mesures hydrauliques (vitesse de filtration) et la distribution spatiale de certaines espèces d'oligochètes dans les sédiments.** Les oligochètes considérés comme des AED correspondent à des espèces qui 1) exploitent essentiellement les eaux souterraines et 2) qui prédominent dans les sédiments superficiels lorsque les vitesses de filtration à travers les sédiments hyporhéiques sont importantes. **L'examen des espèces d'oligochètes AED permet en outre de décrire le sens privilégié des échanges entre le cours d'eau et sa nappe** (Lafont et Durbec 1990, Lafont et al. 1992). Une liste d'oligochètes AED a été proposée (Lafont 1989, Lafont et al. 1992) et est régulièrement mise à jour (Tableau 2).

Tableau 2 (Tableau_2) Liste des espèces d'oligochètes AED (d'après Lafont et Vivier 2006).

En l'état actuel, les données rassemblées dans la base permettent d'envisager deux approches méthodologiques pour l'évaluation des échanges superficiels/souterrains sur le secteur test sélectionné, la première portant sur l'ensemble des groupes taxonomiques composant les peuplements interstitiels, et la seconde portant plus spécifiquement sur les seuls peuplements d'oligochètes.

1.4.7. (I.1.2.1.) Utilisation des espèces interstitielles pour définir les échanges eaux de surface/eaux souterraines

Sur l'ensemble des stations de ce secteur, la faune récoltée dans le milieu interstitiel pourrait permettre, dans un premier temps, d'identifier la structuration spatiale des peuplements interstitiels, tous groupes taxonomiques confondus. Néanmoins, l'hétérogénéité des données rassemblées dans la base incluant la variabilité du niveau de détermination des organismes selon les groupes faunistiques, de la profondeur des échantillons (généralement comprises entre 20 cm et 2 m) et de la période d'échantillonnage (été / hiver, étiage / crues) soulève le problème de la variabilité de l'effort d'échantillonnage. Indépendamment de la qualité des données disponibles (ex. précision des données cartographiées), la variabilité de l'effort d'échantillonnage constitue un problème récurrent dans les analyses biogéographiques quels que soient le milieu, l'échelle spatiale ou le groupe taxonomique considérés. Les données rassemblées dans les bases sont effectivement rarement récoltées dans le but d'analyses cartographiques. Aussi, la carte de distribution des données rassemblées sur l'ensemble du corridor fluvial du Rhône traduit en premier lieu l'état actuel des connaissances (Figure 20). L'étude des caractéristiques faunistiques des stations ne pourra donc être envisagée qu'à partir des données les plus comparables. Il s'agira de sélectionner les données pour lesquelles la pression d'échantillonnage ne présente pas de disparités trop importantes. Des limites (ex. systématiques pour les différents taxons récoltés, profondeur et période d'échantillonnage) devront donc être fixées.

Le modèle prédictif attendu est une structuration spatiale des peuplements interstitiels liée aux interactions entre les eaux superficielles et souterraines. Il s'agirait, dans un premier temps, de **mettre en évidence l'établissement d'une structuration spatiale de la faune hyporhéique à une profondeur et une période donnée à l'échelle du secteur test sélectionné**. Dans un deuxième temps, il s'agirait d'utiliser et de tester les descripteurs stygobies identifiés par Dole-Olivier et al. (1993) pour **renseigner sur la nature et l'origine des eaux circulant dans les sédiments et peut-être également sur l'intensité des flux hydriques qui les traversent**. La distribution spatiale des différents taxons, la richesse taxonomique et le pourcentage d'espèces stygobies pourraient également permettre de définir les caractéristiques faunistiques des stations et d'élaborer une description biologique des échanges entre eaux superficielles et souterraines sous forme de cartes.

1.4.8. (I.1.2.2.) Utilisation des Oligochètes benthiques et interstitiels pour définir les échanges eaux de surface/eaux souterraines

Cette approche serait l'examen simultané de la distribution spatiale des peuplements d'oligochètes dans les milieux benthiques et interstitiels. En effet, 1) la faune a été récoltée à la fois dans les milieux benthiques et hyporhéiques dans près de 50 % des stations hyporhéiques recensées sur le secteur sélectionné, 2) le groupe des oligochètes est un des groupes pour lesquels les identifications ont été menées à l'espèce, et 3) des données sur les peuplements d'oligochètes couvrant des zones spatialement différentes de celles couvertes par les travaux de l'équipe HBES (ex. site de Crépieux-Charmy) ont été obtenues par M. Lafont (comm. pers.).

Le modèle prédictif attendu serait une structuration spatiale des peuplements d'oligochètes liée aux interactions entre les eaux superficielles et souterraines. Il s'agirait, dans un premier temps, de **mettre en évidence l'établissement d'une structuration spatiale des peuplements d'oligochètes à l'échelle du secteur sélectionné**, et dans un deuxième temps, d'utiliser les **espèces AED afin d'identifier les zones d'échanges entre les eaux superficielles et souterraines et de préciser le sens privilégié de ces échanges**. L'examen du pourcentage d'espèces superficielles dans la zone hyporhéique et de celui des espèces AED dans les sédiments superficiels devrait en outre permettre de dresser un bilan global des échanges entre les eaux superficielles et souterraines sous la forme de cartes (Figure 19).

Figure 19 (Figure_2) Description biologique des échanges hydriques sur le site de Crépieux-Charmy en juillet 1994 d'après l'examen des peuplements d'oligochètes (O) et de crustacés (C) (d'après Lafont et Vivier 2006).
Upwellings : exfiltration des eaux souterraines vers les eaux superficielles ; downwellings : infiltration des eaux superficielles dans les eaux souterraines

Figure 20 (Figure_3) Carte de distribution des stations hyporhéiques et phréatiques recensées sur l'ensemble du corridor fluvial du Rhône. Les principaux fleuves représentés sont issus de BD CARTHAGE® (Edition 1 - 2002, IGN, Paris, <http://www.ign.fr>).

1.4.9. Modèles de distribution spatio-temporelle des peuplements interstitiels (LHES)

Les interactions à différentes échelles spatiales entre le réseau hydrographique de surface et les eaux souterraines ont une influence prépondérante sur la richesse taxonomique, l'abondance et la structuration spatiale des biocénoses interstitielles. Le milieu interstitiel étant une zone d'échange entre les milieux benthiques et souterrains, la diversité biologique peut être abordée au niveau de la diversité des groupes écologiques. Cette approche est basée sur la classification des organismes rencontrés dans le milieu interstitiel des cours d'eau en fonction de leur affinité pour le domaine aquatique souterrain (Thienemann 1926, Plesa 1985, Marmonier et al. 1993, Gibert et al. 1994). Cinq groupes peuvent être ainsi définis correspondant aux :

- **stygoxènes** présents accidentellement dans les eaux souterraines,
- **stygoxiles occasionnels**, organismes épigés utilisant le milieu interstitiel mais dont l'accomplissement du cycle vital requiert une phase superficielle obligatoire (ex. larves d'insectes benthiques),
- **stygoxiles permanents**, organismes épigés pouvant effectuer la totalité de leur cycle vital aussi bien dans les eaux de surface que dans le milieu interstitiel (ex. Oligochètes, Crustacés Copépodes),
- **stygoxiles ubiquistes**, organismes strictement inféodés aux eaux souterraines et colonisant tous les habitats souterrains (ex. *Niphargus rhenorhodanensis*),
- **phréatobies**, organismes stygoxiles qui ne colonisent que les habitats interstitiels à forte stabilité physique (ex. *Microcharon reginae*, *Bathynella* sp.).

Hétérogénéité spatiale des peuplements interstitiels dans la plaine alluviale du Rhône

Une relation très claire entre le mode de circulation des eaux dans le sédiment et la structure des peuplements interstitiels a été mise en évidence à différentes échelles spatiales dans différents secteurs du Rhône.

A l'échelle de l'unité géomorphologique (profil seuil-mouille-seuil, bancs de graviers, tronçon), une infiltration des eaux de surface s'effectue généralement en amont des zones de rupture de pente du profil longitudinal (seuil) tandis que la zone située en aval (aval de seuil) est le siège de remontée d'eaux souterraines. Ce fonctionnement en infiltration / exfiltration s'accompagne d'une différenciation nette des peuplements interstitiels de la zone hyporhéique (Dole-Olivier et Marmonier 1992a et 1992b, Mermillod-Blondin 1996). Les zones d'infiltration des eaux de surface sont caractérisées par de fortes diversités et densités faunistiques dominées par les taxons benthiques entraînés passivement ou activement dans le sédiment et par un pourcentage réduit d'organismes stygoxiles. A l'inverse, les zones d'arrivée des eaux souterraines sont caractérisées par de plus faibles diversités et densités d'organismes mais dominées par des taxons stygoxiles. Les zones d'affrontement entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont caractérisées par la diminution de l'importance de la faune benthique et le développement de certains organismes stygoxiles.

L'influence des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines n'a pas été seulement mise en évidence dans la dimension longitudinale, mais également dans les dimensions transversale et verticale de l'espace sous-fluvial (Dole-Olivier et al. 1993).

Dans la dimension verticale, la faune présente une décroissance de l'abondance et une augmentation de la proportion des organismes stygobies avec la profondeur (ex. Dole 1983, Mermillod-Blondin 1996).

Dans la dimension transversale, à l'échelle de la plaine alluviale, les stations les plus proches du chenal actif et les plus fréquemment soumises aux crues possèdent un cortège faunistique dominée par la faune de surface (ex. Marmonier et al. 1992). Inversement, les stations situées près de la bordure de la plaine alluviale hébergent une faune stygobie plus diversifiée.

Cette répétition des mêmes gradients de taxons stygobies dans les trois dimensions de l'espace sous fluvial, d'espèces résistantes à l'instabilité (ex. *Niphargus rheinobodanensis*) à des espèces très sensibles aux perturbations hydrologiques (ex. *Bathynella* sp.), correspond à un gradient de stabilité physique du milieu (*sensu* Dole et Chessel 1986) qui joue un rôle prépondérant dans la structuration spatio-temporelle des peuplements interstitiels (Figure 18).

Dynamique temporelle des peuplements interstitiels

Ces modèles de distribution de la faune rendent donc compte des circulations d'eaux dans les trois dimensions spatiales de l'hydrosystème fluvial qui intègre une quatrième dimension : le temps (Amoros et Petts 1993). Des études intégrant les variations hydrologiques saisonnières et les effets des crues sur les biocénoses interstitielles ont permis de mettre en évidence une dynamique des communautés interstitielles (Marmonier et Dole 1986, Marmonier et Creuzé des Châtelliers 1991, Dole-Olivier et Marmonier 1992a, Dole-Olivier et al. 1997). La colonisation spatio-temporelle de la zone hyporhéique dépend en effet de l'intensité des perturbations mais également des flux hydrologiques (infiltration), de la porosité et de la stabilité des sédiments, et du recrutement des invertébrés (reproduction, morphologie).

Effet des variations hydrologiques saisonnières

L'effet des variations hydrologiques saisonnières sur les communautés interstitielles n'est pas comparable dans tous les secteurs étudiés du Rhône. Si une diminution de la richesse spécifique est généralement observée entre l'été et l'hiver, les variations saisonnières de l'abondance diffèrent selon les caractéristiques hydrologiques des stations étudiées. Dans les stations alimentées par les eaux de surface, l'abondance moyenne des taxons décroît significativement entre l'été et l'hiver en raison notamment de l'importante variation de température des eaux interstitielles (Marmonier et Creuzé des Châtelliers 1993). A l'inverse, dans les secteurs essentiellement alimentés par les arrivées des eaux souterraines, l'abondance moyenne des taxons n'est pas significativement différente entre l'été et l'hiver, la remontée des eaux souterraines pouvant atténuer la variation thermique des eaux interstitielles en hiver (Creuzé des Châtelliers et Marmonier 1993, Ferreira 2000).

Effet des crues

L'effet des crues sur les communautés interstitielles peut varier en fonction de l'origine et du mode de circulation de l'eau alimentant les sédiments (infiltration d'eau de surface ou arrivée d'eau souterraine), et de l'intensité de la crue (définie par le couple durée-amplitude).

Par exemple, dans les stations du Canal de Miribel alimentées par les eaux superficielles, l'effet des crues augmente jusqu'à 300 m³/s en induisant un apport d'organismes de surface dans les sédiments. Au-delà de ce débit, les crues induisent un apport plus massif de faune de surface jusqu'à plus d'un mètre de profondeur, voire même un lessivage de la faune des sédiments pour les débits les plus forts, la richesse taxonomique augmentant ensuite lentement au cours de l'étiage (Marmonier et Dole 1986, Marmonier et Creuzé des Châtelliers 1991, Dole-Olivier et Marmonier 1992a, Dole-Olivier et al. 1997).

Dans les stations alimentées par les eaux souterraines, les crues de courte durée (< 10 jours) et de faible débit ($< 300 \text{ m}^3/\text{s}$) ont peu d'effet sur la structuration spatiale des peuplements interstitiels, qui reste inchangée. Pour des débits plus importants ($> 300 \text{ m}^3/\text{s}$), la diversité des organismes est augmentée par l'infiltration de la faune benthique dans les sédiments mais qui disparaîtra rapidement au cours de l'étiage (Marmonier et Dole 1986, Marmonier et Creuzé des Châtelliers 1991, Dole-Olivier et Marmonier 1992a, Dole-Olivier et al. 1997).

Les deux types de stations présentent donc des dynamiques inversées.

1.4.10. Hydrobiologie : macrophytes

Deux paramètres ont été utilisés pour caractériser les espèces végétales : leur tolérance à l'eutrophisation, et leur affinité pour les apports d'eau souterraine. Le niveau de ressources disponibles dans les écosystèmes aquatiques va jouer un rôle prépondérant sur la structure et la dynamique des communautés végétales. La distribution des espèces végétales aquatiques est donc très fortement corrélée au degré de trophie des écosystèmes. 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 (Barroin 1991). 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. Plusieurs auteurs ont proposé une classification des communautés végétales aquatiques en fonction de leur distribution dans les écosystèmes rangés sur un gradient de concentration croissante de phosphates et d'ammonium dans l'eau (Kohler et al. 1974 ; Carbiener et al. 1990, Robach et al. 1996). La teneur en nutriments dépend du type d'alimentation en eau de la zone humide ; (eaux provenant de nappes, 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 qualité des eaux superficielles dans les annexes fluviales est directement liée à la qualité des aquifères (et parfois des eaux superficielles) qui les alimentent. Ce niveau de ressources permet donc fréquemment de fournir des informations sur l'origine des eaux phréatiques qui alimentent la zone humide (filtrats en général eutrophes de la rivière, résurgences karstiques en général oligotrophes, par exemple). Il est donc important 1) de connaître le niveau de ressources des différentes masses d'eau superficielles et souterraines dans un secteur de plaine donné, et 2) de connaître les tolérances des espèces par rapport à ces ressources, pour établir un diagnostic du type d'alimentation et du débit phréatique dans les zones humides. Le débit de ces apports varie selon les altitudes relatives des nappes souterraines, le degré de colmatage du substrat dans la zone humide, et selon ses caractéristiques physiques, notamment sa pente et sa capacité hydraulique. Comme on l'a dit précédemment, les eaux souterraines peuvent conditionner la qualité de l'eau dans la lône. Si elles sont pauvres en nutriments, elles peuvent maintenir le statut oligotrophe du milieu (Kohler et al. 1974, Carbiener et Kapp 1981). De surcroît, parce qu'elles sont sténothermes et fraîches, si leur débit est suffisant, elles maintiennent des températures plus froides dans la zone humide, ce qui limite la production végétale et notamment les proliférations algales (Bornette & Amoros 1991). Elles contribuent à limiter les phénomènes d'anoxie grâce au renouvellement des eaux engendré par l'apport permanent d'eaux (même faiblement) oxygénées.

Les profils écologiques des espèces végétales aquatiques concernant l'affinité des espèces pour les eaux souterraines et la qualité des eaux ont été établis en deux étapes. Dans une première étape, ces profils avaient été élaborés à partir d'une synthèse bibliographique sur les préférences écologiques des espèces. Cette synthèse a été publiée en 2000 (Amoros et al. 2000). Les exigences des espèces en termes de trophie avaient été établies sur la base de données bibliographiques. Trois niveaux de trophie avaient été définis; oligotrophe pour des teneurs moyennes en $[\text{N-NH}_4^+]$ et $[\text{P-PO}_4^{3-}] < 40 \text{ ug/L}$, mésotrophe pour des teneurs moyennes comprises entre 40 et 80ug/L (valeurs supérieures à celles considérées par Carbiener et al. 1990, et Schnitzler et al. 1996, mais correspondant aux mêmes peuplements représentatifs), eutrophe pour des valeurs supérieures.

Un extrait de la table regroupant ces préférences est présenté ci-dessous (Figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

Tableau 3 (Tableau 3) Fréquence relative d'occurrence de quelques espèces végétales aquatiques dans trois niveaux de trophie des eaux (oligotrophe, mésotrophe, eutrophe) et occurrence habituelle dans les écosystèmes alimentés par des eaux souterraines (extrait de Amoros, C. Bornette, G. & Henry, C. 2000. A Vegetation-Based Method for Ecological Diagnosis of Riverine Wetlands. Environmental Management 25(2) : 211-227).

Ces préférences sont définies sur la base de l'existence de relations significatives entre l'abondance des espèces et les paramètres du milieu indicateurs 1) du niveau de trophie et 2) de l'alimentation en eau souterraine.

Dans le cadre d'une nouvelle étude, nous nous sommes attachés à redéfinir ces profils écologiques non plus sur la base de données bibliographiques, mais sur celle de données floristiques et physico-chimiques collectées dans le bassin du Rhône. Pour cela, nous avons utilisé des relevés floristiques collectés de 1993 à 1999 sur une quarantaine d'anciens chenaux de l'Ain et du haut Rhône (secteurs de Jons et de Brégner). 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 profils n'ont été revus que pour les espèces présentes dans cinq zones humides au moins (soit plus de 10% des écosystèmes échantillonnés).

Etablissement des profils de tolérance vis-à-vis de la trophie des eaux

Nous avons distingué dans un premier temps l'élément phosphore et l'élément azote. Nous avons cherché à mesurer la relation entre l'abondance des espèces et la teneur en phosphore mesurée dans l'eau [PO_4^{3-}] (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). 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 de cet indice « phosphore » ont été divisées en 5 classes, l'abondance moyenne de chaque espèce par classe a été calculée, et la relation entre la distribution de l'espèce et la valeur de cet indice a été testée. La même démarche a été appliquée pour l'azote, en se focalisant sur l'azote ammoniacal, cité dans la bibliographie, avec le phosphore, comme principal facteur d'eutrophisation des eaux. 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 dans l'écosystème. La synthèse entre les deux profils a ensuite été établie espèce par espèce, pour fournir un indice global de tolérance de l'espèce à l'eutrophisation.

Etablissement des profils écologiques vis-à-vis des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont caractérisées par leur grande stabilité thermique par rapport aux eaux de surface (Sakura 2000). Par conséquent, on a utilisé **la variabilité thermique relative des zones humides comme indicatrice de l'intensité relative de l'alimentation par les eaux souterraines**. En effet, lorsque le renouvellement des eaux superficielles par les eaux souterraines est important, ces dernières 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 au moins un cycle annuel. On a donc travaillé sur 43 lînes de l'Ain et du Rhône ayant fait l'objet d'au moins 12 campagnes de prélèvements distribuées sur un cycle annuel, et vérifié que le nombre de valeurs n'influençait pas la variance thermique des sites.

L'analyse a alors consisté d'abord à représenter l'abondance de chaque espèce en fonction du coefficient de variation de la température dans les sites, en recherchant les corrélations éventuelles, puis

à tester l'existence d'une variation significative de l'abondance de l'espèce dans les sites répartis en 5 classes suivant la valeur du coefficient de variation.

Etablissement des nouveaux profils écologiques

La distribution de chaque espèce pour chaque paramètre (trophie, et alimentation en eaux souterraines), 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. Ces préférences sont ensuite comparées avec celles définies précédemment à partir de la bibliographie (Amoros et al., 2000).

Pour la variable « concentration en ammonium », nous avons distingué quatre classes au lieu de trois dans l'étude d'Amoros et al. Approximativement, la limite entre les classes 1 et 2 correspond à la limite entre les niveaux oligotrophes et mésotrophes de la grille précédente (0,043 mg/L), de même la limite entre les classes 2 et 3 correspond à celle séparant les niveaux mésotrophes et eutrophes (0,075 mg/L). L'innovation repose donc essentiellement sur la définition d'une nouvelle classe, que nous avons qualifiée d'hyper-eutrophe, et qui atteint des valeurs nettement plus élevées (entre 0,25 et 0,53 mg/L). Pour la variable « concentration en phosphore dans l'eau et le sédiment », nous avons défini 5 classes, que nous avons confrontées aux quatre nouvelles classes de trophie (oligotrophe à hyper-eutrophe). Cependant, d'après les tests, le phosphore s'est rarement révélé un paramètre régissant l'abondance des espèces, contrairement à l'ammonium.

Enfin en ce qui concerne l'alimentation en eau souterraine, le présent travail nous permet de mesurer, pour certaines espèces, grâce à leur répartition dans les cinq classes de variabilité thermique, si leur présence est liée à des apports d'eau souterraine, et à leur intensité.

Le Tableau 4 présente les nouveaux profils écologiques établis sur la base de cette méthode.

Tableau 4 (Tableau_4) profils écologiques des espèces pour lesquelles les tests étaient significatifs (tiré de Rivoire & Bornette, 2006).

1.4.11. (I.1.4.) Hydrochimie : physico-chimie classique et isotopique

Ces méthodes permettent d'estimer la part des apports des écoulements souterrains dans les eaux souterraines. Il est possible d'exploiter des méthodes isotopiques et des méthodes physico-chimiques plus classiques.

1.4.11.1. (I.1.4.1.) Méthodes isotopiques

La mobilisation d'analyses isotopiques peut permettre de caractériser et de déterminer les apports souterrains aux eaux superficielles, d'estimer l'altitude de la recharge, d'estimer la provenance des eaux souterraines et des zones d'apports privilégiés et d'évaluer les temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. Il est possible d'utiliser différents éléments isotopiques : l'oxygène 18 (^{18}O), le deutérium (^2H), le carbone 13 (^{13}C), le tritium et le carbone 14 (à l'étiage). On peut souligner ici l'intérêt de l'oxygène 18 du système Rhône. Cet isotope constitue une signature du Rhône pour des altitudes de recharge moyennement élevées.

Pour cela, on étudie les variations de concentration de l'amont à l'aval des cours d'eau, en les comparant aux teneurs observées dans les aquifères et la pluie. D'après Danneville (1997), le carbone 13 est un indicateur de l'alimentation par des eaux carbonatées et le tritium un indicateur du temps de séjour des eaux dans les aquifères. Selon Lalbat (2006), l'utilisation du carbone 14 n'est pas idéale dans un contexte carbonaté.

D'après les contacts établis avec Eric Siwertz de Thonon-les-Bains et Yves Travy d'Avignon, les mesures au tritium ne semblent pas pertinentes car les seuils de détection sont complètement perturbés par les relargages EDF. Par contre l'apport des mesures deutérium/O18 seraient plus favorables à l'identification des altitudes de recharge des eaux souterraines des aquifères connectés au Rhône (ex : contributions des massifs karstiques).

1.4.11.2. (I.1.4.2.) Méthodes physico-chimiques et fond géochimique

La comparaison de l'analyse physico-chimique des eaux souterraines et superficielles permet aussi de déterminer les relations d'échanges. Ces analyses portent sur les concentrations en ions majeurs de l'eau (calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates, bicarbonates, nitrates) et sur d'autres paramètres comme la teneur en Silice, la conductivité, la température, la dpH (différence de pH), la pCO₂ (pression de CO₂ équilibrante) (Danneville, 1997). Il est aussi possible de construire des indicateurs plus complexes associant différents paramètres (Lalbat, 2006) et d'affiner le travail en ayant connaissance des fonds géochimiques.

Ces méthodes feront l'objet d'un examen plus approfondi dans la prochaine phase de travail en fonction des données disponibles.

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

A rédiger

2.1. Evaluation qualitative des échanges

Direction, sens, origine

2.2. Evaluation de la quantité d'eau échangée

Volume, contribution

2.3. Evaluation de la qualité de l'eau

2.4. Présentation des outils

Schéma de principe

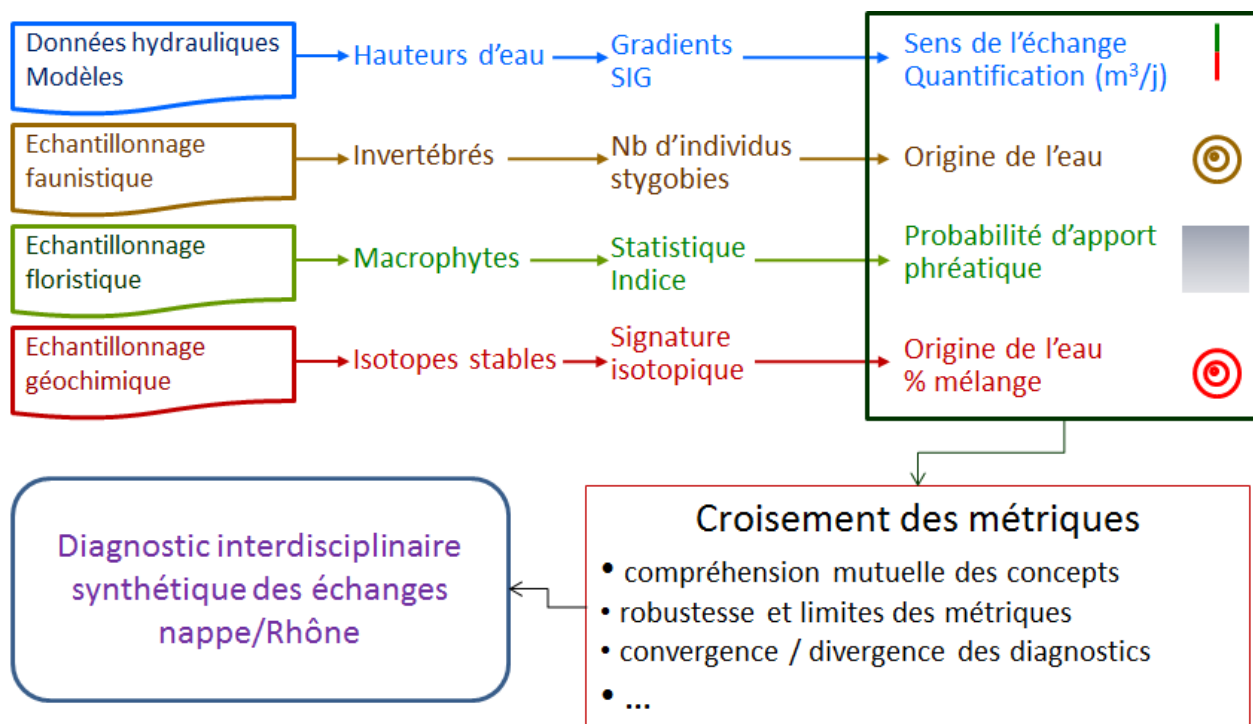


Figure 21 : Schéma de principes

2.5. Cheminement dans le guide

Intérêt d'une évaluation des échanges multi-dimensionnelle

Comme nous l'avons vu précédemment les méthodes quantitatives physiques d'évaluation des échanges restent approximatives et produisent des résultats dont il est difficile de contrôler l'incertitude. Les données disponibles ne permettent pas toujours une évaluation précise des débits d'échange généralement assez faibles entre la nappe et les rivières.

Malgré l'intérêt que présentent les modèles hydrogéologiques, ceux-ci possèdent différentes limites au niveau de la précision et de la nature des résultats obtenus. Le calage du modèle mathématique est parfois difficile à réaliser, notamment à cause des conditions limites (contre-canal, fleuve, interface nappe-gravières, colmatage des berges...) et de l'hétérogénéité du secteur. Il est, par exemple, difficile d'estimer le degré de colmatage des berges ou la qualité de la valeur du niveau piézométrique mesuré dans un puits.

Les résultats produits par les différentes méthodes d'évaluation des échanges proposent une représentation hydrophysique du territoire, essentiellement quantitative, constituée d'objets hydrologiques pour visualiser les relations d'échange (flux). Le croisement avec d'autres dimensions hydrobiologiques et hydrochimiques devient très intéressant pour valider ou infirmer les relations d'échange. Par ailleurs, les corrélations établies entre ces dimensions (invertébrés souterrains, gradient floristique, gradient hydraulique) pour des secteurs déterminés constitueront une base d'extrapolation sur des secteurs où les données manqueraient pour l'une ou l'autre d'entre elles.

Premier bilan sur la mise en évidence de correspondances hydrologique et biologique pour l'évaluation des échanges nappes/Rhône

L'intérêt de ce travail, réalisé sur un site de taille réduite comme celui de la chute de Brégnier-Cordon, permet d'initier l'étude des mécanismes d'échanges de façon interdisciplinaire en se confrontant au terrain. On entendra par terrain, non seulement le milieu auquel on s'intéresse, mais aussi l'organisation complexe à laquelle on doit se confronter pour obtenir les données.

Bien sûr ce type de synthèse est à pondérer en fonction de la densité des données disponibles dans chacun des domaines. A ce stade, on peut souligner l'importance de l'acquisition de connaissances hydrauliques concernant les nappes (piézométrie), le fleuve Rhône et certain de ces affluents (ligne d'eau, débit), et les contre-canaux (ligne d'eau, débit) ; mais aussi l'acquisition de connaissances biologiques afin de tester la cohérence des résultats.

Si pour chaque secteur étudié, les différents points de vue (hydraulique et biologique) sont cohérents, il est 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 est nécessaire (évaluation des erreurs de mesure de débit, conditions d'échantillonnage des données biologiques). Des données complémentaires sont à acquérir (ex : hydrochimie). Sur le plan hydraulique, un modèle physique pourra être mobilisé s'il existe pour obtenir une autre source d'information.

Concernant l'étude des mécanismes d'échange sur d'autres secteurs, s'il manque une des trois composantes sur un secteur similaire à celui où les corrélations hydrauliques et biologiques ont mis en évidence la nature de ces échanges, il sera possible d'utiliser un des paramètres disponibles, hydraulique ou biologique, compte-tenu des différences édaphiques et climatiques. Enfin, en matière de cohérence globale, il faudra, dans la mesure du possible, vérifier les bilans hydrologiques par secteur en les confrontant avec les valeurs de débits mesurées à des stations fiables.

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

A rédiger

Ce qu'il faut pour évaluer les échanges

3.1. Définition de la zone de travail

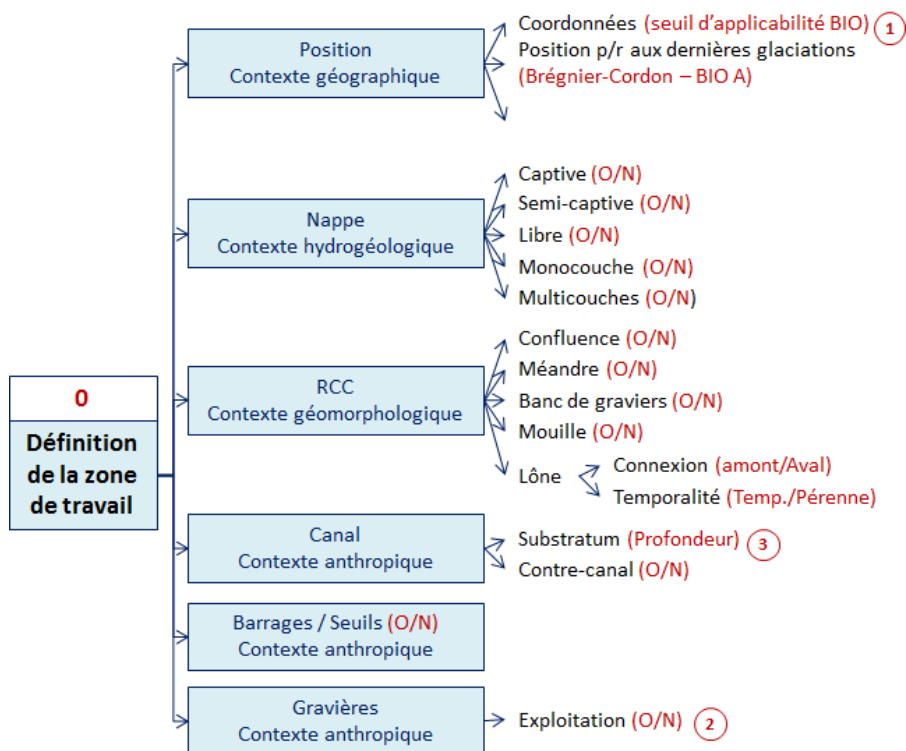


Figure 22 : Définition de la zone de travail

Vers définir les objectifs

3.2. Définir les objectifs

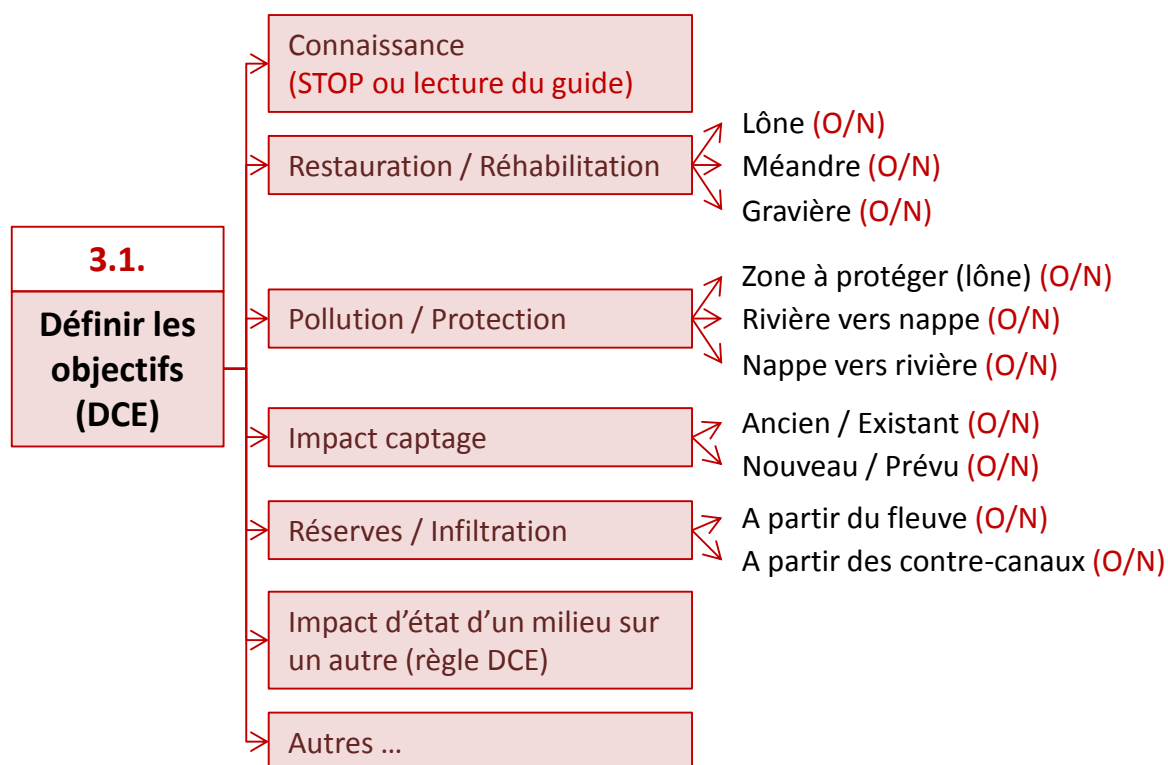


Figure 23 : Définir les objectifs

Vers sélection Temps et Espace

3.3. Sélection au préalable

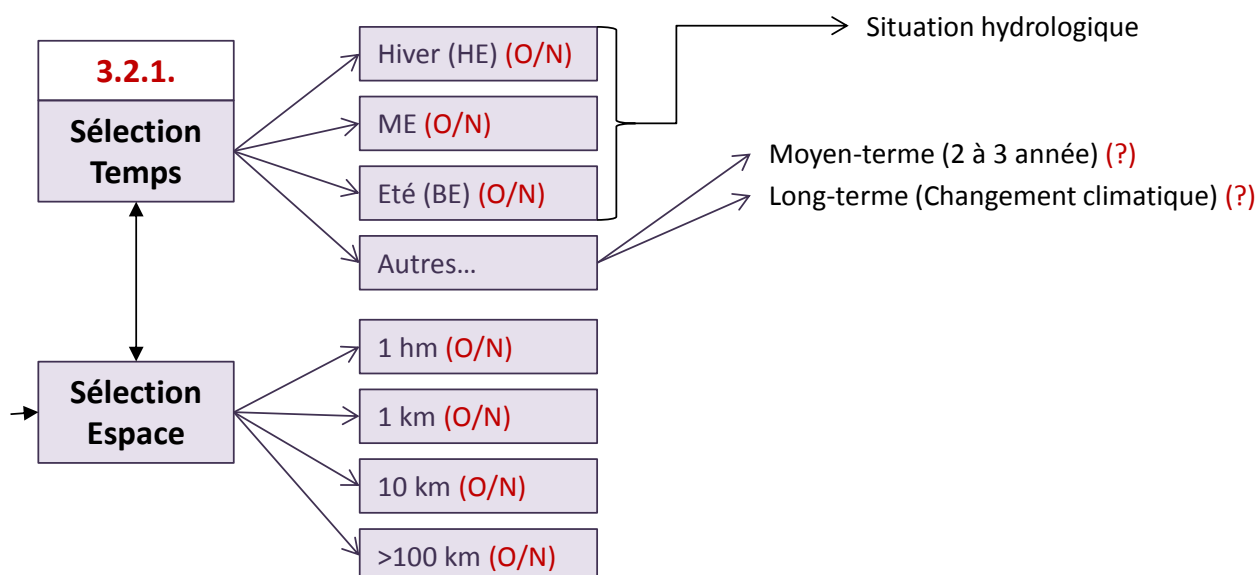


Figure 24 : Sélection des échelles d'espace et de temps

Vers Sélection des outils

3.3.1. Sélection de l'échelle

Temps, espace

3.3.2. Régime transitoire, variations hydrologiques et changement climatique

3.3.2.1. 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 CO₂ élevées ; scénarios **B** : émissions de CO₂ 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^e 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'écarts par rapport à la situation actuelle.

3.3.2.2. 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 CO₂ 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'Ecole 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 ».

3.3.2.3. 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

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 la part entre évolutions climatiques et impacts anthropiques.

3.2.2

M E T R I Q U E S

E? → **HYDRO** → Edata, Mesurer (et / ou)

E? → **GEOC.** → Edata, Mesurer (et / ou)

E? → **BIO A** → Edata, Mesurer (et / ou)

E? → **BIO V** → Edata, Mesurer (et / ou)

3.3.

Vers protocole calcul et interrelation

Tableau de décision explicatif indiquant le potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivière de chacune des métriques en fonction des objectifs et de l'échelle spatiotemporelle

Métrique	Qualitatif	Quantitatif	Echelle
Invertébrés	-	+	++

Exemple de principe

3.4. Données

Données existantes (pertinence, qualité,...) / Données manquantes / Reconstitution de données (cf : travail de thèse d'Eric Lalot)

Localisation géographique et administrative

Aménagements (barrages, seuils, canaux de dérivation, contre-canaux, siphons, captages, digues, centrales hydroélectriques, centrales nucléaires, revêtement des berges)

Usages de l'eau (irrigation AEP, Industrie, agriculture)

Régimes climatiques et hydrologiques

Lignes d'eau

Talweg

Géologie et hydrogéologie

Les données mobilisées sont les suivantes :

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

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

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

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

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

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

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

Ces données nous ont été transmises sous deux formats différents :

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

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

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

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

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

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

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

- Prélèvements d'eau : SIERM

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

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

Les connaissances scientifiques à mobiliser pour ce projet sont nombreuses, mais éparses et parfois très anciennes. Elles relèvent en général de disciplines qui se sont développées séparément (géomorphologie, hydrogéologie, hydrobiologie, physico-chimie et géochimie des eaux). Pour mieux comprendre ces mécanismes d'échange, il devient indispensable d'associer les méthodologies, les outils qui peuvent être mobilisés dans ce domaine (écologie des espèces végétales aquatiques, biodiversité taxonomique et fonctionnelle des communautés d'invertébrés au sein des aquifères, modèles hydrodynamiques, hydrogéochimie,) en relation avec les conditions de milieux (qualité et origine des aquifères, capacités d'échanges).

En premier lieu, c'est donc une synthèse interdisciplinaire des données existantes et un diagnostic intégrant les aspects quantitatifs et qualitatifs de la ressource qu'il s'agit de réaliser. A la lumière des résultats de ce bilan, des actions plus ciblées pourront être programmées.

La grande majorité des bases de données inventoriées est localisée dans des sites Internet et en accès libre. Elles contiennent des données piézométriques (localisation de piézomètres, niveaux d'eau), hydrologiques (débits des cours d'eau), cartographiques (couvertures SIG, BD Carthage), climatologiques (pluviométrie), physico-chimiques, prélèvements et rejets d'eau... Certaines ont une vocation nationale, d'autres sont plus régionales. Beaucoup émanent de l'Agence de l'Eau et du BRGM. On observe par exemple :

- Direction de l'eau du Grand Lyon : Chroniques Eaux souterraines stockées dans la base Vigilance ;
- SIE RMC (Système d'Information sur l'Eau du bassin Rhône-Méditerranée et Corse) : Banque Hydrosol - Serveur de données hydrométriques temps réel du bassin Rhône Méditerranée ; Modification du régime hydraulique par les aménagements hydroélectriques dérivant une partie des eaux d'un cours d'eau ; Déclaration des prélèvements et rejets industriels en Rhône-Méditerranée et Corse ; Déclaration des prélèvements sur les eaux superficielles et souterraines de Rhône-Méditerranée-Corse ; Système d'information sur l'eau du bassin Rhône Méditerranée ;
- BRGM/Agence de l'eau : ADES - Accès aux Données des Eaux Souterraines ;
- BRGM : Portail d'accès aux informations sur le sous-sol ; Remontées de nappes, crues, inondations, ruissellements, débordement ;
- MEDD : Banque HYDRO-Banque Nationale de Données pour l'Hydrométrie et l'Hydrologie.

D'autres bases de données ne sont pas accessibles en ligne, par exemple :

- CEMAGREF : BASE-IN ;BATHY ;BEN-HUR ; HYDROMEL ;
- CNR : INFORHONE.

La structure de la base de données faunistiques ZABR/RMC s'inspire de la structure de la base de données sur les espèces strictement inféodées aux eaux souterraines de France (Ferreira 2005) établie dans le cadre du programme de recherche européen PASCALIS (Protocols for the ASsessment and the Conservation of the Aquatic Life in the Subsurface) (Gibert et al. 2005). Cette base a été développée sous la forme de tableaux Excel et a été intégrée dans la base européenne élaborée pour PASCALIS sous le logiciel 4D (Ferreira et al. 2003).

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

A rédiger

Comment évaluer les échanges (soi-même, sous-traitance ?)

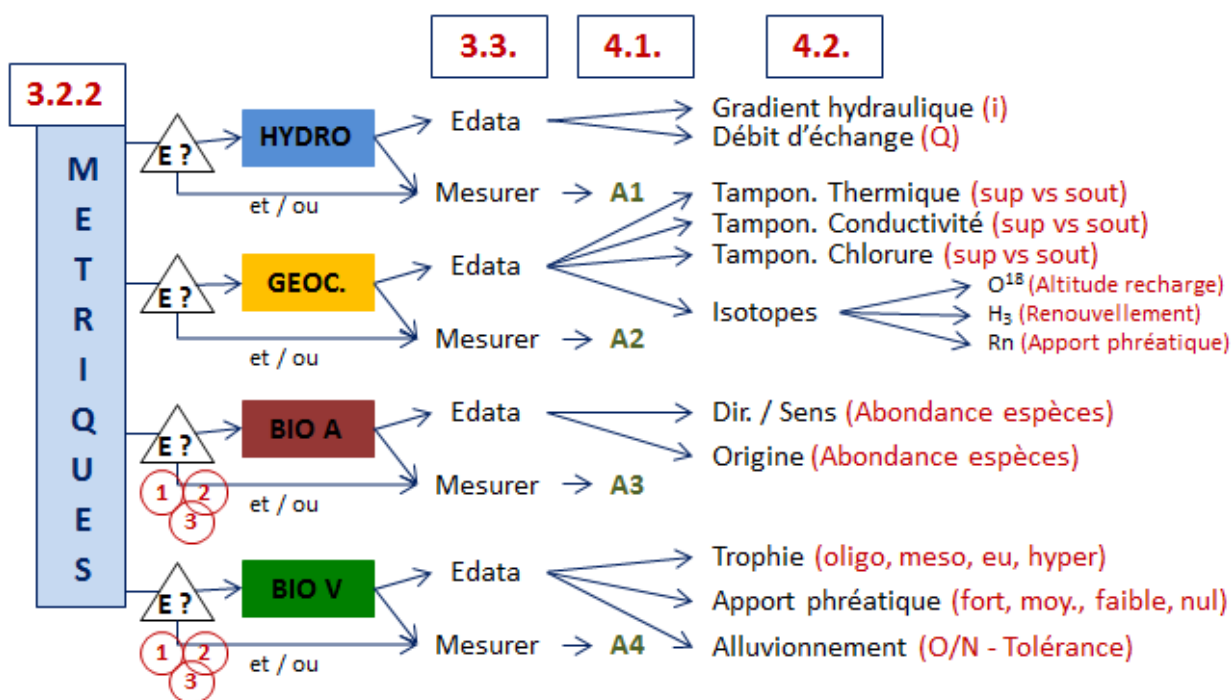


Figure 26 : Mesurer et calculer les échanges nappes/rivière

Vers Synthèse

4.1. Protocole

Renvoi aux annexes

4.2. Calcul et interprétation

Renvoi aux annexes

4.2.1. Exemple Donzère

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

A rédiger

Que peut-on tirer des mesures et calculs ? Comment synthétiser ?

Les résultats ont été agrégés selon un découpage en unités fonctionnelles repérées avec les PK (points kilométriques)

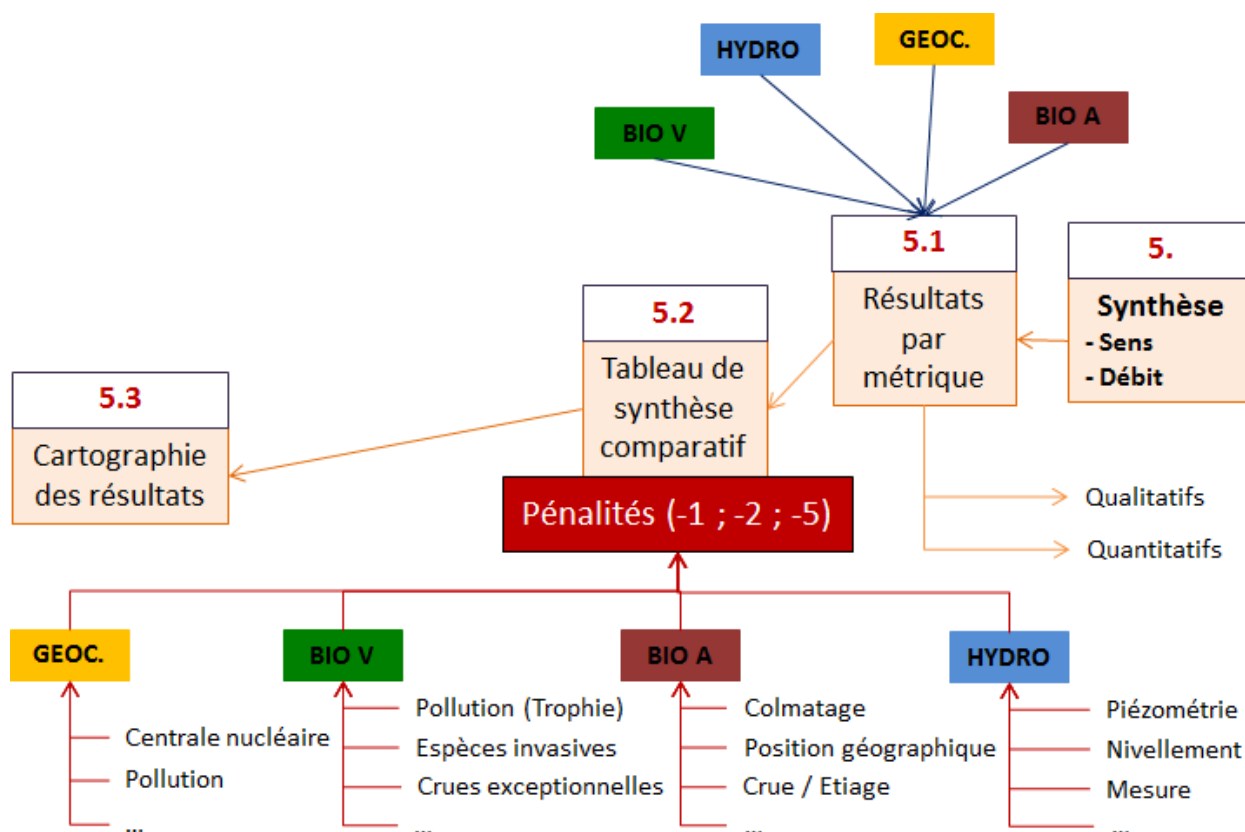


Figure 27 : Synthétiser et cartographier les échanges nappes/rivière

5.1. Tableau des résultats par métrique

Qualitativement et quantitativement

Cf: p47 à 105 rapport année 3 (exemple du secteur de donzère-mondragon)

5.1.1. Hydro

L'étude hydraulique des échanges nappes/Rhône est fondée sur quatre piézométries : deux anciennes réalisées dans un contexte de basses-eaux (juillet 1968 et septembre 1969) ; deux récentes réalisées respectivement dans des contextes de moyennes-eaux (mars 2009) et de hautes-eaux (juin 2008).

Ces données permettent en outre d'étudier les variations saisonnières sur les échanges nappes/Rhône pour la plaine du Tricastin (Vieux-Rhône rive gauche et canal de dérivation rive droite). Seules les

données de 1969 permettent d'étudier les apports en rive gauche du canal de dérivation. Il y a donc une carence de données pour la rive droite du Vieux-Rhône. Toutefois, il semble plus pertinent de mettre en avant les résultats obtenus à partir des piézométries récentes (2008 et 2009) car celles-ci sont construites à partir de relevés dont le nivellement est de meilleure qualité et sont plus représentatives de la situation actuelle concernant les échanges nappe/rivière.

On observe une variabilité saisonnière du sens et de l'intensité des échanges. En basses-eaux, et pour les piézométries anciennes, la sectorisation est assez homogène. Le Vieux-Rhône en rive gauche draine la nappe (1968 : PK 173 à 195 ; 1969 : PK 174 à 196) à l'exception de petits secteurs où les échanges s'inversent (1968 : PK 171 à 172,5 ; 1969 : PK 172 à 173,5 et 196,5 à 197). En ce qui concerne la rive droite du canal de dérivation, le canal d'amenée alimente la nappe (1968 et 1969 : PK 1 à 18) et le canal de fuite draine la nappe à l'amont (1968 et 1969 : PK 18,5 à 24) et l'alimente à l'aval (1968 et 1969 : PK 24,5 à 28). En rive gauche, la nappe alimente le canal de dérivation (1969 : PK 1 à 28).

Pour les piézométries récentes, en moyennes-eaux, on observe deux situations différentes pour la rive droite du canal de dérivation : il y a alimentation de la nappe du PK 1 au PK 18 au niveau du canal d'amenée et drainage de la nappe entre les PK 18,5 et 28 au niveau du canal de fuite. Pour la rive gauche du Vieux-Rhône, le fleuve draine la nappe entre les PK 171 et 185,5, puis les échanges s'inversent sur la partie aval où le fleuve alimente la nappe (PK 186 à 199). En hautes-eaux la sectorisation des échanges est plus hétérogène avec de fréquentes inversions tant sur le Vieux-Rhône en rive gauche que sur le canal de dérivation en rive droite.

Les volumes d'eau échangés sont plus importants en moyennes-eaux et plus faibles en hautes-eaux.

5.1.2. Macrophytes

Le diagnostic des échanges nappes/Rhône est ici réalisé sur la base d'analyses physico-chimiques de l'eau et de relevés de végétation aquatique effectués entre mai et juillet 2008 dans un contexte de moyennes à basses-eaux. Les prélèvements ont été faits dans tous les milieux aquatiques rencontrés, le maillage et la précision de l'évaluation des échanges dépendent donc de la distribution de ces milieux dans le paysage.

Les indicateurs retenus sont :

- la température, la conductivité, le pH et les teneurs en nitrates pour les variables physico-chimiques ;
- les végétaux aquatiques, indicateurs de la trophie des eaux et des apports d'eau souterraine.

Les résultats donnent les informations suivantes :

- En rive droite du Vieux-Rhône, les données physico-chimiques suggèrent des apports de nappe au Rhône entre les PK 169 et 187. Les végétaux quant à eux montrent des apports plus diffus et sur de plus courts linéaires de berges : entre les PK 169 et 178,5, entre les PK 179 et 182, ainsi qu'au niveau des PK 187 et 192,5. Plus en aval, on note un recyclage d'eau du Rhône via la nappe qui semble alimenter les milieux aquatiques de la plaine sur les deux rives. En aval de l'Ardèche, celle-ci semble influencer les milieux situés en rive droite du vieux Rhône.
- En rive gauche du Vieux-Rhône les données issues de la chimie et de la végétation montrent toutes deux des sites influencés par des apports latéraux dans la partie amont de l'île: entre les PK 169 et 177 pour la chimie et entre le PK 169 à 182 pour la végétation (sauf au niveau du PK 176,5 où les données suggèrent des apports du fleuve).

- En rive droite du canal de dérivation, les données issues de la chimie et de la végétation montrent des apports latéraux à la plaine alluviale dans la partie amont de l'île : entre les PK 0 et 29 pour la chimie, et entre les PK 0 à 16 pour la végétation. Ces résultats suggèrent que les apports latéraux pourraient s'infiltrer sous le canal d'amenée et alimenter les milieux aquatiques de la plaine alluviale.
- En rive gauche du canal de dérivation, les données indiquent que les milieux sont soumis à des apports de nappe dans la partie amont du secteur (entre les PK 0 et 12 pour la chimie, et entre les PK 0 et 16, puis 20 à 21 pour la végétation), puis ce sont des eaux issues du recyclage d'eau du Rhône via la nappe qui les alimentent plus en aval.

5.1.3. Invertébrés

Le diagnostic des échanges fondé sur les invertébrés souterrains repose sur 2 campagnes de prélèvements : l'une réalisée en mai 2008 dans un contexte de moyennes-eaux et une seconde en août 2008 dans un contexte de basses-eaux. L'étude est réalisée à partir de 2 indicateurs : le nombre d'individus stygobies (abondance) et les cortèges faunistiques (espèces inféodées à certains habitats).

On peut distinguer dans la faune échantillonnée : 1) des espèces ubiquistes ; 2) des espèces caractéristiques des masses d'eau du versant ardéchois ; 3) des espèces caractéristiques de la nappe du Rhône ; et 4) des espèces caractéristiques des masses d'eau du versant drômois. Les apports de nappe diminuent à l'étiage.

Les échanges identifiés peuvent se résumer de la manière suivante :

- En rive droite du Vieux-Rhône, pas d'alimentation par la nappe latérale, mais des apports potentiels du fleuve à la nappe (PK 173 à 175, PK 180, PK 185 à 189) en basses-eaux. En moyennes-eaux, la situation est identique sauf entre les PK 185 à 189 où les échanges s'inversent.
- En rive gauche du Vieux-Rhône, pas d'apport de nappe au fleuve, mais de potentiels apports du fleuve à la nappe entre les PK 175 à 180 et 189 à 193,5 en moyennes comme en basses eaux.
- En rive droite du canal de dérivation, des apports du fleuve à la nappe entre les PK 9 et 12,5 en moyennes comme en basses-eaux.
- En rive gauche du canal de dérivation, entre les PK 0 et 2, il n'y a pas d'apport de nappe, mais un léger apport potentiel du fleuve. En revanche, pour le reste du canal la situation est nettement différente entre les deux campagnes. En moyennes-eaux on observe des apports de nappe au fleuve importants du PK 4 au PK 21, puis une zone colmatée du PK 21,5 au PK 23, enfin, une zone d'apports de nappe mélangés à des eaux du fleuve du PK 23,5 au PK 25,5. En basses-eaux, une même zone de mélanges se situe entre les PK 7 et 9. A l'aval, entre les PK 9,5 et 25,5, le fleuve alimente potentiellement la nappe.

5.1.4. Isotopes

L'étude isotopique des échanges nappes/Rhône est fondée sur deux pré-campagnes réalisées en avril et juin 2008 dans un contexte de moyennes à hautes-eaux. Le diagnostic a été effectué à partir de 2 indicateurs : l' ^{18}O et le Tritium.

Les résultats de ces deux pré-campagnes sont ponctuels, mais donnent les informations suivantes :

- En rive droite du Vieux-Rhône, les analyses identifient deux situations distinctes : 1) le drainage de la nappe par le Rhône entre les PK 171 et 172 (l'eau du prélèvement est composée d'un tiers d'eau de nappe et de deux tiers d'eaux du Rhône le jour du prélèvement) et entre les PK 176 et 178 ; 2) un colmatage du plan d'eau échantillonné entre les PK 187 et 188.
- En rive droite du canal de dérivation, les analyses décèlent des apports du Rhône à la nappe entre les PK 3 et 5.

- En rive gauche du canal de dérivation, des apports latéraux au Rhône sont perceptibles entre les PK 2 et 4 (l'eau du prélèvement est composée d'un tiers d'eau de nappe et de deux tiers d'eaux du Rhône), et entre les PK 8 et 9 (l'eau du prélèvement est composée de 90% d'eau de nappe).

Il y a une carence d'information en rive gauche du Vieux-Rhône car aucun puits n'a été échantillonné dans la plaine du Tricastin.

5.2. Tableau de synthèse comparatif

Prise en compte de l'incertitude

5.2.1. Donzère

Cf: p107 à 122 rapport année 3 (exemple du secteur de donzère-mondragon)

Les informations synthétisées ci-dessus sont résumées et représentées dans quatre tableaux : Vieux-Rhône rive droite, Vieux-Rhône rive gauche (Tableau 5), Canal de dérivation rive droite () et canal de dérivation rive gauche ().

Dans ces tableaux, pour chacune des métriques (hydraulique, isotopes, invertébrés, macrophytes et physico-chimie) et pour chacune des périodes étudiées, la sectorisation fonctionnelle des échanges nappes/Rhône est présentée en colonne à l'aide d'un code couleur spécifique assorti d'un commentaire. Chaque secteur est repéré spatialement par les PK (lignes). De plus, la situation hydrologique est rappelée (BE : Basses-eaux ; ME : Moyennes-eaux ; HE : Hautes-eaux).

Pour la métrique hydraulique, les chiffres indiquent les volumes d'eau échangés en mètres cubes par jour (signe - : échanges fleuve vers nappe ; signe + : échange nappe vers fleuve).

Les codes couleurs sélectionnés permettent de représenter au mieux la sectorisation fonctionnelle des échanges nappes/Rhône en tenant compte de la spécificité du diagnostic effectué à l'aide de chacune des métriques. En effet, chaque métrique n'utilise pas les mêmes mesures ni les mêmes observations. Elles n'apportent pas forcément, toujours la même information et une telle représentation permet de souligner leurs apports complémentaires.

Tableau 5(Tableau_5): Représentation comparative des résultats par métrique pour la rive gauche du Vieux-Rhône

Notes concernant le Tableau 5:

- Les nombres indiqués dans les colonnes présentant la métrique hydraulique correspondent à la somme de la quantité d'eau échangée pour un secteur déterminé. Il s'agit de la somme des débits de chaque segment de la polyligne de berge. Les nombres positifs (+) indiquent un apport de la nappe au fleuve et les nombres négatifs (-) un apport du fleuve à la nappe. L'agrégation pour grand secteur est fondée sur la tendance majoritaire caractérisant l'échange. Ainsi sur un même secteur, on trouve des débits positifs et négatifs marquant des échanges potentiels dans les deux sens. Toutefois, la tendance majoritaire de l'échange est bien marquée. Nous avons procédé de façon identique pour le et le.
- PK 172 à 181 pour la métrique invertébré : l'échantillonnage réalisé pour l'étude n'a pas permis de détecter des échanges entre la nappe et le fleuve. Toutefois, un échantillonnage antérieur réalisé en 1986 avait permis de détecter des apports de nappe.

2 solutions :

- pondération en fonction de la fiabilité de la métrique (de 0 à 3 par exemple)
- penalty theory : attribuer un nombre de points de pénalité en fonction du problème rencontré et l'ôter à un nombre de points maximum déterminés a priori (par exemple 5 points)

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

Tableau 6 : Exemple de principe

5.3. Cartographie des résultats synthétiques

Cf: p107 à 122 rapport année 3 (exemple du secteur de donzère-mondragon)

5.3.1. Choix de l'échelle spatiale

Dans les tableaux précédents le découpage en secteurs fonctionnels a été effectué par pas de ½ PK en s'appuyant sur les résultats d'interprétation des échanges nappes/Rhône issus des indicateurs utilisés pour chacune des métriques et chacune des périodes. Il s'agit jusque-là d'une représentation linéaire brute sans essai d'interprétation croisée des échanges nappes/Rhône.

Pour l'interprétation croisée des métriques, il faut, dans la mesure du possible, essayer de conserver au final un diagnostic unique concernant le sens et l'intensité des échanges. Si les informations issues des différentes métriques sont cohérentes entre elles, il est alors possible de proposer un découpage fonctionnel croisé. Ce diagnostic final est représenté par la dernière colonne des tableaux précédents () en utilisant le même code couleur associé à un commentaire explicatif. Il faut de plus veiller à comparer des périodes hydrologiquement comparables.

5.3.2. Interprétation croisée des métriques sur Donzère-Mondragon

Cette partie commente le résultat du croisement des métriques d'ouest en est pour les deux rives du Vieux-Rhône et du canal de dérivation. La Carte 1 spatialise ce résultat. Cette carte est reproduite dans le recueil cartographique joint à ce rapport au format A3.

Carte 1(Carte_2) Interprétation des échanges nappes/Rhône issue du croisement des métriques

5.3.3. Vieux-Rhône rive droite

Compte-tenu des campagnes réalisées, le seul contexte hydrologique pertinent est celui de moyennes-eaux. On note qu'il n'y a pas de métrique hydraulique dans l'interprétation faute de données piézométriques suffisantes.

Sur ce secteur, du PK 169 au PK 2000, le fleuve Rhône reçoit différents type d'apports :

- PK 169 à 182 : apports du versant ardéchois. Ces apports ne sont pas perceptibles par les invertébrés en 2008. On note que des prélèvements plus anciens (1996) confirment cette tendance au PK 172.
- PK 182 à 187 : apports issus du recyclage d'eau du Rhône via la nappe alluviale ;
- PK 187 à 200 : apports potentiels issus du recyclage d'eau de l'Ardèche via la nappe alluviale.

5.3.4. Vieux-Rhône rive gauche

Compte-tenu des campagnes réalisées, le contexte hydraulique de moyennes-eaux semble le seul pertinent, les piézométries anciennes ne reflétant pas forcément le fonctionnement actuel du secteur. On note l'absence de métrique isotopique faute de données dans la plaine du Tricastin.

Sur ce secteur, du PK 169 à 200, la situation est plus contrastée. On observe des apports au fleuve du PK 169 à 186 et des apports du fleuve à la nappe du PK 186 au PK 200. Ce contexte binaire est nettement mis en évidence par la métrique hydraulique. La métrique macrophyte permet d'affiner ce diagnostic en discriminant deux types d'apports potentiels :

- du PK 169 au PK 176 : présence d'apports du versant Dromois au Rhône ;
- du PK 176 au PK 186 : le Rhône draine la nappe alluviale (recyclage d'eau du Rhône via la nappe).

La métrique invertébrés ne met pas ces apports en évidence pour 2008. Toutefois, des prélèvements plus anciens (1986) confirment la tendance. Pour la zone aval, le diagnostic fondé sur les métriques biologiques est difficile car :

- le prélèvement d'invertébrés est difficile du fait de la nature captive de la nappe à cet endroit (présence de limons en surface) ;
- les macrophytes ne perçoivent pas directement les apports du Rhône à la nappe. Les communautés végétales et la physico-chimie bien typée sur le secteur suggèrent un apport potentiel d'eau recyclée de l'Ardèche.

5.3.5. Canal de dérivation rive droite

Compte-tenu des campagnes réalisées, la seule période hydrologique pertinente est celle de moyennes-eaux. On note que toutes les métriques sont présentes.

Sur ce secteur, comme sur les précédents, le diagnostic des échanges se décompose en trois situations :

- du PK 0 au PK 4, la végétation indique des apports de nappe possibles (versant Dromois), ce que ne peut distinguer la métrique hydraulique sans modélisation ;
- du PK 4 au PK 18, les eaux du Rhône alimentent la nappe ;
- du PK 18 au PK 28, le Rhône draine la nappe alluviale réalimentée par des eaux de surface.

Ici, le diagnostic biologique est rendu difficile par des eaux très chargées en nutriments pour la végétation, et par le faible nombre de points de prélèvement pour les invertébrés.

5.3.6. Canal de dérivation rive gauche

Compte-tenu des campagnes réalisées, le seul contexte hydrologique pertinent est celui de moyennes-eaux. On note que toutes les métriques sont présentes. La métrique hydraulique plus spécifique d'un contexte de basses-eaux anciens est donnée faute d'informations plus récentes.

Sur ce dernier secteur, le diagnostic est uniforme : il y a des apports de nappe du PK 0 à 28, c'est-à-dire sur l'intégralité de la zone.

5.3.7. Facteurs explicatifs de ces échanges

Plusieurs facteurs sont à prendre en compte pour mieux expliquer le sens et l'intensité des échanges déterminés et surtout leurs variations spatiales et temporelles :

- rôle des aquifères latéraux (appelés aquifères de seconde zone dans les deux premiers rapports). Dans le cas d'un échange nappe vers fleuve, la nature et l'extension géographique de ces aquifères latéraux contribuent certainement au remplissage de la nappe alluviale et par « phénomène de cascade » à l'alimentation du fleuve.
- phénomènes de retard liés à la nature des bassins versants latéraux et à leur ratio infiltration/ruissellement.
- contribution des affluents.
- apports détournés des lônes et des contre-canaux, liés à leur colmatage ou à leur étanchéité.
- topographie du fond des canaux (perchés, encaissés).

Ces points seront approfondis en phase 4 pour apporter des éléments complémentaires afin d'expliquer les échanges.

5.4. Métriques complémentaires

5.4.1. 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^{ème} 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^{ème} 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^{ème} siècle). Au début du 19^{ème} 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^{èmes} 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^{ème} 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.

6. Annexes du guide méthodologique

A compléter

6.1. Sommaire des annexes

A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN

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

A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation

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

A3. BIO A : Invertébrés

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

A4. BIO V : macrophytes

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

Pour les annexes A1 à A4 inclure :

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

A5. Bases de données utiles et consultables

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

A7. Personnes ressources et compétences

Annuaire de compétences à mettre à jour tous les 3 ans

6.2. A1. HYDRO : De la carte piézométrique au modèle TIN

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

6.2.1. A1.1. Lecture de cartes piézométriques / Loi de Darcy

[Geomatic expert_2008] Pour les aquifères alluviaux importants on dispose en général de données détaillées sous forme de cartes piézométriques, souvent en basses-eaux, moyennes-eaux, hautes-eaux. On s'intéressera en priorité aux situations de basses-eaux, qui correspondent aux épisodes du système présentant les enjeux à optimiser. En milieu poreux, cas des aquifères alluviaux, l'écoulement de l'eau est exprimé par la Loi de Darcy (De Marsily, 1981) :

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 m³/s

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

A : section d'écoulement en m²

$i = \frac{dH}{dL}$: 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 m²/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.

6.2.2. A1.2. Fabriquer une carte piézométrique

Objectifs et modalités des mesures piézométriques en nappe libre

- Généralités

Pour connaître, évaluer, mesurer le niveau d'eau dans les nappes phréatiques, il faut disposer de points d'observation dans le milieu naturel. Ces mesures ponctuelles pourront être interpolées pour réaliser une cartographie du niveau de la nappe (carte piézométrique).

Les piézomètres sont des points d'observation. Ce sont des forages de diamètre réduit (environ 200 mm) tubés généralement en PVC qui sont creusés sur au moins les 2/3 de l'épaisseur de la nappe.

Les piézomètres ne sont pas creusés jusqu'au substratum imperméable qui constitue le fond (mur) de l'aquifère. En effet, l'eau souterraine doit pouvoir pénétrer dans le piézomètre afin que son

niveau dans le piézomètre soit en équilibre avec la nappe (s'il s'agit d'une nappe libre) et donc représentatif du niveau dans la nappe.

- **Protocole de mesure**

La mesure du niveau d'eau dans la nappe s'effectue à l'aide d'un matériel portatif qui est une sonde sonore ou/et lumineuse. Le capteur est situé à l'extrémité d'un ruban gradué. Lorsque le capteur de la sonde rentre en contact avec l'eau du piézomètre, un contact électrique s'établit et actionne un témoin sonore ou/et lumineux en surface. Il faut alors arrêter le déroulement du ruban et repérer la profondeur à laquelle se situe l'eau souterraine sur le ruban gradué.

A cette mesure de profondeur, il faudra retrancher la hauteur du piézomètre dépassant au-dessus du niveau du sol. Une mesure fiable nécessite un nivellement précis réalisé à l'emplacement du piézomètre (côté NGF). Dans ces conditions, l'erreur de mesure peut être minimale et de l'ordre de 2 à 3 cm.

Ce protocole est applicable aux mesures de niveau d'eau dans les puits. Le niveau mesuré est soumis à des fluctuations qui dépendent le plus souvent de conditions saisonnières, qui influencent les périodes de hautes eaux et les périodes de basses eaux (étiages) dans les nappes.

- **Précautions**

Attention !! Les mesures de niveau d'eau souterraine dans les piézomètres et le puits peuvent devenir difficiles pour plusieurs raisons :

- a. Piézomètre ou puits obstrué ou fermé
- b. Colmatage du fond du piézomètre ou du puits
- c. Nivellement inexistant ou faux

Dans le cas a., cela rend la mesure impossible, pour b. et c. la mesure ne sera pas représentative.

Pour réaliser une campagne de mesures, il est indispensable d'effectuer ces mesures pendant la même période. Chaque mesure doit être identifiée avec sa date.

- **Autres usages**

- a. L'examen de la carte piézométrique indiquant les courbes d'égale altitude de l'eau de la nappe (courbes hydroisohypses) permettra :

- D'identifier les zones de dômes ou de creux piézométriques
- De calculer le gradient hydraulique ou pente de la nappe : $\delta H / L$ qui intervient dans la vitesse d'écoulement de la nappe (δH : différence de niveau mesuré entre 2 piézomètres, L : distance entre les 2 piézomètres)

- b. Les piézomètres peuvent être aussi équipés avec des enregistreurs de niveau en continu.

Des prélèvements pour analyse sont possibles dans les piézomètres à l'aide de matériel approprié (préleveur en piézométrie).

6.2.3. A1.3. Générer un modèle TIN (analyse 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).

6.2.3.1. 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 » (boîte 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 » (boîte 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 28) perpendiculaire à chaque segment des berges du Rhône. Il convient dès lors de corriger cette valeur d'angle de 90° pour obtenir le sens d'écoulement du Rhône ;

Figure 28 (Figure 9): Cadran de lecture des valeurs d'angle obtenues dans le TIN

- transformation du TIN en triangle avec la fonction « Tin to triangle » (boîte 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 » (boîte à outils « Analysis tools », groupe de fonctions « Overlay »). 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.

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 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 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.

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. 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^3 par jour pour une section de 1m^2 avec une perméabilité uniforme de 10^{-3}m/s . Sur la 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) :

- **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.

6.2.3.2. Vers une automatisation de l'analyse spatiale

Une fois la méthode d'analyse spatiale sous SIG pour l'indentification 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).

[Geomatic expert] Partant d'une carte piézométrique digitalisée, un TIN (Triangulated Irregular Network) permet de restituer le modelé 3D de la surface de la nappe, « slope » en donne la pente (en %), c'est-à-dire le gradient ($i = dH/dL$) en tout point, et « aspect » la direction de l'écoulement. La rive du cours d'eau constitue une limite de la nappe. Pour le paramètre A, par convention, faute d'avoir des données plus précises, on prendra une section d'échange A (données bathymétriques) égale à 4 m^2 par mètre linéaire au droit de la rive. Si, ultérieurement, on dispose d'une méthode rigoureuse pour évaluer la grandeur A, il suffira d'appliquer le coefficient multiplicateur ad-hoc pour ajuster les valeurs du débit d'échange.

Si l'on transforme le TIN « slope nappe » en un GRID « slope nappe » (appellations choisies pour éviter des confusions), et si l'on a une carte des perméabilités (K), il est aisé d'évaluer le débit de l'aquifère dans chaque maille. Le débit global peut être calculé si l'on dispose de la topographie détaillée du substratum, ce qui est toutefois assez rarement le cas, mais permet d'évaluer la hauteur mouillée (ce qui est différent de la surface d'échange nappes/rivière jamais précisément connue, et fixée par hypothèse à 4 m^2).

Le TIN « aspect nappe » transformé en GRID donne les directions d'écoulement de la nappe en tout point. Ce qui nous intéresse ici ce sont les débits et leurs directions sur les mailles limites correspondant à l'interface avec le cours d'eau. Si le flux est perpendiculaire à l'interface le débit entrant ou sortant est totalement échangé. Si le flux de la nappe est parallèle au cours d'eau, l'échange est nul. En situation intermédiaire, un simple calcul angulaire (par son cosinus) permet d'établir le pourcentage d'échange.

Du cours d'eau, on ne prendra en compte que la rive droite ou gauche, qui constitue la limite de la surface piézométrique de la nappe. Pour les nappes alluviales importantes qui accompagnent le Rhône, l'interface avec le cours d'eau s'étend donc en général sur plusieurs kilomètres, et elle est souvent assez sinueuse. Cette sinuosité d'une part et la piézométrie de la nappe d'autre part ne permettent pas d'évaluer les échanges ni localement ni de manière globale de manière simple.

Il est plus facile de discrétiser la polyligne représentant la rive en segments unitaires (entre vertex), puis de faire l'évaluation des échanges sur chaque segment unitaire (de l'ordre de 100 à 200 m de longueur). La pente du lit du fleuve n'est pas utilisée à ce stade du travail. Pour cela il faut évaluer l'orientation de chaque segment, la comparer avec l'orientation du flux de la nappe, et calculer le coefficient angulaire, puis le débit d'échange.

Pour calculer l'orientation des segments on construit un tampon (buffer) de 100 m sur les polygones des rives et du côté de la nappe ; 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 », « nodata » pour le cours d'eau qui correspond à la perpendiculaire au vecteur de rive local ; la pente est de 100% (45°), dans tout le buffer (Figure 3). L'orientation de chaque vecteur unitaire de rive est calculée par simple soustraction de 90° à l'angle d'orientation. La transformation en GRID du TIN « aspect rive », permet le calcul immédiat des angles d'échange. Le GRID « angle d'échange » est obtenu par simple soustraction des deux GRIDs : GRID « aspect rive » - GRID « aspect nappe » qui contient le sens d'écoulement de la nappe élaboré en 3.1. L'orientation du vecteur unitaire de rive est à 90° de la valeur donnée par le GRID « aspect rive » ; si nécessaire le calcul peut être aisément effectué et attribué comme attribut à chaque vecteur.

Le GRID (cosinus (Angle d'échange)) dont les valeurs vont de 1 (100%) à -1 (-100%) est le coefficient d'échange pour chaque vecteur unitaire de rive. Multiplié par le débit de nappe calculé en chaque point il donne le débit d'échange entre la nappe et le fleuve, pour chaque segment. Une sommation doit être faite sur toute la polyligne figurant la rive pour effectuer le bilan global pour la totalité de l'aquifère.

[Artik WR] Hydraulic interactions between groundwater and the river were preliminarily estimated through gradients that were calculated from digitalized piezometric maps with GIS spatial analysis tools (ArcGIS 9.2, ArcInfo, ESRI, <http://www.esri.com/>). The method was founded on the properties of the triangulated irregular network (TIN) model, which is very useful for generating surfaces that consist of a network with irregular triangles. Each triangle contains three values as defined in ArcInfo: elevation, slope (or gradient) and aspect (or angle) (Bornette *et al.* 2008; Paran *et al.* 2008).

The proposed method permits the characterization of exchanges between any aquifer and river along a linear interface (bank) that can be represented with the GIS as a polyline consisting of several segments. The exchange characterization implies: i) the quantification of the rate of flow (Q in m^3/j) and ii) the identification of the direction of hydraulic interactions, wherein fluxes from the aquifer to the river are characterized by positive values (+ Q) and exchanges from the river to the aquifer by negative values (- Q). Infiltration (Q : m^3/s) through the bank was calculated using Darcy's law (Equation 1) considering gradients (i), the cross-section of the river (A : m^2) and the permeability of the aquifer (K : m/s).

$$Q (m^3/s) = K.A.i \quad [1]$$

The gradient values (i) at the aquifer/river interface were obtained from digitalized piezometric maps (obtained from a low water level in February of 1990 from Rampnoux 1992 for Brégnier-Cordon), which were converted in the TIN. Cross-section (A) values were estimated by subtracting groundwater elevation values from riverbed elevation values (Hydratec 2002). Permeability (K) values were obtained from the literature (Michal 1988; Rampnoux 1992; Hydratec 2002 for Brégnier-Cordon).

The exchange directions were given by the sign (+ or -) of the sinus of the angle formed by the groundwater flow and river flow. This angle (D) was calculated by subtracting the angle values given by the TIN of the piezometric levels and the TIN of the river levels. The infiltration estimation (Qe, Equation 2) was weighted by the value of the sinus of angle D to take into account the influence of the angle between the groundwater and superficial flows on the exchanges. If the groundwater and river flows were parallel (D=0°), there was no exchange, whereas, if they were perpendicular (D=90°), the exchange was considered to potentially be at a maximum. Between these two situations, the potential intensity of the hydraulic interactions varied and depended on the angle value. For example, for D=45°, the weight factor was 0.7. The groundwater flow intensity was usually too weak when Qe was provided in m³/s; hence, Qe was given in m³/d (1 day=86 400 seconds):

$$Q_e \text{ (m}^3\text{/d)} = Q \cdot \sin(D) \cdot 86400 \quad [2]$$

Qe was calculated for each segment of the Rhône river bank polyline. The final infiltration estimation (Qf) was given by Equation 3. Qf is the sum of each Qe calculated for a segment (from 1 to n) of the polyline multiplied by the length (L) of this segment:

$$Q_f \text{ (m}^3\text{/d)} = \sum_{(1 \text{ to } n)} (Q_e \cdot L) \quad [3]$$

This algorithm facilitated a selection of the scale for which the exchange flows had to be calculated. It was then possible to aggregate values for several 1-km-long unitary segments along a predetermined river section.

6.2.3.3. A1.4. Limites, conditions d'application

[Geomatic expert] Cette méthode est encore perfectible. Il est en effet possible d'améliorer les calculs et de les automatiser. Ainsi, il conviendra :

- d'affiner la génération des TIN pour supprimer les segments correspondants aux tronçons de berges sans valeur de débit ;
- de généraliser l'utilisation de la méthode quelque soit la berge du fleuve étudiée et l'orientation de l'écoulement du fleuve ;
- d'automatiser l'enchaînement des fonctions d'analyse spatiale pour un traitement plus rapide ;

L'automatisation des calculs pourra être effectuée à l'aide du module de construction de modèles dynamiques proposé par ARCGIS (version 9.2.). Ceci permettra de transposer la méthode non seulement sur d'autres secteurs (aménagements CNR) mais aussi sur d'autres cours d'eau, pour des aquifères alluviaux en changeant simplement les données d'entrée sous réserve qu'elles existent.

6.3. Bilan

La méthode présentée dans cette communication n'est utilisable que dans un contexte hydrogéologique où la Loi de Darcy est applicable, c'est-à-dire dans des formations poreuses. Il conviendra donc d'élaborer d'autres méthodes d'analyses pour les différents contextes hydrogéologiques rencontrés tout au long du fleuve Rhône (ex : aquifères de socles, aquifères karstiques...). Bien que reposant sur un jeu de données minimal, la précision des résultats est conditionnée par :

- la connaissance des impacts anthropiques sur les différents objets hydrologiques (ex : pompages, barrages...);

- l'existence et la qualité des données de départ. A l'heure actuelle, il n'y a pas à notre connaissance de cartes piézométriques après aménagement CNR pour tous les aquifères alluviaux du Rhône. De plus, l'absence de profil en long conduit à travailler sur des hypothèses concernant la surface d'échange utile. Il existe cependant plusieurs secteurs qui ont fait l'objet d'une modélisation hydrologique avec calage des coefficients d'échange entre la nappe et le Rhône. Ces modèles peuvent, dans certaines conditions, servir aux tests de référence pour l'ajustement de la méthode proposée ici.

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

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

6.3.A2. GEOCHIMIE : Echantillonnage et interprétation

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

6.3.1. A2.1. Paramètres simples - nappe/rivière

Conductivité, température, chlorures

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 signalent 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).

Tableau 7 (Tableau_8): 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 7), 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.

6.3.2. A2.2. Isotopes

Oxygène 18, deutérium, tritium, radon

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 δD^6 et du $\delta^{18}\text{O}^7$ 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}O . Ainsi, les δD et $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations diminuent avec l'altitude et les précipitations hivernales sont appauvries en D et ^{18}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}O à cause de l'effet de l'altitude. Ainsi, la signature isotopique (δD , $\delta^{18}\text{O}$) 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 δD de l'eau de la rivière en amont des échanges supposés (δD_r), le δD de l'eau à l'endroit où mélange nappes/rivière est supposé (δD_m), et la composition isotopique de l'eau de la nappe (δD_n), il est possible de calculer la fraction d'eau de la rivière (f) dans le mélange selon l'équation suivante (Équation 4) :

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

Équation 4 : Quantification de la fraction d'eau de rivière (en %) impliquée dans une zone de mélange nappe/rivière

6 $\delta\text{D} = (\text{R}/\text{R}_{\text{std}} - 1) \times 10^3$ avec R et R_{std} les rapports D/H de l'échantillon et d'un standard international (V-SMOW), respectivement.

7 $\delta^{18}\text{O} = (\text{R}/\text{R}_{\text{std}} - 1) \times 10^3$ avec R et R_{std} les rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'échantillon et d'un standard international (V-SMOW), respectivement.

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 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}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}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 (Négrel 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 ».

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 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 2 spatialise sur le bassin du Rhône les données de $\delta^{18}\text{O}$ et δD recensées actuellement

Carte 2 (Carte_1): Localisation des données oxygène 18 et deutérium inventoriées à ce jour

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.

6.3.3. Préambule : apport des isotopes stables

Les isotopes stables de l'eau (^{18}O , ^{16}O , Deutérium ou ^2H) sont utilisés pour comprendre l'origine des eaux dans des environnements variés (Coplen et al., 2000 ; Kendall et Caldwell, 1998).

Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène, notées respectivement $\delta^{18}\text{O}$ et δD , expriment l'abondance relative des deux isotopes des éléments considérés par rapport à un standard international qui est l'eau de mer (SMOW). Le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD des précipitations alimentant les rivières et les nappes sont principalement contrôlés par la température de surface lors de la formation des pluies : on observe un effet de latitude (Figure 29) auquel se superpose un effet saisonnier (Figure 30), et également un effet d'altitude.

Figure 29 (Figure_14) (à gauche) : Illustration de l'effet de température lié à la latitude sur le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations mondiales en fonction de la température de l'air. Halley Bay : Antarctique 75°S ; Vernadski Antarctique 65°S ; Gronnedal : Groenland 65°N ; Vienne : Autriche 48°N ; Groningen : Pays Bas 51°N ; Valentia : Irlande 51°N ; Bahrain : Golfe persique 26°N ; Midway : Océan Pacifique 28°N. D'après Mook (2001)

Figure 30 (Figure_15) (à droite) : Variations saisonnières du $\delta^{18}\text{O}$ et de l'excès en deutérium (DXS) à partir de la moyenne pondérée d'échantillons de précipitations mensuelles (pcpt) prélevées sur quelques stations représentatives. D'après Mook, (2001)

Les eaux de pluies portent donc une signature isotopique « $\delta^{18}\text{O}$, δD » représentative des conditions de leur formation et se répartissent le long de la droite des eaux météoriques mondiales (Figure 31).

L'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau étant considérés comme des éléments conservatifs dans les zones tempérées et en domaine de surface/subsurface sur de courtes périodes de temps, la composition isotopique $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux de surface et de rivière se répartissent également le long de la droite mondiale des eaux météoriques (Figure 32). Le principal processus à l'origine de la modification du $\delta^{18}\text{O}$ et du δD d'une eau de surface est le mélange avec des eaux d'une ou plusieurs origines différentes.

Ces caractéristiques montrent le potentiel des isotopes stables de l'eau pour différencier des sources d'eau et identifier les zones de recharge des eaux souterraines. Cet outil géochimique a été utilisé avec succès dans des environnements très variés (Chapman et al., 2003 ; Gurrieri et Furniss, 2004 ; Rademacher et al., 2002 ; Maréchal and Etcheverry, 2003 ; Barbieri et al., 2005), y compris et depuis longtemps dans le domaine des sites et sols pollués (Rauert et al., 1987 ; Adar et Nativ, 2003 ; Gobeil et al., 2005 ; Obeil et al., 2005 ; Petelet-Giraud et al., 2009 ; Houdou et al., 2010).

Figure 31 (Figure_16) (à gauche) : Relation δD vs $\delta^{18}\text{O}$ pour les eaux de pluie. La droite des eaux météoriques mondiales est définie par la relation $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$. D'après Mook (2001)

Figure 32 (Figure_17) (à droite) : Répartition le long de la droite mondiale des eaux météoriques (DMG) des eaux de cinq rivières (Waikato-Nouvelle Zélande ; Parana – Amérique du Sud ; Saint Laurent – Canada ; Mackenzie-Canada) où l'évaporation est insignifiante et de la rivière Orange (Afrique du Sud) affectée par l'évaporation. D'après Mook (2001)

En association avec les isotopes de l'eau, la composition isotopique du soufre $\delta^{34}\text{S}$ (^{34}S et ^{32}S) des ions sulfates (SO_4^{2-}) peut être utilisée pour compléter l'identification des sources d'eau et d'éventuel mélanges de masses d'eau. Les principales sources de sulfates dissous dans les eaux de surface sont :

- l'oxydation des minéraux de type sulfure (exemple la pyrite FeS_2), lors du lessivage des roches sédimentaires et/ou métamorphiques par les eaux de surface
- la dissolution de minéraux de type sulfate (exemple le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) lors du lessivage de roches sédimentaires par les eaux de surface
- les apports atmosphériques
- l'activité bactérienne au sein du système hydrogéologique
- les apports anthropiques (mines, agriculture...).

Chacune de ces sources de sulfates peut être identifiée par sa signature isotopique $\delta^{34}\text{S} - \delta^{18}\text{O}$ (Figure 33). Les applications des isotopes du soufre dans le domaine de l'étude des contaminations de l'environnement sont variées, nous citerons en exemple i) l'identification des sources de contaminants dans des complexes industriels (Adar et Nativ, 2003), ii) caractérisation de l'impact d'un crassier houiller sur la qualité des eaux souterraines (Denimal et al., 2002), iii) le traçage de l'origine des eaux dans un réseau d'égout (Houdou et al., 2010).

Figure 33 (Figure_18) : Exemple d'étude des isotopes du soufre et de l'oxygène sur les sulfates des rivières Ruhr, Lippe et Ems (Allemagne). Représentation des différentes gammes isotopiques observées pour les sulfates issus de l'oxydation des sulfures, des dépôts atmosphériques ou de la dissolution de sulfates (évaporites sur le diagramme). D'après Stögbauer et al. (2008)

6.3.4. Principe de la méthode

La composition en oxygène 18, isotope stable de la molécule d'eau, s'exprime en rapport isotopique ($R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$). Elle se mesure en δ pour mille par rapport à un standard de valeur voisine à la composition isotopique moyenne des océans : $\delta = \{R (\text{échantillon})/R (\text{standard}) - 1\} \times 1000$

Dans le cycle hydrologique, l'évolution de ce rapport se fait essentiellement par fractionnement lors des changements de phase, à savoir la condensation ou l'évaporation. Ce fractionnement est thermodépendant. La composition isotopique des eaux de pluie dérive essentiellement de la condensation, et sous nos latitudes, en présence de vapeur principalement océanique, le fractionnement est surtout fonction de la température moyenne au sol. Les pluies sont d'autant plus appauvries en isotope lourd (${}^{18}\text{O}$) que la température est basse. Le δ diminue donc lorsqu'on s'élève en altitude (en moyenne de 0,25‰ par 100m). De ce fait les écoulements d'altitude sont très appauvris en ${}^{18}\text{O}$ (δ fortement négatif). A leur arrivée dans les piedmonts, les rivières alpines sont ainsi très nettement marquées par rapport à leur environnement de basse altitude, précipitations, aquifères et cours d'eaux locaux. Cette situation est fréquente dans le Sud Est de la France avec des fleuves marqués en moyenne par des valeurs de l'ordre de -10‰ à -11‰ (Rhône, Durance, Var) dans un contexte isotopique des zones basses, autour de -7‰. Compte tenu de la conservativité de cet élément dans les hydrosystèmes (non soumis à une évaporation significative) ce contraste isotopique permanent peut être utilisé pour connaître la part d'eau de rivière dans un aquifère local ou inversement, à partir d'une simple équation de mélange.

Le tritium est un isotope radioactif de période relativement courte (12,43 ans) qui permet, en général, de dater les eaux relativement récentes, mais sur une période très courte, de l'ordre d'un cycle hydrologique, et pour des concentrations élevées, il peut aussi être utilisé comme un marqueur stable. Après une période fortement influencée par les essais thermonucléaires en haute atmosphère, les concentrations en tritium (exprimées en Unité Tritium) dans les précipitations sont, à l'heure actuelle, revenues aux valeurs normales naturelles, qui varient cependant en fonction des saisons et de la proximité des océans (entre 6 et 11 UT). Les activités du nucléaire (centrales et activités associées) sont à l'origine de rejets de cet élément dans l'atmosphère et l'hydro système. Sa présence, d'origine anthropique, en quantité supérieure à la normale dans les précipitations et les eaux du Rhône à l'amont du site ouvre une autre voie de traçage différente et complémentaire de celle fournie par l'oxygène 18.

6.4.A3. BIO A : Invertébrés souterrains

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

6.4.1. A3.1.Echantillonnage de la faune interstitielle

Méthodes de prélèvements des invertébrés souterrains

6.4.1.1. Prélèvements dans le milieu hyporhéique (sédiments des cours d'eau)

L'échantillonnage d'invertébrés dans les sédiments des cours d'eau et des zones humides a été réalisé à l'aide de la méthode Bou-Rouch (Bou & Rouch, 1967). Cette méthode est l'une des plus couramment utilisées pour l'échantillonnage des invertébrés dans le milieu hyporhéique. L'équipement (Photo 1) consiste en une sonde en acier perforée de 2 à 3 cm de largeur et de longueur variable (en général entre 1,5 et 1,8 m). La longueur de la sonde peut s'adapter en fonction : (1) de la hauteur d'eau dans le milieu échantillonné et (2) de la profondeur de l'échantillonnage.

Photo 1(Photo_1) : Equipement nécessaire pour un pompage à l'aide de la méthode Bou-Rouch : A) sonde en acier avec crépine ; B) tête de pompage à piston ; C) tête de frappe pour enfoncer la sonde en acier ; D) masse

Pour cette étude, la sonde a été enfoncée dans le sédiment à l'aide d'une masse jusqu'à une profondeur de 50 cm pour pomper 10 litres d'un mélange eau/sédiment dans un sceau gradué. Trois prélèvements différents ont été réalisés sur chaque site pour tenir compte de la forte variation spatiale de la faune. Le mélange est filtré sur place à l'aide d'un tamis avec un vide de maille de 100 μm , puis il est stocké dans une boîte étanche après fixation avec de l'alcool à 96°. Finalement, les invertébrés sont triés, comptés et identifiés au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

6.4.1.2. Prélèvements dans les puits

L'échantillonnage d'invertébrés dans les puits, plus difficiles à prélever, a été réalisé en plusieurs étapes à l'aide de méthodes complémentaires permettant un échantillonnage exhaustif de la faune souterraine.

Dans les puits dont l'eau n'est pas utilisée pour l'alimentation, la première étape consiste à déposer, à la tombée de la nuit, des filets circulaires (ou balances) lestés de pierres et d'appâts (morceaux de foie ou de saucisson sec) dans le fond du puits. Cette méthode permet d'attirer des invertébrés cachés dans le puits mais également dans les milieux souterrains à plusieurs mètres du puits. Les filets seront retirés le lendemain matin tôt avant que les rayons de soleil ne fassent partir les invertébrés souterrains qui fuient la lumière. Une fois le filet retiré, la seconde étape correspond à un pompage de 40 litres à l'aide d'une pompe à piston, identique à celle utilisée dans la méthode Bou-Rouch, qui est fixée sur un tuyau d'arrosage lesté d'environ 15 m. Cette méthode permet l'échantillonnage de la faune non carnivore qui n'est pas attirée par les appâts. En revanche, le pompage manuel, à cause de la pression qui s'exerce sur le tuyau, n'est possible qu'à condition que le niveau piézométrique du puits ne dépasse pas 7 à 8 m et que la profondeur totale de celui-ci ne soit pas supérieure à 17 m. Dans le cas contraire, le pompage est remplacé par l'utilisation d'un filet à plancton (Photo 2) qui permet de mettre en suspension et de collecter les invertébrés en faisant d'amples mouvements de haut en bas.

Photo 2 (Photo_2) : Equipement nécessaire pour un pompage dans des puits dont la profondeur total (> 17 m) ou le niveau piézométrique (> 8m) ne permettent pas l'utilisation d'une pompe manuelle

Dans les puits utilisés comme source d'eau potable, l'utilisation de filets appâtés n'est pas possible et l'échantillonnage sera basé uniquement sur le pompage ou le filet à plancton.

Dans tous les cas, les échantillons seront filtrés sur place à l'aide d'un tamis avec un vide de maille de 100 μm , puis stockés dans une boîte étanche après fixation avec de l'alcool à 96°. Finalement, les

invertébrés sont triés, comptés et identifiés au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

6.4.1.3. Prélèvements dans les sources

L'échantillonnage d'invertébrés dans les sources a également été réalisé en plusieurs étapes. Lorsque le débit ou la forme de la source le permettaient, nous avons placé des filets à dérive à la tombée de la nuit (Photo 3). Les filets seront retirés le lendemain matin tôt avant que les rayons de soleil ne fassent partir les invertébrés. Une fois le filet retiré, un pompage de type Bou-Rouch (voir méthode de prélèvement dans le milieu hyporhéique) a été réalisé lorsque la texture du fond de la source permettait d'y enfoncer la sonde. Lorsque la forme de la source ne permettait pas d'utiliser un filet à dérive, des petits filets appâtés (voir méthode de prélèvement dans les puits) ont été utilisés.

Photo 3(Photo_3) : Filet à dérive utilisé dans les sources

6.4.2. A3.2. Identification (clef simplifiée)

6.4.3. A3.3. Calcul de l'indice

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 & Reygrobellet, 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'espèce 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.

6.5. A4. BIO V : macrophytes

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

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

6.5.1.1. 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 ug/L, mésotrophe pour des teneurs moyennes comprises entre 40 et 80 ug/L, eutrophe pour des teneurs entre 80 et 250 ug/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.

6.5.1.2. 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.

6.5.1.3. 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 lînes 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).

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

Figure 34 (Figure_10): Abondance moyenne de la *Berula erecta* selon la teneur en NH_3 (graphique de gauche) et l'amplitude des variations thermiques (graphique de droite)

Figure 35 (Figure_11): Abondance moyenne du *Ceratophyllum demersum* selon la teneur en NH_3 (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 34), et de *Ceratophyllum demersum*, espèce liée aux milieux eutrophes à forts coefficients de variation thermique (Figure 35).

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.

6.5.2. A4.1. Echantillonnage

Méthodologie et caractéristiques des relevés de végétation (Brégénier-Cordon)

En ce qui concerne le secteur de Brégénier-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 8). 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.

Tableau 8 (Tableau_6) : 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 (en vert sur la carte).

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).

6.5.3. A4.2. Indentification (clef simplifiée)

6.5.4. A4.3. Calculs des indices

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 36). 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.

Figure 36 (Figure_12): 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 9). 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.

Tableau 9 (Tableau_5) : 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.

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 37) :

Figure 37 (Figure_13) : 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) ressortent de la même manière sous cette représentation ().

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.

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.

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).

Tableau 10 (Tableau_7) : 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.

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 (). 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 liées au faible nombre de sites. Une grande majorité des bras morts étudiés présentent un niveau de perturbation élevé et un processus actif d'alluvionnement, et cette situation n'est pas limitée au secteur de tressage ().

Trophie, apport phréatique, alluvionnement, global

6.6. A5. Bases de données utiles et consultables

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

ADES : <http://www.ades.eaufrance.fr/>

InfoTerre : <http://infoterre.brgm.fr/>

Géoportail : <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>

SANDRE : <http://www.sandre.eaufrance.fr/>

Liste de portails Eaufrance : <http://www.eaufrance.fr/spip.php?page=portail>

Eaufrance : <http://www.eaufrance.fr/>

ONEMA : <http://www.onema.fr/L-information-sur-les-ressources>

Bassin Rhône-Méditerranée : <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/>

CNR InfoRhône : <http://www.inforhone.fr/inforhone/FR/Commun/index.aspx>

DREAL Rhône-Alpes : <http://www.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/>

Gest'Eau : <http://gesteau.eaufrance.fr/>

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

6.8.A7. Personnes ressources et compétences

Annuaire de compétences à mettre à jour tous les 3 ans

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

