

Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides) Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés Influence des variations saisonnières sur les échanges

Rapport final Phase 3 (2008-2010)

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 SITE :
Roland Déchomets, Didier Graillot, Frédéric Paran

Université Claude Bernard Lyon I, Laboratoire « Écologie des Hydrosystèmes Fluviaux » UMR CNRS 5023 : Hélène Baillet, Gudrun Bornette, Pierre Marmonier, Christophe Piscart, Celia Rodriguez et Laurent Simon

Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, Laboratoire d'Hydrogéologie : Yves Travi

Juin 2010

Fiche signalétique

Destinataire du document : AE-RMC, ZABR

Cordonnées complètes :

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

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

Interlocuteur : Laurent Cadilhac

Date : 13 Juillet 2010

Évaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains
dans l'alimentation des eaux de surface
(cours d'eau, plans d'eau, zones humides)
Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés
Influence des variations saisonnières sur les échanges
Phase 3 (2008-2010)

Statut du rapport :	Version provisoire	<input type="radio"/>
	Version intermédiaire	<input type="radio"/>
	Version de travail	<input type="radio"/>
	Version finale	<input checked="" type="radio"/>

Auteurs :

- EMSE – Centre SITE (Didier Graillot, Frédéric Paran, Roland Déchomets).
- LEHF – Ecologie souterraine (Pierre Marmonier, Christophe Piscart, Laurent Simon) ;
- LEHF – Ecologie végétale (Gudrun Bornette, Hélène Baillet, Celia Rodriguez).
- UAPV – Laboratoire d'Hydrogéologie (Yves Travi)

Données hydrauliques : en convention avec la CNR.

Financements complémentaires : Région PACA

Nombres d'exemplaires édités :

Diffusion : ZABR

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

Nombres de pages du rapport hors annexes : 157

Nombres d'illustrations hors annexes : 30 figures, 39 tableaux et 31 cartes

Nombre d'annexes : 7

Recueil de cartes : 10 cartes

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

Table des matières synthétique

Fiche signalétique.....	I
Table des matières synthétique	III
Résumé	V
1. Introduction	1
1.1. Finalités, objectifs et planification du projet.....	1
1.2. Justification du choix de la chute CNR de Donzère-Mondragon.....	4
1.3. Organisation du rapport.....	5
2. Présentation hydraulique de la chute CNR de Donzère-Mondragon	7
2.1. Localisation géographique et administrative du secteur de Donzère-Mondragon	7
2.2. Aménagements CNR du secteur de Donzère-Mondragon	9
2.3. Usages de l'eau.....	16
2.4. Hydrologie du secteur de Donzère-Mondragon	18
2.5. Géologie et hydrogéologie du secteur de Donzère-Mondragon	22
3. Description et présentation des données disponibles.....	45
3.1. Volet hydraulique.....	45
3.2. Volet faune : invertébrés souterrains.....	46
3.3. Volet végétation et chimie	46
4. Métrique hydraulique : caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR Donzère-Mondragon (Bas-Rhône).....	47
4.1. Piézométries de départ, états hydrologique et perméabilités	47
4.2. Altitudes comparées de la nappe et du talweg du Rhône.....	48
4.3. Caractérisations des échanges nappes/Rhône.....	50
4.4. Bilan des échanges sur Donzère-Mondragon.....	64
4.5. Comparaison avec d'autres évaluations des échanges sur Donzère-Mondragon.....	67
5. Métrique isotopique : Utilisation des isotopes stables (¹⁸O) et radioactifs (tritium) pour évaluer les échanges nappe-rivière dans le secteur Donzère-Mondragon	69
5.1. Préambule : apport des isotopes stables	69
5.2. Principe de la méthode.....	71
5.3. Travaux de terrain, résultats préliminaires et perspectives.....	72
5.4. Conclusions	75
6. Métriques végétation aquatique et physico-chimique.....	77
6.1. Métrique hydrobiologique : végétation aquatique	77
6.2. Analyses physico-chimiques et alimentation phréatique.....	87
6.3. Evaluation de la méthode.....	93
7. Métrique invertébrés souterrains.....	95
7.1. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques.....	95
7.2. Stations échantillonnées.....	96
7.3. Analyses et interprétation sur le secteur de Donzère-Mondragon	98
7.4. Conclusions et perspectives.....	104
8. Croisement et superposition des métriques	107
8.1. Synthèse rapide des résultats par métriques	107
8.2. Analyse comparative des métriques	109
9. Conclusion	123
9.1. Efficacité des descripteurs.....	123
9.2. Bilan par chute CNR.....	126
9.3. Applicabilité et pertinence de la méthode.....	127
10. Perspectives.....	129
10.1. Planification de la phase 4	129
10.2. Un sujet de thèse (démarrage en octobre 2010)	130

10.3. <i>Corrélation entre les métriques sur Brégner-Cordon et sur Donzère-Mondragon</i>	132
Partenaires et correspondants	133
Bibliographie	135
<i>Métrique hydraulique</i>	135
<i>Métrique invertébrés souterrains</i>	136
<i>Métrique macrophytes</i>	136
Liste des figures, tableaux et cartes	139
<i>Liste des figures</i>	139
<i>Liste des tableaux</i>	140
<i>Liste des cartes</i>	141
Table des matières complète	143
Table des matières des annexes	147
Listes des cartes du recueil de cartes	149

Résumé

Le travail présenté dans ce rapport correspond à la phase 3 (2008-2010) de l'action de recherche ZABR/Agence de l'eau RMC intitulée « Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides) - Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés ». L'objectif de ce travail vise à identifier et à quantifier les échanges nappes/Rhône du lac Léman à la mer Méditerranée.

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

- une approche spécifique fondée sur 3 métriques principales : hydrophysique (hydrogéologie quantitative), hydrobiologique (indicateurs biologiques : invertébrés souterrains, macrophytes) et géochimique (traceurs chimiques et isotopiques) ;

- une interprétation croisée des résultats obtenus pour chaque métrique.

La finalité de ce travail est tant scientifique qu'opérationnelle et vise à produire un outil d'interprétation des échanges nappes/Rhône, assorti de préconisations pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité.

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

Les deux premières parties du rapport proposent : 1) une description de la zone d'étude (aménagements, description des masses d'eaux, enjeux en matière de ressource en eau) ; 2) une présentation des données disponibles (nature, type, source, propriétaire, précision, exploitabilité) pour chacune des métriques.

Les quatre parties suivantes sont dédiées à l'étude des échanges nappes/Rhône avec les outils et méthodes respectifs de chacune des métriques :

- La métrique hydrophysique est fondée sur la schématisation des configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges, l'hydrogéologie quantitative, notamment la Loi de Darcy, et les techniques d'analyse géomatique sous SIG. La caractérisation des échanges nappes/Rhône a pu être effectuée à partir de quatre piézométries différentes, ce qui a permis d'initier une réflexion sur les variations saisonnières des échanges.

- La métrique isotopique est fondé sur l'analyse des teneurs en tritium et oxygène 18 des eaux superficielles et souterraines du secteur. La pré-campagne réalisée à l'aide de ces indicateurs montre leur pertinence pour appréhender les mélanges et le rôle respectif des eaux du Rhône et des eaux locales (pluie, cours d'eau) dans l'alimentation des nappes.

- La métrique hydrobiologique mobilise deux types d'indicateurs pour évaluer les échanges : 1) d'une part les végétaux aquatiques, ou macrophytes, sensibles aux variations thermiques dues aux apports d'eaux souterraines, à la trophie du milieu aquatique et aux perturbations ayant pour origine la dynamique fluviale ; 2) d'autre part, les invertébrés souterrains marqueurs des arrivées d'eaux souterraines.

La septième partie du rapport est au cœur de la démarche interdisciplinaire. L'interprétation croisée des échanges nappes/Rhône a permis de dresser une cartographie issue de SIG montrant la superposition des résultats issus des différentes métriques mobilisées sur le secteur de Donzère-Mondragon. Ici, les métriques convergent dans la plupart des cas vers des résultats similaires. Le croisement des métriques permet une évaluation plus robuste des échanges. La complémentarité des métriques permet une évaluation spatialement plus étendue pour des zones où l'on ne dispose pas de toutes les données, et procure aussi une plus-value d'informations spécifiques à chacune des métriques. Par exemple l'hydrophysique permet de quantifier les volumes échangés, les macrophytes identifient les sources de pollutions et les invertébrés les apports souterrains profonds. Sur le secteur de Donzère-Mondragon, on aboutit au final à une sectorisation spatiale fonctionnelle en 10 zones pour un linéaire de berge d'environ 120km.

Pour conclure, l'efficacité des descripteurs utilisés, ainsi que l'applicabilité et la pertinence de la méthode sont discutés. Enfin, la planification et les secteurs d'étude de la phase 4 (2010-2012) sont présentés, ainsi que les fondements d'un sujet de thèse sur la question prévu à partir d'octobre 2010 et un travail sur la recherche de corrélation entre métriques.

1. Introduction

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

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

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

Cinq équipes sont principalement impliquées dans cette action de recherche :

- le Centre SITE (Sciences, Informations et Technologies pour l'Environnement) de l'ENSM-SE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne);
- l'UMR 5023 EHF (Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux) de l'Université Lyon I, et plus spécifiquement des équipes « Hydrobiologie et Ecologie Souterraines » et « Ecologie des Communautés Végétales » ;
- le CEMAGREF Lyon (phase 1 et 2) ;
- le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon (phase 3) ;
- l'ENTPE Lyon (Phase 3).

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

1.1. Finalités, objectifs et planification du projet

Les paragraphes qui suivent présentent les finalités et les objectifs du projet et sa planification en 5 phases, prévues de 2006 à 2012 suite à la labellisation ZABR effective depuis juin 2005.

1.1.1. Finalités opérationnelles, objectifs et méthodologie

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

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

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

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

Dans un objectif de gestion coordonnée de la ressource en eau tant superficielle que souterraine, et plus généralement de préservation de la ressource en eau et de la biodiversité sur le corridor alluvionnaire du Rhône, le programme permettra :

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

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

1.1.2. Phases de l'étude

Le programme a 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 (Annexe 6). La phase 3 est l'objet de ce rapport et la phase 4 a été décrite synthétiquement dans une fiche ZABR (Annexes 5). Les différentes phases prévues de l'étude sont les suivantes :

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

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

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

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

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

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

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

Les tâches suivantes sont prévues pour cette nouvelle phase de travail :

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

- Etude des échanges en régime transitoire. 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.

- 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.

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

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

Phase 5 : 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.

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

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

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

1.1.4. Phase 2 (2007-2008)

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

- la schématisation des configurations hydrogéologique sur le Rhône-Moyen et le Bas-Rhône ;
- la collecte de données complémentaires ;
- au développement d'une méthode d'analyse spatiale sous SIG de caractérisation des échanges
- l'initiation du tableau d'interprétation des résultats par métriques ;

- l'initiation de la codification des métriques ;
- l'analyse des résultats inter-sites sur Brégnier-Cordon ;
- une sectorisation fonctionnelle quantifiée sur Brégnier-Cordon.

La phase 2 comprend également :

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

Pour le volet hydrogéologique, la phase 2 comprend également :

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

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

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

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

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

En ce qui concerne les rendus, pour chacune des deux premières phases, 1 rapport a été rédigé, ainsi qu'une fiche de restitution, 1 comité de suivi plénier a été organisé et des comités de suivi techniques ont eu lieu (Annexe 7).

1.2. Justification du choix de la chute CNR de Donzère-Mondragon

1.2.1. Volet hydraulique

Concernant le volet hydraulique de choix du secteur de Donzère-Mondragon a été motivé par plusieurs raisons : des différences notables avec le secteur précédemment étudié (Brégnier-Cordon), la variété des situations rencontrées, l'existence de modèles de nappe et de données permettant d'initier l'étude des variations saisonnières sur les échanges nappes/Rhône.

Par rapport au secteur de Brégner-Cordon, la chute CNR de Donzère-Mondragon présente des différences notables :

- la superficie du secteur d'étude est plus grande, notamment celle de l'aquifère étudié ;
- les influences anthropiques et les aménagements sont plus importants (irrigation, centrale nucléaire, hauteur de la chute, longueur du canal de dérivation) ;
- les débits du Rhône sont nettement plus importants ;
- le contexte hydrogéologique n'est pas le même.

Les situations rencontrées sont plus variées :

- l'impact du canal d'aménagé et du canal de fuite sur l'aquifère sont différents ;
- l'aquifère est semi-captif sur toute la partie aval ;

Les données et les modèles disponibles permettent d'initier l'étude de l'influence saisonnière sur les échanges nappes/Rhône, notamment à partir de plusieurs piézométries :

- piézométries récentes 2008 (hautes-eaux) et 2009 (moyennes-eaux) ;
- piézométries anciennes 1968 (basses-eaux) et 1969 (moyennes-eaux).

La chute CNR de Donzère-Mondragon constitue donc un secteur d'étude représentatif à l'échelle du fleuve Rhône sur le plan hydraulique.

1.2.2. Volet faune : invertébrés souterrains

Les deux arguments qui ont conduit à la sélection du secteur de Donzère-Mondragon étaient : (i) les études de la faune souterraine disponibles sur ce secteur (Creuzé des Châtelliers, 1991, Plenet et al., 1996) ainsi que (ii) la richesse spécifique importante dans ce secteur. En effet, la richesse en invertébrés souterrains augmente vers le Sud, lorsque l'on s'éloigne de la limite des dernières glaciations.

1.2.3. Volet flore : macrophytes

Le secteur de Donzère Mondragon a été sélectionné car il permet de tester l'outil physico-chimique dans un secteur potentiellement contrasté climatiquement et floristiquement par rapport à Brégner-Cordon, ce qui permet de mettre à l'épreuve l'outil végétation, initialement élaboré dans un contexte tempéré (Haut Rhône et Ain).

1.3. Organisation du rapport

Le rapport est divisé en 9 parties.

La **première partie** propose une description hydraulique de la chute CNR de Donzère-Mondragon, en guise de présentation du secteur d'étude sélectionné. Le secteur est repositionné dans le contexte de la vallée du Rhône et décrit sur les plans géographique, administratif et géologique. Les différents aménagements sont présentés (barrages, canal de dérivation, siphon, contre-canaux, digues, revêtements du canal de dérivation), ainsi que les différents usages de l'eau passés et présents. Ensuite, le secteur est décrit du point de vue de l'hydrologie et des eaux superficielles (débit, pente, morphologie, ligne d'eau et profil en long du lit du Rhône ; débits des autres cours d'eau). Une section importante de cette partie présente les caractéristiques hydrogéologiques du secteur (nappe alluviale, substratum, influence des aménagements). Les connaissances initiales sur les échanges nappes/Rhône sont détaillées dans une autre section. Une dernière section insiste sur les enjeux associés à ce secteur (biodiversité, réhabilitation des lônes, tourisme, pollution, usages de l'eau, manque de connaissances en rive droite du Rhône).

La **deuxième partie** présente les données disponibles sur le secteur de Donzère-Mondragon pour chacune des métriques impliquées (hydraulique, biologique, géochimique). Ces données sont

décrites selon leur nature, leur type, leur source, leurs propriétaires, leur précision et leur exploitabilité.

Les trois parties suivantes exposent l'étude des échanges nappe/Rhône réalisée pour chacune des métriques : métrique hydraulique pour la **troisième partie**, métrique isotopique pour la **quatrième partie**, métrique macrophytes pour la **cinquième partie** et métrique invertébrés souterrains pour la **sixième partie**.

La **septième partie**, au cœur de ce travail interdisciplinaire, procède au croisement des métriques et à la superposition des cartes de résultats. Les convergences et divergences des résultats sont représentées, explicitées et analysées.

Les deux dernières parties proposent un bilan du travail réalisé et la planification future du projet de recherche. Ainsi, la **huitième partie** conclut en apportant des précisions sur l'efficacité des descripteurs et l'applicabilité et la pertinence de la méthode. Elle propose aussi un bilan en termes de couverture spatiale des secteurs traités et des données acquises ou en cours d'acquisition sur le fleuve Rhône. La **neuvième partie** détaille les perspectives : 1) l'organisation et les secteurs d'étude de la phase 4 (2010-2012), 2) le démarrage du sujet de thèse en octobre 2010, 3) la corrélation des métriques.

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

2. Présentation hydraulique de la chute CNR de Donzère-Mondragon

Cette partie propose une synthèse des informations bibliographiques recueillies sur le secteur de Donzère-Mondragon. Après avoir localisée cette chute CNR sur le plan géographique et administratif, elle est ensuite décrite sur le plan des principaux aménagements (historique, barrages, canal de dérivation, siphons, contre-canaux, digues, revêtements des berges, usages de l'eau).

Ensuite sont présentées les informations cruciales recueillies pour l'étude des échanges nappes/Rhône et entre aquifères. Il s'agit des caractéristiques hydrologiques du secteur, notamment pour le fleuve Rhône (débits, pente, morphologie du lit, lignes d'eau, profils en long), mais aussi pour la rivière Ardèche et les autres cours d'eaux ou canaux. L'autre point important concerne les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la chute de Donzère-Mondragon, notamment de la nappe alluviale, parfois captive sous des limons, et du substratum sous-alluvial, mais aussi l'influence du canal de dérivation sur l'aquifère alluvial.

Pour terminer, cette partie présente une synthèse des informations connues concernant les échanges nappe alluviale/rivières (Rhône, canal de dérivation, Gaffière) et les échanges nappe alluviale/épontes (limons, Crétacé, Pliocène).

Au final, cette présentation de la chute CNR de Donzère-Mondragon permet de mieux cerner le fonctionnement de cet hydrosystème et l'influence des aménagements.

2.1. Localisation géographique et administrative du secteur de Donzère-Mondragon

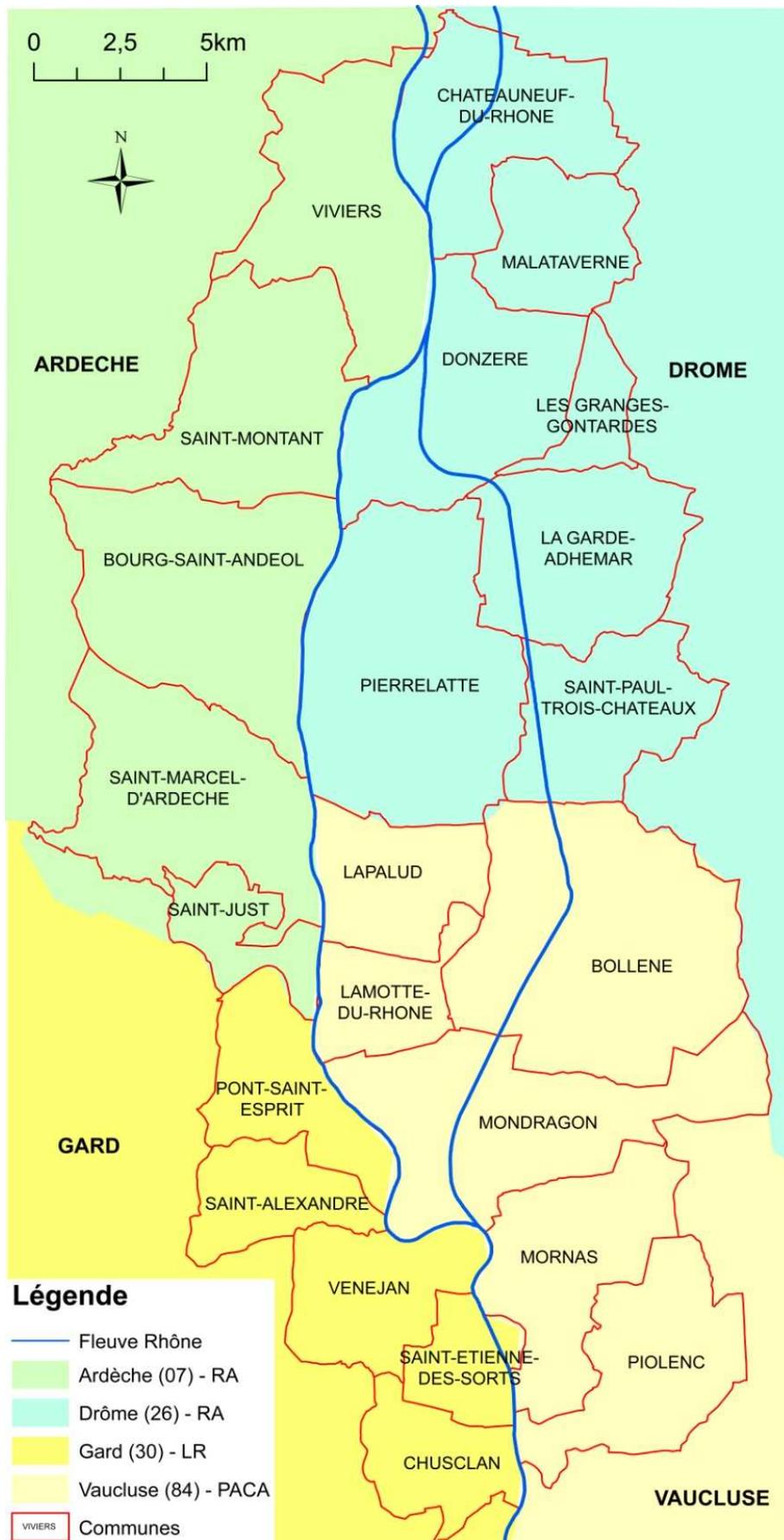
Localisé à environ 170km au sud de Lyon et à une centaine de kilomètres au nord d'Arles (25km au sud de Montélimar et à 33 km au nord d'Orange), l'aménagement CNR de Donzère-Mondragon est situé principalement dans la plaine du Tricastin. Ce territoire s'étend sur une trentaine de kilomètres du nord au sud et sur une quinzaine de kilomètres d'est en ouest. Les localités principales bordant le Rhône et le canal de dérivation sont (Carte 1) :

- Viviers, Saint-Montant et Donzère au nord ;
- Saint-Alexandre, Mondragon, Vénéjan, Mornas et Saint-Etienne-des-Sorts au sud ;
- Pierrelatte, Lapalud et Lamotte-du-Rhône au centre de la plaine ;
- Bourg-Saint-Andéol, Saint-Marcel d'Ardèche, Saint-Just et Pont-Saint-Esprit (au niveau de la confluence Rhône-Ardèche) en rive droite du Rhône ;
- Les Granges Gontardes, la Garde Adhémar, Saint-Paul-Trois-Châteaux et Bollène en rive gauche du Canal de dérivation.

De part sa grande superficie et sa localisation géographique ce secteur est complexe du point de vue du découpage administratif éclaté. En effet, il est à cheval sur trois régions et quatre départements (Carte 1) :

- Rhône-Alpes (RA) : Ardèche (07) au nord-ouest en rive droite du Rhône et Drôme (26) au nord-est en rive gauche du Rhône ;
- Languedoc-Roussillon (LR) : Gard (30) au sud-ouest est rive droite du Rhône ;
- Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) : Vaucluse (84) au sud-est en rive gauche du Rhône.

Des informations complémentaires concernant le contexte rhodanien sont fournies en Annexe 1.



Carte 1 : Découpage administratif de l'aménagement de Donzère-Mondragon (source BDCarthage)

2.2. Aménagements CNR du secteur de Donzère-Mondragon

Le chantier pour la mise en place des ouvrages du secteur de Donzère-Mondragon était considéré à l'époque comme un des plus gros d'Europe. Le commencement des études a été initié en 1942. L'achèvement des travaux et la mise en service a eu lieu sur la période 1952-1954 (Delattre, 1955). Cet aménagement n'était pas le premier sur le secteur. De la fin du 18^e au milieu de 20^e siècle les aménagements ont été les suivants (Poinsart, 1992 ; Sogreah, 1999) :

- ouvrages de défense contre les crues (digues insubmersibles) ;
- chenalisation du fleuve et ouvrages d'amélioration des conditions de navigabilité (digues submersibles, barrages au niveau des bras secondaire, digues basses de resserrement du lit et premiers épis).

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

Les aménagements réalisés de 1781 à 1947 ont eu pour conséquence (Poinsart, 1992) :

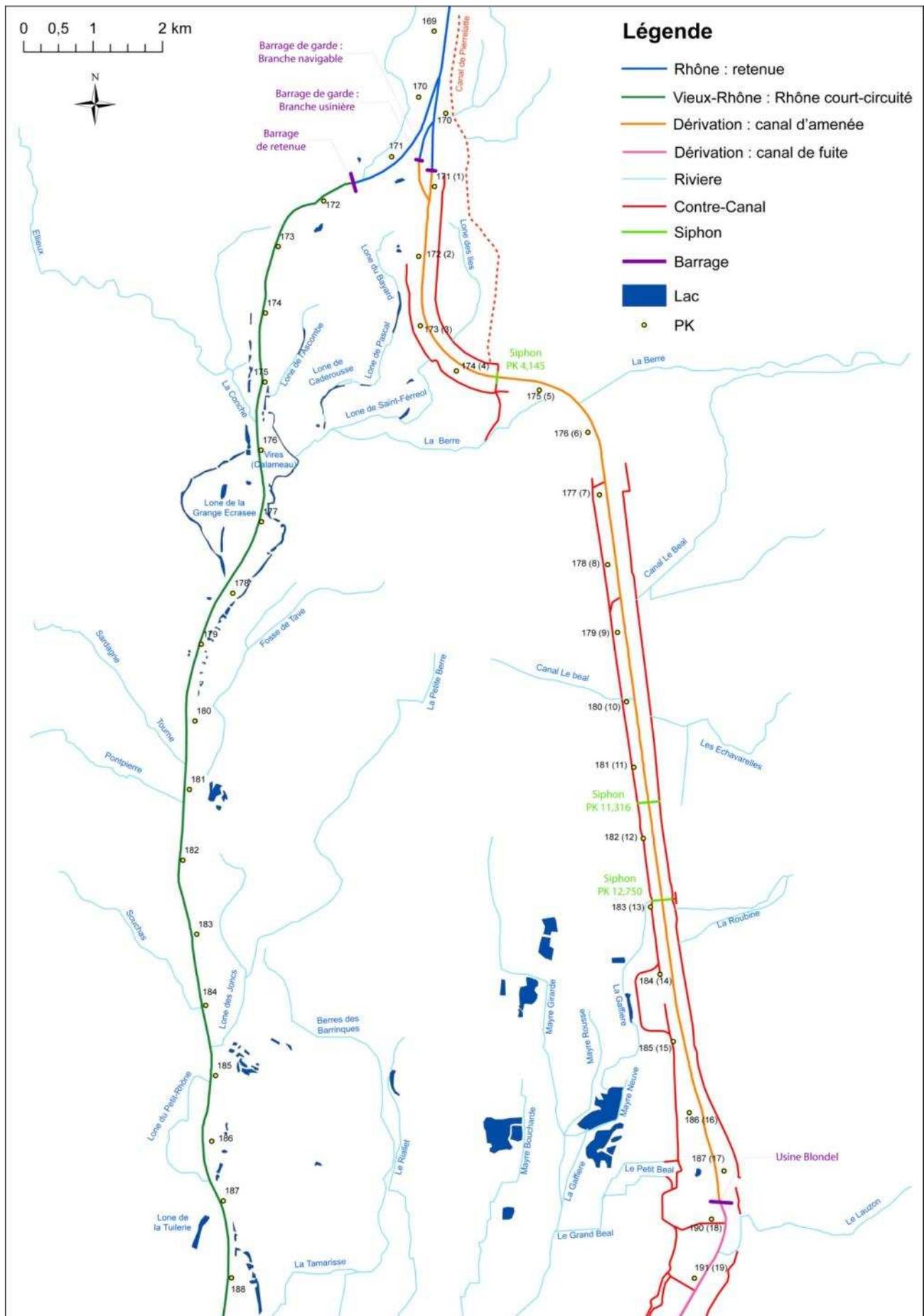
- la diminution de la surface en eau du Rhône et de ses annexes, l'assèchement des lônes et la disparition des îles ;
- la délimitation de la largeur du chenal, la stabilisation des sinuosités et la limitation de la divagation horizontale ;
- un déficit sédimentaire.

En 1947, la largeur du chenal est comprise entre 150 et 259m (moyenne : 160m). Le choix de ce site par la CNR a été guidé par sa forte pente (la plus forte du bas-Rhône) et donc par sa forte rentabilité potentielle. Un tel aménagement a conduit à supprimer les derniers hauts-fonds qui rendaient la navigation délicate au niveau de passages rétrécis (courant violent). Le tracé de la dérivation a été choisi en fonction de différents critères :

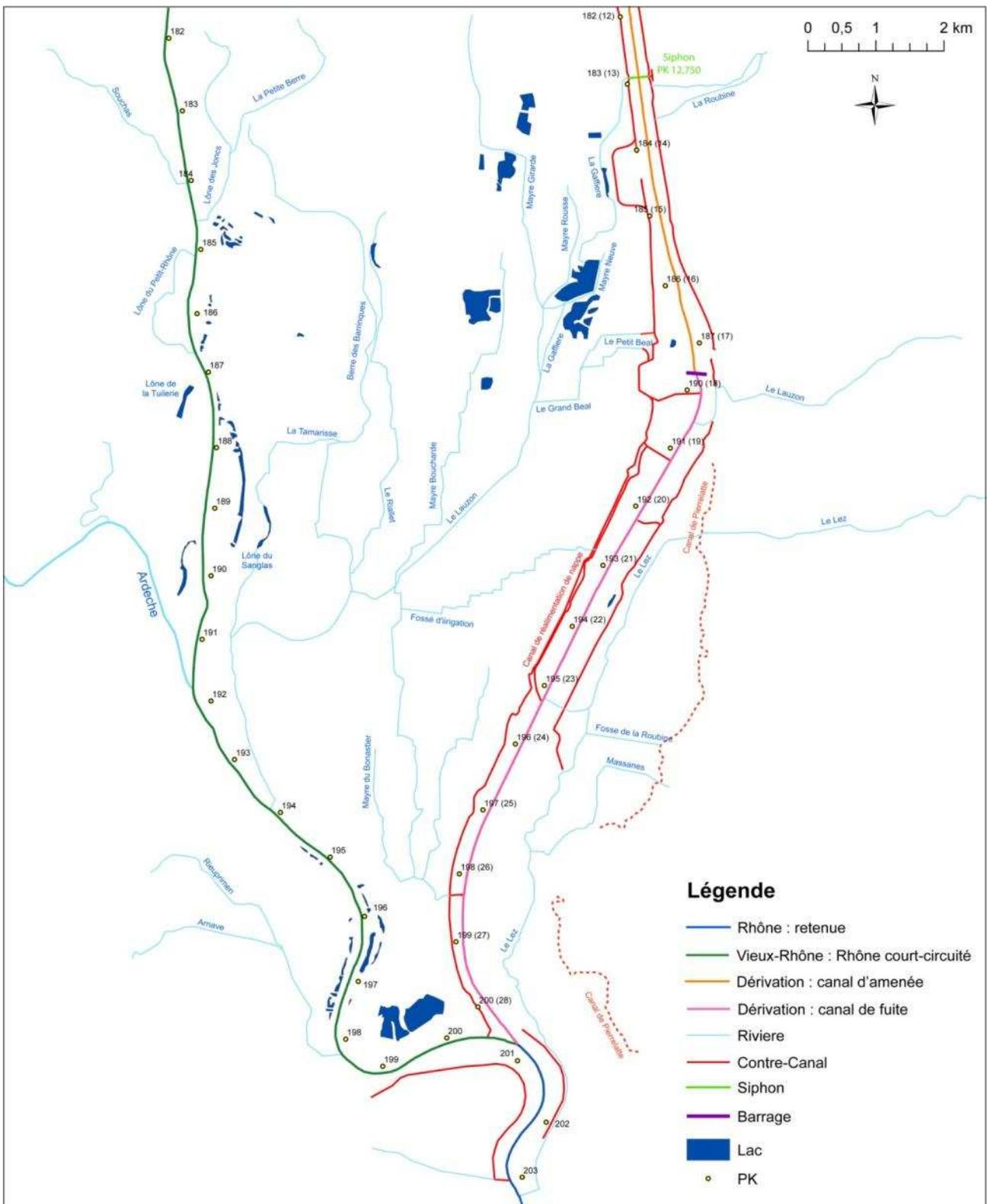
- faible présence de limons (non-utilisables pour les remblais) ;
- secteurs présentant un risque moindre de submersion ;
- présence d'un piton de grès (10 à 12m de la surface) pour ancrer l'usine Blondel ;
- présence de hameaux et d'un futur terrain d'aviation à épargner (raison de la courbe du canal de dérivation au nord).

La Carte 2 et la Carte 3 localisent le réseau hydrographique, les bassins, les lônes, les contre-canaux, les barrages, les siphons, les PK, les retenues, le Vieux-Rhône et le canal de dérivation avec ses deux composantes : canal d'amenée et canal de fuite. Ces deux cartes sont disponibles au format A3 dans le recueil cartographique joint à ce rapport pour une meilleure visibilité.

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



Carte 2 : Réseau hydrographique et principaux aménagements sur le secteur de Donzère-Mondragon (Nord)



Carte 3 : Réseau hydrographique et principaux aménagements sur le secteur de Donzère-Mondragon (Sud)

2.2.1. Les barrages

Le Tableau 1 synthétise les différentes informations sur les barrages contenues dans la littérature étudiée. Le volume de retenue total de ces barrages est estimé à 20 millions de m³.

	Barrage de retenue	Barrages de garde		Usine Blondel
		Barrage navigable	Barrage usinier	
PK (km)	171,57	0	0	17,3
Localisation	Vieux-Rhône	Canal de dérivation	Canal de dérivation	Canal de dérivation
Altitude du barrage au point le plus haut (m)	75,70	80,50	63,00	75,00
Chute moyenne utile (m)	-	-	-	22,00
Niveau d'eau amont (m)				
Retenue normale	58,50	58,00	58,00	58,00
Retenue minimum	-	-	-	56,32
Retenue maximum	-	58,50	58,50	-
Déversement	58,65	61,50	61,50	-
Exploitation	57,50 à 58,50	-	-	-
Etiage naturel (560m ³ /s)	52,40	-	-	-
1530m ³ /s	58,50	-	-	57,80 à 56,93
1980m ³ /s	58,50	-	-	-
3950m ³ /s	58,50	-	-	-
Crue maximum (millénaire)	-	63,00	63,00	63,50
Niveau d'eau aval (m)				
Retenue normale	-	58	58	-
Retenue maximum	-	58,50	58,50	-
Etiage	52,40	-	-	32,45
560m ³	52,40	-	-	-
1530m ³	-	57,80	57,80	34,94 à 34,40
3950m ³	56,85	-	-	-
Crue centenaire	58,61	-	-	-
Crue 1900	-	-	-	40,00
Altitude du radier amont (m)	49,50	54,50	52,50	53,00
Altitude du radier aval (m)	49,00	54,00	52,00	29,00

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques techniques des barrages à Donzère-Mondragon (d'après Sogreah, 1999 ; Saby, 1955 ; Craste, 1955 ; Anonyme, 1955)

2.2.1.1. Barrage de retenue

Le barrage de retenue court-circuite le Rhône au niveau du PK 171,57 un peu à l'aval du pont de Donzère. Il est constitué de cinq passes de 31,5m pour l'évacuation des eaux, d'une passe de 45m pour la navigation en cas d'arrêt du canal de dérivation et d'une passe à poissons. L'ouverture des six vannes permet d'évacuer jusqu'à 6 000m³/s. Ce barrage relève les eaux d'environ 5m au-dessus de l'étiage (560m³/s, cote naturel de l'étiage avant aménagement 52,40m) ce qui correspond à une crue type annuelle de 4 100m³/s (Sogreah, 1999). Ceci correspond aussi à une cote située à environ 2m au-dessous du niveau des plus hautes eaux connues (PHEC) soit 10 600m³/s en 1856, cote 58,61m (Saby, 1955). L'influence de ce barrage est sensible jusqu'à 10km à l'amont (Craste, 1955). Sogreah (1999) précise que l'incidence du barrage induit la présence de remous à 8,5km à l'amont à l'étiage, à 4,5km pour 3 000m³/s. A partir de 5 000m³/s l'influence du barrage est gommée.

La structure du barrage de retenue est prévue pour résister à des crues de 12 000m³/s sachant que les crues ordinaires sont de l'ordre de 5 000m³/s et le débit moyen de 1 625m³/s. A l'origine, il était prévu pour envoyer un débit dérivé dans le canal de dérivation de 1 530m³/s maximum. Ce débit dérivé est passé de 1530 à 1800m³/s en 1960, puis à 1980m³/s en 1986 (Sogreah, 1999). Le débit réservé minimum est de 60m³/s.

La cote du barrage de retenue est maintenue entre 57,5 (1 000 à 3950m³/s) et 58,5m. Le seuil de déversement est à la cote 58,65m (Jacob, 1955). Aujourd'hui, pour des débits compris entre 1 700 et 7 000m³/s le niveau est constant au point de consigne du PK 170,3. Au-delà de 7 000m³/s, le niveau au point de consigne augmente progressivement et le débit dérivé est réduit à 1 500m³/s (Sogreah, 1999).

2.2.1.2. Barrages de garde (PK 0 du canal de dérivation)

Il y a deux barrages de gardes situés à l'entrée du canal de dérivation. Leur mission est de garantir la sécurité et le réglage (vannes régulant les entrées solides et liquides) pour la production

d'hydroélectricité (Bossy & Chappuis, 1955). Il y a un barrage navigable qui dérive un tiers du débit et un barrage usinier qui dérive les deux autres tiers. La construction de ces deux ouvrages a nécessité $70\,000\text{m}^3$ de béton et un terrassement d'un volume de 1,12 millions de m^3 .

Barrage de garde : la branche navigable (Bossy & Chappuis, 1955)

Ce barrage, fondé sur les alluvions, comprend deux passes de 45m. Lors des travaux, la nappe phréatique était en moyenne à la cote 55m. A l'amont, la cote du radier est de 54,50m et à l'aval de 54,00m. Lors des crues millénales le plan d'eau peut atteindre 63m à l'amont (58m à l'aval). La cote de déversement par-dessus les vannes est de 61,5m. Cette cote fixe le niveau maximum d'exploitation. A l'aval, elle est de 58m. Lors des chasses, la cote amont est réduite à 54,5m. En condition normale, la **vitesse du courant est de 1,75m/s**.

Barrage de garde : la branche usinière (Bossy & Chappuis, 1955)

Ce barrage est fondé sur un plateau rocheux situé à la cote 46,50m, soit 11m sous le sol naturel. Il comprend trois passes de 24m. A l'amont, la cote du radier amont est de 52,50m et à l'aval 52,00m. Le niveau normal de la retenue est fixé à 58m soit environ 2m au dessous des plus hautes eaux connues (PHEC). Lors des crues millénaires le niveau peut atteindre 63m à l'amont et 58m à l'aval. En exploitation (crues ordinaires incluses), le niveau amont est de 61,5m et le niveau aval de 58m. Lors des chasses, la cote amont est réduite à 54,5m.

Les berges et le plafond du canal de dérivation sont pourvus de revêtements au niveau de ces deux ouvrages :

- béton bitumeux sur les berges du canal de navigation ;
- dalles de béton sur les berges du canal usinier (pente 3/1, soit 1m pour 3m, soit environ 33% ; en rive droite à l'amont du barrage la cote de la digue est à 63,50m) ;
- dalles de béton sur le plafond du canal usinier entre le seuil amont et le barrage et sur 50m à l'aval ;
- sol en ciment pour les berges et le plafond du canal usinier du PK 0 au PK 1,185.

2.2.1.3. Usine Blondel : bloc usine-déchargeur-écluse de Bollène

L'usine Blondel, située au PK 17,3 du canal de dérivation, comprend six turbines absorbant chacune $255\text{m}^3/\text{s}$ pour une production électrique annuelle d'environ 2 milliards de KWh dont 50% en hiver. Le débit d'équipement est de $1980\text{m}^3/\text{s}$ pour une chute de 22 en moyenne. La construction de l'usine Blondel a nécessité $438\,000\text{m}^3$ de béton et un terrassement d'un volume de 3,5 millions de m^3 (Pavin, 1995).

L'usine est construite sur un piton rocheux du grès sous-jacent (entouré d'argile Pliocène) situé à la cote 46m, le terrain naturel étant à un niveau compris entre 58 et 60m. Au-dessus du grès et des argiles pliocènes on trouve des alluvions de galets roulés sur 6m d'épaisseur, puis en surface 5 à 6m de limons granuleux. Lors des travaux, le niveau de la nappe phréatique oscillait entre 49 et 52m. **A titre indicatif, l'épuisement de la nappe, pour les besoins du chantier, est obtenu pour un pompage de $1800\text{m}^3/\text{s}$ au niveau de l'usine Blondel.**

2.2.2. Le canal de dérivation

La construction du canal de dérivation a nécessité un terrassement de 50 millions de m^3 (Saby, 1995). D'une longueur d'environ 28km, il comprend un canal d'amenée (amont Usine Blondel) de 17,3km (largeur : 83m au plafond et 145m au plan d'eau ; profondeur : 10m ; digues : cote 63m, 63,5m au niveau des ouvrages) et un canal de fuite (aval Usine Blondel) de 11km (largeur : 50 au plafond et 125m minimum au plan d'eau ; profondeur : 10 à 18m). Le canal de dérivation est pourvu d'un revêtement seulement sur la zone atteinte par le batillage. L'étanchement est obtenu

par dépôt naturel des limons du Rhône. **La vitesse moyenne de l'eau du fleuve est de l'ordre de 1,3m/s.** De plus, 25m³/s sont prélevés dans le canal de dérivation pour l'irrigation.

La restitution est située au PK 200,85. Le Tableau 2 donne les détails techniques du canal d'amenée et du canal de fuite.

	Canal de dérivation	
	Canal d'amenée	Canal de fuite
Longueur (km)	17,3	10,7
PK	0 à 17,3	17,3 à 28
Barrages de garde	PK 0 à 1,2	-
Canal	PK 1,2 à 15,5	PK 18,359 à 27,675
Passé éclusière à usine	PK 15,5 à 17,3	-
Usine à passé éclusière	-	PK 17,3 à 18,359
Restitution	-	PK 27,675 à 28
Niveau amont (m)	58 (58,5)	34,8 / 31,25 (32 à 49 selon le débit)
Niveau aval (m)	57	
Largeur au plafond (m)	83,3 (34,20 du PK 11,6 à 13,1)	46,89
Vitesse d'écoulement (m/s)		1,30
Largeur au plan d'eau (m)	145,10	125
Profondeur à plein régime (m)	10,30 (12,30 du PK 11,6 à 13,1)	11,97 pour un plan d'eau à 34,80
Section mouillée (m ²)	1176	1020
Pente du talus	3/1 (5/1 du PK 11,6 à 13,1)	2,5/1 (revêtement) puis 3,27/1
Revêtement	Bétons bitumeux : 2,25m au-dessous du niveau d'eau (cote 59m à 55,75m)	Béton perméable : 3,3m au-dessous du niveau de l'eau (39,7m à 31,5m)
Différence plan d'eau et terrain naturel	7 à 13m (terrain au-dessous du plan d'eau) sauf entre les PK 4 et 6	10 à 18m (terrain au-dessous du plan d'eau)

Tableau 2 : Caractéristiques du canal de dérivation (Miche, 1955 ; Houette, 1955 ; Poinsart, 1992)

Le **canal d'amenée** alimente la nappe il communique avec la couche perméable d'alluvions. Le niveau de la nappe est situé à environ 1m sous le sol au niveau des contre-canaux. Le canal d'amenée est creusé dans les alluvions proches du niveau pliocène qu'il recoupe parfois (Jacob, 1955 ; Miche, 1955). L'épaisseur de limons est plus forte entre les PK 11,5 et 13,2 (Houette, 1955).

Au contraire, le **canal de fuite** draine la nappe qui est réalimentée par des fosses et des puits. Selon Sogreah (1999), un écran étanche de 2 400m (une ouverture tous les 100m) entre les PK 195,2 (23,2) et 192,8 (20,8) a été construit en rive gauche du canal de fuite pour maintenir un niveau piézométrique qui avait baissé à cause du colmatage des puits de réalimentation. Le canal de fuite est creusé dans les alluvions à l'amont, puis dans les marnes pliocènes (Jacob, 1955) sauf au niveau de la restitution (Miche, 1955). La profondeur est d'environ à 22m à l'amont et 12m à l'aval. La cote moyenne du fond de ce canal est à 22,5m, alors que le niveau de la nappe est à 47m en amont et 34m vers la restitution (Houette, 1955).

2.2.3. Les contre-canaux

Les contre-canaux ont été construits pour le drainage des eaux d'infiltration du canal de dérivation et la récupération des eaux des affluents (Maire, 1955). Ces ouvrages ont été conçus pour drainer 1m³/s /km de berge. Ils sont présents sur les deux rives du canal de dérivation sauf entre les PK 4 et 6 car la cote du terrain naturel est supérieure à celle du plan d'eau.

Entre les PK 0 et 4, le contre-canal est situé en rive gauche. Il reçoit les eaux de la lône des Isles puis transverse le canal (siphon PK 4,145) pour rejoindre le Rhône en rive droite via plusieurs lônes.

A l'aval, à partir du PK 6, il y a un contre-canal sur chaque rive quasiment jusqu'à l'usine. Les eaux sont finalement recueillies en rive droite (2 siphons PK 11,316 et 12,750) et dirigées vers la Gaffière. A cet endroit, le contre-canal peut recevoir jusqu'à 25m³/s.

A l'aval de l'usine le contre-canal se divise en 2 branches :

- la première pouvant recueillir jusqu'à $20\text{m}^3/\text{s}$ se jette dans le canal de fuite par un ouvrage de décharge ;
- la seconde recevant $5\text{m}^3/\text{s}$ sert de canal de réalimentation de la nappe.

Le débit des contre-canaux diminue dans le temps car les crues du Rhône colmatent les berges avec des limons. Selon Maire (1955), après les crues de septembre et octobre 1952 les infiltrations sont passées de 20 à $8\text{m}^3/\text{s}$. **En 1972, selon Guégan le débit du contre-canal en rive droite à l'amont de l'usine Blondel avait un niveau constant au cours de l'année d'environ $4,5\text{m}^3/\text{s}$.**

2.2.4. Les siphons

Il existe 3 siphons passant sous le canal de dérivation (Maire, 1955) :

- PK 4,145 : le premier siphon peut évacuer un débit de $5\text{m}^3/\text{s}$. Il rejette les eaux d'infiltration du canal de dérivation en rive gauche dans la Lône des Isles en rive droite ;
- PK 11,316 : le deuxième siphon peut évacuer un débit de $5\text{m}^3/\text{s}$;
- PK 12,750 : le troisième siphon peut évacuer un débit de $150\text{m}^3/\text{s}$ de la rive gauche vers la rive droite par 3 tubes de 3m de diamètre ;

Ces siphons recueillent les eaux des affluents en rive gauche sauf celles du Lez (Caquot, 1955), Bien qu'il y ait un déversoir en rive gauche du canal de dérivation, le Lez s'écoule parallèlement au canal de fuite et se jette en aval dans le Rhône. Le lit majeur de cette rivière est limité par les digues du canal de dérivation. Le déversoir permet l'évacuation des eaux de crues dans le canal de fuite, servant alors de lit majeur.

2.2.5. Les digues

Bien que construites à partir de matériaux locaux, les matériaux des digues sont beaucoup moins perméables que les alluvions dont ils proviennent (Jacob, 1955). Selon Miche (1955), **les berges du canal de dérivation (dignes) ont une perméabilité deux à quatre fois plus faible que la perméabilité moyenne des alluvions (2.10^{-3}m/s)** car les matériaux ont été remaniés. La perméabilité varie selon le type de digues : digues perméables en alluvions remaniées : $K=10^{-3}\text{m/s}$; digues semi-perméables en tout-venant : $K=10^{-4}\text{m/s}$; digues imperméable en limon : $K=10^{-6}\text{m/s}$. De plus, il y a un colmatage rapide par dépôts des limons du Rhône. Ainsi, **quelques mois après la mise en service les fuites des digues du canal de dérivation sont estimées à $1\text{m}^3/\text{s/km}$.** Le fond du canal quant à lui est considéré imperméable du fait du colmatage par les limons du Rhône.

Miche (1955) a calculé des **débits de fuite des digues** :

- **infiltration à travers digue : $Q=0,084\text{l/s}$ par mètre de canal ;**
- **infiltration sous-jacent : $Q=1,045\text{l/s}$ par mètre de canal.**

Ces résultats cumulés correspondent à un débit de fuite des digues de l'ordre de 1129l/s/km , soit environ $1\text{m}^3/\text{s/km}$ comme indiqué au paragraphe précédent. Pour les digues en limon l'infiltration est négligeable.

Selon Maire (1955), les élévations que forment les digues constituent à l'arrière de petits bassins versants lors des pluies. Il a donc été nécessaire d'implanter des puisards tous les 50 à 100m pour récolter les eaux pluviales. Celles-ci passent ensuite sous la digue, dans une buse, et se jettent dans le canal d'amenée au niveau du haut du revêtement. Sur le canal de fuite, c'est le même système, mais les eaux sont rejetées seulement en 2 points : le déchargeur de la RN94 et celui du Lez. Le dimensionnement des ouvrages est prévu pour des pluies de 5cm/heure.

Par ailleurs, des digues étaient présentes avant aménagement. Les digues du Rhône rendaient difficile le drainage de la basse plaine de l'est. Aujourd'hui, le drainage est rendu possible par des passages dans les digues au niveau de la confluence de la Berre, du Lauzon et du Lez. La plaine est

aussi drainée par un réseau de ruisseaux et de lônes. A l'origine, la lône des Isles qui débouchait à la confluence de la Berre et la Mayre du Grand Banastier se jetait dans le Lez. Aujourd'hui, les eaux de la lône des Isles sont recueillies par des contre-canaux, et l'abaissement du niveau du Rhône à l'aval du barrage de retenue facilite les écoulements. La Mayre du Grand Banastier est coupée par le canal de dérivation. Elle se jette dans le canal de fuite par un déversoir (évacuation des eaux de ruissellement du sud de l'aménagement).

2.2.6. Les revêtements des berges du canal de dérivation

Si le talus des berges est souvent constitué de graviers parfois recouvert de limons, ce n'est pas le cas partout. Il a souvent été nécessaire de recouvrir ces talus de berge par des revêtements afin des les protéger du batillage (Bouvet, 1955).

Pour le canal d'amenée, où l'infiltration des eaux se fait vers la nappe (sauf sur 1 secteur où le gradient s'inverse) et où les variations de niveaux d'eau sont faibles (variation de la cote du niveau d'eau : 56,50 à 58) les revêtements sont les suivants :

- graviers : pente: 3/1 (33%), largeur de revêtement de 11m ;
- limons : pente 5/1 (20%), largeur revêtement de 17,80m ;
- revêtement par des matériaux enrobés de bitume non imperméabilisant sur 303 000m² de berge ou de persiennes en béton armé.

Pour le canal de fuite, où les échanges se déroulement de la nappe vers le canal, et où la variation du niveau d'eau est plus importante (variation de la cote du niveau d'eau : 32 à 40m) le revêtement est constitué de persiennes en béton armé avec une grande largeur de joints ouverts pour éviter les sous-pressions sur 500 000m². La pente est de 2,5/1 (40%), la largeur revêtement de 22m.

Il existe deux autres types de revêtement (Bouvet, 1955) :

- sol ciment pour les secteurs (197 000m²) où il n'y pas de tassement et de sous-pression à craindre. On trouve ce revêtement au niveau des berges du canal d'amenée (PK 4,3 à 8 en rive droite ; PK 13,2 à 15,5 en rive gauche) et sur la basse berge et le plafond du canal de dérivation là où la vitesse du courant est supérieure à 1,3m/s

- dalles en béton armé sur marne (revêtement étanche et joints bitumeux) pour éviter le délitement des marnes sur les premiers 1 500m du canal de fuite.

2.3. Usages de l'eau

2.3.1. Plan pour l'irrigation en 1955

Le canal de Pierrelatte, dont les premiers travaux ont eu lieu en 1838, était le principal instrument pour l'irrigation du secteur avec un débit de 8m³/s (David, 1955). Ce canal de plus de 78km de long débute à l'amont du pont de Donzère par une prise d'eau dans le Rhône. Il traversait la plaine du Tricastin pour rejoindre l'Ouvèze à l'aval de Bedarrides. Il comprenait 300km de dérivation et irriguait 7 000ha.

Le tracé de ce canal a été modifié par les aménagements CNR. La prise d'eau pour l'irrigation est située sur le canal de dérivation au PK 10,250. Une station de pompage principale dites « Echavarelle » (débit maximum : 2m³/s) a dû être implantée à cet endroit (cote 54m) car les plus basses terres sont 2,60m au-dessus. Suite à l'aménagement, cette station alimentait :

- un canal principal nord (entre « Echavarelles » et Donzère) qui débitait 800l/s (6 canaux secondaires vers la Garde Adhémar, Donzère et la vallée de la Berre) ;
- un canal principal sud qui débitait 200l/s (6 canaux secondaires) ;
- le canal principal qui débitait 200l/s vers la plaine et Saint-Paul-Trois-Châteaux.

Selon Genevrey (1955), une dotation de 25m³/s, prélevé sur le canal d'amenée, pour l'agriculture par la CNR, était en projet. La répartition devait se faire comme suit :

- 2m³/s : dans canal d'amenée vers des terres à l'est du canal (2 000ha) ;
- 0,5m³/s : dans le canal de Pierrelatte vers vallée du Lez, Bollène (300ha) ;
- 0,2m³/s : dans canal de Pierrelatte vers Bollène et Mondragon (200ha) ;
- 4,5m³/s : dans le canal de Pierrelatte à Uchaux vers l'Aygues et l'Ouvèze à l'est d'Orange (8 000ha) ;
- 3m³/s : dans le canal de Pierrelatte vers la Drôme et le Vaucluse (400ha) ;
- 7m³/s : réservés pour la Drôme et le Vaucluse dont 3m³/s pour le secteur de Donzère-Mondragon entre la dérivation et le Rhône (1 000ha).

2.3.2. Les usages de l'eau aujourd'hui

D'après les données fournies par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse les prélèvements d'eau dans le secteur de Donzère-Mondragon en 2005 (SIERM, 2005) se font aussi bien en eau souterraine, dans les nappes alluviales (327b, 327c, 327d, 327e – Carte 6), qu'en eau superficielle, essentiellement dans le canal de dérivation, mais aussi la Berre, la lône des Isles, à proximité de la Petite-Berre (petits canaux) et dans le Rhône.

Pour les eaux superficielles, la plus grosse part de l'eau prélevée est utilisée pour le refroidissement de la centrale nucléaire (99,91%), le reste est réparti entre l'industrie, l'agriculture et la réalimentation du milieu souterrain (Tableau 3).

	milliers m ³ /an	milliers m ³ /jour	m ³ /s	%
Total eaux superficielles	5 219 968,00	14 301,28	165,52	
Industriel (restitution directe ou autres usages)	3 566,90	9,77	0,11	0,07
Irrigation par aspersion	889,20	2,44	0,028	0,02
Réalimentation des milieux souterrains	13,20	0,04	0,0004	0,0003
Refroidissement des centrales thermiques (fil de l'eau)	5 215 498,70	14 289,04	165,38	99,91

Tableau 3 : Prélèvements d'eau superficielle à Donzère-Mondragon (d'après SIERM, 2005)

Concernant les eaux souterraines (Tableau 4), le total prélevé est bien moindre, mais les usages plus variés. Si on regroupe les différents usages présentés dans le Tableau 4 les taux d'utilisation sont environ les suivants : 42% pour l'AEP (distribution publique), 28% pour l'AEA (irrigation), 22% pour l'AEI (industrie et nucléaire) et 8% pour d'autres usages (climatisation, vie communautaire).

	milliers m ³ /an	milliers m ³ /jour	m ³ /s	%
Total eaux souterraines	10 760,80	29,48	0,341	
Distribution publique	4 526,10	12,40	0,144	42,06
Climatisation (circuit ouvert - restitution souterraine)	329,40	0,90	0,010	3,06
Industriel (restitution directe ou autres usages)	1 866,00	5,11	0,059	17,34
Irrigation par aspersion	1 153,95	3,16	0,037	10,72
Irrigation par goutte à goutte	1 727,79	4,73	0,055	16,06
Irrigation par ruissellement	124,76	0,34	0,004	1,16
Mode de vie communautaire	507,20	1,39	0,016	4,71
Refroidissement des centrales thermiques (fil de l'eau)	525,60	1,44	0,017	4,88

Tableau 4 : Prélèvements d'eau souterraine à Donzère-Mondragon (d'après SIERM, 2005)

2.4. Hydrologie du secteur de Donzère-Mondragon

2.4.1. Un climat méditerranéen soumis aux épisodes cévenoles

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

Les précipitations annuelles moyennes sont relativement abondantes (924 mm pour Montélimar, 750 mm pour Pierrelatte et 722 mm pour Orange) mais leurs distributions saisonnières sont très contrastées (Figure 1) avec des minimums en juillet (47 mm pour Montélimar et 36 mm pour Orange) et des maximums en octobre (138 mm pour Montélimar et 107 mm pour Orange). Les pluies automnales représentent environ 35 % des précipitations annuelles et peuvent être très violentes avec des épisodes orageux de type cévenol, c'est à dire des précipitations orageuses particulièrement intenses. Les précipitations méditerranéennes se caractérisent aussi par leur faible fréquences (80 jours de pluies (>1mm) par an en moyenne à Montélimar et 69 jours pour Orange). Les données proviennent du site internet de Météo France.

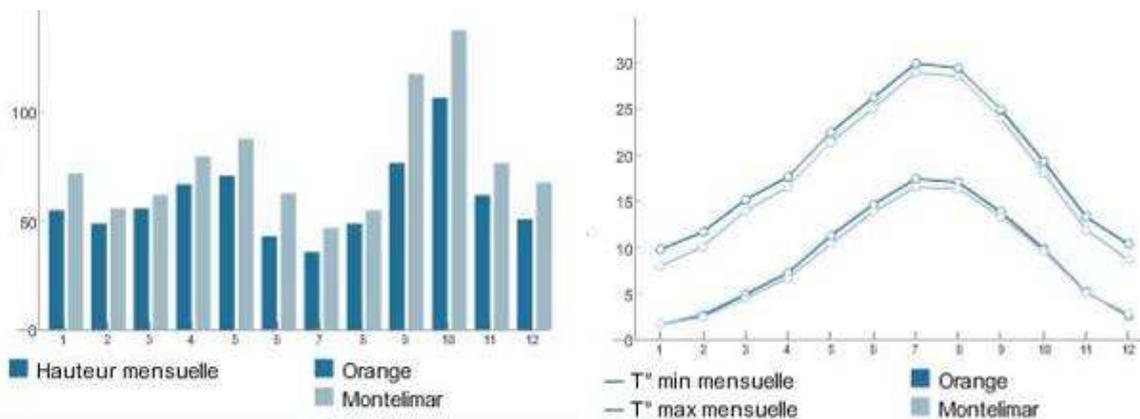


Figure 1 : Schémas des hauteurs d'eau et des températures minimales et maximales mensuelles moyennes (1971 – 2000), pour Orange et Montélimar (Météo France)

Il est à noter que Montélimar et Orange se trouvent dans la vallée du Rhône, les zones de relief ont donc un climat légèrement différent avec des précipitations accentuées. En effet, avec l'altitude les précipitations augmentent ainsi que l'amplitude thermique

Le secteur a connu des périodes de forte sécheresse de 1942 à 1950 et notamment lors de l'hiver 1949/1950 et du printemps 1950 (Maire, 1955). Le secteur est sous l'influence d'un régime mixte pluvio-nival avec de forts débits du Rhône en mai, juin, juillet, saison froide et des débits faibles en aout, septembre et octobre.

2.4.2. Le Rhône

2.4.2.1. Débits du Rhône, pente et morphologie du lit

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

	Débit à Donzère m ³ /s	Station de Vivier m ³ /s	Vieux-Rhône m ³ /s	Dérivation m ³ /s
Débit minimum observé	370	-	-	-
Etiage de 10 jours	590	-	-	-
Débit réservé	-	-	60	-
Débit dérivé usuel	-	-	-	1980
Débit semi-permanent (+6mois/an)	1400	-	-	-
Débit moyen annuel	1625	-	1500	-
Plus hautes-eaux navigables	3950	-	-	-
Crue quinquennale (Q5)	-	5500	-	-
Crue décennale (Q10)	-	6100	6000	-
Crue cinquantennale (Q50)	-	7550	-	-
Crue centennale (Q100)	10 000	9530	7900	-
Crue millénaire (Q1000)	12 500	10 100	-	-

Tableau 5. Débit du Rhône sur le secteur de Donzère-Mondragon (CNRa, 1999 ; CNRb, 1999 ; Sogreah, 1999)

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

A titre de repère le débit d'armement de l'usine Blondel a été fixé au départ à 1 530m³/s, puis à 1 980m³/s en 1986. Ce débit d'armement correspond au débit de la centrale donnant la production maximum (toutes turbines grandes ouvertes, déchargeurs fermés, à chute maximale et juste avant l'ouverture du barrage). L'armement nécessite aujourd'hui un débit du Rhône de 2 020m³/s. Ce débit est atteint trois mois en année moyenne. Le débit de plein fonctionnement de l'usine et de 1590m³/s (cinq mois par an en année normale). L'usine Blondel est donc prévue pour la production d'une énergie de pointe et une meilleure utilisation de la puissance du fleuve, au détriment de la rentabilité maximale (Poinsart, 1992).

Sur la chute de Donzère-Mondragon, la pente du lit du Rhône est d'environ 0,7%. Du barrage de retenue au PK 185 la pente est plus forte et de l'ordre de 0,85%. Sur cette zone on observe des affleurements rocheux (PK 173,7 ; 175 ; 175,4 et 176,5). Le lit est unique et comporte cinq bancs peu mobiles composés de limons dépassant de 1m au-dessus du niveau de l'eau à l'étiage. Certains sont couverts de végétation basse, d'autres sont nus. Du PK 185 à Pont-Saint-Esprit le lit est unique avec de rares bancs à l'amont du Pont-Saint-Esprit (2 à 3m au-dessus du fond du lit). A l'aval de Pont-Saint-Esprit le lit est noyé dans les remous de la retenue de Caderousse (Sogreah, 1999).

2.4.2.2. Lignes d'eau et profil en long du fond du lit du Rhône

Le tableau suivant (Tableau 6) synthétise l'évolution de la ligne d'eau du Rhône avant et après aménagement en fonction des débits dans le Vieux-Rhône (Rhône court-circuité, aval du barrage de retenue) et dans la retenue (amont du barrage de retenue). D'après Henry (1955), la ligne d'eau moyenne du Rhône (débit moyen semi-permanent) a été abaissée de 3m par rapport au niveau naturel suite aux aménagements et de 2m à l'étiage (Poinsart, 1992). L'abaissement de la ligne d'eau a entraîné une végétalisation des lônes et des casiers Girardon dans le lit mineur du fait de la diminution des fréquences de crue les submergeant. Il est donc nécessaire de réaliser un entretien de la végétation dans les bancs (labourages, herbicides) et les lônes (recalibrage, creusement, suppression de la végétation par désherbant puis fauches et coupes) pour permettre le passage des crues. En lit majeur, l'aménagement a entraîné une augmentation de la surface en culture du fait de la moindre fréquence des crues et de l'assèchement général de la plaine (drainage de la nappe par le Rhône et le canal de fuite).

Débit (m ³ /s)		Pentes en % (d'après lignes d'eau mesurées)			
Vieux-Rhône	Retenue	Retenue	Barrage à PK 184	PK 184 à Pont-Saint-Esprit	Pont-Saint-Esprit à la restitution
Etiage avant aménagement	Etiage avant aménagement	0,7	0,85	0,6	0,75
Réservé	Etiage après aménagement	0,0	0,85	0,7	0,0
1500	3600	0,0	0,75	0,7	0,25 à 0,35
2600	4500	0 à 0,2	0,75	0,7	0,4
3400	5800	0,2 à 0,4	0,75	0,7	0,4 à 0,5
5500	7000	0,4	0,75	0,65	0,55

Tableau 6 : Evolution de la pente de la ligne d'eau du Rhône en fonction des débits (Sogreah, 1999)

Poinsart (1992) a découpé le Rhône en 3 tronçons fonctionnels sur le secteur de Donzère-Mondragon.

Tronçon 1 du PK 179 au PK 185,3 :

- pente de la ligne d'eau 0,87% ;
- stabilité du lit due aux affleurements calcaires et accumulations d'alluvions après le barrage.

Tronçon 2 du PK 185,3 au PK 198,6 :

- diminution des pentes de la ligne d'eau de 0,76% à 0,67% de 1953 à 1987 ;
- incision de 2m du PK 185,4 à l'Ardèche (PK 191,3) ;
- enfoncement net du lit des PK 192,2 à 197 ;
- stabilité du lit des PK 197 à 198,4.

Sur ce tronçon, la tendance à l'engravement dans les années 1970 est compensée par les extractions.

Tronçon 3 du PK 198,6 à 200,5 (confondu avec la queue de la retenue de Caderousse) :

- pente de la ligne d'eau inférieure à 1% (0,75%) avant 1953 (réduite aujourd'hui par l'influence du barrage de Caderousse à l'aval) ;
- fosses d'extraction occupant le lit du Rhône. A l'étiage le fleuve est presque stagnant (les lignes d'eau varient selon le fonctionnement du barrage de Caderousse) ;
- forts courants à l'amont de Pont-Saint-Esprit.

Selon Sogreah (1999), le niveau du fond du lit du Rhône montre une tendance à l'abaissement à l'amont du pont de Donzère et à l'aval jusqu'à la dérivation (2m sur 1km de 1957 à 1986 suite à l'extraction de granulats, aujourd'hui on observe un comblement partiel). Au contraire le lit montre une tendance à l'exhaussement en aval de la dérivation entre 1957 et 1988 (moindre de 1988 à 1997 à cause des extractions). Du barrage de retenue jusqu'à Pont-Saint-Esprit le lit est stable en altitude sauf en aval du PK 184 où l'on constate un abaissement par érosion progressive (60 à 90cm) de 1955 à 1990, puis un exhaussement de 1987 à 1990 (10cm à 1m). De Pont-Saint-Esprit à la restitution, on observe un abaissement de 1 à 1,2m de 1953 à 1990, puis de 50cm de 1981 à 1991.

Le lit du fleuve Rhône a en effet été modifié par de nombreuses extractions de granulats. Sogreah (1999) précise que :

- dans la retenue 1,8 à 2,3 millions de m³ ont été extraits de 1977 à 1999 ;
- de la confluence avec l'Ardèche à la restitution environ 3,7 millions de m³ ont été extraits entre 1964 et 1992 (130 000m³/an), puis 0,11 millions de m³ depuis 1995 (28 000m³/an) ;
- dans le lit mineur de l'Ardèche 160 000m³/an ont été extraits de 1977 à 1985 puis 60 000m³/an de 1985 à 1992.

Grâce à l'étude Sogreah (1999) nous disposons des lignes d'eau, des niveaux du fond du lit et de profils en travers du fond du lit sur une grande partie du cours du Rhône. Ces données seront très utiles pour le calcul des échanges nappes/Rhône.

2.4.3. L'Ardèche

La rivière Ardèche est le principal affluent du Rhône sur le secteur de Donzère-Mondragon. La confluence est située en rive droite. Le tableau suivant (Tableau 7) donne les débits de l'Ardèche à la confluence (Sogreah, 1999) et à la station de Saint-Martin d'Ardèche (Banque Hydro). La surface du bassin versant est respectivement de 2430 et 2240km².

	Confluence (m ³ /s)	Station de St-Martin (m ³ /s)
Débit moyen	50	-
Module (moyenne)	-	64,70
Module (Q5 sèche)	-	45,00
Module (Q5 humide)	-	83,00
Etiage Q2	-	7,10
Etiage Q5	-	4,50
Cruces Q2	-	1700
Cruces Q5	-	2500
Cruces Q10	3850	3000
Cruces Q50	-	4200
Cruces Q100	6900	-
Débit maximal connu	-	4500

Tableau 7 : Débit de l'Ardèche (Sogreah, 1999 ; Banque Hydro)

2.4.4. Les autres cours d'eau

Suite à l'aménagement de Donzère-Mondragon, s'il a été nécessaire de rétablir les communications routières et ferroviaires et de maintenir la nappe d'eau souterraine, il a aussi été impératif de rétablir l'écoulement des eaux de surface (Maire, 1955). Les cours d'eau coupés par le canal de dérivation en rive gauche sont les suivants : lône des Iles, la Berre, le Beal, les Echavareilles, la Roubine et le canal de Pierrelatte. Ce canal était à l'origine destiné à l'irrigation. Il se perd aujourd'hui dans la plaine de Pierrelatte à 4km au sud de la cluse de Donzère. A 2km au nord de Pierrelatte la branche maitresse de l'irrigation rejoint le canal de dérivation au PK 10, reste parallèle à celui-ci jusqu'au PK 18, puis rejoint Bollène, Mondragon, Mornas et Piolenc (Jacob, 1955). Aujourd'hui, 2 prises d'eau pour l'irrigation ont été réalisées dans le canal de dérivation au PK 9,7 en rive gauche et 10,2 en rive droite.

Les cours d'eau cités ci-avant ont un régime torrentiel. Ils sont mal alimentés en saison sèche, mais peuvent se transformer en torrents après un orage local ce qui occasionne des dépôts de limon dans la plaine basse quand la pente est réduite. Seuls la Berre et une partie du Lez se rejettent directement dans le canal d'amenée et de fuite. Les autres cours d'eau sont reçus entre les PK 9 et 13 dans un contre-canal largement dimensionné en rive gauche pour aboutir à un siphon (PK 12,750). A leur sortie en rive droite les eaux rejoignent la Gaffière, puis le cours inférieur du Lauzon pour arriver au Rhône. Le débit du bassin versant pris en considération est de l'ordre de 1,5m³/s/km (Maire, 1955). Le tableau suivant (Tableau 8) présente les débits des principaux affluents en rive gauche du canal de dérivation.

	La Berre	Le Béal	Les Echavareilles	La Roubine	Le Lauzon	Le Lez	Mayre Girarde
Débit normal (m ³ /s)	3 à 6	-	-	-	0,3	10	0,1
Débit de crue (m ³ /s)	90	5	5	5	30	650	-

Tableau 8 : Débits des affluents du Rhône en rive gauche (Maire, 1995 ; Sogreah, 1999)

La Berre s'écoule dans le canal d'amenée au PK 175,5 par l'intermédiaire d'un déversoir prévu pour des débits de 6m³/s, au-delà, l'écoulement se fait dans 2 bassins de décantation limités par des

seuils. Lors de la crue de février 1951 le débit a atteint $14\text{m}^3/\text{s}$ (cote 56) et $50\text{m}^3/\text{s}$ (cote 56,80) pour celle de novembre 1951.

Les eaux du **Béal, des Echavareilles** et de **la Roubine** sont reçus par un collecteur dimensionné pour des flux de $30\text{m}^3/\text{s}$ au niveau du siphon du PK 12,750.

Le Lez est le principal cours d'eau du bassin sur cette rive. Ces eaux sont reçues dans le canal de fuite par 2 déversoirs lors des crues. La crue du 20 novembre 1951 atteint $350\text{m}^3/\text{s}$. Le lit mineur a été redimensionné pour recevoir un flot de $50\text{m}^3/\text{s}$. Un canal de décharge (revêtement en persiennes) à Mondragon dérive un débit de $400\text{m}^3/\text{s}$ pour une crue de $650\text{m}^3/\text{s}$. Ce canal fonctionne à partir de $10\text{m}^3/\text{s}$. Il existe un autre déversoir en amont, au niveau de la RN94, pour évacuer les eaux provenant d'une éventuelle rupture de digue dans le secteur de Bollène.

Le Lauzon s'écoule dans le canal d'amenée (amont écluse) jusqu'à un débit $1\text{m}^3/\text{s}$. Les eaux de crue sont quant à elles déversées dans le canal de fuite par un canal de décharge et 3 déversoirs (cote 59 à 34).

La Gaffière récupère les eaux du Béal, des Echavareilles et de la Roubine via un siphon qui traverse le canal de dérivation (PK 12,750). A ce niveau, un canal a été creusé vers le cours inférieur du Lauzon pour évacuer ces eaux vers le Rhône, ainsi que celles de la plaine marécageuse de la Gaffière mal drainée autrefois. Ce canal constitue une saignée dans les limons atteignant le gravier et draine la plaine. Il existe un répartiteur de débit entre la Gaffière et le contre-canal en rive droite.

Les eaux de la **Gaffière-Lauzon** viennent du bassin tampon recueillant les eaux du site nucléaire de Pierrelatte (CEA) et du canal de dérivation rive droite. Il existe 3 stations de jaugeage (nord, centre et sud) qui doivent tenir compte de l'influence de petits barrages pour l'irrigation. En été, le niveau monte de 2m pour le même débit :

- station nord : débit moyen : $20\pm 5\text{l/s}$; $380\pm 38\text{l/s}$ le 21 juin 1968 après de fortes précipitations ; niveau moyen : 47,70m ;
- station centre : débit moyen : $120\pm 12\text{l/s}$;
- station sud : débit moyen : $140\pm 14\text{l/s}$ (hors rejet) ; bassin tampon rempli, vannes ouvertes au maximum ($1,6\text{m}^3/\text{s}$) ; rejet courant ($600\pm 60\text{l/s}$) ; vannes fermées ($50\pm 10\text{l/s}$) ; vannes ouvertes ($500\pm 50\text{l/s}$) ; vannes relevées ($1400\pm 140\text{l/s}$).

La **Mayre Girarde** recueille aussi une partie des eaux du bassin tampon. Son débit moyen est de l'ordre de $100\pm 10\text{l/s}$.

2.5. Géologie et hydrogéologie du secteur de Donzère-Mondragon

2.5.1. Description générale

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

La **plaine alluviale** est une cuvette d'origine tectonique creusée dans les calcaires et les grès crétacés qui a été remblayée au Pliocène par les marnes bleues imperméables d'origine marine (Plaisancien), puis par des alluvions sablo-graveleuses. La pente de la plaine est de 1‰ et son altitude varie de 45 à 50m (50 à 55m au nord ; 35 à 45m au sud ; au niveau de la confluence avec l'Ardèche l'altitude est de 37m). L'ancien tracé du Rhône à l'Anté-Pliocène passe à 5km à l'est du

défilé de Donzère au droit du tracé actuel de l'autoroute A7 (Poinsart, 1992). La Carte 4 (Jacob, 1955) montre que les formations géologiques superficielles de cette plaine sont des alluvions actuelles (notées a²). Celles-ci sont recouvertes de limons.

Les **terrasses latérales** (alluvions anciennes, notées a¹), ou terrasses quaternaires (Würm ancien, Riss, Mindel, cônes de déjections) sont constituées d'éléments plus grossiers et mieux lavés que les alluvions actuelles. On les trouve en rive gauche de Donzère jusqu'à Bollène et en rive droite de Saint-Marcel d'Ardèche jusqu'à Saint-Alexandre et au niveau de Saint-Montant. Le substratum, quant à lui, est constitué selon les secteurs de grès ou de calcaires ou de marnes argileuses (Pliocène).

Les alluvions récentes sont recouvertes de limons et reposent sur des **marnes plaisanciennes** sauf dans la zone de Lapalud où le substratum sous-alluvial comprend des **formations aquifères crétacées**. Guégan (1972) distingue quatre ensembles hydrogéologiques :

- en rive droite du Rhône au nord de l'Ardèche, le plateau calcaire ardéchois, et au sud l'anticlinal de Pont-Saint-Esprit. La cuvette de Saint-Just relie ces 2 entités ;

- en rive gauche du Rhône du nord vers le sud les anticlinaux de Viviers-La Garde Adhémar et du massif d'Uchaux séparés par les synclinaux de Donzère et Bollène (Tricastin).

En se fondant sur l'étude de 190 sondages mécaniques et prospections géophysiques, effectués par la CNR, Poinsart (1992) nous livre les informations suivantes :

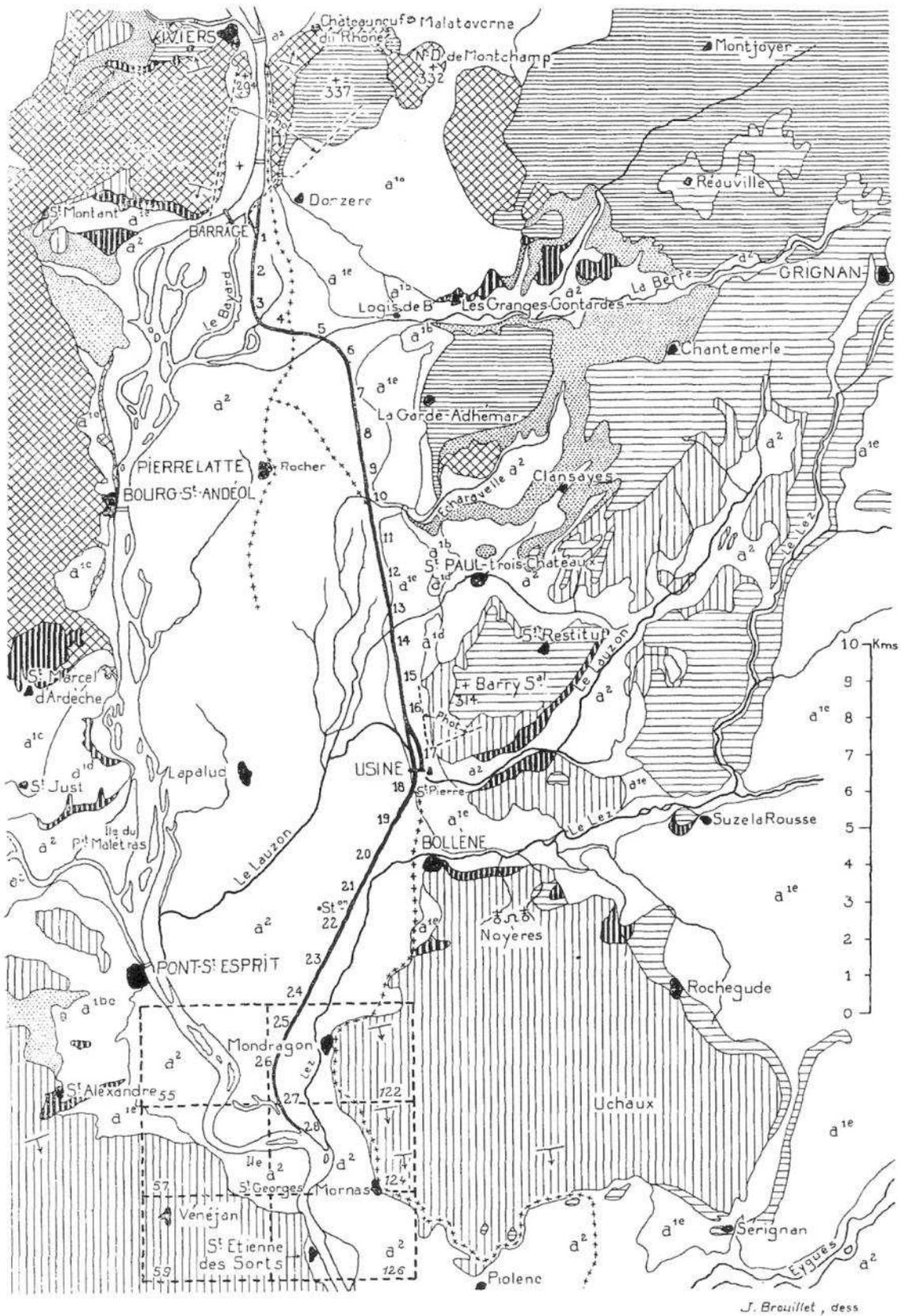
- les calcaires urgoniens sont proches de la surface au N/NE (affleurements à Pierrelatte et dans le chenal du fleuve Rhône au débouché du défilé de Donzère) ;

- le substratum de grès crétacés se situe à 20 à 30m de la surface au sud à partir de Lapalud (il existe un piton de grès à moins de 15m de profondeur qui sert d'assise à l'usine de Bollène, PK 17,3).

- les terrasses d'alluvions anciennes sont constituées d'éléments grossiers plus ou moins roulés (présence d'alluvions récentes dans les entailles des terrasses quaternaires anciennes) ;

- l'épaisseur du remblaiement sablo-graveleux holocène (alluvions modernes : graviers, sables, galets) varie de quelques mètres à 15 mètres ;

- le niveau supérieur est constitué de limons argilo-sablonneux, noirâtres, parfois tourbeux. Ceux-ci sont presque absents au nord (secteur de la lône Bayard). Ils ont une épaisseur inférieure à 50cm près du Rhône jusqu'au sud de Bourg-Saint-Andéol mais peuvent atteindre 2 à 4m à l'est d'un axe Pierrelatte-Lapalud. Au lieu-dit de Lamiat, au sud, entre le Rhône et le canal de dérivation l'épaisseur des limons atteint 11m.



Légende. Calcaires urgoniens. Marnes gargasiennes et grès verts albiens. Crétacé supérieur. Formations éocènes et oligocènes. Mollasses miocènes. Argiles et autres dépôts pliocènes.

NB. Les alluvions quaternaires, laissées en blanc, sont affectées, dans leur ordre d'ancienneté, des notations : a², a¹, a⁰, etc..

Carte 4 : Géologie du secteur de Donzère-Mondragon (Jacob, 1955)
 Les nombres qui suivent le cours du canal de dérivation indiquent les PK

D'une manière générale, l'épaisseur du remplissage holocène (alluvions graveleuses et couverture limono-sableuse) est comprise entre 7 et 30m. Au niveau du canal d'amenée elle varie de 10 à 22m, et 19 à 40m au niveau du canal de fuite. De Donzère à la confluence avec l'Ardèche, le remplissage holocène est réduit au niveau du Fleuve Rhône. On observe des affleurements calcaires jusqu'à Bourg-Saint-Andéol (PK 170 : affleurement calcaire ; PK 170,93 : en rive droite calcaire à 8m, en rive gauche calcaire à 12m ; PK 171,696 : calcaire à 4m ; PK 172 à 173 : calcaire peu profond). A l'aval, les épaisseurs d'alluvions fluviatiles sont plus considérables. A la hauteur de Pont-Saint-Esprit, la couche de sables et graviers est d'une quinzaine de mètres.

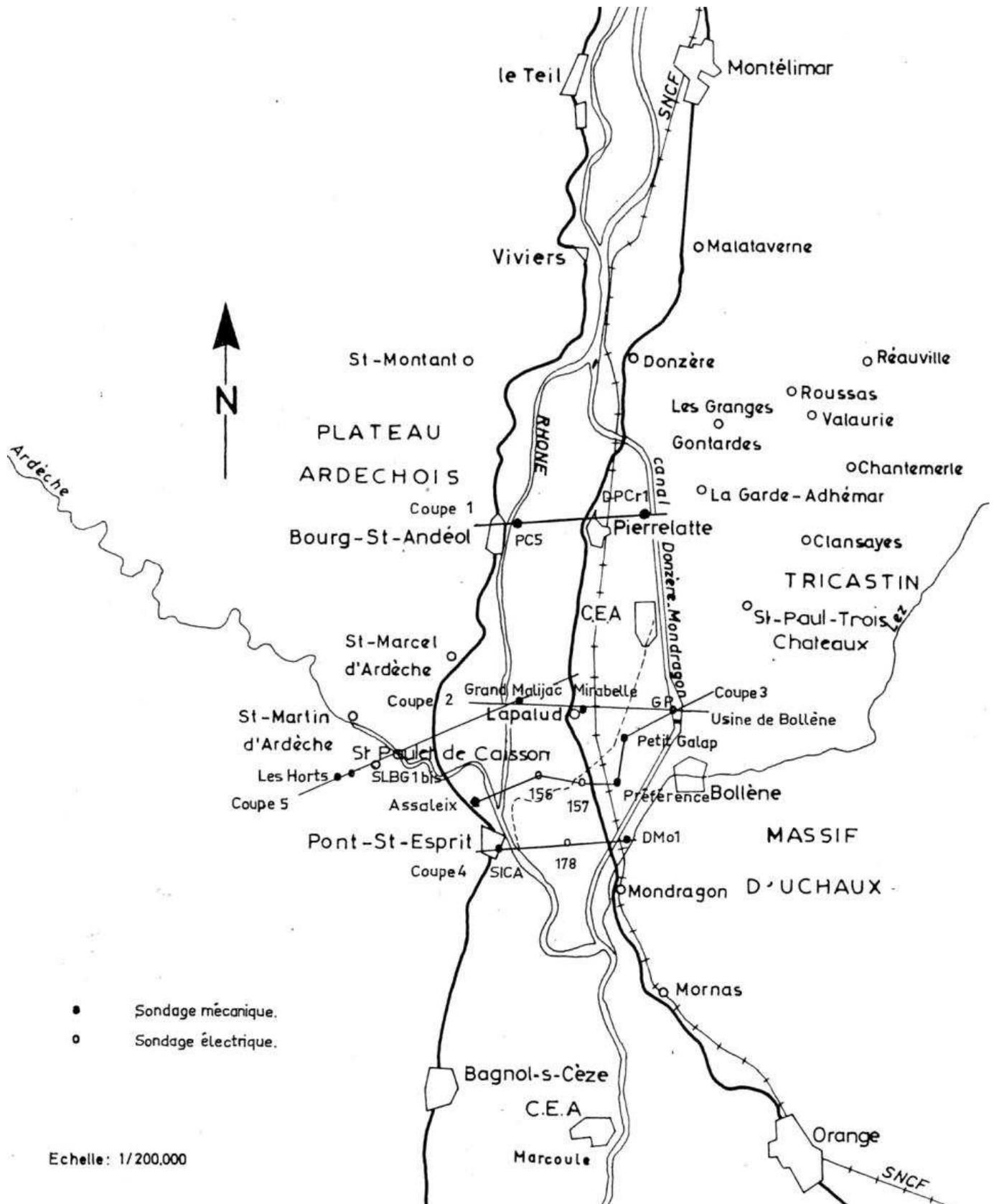
En se fondant sur les études sismiques, gravimétriques et électriques et les sondages (dont 7 profonds) réalisés par la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine (SNPA), le CEA (Centre à l'Energie Atomique), la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), Guégan (1972) brosse un portrait stratigraphique du secteur et de la structure sous-alluviale du Rhône.

Sous les terrains du Quaternaire se trouvent des terrains plus anciens : certains du Tertiaire avec des formations du Pliocène (Plaisancien), du Miocène, de l'Oligocène et de l'Eocène ; d'autres du Crétacé avec des formations du Turonien, Cénomaniens et des faciès urgoniens calcaires (Barrémien et Bédoulien).

Les différents sondages et études nous livrent les informations suivantes (La localisation des sondages est présentée Carte 5) :

- entre Donzère et Pierrelatte, on trouve 20m d'alluvion, des marnes à 45m de profondeur, et de l'Urgonien à 351,4m ;
- entre Pierrelatte et l'Ardèche le substratum crétacé est à très faible profondeur (les marnes plaisanciennes sont à 50m). Il y a un affleurement Urgonien à Pierrelatte et une faille ;
- à Donzère présence de calcaires urgoniens sous les alluvions ;
- à l'usine Blondel présence de grès à 30m cote NGF ;
- à Pierrelatte présence de marnes plaisanciennes sous les alluvions ;
- au sondage « Petit Galap » présence de limons, d'alluvions et de marnes ;
- au sondage « Grand Malijac » présence d'alluvions, d'une épaisseur de marne réduite (1,32m) et de grès ;
- au sondage « Mirabelle » présence de grès à lignite sous les alluvions ;
- au sondage « Préférence » présence d'alluvions, de grès fissurés à passées sablo-argileuses.

A Pierrelatte par exemple, la structure stratigraphique est la suivante (Guégan, 1972) : 0 à 4m de limons, 10m d'alluvions, 50m de marnes plaisanciennes, 2000m formations crétacées (calcaires et grès). On note aussi la présence sous Lapalud de réservoirs turoniens et cénomaniens, et des liaisons hydrogéologiques entre les différents aquifères.



Carte 5 : Localisation des sondages (Guégan, 1972)



Carte 6 : Localisation des entités hydrogéologiques (référentiel bdrhfv1)

2.5.2. Entités hydrogéologiques en présence

Les entités hydrogéologiques en présence sont localisées sur la Carte 6. Cette partie propose une brève description des entités au contact avec le fleuve Rhône.

- **Entité principale : 327c**

Cette entité occupe tout l'espace entre la rive gauche du Vieux-Rhône et le canal de dérivation. Il s'agit d'alluvions quaternaires récentes, notées a² sur la Carte 4 ou Fz sur les cartes géologiques du secteur (BRGM - 1/50 000^e) en tant qu'alluvions récentes à actuelles (holocène).

L'entité 327c se poursuit en rive gauche du canal de dérivation où l'on trouve à la fois des alluvions récentes (a²) au nord entre Donzère et la Berre et au sud entre Bollène et la restitution ; et des alluvions plus anciennes (notées a^{1e} sur la Carte 4 ou Fy sur les cartes géologiques du secteur (BRGM – 1/50 000^e) en tant qu'alluvions wurmiennes) entre Donzère et Bollène.

Ces formations à fortes perméabilités (10^{-2} à 10^{-3} m/s) sont aquifères et présentent de fortes potentialités d'échanges hydrauliques avec le fleuve Rhône.

L'entité 327c est en contact avec des formations aquifères alluviales de seconde zone (notées a² sur la Carte 4 ou Fz sur la carte géologique BRGM 1/50 000^e du secteur). Il s'agit des entités 155a (notamment alluvions du Lez), 155d et 155c (Carte 6) au sud de Bollène. Des échanges hydrauliques entre l'entité 327c et ces entités au contact existent potentiellement. Plus au nord, des échanges existent potentiellement avec les alluvions de la Berre.

De plus, localement au nord et au sud de Bollène, des échanges hydrauliques existent potentiellement entre des formations calcaires du Crétacé et l'entité 327c. Ces formations calcaires sont incluses dans les entités hydrogéologiques 549a et 549c (Carte 6) localement perméables.

- **Les autres entités : 327b, 327d et 327e**

Ces entités sont situées en rive droite du Vieux-Rhône (Carte 6). Il s'agit de formations quaternaires alluviales récentes (notées a² sur la Carte 4 ou Fz sur la carte géologique du secteur BRGM 1/50 000^e). Du fait de la perméabilité des ces entités aquifères des échanges hydrauliques potentiels existent avec le Rhône.

Cette fois, les échanges hydrauliques avec les formations de seconde zone sont plus incertains (148a, 549d, 549e). Toutefois, une alimentation profonde de l'entité 327b (Alluvions de l'Ardèche) par les calcaires urgoniens de l'entité 148a existe potentiellement.

2.5.3. Hydrogéologie de Donzère-Mondragon : La nappe alluviale de la Plaine du Tricastin

Sur le secteur, la nappe d'alluvions sablo-graveleuses est de bonne perméabilité (code 327c, Carte 6). Elle est parfois surmontée d'une couche de limons argileux formant un toit presque imperméable. Les épontes de la nappe alluviales sont des limons et des marnes plaisanciennes.

Selon Maire (1955), la nappe alluviale est globalement captive entre limons et marnes. Ainsi toute augmentation de charge de la nappe à l'amont se propage instantanément vers l'aval. Cette nappe alluviale avait les caractéristiques suivantes avant aménagement :

- débit : 50l/s/km ;
- vitesse : 150m/an ;
- perméabilité moyenne de la couche d'alluvions : 2mm/s ($2 \cdot 10^{-3}$ m/s). La perméabilité horizontale est plus forte que la perméabilité verticale. Les valeurs locales de perméabilité peuvent être 15 fois plus fortes à 200 fois plus faibles par rapport à la moyenne ;
- gradient hydraulique : 2 à 3‰.

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

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

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

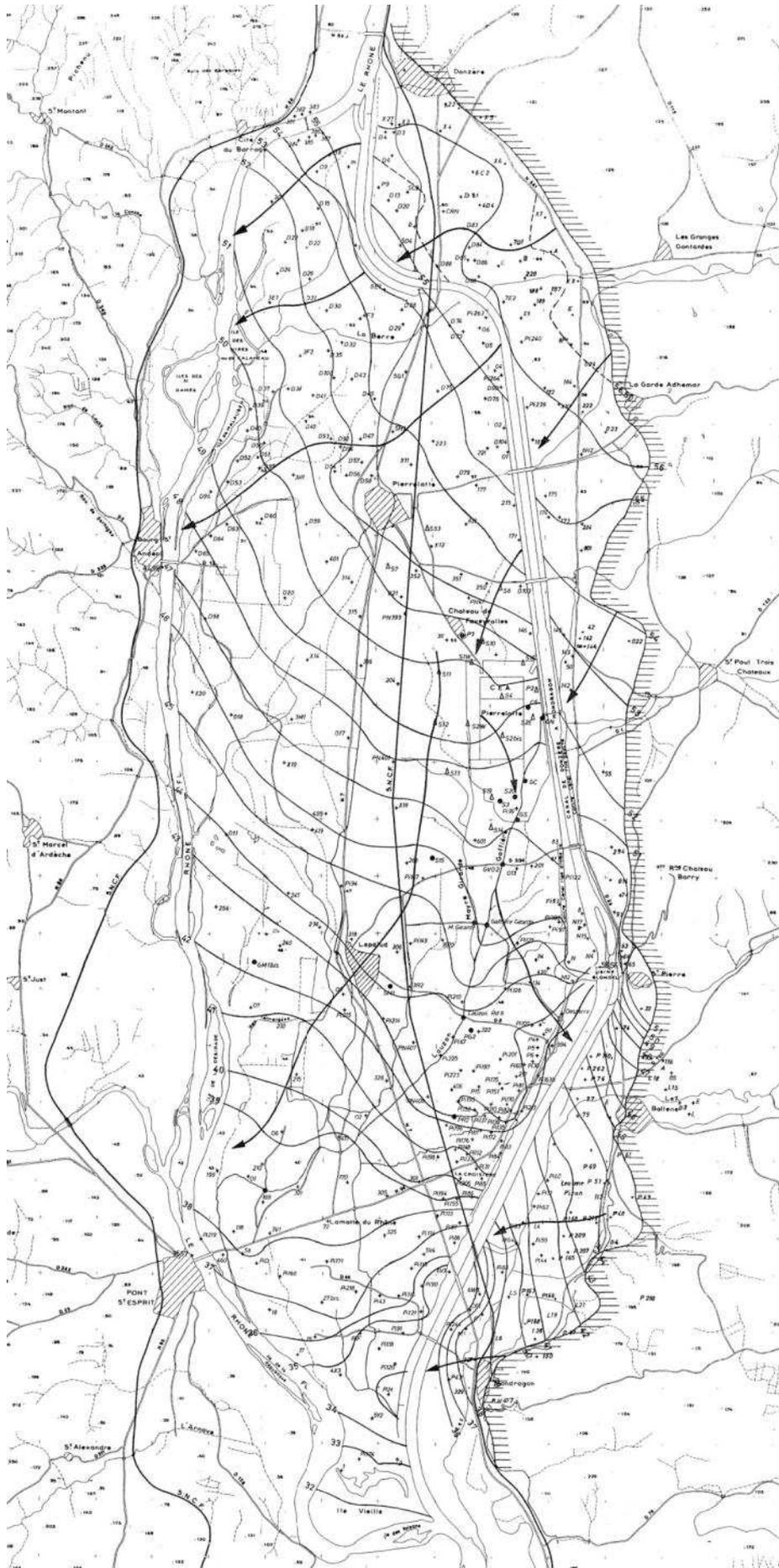
- le contre-canal en rive droite du canal de dérivation ;
- le cours du Rhône.

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

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

Le battement de la nappe est d'environ 2m au niveau du site du CEA pour atteindre 3 à 4m plus à l'aval au niveau du drainage du canal de fuite. Selon Guégan (1972) le niveau piézométrique moyen est identique de 1960 à 1972. Entre une période très sèche (Juillet 1968, hauteur de précipitations : 3mm - Carte 7) et une période très humide (septembre 1969, hauteur de précipitation : 149mm - Carte 8) le niveau de la nappe varie de 1 à 0,5m. Les variations de niveau sont peu marquées car les limites stables jouent un rôle tampon de 1956 à 1969. Sur cette période le sens écoulement et les gradients restent stables. En dehors de ces 2 périodes, Guégan (1972) a dressé des cartes piézométriques pour juillet 1956, mars 1956, avril 1958, septembre 1959, février 1959 et juillet 1969.

La Carte 7 et la Carte 8 sont disponibles au format A3 dans le recueil cartographique joint à ce rapport pour une meilleure visibilité.



Carte 8 : Carte piézométrique en période humide de septembre 1969 (Zoom, Guégan, 1972)

Les deux cartes piézométriques présentées ci-après (Carte 7 et Carte 8) sont issues des travaux de Guégan (1972). Il s'agit d'un zoom sur des planches de grand format numérisées. A l'origine, l'échelle était au 1/50 000^e. Le nord est toujours vers le haut. Bien que leur qualité visuelle soit moyenne ont distingue nettement les courbes piézométriques (traits noirs continus : _____), les sens d'écoulement de la nappe (flèches noires : →), la limite de la nappe (hachures : ▮▮▮▮). Avec de bons yeux, il est aussi possible de distinguer les piézomètres CEA (triangles : Δ), les piézomètres CNR (croix : +) et les points de prélèvement d'eau CEA dans la nappe et les eaux superficielles (disques noirs : ●).

La nappe alluviale est soutenue par le canal d'amenée, les eaux de surface et les infiltrations verticales des pluies à travers les limons de surface. Le Tableau 9 montre l'influence de la pluviométrie sur la nappe alluviale suite au suivi du niveau d'eau dans des puits après des épisodes pluvieux. L'information importante qui ressort est que les limons alimentent la nappe alluviale lorsqu'ils sont saturés en eau. S'ils sont desséchés, un délai est nécessaire.

Selon Guégan (1972), l'influence du ruissellement des pluies est négligeable compte-tenu de la faible pente de la plaine (1‰). La nappe alluviale du Rhône est aussi alimentée par les terrasses (dont le débit est supérieur à celui de la plaine à certains moments de l'année), par des résurgences au pied des terrasses et dans une moindre mesure par les limons (Jacob, 1955).

Date	Pluviométrie (mm)	Durée (h)	Intensité maximum (mm/h)	Hausse du niveau de la nappe (m)	Remarques
03/12/1963	39	9,5	10	0,6	Le niveau piézométrique monte rapidement car les terrains sont saturés par les pluies des jours précédents (5,8mm en 4 jours)
05/09/1965	28,1	10	30	?	
01/08/1963	10	1	-	0	Le niveau de la nappe ne varie pas car les limons sont desséchés
03/08/1963	31	2	-	quelques cm	-
06/08/1963	9 (nuit)	6,5	-	peu affecté	Saturation du niveau des limons
	21 (journée)	5,5	36	0,6	-
03/09/1965	130	2 jours	100	0,6	-

Tableau 9 : Influence de la pluviométrie sur le niveau de la nappe alluviale (d'après Guégan, 1972)

La Carte 7 et la Carte 8 montre les sens d'écoulement de l'aquifère. Le gradient hydraulique moyen au niveau de la plaine est de 1,2‰.

En rive gauche du canal de dérivation, au niveau des Granges Gontardes, la Berre à sec divise l'écoulement de la nappe alluviale en deux. L'écoulement est orienté vers l'ouest au nord de la Berre et NE/SO au sud de la Berre. Au niveau de l'usine Blondel le gradient hydraulique est de 4‰. Sur ce secteur, la nappe est alimentée par les collines tertiaires et crétacées et les pluies. La nappe est drainée par le canal de dérivation et le contre-canal en rive gauche.

En rive droite du canal de dérivation l'écoulement est orienté E/NE-O/SO au nord de Pierrelatte et N/NE-S/SO au sud. La nappe est alimentée par le canal de dérivation à l'amont de l'usine Blondel, le contre-canal en rive droite, la Gaffière (aval) et par la partie sud du canal de fuite. La nappe est drainée par la Gaffière sous le site nucléaire de Pierrelatte (CEA) et par le canal de fuite (niveau du canal : 34,4m ; cote des alluvions : 44 à 45m). L'eau injectée pour soutenir la nappe au niveau de puits de réalimentation (4,5m³/s) retourne au canal de fuite. Le Rhône, pour finir, draine l'ensemble de l'aquifère.

Guégan (1972) a dressé une carte des zones libres et des captives de la nappe alluviale pour la zone situé au sud de Pierrelatte car au nord les données étaient insuffisantes (Carte 9). Sur ce secteur, 66% de la nappe alluviale est captif. Il précise toutefois que globalement la nappe est libre dans le centre de la plaine de Pierrelatte et captive de part et d'autre.

Guégan (1972) a interprété des essais de pompage de longue durée pour connaître la perméabilité des alluvions à l'aide de la méthode d'approximation logarithmique de Jacob. Le Tableau 10

résume les résultats obtenus et donne pour chacun des puits les valeurs de débit (Q) de nappe, de transmissivité (T), de perméabilité (K) et du coefficient d'emmagasinement (S) de l'aquifère. La dernière colonne donne d'autres valeurs pour des essais ponctuels moins précis que les pompages de longue durée. Sur le site de nucléaire de Pierrelatte (CEA), le coefficient d'emmagasinement est de 10^{-5} à 8,5% selon que la nappe est captive ou libre. La perméabilité moyenne est de 10^{-2} m/s.

Puits	Essais longue durée			Essais ponctuels
	T (m ² /s)	K (m/s)	S	K (m ² /s)
P1	$9,0.10^{-2}$	$9,0.10^{-3}$	$7,7.10^{-6}$	-
P2	10^{-2}	$3,0.10^{-3}$	$1,6.10^{-6}$	-
P3	$2,7.10^{-1}$	$2,2.10^{-2}$	$5,6.10^{-7}$	-
P4	-	-	$3,6.10^{-5}$	-
P5	-	-	$1,3.10^{-2}$	-
P6	-	-	$6,3.10^{-4}$	-
P7	-	-	$1,4.10^{-4}$	-
P8	-	-	$2,2.10^{-3}$	-
P ¹	$1,2.10^{-1}$	$1,6.10^{-2}$	-	-
P ²	$6,1.10^{-2}$	$8,1.10^{-3}$	-	-
P ³	$1,2.10^{-2}$	$6,9.10^{-3}$	-	-
S1	$7,7.10^{-2}$	$9,9.10^{-3}$	$3,1.10^{-2}$	-
S4	-	-	$6,1.10^{-2}$	-
Puits Ugine	$3,4.10^{-2}$	$4,8.10^{-3}$	-	-
Lez/N7	-	-	-	2.10^{-3}
Usine Blondel	-	-	-	3 à 8.10^{-3}
Petit Galap	-	-	-	7.10^{-3}
Mirabelle	-	-	-	5.10^{-3}
Grand Malijac	-	-	-	2.10^{-5} (douteux)
Préférence	-	-	-	8.10^{-3}

Tableau 10 : Paramètres physiques de la nappes alluviales de Donzère-Mondragon (Guégan, 1972)
La localisation des puits est données Carte 12 et Carte 13

2.5.4. Description des limons

La perméabilité des limons est de l'ordre de 10^{-5} m/s pour les horizons les plus sableux et grossiers (généralement les horizons supérieurs), ailleurs, elle est plus faible (10^{-7} à 10^{-9} m/s pour les limons les plus argileux).

Puits ou secteur	Perméabilité (m/s)
CEA	10^{-7}
S4	10^{-5}
Sondage Petit Galap (PG1) au toit des alluvions (3,2m)	10^{-7}
Préférence (PR1)	10^{-3}
Grand Malijac	10^{-4}

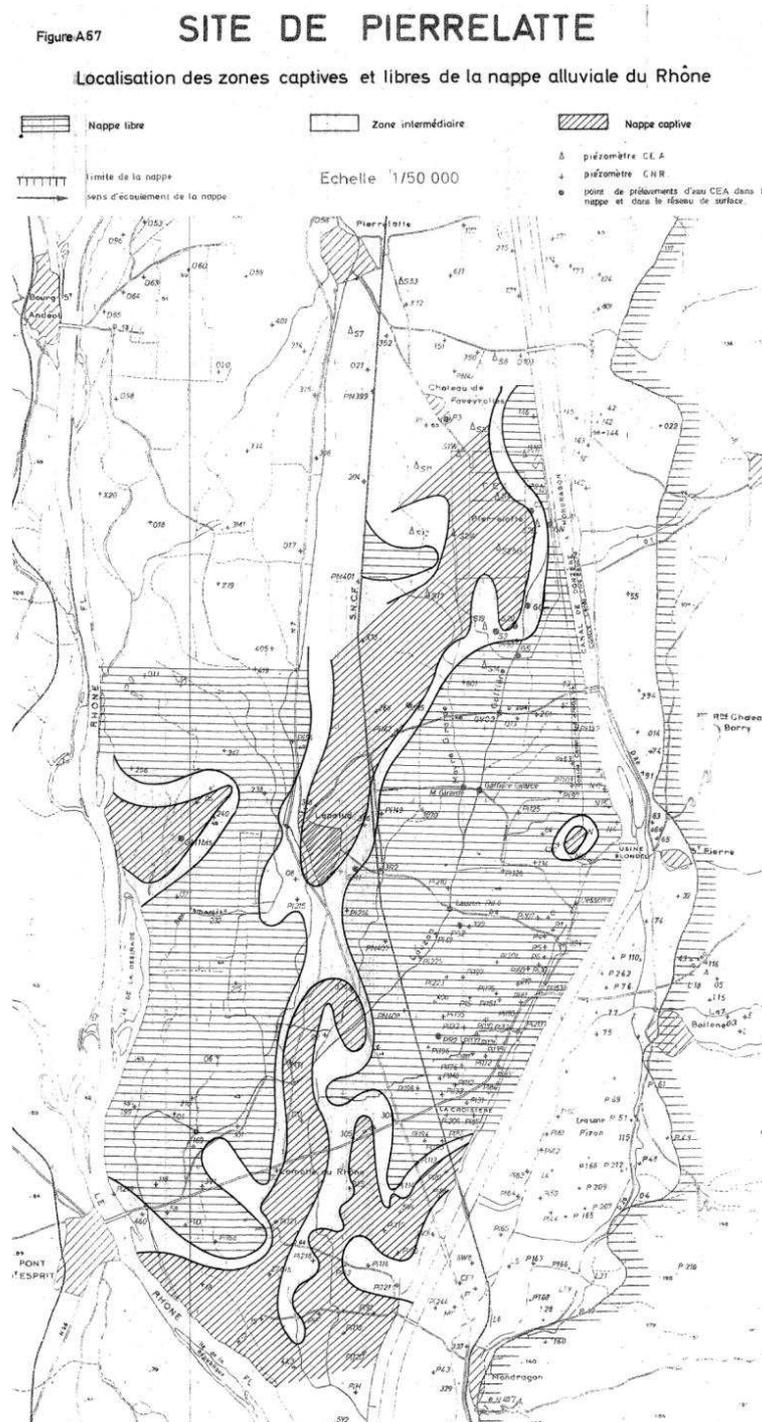
Tableau 11 : Perméabilités des limons
La localisation des puits est données Carte 12 et Carte 13

Leur épaisseur est normalement inférieure à 3m, sauf dans le sud plaine où elle peut atteindre jusqu'à 8m. Globalement, les limons sont plus épais le long du Rhône et du canal de dérivation que dans le centre de la Plaine (Miche, 1955 ; Guégan, 1972) (Carte 10).

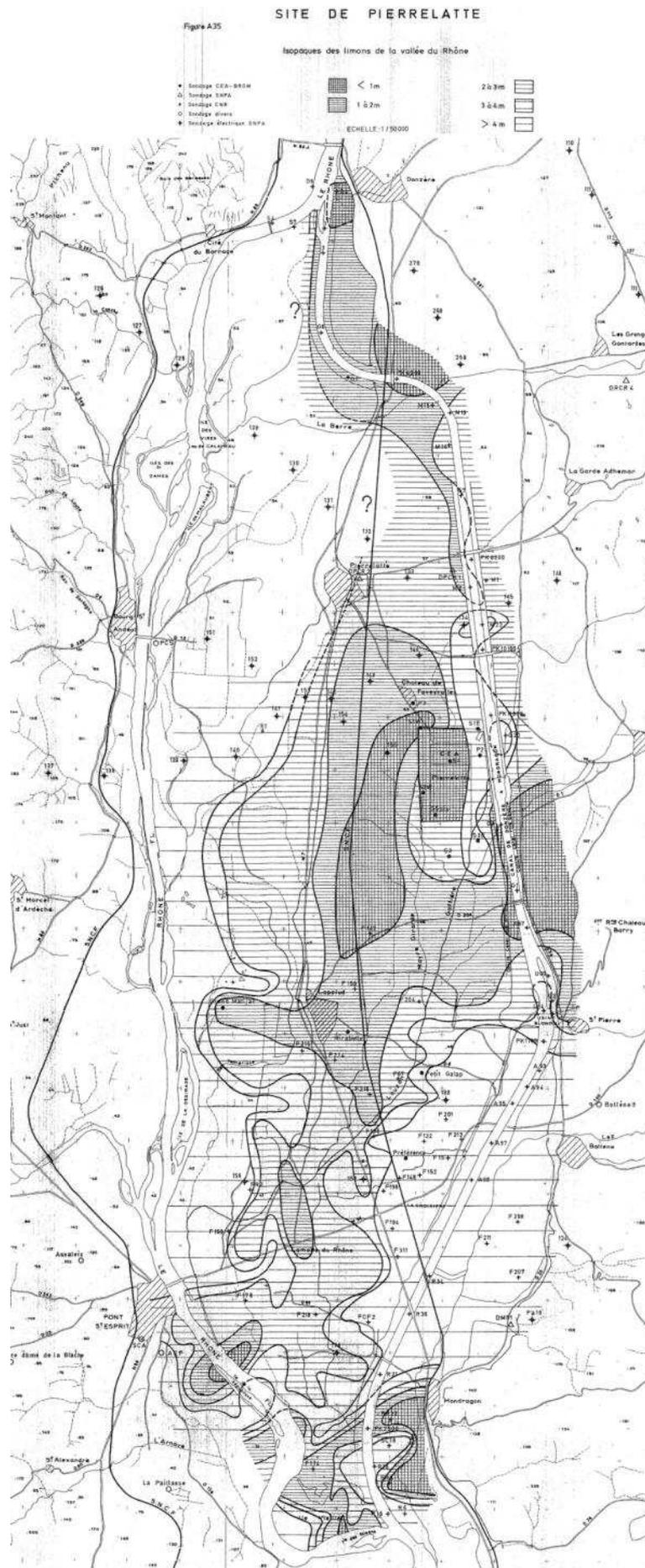
La Carte 11 montre les limites selon la discordance des perméabilités ou le changement de la nature du limon. Un limon fin et homogène rend la nappe alluviale sensible aux pluies en fin d'été quand le sol est sec et fissuré. La hausse du niveau piézométrique peut alors atteindre 1m en quelques heures. Lors de ces épisodes pluvieux, l'alimentation de la nappe captive par les limons la met en charge, puis la pression diminue quand l'eau est évacuée (Henry, 1955). Sans zone saturée superficielle dans les limons les précipitations atteignent directement le réservoir quaternaire.

Il y a une nappe superficielle dans les limons, là où le réservoir alluvial est captif, ce qui n'est pas le cas dans les zones libres. Dans ces secteurs, le niveau piézométrique de la nappe des limons est légèrement supérieur à celui de la nappe captive.

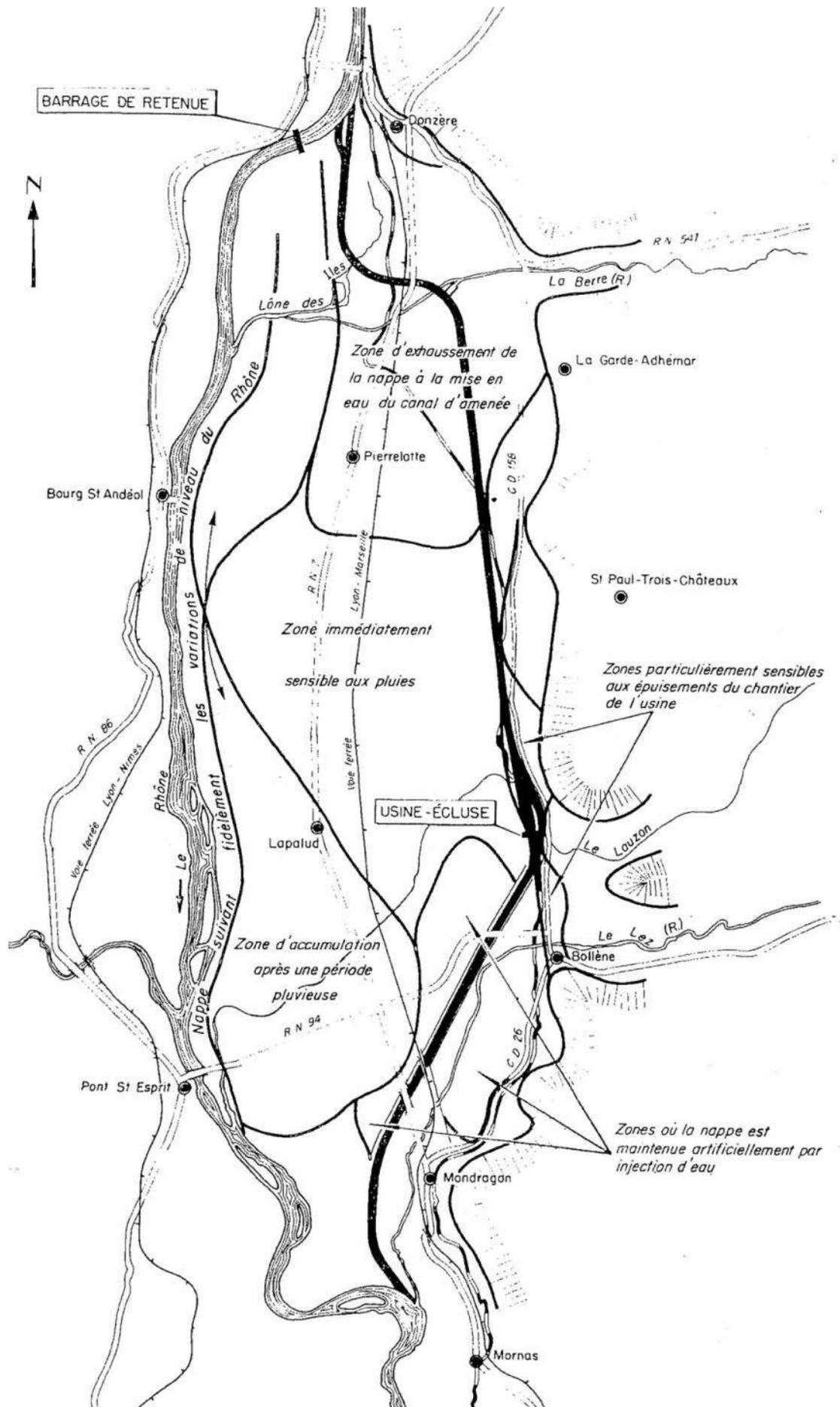
La Carte 13 montre les limites du comportement de la nappe sur le site nucléaire de Pierrelatte (Guégan, 1972).



Carte 9 : Localisation des zones captives et libres de la nappe alluviale du Rhône (Zoom, Guégan, 1972)



Carte 10 : Isopaques des limons dans le secteur de Donzère-Mondragon (Zoom, Guégan, 1972)



Carte 11 : Zonage du comportement de la nappe alluviale (Henry, 1955)

2.5.6.1. Influence du canal d'amenée

Au niveau du canal d'amenée (partie amont du canal de dérivation qui apporte l'eau du Rhône à l'usine hydroélectrique, PK 1 à 18, Carte 2), le plan d'eau se situe par endroit à 10m au-dessus du terrain naturel ce qui met la nappe en charge. Sans précaution particulière, il y a une menace de débordement des puits et d'apparition de résurgences. Le maintien du niveau de nappe est assuré par le contre-canal situé en rive droite. Henry (1955) indique qu'il est possible de calculer les infiltrations d'un canal creusé en milieu perméable en se référant au « Traité d'hydraulique des milieux poreux » de Norris Muskat.

Dans le cas de Donzère-Mondragon, la nappe est située à environ 12m sous le canal. Malgré l'absence de revêtement (outre celui pour la protection contre le batillage), la présence d'alluvions peu grossières et le colmatage rapide par les limons du Rhône réduit le débit d'infiltration. De plus, il apparaît que les fuites d'un canal varient beaucoup entre été et hiver car l'action de la température joue sur le coefficient de perméabilité

Miche (1955) a calculé des débits de fuite des digues (pour les digues en limon l'infiltration est négligeable) :

- infiltration à travers digue (vers les contre-canaux) : $Q=0,084l/s/m$;
- infiltration sous-jacente (vers la nappe) : $Q=1,045l/s/m$.

2.5.6.2. Influence du canal de fuite

Le canal de fuite (partie aval du canal de dérivation qui recueille l'eau du Rhône turbinée par l'usine hydroélectrique, PK 18 à 28, Carte 3), au contraire du canal d'amenée, constitue un drain profond et puissant pour la nappe. En effet, il est creusé dans les alluvions et parfois dans le substratum. La base du gravier est atteinte partout et pour les 8km amont le niveau moyen du canal est au-dessous du toit du gravier (à l'état naturel la nappe était au-dessus du toit du gravier, captive sous les limons de surface). Il y a cette fois une menace d'abaissement de la nappe de plusieurs mètres et donc d'assèchement des puits (AEP, abreuvage, irrigation) et de changement des caractéristiques agricoles des terrains (lessivage des limons et suppression des éléments fertilisants). Le maintien du niveau de la nappe est assuré par réinjection de l'eau collectée par les contre-canaux dans des puits (les fosses rectangulaires prévues initialement ce sont avérées inefficaces). Ainsi, le niveau de nappe est maintenu à la base des limons pour maintenir la nappe captive et à permettre l'ascension capillaire dans les limons. Autrement dit, ces puits permettent de maintenir la nappe en charge sous les limons (Maire, 1955 ; Henry, 1955).

Maire (1995) a calculé le débit de réalimentation nécessaire avec la formule de Dupuit. Il est d'environ 500l/s/km (soit 50l tous les 100m). Les paramètres utilisés pour le calcul sont les suivants :

- distance puits-canal : 300m ;
- différence de niveau nappe/canal : 8m ;
- perméabilité (K) : $2.10^{-3}m/s$ (l'erreur classique sur K varie d'un coefficient 1 à 5. Il est possible de limiter l'imprécision sur K en tenant compte du fait que les débits sont proportionnels aux gradients.) ;
- épaisseur des alluvions : 10m.

Des explications complémentaires sur le rôle des puits de réalimentation sont fournies en Annexe 1.

2.5.7. Les échanges nappe/rivière

Selon Poinart (1992), les échanges nappe/Rhône sont faibles avant et après aménagement.

En cas de crue, le Rhône alimente la nappe s'il y a submersion du lit majeur et si le séjour de l'eau dure plusieurs jours car l'infiltration à travers les limons est lente. La nappe chargée ne restitue que lentement ses eaux au Rhône. Cette lenteur est conditionnée par la porosité, la perméabilité et le

pendage des strates des dépôts alluviaux. Au sud de Lapalud, par exemple, les pentes orientent l'écoulement vers le SE et non vers le fleuve à l'ouest.

Sur la zone de site nucléaire de Pierrelatte (CEA), Guégan (1972) a évalué les échanges nappes/rivière en utilisant des méthodes hydrauliques, physico-chimiques (analyse des ions calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates, carbonates, nitrates) et isotopiques (tritium ^3_1H qui marque le cycle naturel de l'eau : précipitation, évapotranspiration, infiltration, ruissellement). Dans le secteur, il n'y a pas de corrélation entre activité tritium et hauteur de précipitation mensuelle à cause des perturbations liées aux centrales nucléaires, notamment celle de Marcoule).

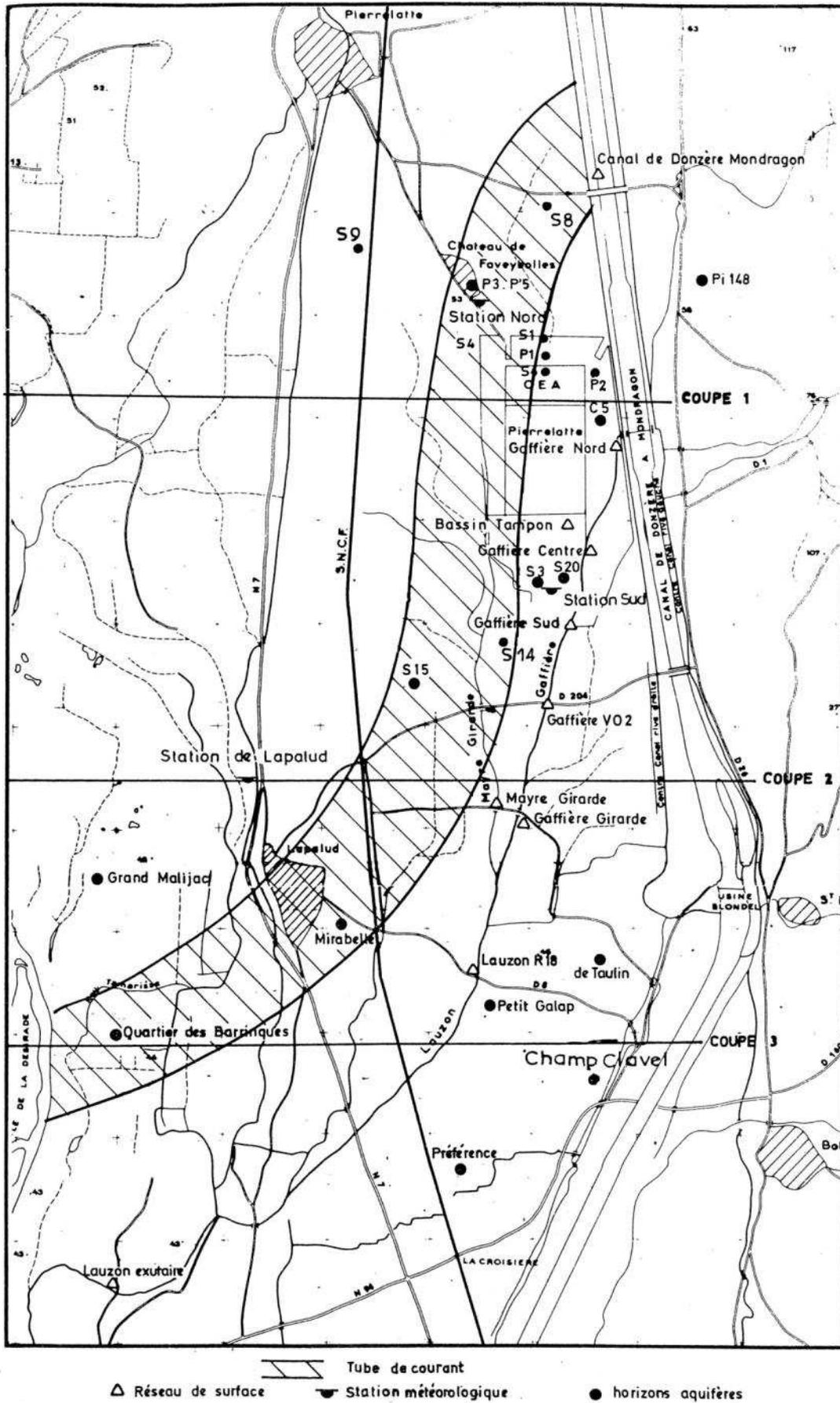
2.5.7.1. Le Rhône

Le débit d'alimentation du Rhône par la nappe a été calculé par Guégan (1972) avec la loi de Darcy pour un tube de courant traversant la plaine du canal de dérivation au niveau du CEA jusqu'au Rhône à l'aval de Pont-Saint-Esprit (Carte 13). La loi de Darcy est utilisable si l'on considère comme négligeable sur une longue période les variations de niveau de la nappe (maximum : 2m) dans les secteurs où elle est libre (33% de la surface du secteur). Le débit a été calculé à partir des données suivantes :

- $T=8.10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$;
- $L=1000\text{m}$;
- $i=1,2.10^{-3}$

Au final, **la nappe alimente le Rhône à raison de $9,6.10^{-2}\text{m}^3/\text{s}$ (96l/s ou 8294,4m³/jour) soit 3 000 000m³/an.** Pour une surface du tube de courant moyenne de 12,5km², le module annuel du débit souterrain (le volume annuel réparti sur cette surface) de la nappe alluviale sous le site nucléaire de Pierrelatte est de 240±24mm.

La vitesse moyenne de l'eau souterraine sur la zone Lapalud-Pierrelatte est de 0,6m/h. Elle a été vérifiée à l'aide d'un traçage au bromure d'ammonium.



Carte 13 : Localisation du tube de courant étudié par Guégan (1972) et des principaux repères utilisés dans son travail (puits, sondages, stations de jaugeage)

2.5.7.2. Le canal de dérivation

Les analyses physico-chimiques des eaux du canal de dérivation n'évoluent pas dans le temps. Ceci montre selon Guégan (1972) l'importance de l'alimentation de la nappe pour la limite occidentale. Globalement les eaux de ce canal sont moins minéralisées que celles de la nappe.

Les mesures de tritium montrent que le canal de dérivation, au niveau du site CEA, alimente la Gaffière nord et la nappe alluviale. Le coefficient de mélange du canal de dérivation à Pierrelatte est $\alpha=0,45\pm0,05$ et son âge moyen est compris entre 1,5 et 2 ans (corrélation avec les valeurs du Léman).

Si l'on considère le tronçon amont du canal de dérivation jusqu'au site de Pierrelatte (CEA) le coefficient de mélange est $\alpha=0,65\pm0,05$. Au niveau des puits P3 et C5, $\alpha=0,7$. Ceci signifie que le Rhône dérivé participe à 70% et les limons à 30% de l'alimentation de la nappe (recharge annuelle).

Du point de vue quantitatif l'apport du canal est $118\pm28\text{mm/an}$ et celui des limons de $50\pm18\text{mm/an}$ pour un débit annuel de nappe de $240\pm24\text{mm/an}$. Ici, la valeur de l'infiltration est très faible compte-tenu de l'influence des vents (évapotranspiration moyenne annuelle : $724\pm210\text{mm}$). La recharge annuelle de la nappe est de $168\pm38\text{mm}$.

2.5.7.3. Gaffière-Lauzon

Comme nous l'avons déjà évoqué, la Gaffière draine la nappe alluviale dans sa partie nord et l'alimente dans sa partie centrale et sud.

Les analyses isotopiques fondées sur le tritium (Guégan, 1972) montrent que de 1968 à 1970 le régime de la Gaffière-Lauzon est plus lié au bassin tampon qu'à la Gaffière nord. Les concentrations moyennes annuelles en tritium sur la Gaffière en aval du site CEA sont identiques à celles du bassin tampon et supérieures à celles de la Gaffière nord (voisines de celles du canal de dérivation).

La nappe alluviale alimente la Gaffière du centre à V02. Toutefois, les apports ne sont pas décelés par le tritium à l'échelle annuelle à cause de la superposition de 2 phénomènes : 1) les crues provoquées par les rejets augmentent l'alimentation de la nappe, 2) alors que la décrue crée le phénomène inverse.

Les mesures au tritium sont conformes aux mesures hydrauliques :

- entre la Gaffière nord et centre l'apport de la nappe alluviale est de $50\pm25\text{l/s/km}$;
- quand il y a pas de rejets (CEA) les apports de nappe alluviale représente 45% du débit de la Gaffière entre centre et V02, soit $35\pm10\text{l/s/km}$ contre $27\pm6\text{l/s/km}$ obtenus par des mesures hydrauliques ;
- à partir de V02 la teneur en tritium est constante car la Gaffière alimente la nappe.

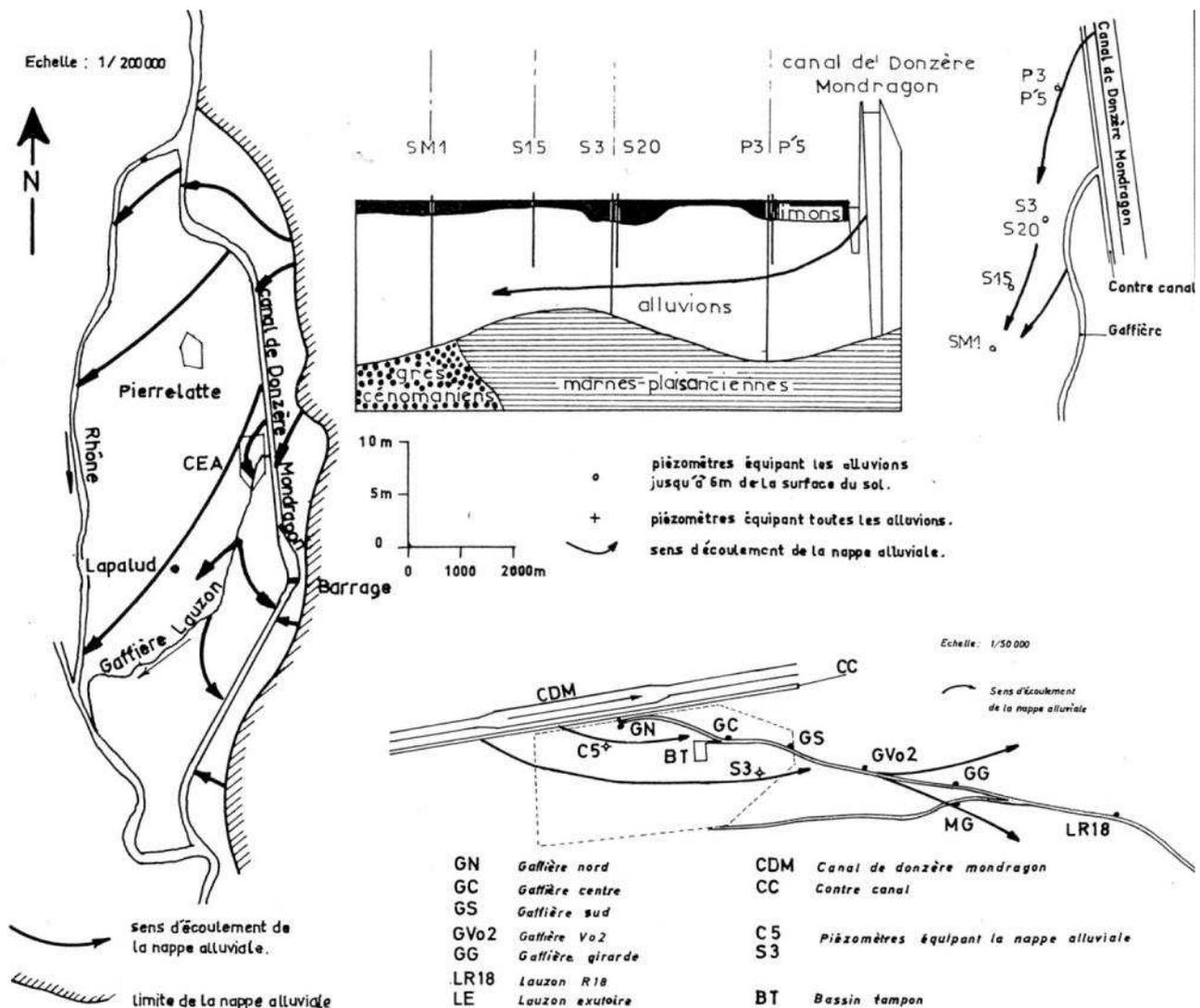
On note que lors de la crue du 26 décembre, la hausse du niveau du Lauzon a été de 2m. Les mesures tritium montrent que les eaux du Rhône n'atteignent par le Lauzon et freinent son écoulement.

Sur le secteur aval, la Gaffière-Lauzon intervient dans l'alimentation de la nappe.

Dans le secteur de la Gaffière, les activités tritium augmentent du nord vers le sud. Cela est dû à la concentration élevée des eaux du limon et à l'infiltration rapide due à la faible épaisseur de limon (moins d'1m) et au régime libre de la nappe alluviale. Il y a une homogénéité de l'apport annuel des limons et du sens d'écoulement de 1967 à 1970. L'apport sous-alluvial crétacé est négligeable.

De 1969 à 1970 la Gaffière participe de 65 à 50% au débit moyen de la nappe alluviale du Rhône au niveau de Lapalud. La zone d'alimentation de la Gaffière au niveau de « Mirabelle » s'étend sur 2km en aval de la Gaffière V02. Sur cette zone, le débit de la nappe est de 200l/s ($T = 8.10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$; $L=2000\text{m}$; $I=1,2.10^{-3}$). Si l'on considère un coefficient de mélange de 0,7, le débit effectif de la recharge est de 140l/s dont 65 à 50% proviennent de la Gaffière soit 90 à 70l/s, soit 45 en rive droite et 35l/s en rive gauche.

A l'est de la Gaffière au niveau de « Petit Galap » et de « Préférence » les eaux des alluvions proviennent essentiellement de la Gaffière. En aval (PR2), à 1,5km, il y a participation du canal de réalimentation et surtout des limons.



Carte 14 : Écoulement général de l'aquifère sur le secteur de Donzère-Mondragon et échanges nappe/canal de dérivation/Gaffière-Lauzon (Montage, Guégan, 1972)

2.5.8. Les échanges entre aquifères

Les analyses physico-chimiques des différents réservoirs aquifères montrent que (Guégan, 1972) :

- les apports des limons vers la nappe alluviale sont faibles, même s'il y a un fort apport d'éléments dissous ;
- les apports sous-alluviaux plaisanciens vers la nappe alluviale sont négligeables. Ces apports sont carbonatés sodiques ;
- les apports des grès ligniteux vers la nappe alluviale sont négligeables (« Mirabelle », Cénomaniens). Ces apports sont carbonatés sodiques ;
- les réservoirs turoniens et cénomaniens de « Grand Malijac », ainsi que le réservoir albien de Pont-Saint-Espirit ont les mêmes propriétés chimiques. Toutefois, les teneurs en sodium sont plus élevées que dans la nappe cénomaniens de Saint-Paulet-de-Caisson ;
- les propriétés chimiques des eaux de la vallée du Rhône sont bien différenciées et le chimisme de la nappe alluviale ne varie pas dans l'espace et dans le temps.

Au niveau de la nappe des limons, les mesures tritium montrent quant à elles que (Guégan, 1972) :

- au niveau de « Préférence » (épaisseur de terre végétale : 0,90m ; épaisseur d'argile jaune : 4,00m), le coefficient d'infiltration moyen des limons est compris entre 0,05 et 0,10. Dans les limons, la vitesse d'infiltration par mois est de 0,20m/mois en hiver et 0,12m/mois en été à cause de l'évapotranspiration. Lors d'épisodes pluvieux avec une évapotranspiration réduite et un sol humide (fin d'hiver) la vitesse d'infiltration est 0,30m/mois (en 10 jours). En automne, avec des sols plus secs elle est de 0,7m/mois (en 13 jours) ;

- au niveau des limons « Petit Galap » le coefficient d'infiltration est de 0,10 à 0,15. L'infiltration efficace lente est de 45±10mm.

Il y a 2 sortes d'infiltrations à travers les limons (infiltration saccadée) :

- échelle annuelle : infiltration lente en automne et hiver car le sol est humide ;

- échelle de l'averse : infiltration rapide au début de l'automne car le sol est sec et l'évapotranspiration limitée.

De plus, les apports des limons vers la nappe alluviale augmentent de l'amont vers l'aval. Il n'est pas négligeable et se répartit sur l'ensemble de la plaine.

Les nappes captives sous-alluviales alimentent aussi les alluvions du Rhône (Guégan, 1972) :

- au niveau de « Préférence, » il n'y a pas de tritium détectable dans le Crétacé (grès turoniens) et le Plaisancien. L'âge des eaux sous-alluviales est supérieur à 19 ans et leur temps de renouvellement supérieur à 20 ans ;

- les aquifères captifs du Cénomaniens des Horts et de la Siolle, des albiens de Pont-Saint-Esprit montrent les mêmes propriétés ;

- la source paulétienne (étage géologique) de Champ Couffé provenant d'une nappe libre du Cénomaniens montre une activité tritium plus élevée. Ceci montre une alimentation rapide et inférieure à 6 mois.

Ces études suggèrent un comportement différents pour les aquifères sous-alluviaux captifs et libres.

3. Description et présentation des données disponibles

3.1. Volet hydraulique

Les données utilisées pour le volet hydraulique de l'étude de la chute CNR de Donzère-Mondragon proviennent de différentes sources. Il peut s'agir de données issues de la bibliographie, issues de bases de données accessibles en ligne ou transmises directement par nos partenaires. Les sources des données hydrauliques utilisées sont rappelées dans les parties où elles sont mobilisées : §2 Présentation hydraulique de la chute CNR de Donzère-Mondragon et §4 Métrique hydraulique : caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR Donzère-Mondragon (Bas-Rhône).

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.

3.2. Volet faune : invertébrés souterrains

Les données d'invertébrés souterrains disponibles sur le secteur de Donzère-Mondragon sont constituées par des échantillons effectués en 1989 (Creuzé des Châtelliers, 1991) et en 1994 (Plénet et al. 1996). Ces données obtenues dans la cadre de deux thèses de doctorat sont la propriété de l'Equipe d'Hydrobiologie et Ecologie Souterraines de l'UMR-CNRS 5023 LEHF. La qualité de ces données est bonne (méthodologie et saisons similaires). Toutefois, le degré d'identification des Amphipodes Niphargidae n'a pas toujours été poussé à l'espèce. Leur exploitabilité est donc satisfaisante.

3.3. Volet végétation et chimie

Les données collectées consistent :

1) en des relevés floristiques (quadrats) systématiques collectés dans tous les points d'eau du secteur et en plusieurs points le long des cours d'eau.

2) en une évaluation, sur la base des exigences écologiques des espèces composant ces peuplements, de différentes caractéristiques des écosystèmes échantillonnés (trophie, importance des apports d'eau souterraine)

3) en des mesures physico-chimiques réalisées à 4 reprises en 30 points dispersés dans l'ensemble du secteur dans tous les types d'habitats et pourtant sur 6 paramètres (conductivité, température, pH, O₂, nitrates, phosphates, ammoniac), mesures destinées à recalibrer les indicateurs biologiques dans ce secteur méridional dans lequel ils n'avaient jamais été testés auparavant.

4. Métrique hydraulique : caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR Donzère-Mondragon (Bas-Rhône)

La méthode de calcul des échanges nappes/Rhône utilisée reste la même que celle décrite dans le rapport phase 2 (Bornette & al., 2007). Nous n'y reviendrons donc pas. Cette partie présente les échanges calculés sur la chute CNR de Donzère-Mondragon sur le Bas-Rhône. Ces échanges ont été calculés entre le Vieux-Rhône (rive gauche) et la nappe et entre le canal de dérivation (rive droite) et la nappe pour quatre dates différentes. Ce travail constitue une première approche des variations saisonnières au niveau des échanges nappes/rivière.

4.1. Piézométries de départ, états hydrologique et perméabilités

Pour ce secteur, la caractérisation des échanges nappes/Rhône a pu être réalisée sur quatre piézométries distinctes. Ceci permet de se faire une première idée des variations saisonnières des échanges nappes/Rhône sur deux piézométries anciennes et deux piézométries récentes (toutes après aménagement).

Les piézométries anciennes sont issues de Guégan (1972) :

- contexte de basses-eaux (BE) de nappe pour la piézométrie du 15 au 20 juillet 1968 ;
- contexte de moyennes-eaux (ME) de nappe pour la piézométrie de septembre 1969.

Les piézométries récentes nous ont été communiquées par le bureau d'étude ANTEA. Elles ont été réalisées dans le cadre d'une étude menée pour AREVA (piézométrie de référence) :

- contexte de hautes-eaux (HE) de nappe pour la piézométrie du 9 juin 2008 ;
- contexte de moyennes-eaux (ME) de nappes pour la piézométrie du 16 mars 2009.

Sur le secteur de Donzère-Mondragon, le débit maximum turbinable est de $1800\text{m}^3/\text{s}$ à partir des années 1960 et de $1980\text{m}^3/\text{s}$ à partir de l'année 1986. Le débit réservé du Rhône court-circuité est de $60\text{m}^3/\text{s}$. Le débit moyen annuel (module) est de $1490\text{m}^3/\text{s}$. Les données de débit du Rhône à Viviers (PK 166,5) sont issues de la banque Hydro et de la CNR. L'état hydrologique du fleuve est déterminé à partir des statistiques de la Banque Hydro :

- En juillet 1968, le débit moyen du Rhône était de $1040\text{m}^3/\text{s}$ ($1130\text{m}^3/\text{s}$ du 15 au 20 juillet et $1200\text{m}^3/\text{s}$ pour juin 1968), le module interannuel pour juillet étant de $1320\text{m}^3/\text{s}$. Le Rhône est donc en moyennes-eaux (ME).

- En septembre 1969, le débit moyen du Rhône était de $751\text{m}^3/\text{s}$ (Côte : 59,2m) ($977\text{m}^3/\text{s}$ pour août 1969), le module interannuel pour septembre étant de $1060\text{m}^3/\text{s}$. Le Rhône est donc en basses-eaux (BE).

Pour ces deux dates, le débit du Rhône étant relativement faible on peut considérer que le débit du Vieux-Rhône est de l'ordre de la valeur du débit réservé et donc en moyennes-eaux (ME).

- Le 9 juin 2008 le débit du Rhône était de $2623\text{m}^3/\text{s}$ (côte : 59,8m). Le débit moyen de ce mois de juin était de $2035\text{m}^3/\text{s}$ ($1456\text{m}^3/\text{s}$ pour mai 2008), le module interannuel pour juin étant de $1610\text{m}^3/\text{s}$. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un débit classé, le Rhône court-circuité peut être considéré en hautes-eaux (HE). A Pont-Saint-Esprit (PK 192) à l'aval de la confluence avec l'Ardèche, le débit sur le Vieux-Rhône est de l'ordre de $866\text{m}^3/\text{s}$. A Saint-Montant (PK 173,2) le débit est de l'ordre de $917\text{m}^3/\text{s}$ (côte : 52,1m).

- Le 16 mars 2009 le débit du Rhône était de $1673\text{m}^3/\text{s}$. Le débit moyen de ce mois de mars était de $1575\text{m}^3/\text{s}$ ($2117\text{m}^3/\text{s}$ pour février), le module interannuel de mars étant de $1730\text{m}^3/\text{s}$. Le Rhône est donc en moyennes-eaux (ME). Le débit sur le Vieux-Rhône à Saint-Montant (PK 173,2) était de l'ordre de $333\text{m}^3/\text{s}$ (côté : 50,8m) et de l'ordre de $353\text{m}^3/\text{s}$ à Pont-Saint-Esprit ce jour-là ce qui est supérieur au débit réservé.

Le Tableau 12 résume les informations précédemment énoncées.

Secteur	Donzère-Mondragon	Donzère-Mondragon	Donzère-Mondragon	Donzère-Mondragon
Station	Viviers (amont)	Viviers (amont)	Viviers (amont)	Viviers (amont)
Date de la piézométrie	09/06/2008	16/03/2009	15 au 30/07/1968	??/09/1969
Source	Antea/Areva	Antea/Areva	Guégan (1972)	Guégan (1972)
Débit maximum turbinable	1 980	1 980	1 800	1 800
Débit réservé	60	60	60	60
Débit du jour concerné	2 623	1 673	??	??
Débit moyen du mois concerné	2 035	1 569	1 040	750
Débit moyen du mois précédent	1 456	2 117	1 200	977
Module interannuel du mois concerné	1 610	1 730	1 320	1 060
Moyenne annuelle (module)	1 490	1 490	1 490	1 490
Etat hydrologique du Rhône	HE	ME	ME	BE
Etat hydrologique nappe	HE	ME	BE	ME

Tableau 12 : Etats hydrologiques de la nappe et du Rhône à sur la chute CNR de Donzère-Mondragon

Les valeurs de perméabilités (K) utilisées pour le calcul des débits sont issues d'un exercice de modélisation de l'étude ANTEA pour AREVA. Selon cette étude la perméabilité dans la plaine du Tricastin est supérieure à 10^{-2} m/s, nous l'avons fixée à 2.10^{-2} m/s. Seul un petit secteur bordant le canal de dérivation et centré sur le site nucléaire de Pierrelatte présente des perméabilités plus faibles comprises entre 10^{-2} et 10^{-3} m/s. Globalement, les valeurs de perméabilités utilisées pour le modèle de nappe d'ANTEA sont supérieures à la moyenne (2.10^{-3} m/s) donnée par Guégan (1972).

La surface d'échange (A) a été estimée pour soustraction du niveau de l'aquifère et du niveau du talweg formé par le fond du lit du Rhône. Les données de profil en long du talweg du Rhône nous été communiquées par la CNR, d'autres récupérées dans l'Etude Globale du Rhône (Hydratec, 2002). Cette estimation ne tient pas compte du sous-écoulement possible si le fond du lit n'est pas colmaté.

4.2. Altitudes comparées de la nappe et du talweg du Rhône

La Figure 2 présente le niveau comparé des quatre piézométries et du talweg du Rhône pour chaque segment composant la polyligne de berge de la rive gauche du Vieux-Rhône. Cette polyligne correspond à la vectorisation du tracé de la berge du Rhône sous SIG à partir d'une carte IGN au 25 000°. Une même polyligne est composée de segments. L'analyse géomatique d'une piézométrie permet d'affecter à chacun de ces segments une valeur de gradient de nappe. Pour calculer le débit d'échange entre le fleuve et la nappe, il faut ensuite affecter à ces segments des valeurs de perméabilités et de surface d'échange. La Figure 2 représente donc les valeurs des altitudes du substratum et du niveau de nappe utilisées par évaluer la surface d'échange sur chacun des segments de la polyligne de berge. Ce type de représentation segmentée plutôt qu'à intervalles de distance régulier est ici pertinent car il permet de visualiser une partie des données utilisées pour le calcul des échanges nappe/rivière. Les segments de polyligne de berge sont numérotés de l'amont vers l'aval. Sur la Figure 2, l'altitude du talweg est représentée par un trait noir. Celle des piézométries est représentée de la façon suivante : trait rouge pour 2009, trait vert pour 2008, trait violet pour 1969, trait bleu pour 1968. Globalement, les variations d'altitudes de nappes suivent celles du talweg du Rhône. Le point d'inflexion situé au niveau de la polyligne n°500 correspond environ au PK 178. L'altitude du niveau piézométrique est proche pour septembre 1969 et juillet 1968 avec un niveau légèrement inférieur pour cette dernière date. Juin 2008 présente le niveau piézométrique le plus élevé. Le comportement de la nappe en mars 2009 est plus déroutant car sur

un secteur amont le niveau piézométrique est le plus bas des quatre périodes alors que sur un secteur aval il est au plus haut.

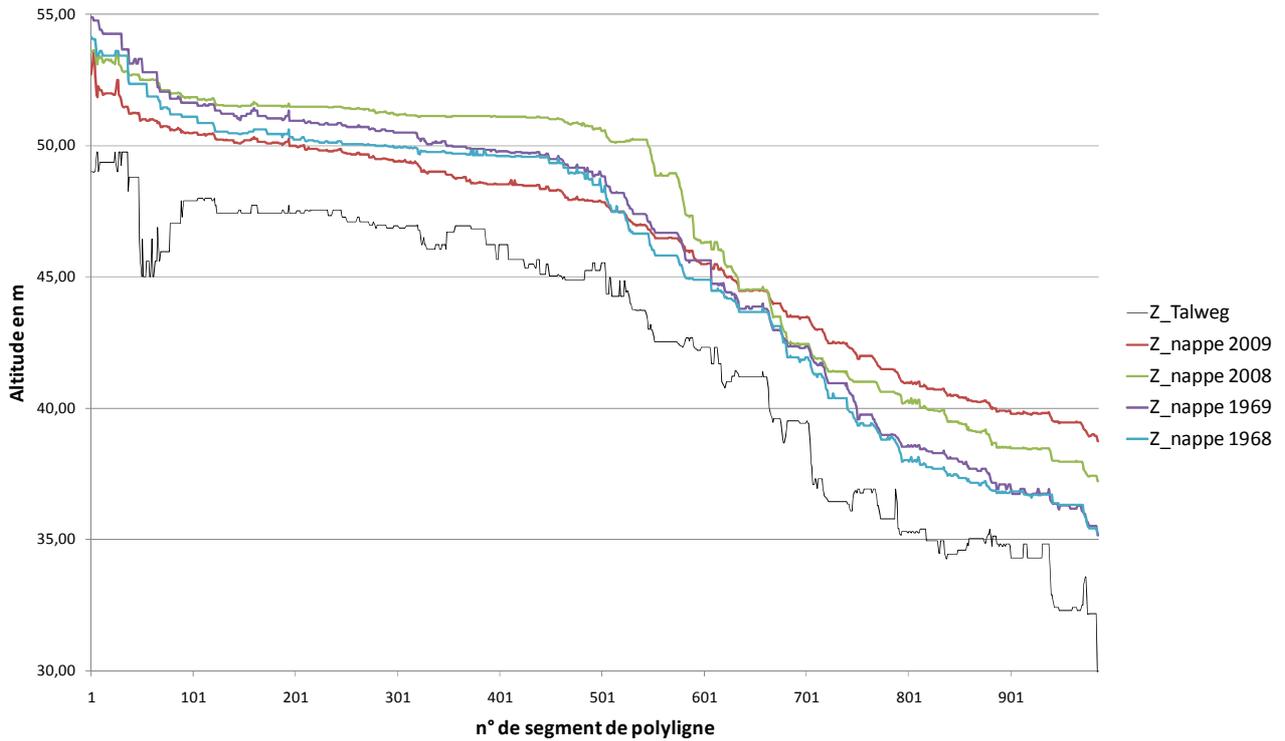


Figure 2 : Altitude comparée des niveaux de nappes et du talweg du Rhône en rive gauche du Vieux-Rhône de l'aval du barrage de retenue (segment 1 au PK 172) à l'amont de la restitution (segment 985 au PK 195)

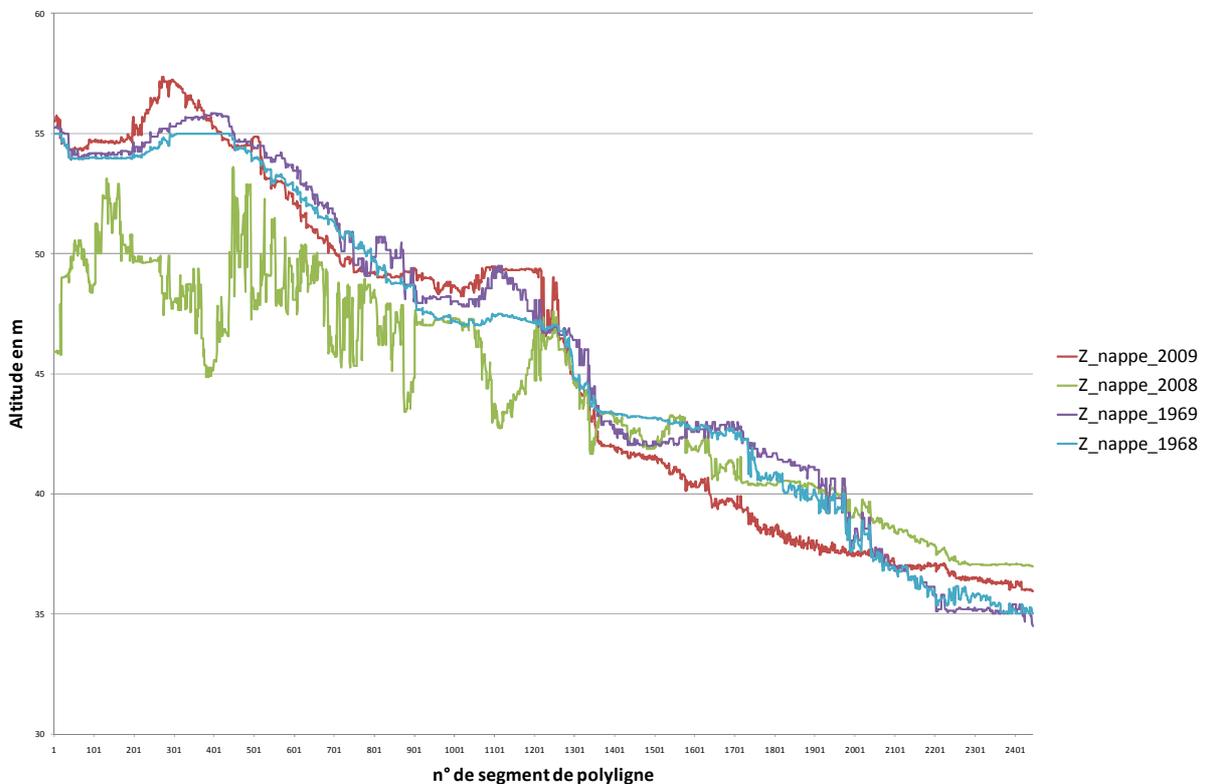


Figure 3 : Altitude comparée des niveaux de nappes en rive droite du canal de dérivation de l'aval du barrage de garde (segment 1 au PK 0) à l'amont de la restitution (segment 2444 au PK 26). L'usine Blondel se situe environ au niveau du segment n°1150 (PK 17,3).

La Figure 3 présente le niveau comparé des quatre piézométries pour chaque segment de la polyligne de berge de la rive droite du canal de dérivation.

L'ensemble des niveaux de nappe marquent une inflexion au niveau de segments de polyligne n°1200 à 1300 ce qui correspond environ au PK 185 (15) à 186 (16). A l'amont de ce point, le niveau de nappe pour juin 2008 est le plus bas et irrégulier. Les autres niveaux se comportent de manière plus régulière et de façon globalement similaire.

A l'aval de ce point, les quatre niveaux se comportent de manière régulière et de façon globalement similaire.

4.3. Caractérisations des échanges nappes/Rhône

Cette partie synthétise les calculs effectués pour caractériser les échanges nappe/Rhône au niveau de la rive gauche du Vieux-Rhône entre les PK 171 et 200 pour les quatre piézométries précédemment citées. Des tableaux résumant les résultats obtenus en trois parties :

- Le fleuve alimente la nappe (Q-)
- La nappe alimente le fleuve (Q+)
- Pas d'échange (Q0)

Pour chacune de ces parties, les tableaux suivants donnent la moyenne, l'écart type, les valeurs minimales et maximales des variables suivantes (à gauche) : perméabilité de l'aquifère (K), surface d'échange (A), altitude de la nappe (Z nappe), altitude du fond du lit du Rhône (Z talweg). A droite, dans les tableaux, on trouve la moyenne, l'écart type, les valeurs minimales et maximales et la somme des débits échangés (Q- ou Q+) et des longueurs de segment de polyligne.

Le paramètre « nb » indique le nombre de segments de polyligne de berge sur lesquels les calculs ont été effectués. Une dernière valeur, « Qu- » ou « Qu+ », donne le débit unitaire pour les segments considérés. Pour finir, les tableaux donnent des indications sur les principales variables (K, A, Z nappe, Z Talweg, nb) tout secteur confondu.

Les échanges ont aussi été caractérisés pour les quatre périodes au niveau des contre-canaux du canal de dérivation en rive droite. En septembre 1969, la piézométrie disponible permet aussi de caractériser ces échanges en rive gauche. Le canal de dérivation est composé d'un canal d'amenée qui s'étend du PK 171 (1) au PK 190 (18) et d'un canal de fuite du PK 190(18) au PK 200 (28). Au niveau des contre-canaux, la surface d'échange est estimée, par hypothèse, à 2m².

Au final, ces résultats sont commentés. De plus, une sectorisation des échanges pour chaque période est proposée. Une carte permet enfin de visualiser les résultats. Les échanges de la nappe vers le fleuve sont représentés dans des tons verts, et les échanges du fleuve vers la nappe dans des tons rouges et oranges. La couleur bleue est réservée aux secteurs sur lesquels les échanges sont nuls.

4.3.1. Juillet 1968 – Basses-eaux de nappe : Rive gauche du Vieux-Rhône et rive droite du canal de dérivation

• Rive gauche du Vieux-Rhône

La sectorisation des échanges pour cette période est la suivante (E_DM_07_1968_RCC_RG, Carte 15) :

- PK 171 à 172,5 : le fleuve alimente la nappe ;
- PK 172,5 à 195 : la nappe alimente le fleuve.

Pour juillet 1968, la nappe alimente le fleuve de manière prépondérante (Tableau 13). Sur de tels secteurs, la surface d'échange moyenne est légèrement inférieure par rapport aux secteurs où le

fleuve alimente la nappe. Les gradients moyens sont sensiblement les mêmes pour les deux types de comportement. Le gradient moyen calculé (1,5‰) est proche de celui estimé (1,2‰) par Guégan (1972).

Donzère-Mondragon_RCC_RG_1968 Q- (basses-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	3,8	1,6	51,6	47,9	Moyenne	-280,1	86,5	
Ecart type	0	1,1	0,9	2,1	1,8	Ecart type	355,0	60,3	
Minimum	2,0E-02	2,9	0,4	46,2	43,2	Minimum	-1 440,6	29,2	
Maximum	2,0E-02	5,8	3,3	54,6	49,8	Maximum	-24,6	252,7	
						Somme	-4 762	1 470	-3 240
nb	17								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_1968 Q+ (basses-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	3,3	1,5	43,7	40,4	Moyenne	685,5	107,5	
Ecart type	0	0,9	0,7	5,2	5,0	Ecart type	621,5	63,5	
Minimum	2,0E-02	1,5	0,1	35,0	28,5	Minimum	1,8	21,1	
Maximum	2,0E-02	6,8	6,4	54,6	49,0	Maximum	3 538,5	306,8	
						Somme	146 704	22 994	6 380
nb	214								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_1968 (total Q+ et Q- confondus) (basses-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)				
Moyenne	2,0E-02	3,3	1,5	44,3	41,0				
Ecart type	0	0,9	0,8	5,4	5,2				
Minimum	2,0E-02	1,5	0,1	35,0	28,5				
Maximum	2,0E-02	6,8	6,4	54,6	49,8				
nb	231								

Tableau 13 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en juillet 1968

• Rive droite du canal de dérivation

La sectorisation des échanges pour cette période est la suivante (E_DM_07_1968_CD_RD, Carte 15) :

- PK 171 (1) à 190 (18) : le canal alimente la nappe ;
- PK 190 (18) à 196 (24) : la nappe alimente canal ;
- PK 196 (24) à 200 (28) : le canal alimente la nappe.

Le canal alimente la nappe de manière prépondérante au niveau du canal d'amenée. La situation est partagée au niveau du canal de fuite.

Pour cette période, c'est le canal qui alimente de manière prépondérante la nappe. Les gradients moyens sont supérieurs dans les secteurs où le canal alimente la nappe (Tableau 14). Le gradient de nappe moyen (3,1‰) est plus fort qu'au niveau du Vieux-Rhône.

Donzère-Mondragon_CD_RD_1968 Q- (basses-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	1,3E-02	2,0	3,0	Moyenne	-259,5	93,1	
Ecart type	7,7E-03	0,0	4,7	Ecart type	330,0	83,0	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0	Minimum	-1 519,1	0,5	
Maximum	2,0E-02	2,0	42,3	Maximum	-1,0	381,6	
				Somme	-44 380	15 917	-2 788
nb	171						
Donzère-Mondragon_CD_RD_1968 Q+ (basses-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	1,6E-02	2,0	5,9	Moyenne	229,9	58,0	
Ecart type	6,5E-03	0,0	8,6	Ecart type	273,2	64,6	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,2	Minimum	0,0	0,0	
Maximum	2,0E-02	2,0	58,6	Maximum	1 263,7	258,1	
				Somme	18 848	4 755	3 964
nb	82						
Donzère-Mondragon_CD_RD_1968 Q0 (basses-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q0 (m ³ /j)	Longueur (m)	Q0 (m ³ /j/km)
Moyenne	1,8E-02	2,0	0,0	Moyenne	0	63,9	
Ecart type	5,2E-03	0,0	0,0	Ecart type	0	94,8	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0	Minimum	0	0,0	
Maximum	2,0E-02	2,0	0,0	Maximum	0	391,4	
				Somme	0	4 153	0
nb	64						
Donzère-Mondragon_CD_RD_1968 (total Q-, Q+ et Q0 confondus) (basses-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)				
Moyenne	1,5E-02	2,0	3,1				
Ecart type	7,2E-03	0,0	5,9				
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0				
Maximum	2,0E-02	2,0	58,6				
nb	317						

Tableau 14 : Caractérisation des échanges en droite du canal de dérivation en juillet 1968

4.3.2. Septembre 1969 – Moyennes-eaux de nappes: Rive gauche du Vieux-Rhône et rives gauche et droite du canal de dérivation

• Rive gauche du Vieux-Rhône

La sectorisation des échanges en septembre 1969 est la suivante (E_DM_09_1969_RCC_RG, Carte 16) :

- PK 172 à 173,5 : le fleuve alimente la nappe ;
- PK 173,5 à 196 : la nappe alimente le fleuve ;
- PK 196 à 197 : le fleuve alimente la nappe.

Pour septembre 1969, la nappe alimente le fleuve de manière prépondérante (Tableau 15). Sur de tels secteurs, la surface d'échange moyenne est légèrement inférieure par rapport aux secteurs où le fleuve alimente la nappe. Les gradients moyens sont sensiblement les mêmes pour les deux types de

comportement. Le gradient moyen calculé (1,4‰) est proche de celui estimé (1,2‰) par Guégan (1972).

Donzère-Mondragon_RCC_RG_1969 Q- (moyennes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	4,2	1,5	44,6	40,5	Moyenne	-240,4	93,6	
Ecart type	0	1,2	0,7	8,2	7,7	Ecart type	256,0	70,2	
Minimum	2,0E-02	2,5	0,5	32,1	27,8	Minimum	-826,4	2,2	
Maximum	2,0E-02	6,9	2,9	53,7	49,7	Maximum	-0,6	238,4	
						Somme	-7 213	2 807	-2 569
nb	30								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_1969 Q+ (moyennes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	3,6	1,4	43,7	40,1	Moyenne	639,0	102,6	
Ecart type	0	0,8	1,0	5,2	5,1	Ecart type	792,5	71,1	
Minimum	2,0E-02	2,0	0,1	33,6	28,1	Minimum	1,3	0,1	
Maximum	2,0E-02	6,8	10,9	52,5	48,0	Maximum	7 349,8	412,9	
						Somme	134 837	21 651	6 228
nb	211								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_1969 (total Q+ et Q- confondus) (moyennes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)				
Moyenne	2,0E-02	3,7	1,4	43,8	40,1				
Ecart type	0	0,9	1,0	5,6	5,5				
Minimum	2,0E-02	2,0	0,1	32,1	27,8				
Maximum	2,0E-02	6,9	10,9	53,7	49,7				
nb	241								

Tableau 15 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en septembre 1969

• Rive droite du canal de dérivation

La sectorisation des échanges en septembre 1969 est la suivante (E_DM_09_1969_CD_RD, Carte 16) :

- PK 171 (1) à 190 (18) : le canal alimente la nappe ;
- PK 190 (18) à 196 (24) : la nappe alimente le canal ;
- PK 196 (24) à 200 (28) : le canal alimente la nappe.

Le canal alimente la nappe de manière prépondérante au niveau du canal d'amenée. La situation est partagée au niveau du canal de fuite.

Pour cette période, c'est le canal qui alimente de manière prépondérante la nappe. Les gradients moyens sont supérieurs dans les secteurs où la nappe alimente le canal (Tableau 16). Le gradient de nappe moyen (2,85‰) est plus fort qu'au niveau du Vieux-Rhône.

Donzère-Mondragon_CR_RD_1969 Q- (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	1,5E-02	2,0	3,0	Moyenne	-564,8	141,6	
Ecart type	7,2E-03	0,0	2,5	Ecart type	548,6	91,8	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,1	Minimum	-2 510,9	0,1	
Maximum	2,0E-02	2,0	11,6	Maximum	-0,1	413,8	
				Somme	-84 726	21 234	-3 990
nb	150						
Donzère-Mondragon_CD_RD_1969 Q+ (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	1,4E-02	2,0	3,3	Moyenne	488,6	117,2	
Ecart type	6,6E-03	0,0	1,7	Ecart type	607,5	73,4	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,1	Minimum	0,4	0,2	
Maximum	2,0E-02	2,0	7,0	Maximum	3 488,2	269,5	
				Somme	22 477	5 390	4 170
nb	46						
Donzère-Mondragon_CD_RD_1969 Q0 (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q0 (m ³ /j)	Longueur (m)	Q0 (m ³ /j/km)
Moyenne	1,9E-02	0,0	0,0	Moyenne	0	81,7	
Ecart type	4,0E-03	0,0	0,0	Ecart type	0	71,8	
Minimum	7,5E-03	0,0	0,0	Minimum	0	2,0	
Maximum	2,0E-02	0,0	0,0	Maximum	0	218,1	
				Somme	0	1 471	0
nb	18						
Donzère-Mondragon_CD_RD_1969 (total Q-, Q+ et Q0 confondus) (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)				
Moyenne	1,52E-02	2,00	2,85				
Ecart type	6,94E-03	0,00	2,41				
Minimum	2,50E-03	2,00	0,00				
Maximum	2,00E-02	2,00	11,61				
nb	214						

Tableau 16 : Caractérisation des échanges en rive droite du canal de dérivation en septembre 1969

- **Rive gauche du canal de dérivation**

Du PK 171 (1) au PK 200 (28), c'est la nappe qui alimente le canal (E_DM_09_1969_CD_RG Carte 16).

Le gradient moyen est supérieur à celui observé au niveau du Vieux-Rhône (Tableau 17).

Donzère-Mondragon_CD_RG_1969 Q- (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	6,9E-03	2,0	1,9	Moyenne	-13,3	74,8	
Ecart type	8,8E-03	0,0	2,3	Ecart type	14,9	57,1	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,6	Minimum	-35,1	8,4	
Maximum	2,0E-02	2,0	5,4	Maximum	-3,1	147,5	
				Somme	-53	299	-178
nb	4						
Donzère-Mondragon_CD_RG_1969 Q+ (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	1,5E-02	2,0	3,4	Moyenne	703,3	138,8	
Ecart type	7,1E-03	0,0	2,9	Ecart type	765,9	111,1	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,1	Minimum	0,5	0,1	
Maximum	2,0E-02	2,0	22,9	Maximum	3 854,1	568,9	
				Somme	135 040	26 648	5 068
nb	192						
Donzère-Mondragon_CD_RG_1969 Q0 (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q0 (m ³ /j)	Longueur (m)	Q0 (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	2,0	0,0	Moyenne	0	178,6	
Ecart type	0	0,0	0,0	Ecart type	0	37,1	
Minimum	2,0E-02	2,0	0,0	Minimum	0	152,4	
Maximum	2,0E-02	2,0	0,0	Maximum	0	204,8	
				Somme	0	357	0
nb	2						
Donzère-Mondragon_CD_RG_1969 (total Q-, Q+ et Q0 confondus) (moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)				
Moyenne	1,5E-02	2,0	3,3				
Ecart type	7,1E-03	0,0	2,9				
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0				
Maximum	2,0E-02	2,0	22,9				
nb	198						

Tableau 17 : Caractérisation des échanges en rive gauche du canal de dérivation en septembre 1969

4.3.3. Juin 2008 – Hautes-eaux de nappe : Rive gauche du Vieux-Rhône et rive droite du canal de dérivation

• Rive gauche du Vieux-Rhône

La sectorisation des échanges pour juin 2008 est la suivantes (E_DM_06_2008_RCC_RG, Carte 17) :

- PK 171,5 à 179,5 : la nappe alimente le fleuve ;
- PK 179,5 à 180,5 : le fleuve alimente la nappe ;
- PK 180,5 à 188 : la nappe alimente le fleuve ;
- PK 188 à 192 : le fleuve alimente la nappe ;
- PK 192 à 196 : la nappe alimente le fleuve ;
- PK 196 à 196,5 : le fleuve alimente la nappe.

Pour juin 2008, la nappe alimente le fleuve de manière prépondérante (Tableau 18). Sur de tels secteurs, la surface d'échange est légèrement inférieure par rapport aux secteurs où le fleuve alimente la nappe. Les gradients moyens sont sensiblement les mêmes pour les deux types de comportement. Le gradient moyen calculé (0,8‰) est sensiblement plus faible que celui estimé (1,2‰) par Guégan (1972).

Donzère-Mondragon_RCC_RG_2008 Q- (Hautes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Qu- (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	5,1	0,8	42,5	37,4	Moyenne	-214,9	89,0	
Ecart type	0	1,2	0,5	4,5	4,3	Ecart type	259,3	58,9	
Minimum	2,0E-02	3,6	0,3	36,5	28,1	Minimum	-1394,3	7,1	
Maximum	2,0E-02	8,5	2,4	52,6	47,4	Maximum	-0,7	288,0	
						Somme	-13 322	5 519	-2 414
nb	62								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_2008 Q+ (Hautes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Qu+ (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	4,9	0,9	46,3	41,5	Moyenne	325,2	106,8	
Ecart type	0	1,1	0,5	5,1	5,2	Ecart type	318,9	66,3	
Minimum	2,0E-02	3,0	0,3	36,8	28,5	Minimum	3,0	1,3	
Maximum	2,0E-02	8,6	3,1	53,5	49,8	Maximum	2 180,0	350,7	
						Somme	60 482	19 870	3 044
nb	186								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_2008 Q0 (Hautes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)		Q0 (m ³ /j)	Longueur (m)	Qu0 (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	4,8	0,0	46,4	41,7	Moyenne	0	6,3	
Ecart type	0	0,9	0,0	7,8	8,3	Ecart type	0	17,8	
Minimum	2,0E-02	3,7	0,0	36,5	30,2	Minimum	0	0,1	
Maximum	2,0E-02	6,3	0,0	53,5	49,0	Maximum	0	57,0	
						Somme	0	63	0
nb	10								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_2008 (Total Q+, Q0, Q- confondus) (Hautes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg (m)				
Moyenne	2,0E-02	4,9	0,8	45,4	40,5				
Ecart type	0	1,1	0,5	5,3	5,4				
Minimum	2,0E-02	3,0	0,0	36,5	28,1				
Maximum	2,0E-02	8,6	3,1	53,5	49,8				
nb	258								

Tableau 18 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en juin 2008

• Rive droite du canal de dérivation

La sectorisation des échanges est la suivante (E_DM_06_2008_CD_RD, Carte 17) :

- PK 172,5(2,5) à 174,5 (4,5) : le canal alimente la nappe ;
- PK 174,5 4,5) à 177 (7) : la nappe alimente le canal ;
- PK 177 (7) à 178,5 (8,5) : le canal alimente la nappe ;
- PK 178,5 (8,5) à 181 (11) : la nappe alimente le canal ;

- PK 181 (11) à 182,5 (12,5) : le canal alimente la nappe ;
- PK 182,5 (12,5) à 185 (15) : la nappe alimente le canal ;
- PK 185 (15) à 194 (22) : le canal alimente la nappe ;
- PK 194 (22) à 198 (26) : la nappe alimente le canal.

Donzère-Mondragon_CD_RD_2008 Q- (Hautes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	1,3E-02	2,0	2,7	Moyenne	-186,7	128,6	
Ecart type	7,1E-03	0,0	7,9	Ecart type	242,4	76,4	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,3	Minimum	-1 456,0	1,5	
Maximum	2,0E-02	2,0	67,4	Maximum	-1,3	306,5	
				Somme	-16 057	11 057	-1 452
nb	86						
Donzère-Mondragon_CD_RD_2008 Q+ (Hautes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	1,5E-02	2,0	1,6	Moyenne	227,1	128,5	
Ecart type	7,5E-03	0,0	1,5	Ecart type	428,3	91,6	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,3	Minimum	1,3	1,7	
Maximum	2,0E-02	2,0	11,3	Maximum	2 968,5	378,5	
				Somme	18 623	10 539	1 767
nb	82						
Donzère-Mondragon_CD_RD_2008 Q0 (Hautes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q0 (m ³ /j)	Longueur (m)	Q0 (m ³ /j/km)
Moyenne	7,1E-03	2,0	0,0	Moyenne	0	95,4	
Ecart type	7,2E-03	0,0	0,0	Ecart type	0	72,0	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0	Minimum	0	2,0	
Maximum	2,0E-02	2,0	0,0	Maximum	0	240,9	
				Somme	0	2 574	0
nb	27						
Donzère-Mondragon_CD_RD_2008 (total Q-, Q+ et Q0 confondus) (Hautes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)				
Moyenne	1,3E-02	2,0	1,9				
Ecart type	7,7E-03	0,0	5,4				
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0				
Maximum	2,0E-02	2,0	67,4				
nb	195						

Tableau 19 : Caractérisation des échanges en rive droite du canal de dérivation en juin 2008

La tendance est plutôt équilibrée concernant le sens des échanges, bien que ceux s'effectuant dans le sens nappe vers canal soient plus importants (Tableau 19). Dans les deux cas, tout comme en moyenne, les gradients de nappes sont supérieurs à ceux observés au niveau du Vieux-Rhône

4.3.4. Mars 2009 – Moyennes-eaux de nappe: Rive gauche du Rhône court-circuité et rive droite du canal de dérivation

• Rive gauche du Vieux-Rhône

La sectorisation des échanges est la suivante (E_DM_03_2009_RCC_RG, Carte 18) :

- PK 171 à 185,5 : la nappe alimente le fleuve
- PK 185,5 à 199 : le fleuve alimente la nappe
- PK 199 à 200,5 : la nappe alimente le fleuve

Donzère-Mondragon_RCC_RG_2009 Q- (Moyennes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg(m)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	6,5	1,3	40,5	34,1	Moyenne	-409,0	53,0	
Ecart type	0	1,7	1,0	3,3	4,6	Ecart type	654,8	65,3	
Minimum	2,0E-02	2,1	0,5	36,0	24,1	Minimum	-3 443,7	0,0	
Maximum	2,0E-02	12,5	11,3	56,5	50,4	Maximum	-0,2	285,3	
						Somme	-96 935	12 554	-7 721
nb	237								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_2009 Q+ (Moyennes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg(m)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	3,4	3,2	49,3	45,9	Moyenne	246,3	28,0	
Ecart type	0	1,6	2,4	3,1	3,8	Ecart type	422,0	48,5	
Minimum	2,0E-02	1,7	0,3	36,0	24,1	Minimum	0,1	0,0	
Maximum	2,0E-02	12,4	14,2	57,4	52,4	Maximum	2 933,6	320,5	
						Somme	131 257	14 939	8 786
nb	533								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_2009 Q0 (Moyennes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg(m)		Q0 (m ³ /j)	Longueur (m)	Q0 (m ³ /j/km)
Moyenne	2,0E-02	5,2	0,0	43,8	38,6	Moyenne	0	6,8	
Ecart type	0	2,6	0,0	5,1	7,3	Ecart type	0	14,7	
Minimum	2,0E-02	1,8	0,0	36,0	24,5	Minimum	0	0,0	
Maximum	2,0E-02	12,0	0,0	57,1	52,3	Maximum	0	114,1	
						Somme	0	3 014	
nb	446								
Donzère-Mondragon_RCC_RG_2009 (total Q-, Q+ et Q0 confondus) (Moyennes-eaux de nappe)									
	K (m/s)	A (m)	i (‰)	Z nappe (m)	Z talweg(m)				
Moyenne	2,0E-02	4,6	1,6	45,6	40,9				
Ecart type	0	2,4	2,2	5,3	7,2				
Minimum	2,0E-02	1,7	0,0	36,0	24,1				
Maximum	2,0E-02	12,5	14,2	57,4	52,4				
nb	1216								

Tableau 20 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en mars 2009

Les échanges se font préférentiellement dans le sens nappe vers fleuve (Tableau 20). Les gradients de nappes moyens sont supérieurs à la moyenne, notamment pour les secteurs où les échanges se font dans le sens nappe vers fleuve.

• **Rive droite du canal de dérivation**

La sectorisation des échanges est la suivante (E_DM_03_2009_CD_RD, Carte 18) :

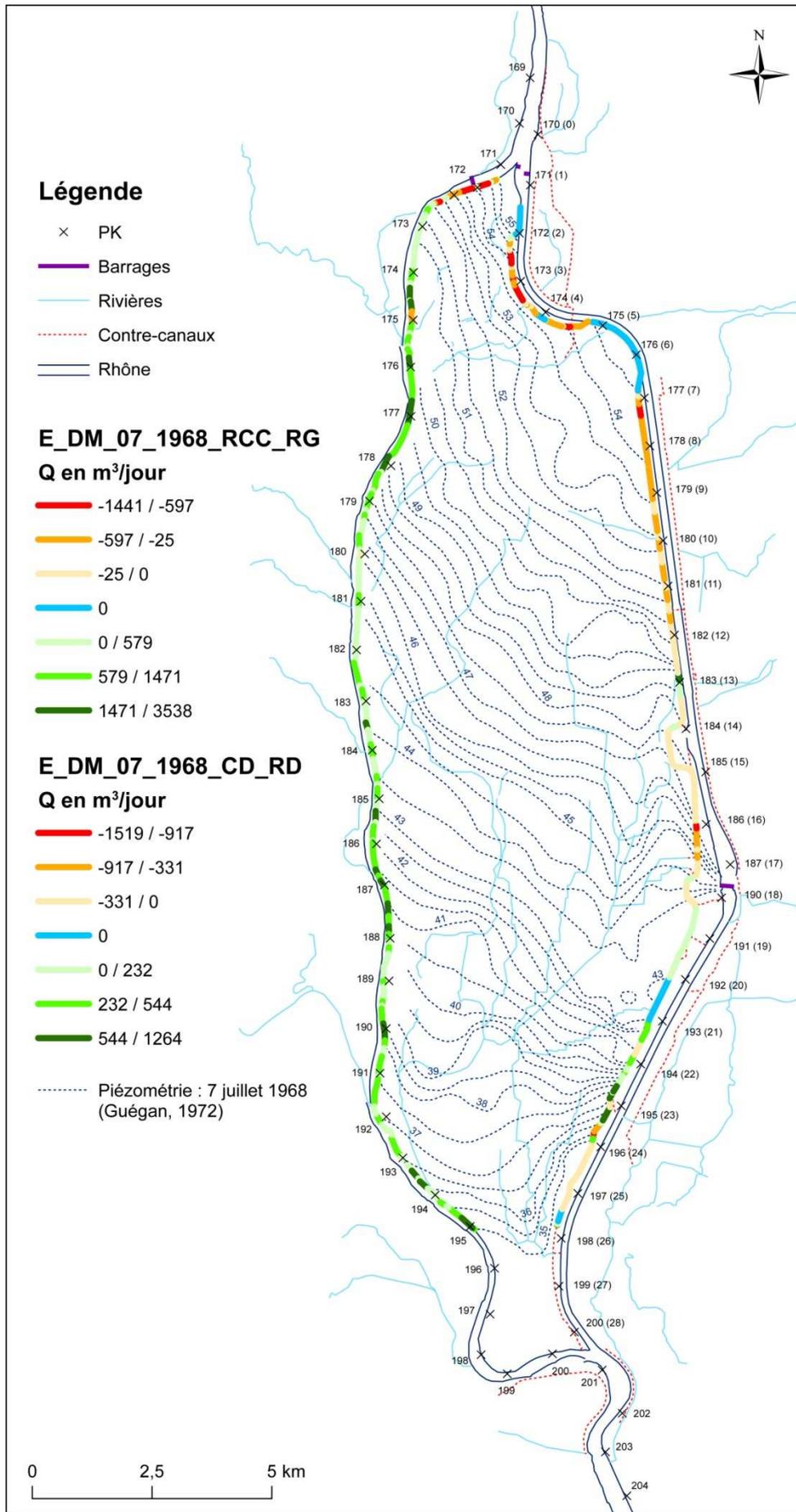
- PK 171 (1) à 190 (18) : le canal alimente la nappe ;
- PK 190 (18) à 200 (28) : la nappe alimente le canal.

Donzère-Mondragon_CD_RD_2009 Q- (Moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q- (m ³ /j)	Longueur (m)	Q- (m ³ /j/km)
Moyenne	1,3E-02	2,0	5,0	Moyenne	-63,5	12,1	
Ecart type	8,4E-03	0,0	4,0	Ecart type	123,0	28,0	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,1	Minimum	-1 211,8	0,0	
Maximum	2,0E-02	2,0	19,0	Maximum	0,0	320,9	
				Somme	-86 995	16 635	-5 230
nb	1371						
Donzère-Mondragon_CD_RD_2009 Q+ (Moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q+ (m ³ /j)	Longueur (m)	Q+ (m ³ /j/km)
Moyenne	1,6E-02	2,0	6,2	Moyenne	111,1	9,6	
Ecart type	5,8E-03	0,0	3,3	Ecart type	150,8	25,3	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,2	Minimum	0,0	0,0	
Maximum	2,0E-02	2,0	14,0	Maximum	1 001,8	294,8	
				Somme	127 894	11 055	11 569
nb	1151						
Donzère-Mondragon_CD_RD_2009 Q0 (Moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)		Q0 (m ³ /j)	Longueur (m)	Q0 (m ³ /j/km)
Moyenne	1,8E-02	2,0	0,0	Moyenne	0	10,7	
Ecart type	5,8E-03	0,0	0,0	Ecart type	0	31,9	
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0	Minimum	0	0,0	
Maximum	2,0E-02	2,0	0,0	Maximum	0	211,7	
				Somme	0	858	
nb	80						
Donzère-Mondragon_CD_RD_2009 (total Q-, Q+ et Q0 confondus) (Moyennes-eaux de nappe)							
	K (m/s)	A (m)	i (‰)				
Moyenne	1,4E-02	2,0	5,4				
Ecart type	7,5E-03	0,0	3,8				
Minimum	2,5E-03	2,0	0,0				
Maximum	2,0E-02	2,0	19,0				
nb	2602						

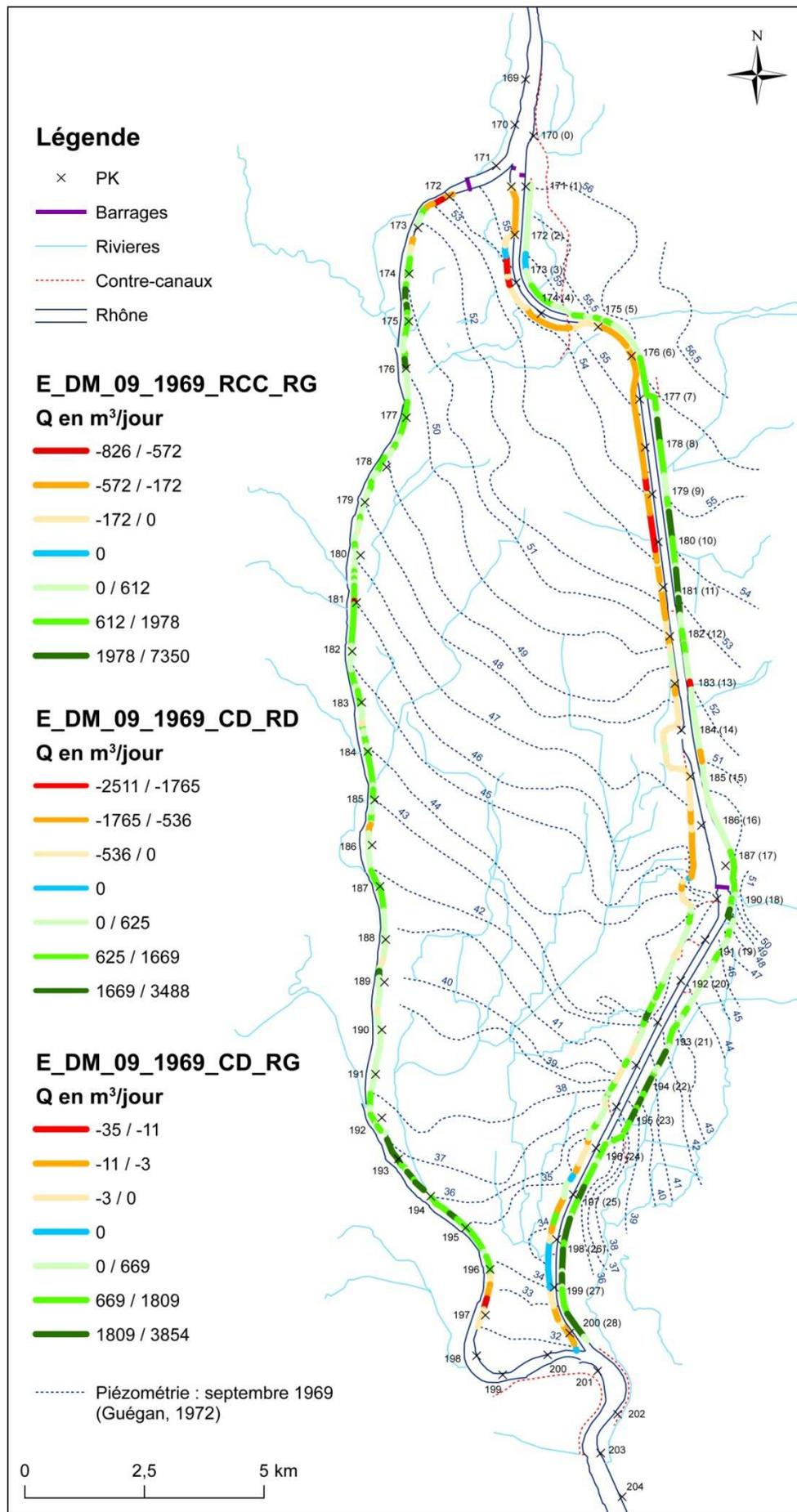
Tableau 21 : Caractérisation des échanges en rive droite du canal de dérivation en mars 2009

Les échanges se font préférentiellement dans le sens nappe vers fleuve (Tableau 20). Les gradients de nappes moyens sont supérieurs à la moyenne, notamment pour les secteurs où les échanges se font dans le sens nappe vers fleuve.

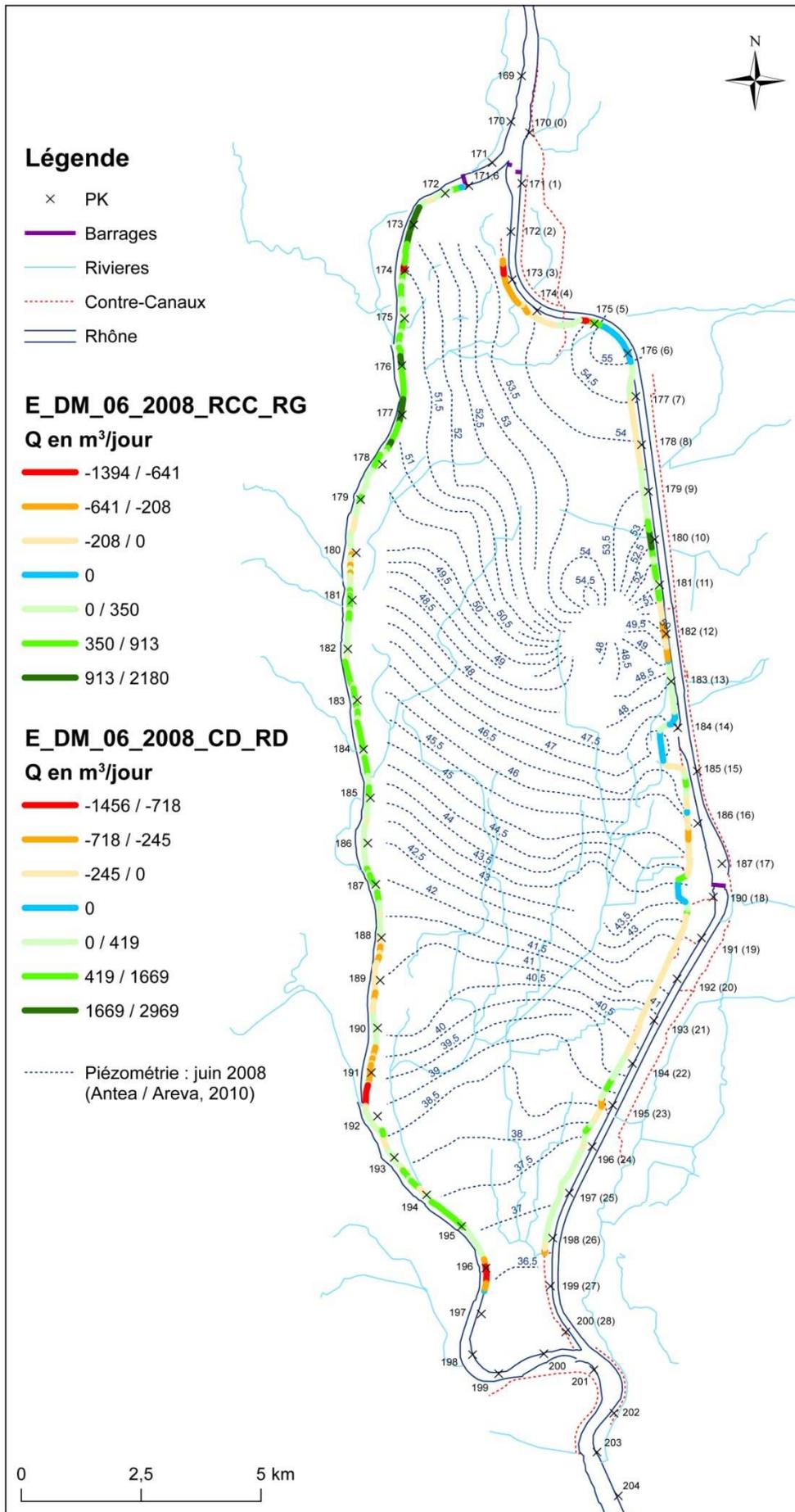
Les cartes suivantes (Carte 15, Carte 16, Carte 17, Carte 18, Carte 19) sont disponibles au format A3 dans le recueil cartographique joint à ce rapport.



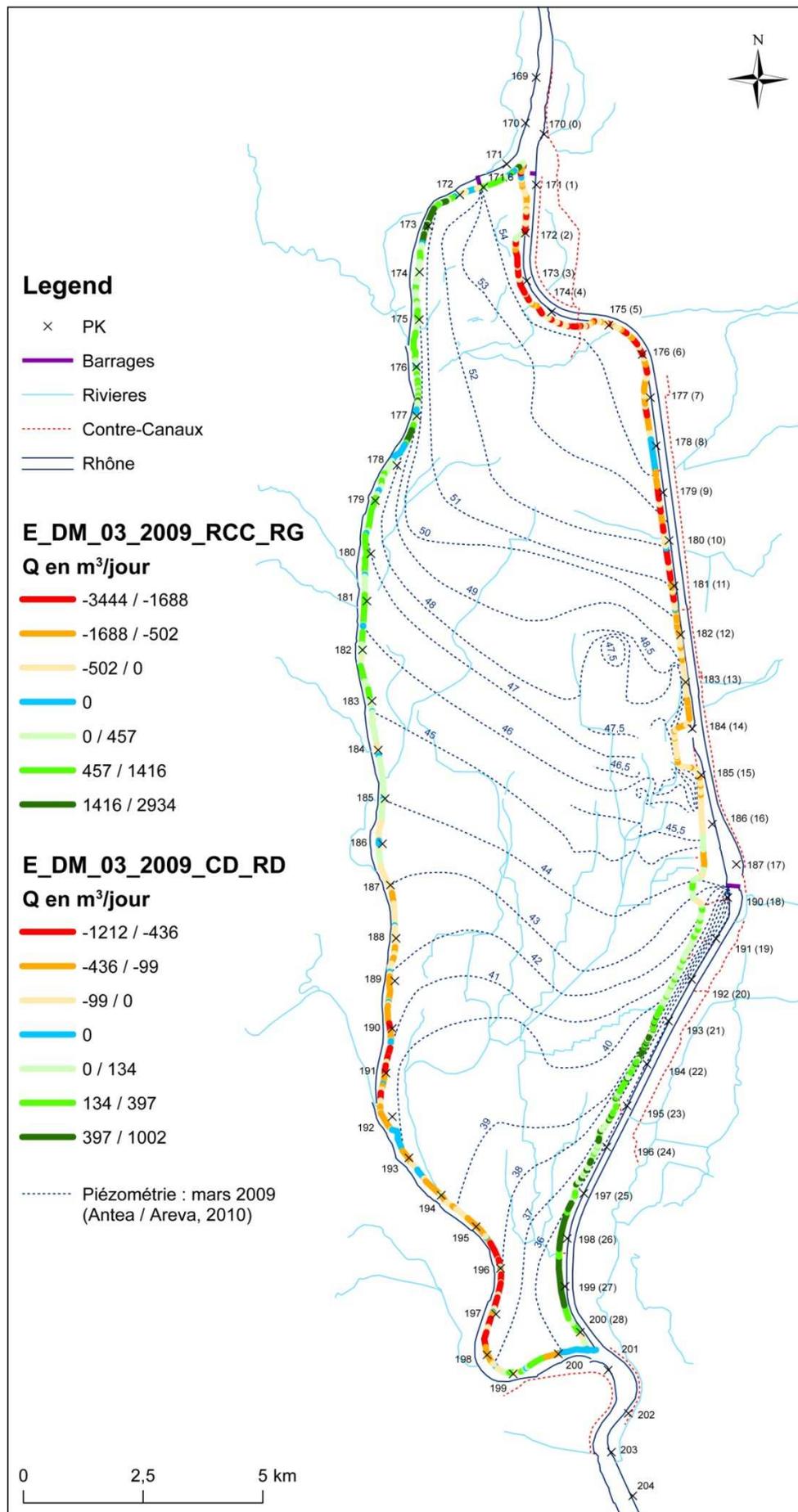
Carte 15 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en juillet 1968



Carte 16 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en septembre 1969



Carte 17 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en juin 2008



Carte 18 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en mars 2009

4.4. Bilan des échanges sur Donzère-Mondragon

Les tableaux suivants dressent le bilan des échanges nappe/Rhône calculés pour le Vieux-Rhône en rive gauche (RCC_RG) et le canal de dérivation en rive droite (CD_RD) pour les quatre dates étudiées (1968, 1969, 2008, 2009). Le débit d'échange de la nappe vers le fleuve est noté Q_+ , et Q_- du fleuve vers la nappe. Les tableaux donnent de plus les débits unitaires (Q_{u+} et Q_{u-}) et les gradients de nappe moyens ($imoy_+$ et $imoy_-$).

La Carte 19 permet de comparer visuellement la sectorisation des échanges pour les quatre périodes en rive gauche du Vieux-Rhône et en rive droite du canal de dérivation. Les classes de débits sont les mêmes pour chaque période.

Le Tableau 22 dresse un bilan global inter-saisonnier au niveau du Vieux-Rhône. Dans tous les cas, c'est la nappe qui alimente le fleuve de manière préférentielle. En 1968 et 1969 le comportement du système est très proche, avec des débits et des gradients du même ordre de grandeur. En 2009, par contre, la part d'alimentation de la nappe par le fleuve est nettement plus importante et le gradient nappe vers fleuve supérieur. En 2008, les échanges nappe vers fleuve sont moindres et les gradients plus faibles.

D'après ces résultats, les échanges semblent donc moins importants (gradients faibles) en période de hautes-eaux (juin 2008). Ils sont au maximum dans le sens fleuve vers nappe (gradients moyens) en moyennes-eau (mars 2009) et inférieurs (gradients moyens) en période de basses-eaux (juillet 1969 et septembre 1969).

Secteur_Rive_Date	Q_+	Q_-	Q_{u+}	Q_{u-}	$imoy_+$	$imoy_-$
	m^3/j	m^3/j	$m^3/j/km$	$m^3/j/km$	‰	‰
RCC_RG_1968	146 704	-4 762	6 380	-3 240	1,5	1,6
RCC_RG_1969	134 837	-7 213	6 228	-2 569	1,4	1,5
RCC_RG_2008	60 482	-13 322	3 044	-2 414	0,9	0,8
RCC_RG_2009	131 257	-96 935	8 786	-7 721	3,2	1,3

Tableau 22 : Bilan global des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône

Le Tableau 23 dresse un bilan global inter-saisonnier au niveau du canal de dérivation. Les échanges sont plus importants dans le sens fleuve vers nappe en 1968 et 1969. La situation est inverse pour les deux autres dates, même si en 2008 on se trouve proche de l'équilibre. Les gradients sont globalement forts, plus particulièrement en 2009 et en 1968. Ils sont plus faibles en 2008.

D'après ces résultats, les échanges semblent plus importants en période de moyennes-eaux (mars 2009) avec des gradients forts. Ils sont plus faibles en période de hautes-eaux (juin 2008) avec des gradients plus faibles. Pour les deux autres dates (juillet 1968 et septembre 1969) la situation est intermédiaire avec des gradients inférieurs.

Secteur_Rive_Date	Q_+	Q_-	Q_{u+}	Q_{u-}	$imoy_+$	$imoy_-$
	m^3/j	m^3/j	$m^3/j/km$	$m^3/j/km$	‰	‰
CD_RD_1968	18 848	-44 380	3 964	-2 788	5,9	3,0
CD_RD_1969	22 477	-84 726	4 170	-3 990	3,3	3,0
CD_RD_2008	18 623	-16 057	1 767	-1 452	1,6	2,7
CD_RD_2009	127 894	-86 995	11 055	-5 230	6,2	5,0

Tableau 23 : Bilan global des échanges en rive droite du canal de dérivation

Le Tableau 24 dresse un bilan de la sectorisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône. Le découpage est globalement similaire en basses-eaux (juillet 1968 et septembre 1969) où le fleuve draine la nappe. En moyennes-eaux (mars 2009), la situation s'inverse sur la moitié sud (aval) où le

fleuve alimente la nappe. Pour les hautes-eaux (juin 2008), la situation est plus confuse avec une alternance des secteurs drainant et alimentant la nappe.

PK	Secteur_Rive_Date	Q+	Q-	Qu+	Qu-
		m ³ /j	m ³ /j	m ³ /j/km	m ³ /j/km
171 à 172,5	RCC_RG_1968	827	-3 964	2 405	-3 600
172,5 à 195	RCC_RG_1968	145 887	-797	6 440	-2 163
172 à 173,5	RCC_RG_1969	806	-3 863	2 429	-4 020
173,5 à 196	RCC_RG_1969	134 031	-1 763	6 287	-2 389
196 à 197	RCC_RG_1969	0	-1 587	0	-1 432
171,5 à 179,5	RCC_RG_2008	32 824	-1 534	4 285	-5 442
179,5 à 180,5	RCC_RG_2008	870	-1 692	1 462	-2 164
180,5 à 188	RCC_RG_2008	19 211	-429	2 607	-1 550
188 à 192	RCC_RG_2008	617	-6 985	902	-2 307
192 à 196	RCC_RG_2008	6 959	-213	1 955	-403
196 à 196,5	RCC_RG_2008	0	-247	0	-398
171 à 185,5	RCC_RG_2009	126 361	-1 637	9 256	-2 488
185,5 à 199	RCC_RG_2009	653	-93 674	1 406	-8 190
199 à 200	RCC_RG_2009	4 242	-1 624	5 102	-3 537

Tableau 24 : Bilan des échanges par secteur en rive gauche du Vieux-Rhône

Le Tableau 25 et le Tableau 26 dressent un bilan de la sectorisation en rive droite du canal de dérivation. Le premier montre un découpage par Pk et le second un découpage canal de fuite et canal d'amenée. Dans un contexte de basses-eaux (1968 et 1969) le canal d'amenée alimente la nappe, alors que le canal de fuite la draine à l'amont et l'alimente à l'aval. Dans un contexte de moyennes-eaux (2009) la situation est encore plus nette, le canal d'amenée alimente la nappe et le canal de fuite la draine. En période de hautes-eaux (2008) au contraire, la situation est très contrastée avec une alternance de secteurs de drainage et d'alimentation de la nappe.

PK	Secteur_Rive_Date	Q+	Q-	Qu+	Qu-
		m ³ /j	m ³ /j	m ³ /j/km	m ³ /j/km
1 à 18	CD_RD_1968	1 328	-39 262	1 352	-2 911
18 à 24	CD_RD_1968	13 033	-494	3 652	-915
24 à 28	CD_RD_1968	4 488	-4 624	21 964	-2 450
1 à 18	CD_RD_1969	49	-73 454	124	-4 275
18 à 24	CD_RD_1969	21 343	-998	4 908	-958
24 à 28	CD_RD_1969	1 084	-10 274	1 683	-3 414
2,5 à 4,5	CD_RD_2008	0	-4 172	0	-2 226
4,5 à 7	CD_RD_2008	2 782	-1 187	1 822	-6 142
7 à 8,5	CD_RD_2008	0	-513	0	-354
8,5 à 11	CD_RD_2008	8 654	0	3 002	0
11 à 12,5	CD_RD_2008	0	-2 356	0	-1 829
12,5 à 15	CD_RD_2008	738	0	619	0
15 à 22	CD_RD_2008	3 052	-2 787	-4 616	-865
22 à 26	CD_RD_2008	3 395	-3 213	912	-3 511
1 à 18	CD_RD_2009	3 424	-86 975	2 222	-5 281
18 à 28	CD_RD_2009	124 470	-20	13 023	-121

Tableau 25 : Bilan des échanges pour secteur en rive droite du canal de dérivation

Secteur_Rive_Date	Q+	Q-	Qu+	Qu-
	m ³ /j	m ³ /j	m ³ /j/km	m ³ /j/km
CD_RD_amenée1968	1 328	-38 793	1 352	-3 004
CD_RD_fuite_1968	17 521	-5 587	4 644	-1 859
CD_RD_amenée_1969	49	-71 489	124	-4 305
CD_RD_fuite_1969	22 427	-13 236	12 265	-2 859
CD_RD_amenée_2008	14 109	-10 365	2 180	-1 493
CD_RD_fuite_2008	4 514	-5 692	1 110	-1 383
CD_RD_amenée_2009	790	-86 810	1 181	-5 339
CD_RD_fuite_2009	127 105	-185	12 237	-496

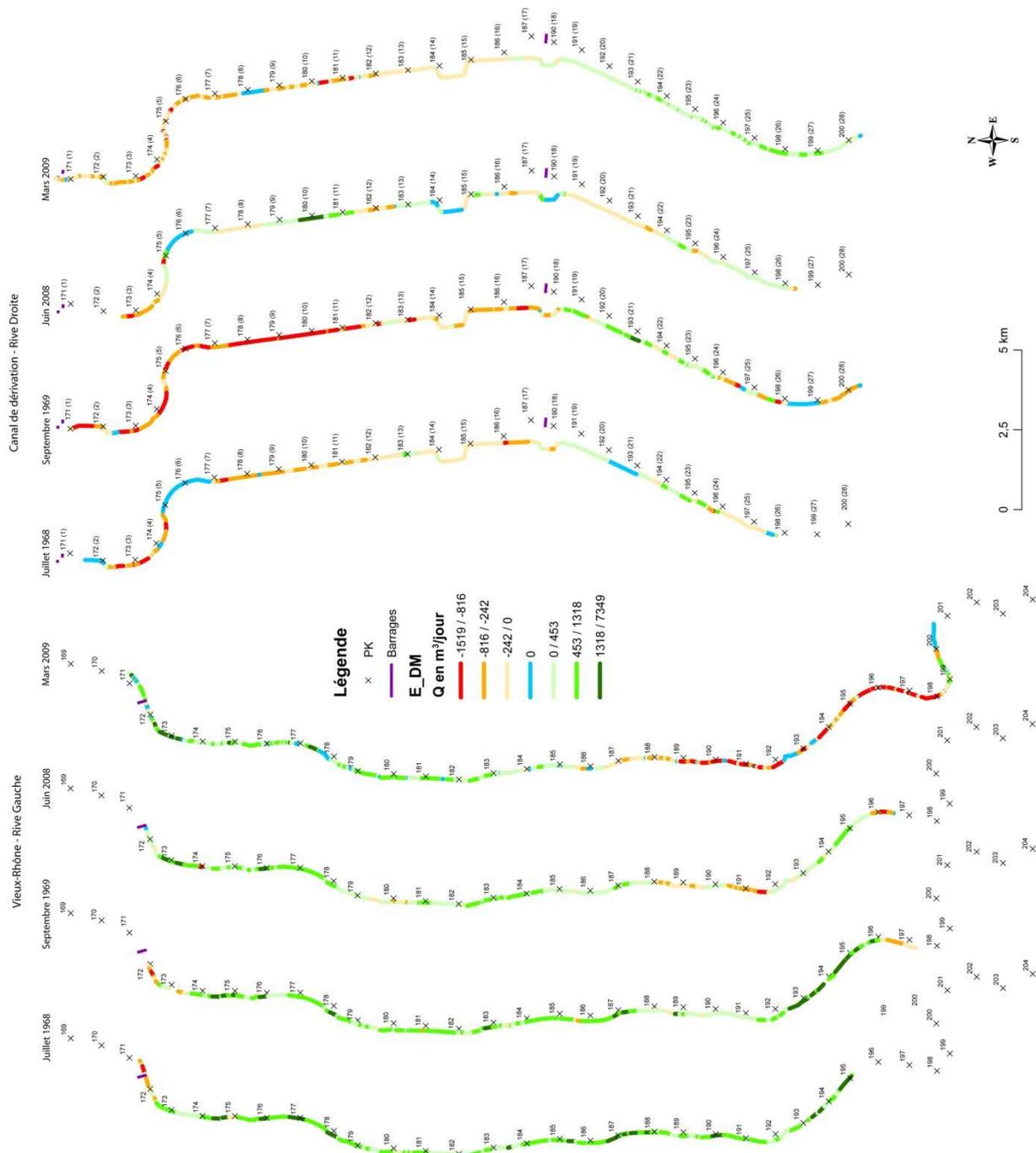
Tableau 26 : Bilan des échanges sur le canal d'amenée et le canal de fuite en rive droite du canal de dérivation

Au final, selon les périodes on observe :

- en basses-eaux (1968 et 1969) : une sectorisation et une intensité des échanges globalement similaires. Les échanges nappes vers fleuve sont importants et ceux depuis le fleuve vers nappe faibles (notamment en 1968). Les échanges canal vers nappe sont assez forts (1968) à forts (1968) et ceux nappes vers canal faibles.

- en moyennes-eaux (2009) : l'intensité des échanges est globalement forte dans les deux sens que ce soit avec le fleuve ou avec le canal de dérivation.

- en hautes-eaux (2008) : contrairement aux périodes précédentes où la sectorisation est bien marquée, on observe ici une forte alternance de secteurs drainant et alimentant la nappe. L'intensité des échanges est globalement faible dans les deux sens avec le fleuve et le canal de dérivation.



Carte 19 : Sectorisation comparée des échanges pour la plaine du Tricastin

4.5. Comparaison avec d'autres évaluations des échanges sur Donzère-Mondragon

Guégan (1972) évalue l'apport de la nappe à la rive gauche du Vieux-Rhône à 0,096m³/s (soit 8294m³/j) pour un tube de courant de 1km de large approximativement entre le PK 188 et le PK 189. L'évaluation que nous faisons des échanges avec la méthode SIG est la suivante :

- juillet 1968 : 9173m³/s/km
- septembre 1969 : 6502m³/s/km.

Ces résultats sont du même ordre de grandeur. Il n'est pas possible d'effectuer une comparaison avec 2008 et 2009 car les échanges s'effectuent dans le sens fleuve vers nappe sur ce secteur.

Guégan 1972 estime que l'apport du canal de dérivation à la nappe jusqu'à Pierrelatte (14km) est de $1\,652\,000\text{m}^3/\text{an}$ soit $4526\text{m}^3/\text{jour}$ ($323\text{m}^3/\text{jour}/\text{km}$). L'évaluation que nous faisons des échanges avec la méthode SIG est la suivante :

- juillet 1968 : $3004\text{m}^3/\text{jour}/\text{km}$
- septembre 1969 : $4305\text{m}^3/\text{jour}/\text{km}$
- juin 2008 : $1493\text{m}^3/\text{jour}/\text{km}$
- mars 2009 : $5339\text{m}^3/\text{jour}/\text{km}$

Nos valeurs sont donc globalement inférieures sauf pour mars 2009.

A titre indicatif, Parascandola (1982), en s'appuyant sur des modèles de simulation, dont il ne cite pas la source, évalue (Tableau 27) :

- l'apport de la nappe au Vieux-Rhône en rive gauche et au canal de dérivation (rive gauche, rive droite en aval de La Gaffière) à 340 million de m^3/an ($931\,500\text{m}^3/\text{jour}$) ;
- l'apport la nappe à la Gaffière à 4,5 millions de m^3/an ($12\,330\text{m}^3/\text{j}$);
- l'apport du canal de dérivation (rive droite en amont de La Gaffière) et l'apport Nord à la nappe de 220 millions de m^3/an ($602\,740\text{m}^3/\text{j}$);
- l'apport des aquifères 544e et 549a à la nappe à 35 millions de m^3/an ($95\,890\text{m}^3/\text{j}$).

L'évaluation que nous faisons de ces échanges sur des secteurs (en reprenant la même sectorisation fonctionnelle) où les calculs ont été effectués avec la méthode SIG est résumée dans le tableau suivant (Tableau 27).

	Q en m^3/jour				
	Parascandola (1982)	Juillet 1968	Septembre 1969	Juin 2008	Mars 2009
1. Vieux-Rhône RG	?	+146 704	+134 837	+60 482	+131 257
2. Canal de dérivation RG	?	+135 040*	+135 040	+135 040*	+135 040*
3. Canal de dérivation RD (aval)	?	+17 521	+22 427	+4 514	+127 105
Total : 1 + 2 + 3	+931 500	+299 265	+292 304	+200 036	+393 402
La Gaffière	+12 330	?	?	?	?
Canal de dérivation RD (amont)	+602 740	-38 793	-71 489	-10 365	-86 810
Nord		?	?	?	?
Aquifères 544e et 549a		+95 890	?	?	?

Tableau 27 : Comparaison de l'intensité des échanges avec des études antérieures

Au final, notre approche sous-estime les apports de nappe au Vieux-Rhône et au canal de dérivation par rapport aux résultats de modèles. Une des causes de cette différence peut être due au fait que la surface d'échange utilisée dans la méthode SIG ne tient pas compte de toute l'épaisseur mouillée au niveau du Vieux-Rhône et des contre-canaux du canal de dérivation.

Les apports à la nappe sont difficiles à comparer car ils manquent une partie des données. Ils semblent toutefois sous-estimés eux aussi.

Par ailleurs, il est regrettable que nous ne disposions pas des résultats récents du modèle ANTEA. La comparaison de nos résultats avec ceux-ci aurait été des plus intéressantes.

L'annexe 1 propose une réactualisation de la caractérisation des échanges sur Brégnier-Cordon. La surface d'échange (A) utilisées pour le calcul des échanges nappe/Rhône a été cette fois évaluée de la même façon que pour le secteur de Donzère-Mondragon. De plus, un secteur aval a été caractérisé suite à l'obtention d'une nouvelle piézométrie.

5. Métrique isotopique : Utilisation des isotopes stables (^{18}O) et radioactifs (tritium) pour évaluer les échanges nappe-rivière dans le secteur Donzère-Mondragon

Dans le cadre de l'Action de recherche ZABR/AE/RMC, un travail préliminaire a été effectué pour examiner la possibilité d'utiliser le traçage isotopique naturel par l'oxygène 18 et le tritium, sur le secteur de Donzère Mondragon. On s'appuie pour cela sur le fait que l'eau de la nappe alluviale est un mélange entre, d'une part les eaux issues des précipitations locales infiltrées directement, ou en provenance des petits bassins versants et des karsts qui bordent la vallée, et d'autre part les eaux du Rhône d'origine plus lointaine et plus élevée en altitude. Par ailleurs, on sait que les eaux du Rhône présentent une activité en tritium supérieure à la normale du fait de la présence de centrales nucléaires en amont, et on suppose que les précipitations locales sont probablement influencées de manière différente par le centre nucléaire du Tricastin.

5.1. 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 4) auquel se superpose un effet saisonnier (Figure 5), et également un effet d'altitude.

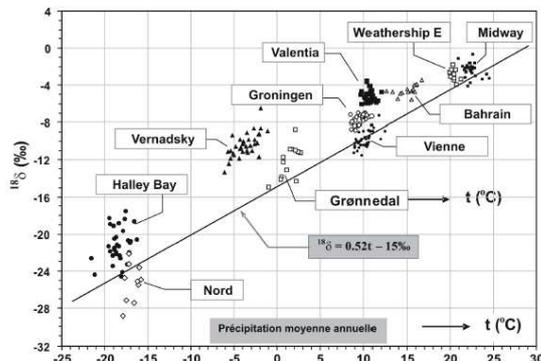


Figure 4 (à gauche) : Illustration de l'effet de température lié à la latitude sur le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations mondiales en fonction de la température de l'air. Halley Bay : Antarctique 75°S ; Vernadski Antarctique 65°S ; Grønnedal : Groenland 65°N ; Vienne : Autriche 48°N ; Groningen : Pays Bas 51°N ; Valentia : Irlande 51°N ; Bahrain : Golfe persique 26°N ; Midway : Océan Pacifique 28°N . D'après Mook (2001)

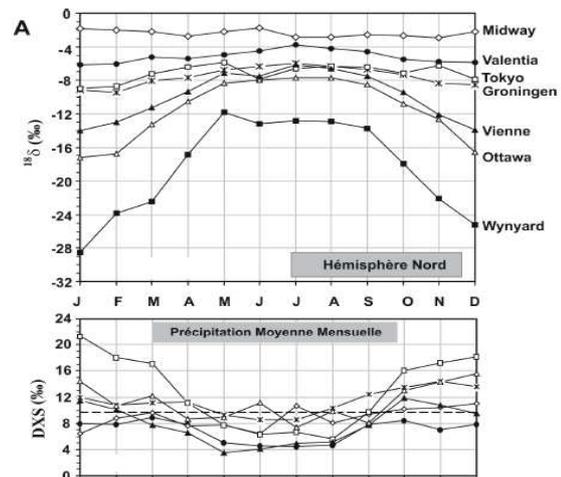


Figure 5 (à droite) : Variations saisonnières du $\delta^{18}\text{O}$ et de l'excès en deutérium (DXS) à partir de la moyenne pondérée d'échantillons de précipitations mensuelles (pcpt) prélevées sur quelques stations représentatives. D'après Mook, (2001)

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 6).

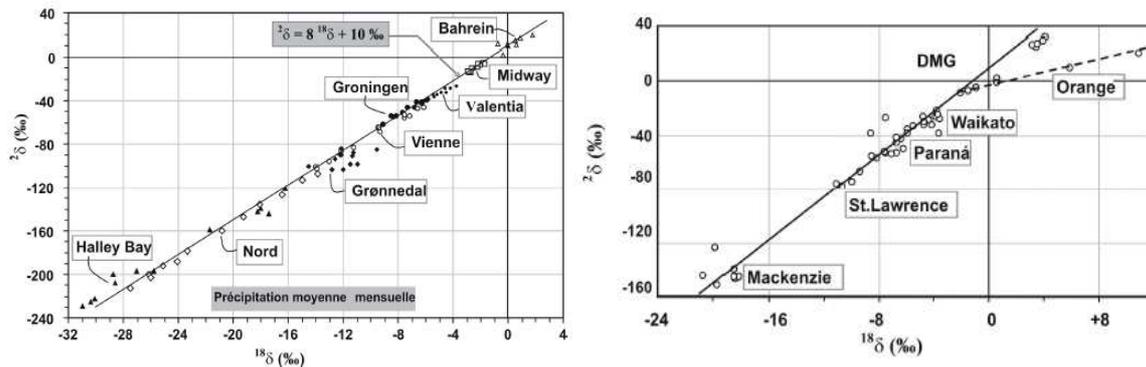


Figure 6 (à gauche) : Relation δD vs $\delta^{18}\text{O}$ pour les eaux de pluie. La droite des eaux météoriques mondiales est définie par la relation $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$. D'après Mook (2001)

Figure 7 (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)

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 7). 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).

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 8). 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).

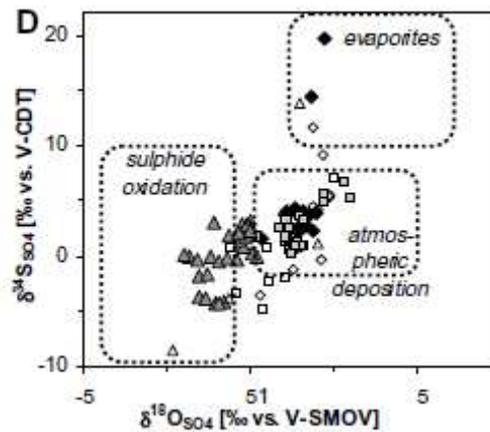


Figure 8 : Exemple d'étude des isotopes du soufre et de l'oxygène sur les sulfates des rivières Ruhr, Lippe et Ems (Allemagne). Représentation des différentes gammes isotopiques observées pour les sulfates issus de l'oxydation des sulfures, des dépôts atmosphériques ou de la dissolution de sulfates (évaporites sur le diagramme). D'après Stögbauer et al. (2008)

L'association des traceurs naturels $\delta^{18}\text{O}$ et δD sur la molécule d'eau et $\delta^{34}\text{S}$ sur la molécule SO_4 permet d'avoir une approche plus complète pour caractériser chacune des sources d'eau présente sur un bassin relativement restreint. Pour y parvenir, on s'intéresse simultanément à la signature isotopique mémoire des conditions de formation des précipitations et à la signature isotopique mémoire de la nature des terrains géologiques traversés par les eaux et à celle des apports anthropiques.

5.2. 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.

5.3. Travaux de terrain, résultats préliminaires et perspectives

Une première mission de reconnaissance a été effectuée avec l'ensemble des équipes impliquées dans le projet (avril 08). Cette première mission a permis sur la base de mesures de conductivités et de températures de localiser les zones pertinentes pour caractériser les différents écoulements de surface et souterrains. Une deuxième mission de terrain a été réalisée le 17 juin 2008, pour un échantillonnage spécifique aux isotopes. Dans la mesure du possible les points déjà reconnus ont servi de base à l'échantillonnage. Quelques points ont été rajoutés, en particulier pour contrôler les signatures d'entrée et de sortie du système (Rhône amont, Ardèche avant la confluence, Rhône et canal du Rhône à l'aval, Carte 20).

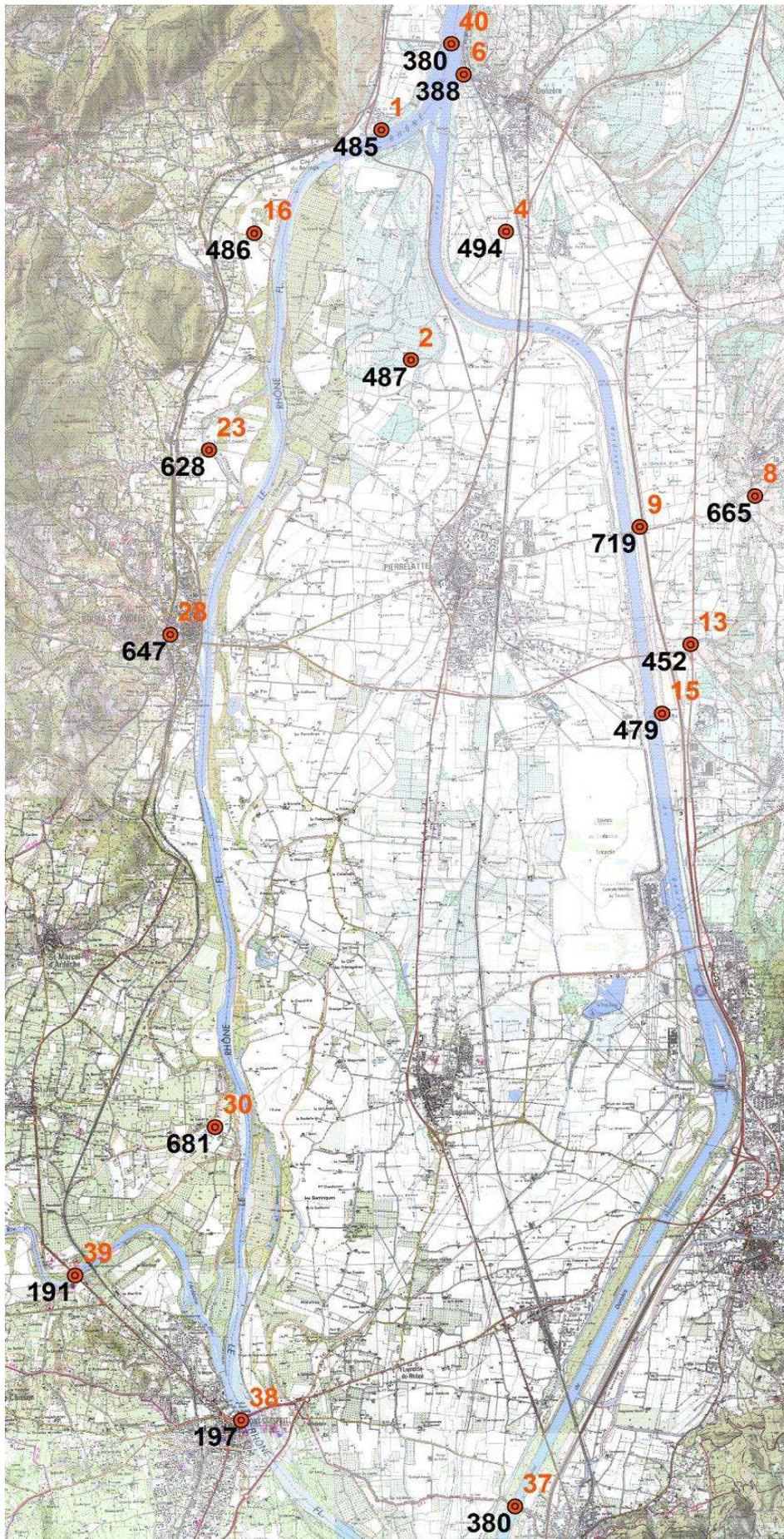
L'objectif était d'évaluer les signatures isotopiques des différents « corps d'eau » et surtout leurs différences relatives qui permettent le traçage. Il s'agissait aussi d'obtenir les informations nécessaires à la mise en place d'un futur suivi spatio-temporel

Parallèlement des mesures ont été effectuées sur les précipitations en utilisant des stations de suivi, déjà opérationnelles, au sud du site sur la région d'Avignon et un peu plus au nord sur le secteur de Valence, en particulier pour évaluer l'influence du Centre de Tricastin sur la teneur en tritium des précipitations. Les prélèvements ont été réalisés au pas de temps de l'événement pluvieux et les échantillons regroupés pour une analyse d'un échantillon moyen mensuel.

Les résultats sont regroupés dans le Tableau 28, le Tableau 29 et le Tableau 30.

N° analyse	Code échantillon	Conductivité de l'eau ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température de l'eau ($^{\circ}\text{C}$)	^{18}O $\delta\%$	T (UT)	Nom Description
Z 1	A (37)	380	16,2	-10,04	16,2 \pm 0,8	Rhône chenal, canal de dérivation, pont routier de Mondragon (D44)
Z 2	34 (amont) (38)	197	15,5	-6,82	15,2 \pm 0,8	Rhône rive droite, vieux-Rhône, pont routier de Pont-Saint-Esprit (D994)
Z 3	Ardèche (39)	191	15,6	-6,62		Ardèche chenal, pont routier de Saint-Just (N86)
Z 4	30	681	19,1	-4,78		Lône de La Tuilerie, plan d'eau sud par rapport à la petite route
Z 5	28	647	13,5	-6,36	32 \pm 1,4	Fontaine de Tourne
Z 6	23	628	15,5	-7,29		Lône de la Grange Ecrasée (Centre), plan d'eau sud par rapport au chemin
Z 7	16	486	20,9	-3,74		Gravière en rive droite du Vieux-Rhône (Lafarge)
Z 8	1	485	17,3	-8,59		Contre-canal, rive droite du Rhône, Cité du Barrage, ouvrage
Z 9	6 (amont) (40)	380	16,3	-10,14	15,6 \pm 0,9	Rhône chenal, Vieux-Rhône, pont routier de Donzère (D86)
	6	427	16			Canal de Pierrelatte (amont), zone sans courant à l'amont de l'ouvrage latéral
Z 10	6	388	16	-10,03		Canal de Pierrelatte (amont), zone avec courant à l'aval de l'ouvrage latéral
Z 11	4	494	17,6	-8,88		Canal de Pierrelatte (aval)
Z 12	2	487	15,1	-9,08		Lône de Saint-Ferréol
Z 13	9	719	20	-7,06		Contre-Canal, rive gauche canal de dérivation
Z 14	8	665	15,4	-6,48		Ruisseau au pied de la Garde-Adhémar
Z 15	13	452	17,1	-5,56		Ruisseau « Les Echavarelles »
Z 16	15	479	20,1	-6,89		Contre-canal, rive gauche canal de dérivation

Tableau 28 : Secteur Donzère-Mondragon. Analyses isotopiques, résultats et localisation des prélèvements



Carte 20 : Localisation de l'échantillonnage et valeurs des conductivités en $\mu\text{S/cm}$

cumul mensuel mm	mois	tritium (UT)
0,92	févr-09	
45,36	mars-09	8,3±0,7
58,86	avr-09	9±0,4
39,62	mai-09	12,9±0,9
57,49	juin-09	11,2±0,8
2,55	juil-09	
26,19	août-09	8,1±0,3

Tableau 29 : Résultats isotopiques actuellement disponibles sur les précipitations, secteur de Valence

cumul mensuel mm	mois	tritium (UT)
85	Juin 08	14,9±0,8
36	juillet	13,6±0,8
21,5	août	8,2±0,7
133	sept	6,6±0,7
141	oct	15±1
150	nov	29,6±1
119	déc	11,4±0,4
67	Janv 09	35±1
31	févr	40±1

Tableau 30 : Résultats isotopiques actuellement disponibles sur les précipitations, secteur d'Avignon

De ces tableaux de résultats il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- **Tritium**

L'influence de la centrale de Tricastin ne semble pas s'étendre de manière significative vers le Nord de la Vallée du Rhône où les teneurs restent proches de la normale au printemps. En revanche, il y a un manifestement des bouffées importantes vers le Sud en particulier en automne et en hiver (à confirmer) probablement en liaison avec les conditions météorologiques. Ceci laisse supposer une influence significative et plus constante sur la zone du site. La valeur relevée sur la Fontaine de Tournes (Tableau 28), source karstique du versant ouest, confirme cette hypothèse. En effet, le réservoir karstique, qui mélange les précipitations de plusieurs mois, fournit une valeur moyenne supérieure à 30 UT, qui caractérise, au moins la période de printemps 2008. On remarque que cette valeur est plus du double de celle observée sur le Rhône, à l'entrée du site au niveau du pont routier de Donzère.

- **Oxygène 18**

D'une manière générale, les eaux du Rhône présentent effectivement des valeurs très négatives, de l'ordre de -10‰ à l'entrée et à la sortie du secteur Donzère/Mondragon (mesures sur le Rhône amont, le canal de Pierrelatte amont et le canal de dérivation à Mondragon). Ce résultat est particulièrement intéressant car obtenu en période de forte crue pluviale, ce qui permet de penser que les crues de fonte des neiges pourront fournir des valeurs nettement plus négatives.

Le marquage local en ^{18}O se situe très clairement entre - 6‰ et - 7‰, avec de petites différences associées à l'altitude des bassins versants, comme le montre les valeurs relevées sur l'Ardèche, la Fontaine de Tournes et le petit ruisseau au pied de la Garde-Adhémar.

Les écarts relevés, aussi bien pour l'oxygène 18 que pour le tritium, sont tout à fait significatifs pour un traçage naturel, d'autant que les prélèvements ont été effectués en période de crue pluviale plutôt défavorable dans ce cas.

Au delà de la démonstration de la pertinence d'utiliser un tel traçage naturel, quelques observations plus ponctuelles peuvent d'ores et déjà être relevées :

- au niveau de Pont Saint Esprit, en rive droite du vieux Rhône, juste à l'aval de la confluence avec l'Ardèche, les eaux de cette dernière, en crue, ne sont toujours pas mélangées aux eaux du Rhône.

- à l'aval (point 4) un mélange significatif avec les eaux des versants. Le drainage des eaux de versant par le canal, à l'époque de la mesure est de l'ordre d'un tiers de l'écoulement.

- l'eau de la Lône de la Tuilerie et de la gravière montre des valeurs nettement enrichies en ^{18}O signe très probable d'une évaporation significative. On peut donc supposer un colmatage important des berges.

- enfin de nombreux points montrent des mélanges en proportion variable. Le point 9, contre canal en rive gauche draine essentiellement des eaux locales. Le point 1 contre canal rive droite, reçoit également une alimentation importante depuis les versants (plus d'un tiers).

- le point 23 (Lône de la grange écrasée) caractérise une alimentation essentiellement par des eaux locales, alors que la Lône de Saint Ferréol (point 2) est essentiellement alimentée par les eaux du Rhône.

Ces observations peuvent être corroborées par le schéma hydraulique et sont, bien sur, à replacer dans le contexte des fortes pluies qui ont précédé la période d'échantillonnage.

5.4. Conclusions

Ces résultats préliminaires montrent à l'évidence la pertinence des méthodes isotopiques pour appréhender les mélanges et le rôle respectif des eaux du Rhône et des eaux locales (pluie, cours d'eau) dans l'alimentation des nappes et les échanges éventuels. Certaines informations semi quantitatives sont d'ores et déjà disponibles pour la période correspondant à l'échantillonnage.

Pour aller plus loin, et aborder l'aspect quantitatif, il faut bien évidemment effectuer un suivi temporel sur des points caractéristiques.

Ce programme est en cours. Il comprend notamment des prélèvements à fréquence mensuelle ou saisonnière, sur le vieux Rhône (4 points), le bassin versant de l'Ardèche (rivière et sources) et sur la nappe alluviale (transects et points répartis sur l'ensemble du système).

Par ailleurs la mesure du radon pourra être envisagée au besoin. En effet, le radon ^{222}Rn peut être utilisé comme traceur des eaux souterraines. Le radon est produit naturellement dans les réservoirs aquifères par décroissance radioactive du radium ^{226}Ra . Une partie du radon produit dans la matrice passe en solution dans l'eau.

Du fait du dégazage les concentrations diminuent rapidement dans les eaux de surface où elles sont de plusieurs ordres de grandeur plus faibles. Le radon est facile à échantillonner et analyser. De plus, du fait d'une période courte (3,8 jours), il est particulièrement performant dans les processus de mélange rapide (échelle de temps de quelques heures à quelques jours). Ainsi, la présence de fortes concentrations en ^{222}Rn dans les eaux de surface traduit la proximité immédiate d'un apport d'eau souterraine. Inversement on peut déceler l'entrée d'eau de surface dans un aquifère, car elle détruit l'équilibre Ra/Rn.

La diffusion du Radon dans l'eau étant seulement de 2 cm, on peut considérer que sa migration est seulement due aux processus de migration de l'eau (advection et dispersion dans l'aquifère).

C'est donc un bon traceur des échanges, en particulier sur l'aspect qualitatif. La quantification des flux est possible même si cette technique est quelquefois limitée par le fait que l'on considère la concentration homogène dans l'aquifère, ce qui n'est pas toujours le cas (c'est pour cela que l'on couple avec d'autres traceurs et en particulier les isotopes stables de la molécule d'eau).

Cette technique, déjà utilisée pour quantifier les flux d'échange nappe / rivière, fait encore l'objet de travaux de recherche pour tester son applicabilité à différents contextes. Le laboratoire d'hydrogéologie est maintenant équipé d'un compteur pour la mesure de cet élément radioactif.

6. Métriques végétation aquatique et physico-chimique

6.1. Métrique hydrobiologique : végétation aquatique

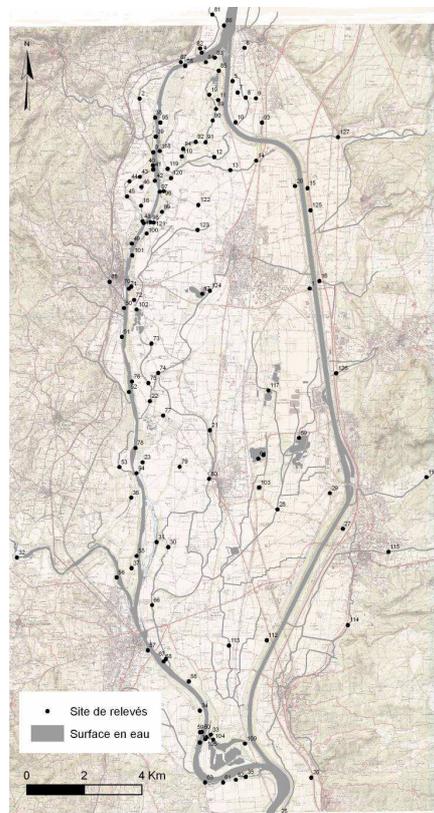
Ce chapitre vise à identifier l'origine et l'importance relative des apports d'eau souterraine aux écosystèmes aquatiques de surface à l'aide des végétaux aquatiques et de la physico-chimie des eaux. Les principes de la méthode de diagnostic utilisée et le protocole mis en œuvre dans le cadre de cette étude s'appuient sur la méthode de diagnostic élaborée par C. Amoros *et al.*, 2000 et E. Rivoire et G. Bornette, 2006, qui est décrite dans le rapport final de la phase 2 (Partie II. 2.2. Métrique hydrobiologique : végétation aquatique p.47).

Les résultats sont ici présentés, interprétés et discutés.

6.1.1. Méthodologie et caractéristiques des relevés de végétation

Campagne de terrain

Suite à une campagne de terrain ayant pour objectif l'échantillonnage systématique de la végétation dans les milieux aquatiques (juin - juillet 2009), 126 sites ont été échantillonnés sur tout le secteur de Donzère-Mondragon (Carte 21). Les relevés ont été systématiquement effectués sur tous les points d'eau et zones humides (lônes, lacs, gravières, bords du Rhône ...) non asséchés et accessibles. La méthode utilisée pour les relevés a été identique sur tous les sites, et a consisté en un transect de 2 mètres, perpendiculairement à l'axe d'écoulement principal de la zone humide. Suivant la taille du milieu échantillonné (ex : lônes de plusieurs centaines de mètres de longueur), plusieurs prélèvements ont pu être réalisés, de manière à prendre en compte l'hétérogénéité éventuelle amont aval des peuplements végétaux et donc des modes d'alimentation en eau des sites. La localisation du relevé a été choisie de manière à fournir une image représentative de la zone humide.



Carte 21: Sites échantillonnés sur le secteur de Donzère-Mondragon

Source : fond IGN, 2008 ; modifiée par H. Baillet, 2009

Les différentes espèces végétales ont été identifiées et leurs abondances ont été estimées sur le site grâce au double indice d'abondance de Braun-Blanquet (1932) (Tableau 31). Ces indices permettent d'obtenir l'abondance relative de chaque espèce sur le transect ainsi que leur mode de répartition.

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

Tableau 31: Les indices de la méthode de Braun-Blanquet (1932)

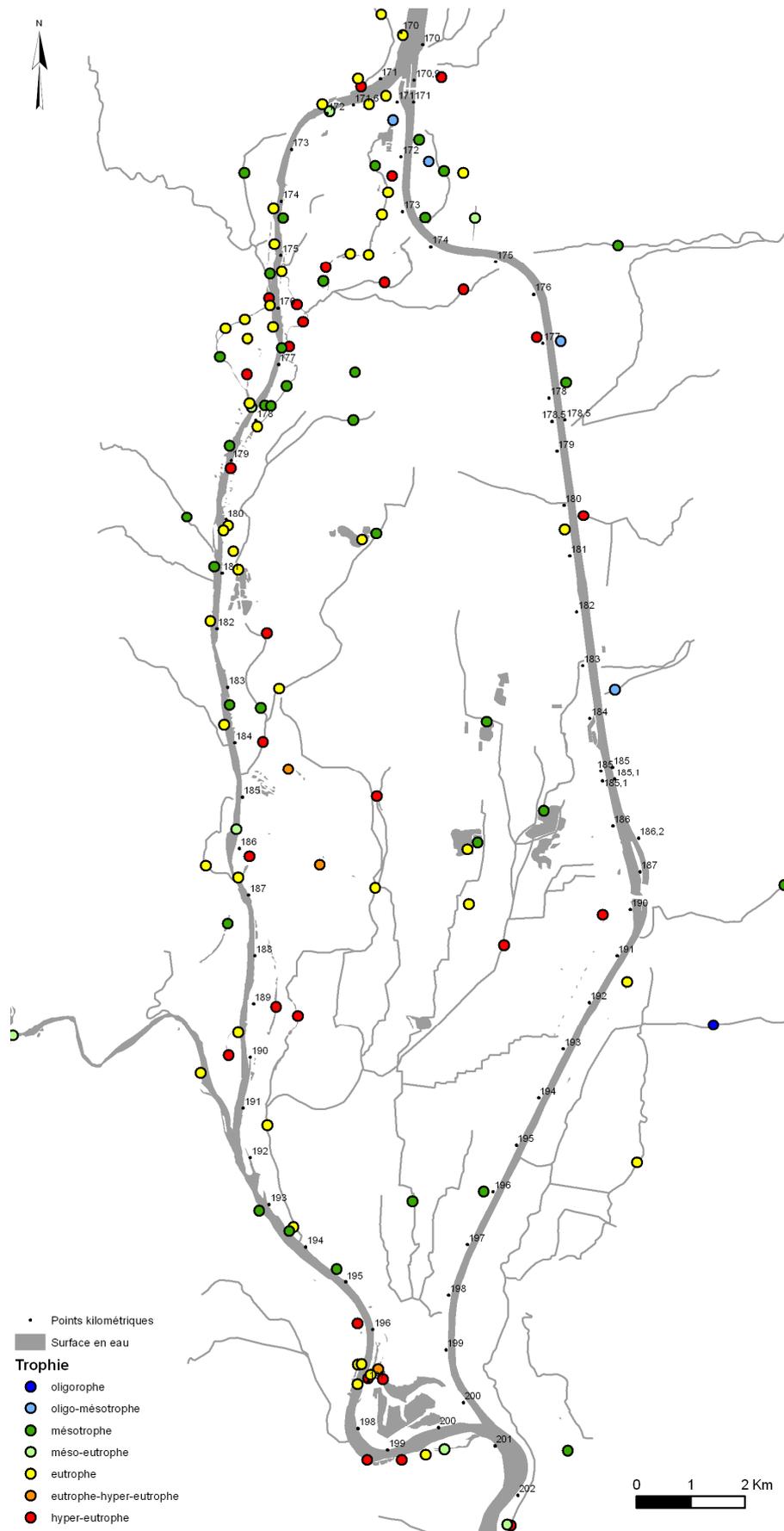
Les données floristiques ont ensuite été converties en indices de la qualité de l'eau (de oligotrophe à eutrophe) et d'alimentation par les eaux souterraines (présence et intensité relative des apports). Cette conversion repose sur la multiplication de l'abondance des espèces rencontrées dans un relevé donné avec leur affinité pour chaque classe des variables de fonctionnement identifiées ci-dessus, puis sur l'addition de ces valeurs obtenues pour chaque espèce au sein d'un relevé donné et pour chaque classe. Le résultat final consiste en une affinité relative du relevé pour chaque classe de fonctionnement. La valeur la plus élevée est considérée comme celle qui est la plus proche du fonctionnement réel du site pour cette variable (eg, si un site montre en abondance des espèces ayant une forte affinité pour des conditions oligotrophes, la note de ce site pour la catégorie « oligotrophe » sera plus élevée que pour les catégories mésotrophe ou eutrophe, et on considérera que le site est vraisemblablement oligotrophe. La variable trophie informe sur la qualité de l'eau de la masse d'eau superficielle échantillonnée. Si celle-ci est alimentée par des eaux souterraines, la trophie est en général moins élevée que celle des eaux de surface. De même, si le temps de séjour des eaux est important dans le plan d'eau, celui-ci a tendance à présenter des eaux plus riches en nutriments, et donc des espèces végétales plus tolérantes à l'eutrophisation. Les espèces végétales aquatiques informent sur le débit des apports d'eau souterraine, du fait que des apports croissants en eaux souterraines, froides, limitent la croissance des algues, les interactions compétitives entre celles-ci et la végétation macrophytique ; tout en maintenant des eaux limpides favorables à la croissance des plantes. Les eaux souterraines maintiennent également une bonne oxygénation des eaux interstitielles, et donc limitent également les phénomènes d'accumulation d'ammoniaque phytotoxique liés à la minéralisation de la matière organique.

6.1.2. Distribution spatiale des diagnostics fonctionnels obtenus

Trophie des eaux

La cartographie reflète la trophie des sites échantillonnés à l'aide du code couleur suivant :

- oligotrophe en bleu foncé,
- oligo-mésotrophe en bleu clair,
- mésotrophe en vert foncé,
- méso-eutrophe en vert clair,
- eutrophe en jaune,
- eutrophe-hyper-eutrophe en orange,
- hyper-eutrophe en rouge.



Carte 22 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques de la plaine alluviale du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon estimé par les exigences écologiques des espèces végétales composant les peuplements aquatiques

Source : H. Baillet, 2009

La majorité des sites échantillonnés dans le lit mineur du fleuve (berges) est eutrophe.

En ce qui concerne la plaine alluviale et ses versants, la situation varie en fonction de la position géographique des sites. En rive droite du Rhône, jusqu'à la confluence avec l'Ardèche, les stations sont mésotrophes à eutrophes, ce qui pourrait indiquer des apports ponctuels de versant mésotrophe.

Au sud du secteur, en rive droite du Rhône et sur l'île, deux zones se distinguent : une zone où les échantillons sont mésotrophes (en aval de la confluence avec l'Ardèche) et une zone à l'extrémité sud de l'aménagement où les stations sont en grande majorité eutrophes à hypereutrophes.

En rive gauche du canal d'amenée, les stations sont pour la plupart oligotrophes et oligo-mésotrophes, ce qui pourrait s'expliquer par des apports de versant oligotrophe. Les relevés réalisés sur l'île, en bordure du canal d'amenée, apparaissent comme mésotrophes à eutrophes. De plus, on remarque que l'amont des petits affluents est en général mésotrophe.

Le secteur se caractérise donc par une grande hétérogénéité trophique, symptôme de complexité des caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques.

6.1.3. Interpolation des résultats pour la trophie

L'interpolation permet de déterminer la valeur d'un « noeud » à partir d'un nombre limité de points d'échantillonnage.

La méthode utilisée ici, identique à celle utilisée dans le rapport final de la phase 2 est celle de la pondération par l'inverse de la distance (IDW : « Inverse Distance Weighted »), grâce au logiciel ArcGIS 9.2.

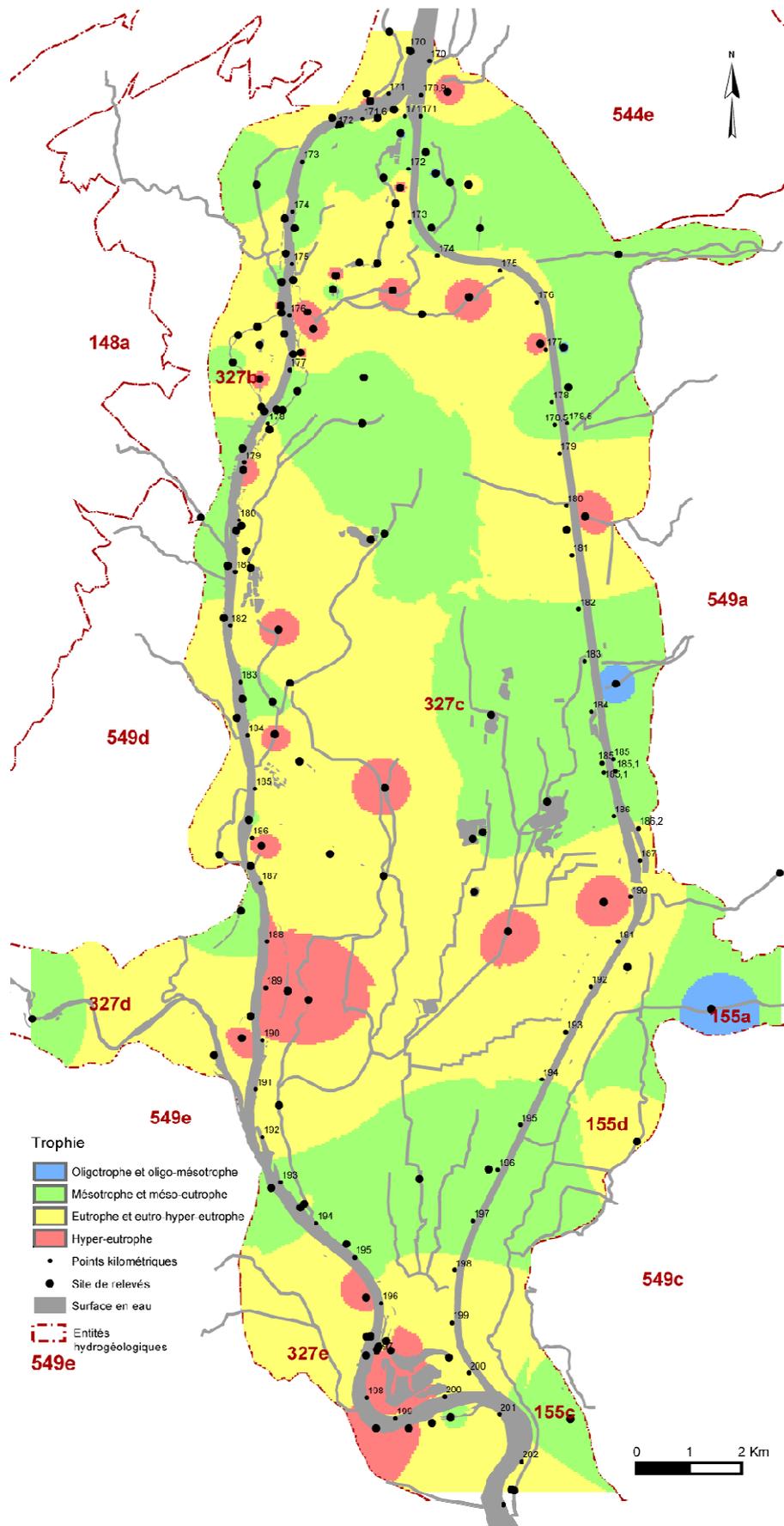
Le principe est d'estimer la valeur d'un point inconnu en fonction des points connus. Plus le point connu est proche, plus sa valeur est affectée d'un poids élevé. Ceci suppose que l'influence de la variable cartographiée décroît avec la distance qui la sépare de son emplacement d'échantillonnage.

Afin que la carte soit plus lisible seule les quatre classes principales de trophie ont été gardées pour l'interpolation :

- oligotrophe et oligo-mésotrophe en bleu,
- mésotrophe et méso-eutrophe en vert,
- eutrophe et eutrophe-hyper-eutrophe en jaune,
- hyper-eutrophe en rouge.

L'ensemble du secteur en rive droite du Rhône est de type mésotrophe à eutrophe ce qui pourrait correspondre à une nappe mésotrophe, de meilleure qualité que la nappe alluviale (probablement eutrophe), au vu du diagnostic trophique des points localisés sur le fleuve et sur l'île, qui viendrait étendre son influence jusqu'au cours d'eau en certains secteurs d'écoulements préférentiels (amont essentiellement, mais potentialités d'apports ponctuels au centre et en aval du cours d'eau).

Les conditions d'habitat des sites échantillonnés pourraient potentiellement biaiser le diagnostic de trophie. Par exemple, au niveau du point kilométrique (PK) 193, la zone a été caractérisée comme mésotrophe. Ceci pourrait ne pas être lié de manière simple à la qualité des eaux, mais au fait que les milieux échantillonnés soient particulièrement courants (apports de l'Ardèche), favorisant le remaniement des sédiments et l'élimination des sédiments fins potentiellement riches en nutriments, et provoquant une meilleure oxygénation du milieu (limitant la production d'ammonium et la biodisponibilité du phosphore) et donc une baisse apparente du niveau trophique. De même, au sud, le secteur apparaît comme hyper-eutrophe autant en rive droite du Rhône que sur l'île. Cela pourrait être lié au caractère stagnant et colmaté des milieux échantillonnés dans ce secteur, renforçant la tendance à l'eutrophisation observée dans les milieux alluviaux du secteur.



Carte 23 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon estimé via les relevés de végétation

Source : H. Baillet, 2009, Interpolation : pondération par l'inverse de la distance (ArcGIS 9.2.)

Pour vérifier qu'il n'y avait pas d'effet confondant entre la vitesse du courant [visuellement estimée de manière qualitative selon 5 classes : nul, eau renouvelée (approx. 0-5 cm/s), lent (approx. 5-10 cm/s), moyen (approx. 10-30 cm/s) et rapide (approx. >30cm/s)] et le niveau d'eutrophisation tel qu'il a été déterminé par les exigences écologiques des espèces présentes, nous avons réalisé un test de corrélation de Spearman entre ces deux variables pour l'ensemble des sites échantillonnés (les données ne suivant pas une loi normale), il paraît important de remarquer que globalement, sur tout le secteur d'étude, ces deux paramètres ne sont pas corrélés : p-value = 0,083 et $R^2 = 0,032$ (XLSTAT, 2009), ce qui permet d'interpréter les données de trophie en faisant abstraction a priori d'effets confondants liés aux conditions de courant.

La rive gauche du canal est principalement mésotrophe avec quelques points oligotrophes. Ceci suggère l'existence d'apports de versant alimentant la plaine alluviale, avec un passage potentiel sous le canal d'amenée au niveau du PK 178 et entre les PK 182 et 185. L'analyse des données géologiques suggère que cette situation est possible, du fait que l'entité hydrogéologique 327c passe sous le canal. Les deux zones d'hyper-trophie (au niveau des PK 170,9 et 180,2) sont probablement liées à des pollutions locales, car aucune station d'épuration ou source de pollution n'apparaît en claire sur la carte IGN (1/30 000^e). On peut cependant remarquer que le point situé au nord est localisé à l'aval de Donzère et que le point situé au niveau du PK 180 se trouve à l'aval d'une déchetterie, deux situations pouvant expliquer l'état d'eutrophisation élevé des sites. Le Lez (PK 192) oligotrophe, descend des collines du Tricastin (P. George, 1980). Les autres sites en bleu sur la carte sont plus proches d'un statut oligo-mésotrophe et correspondent vraisemblablement, étant donné leur situation respective, (entités géologiques 544e et 549a) à des zones de résurgences de versant de bonne qualité.

L'île de Donzère est majoritairement eutrophe avec la présence de zones hyper-eutrophes, probablement dues à des pollutions locales potentiellement agricoles, car le secteur est consacré en grande majorité à l'arboriculture fruitière et à la maïsiculture.

6.1.4. L'intensité des apports phréatiques

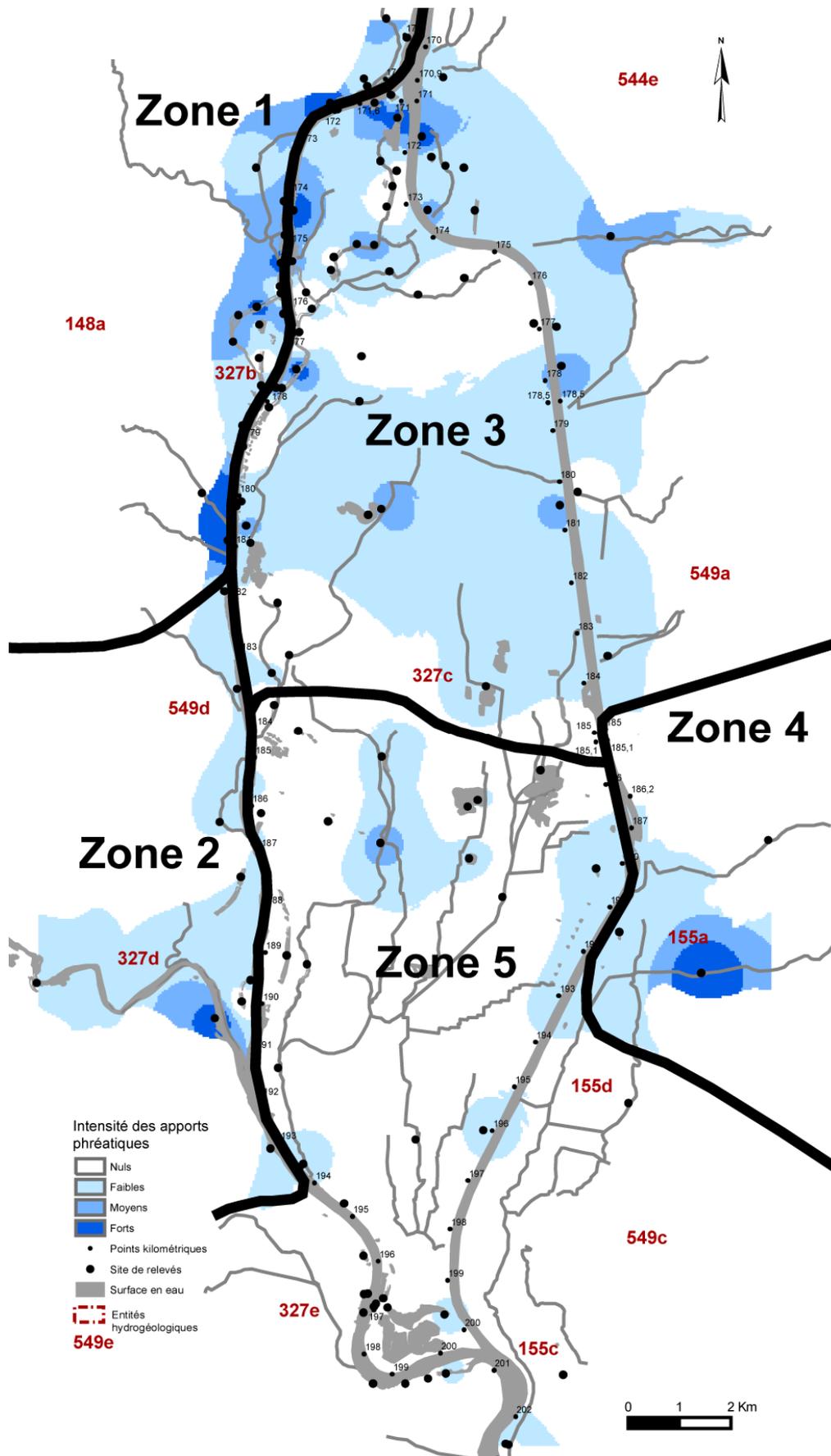
Tout le nord/ouest du secteur en rive droite du Rhône (zone 1) présente des communautés végétales aquatiques associées habituellement à des apports d'eau phréatique. L'apport d'eaux souterraines apparaît important du fait de la présence en abondance d'espèces témoignant de ces apports jusqu'au PK 182. Entre le PK 182 et le PK 194, toujours en rive droite du vieux Rhône (zone 2), ces apports apparaissent de moindre importance, mais restent présents. L'abondance des espèces associées à des apports d'eaux souterraines devient nulle après le PK 194.

En rive gauche du canal, des apports d'eaux souterraines sont également perceptibles même s'ils semblent moins intenses (abondance des espèces associées moyenne à faible), et plus hétérogènes (zone 3). Ceux-ci sont aussi perceptibles en amont et au centre de l'île, ce qui milite également en faveur d'un passage de l'apport de versant 544e sous le canal dans sa portion amont.

En aval et en rive gauche du canal (au niveau du PK 193, zone 4), seule la station située sur le Lez indique de forts apports d'eaux souterraines, cela était prévisible, étant donné la nature de ce cours d'eau dont les eaux proviennent directement des versants.

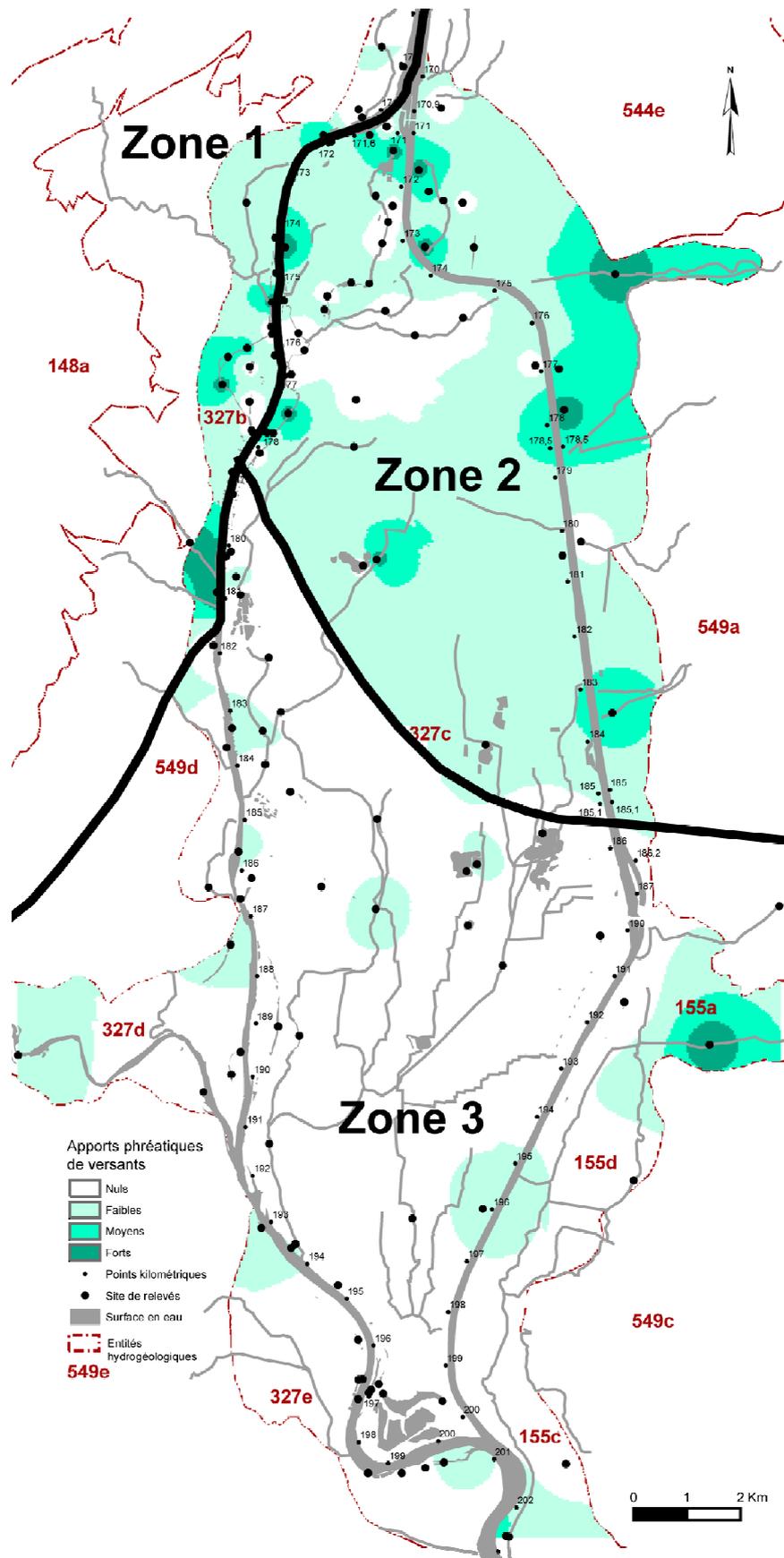
Le sud du secteur (rive gauche du canal et la plus grande partie de l'île, zone 5) semble ne pas recevoir d'apports phréatiques car l'indice d'apport phréatique est globalement nul. Dans cette zone cela semble cohérent car, d'après Guégan (1972), tout le sud du secteur serait colmaté. De plus, en aval de l'usine écluse de Blondel (PK 190), la nappe est profonde. Ces deux éléments pourraient expliquer qu'il n'y ait pas de résurgence de nappe dans ce secteur.

Selon toute probabilité, le Rhône draine, en rive droite, les nappes et les apports de versant (327b, 327d et 549e), mais les échanges avec la nappe 327e sont très faibles. En rive gauche, il semble drainer les apports de versant 544e et 549a jusqu'au niveau du PK 182. Dans la partie centrale et aval de l'île, les faibles niveaux d'alimentation phréatique et le niveau d'eutrophisation élevé suggèrent des sous-écoulements fluviaux de faible intensité.



Carte 24 : Estimation de l'intensité des apports phréatiques aux milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon

Source : H. Baillet, 2009, Interpolation : pondération par l'inverse de la distance (ArcGIS 9.2.)



Carte 25 : Apports des versants dans les milieux aquatiques de la plaine du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon (obtenus par combinaison des indices de trophie et d'apports phréatiques estimés indépendamment par la végétation)

Source : H. Baillet, 2009, Interpolation : pondération par l'inverse de la distance (ArcGIS 9.2.)

6.1.5. *Fréquence relative d'espèces associées à des apports souterrains de versant*

Cette probabilité est obtenue en combinant les indices d'apports d'eaux souterraines et les indices de trophie en un indice unique, sur la base de l'hypothèse que les apports de versant sont de meilleure qualité trophique que la nappe alluviale dans le secteur (voir rapport précédent pour plus de détails sur la méthode de combinaison des indices). La méthodologie utilisée pour calculer l'indice est détaillée dans le rapport précédent (cf méthodologie détaillée dans le rapport de phase 1 et Rivoire et Bornette 2006). L'affinité des espèces pour des eaux thermiquement stables est calculée et testée statistiquement pour chaque espèce, à l'aide d'un jeu de données concernant les peuplements végétaux et les caractéristiques physico-chimiques collectées sur 40 sites environ pendant un minimum de 1 an (périodicité mensuelle). Ces profils écologiques, lorsqu'ils ont été validés statistiquement (affinité significative de l'espèce végétale avec une classe de variabilité thermique) sont utilisés pour caractériser le fonctionnement probable de l'habitat. Le contenu floristique de chaque habitat est combiné aux exigences thermiques des espèces. L'affinité de l'habitat pour les eaux souterraines est obtenue par la somme des abondances des espèces pondérées par leur affinité pour les eaux souterraines (nulle à faible, intermédiaire, forte). L'indice obtenu est une estimation qualitative de l'influence relative des eaux souterraines sur le fonctionnement du site.

La Carte 25 permet de confirmer la provenance des apports souterrains décrits. Dans le nord/ouest du secteur (PK 172 à 181, zone 1), les apports latéraux proviendraient des entités hydrogéologiques 148a et 549d et sont très probablement drainés par le Rhône après avoir été repris par la nappe alluviale. Plus en aval, toujours sur la rive droite du vieux Rhône, seuls 2 secteurs semblent recevoir des apports de versant : au niveau du PK 187, ils pourraient provenir d'une résurgence ponctuelle de l'entité hydrogéologique 549d, et au niveau du PK 193, de la 549e. Le drainage des nappes 327d et 327e par le Rhône semble très faible ou absent, car il n'a pas été décelé par les indicateurs végétaux.

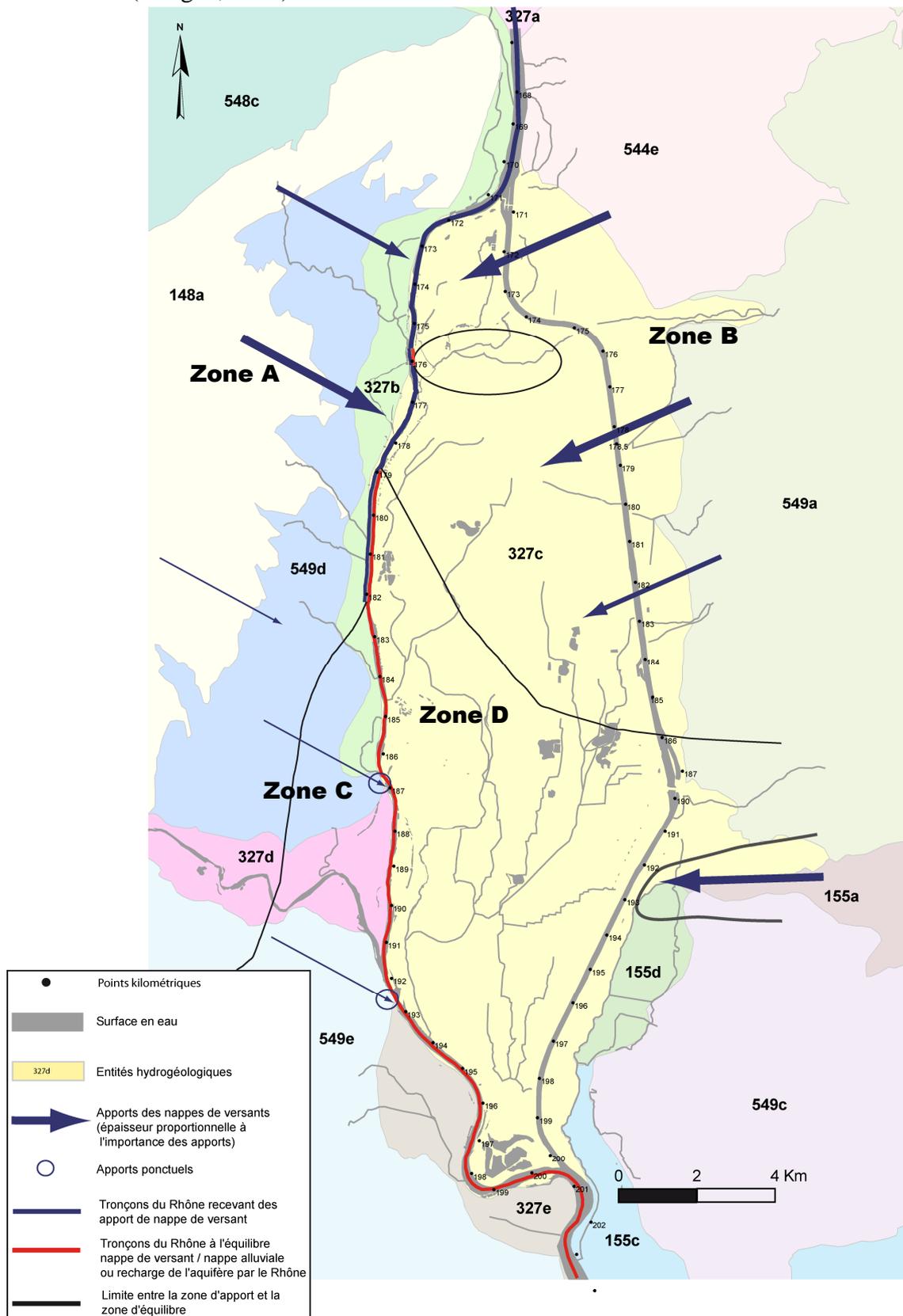
En rive gauche du canal d'amenée (zone 2), des signes d'apports souterrains relativement importants sont observables à l'amont (PK 170 à 185) et pourraient s'expliquer par un drainage des apports de versant 544e et 549a. Dans le nord de l'île, les possibles infiltrations sous le canal semblent confirmées. Au sud du secteur, et en rive gauche du canal, la probabilité d'alimentation souterraine est très faible à nulle, exception faite du Lez dont l'eau provient vraisemblablement des apports de versant. La zone 3 se caractérise soit par des eaux souterraines (versant-alluviale) à l'équilibre, et l'absence de drainage des apports par les milieux aquatiques, soit par une nappe alluviale alimentant les milieux alluviaux. Ceci paraît possible car les sites alluviaux sont pour la plupart eutrophes et les résultats de la Carte 22 montrent que ces deux zones sont en grande partie eutrophes.

6.1.6. *Synthèse*

Il est possible de dresser une carte de synthèse des échanges entre le Rhône et les eaux souterraines. Dans le nord du secteur (zones A et B) et plus modérément par le biais du Lez, les apports de versants ont été identifiés et sont relativement importants. Le Rhône draine très probablement les apports de versants en provenance des entités 148a et 549d en rive droite, et en rive gauche les eaux issues des entités 544e et 549a. Seul un petit secteur, au niveau du PK 176, ne reçoit pas ces apports : l'apport de versant est soit à l'équilibre avec la nappe alluviale, soit le Rhône recharge l'aquifère.

Entre le PK 179 et le PK 182, en rive droite, le Rhône draine la nappe 327b. En rive gauche, il draine plus modérément l'apport de versant 549a. Plus en aval, le Rhône paraît ne drainer aucun apport de versant, sur aucune rive (zones C et D), sauf très ponctuellement au niveau du PK 187 et du PK 192,5 où il pourrait recevoir des apports ponctuels des entités hydrogéologiques 549d et 549e. Soit la nappe alluviale et les apports de versants sont à l'équilibre, soit tout ce secteur est un secteur de recharge de la nappe par le Rhône. La configuration sédimentaire du sud de la nappe

alluviale est peu favorable aux échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans ce secteur. En effet, cette partie de la nappe alluviale est largement captive, puisque couverte d'une couche de limons (Guégan, 1972).

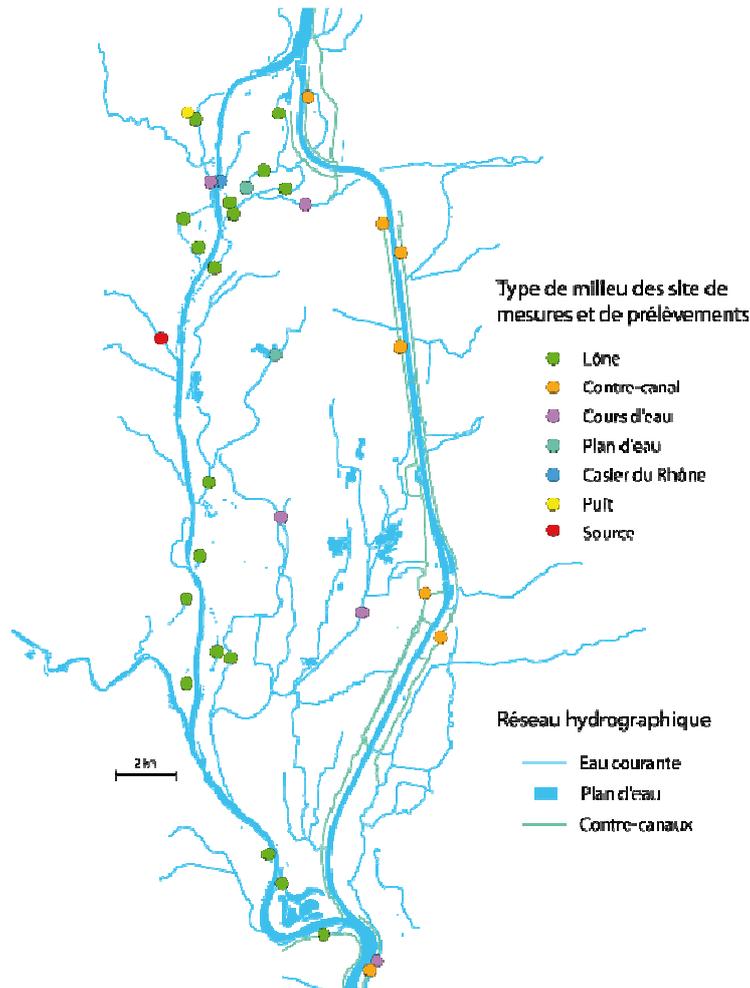


Carte 26 : Synthèse de l'évaluation des échanges nappe-fleuve dans le secteur de Donzère-Mondragon, reposant sur la valeur indicatrice des peuplements végétaux aquatiques

Source : H. Baillet, 2009

6.2. Analyses physico-chimiques et alimentation phréatique

6.2.1. Matériel et méthode



Carte 27 : Localisation et typologie des sites d'échantillonnage (BD Carthage, IGN)

Source : C. Rodriguez, 2009

Quatre campagnes de terrain, réalisées à intervalles réguliers, ont été menées sur le secteur de Donzère-Mondragon entre le 4 mai et le 21 juillet 2008. 35 sites ont été choisis dans l'objectif de couvrir au mieux le secteur et de prendre en compte tous les types de milieux aquatiques (Carte 27). Les sites de mesures et de prélèvements se répartissent ainsi :

- 18 dans des lônes
- 7 dans les contre-canaux
- 5 dans des cours d'eau
- 2 dans des plans d'eau
- 1 dans un casier du Rhône
- 1 dans une source
- 1 dans un puits

Chacun de ces sites a fait l'objet, à 4 reprises, de la mesure de la température, de la conductivité, du pH, de l'oxygène dissous et du taux de saturation en oxygène, ainsi que du prélèvement d'un échantillon d'eau afin d'en analyser en laboratoire la concentration en ammonium (NH_4^+), en phosphates (PO_4^-) et en nitrates (NO_3^-). Ces mesures et analyses avaient pour objectifs de caractériser la physicochimie des eaux afin de valider l'utilisation de l'indice végétation dans ce secteur plus méridional.

6.2.2. Résultats des analyses en composantes principales

Une ACP normée intersites (un site étant une station d'échantillonnage) a été effectuée avec l'ensemble des données de terrain (Figure 9). Afin de ne pas fausser l'analyse avec des paramètres redondants, les mesures du taux de saturation en oxygène ont été exclues. Seule la concentration en oxygène dissous a été intégrée à l'ACPn. Deux sites ont été évincés de l'analyse à cause de leurs valeurs extrêmes à certaines dates pour certains paramètres (ammonium et phosphates).

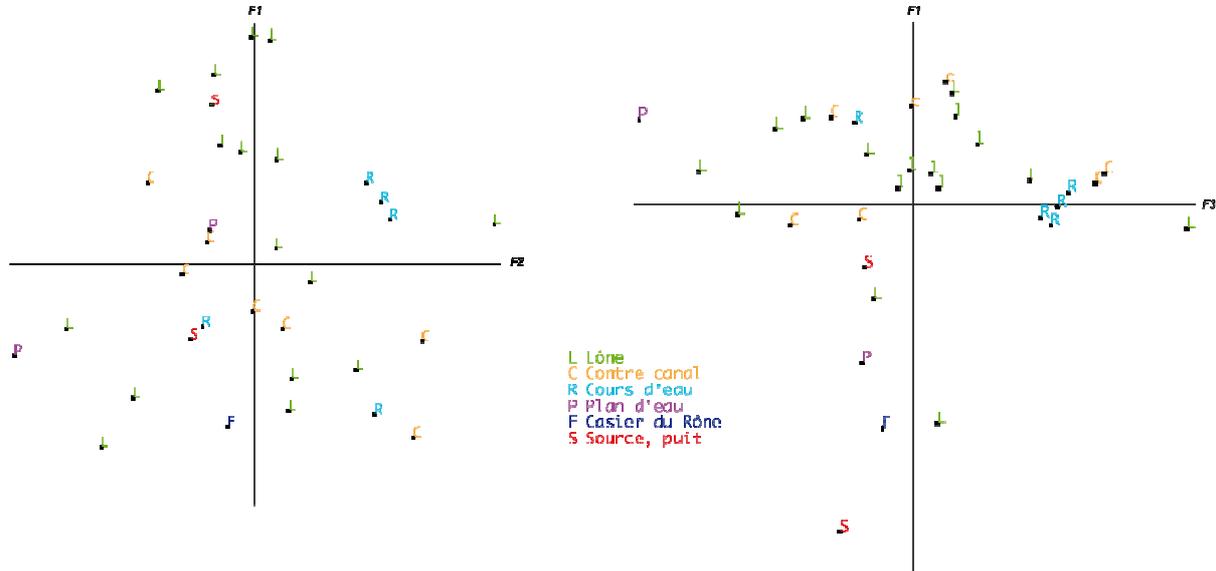


Figure 9 : Répartition des sites sur les axes factoriels 1, 2 et 3 (la couleur des points est indicative de la nature des sites échantillonnés)

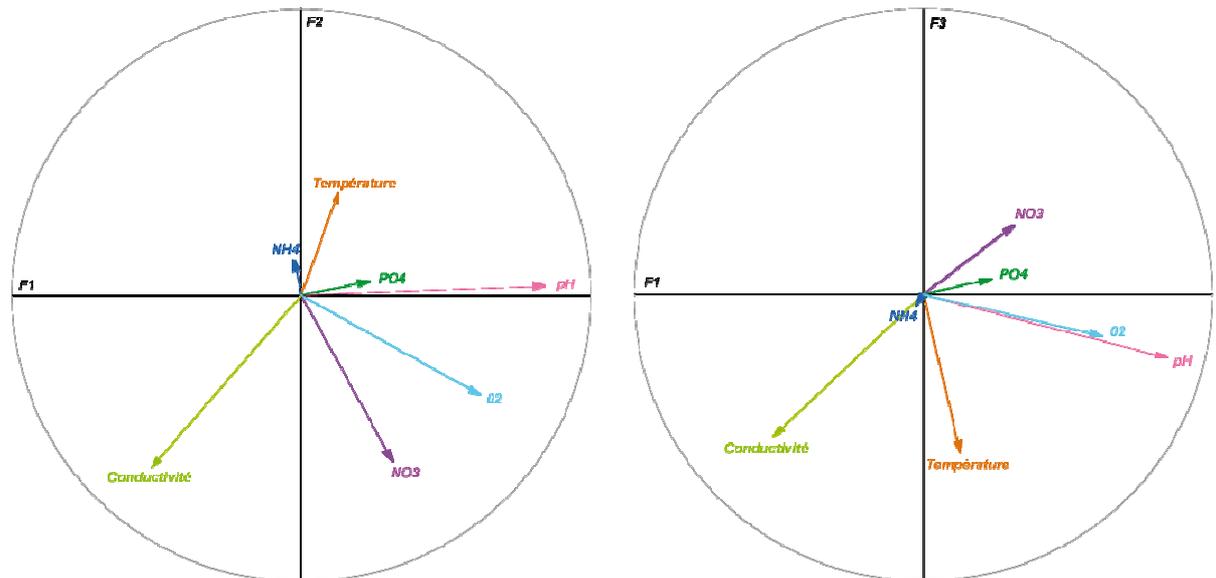


Figure 10 : Cercles des corrélations des paramètres physico-chimiques avec les axes factoriels 1, 2 et 3

La longueur des flèches indique le pourcentage d'explication du paramètre par les axes factoriels, tandis que l'angle des flèches avec les axes représente le niveau de corrélation entre le paramètre et l'axe en question. L'inertie interclasses (la part d'information liée aux différences physico-chimiques entre les sites) de cette analyse représente 53,69 % de l'inertie totale (l'information complète du tableau de données, i.e. des variances inter et intra sites cumulées). Le pourcentage d'inertie de l'axe factoriel 1 est de 33,47 % (de l'inertie interclasse), celle de l'axe 2 est de 14,12 % et celle de l'axe 3 de 14,12 %. Les 3 premiers axes factoriels totalisent 72,40 % de l'inertie de l'analyse intersites.

	NO ₃	pH	Conductivité	Température	NH ₄	PO ₄	O ₂ (mg)
NO ₃	1	+0.2266	+0.0886	-0.4566	-0.5104	+0.1572	+0.4534
pH	+0.2266	1	-0.3285	+0.2705	-0.0827	+0.2775	+0.6153
Conductivité	+0.0886	-0.3285	1	-0.0947	-0.1025	-0.1326	+0.0077
Température	-0.4566	+0.2705	-0.0947	1	+0.4617	-0.0251	-0.0824
NH ₄	-0.5104	-0.0827	-0.1025	+0.4617	1	-0.1267	-0.3427
PO ₄	+0.1572	+0.2775	-0.1326	-0.0251	-0.1267	1	+0.1134
O ₂ (mg)	+0.4534	+0.6153	+0.0077	-0.0824	-0.3427	+0.1134	1

Tableau 32 : Coefficients de corrélation entre les différents paramètres

Les cercles des corrélations de la première ACP (Figure 10) montrent le rôle peu significatif de l'ammonium et des phosphates dans la discrimination des sites. De plus, l'oxygène dissous est corrélé au pH. Une seconde ACP (Figure 11) a donc été effectuée en éliminant ces paramètres, dans l'objectif de chercher la meilleure discrimination possible des sites.

L'inertie inter-classes de cette deuxième analyse représente 69,25 % de l'inertie totale contenue dans le tableau de données. L'inertie de l'axe factoriel 1 est de 42,30 %, celle de l'axe 2 est de 23,04 % et celle de l'axe 3 de 4,5 %. Les 2 premiers axes factoriels totalisent une inertie de 72,46 %. Les sites sont donc potentiellement mieux discriminés par cette analyse.

Les coordonnées factorielles (pour les axes 1, 2 et 3) ont été cartographiées dans l'objectif de déterminer si des logiques spatiales régissent la répartition des paramètres.

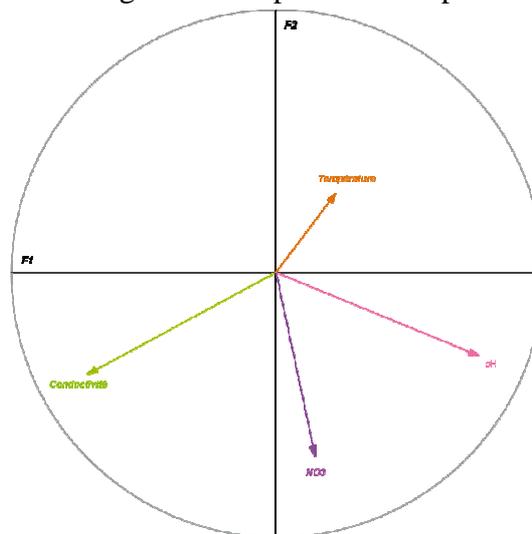


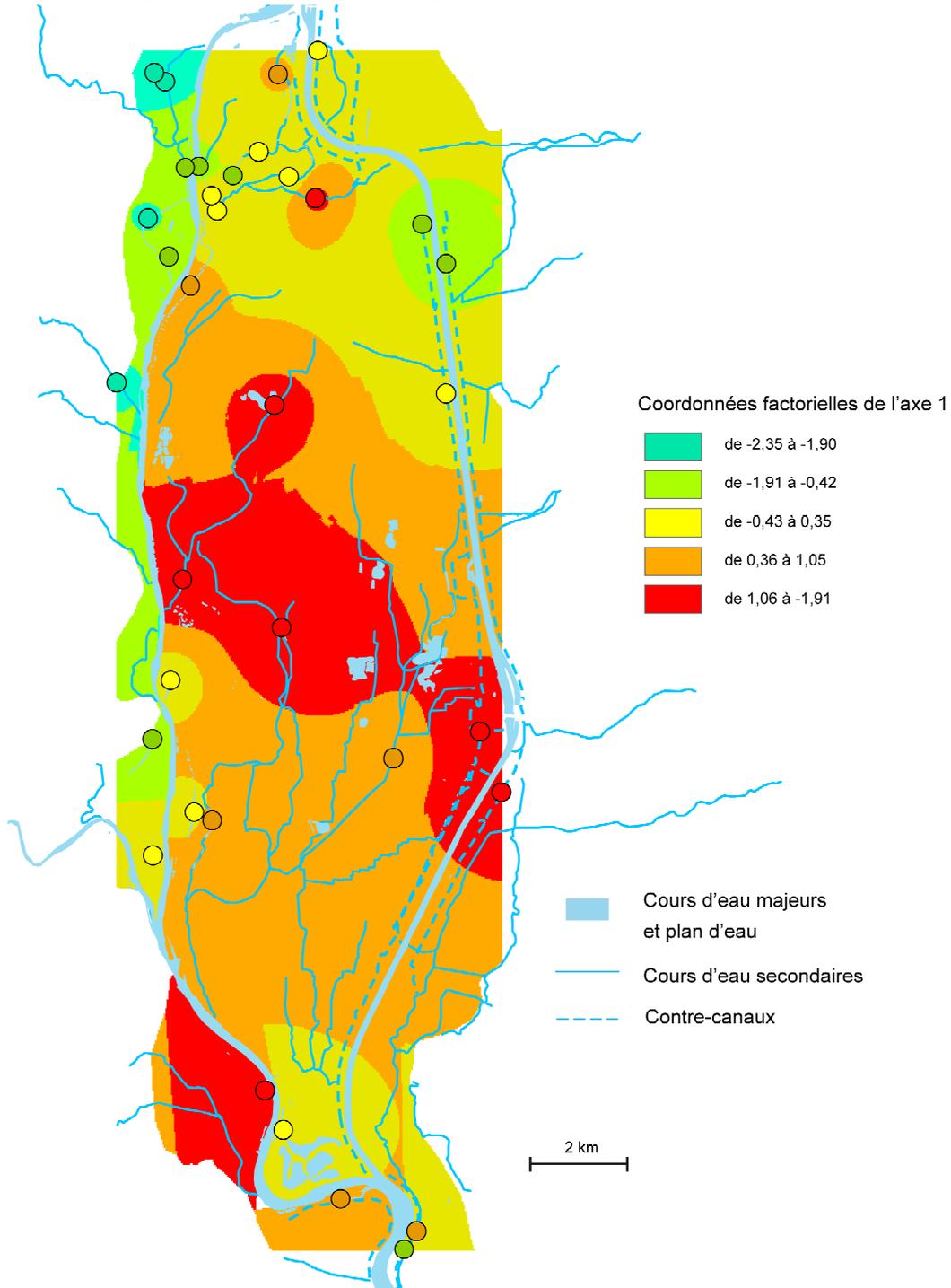
Figure 11 : Cercle des corrélations de la seconde ACP, avec les axes factoriels 1 et 2

6.2.3. Interprétation des résultats des ACP

Les deux premiers graphiques (Figure 9) mettent en évidence l'absence de corrélation claire entre les caractéristiques physico-chimiques des eaux et le type de milieu aquatique (eg. gravière, lône, cours d'eau) ce qui milite dans le sens de la pertinence de la mesure physico-chimique pour caractériser les échanges sans effet confondant du type d'écosystème.

Les cercles des corrélations de la première ACP (Figure 10) montrent le rôle peu significatif de l'ammonium et des phosphates dans la discrimination des sites. On observe que le pH est le paramètre le plus étroitement et intensément corrélé à l'axe 1. Les nitrates sont corrélés de manière importante uniquement avec l'axe 2 et la température avec l'axe 3. La conductivité présente la particularité d'être assez fortement corrélée avec les 3 premiers axes. Le cercle des corrélations de la seconde ACP (Figure 11) met en lumière la forte corrélation de la conductivité et du pH avec l'axe factoriel 1, et l'importance de la relation entre les nitrates et l'axe 2. La température semble intervenir de manière secondaire dans la discrimination des sites. Les coordonnées factorielles (pour

l'axe 1 et l'axe 2) de cette deuxième ACP ont été cartographiées dans l'objectif de déterminer si des logiques spatiales régissent la répartition des paramètres.



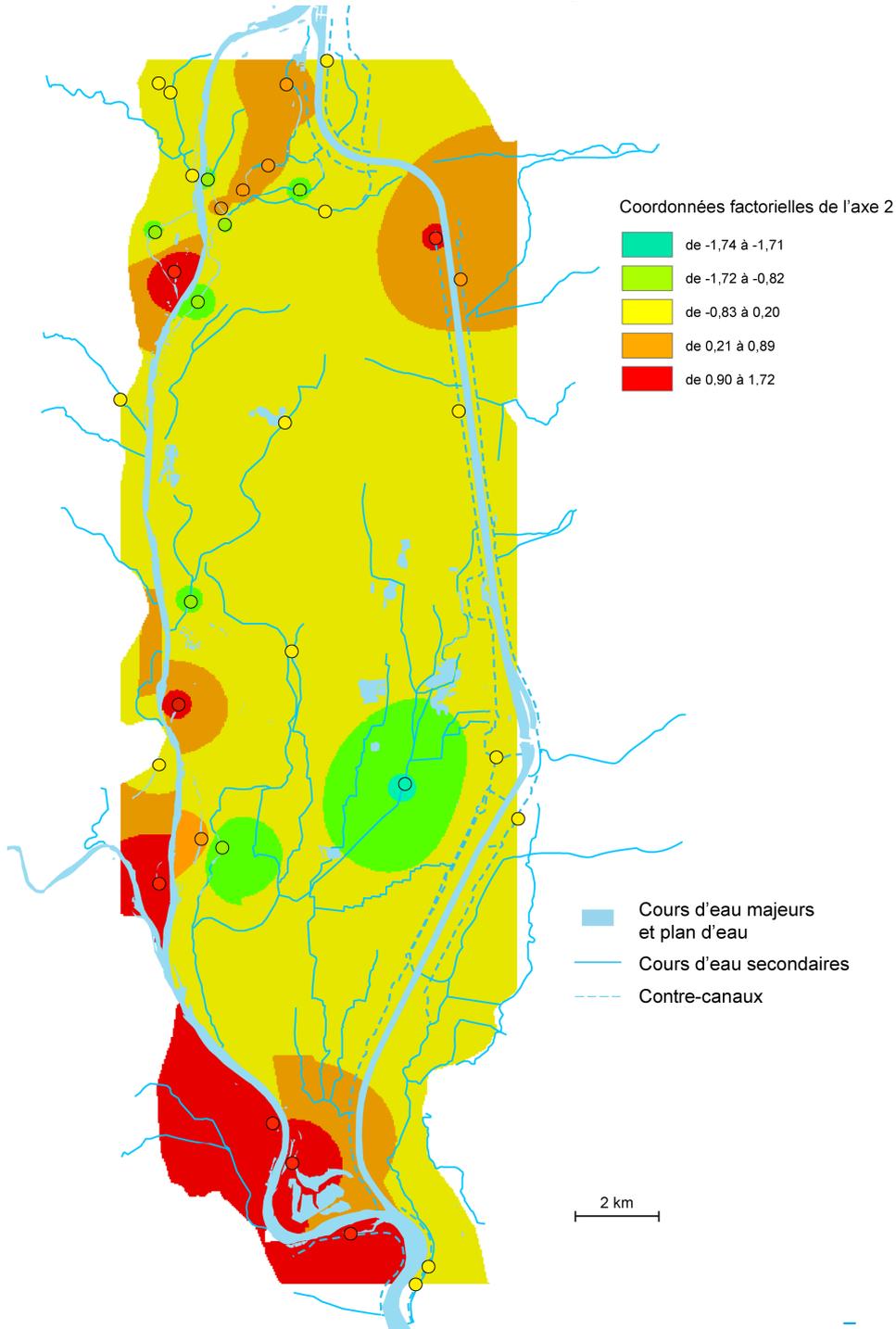
Carte 28 : Projection et interpolation des coordonnées factorielles de l'axe 1, de la seconde ACP sur l'espace géographique de Donzère Mondragon

Source : C. Rodriguez, 2009, Interpolation : pondération par l'inverse de la distance (ArcGis 9.2.)

La carte des coordonnées factorielles de l'axe 1 (Carte 28) permet de distinguer différents secteurs relativement homogènes. On observe sur la zone nord/ouest, en rive droite, des valeurs négatives sur l'axe 1. Il pourrait s'agir d'apports de versant présentant des conductivités élevées (ce paramètre est corrélé aux valeurs négatives de l'axe 1). A l'inverse, on remarque un ensemble homogène de points présentant des valeurs positives sur l'axe F1, au centre de la plaine. Le pH étant fortement corrélé positivement à l'axe 1, ceci pourrait signifier une influence des eaux du fleuve (sous

écoulements) car le fleuve présente en général des pH plus élevés et des conductivités faibles comparativement aux apports de versant.

La seconde carte (Carte 29) ne permet pas de dégager de logiques spatiales claires, à l'exception du secteur sud/ouest. Les nitrates et la température étant les paramètres déterminant de l'axe 2, cette zone se caractérise par sa concentration en NO_3^- et sa température. En effet, il s'agit de sites aux eaux très faiblement chargées en nitrates et relativement chaudes, ce qui correspond à l'Ardèche et à sa zone d'influence. Ce secteur semble donc être alimenté par les eaux de l'Ardèche.

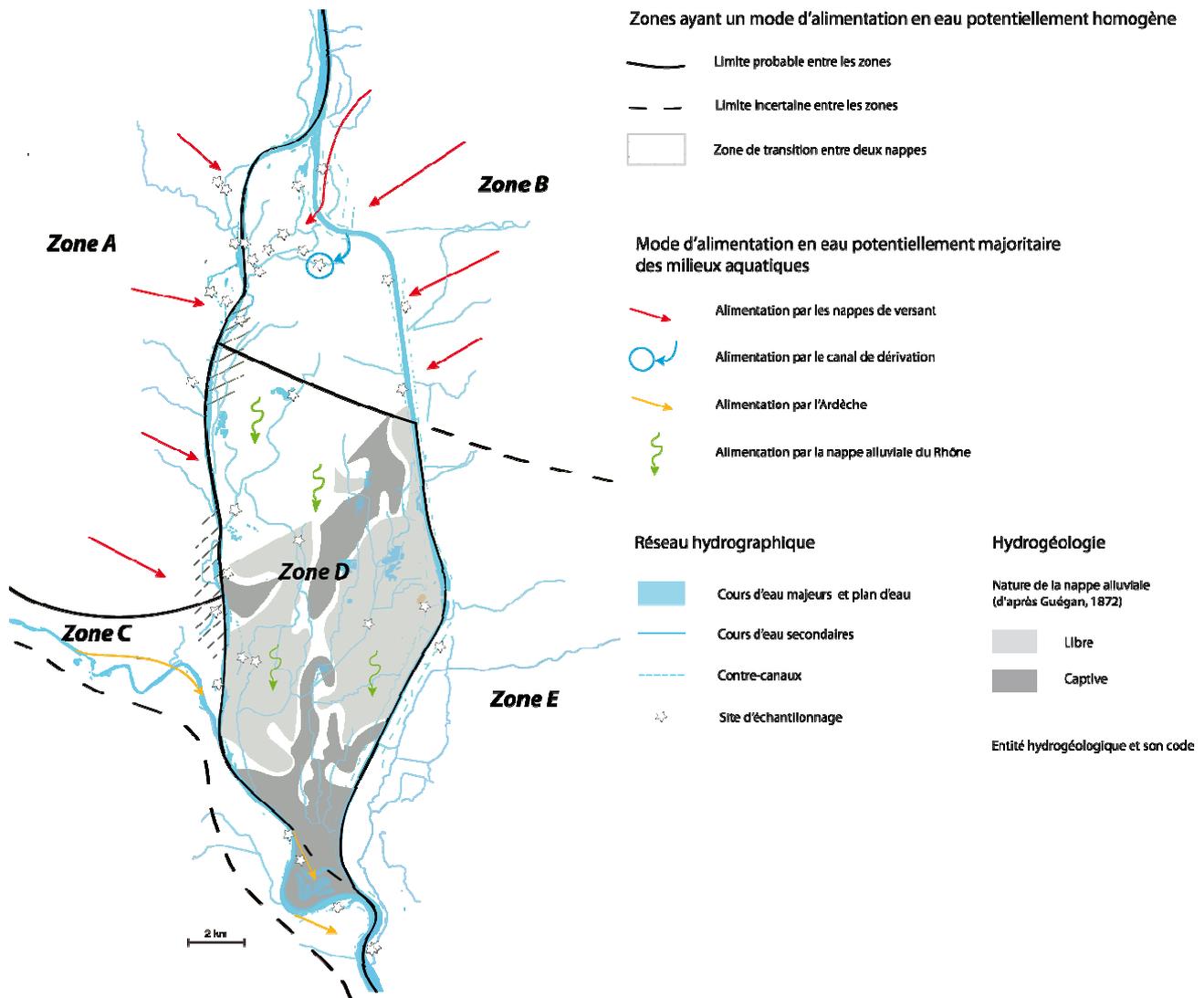


Carte 29 : Projection et interpolation des coordonnées factorielles de l'axe 2, de la seconde ACP sur l'espace géographique de Donzère Mondragon

Source : C. Rodriguez, 2009, Interpolation : pondération par l'inverse de la distance (ArcGis 9.2.)

6.2.4. Validation des résultats et critiques de la méthode

Cartographie de l'origine des eaux alimentant les milieux de surface



Carte 30 : Carte de synthèse des données physico-chimiques

Source : C. Rodriguez, 2009

La carte de synthèse (Carte 30) a été réalisée à partir des cartes interpolées précédentes et de leurs interprétations. Quatre zones ont été délimitées. La première, la zone A, se caractérise par des apports en eau souterraine, probablement issus de l'entité 549d, qui elle-même reçoit des eaux de l'entité 148a. Au nord, les apports de versant sont clairement mis en évidence alors qu'au sud, ils sont moins visibles. Les milieux aquatiques au sud de cette zone sont probablement alimentés par un mélange des eaux de versant et de celles de l'Ardèche. Le Rhône paraît donc drainer l'apport de versant ouest sur l'ensemble de son linéaire en rive droite entre Viviers et la zone de confluence de l'Ardèche.

La zone B, au nord/est, bénéficie également d'apports de versant. Il s'agit d'eaux souterraines provenant vraisemblablement des entités hydrogéologiques 544e et 549a. Les eaux souterraines semblent passer sous le canal de dérivation pour alimenter les milieux aquatiques. Les contre-canaux drainent la nappe alluviale du Rhône qui semble dans ce secteur, fortement alimentée par l'apport de versant. Les résultats physico-chimiques montrent un mélange plus ou moins important en fonction de l'éloignement, d'eau de versant et d'eau de la nappe alluviale. Un site d'échantillonnage pourrait être alimenté de manière significative par les eaux du canal. En effet, le

tronçon aval de la Berre semble récupérer les pertes du canal grâce à son lit graveleux, qui est aujourd'hui couvert de limons.

La troisième zone (zone C), correspond au secteur d'influence directe de l'Ardèche. Il s'agit d'eau à très faible conductivité, à température élevée et à pH bas. Il semblerait que ces eaux, peut-être mélangées à celle du Rhône, s'infiltrent à l'amont des méandres du sud pour alimenter les espaces aquatiques situés à proximité du fleuve. A l'exception du secteur du cône de déjection, l'Ardèche ne possède qu'une mince nappe alluviale puisque le substratum rocheux se situe peu profondément sous la rivière. Il n'existe pas de différences physico-chimiques significatives entre les eaux de surface de l'Ardèche et les eaux de sa nappe d'accompagnement puisque les échanges sont très importants. Cette zone semble donc être marquée par des infiltrations des eaux de surface vers le milieu souterrain ou par un équilibre entre eau de surface et nappe phréatique.

La zone D, se caractérise par une probable absence d'apports de versant, comme en témoignent les caractéristiques physico-chimiques (pH élevé, etc). Il s'agit d'un secteur où les milieux aquatiques sont probablement alimentés majoritairement par les eaux de la nappe alluviale du Rhône, qui présente en général des conductivités intermédiaires, et des pH relativement élevés.

Les sites les plus proches du fleuve bénéficient très certainement d'apports des eaux du fleuve qui s'infiltrent en rive gauche, notamment au niveau de la confluence de l'Ardèche. En effet, il est probable que les eaux de cette rivière s'écoulent préférentiellement le long de la rive droite du Rhône, les eaux du Rhône sur la rive gauche et favorisent ainsi les infiltrations. Le Rhône, en rive gauche, semble donc s'infiltrer dans la nappe ou être en équilibre avec celle-ci. La nappe alluviale étant relativement profonde au niveau du canal de fuite, on peut supposer que les sites d'échantillonnage éloignés du Rhône ne sont alimentés que par les eaux de pluie et par les affluents, ainsi que par leurs sous-écoulements. On remarque également, grâce à des informations complémentaires (Guégan, 1972) sur la nature de la nappe alluviale, que sur certains secteurs la nappe est captive (sous une couche de limons relativement imperméable) et qu'elle ne peut donc pas alimenter les milieux de surface à ces endroits. En outre, la captivité de la nappe sur certaines zones favorise, quand elle est en charge, les résurgences phréatiques sur les secteurs où elle est libre.

La dernière zone, la E, est probablement, mais sans aucune certitude, sous l'influence conjointe de la nappe alluviale du Rhône et des cours d'eau de la rive gauche. La faible densité spatiale des données sur cette zone n'a pas permis de mettre en évidence l'influence des affluents, notamment du Lez. Le manque d'information sur cette zone ne permet pas de conclure sur l'alimentation en eau des milieux aquatique de la partie sud/est du territoire d'étude.

6.3. Evaluation de la méthode

Comparaison des résultats avec les données des analyses physico-chimiques

La comparaison des résultats obtenus avec la métrique macrophytique (Carte 26) et les données physico-chimiques (Carte 30) fait apparaître plusieurs éléments.

Les données physico-chimiques suggèrent une influence de versant (148a et 549d) plus large que les végétaux, et la zone A descend plus au sud, jusqu'au niveau de la nappe de l'Ardèche (327d). Les indicateurs végétaux limitent cette influence au niveau du PK 182, la nappe alluviale semblant ensuite *ad minima* à l'équilibre avec l'apport de versant. Cet écart pourrait être dû à des pollutions des sites de surface à l'aval du secteur, limitant la robustesse du diagnostic fourni par la végétation, en favorisant des espèces polluo-tolérantes.

Les zones B et D ont sensiblement les mêmes contours et les deux études aboutissent à la même conclusion. Dans la zone B, le Rhône semble drainer les apports de versant 544e et 549a alors que dans la zone D il recharge la nappe ou est en équilibre avec les apports de versants. Au niveau du Lez, la situation est un peu différente dans la mesure où la végétation indique un fort apport de versant non visible avec les analyses physico-chimiques.

Dans la zone C, l'indice macrophytique n'indique que deux apports très ponctuels et de faible intensité par les entités 549d et 549e alors que les analyses physico-chimiques permettent de mettre en évidence une alimentation par les eaux de l'Ardèche.

Même si les sites de prélèvements physico-chimiques sont sensiblement moins nombreux que les sites prospectés pour la flore, les résultats des deux approches sont très proches et permettent de confirmer la validité de la méthode.

7. Métrique invertébrés souterrains

7.1. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques

L'un des principaux résultats issus des recherches menées au cours des années 1980 et 1990 sur le milieu interstitiel des grands fleuves, est le rôle majeur joué par les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines, sur la distribution et la composition des communautés interstitielles (ou hyporhéiques), aussi bien au niveau du chenal actif que de la plaine alluviale. C'est donc tout naturellement que nous avons souhaité tester l'utilisation des communautés souterraines pour reconstituer, cartographier et évaluer les échanges entre les cours d'eau et leur nappe. Au cours de la phase 2 de ce programme, nous nous étions focalisés sur un secteur du Haut-Rhône français (le secteur de Brégnier-Cordon), mais celui-ci s'est révélé très pauvre en faune stygobie (faune adaptée à la vie dans le milieu souterrain), certainement pour des raisons biogéographiques liées aux dernières glaciations. Pour cette phase 3, nous avons donc centré nos efforts sur le secteur de Donzère-Mondragon, situé plus au Sud, plus éloigné de la limite des glaciations et connu pour héberger une faune plus diversifiée, donc potentiellement plus informative. 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 de ce secteur. Pour cela nous utilisons deux approches complémentaires liées à la présence d'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'espèces stygobies est liée à une arrivée plus ou moins récente d'eau souterraine. De la même façon, la proportion de ces espèces au sein de peuplements (constitués à la fois d'espèces stygobies et d'organismes vivants généralement à la surface des sédiments) est corrélée à l'intensité et au sens des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Jusqu'à présent notre approche était basée sur l'hypothèse que des fortes arrivées d'eaux souterraines apportent un plus grand nombre d'espèces stygobies tout en limitant la pénétration d'espèces de surface alors que de faibles arrivées d'eaux souterraines favorisent la pénétration d'espèces de surface dans les interstices et limitent la présence d'espèces stygobies. Cette approche faunistique simple était jusque là 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. Des études récentes, en amont du Rhône sur le secteur de Brégnier-Cordon, ont comparé l'efficacité de cette approche avec des résultats d'analyses isotopiques des eaux basées sur les isotopes stables de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) et de l'hydrogène (D/H). Les résultats montrent clairement que **l'abondance des individus stygobies** (nombre d'individus stygobies) est beaucoup plus efficace que la richesse en stygobies (proportion d'espèces stygobies) pour mettre en évidence l'arrivée des eaux souterraines, surtout dans les secteurs où l'on retrouve un mélange d'eau de surface et d'eau souterraine important (Simon et al., en préparation). Pour la phase 3 de notre programme nous avons choisi de remplacer la proportion d'espèces stygobies (Nombre d'espèces stygobies/Nombre total d'espèces) par l'abondance en stygobies (nombre d'individus stygobies).

- **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 intermédiaires, liés à des espaces disponibles de grandes tailles et des circulations rapides (karsts).

L'observation de ces espèces sur un secteur très diversifié tel que celui de la chute de Donzère-Mondragon pourrait procurer de précieuses informations pour 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 sur la chute de Brégnier-Cordon (cf. phase 2 du projet) la localisation des espèces indicatrices des nappes profondes a clairement mis en évidence des arrivées d'eaux souterraines profondes dans le secteur du Mont Cordon. De même, on pourrait s'attendre, du fait de la présence de formations encaissantes de natures variées susceptibles de contribuer à l'alimentation de l'aquifère alluvial, à certaines spécificités du cortège faunistique sur les versants côté Ardèche (Creuzé des Châtelliers, 1991) mais aussi côté Drôme.

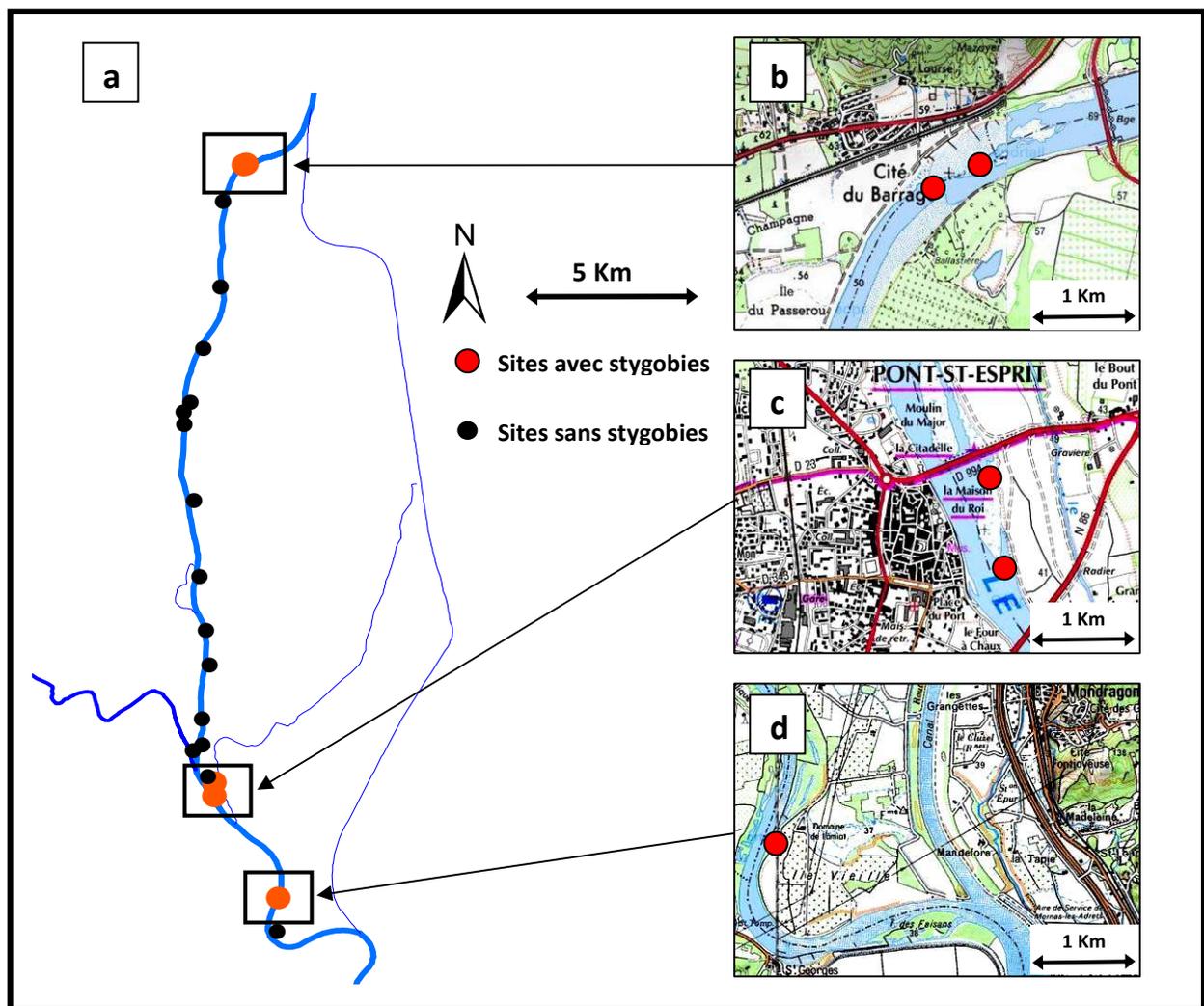


Figure 12 : Localisation des sites de la littérature sur le secteur de Donzère-Mondragon : a) localisation des sites sur l'ensemble de la chute ; b) sites au niveau de Saint-Montant ; c) sites au niveau de Pont Saint-Esprit ; d) site au niveau de Mondragon

7.2. Stations échantillonnées

- Synthèse des données de la littérature

Le secteur de Donzère-Mondragon n'a que peu été étudié au cours des dernières décennies. Dans ce secteur, 19 points d'échantillonnage de la faune interstitielle, distribués uniquement sur le Rhône

court-circuité, ont été recensés dans la littérature (Creuzé des Châtelliers, 1991, Plénet et al. 1996) (Figure 12a). L'examen des résultats obtenus lors de ces études montrent la présence de trois espèces stygobies (Plénet et al. 1996) : *Niphargus sp.*, *Proasellus walteri* et *Pseudocandona zschokkei* au niveau du village de Saint-Montant (Figure 12b) et de *Niphargus sp.* (Creuzé des Châtelliers, 1991) sur trois sites situés à l'aval immédiat de la confluence entre le Rhône court-circuité et la rivière Ardèche (Figure 12c et d).

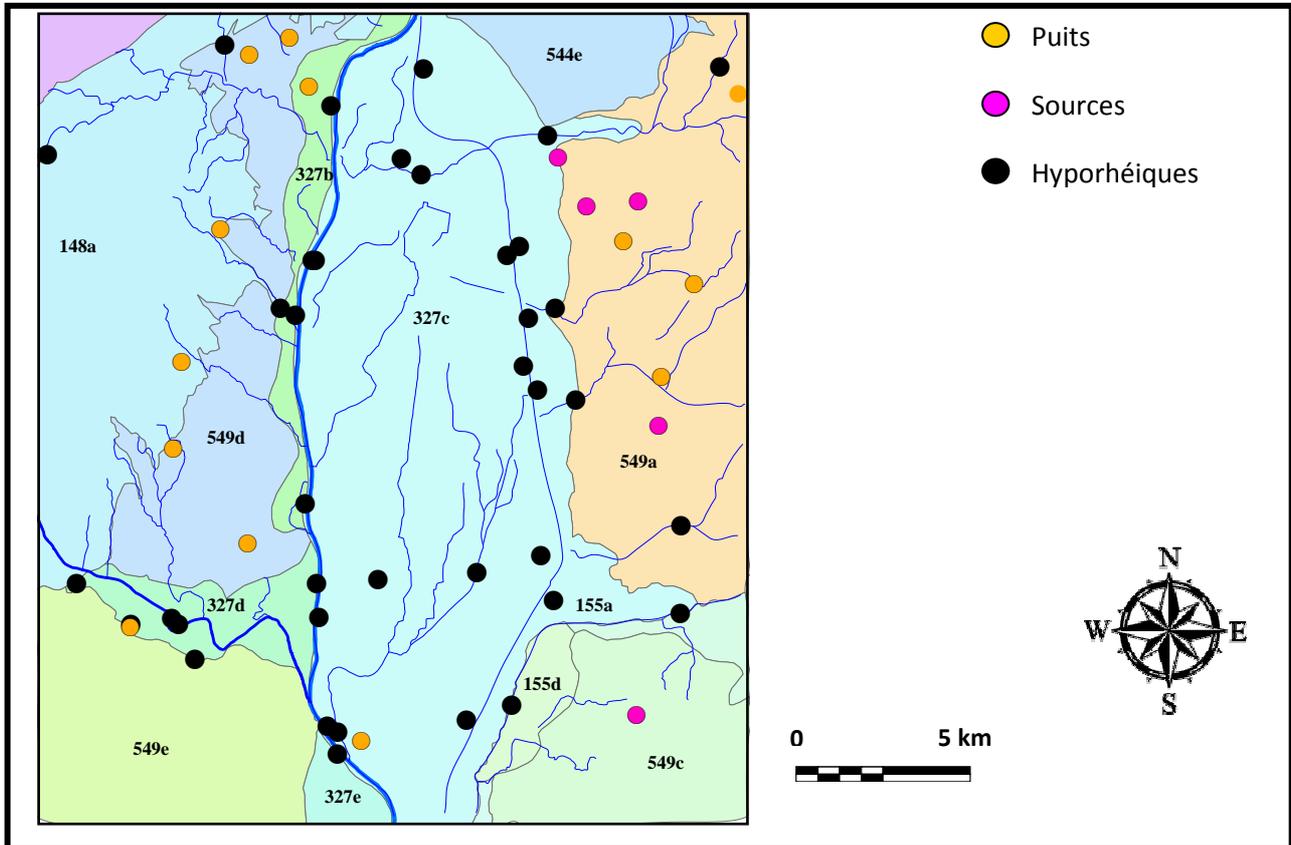


Figure 13 : Répartition des 64 stations de mesure en mai 2008 en fonction des affluents et des aquifères superficiels

• Echantillonnage en 2008

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en mai avec des niveaux hydrologiques moyens (débit du Rhône à Viviers d'environ 1500 m³/s) et à l'étiage en août 2008 avec des débits du Rhône à Viviers d'environ 800 m³/s sur le secteur.

La méthode d'échantillonnage est décrite en annexe 3.

En mai, nous avons échantillonné 45 sites en milieu hyporhéique (Figure 13). Les sites comprenaient l'ensemble des masses d'eau et les principaux affluents et sont répartis de la façon suivante : 9 sites dans le Rhône, 8 sites dans les contre-canaux, 8 sites dans les affluents en rive droite, 17 sites dans les affluents en rive gauche (dans la plaine de Pierrelatte et à l'extérieur). Cet échantillonnage du milieu hyporhéique a été complété par l'échantillonnage de 14 puits et de 5 sources afin de rechercher des espèces caractéristiques des différentes masses d'eau (Figure 13). Lors de cette première campagne un échantillon de 10 litres (par pompage Bou-Rouch) a été effectué à chaque station prospectée en milieu interstitiel.

En août 2008, une deuxième campagne d'échantillonnage a été initiée en se focalisant uniquement sur le Rhône, les contre-canaux et les principaux affluents.

Au cours de cette campagne, nous avons ré-échantillonné les 8 stations du Rhône, les 8 stations des contre-canaux et les principaux affluents en rives gauche (3 sites) et en rive droite (3 sites). A ces 22 stations, nous avons ajouté une station supplémentaire sur le contre-canal gauche en aval de Donzère (Figure 14). Lors de cette seconde campagne, trois échantillons de 10 litres ont été réalisés à chaque station par pompage Bou-Rouch.

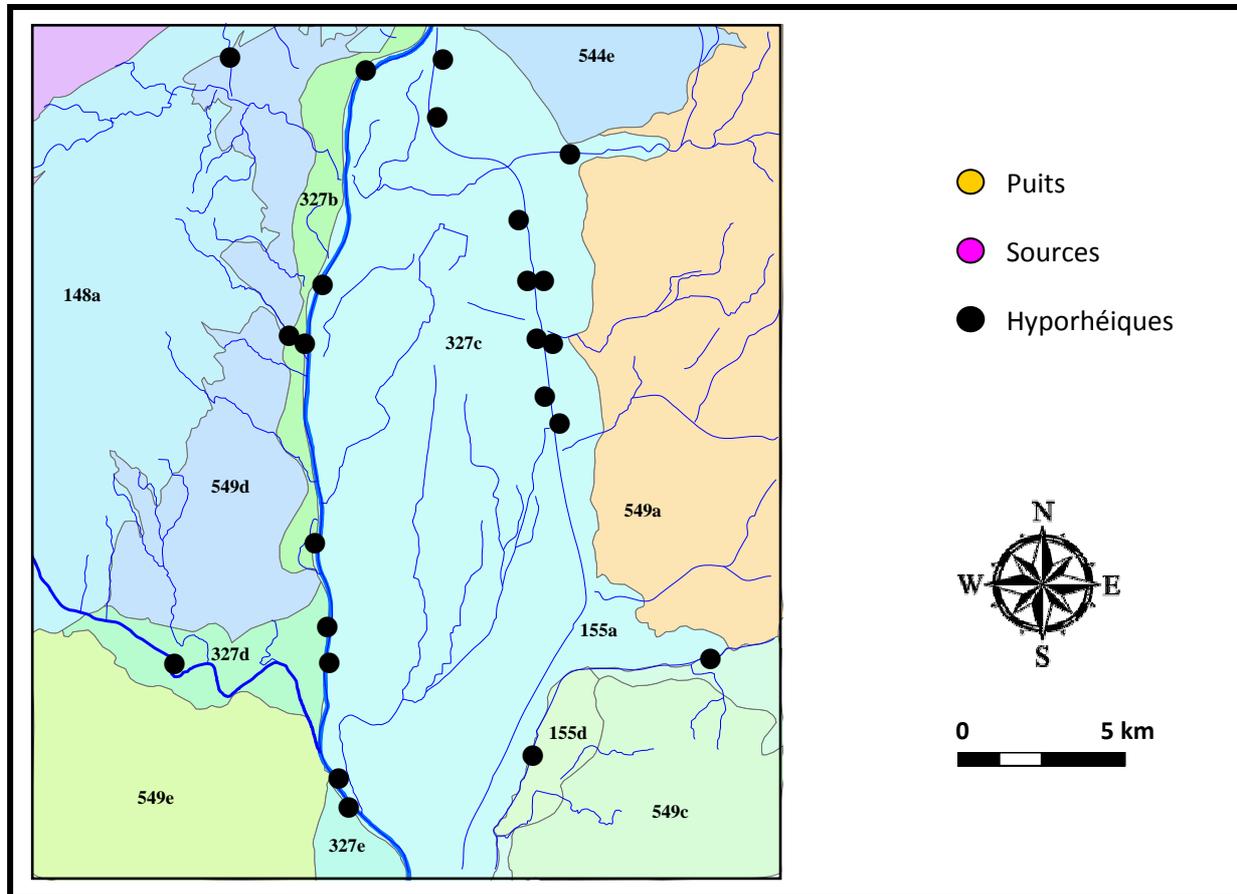


Figure 14 : Répartition des 23 stations échantillonnées en août 2008

7.3. Analyses et interprétation sur le secteur de Donzère-Mondragon

• Caractérisation des assemblages faunistiques stygobies sur le secteur

L'interprétation des données faunistiques s'est faite sur la base des prélèvements de 2008 pour lesquels nous avons trouvé une grande diversité d'espèces stygobies avec un total de 23 espèces identifiées. L'ensemble de ces espèces stygobies ont été échantillonnées en mai et seulement 9 espèces l'ont été en août. Cette différence s'explique en partie par le fait que certains copépodes stygobies (*Nitrocella hirta*, *Pseudectinosoma jeaninae* et *Diacyclops clandestinus*) n'ont pas pu être identifiés pour la campagne d'août. Toutefois, même en retirant ces espèces de la campagne de mai, celle-ci, avec 20 espèces, reste largement plus diversifiée que celle d'août. L'autre facteur pouvant expliquer cette différence pourrait être l'échantillonnage, en mai, d'un plus grand nombre de sites dans les affluents, les puits et les sources. L'examen des listes faunistiques des affluents non-échantillonnés en août ne montre pas d'espèce nouvelle. En revanche, 4 espèces ont été trouvées uniquement dans les sources et les puits en mai (*Avenonia berengueri*, *Bythiospeum* sp., *Spiralix* cf. *puteana* et *Microcharon* sp.) et n'ont pas été échantillonnées dans le milieu hyporhéique. Deux espèces (*Spiralix* cf. *puteana* et *Microcharon* sp.) sont présentes uniquement sur le versant côté Ardèche et deux autres (*Avenonia berengueri* et *Bythiospeum* sp.) n'ont été retrouvées que sur le versant côté Drôme. Ces 6 espèces (3 espèces de copépodes et 3 espèces dans les puits) étant liées à

l'échantillonnage, ne seront pas conservées dans les analyses ultérieures. Malgré cette correction, le différentiel reste important avec 17 espèces en mai et seulement 9 en août. En août, nous avons quand même trouvé dans l'Ardèche une espèce qui n'avait pas été observée en mai (*Cryptocandona* cf. *vavrai*).

La distribution des espèces entre les différentes masses d'eau (Rhône, versant Ardèche et versant Drôme) est donnée dans le Tableau 33. Nous avons ainsi 5 espèces ubiquistes présentes sur l'ensemble des masses d'eaux. Ces espèces pourront être utilisées pour mettre en évidence l'arrivée des eaux souterraines, mais ne pourront pas être utilisées pour caractériser l'origine de ces eaux.

Groupes taxonomiques	Espèces	Versant côté	Rhône	Versant côté
		Ardèche		Drôme
Isopode	<i>Microcharon</i> sp.	x		
Ostracode	<i>Candoninae</i> indet.	x		
Gastéropode	<i>Spiralix</i> cf. <i>puteana</i>	x		
Ostracode	<i>Cryptocandona vavrai</i>	x		
Amphipode	<i>Niphargus virei</i>	x		
Amphipode	<i>Salentinella juberthiae</i>		x	
Ostracode	<i>Fabaeformiscandona wegelini</i>		x	
Amphipode	<i>Niphargopsis casparyi</i>		x	
Ostracode	<i>Pseudocandona zschokkei</i>	x	x	x
Ostracode	<i>Cryptocandona</i> cf. <i>kieferi</i>	x	x	x
Amphipode	<i>Niphargus</i> ind. 1	x	x	x
Amphipode	<i>Niphargus</i> ind. 2	x	x	x
Gastéropode	<i>Paladilhia</i> sp.	x	x	x
Copépode	<i>Graeteriella unisetigera</i>	x		x
Ostracode	<i>Fabaeformiscandon breuili</i>	x		x
Amphipode	<i>Niphargus</i> cf. <i>gallicus</i>	x		x
Gastéropode	<i>Bytiospeum</i> sp.			x
Gastéropode	<i>Fissurai boui</i>			x
Gastéropode	<i>Avenonia berengueri</i>			x
Copepode	<i>Parastenocaris</i> sp.			x

Tableau 33 : Distribution des espèces stygobies dans les différentes masses d'eau du secteur

Nous avons récolté 3 espèces (*Graeteriella unisetigera*, *Fabaeformiscandona breuili*, *Niphargus* cf. *gallicus*) que l'on ne retrouve que sur les masses d'eau latérales (versant Ardèche et versant Drôme) et qui n'ont jamais été observées dans le Rhône ou dans sa nappe d'accompagnement. Bien que la distribution de ces espèces ne permettent pas de caractériser l'origine drômoise ou ardéchoise de l'eau, leur présence est probablement liée à de fortes arrivées d'eau en provenance des aquifères latéraux.

Enfin, nous avons 11 espèces présentes uniquement sur un secteur particulier et pouvant servir à caractériser l'origine des eaux :

- 3 espèces (*Spiralix* cf. *puteana*, *Candoninae* indet., et *Niphargus virei*) seraient caractéristiques des masses d'eau côté Ardèche, ainsi que, dans une moindre mesure, *Cryptocandona vavrai* et *Microcharon* sp. ;

- 3 autres espèces (*Fabaeformiscandona wegelini*, *Niphargopsis casparyi* et *Salentinella juberthiae*) seraient plutôt caractéristiques de la nappe d'accompagnement du Rhône ;

- 3 espèces (*Avenonia berengueri*, *Bytiospeum* sp., *Fissurai boui*) pourraient être utilisées pour caractériser les masses d'eau côté Drôme, ainsi que, dans une moindre mesure, *Parastenocaris* sp.

- **Echanges contre-canaux et vieux Rhône dans la plaine de Donzère**

- a) **En période de moyennes-eaux en mai 2008**

Au cours de cette campagne, la plupart des sites hébergent une faune stygobie importante (Figure 15). Nous allons considérer successivement 5 systèmes présents dans le secteur d'étude.

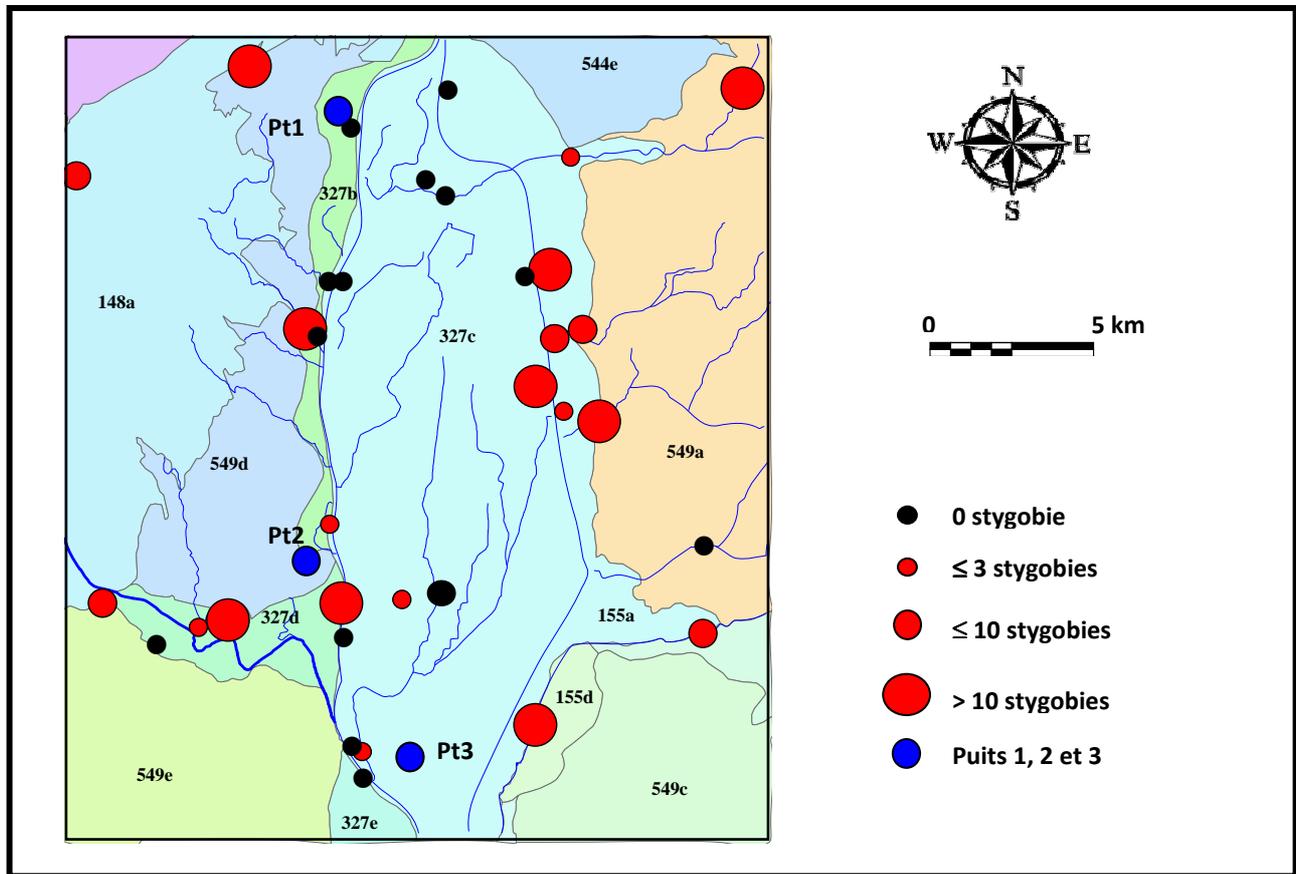


Figure 15 : Abondances moyennes des stygobies échantillonnés sur les sites hyporhéiques en mai et position des puits (pt1, pt2 et pt3) échantillonnés à proximité du Rhône

- Les affluents de rive droite :

La faune stygobie est particulièrement abondante sur les affluents en rive droite du Rhône sur le versant côté Ardèche en Amont de la Conche à Saint-Montant, sur la Tourne à Bourg Saint-Andéol et sur la rivière Ardèche entre Saint-Julien de Peyrolas et Saint-Martin d'Ardèche. Cette abondance importante en stygobies, ainsi que la présence sur ces sites d'espèces karstiques telles que le gastéropode *Spiralix cf. puteana* et l'Amphipode *Niphargus virei*, semblent indiquer que ces affluents sont en connexion directe avec le réseau des karsts ardéchois.

- Le Rhône court-circuité :

Malgré la forte abondance des stygobies dans le sédiment des affluents, on retrouve peu d'individus stygobies au niveau des bancs de galets du Rhône en amont de la confluence avec l'Ardèche. Dans cette partie du Rhône, la seule station pour laquelle nous avons trouvé des stygobies se situe au niveau de Saint-Marcel d'Ardèche où deux espèces (*Pseudocandona zschokkei* et *Cryptocandona cf. kieferi*) ont été trouvées. Malheureusement ces deux espèces sont ubiquistes et ne nous informent pas sur l'origine des eaux en rive droite. Au niveau de la confluence avec l'Ardèche, nos résultats montrent une quantité importante de stygobies au niveau de la commune de Saint-Just, la présence d'une espèce caractéristique du Rhône (*Niphargopsis casparyi*) nous indique une origine des eaux de la nappe du Rhône en rive gauche. A l'aval immédiat de la confluence, au niveau de la commune de Pont Saint-Esprit, les échanges semblent plus complexes avec une forte disparité dans

l'abondance des stygobies. Ainsi, la présence de l'espèce ubiquiste *Cryptocandona cf. kieferi* à la confluence du Rhône et du Lauzon rend l'interprétation de ces échanges difficile.

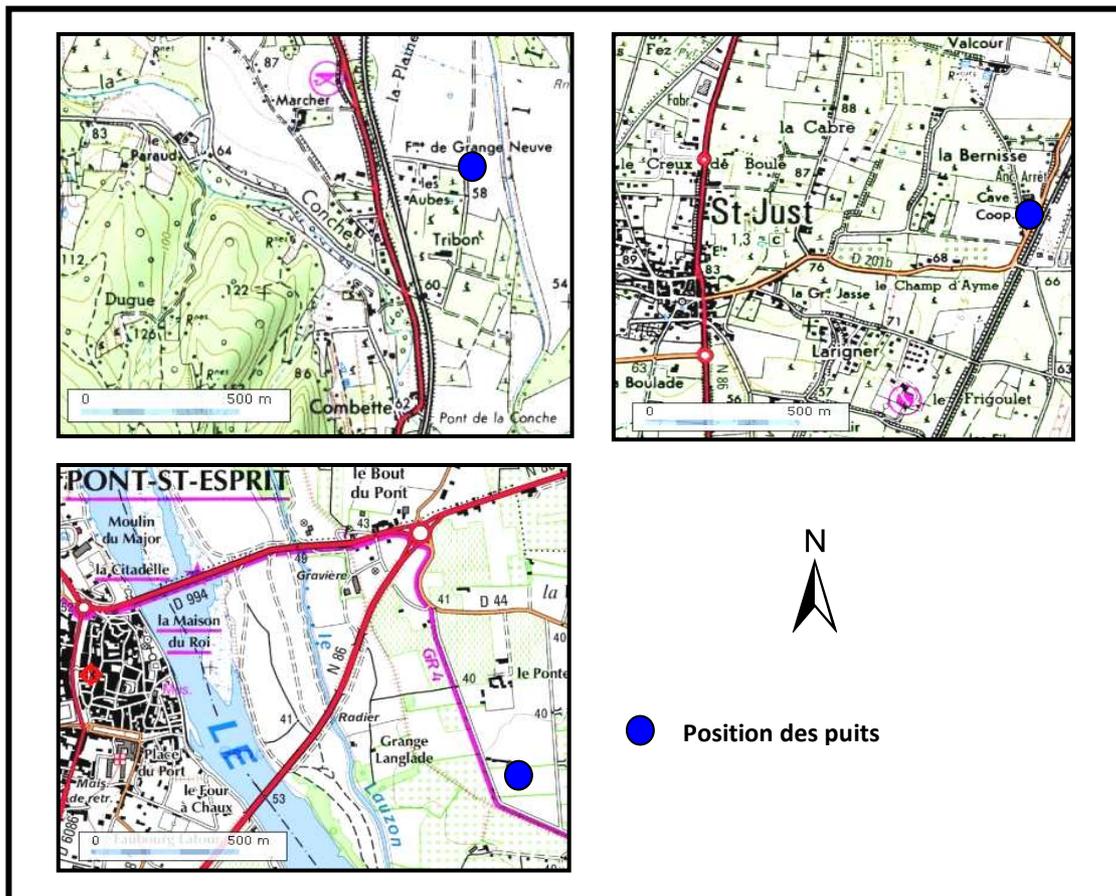


Figure 16 : Localisation des puits échantillonnés à proximité des rives du Rhône en mai 2008 : a) Puits 1 situé sur la commune de Saint-Montant, b) Puits 2 situé sur la commune de Saint-Just et c) Puits 3 situé à Lapalud.

La faune retrouvée dans les puits (Figure 16) apporte quelques éléments complémentaires. Dans le puits numéro 1, sur la commune de Saint-Montant, l'absence de stygobie semble confirmer l'absence d'échange dans ce secteur entre le Rhône et les aquifères du versant Ardèche. En revanche la présence, dans le puits numéro 2, du gastéropode karstique *Spiralix cf. puteana*, caractéristique de l'Ardèche semble montrer une alimentation en eau à partir du karst ardéchois sur la commune de Saint-Just et jusqu'à environ 1 km des berges du Rhône.

En ce qui concerne les trois sites localisés dans la plaine de Pierrelatte (Figure 15), nous n'avons pas trouvé de stygobie, ce qui semble indiquer une absence d'échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines sur ces sites. Ce résultat est également confirmé par nos prélèvements dans le puits 3 (Figure 16) où l'absence totale de faune stygobie semble confirmer le colmatage important observé dans cette partie de la plaine de Pierrelatte.

- Les affluents de rive gauche :

De même que les affluents du versant côté Ardèche, les affluents côté Drôme, à l'exception du Lauzon, ont une faune stygobie bien présente (Figure 15). En revanche, seule la Berre au lieu-dit « le logis de Berre » héberge une espèce qui pourrait être caractéristique du côté drômois (*Parastenocaris* sp.), les autres espèces caractéristiques du versant drômois ayant été trouvées que dans les puits et les sources éloignées du canal.

- Les contre-canaux :

La présence uniquement d'espèces ubiquistes rend plus complexe l'interprétation du sens des échanges dans les contre-canaux. Dans le contre-canal gauche, nous n'observons pas d'échanges au niveau de Donzère. En revanche les arrivées d'eau souterraines semblent importantes dans le secteur compris entre la Berre et la commune de Bollène. La présence à la fois de *Niphargopsis casparyi* (caractéristique du Rhône) et de *Niphargus gallicus* (caractéristique des aquifères latéraux) dans le contre-canal gauche à hauteur de la commune de Pierrelatte semble indiquer un mélange important d'eau du Rhône et de l'aquifère drômois à ce niveau. En aval de Bollène, et plus particulièrement de la restitution du Lez dans le contre-canal au lieu-dit « les Saignères », le sédiment est complètement colmaté et la faune n'a pas pu être échantillonnée.

Dans le contre-canal droit, les arrivées d'eaux souterraines ne se font qu'à l'aval de Pierrelatte où l'on retrouve une espèce *Salentinella juberthiae* caractéristique du Rhône. La présence de cette espèce semble indiquer une alimentation par des eaux du Rhône, probablement issues de perte du canal. En aval de l'usine du Tricastin, la grande profondeur de ce contre-canal n'a malheureusement pas permis l'échantillonnage de la faune.

b) A l'étiage en août 2008

Au cours de cette campagne, la plupart des sites hébergent une faune stygobie nettement moins abondante et diversifiée que lors de la campagne de mai (Figure 17).

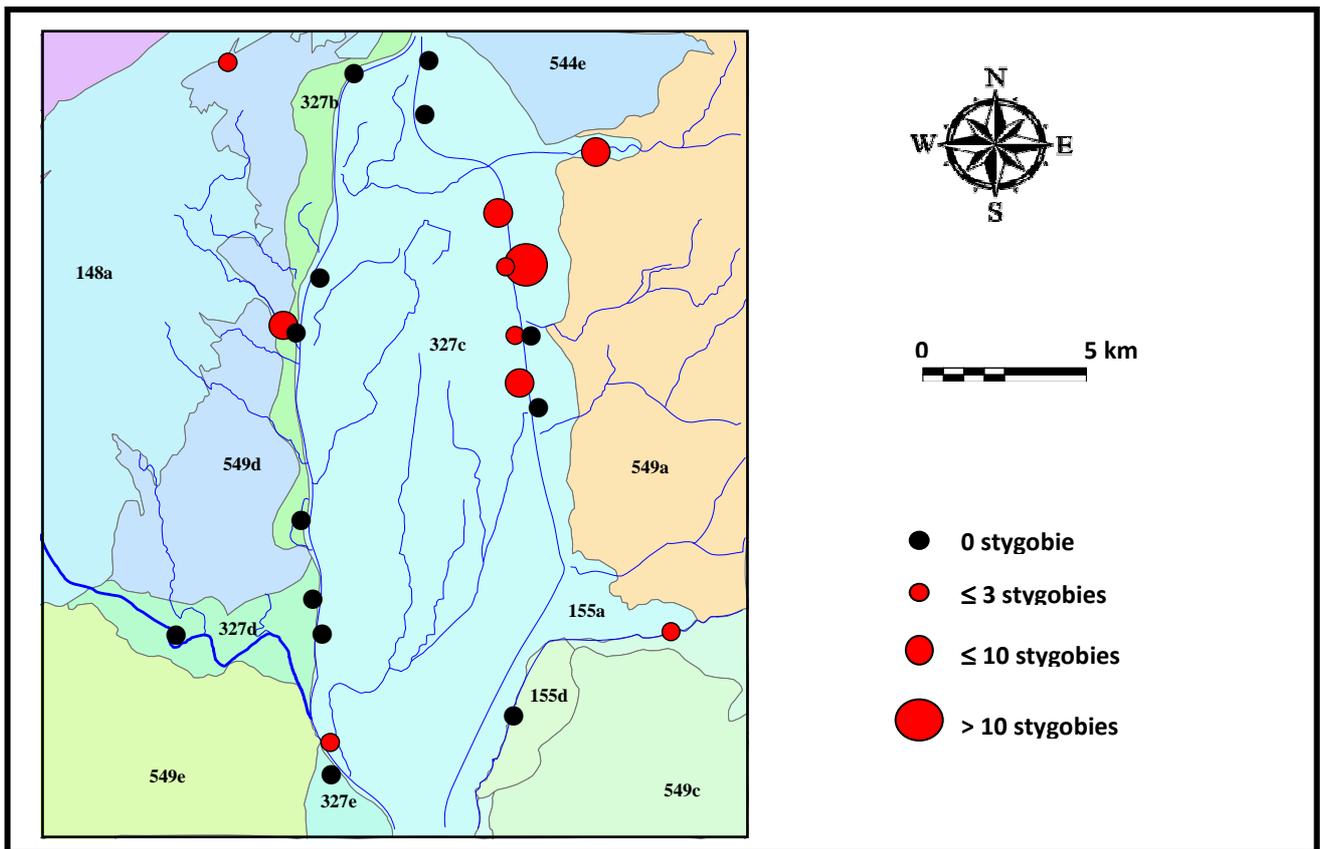


Figure 17 : Abondances moyennes des stygobies échantillonnés sur les sites en août 2008.

- Les affluents de rive droite :

La faune stygobie reste relativement importante sur les affluents en rive droite du Rhône sur le versant côté Ardèche en amont de la Conche à Saint-Montant et sur la Tourne à Bourg Saint-Andéol, mais n'a plus été retrouvée dans la rivière Ardèche. La présence sur ces sites d'espèces

karstiques n'est observée que sur la Tourne qui semble donc bien alimentée par le karst ardéchois au contraire de la Conche et de l'Ardèche.

- *Le Rhône court-circuité :*

De la même manière, on ne retrouve plus d'individus stygobies au niveau des berges du Rhône en amont de la confluence avec l'Ardèche. A l'aval immédiat de la confluence, au niveau de la commune de Pont Saint-Esprit, les échanges restent ponctuels avec une forte disparité dans l'abondance des stygobies. Ainsi, la présence de l'espèce ubiquiste *Cryptocandona cf. kieferi* à la confluence du Rhône et du Lauzon est toujours observée mais ne permet pas l'interprétation quant à l'origine de l'eau souterraine.

- *Les affluents de rive gauche :*

Pour les affluents côté Drôme, à l'exception de la partie aval du Lez, la faune stygobie reste bien présente (Figure 17) avec des espèces caractéristiques du versant drômois telle que le gastéropode *Bythiopeum* sp. dans la Berre et la partie amont du Lez.

- *Les contre-canaux :*

Dans le contre-canal gauche, l'abondance des stygobies est également beaucoup plus faible que celle observée en mai. Un seul site situé au niveau de la Garde Adhémar conserve un peuplement stygobie. Sur ce site, la présence à la fois de *Salentinella juberthiae* (caractéristique du Rhône) et de *Bythiopeum* sp. (caractéristique des aquifères de la Drôme) semble indiquer un mélange important d'eau du Rhône et de l'aquifère drômois à ce niveau. Dans la partie aval de ce contre-canal, l'absence de faune stygobie semble indiquer une faible arrivée d'eau souterraine quelle que soit son origine.

Dans le contre-canal droit, l'abondance des stygobies reste importante et à des niveaux similaires voire supérieurs à ceux observés en mai. La présence de *Salentinella juberthiae* (caractéristique du Rhône) sur le site le plus amont et le plus aval indique une alimentation importante en eaux issues du Rhône.

- **Variations saisonnières et temporelles des échanges**

- a) **La variabilité saisonnière**

La comparaison des deux campagnes de prélèvement réalisée en mai (en période de moyennes-eaux) et en août (lors de l'étiage) met en évidence d'importants changements dans l'intensité des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Ainsi, les alimentations en eaux souterraines de la part des aquifères latéraux sont plus fréquentes et plus intenses lors des moyennes-eaux et diminuent en août. Il apparaît donc important de bien choisir la période d'échantillonnage afin d'augmenter les chances de visualiser les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Notre approche saisonnière s'est également révélée très utile pour mieux caractériser le sens de circulation à l'aide des espèces caractéristiques. Ainsi, dans le contre-canal gauche les données faunistiques du mois de mai n'avaient pas permis de conclure sur l'origine probable de l'eau souterraine du fait de la présence d'espèces stygobies ubiquistes. En revanche les mêmes sites ré-échantillonnés en période de nappe basse (en août) n'ont pas fourni de faune stygobie, laissant ainsi penser que le contre-canal droit est influencé par une réserve d'eau souterraine fluctuant saisonnièrement. L'échantillonnage du contre-canal droit (situé du côté de Pierrelatte) montre des densités de faune stygobie comparables entre mai et août, caractérisées par une faune originaire de la nappe d'accompagnement du Rhône. Cette absence de variation saisonnière dans ce contre-canal gauche semble indiquer que les pertes du canal d'amont restent relativement stables d'une saison à l'autre et que les alimentations fluctuantes du contre-canal droit pourraient provenir du versant drômois.

b) La variabilité pluriannuelle

La comparaison de nos résultats avec les données bibliographiques de 1989 (Creuzé des Châtelliers, 1991) et de 1994 (Plénet et al. 1996) montre une très bonne concordance des résultats à une échelle pluriannuelle, et pour la quasi-totalité du chenal court-circuité du Rhône : (i) peu ou pas d'arrivée d'eaux souterraines en provenance du versant ardéchois entre le lieu-dit « les barraques » et la commune de Saint-Just et (ii) une arrivée d'eau souterraine au niveau de la confluence de l'Ardèche.

En revanche, l'arrivée d'eau souterraine observée en 1989 et 1994 à l'aval immédiat du barrage de Donzère n'a pas été retrouvée lors de notre campagne d'août 2008 (ce site n'avait pas été échantillonné en mai). Il existe plusieurs raisons pouvant expliquer cette différence. En 15 années les berges ont pu être modifiées limitant ainsi les échanges avec la nappe, ou le niveau de celle-ci a pu baisser en lien avec la demande croissante d'eau. Toutefois, les échantillons de 1989 et 1994 ont été réalisés en période d'eaux moyennes alors que nos résultats de 2008 ont été effectués à l'étiage. Ainsi, l'absence de faune stygobie en août 2008 sur ce site pourrait facilement s'expliquer par la réduction des échanges en période basses-eaux.

7.4. Conclusions et perspectives

Les résultats de la phase 3 de ce programme (Figure 18) mettent en lumière six principales conclusions, permettant de préciser la nature et les objectifs de nos futurs travaux :

- Au cours de cette phase 3, nous sommes passés d'un indicateur basé sur la diversité de la faune stygobie à un descripteur plus simple tenant compte de la seule **abondance**. Ce choix, initié au cours de recherches menées dans le secteur de Brégnier-Cordon, semble être confirmé par nos résultats obtenus à Donzère-Mondragon. L'abondance de la faune stygobie semble traduire de façon satisfaisante les échanges entre le fleuve et ses nappes.
- Compte-tenu des difficultés d'échantillonnage, la plupart des études réalisées sur le Rhône n'incluaient qu'un échantillon de 10 litres d'eau par station. Au cours de cette phase 3, nous avons réalisé **trois échantillons de 10 litres** par station par pompage Bou-Rouch. Cette stratégie semble efficace : elle a permis de récolter de la faune stygobie à une période (les basses-eaux du mois d'août) où ces organismes sont rares à faible profondeur. Elle devrait donc être intégrée au protocole d'échantillonnage des études futures.
- L'échantillonnage des chenaux court-circuités est généralement réalisé au niveau des seuils peu profonds qui les traversent. Lors de cette phase d'étude, nous avons échantillonné **l'extrémité aval des bancs de graviers latéraux**. Ces zones sont connues pour héberger une faune stygobie abondante liée aux remontées d'eaux souterraines. Cette stratégie a été efficace puisque nous avons récolté des organismes sur un beaucoup plus grand nombre de stations que lors des études précédentes.
- Une forte **variabilité temporelle** des résultats a pu être mise en évidence. Il convient donc de prendre en compte la saison lors de l'échantillonnage en vue de cartographier des échanges rivière-nappe. Le protocole des futures études devrait donc inclure un échantillonnage en période d'eaux moyennes ou hautes.
- L'évaluation de **l'origine de l'eau** à l'aide de la seule composition de la faune stygobie semble fragile, particulièrement si cette méthode devait être appliquée à d'autres cours d'eau. Il conviendrait donc d'inclure dans le protocole la nécessité de réaliser des analyses physico-chimiques ou isotopiques des eaux échantillonnées avec la faune interstitielle.
- Enfin, la possibilité d'utiliser la faune stygobie pour estimer l'origine de l'eau présente dans des **puits de la plaine alluviale** doit encore être testée. Les premiers résultats obtenus dans le secteur de Donzère-Mondragon semblent prometteurs, mais le nombre de puits échantillonnés reste faible. La phase 4 de cette étude devrait permettre de trancher cette question en prospectant la zone de la confluence entre le Rhône et l'Ardèche.

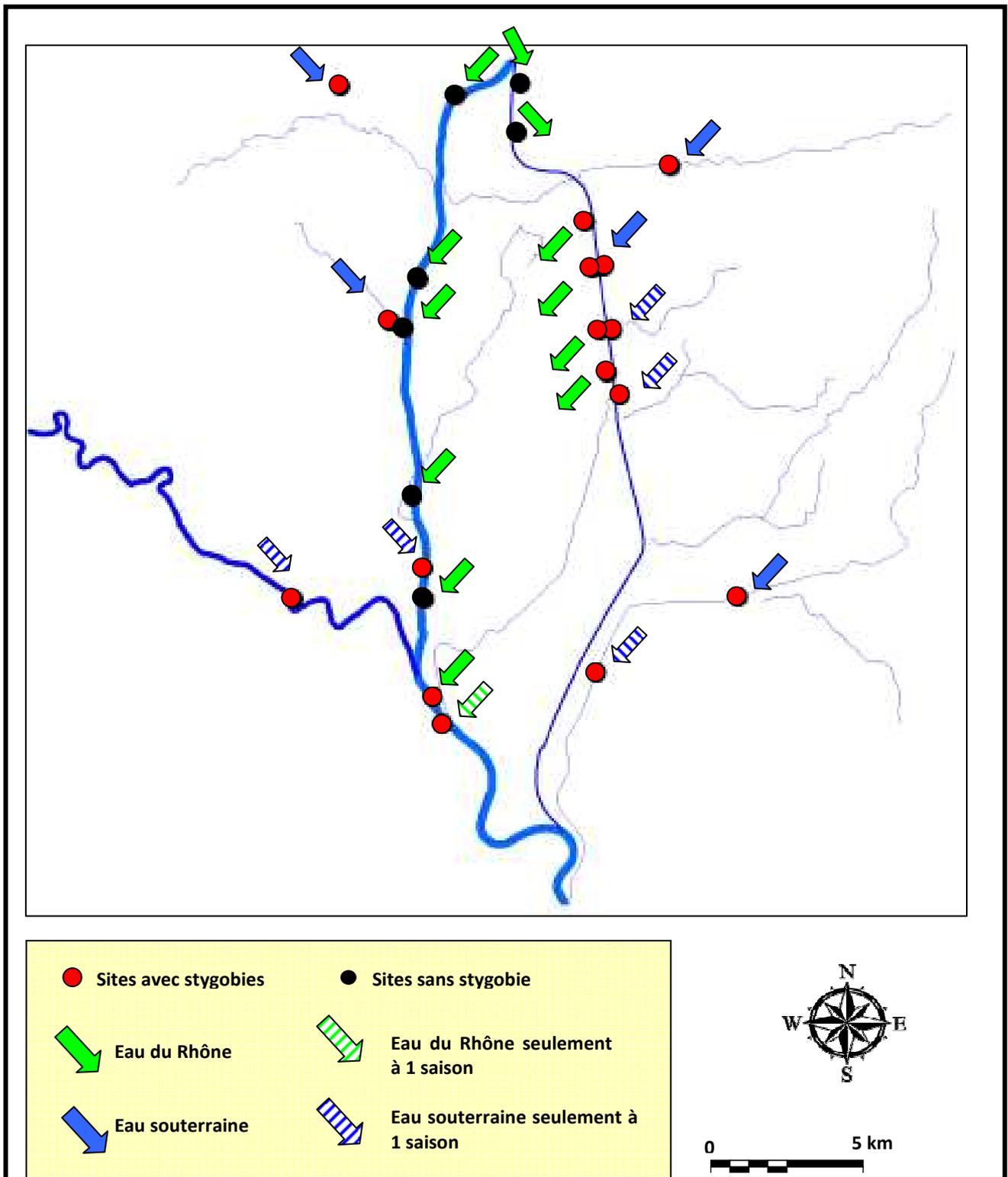


Figure 18 : Synthèse des résultats obtenus au cours des deux campagnes d'échantillonnage réalisées en mai et août 2008 sur le secteur de Donzère-Mondragon

8. Croisement et superposition des métriques

8.1. Synthèse rapide des résultats par métriques

Cette partie reprend de manière synthétique et par métriques les résultats détaillés dans les parties précédentes.

8.1.1. Métrique hydraulique

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.

8.1.2. Métrique isotopique

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.

8.1.3. Métrique invertébrés souterrains

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.

En résumé, les apports de nappe fluctuent fortement dans le temps, avec des diminutions notables à l'étiage. Ces variations saisonnières sont surtout marquées en rive gauche du canal de dérivation.

8.1.4. Métriques végétation et physico-chimiques

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.

8.2. Analyse comparative des métriques

Les informations synthétisées ci-dessus sont résumées et représentées dans quatre tableaux : Vieux-Rhône rive droite (Tableau 34), Vieux-Rhône rive gauche (Tableau 35), Canal de dérivation rive droite (Tableau 36) et canal de dérivation rive gauche (Tableau 37).

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.

Les codes retenus sont les suivants :

- : Pas de données disponibles ou exploitables.

- **Apports de nappe** : apports de nappe au fleuve Rhône (Figure 19 et Figure 20). Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, isotopes, invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

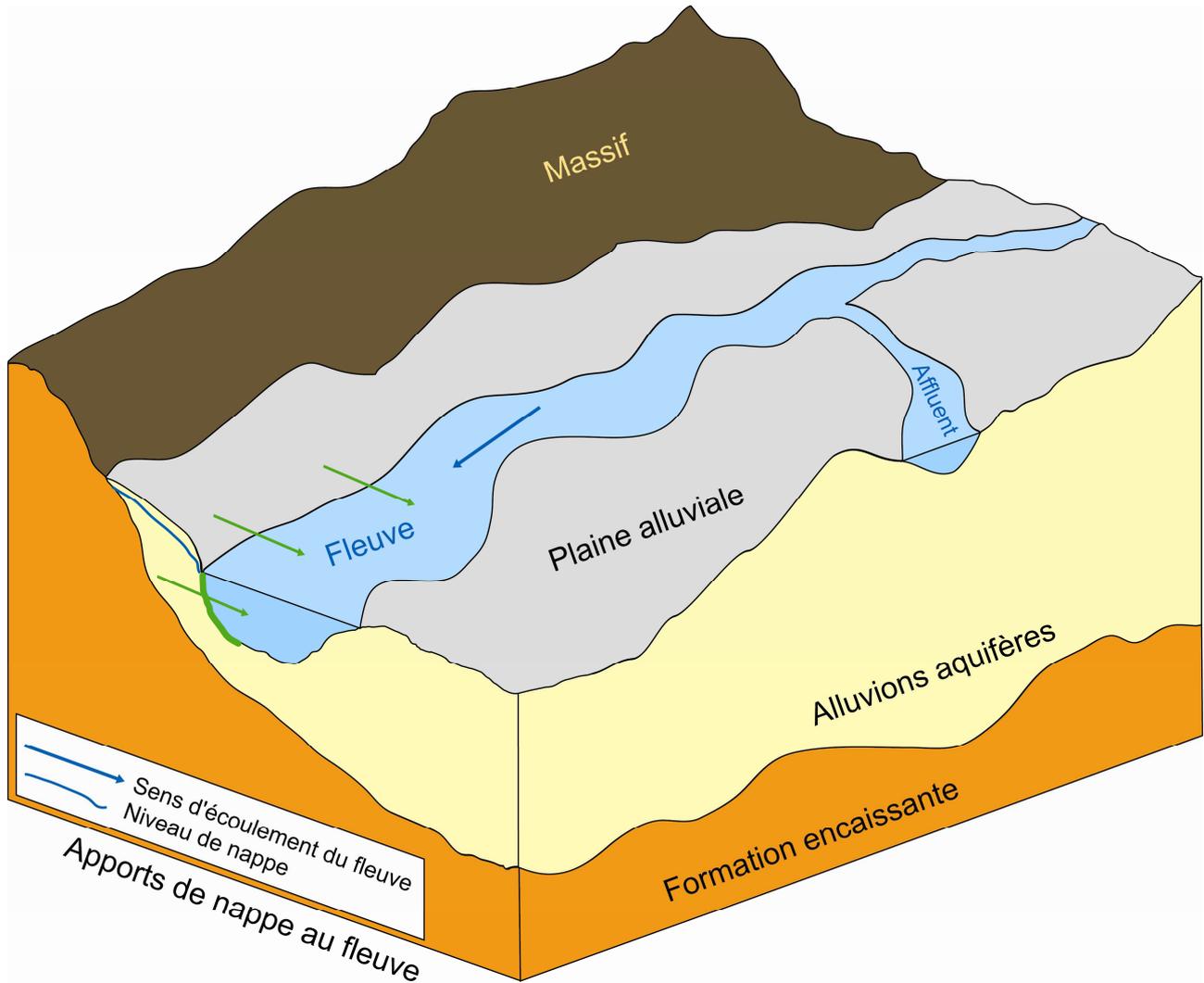


Figure 19 : Apports de nappe au fleuve : vue 3D

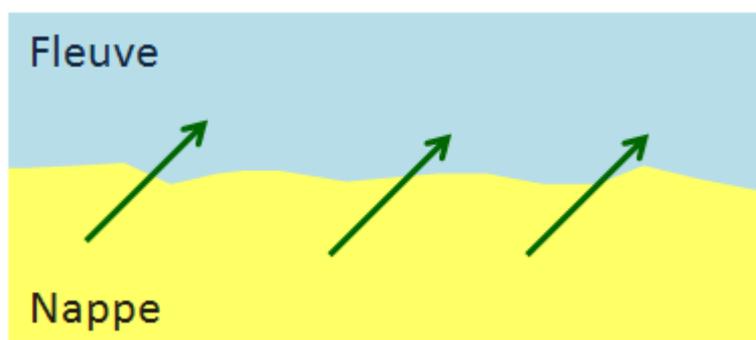


Figure 20 : Apports de nappe au fleuve : représentation simplifiée

- **Apports du Rhône** : apports du fleuve Rhône à la nappe (Figure 21 et Figure 22). Cette configuration est détectable par les métriques hydrauliques, isotopes et invertébrés. Elle n'est pas détectable par la métrique végétation.

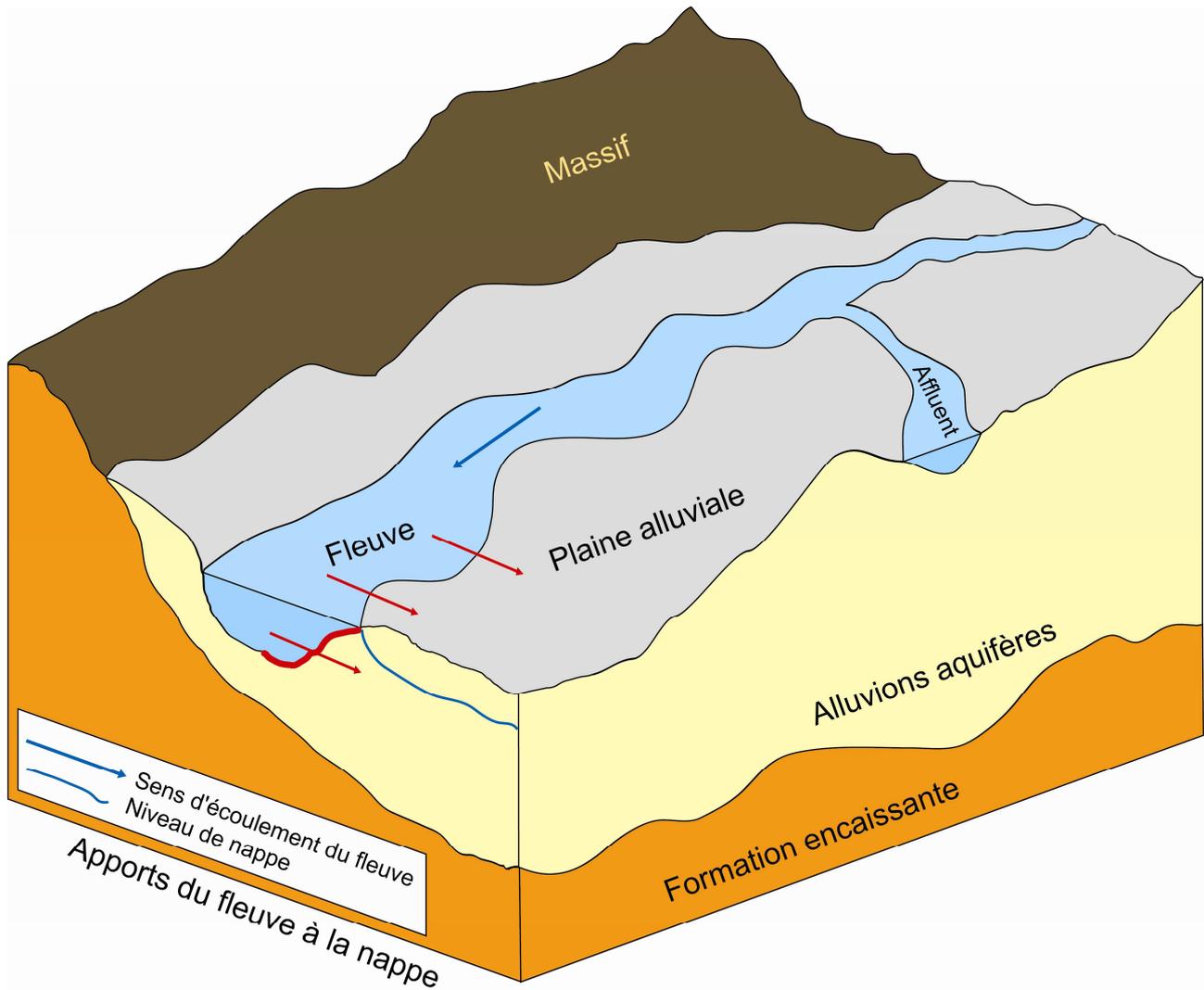


Figure 21 : Apports du fleuve à la nappe : vue 3D

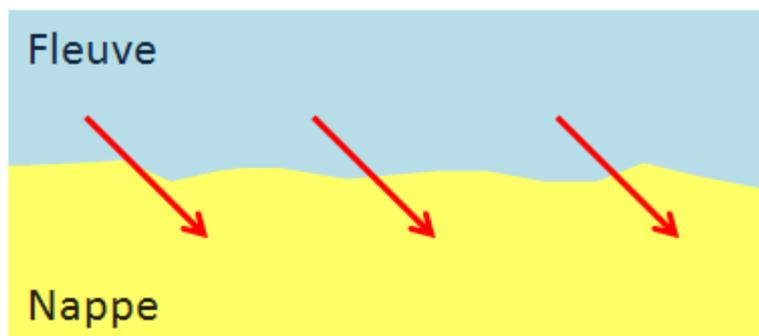


Figure 22 : Apports du fleuve à la nappe : représentation simplifiée

- **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 23 et Figure 24). Cette configuration est détectable par les métriques invertébrés, macrophytes et physico-chimie.

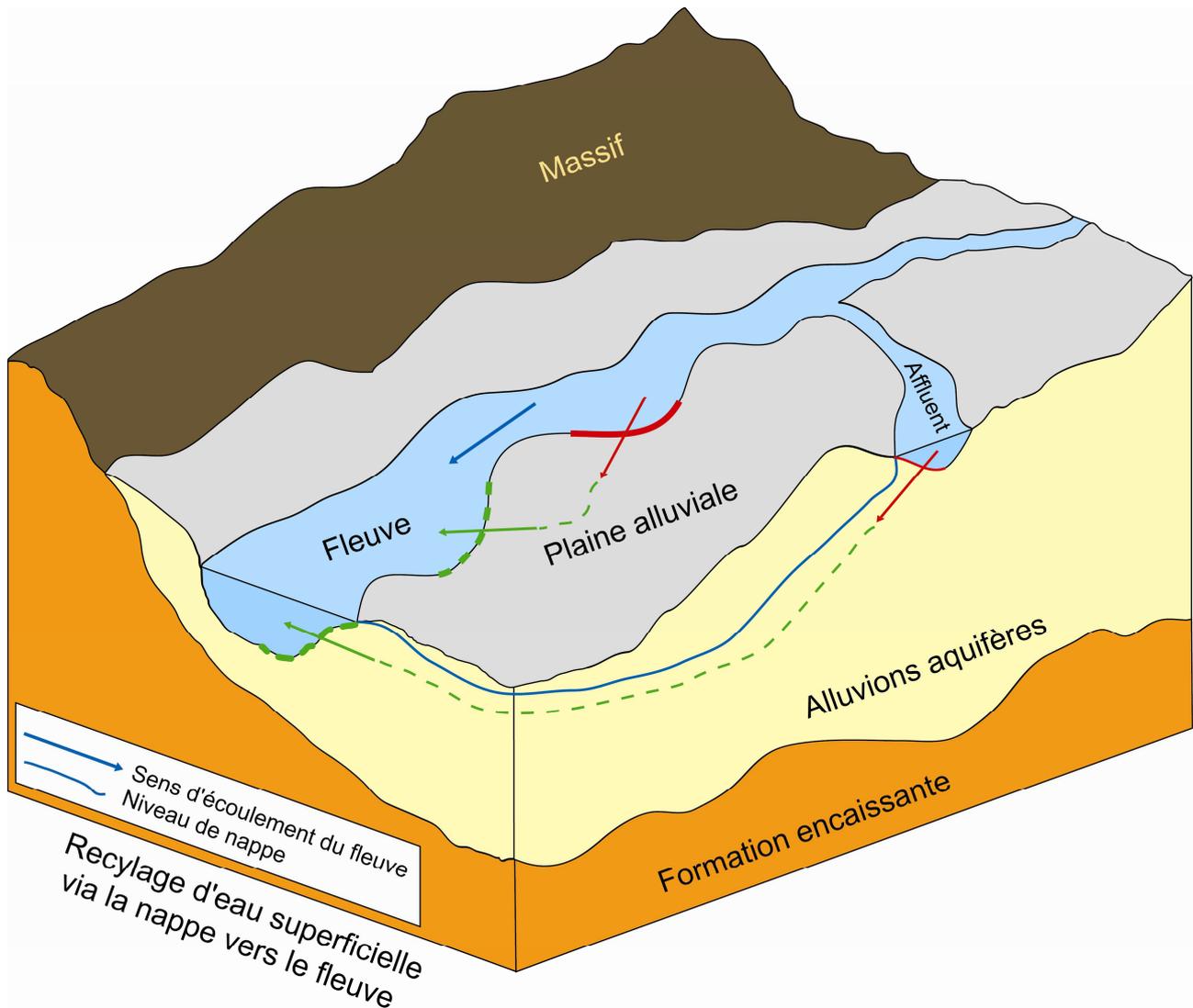


Figure 23 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : vue 3D

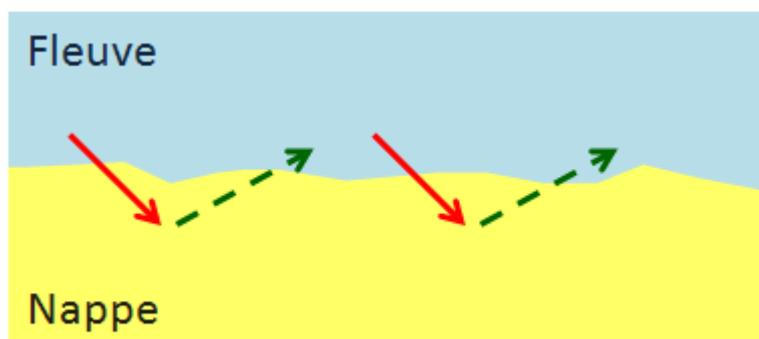


Figure 24 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : représentation simplifiée

- **Mélange** : apports mélangés d'eau superficielle recyclée (via la nappe) et de nappe au fleuve (Figure 25 et Figure 26). Cette configuration est détectable par les invertébrés, les macrophytes et la physico-chimie.

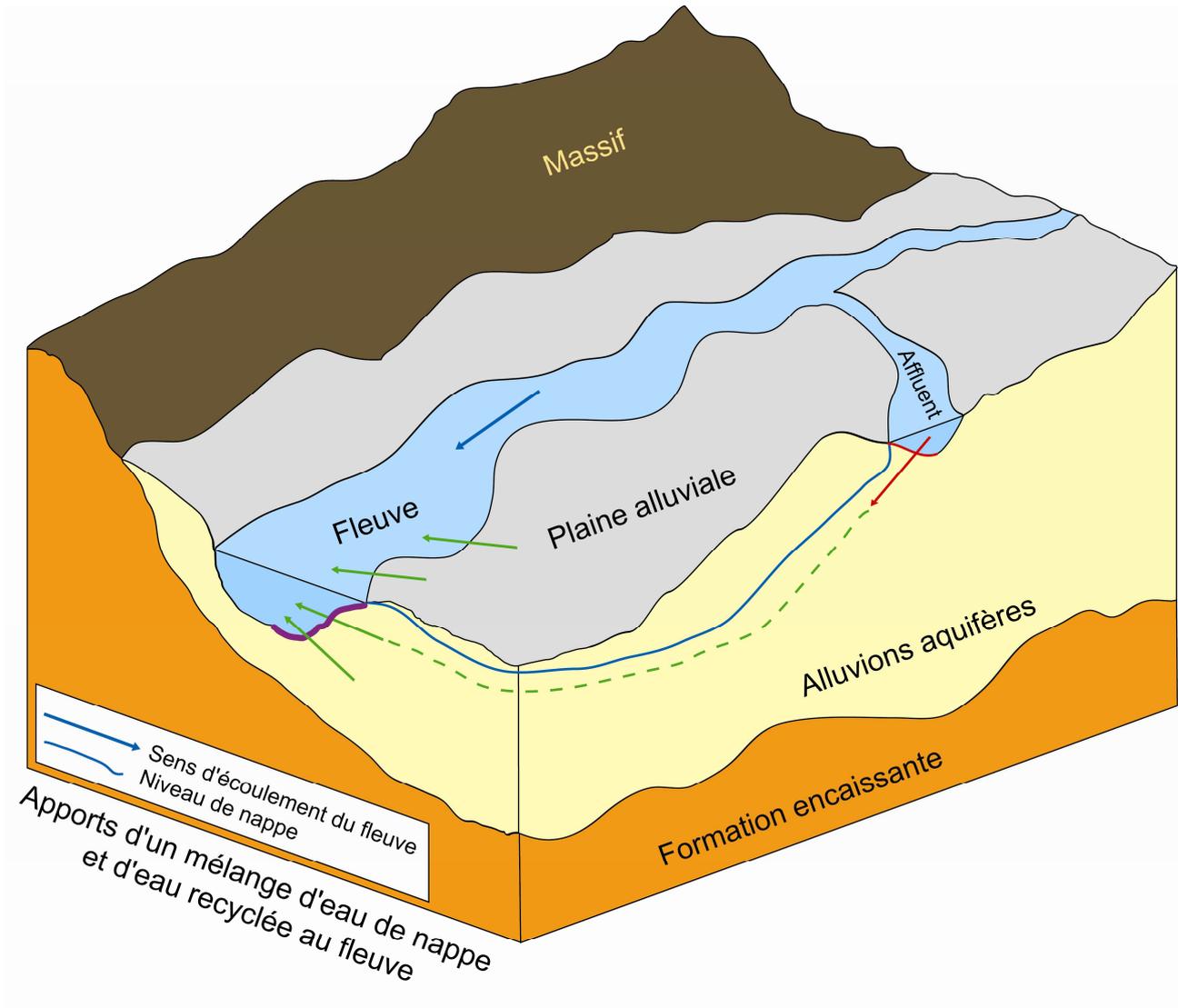


Figure 25 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : vue 3D

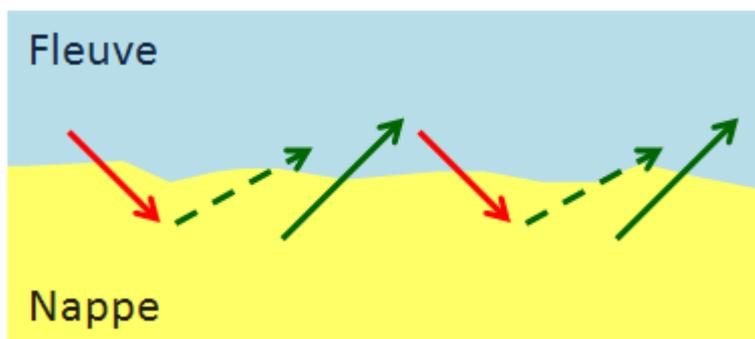


Figure 26 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : représentation simplifiée

- **Pas d'échange** : pas d'apport de la nappe au fleuve (Figure 27 et Figure 28), 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.

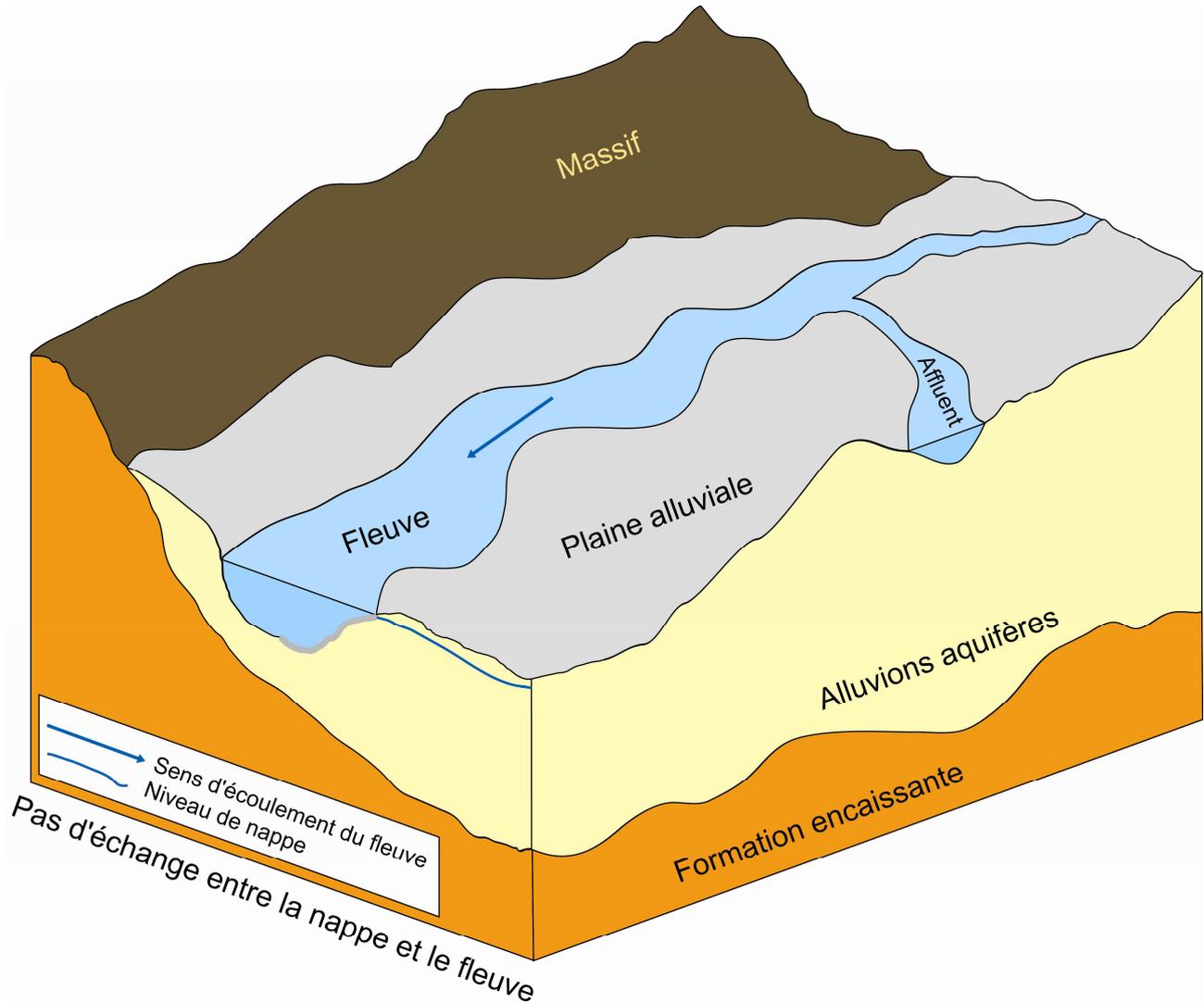


Figure 27 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : vue 3D



Figure 28 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : représentation simplifiée

- **Colmatage** : colmatage entre la nappe et le fleuve (Figure 29 et Figure 30), cas par exemple, où les berges sont colmatées. Cette configuration est détectable par les métriques isotopes et invertébrés.

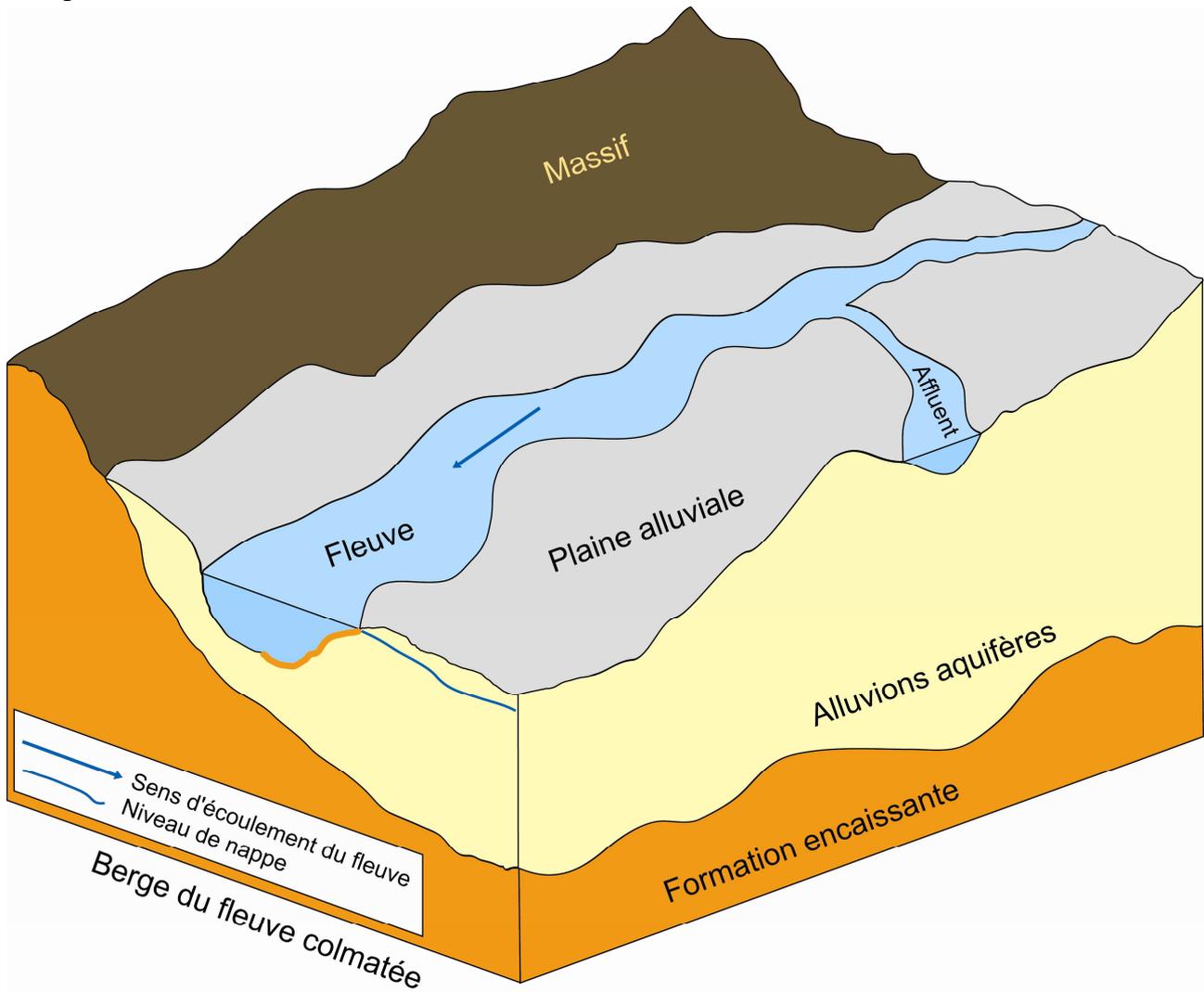


Figure 29 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : vue 3D

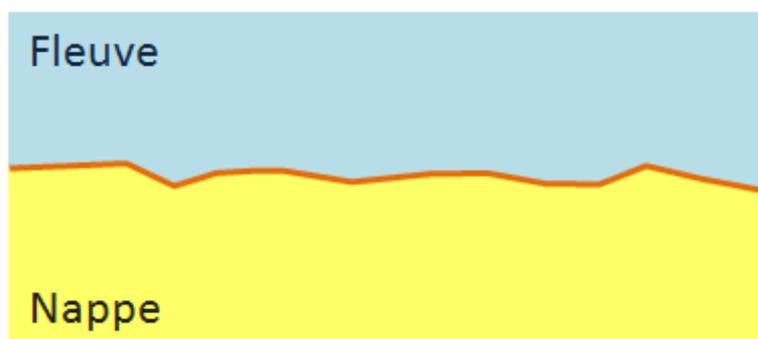


Figure 30 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : représentation simplifiée

PK	Donzère-Mondragon - Vieux-Rhône - Rive droite									Interprétation des échanges nappes/Rhône
	Hydraulique				Isotopes	Invertébrés		Macrophytes	Physico-chimie	
	07/1968	09/1969	06/2008	03/2009		04-06/2008	05/2008			
	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)	ME	ME	BE	ME/BE	ME/BE	
BE	BE	HE	ME	ME	ME	BE	ME/BE	ME/BE		
170										
170,5										
171										
171,5					Apports de nappe (1/3)					
172						Apports de nappe 1996	Apports de nappe 1996			
172,5										
173										
173,5										
174						Pas d'échange	Pas d'échange			
174,5										
175										
175,5								Apports de nappe aux zones humides riveraines		
176					Apports de nappe					
176,5									Apports de nappe	
177										
177,5										
178										
178,5										
179										
179,5										
180						Pas d'échange	Pas d'échange			
180,5										
181										
181,5										
182										
182,5										
183										
183,5										
184										
184,5										
185										
185,5						Recyclage d'eau du Rhône	Pas d'échange			Recyclage d'eau du Rhône
186										
186,5										
187					Colmatage ?			Recyclage d'eau du Rhône		
187,5										
188										
188,5										
189										
189,5										
190										
190,5										
191										
191,5										
192										
192,5										
193										
193,5										
194									Recyclage d'eau de l'Ardèche ?	Recyclage d'eau de l'Ardèche ?
194,5										
195										
195,5										
196										
196,5										
197										
197,5										
198										
198,5										
199										
199,5										
200										

Tableau 34 : Représentation comparative des résultats par métriques pour la rive droite du Vieux-Rhône

Notes concernant le Tableau 34 :

- PK 171 à 171 métrique isotopique : les apports de nappe au Rhône constituent 1/3 de l'apport d'eau total au Rhône ;
- PK 172 métrique invertébrés : les apports de nappe au Rhône n'ont pas été détectés avec l'échantillonnage réalisé dans le cadre de cette étude. Ils résultent d'un échantillonnage réalisé pour une autre étude en 1996.

Donzère-Mondragon - Canal de dérivation - Rive droite										Interprétation des échanges nappes/Rhône
PK	Hydraulique				Isotopes	Invertébrés		Macrophytes	Physico-chimie	
	07/1968	09/1969	06/2008	03/2009	04-06/2008	05/2008	08/2008	06-07/2008	06-07/2008	
	Q+ (m ³ /j)	ME	ME	BE	ME/BE	ME/BE				
	BE	BE	HE	ME						
1	-39 262	-73 454		-86 975						
1,5	1 328	49		3 424						
2										
2,5									Mélange nappe + recyclage ?	Possibles apports de nappe potentiellement par les siphons
3										
3,5										
4					Apports du Rhône					
4,5									Pas d'échange	
5										
5,5									Pas d'échange	
6										
6,5										
7										
7,5									Apports de nappe	
8										
8,5										
9										
9,5										
10										
10,5										
11										
11,5										
12									Mélange nappe + recyclage ?	Apports du Rhône vers la nappe
12,5										
13										
13,5										
14										
14,5										
15										
15,5										
16										
16,5										
17										
17,5										
18										
18,5	13 033	21 343		124 470						
19	-494	-998		-20						
19,5										
20										
20,5										
21										
21,5										
22										
22,5										
23										
23,5										
24										
24,5	-4 624	-10 274								
25	4 488	1 084								
25,5										
26										
26,5										
27										
27,5										
28										

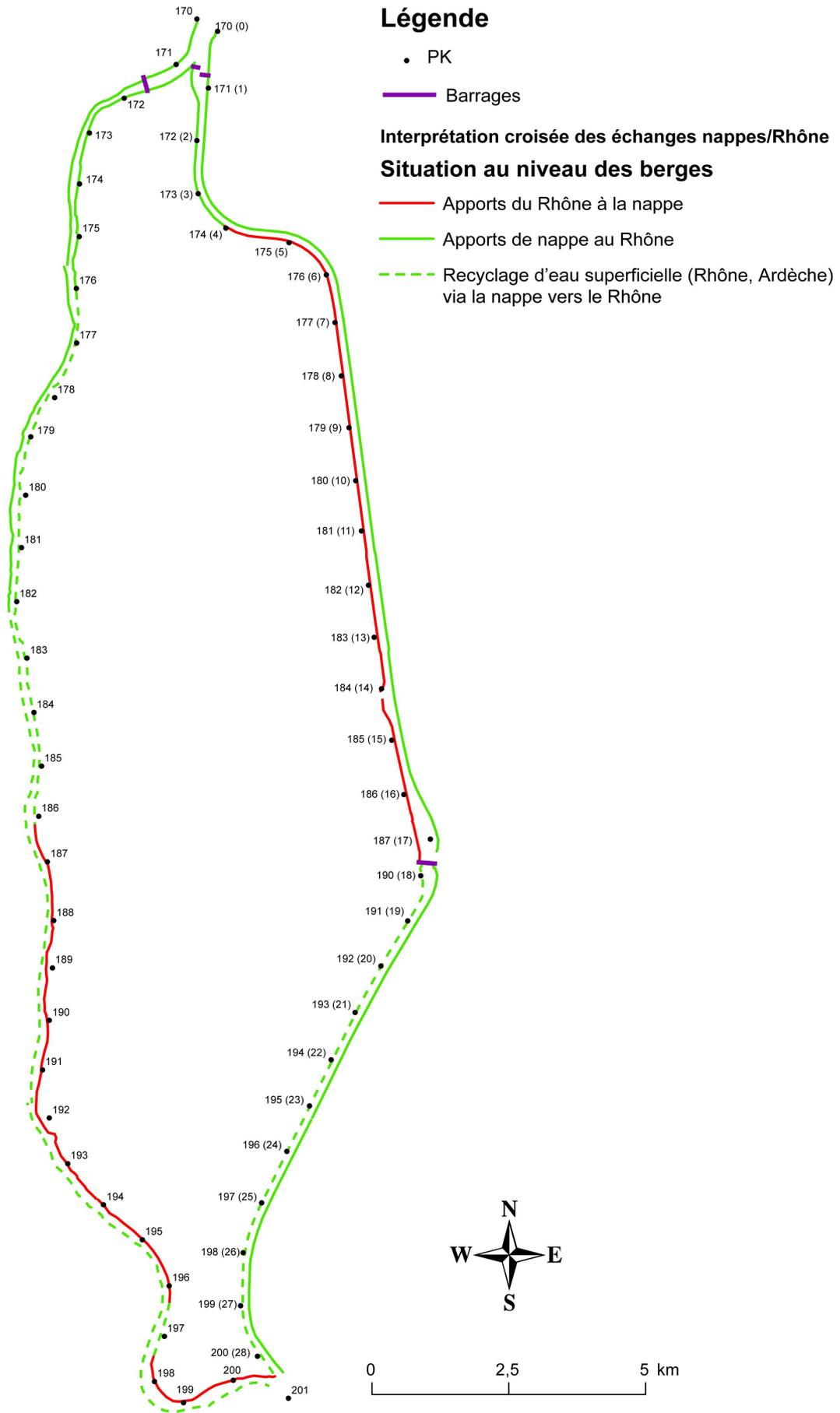
Tableau 36 : Représentation comparative des résultats par métriques pour la rive droite du canal de dérivation

Donzère-Mondragon - Canal de dérivation - Rive gauche										Interprétation des échanges nappes/Rhône
PK	Hydraulique				Isotopes	Invertébrés		Macrophytes	Physico-chimie	
	07/1968	09/1969	06/2008	03/2009	04-06/2008	05/2008	08/2008	06-07/2008	06-07/2008	
	Q+ (m ³ /j)	ME	ME	BE	ME/BE	ME/BE				
BE	BE	HE	ME	ME	ME	BE	ME/BE	ME/BE		
0										
0,5										
1										
1,5										
2										
2,5										
3										
3,5										
4										
4,5										
5										
5,5										
6										
6,5										
7										
7,5										
8										
8,5										
9										
9,5										
10										
10,5										
11										
11,5										
12										
12,5										
13										
13,5										
14										
14,5										
15										
15,5										
16										
16,5										
17										
17,5										
18										
18,5										
19										
19,5										
20										
20,5										
21										
21,5										
22										
22,5										
23										
23,5										
24										
24,5										
25										
25,5										
26										
26,5										
27										
27,5										
28										

Tableau 37 : Représentation comparative des résultats par métriques pour la rive gauche du canal de dérivation

Notes concernant le Tableau 37 :

- PK 2 à 4 métrique isotopique : les apports de nappe au Rhône constituent 1/3 de l’apport d’eau total au Rhône ;
- PK 8 à 9 métrique isotopique : les apports de nappe au Rhône constituent 9/10 de l’apport d’eau total au Rhône.



Carte 31 : Interprétation des échanges nappes/Rhône issue du croisement des métriques

8.2.1. 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 (Tableau 34 ; Tableau 35 ; Tableau 36 ; Tableau 37) en utilisant le même code couleur associé à un commentaire explicatif. Il faut de plus veiller à comparer des périodes hydrologiquement comparables.

8.2.2. 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 31 spatialise ce résultat. Cette carte est reproduite dans le recueil cartographique joint à ce rapport au format A3.

8.2.2.1. 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.

8.2.2.2. 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.

8.2.2.3. 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.

8.2.2.4. 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.

8.2.3. 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.

9. Conclusion

9.1. Efficacité des descripteurs

9.1.1. Hydraulique

L'approche utilisée montre tout l'intérêt et la simplicité d'utilisation de la Loi de Darcy pour calculer des débits d'échanges nappes/rivière sur les secteurs étudiés du Rhône. La généralisation de la loi de Darcy à l'échelle du Rhône n'est possible que sous réserve de l'applicabilité de la loi de filtration.

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

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

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

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

- elle limite l'effet observateur (utilisateur) potentiellement existant lors des calculs manuels ;
- elle est reproductible secteur après secteur sous réserve d'obtention des données nécessaires ;
- elle est souple d'utilisation car des données acquises ultérieurement peuvent être intégrées dans la base de données pour le calcul des débits (ex : champs de perméabilité, surfaces d'échange utile) ;
- elle permet, si les données existent, une représentation linéaire des échanges sur l'ensemble des berges et non plus une représentation ponctuelle comme avec les calculs manuels ;
- elle permet de réaliser des bilans à différentes échelles par agrégation des valeurs de débits sur les segments de berge. Ceci sera très pratique pour travailler à des échelles compatibles avec les résultats obtenus dans les métriques biologiques et géochimiques.
- elle permet d'instaurer une pondération en fonction de l'angle décrivant l'interface entre la nappe et le fleuve. En effet, la Loi de Darcy ne fonctionne que dans le cas où la nappe et le fleuve ont un écoulement perpendiculaire. Dans les autres cas, le débit calculé avec cette Loi est surévalué.
- elle permet d'automatiser l'enchaînement des fonctions d'analyse spatiale pour un traitement plus rapide.

Cette méthode est encore perfectible. Il conviendra entre autres d'évaluer au mieux les incertitudes pesant sur le calcul des débits et des gradients de nappe. En effet, la généralisation de la méthode demande au préalable une évaluation de la marge d'incertitude induite par les incertitudes des

chacune des variables servant au calcul des débits et des gradients de nappe. Il conviendra, en phase 4, de travailler sur la façon de prendre en compte les incertitudes dans la caractérisation des échanges. Il faudra tenir compte des incertitudes liées aux variables utilisées pour le calcul du débit d'échange : gradient de nappe, surface d'échange et perméabilité des alluvions. De plus, il faudra engager une réflexion concernant la distance optimale, par rapport à la rivière, à laquelle on détermine le niveau de nappe. Cette distance peut modifier la valeur du gradient de nappe calculé. Il faudra aussi inclure les problèmes de colmatages au niveau des berges et les freins au drainage.

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

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

9.1.2. *Invertébrés*

L'approche utilisée dans ce travail est basée sur l'observation que la distribution de la faune souterraine ou stygobie (adaptée à la vie en milieu souterrain) dans les interstices des cours d'eau est contrôlée par les patrons hydrologiques. Il a été montré en particulier que les influences relatives des apports d'eau de surface (riches en oxygène dissous et en matière organique biodégradable, mais thermiquement instables) et des apports d'eau souterraine (souvent pauvres en oxygène et en matière organique, mais tamponnés thermiquement) conduisaient à des compositions contrastées des peuplements interstitiels. Nous avons donc proposé d'utiliser cette composition des peuplements pour reconstituer l'origine des eaux baignant les sédiments d'un cours d'eau.

Les points positifs de cette méthode sont (i) d'offrir une source d'information indirecte de l'origine de l'eau et de sa dynamique, les organismes stygobies intégrant une grande diversité de caractéristiques environnementales, (ii) d'intégrer les échanges nappe-riwière sur des durées de l'ordre de plusieurs semaines, ces organismes étant peu mobiles ils rendent sans doute bien compte des échanges moyens au niveau d'une station, mais aussi (iii) de traduire les effets des changements saisonniers des niveaux relatifs des nappes et du fleuve. Ces avantages sont clairement mis en avant par le diagnostic des échanges nappe-fleuve au niveau des deux contre-canaux situés de part et d'autre du canal d'amenée. Des apports, variables dans le temps, d'eau de nappe du versant Drômois ont ainsi été diagnostiqués dans le contre-canal gauche et des apports très constants de pertes d'eau du Rhône ont pu être observés dans le contre-canal droit.

Les limites de cet indicateur "invertébrés souterrains" sont liées (i) à la lourdeur de leur échantillonnage (en termes d'effort de prélèvement sur le terrain et de tri au laboratoire) qui conduit à des diagnostics ponctuels à l'échelle de la station, donc discontinus sur la longueur des chenaux, (ii) à la difficulté d'identification des organismes, qui doit être réalisée par des spécialistes, et (iii) à la connaissance parfois limitée de leur écologie, qui ne permet pas toujours de préciser l'origine des eaux souterraines alimentant les interstices des sédiments. Ces limites sont clairement visibles au niveau du Rhône court-circuité (RCC ou vieux Rhône), où les apports du versant Ardéchois n'ont pu être diagnostiqués dans la partie la plus en amont du RCC et où l'influence de la nappe accompagnant l'Ardèche masque les pertes d'eau de surface vers la plaine au niveau de la confluence avec l'Ardèche.

Une étude plus détaillée du secteur de la confluence RCC - Ardèche ainsi que d'un autre secteur du Rhône plus en aval, devrait permettre de mieux préciser le cadre de l'utilisation de cet indicateur "invertébrés souterrains" dans la méthode globale de diagnostic des échanges nappe-rivière.

9.1.3. *Macrophytes et physico-chimie*

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

L'activité biologique dans les écosystèmes peut également biaiser l'outil (e.g. modifications des équilibres ioniques susceptibles de modifier le pH ou des activités biologiques modifiant la teneur en nitrates). La méthode physico-chimique se montre performante surtout pour indiquer les apports des nappes de versant. Il est également intéressant de noter que le niveau de trophie n'intervient pas dans cette méthode (faible pouvoir discriminant de l'ammonium et des phosphates), ce qui semble indiquer que ces paramètres, dont les variations sont influencées par l'activité biologique, influent peu sur la typologie, augmentant ainsi sa validité.

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

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

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

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

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

9.2. Bilan par chute CNR

Le Tableau 38 repositionne le travail déjà effectué et les données acquises ou en cours d’acquisition sur l’ensemble du cours du fleuve du point de vue hydraulique. Si les apports de la nappe aux Rhône ont pu être évalués sur certains secteurs, les apports des aquifères de seconde zone (aquifères satellites) aux nappes alluviales n’ont pas encore fait l’objet d’évaluations.

Localisation	Secteurs (chutes CNR)	Estimation de l’apport de la nappe au Rhône (m ³ /j)		Apports d’aquifères de seconde zone
		Rive gauche	Rive droite	
Haut-Rhône	Génissiat	Données CNR		
	Seyssel			
	Chautagne-Lavours	En cours (Modèle BURGEAP, Données CNR)		
	Belley	Données CNR		
	Brégnier-Cordon	Apports de la nappe au fleuve du PK 111 à 99 en m ³ /j : [32 373 ; 61 946] : Autres PK en cours	En cours	
	Pont d’Eviou à Sault-Brenaz (Port Lagnieu)			
	Port Lagnieu au Pont de Jons			
Rhône-Moyen	Pont de Jons à la Saône (Cusset, EDF)			
	Pierre-Bénite			
	Vaugris			
	Péage-de-Roussillon	Apports de la nappe au fleuve du PK 51 à 63 en m ³ /j : [46 880 ; 117 200] : Autres PK en cours	En cours	
	Saint-Vallier			
	Bourg-Lès-Valence			
Rhône-Aval	Beauchastel			
	Baix-Logis-Neuf			
	Montélimar			
	Donzère-Mondragon	Apports de la nappe au fleuve du PK 170 à 195 en m ³ /j : [126 361 ; 145 887] : Autres PK en cours	En cours	
	Caderousse	En attente des données CNR		
	Avignon			
	Vallabrègues			
	Pallier d’Arles 1			
	Pallier d’Arles 2			
Pallier d’Arles 3				

Tableau 38 : Bilan de la quantification des échanges nappes/Rhône

Le Tableau 39 dresse un bilan des données recueillies actuellement par unité d’aménagement CNR pour chacune des métriques. On observe :

- en gras : les chutes étudiées ;

- pour la métrique hydraulique : en bleu foncé les chutes pour lesquelles les données CNR sont acquises, en bleu clair les chutes pour lesquelles d'autres données (rapports, thèses...) sont déjà disponibles ;

- pour la métrique macrophyte : en vert foncé les chutes spécifiquement échantillonnées dans le cadre de l'étude ; en vert clair les chutes déjà échantillonnées par ailleurs ;

- pour la métrique invertébrés souterrains : en orange foncé les chutes spécifiquement échantillonnées dans le cadre de l'étude ; en orange clair les chutes déjà échantillonnées par ailleurs ;

- pour la métrique isotope : en rouge foncé les chutes spécifiquement échantillonnées dans le cadre de l'étude.

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

Tableau 39 : Etat d'avancement du recueil de données par unité d'aménagement CNR (chutes)

9.3. Applicabilité et pertinence de la méthode

Sur les deux grands secteurs étudiés, lors des deux dernières phases de travail, il apparaît que le croisement des métriques (hydraulique, invertébrés, macrophytes, physico-chimie) permet de réaliser un diagnostic convergent des échanges nappes/Rhône. Ce diagnostic est rendu possible grâce aux informations apportées par chacune des métriques. Ces informations peuvent être de même nature ou complémentaires : 1) de même nature si elles conduisent au diagnostic d'un même phénomène de manière convergente ou même divergente ; 2) complémentaires si elles autorisent le diagnostic de phénomènes différents ou si elles comblent les lacunes en données, permettant le diagnostic, de l'une ou l'autre des métriques.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

10. Perspectives

10.1. Planification de la phase 4

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

10.1.1.1. 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

10.1.1.2. Confluence Aygues/Rhône

- 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.

10.1.2. *Echanges en régime transitoire*

- i. Eléments méthodologiques
- ii. Recherche d'un site pertinent où l'alternance dans le temps du sens des échanges nappes/fleuve est avérée (Jons, Plaine de Peyaud, Brégner-Cordon...)
- iii. Visite de terrain, bibliographie, recueil des données et modèles existants
- iv. Recherche de piézomètres
- v. Campagne de mesure, équipement (suivi continu)
- vi. 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.

10.1.3. *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.

10.1.4. Valorisation résultats

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

10.2. Un sujet de thèse (démarrage en octobre 2010)

Intitulé : Approche spatio-temporelle pour la caractérisation et la modélisation de la dynamique des échanges nappe/rivière – Application au Rhône

Intitulé du sujet de thèse	Approche spatio-temporelle pour la caractérisation et la modélisation de la dynamique des échanges nappe/rivière – Application au Rhône
Laboratoire d'accueil	UR SEPIT (Sciences de l'Environnement pour les Processus Industriels et territoriaux)
Directeur de thèse	Direction : Didier Graillot ENSM-SE UR SEPIT Co-direction : Mireille Batton-Hubert Maître de conférences ENSM-SE, UR LSTI (équipe CROCUS)
Laboratoire de rattachement	Centre SITE ENSM-SE
Autres membres de l'encadrement	F. Paran, Y. Travy, P. Marmonier, G. Bornette, L. Cadilhac
Nomenclature ministérielle http://dr.education.fr/SIREDO/DS_RSD_SD	DS3

10.2.1. Contexte/objectif

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) impose à l'horizon 2015 de prendre en compte les masses d'eaux souterraines pour la durabilité et la disponibilité des ressources en eau sur le territoire.

Actuellement une réflexion doit être engagée sur la façon de caractériser la dynamique des échanges nappes/rivière pour des systèmes aquifères alluviaux superficiels à grande échelle connectés à un système hydrographique principal et secondaire. Lorsque sur ce type d'aquifère, des modélisations hydrogéologiques locales 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 ? Afin de répondre à cette problématique, il devient stratégique de se focaliser sur les relations hydrodynamiques aux interfaces eaux superficielles/eaux souterraines.

10.2.2. Démarche

La première démarche initiée dans les travaux précédents consiste à utiliser les fonctionnalités SIG d'analyse spatiale pour calculer automatiquement les gradients hydrauliques de nappes correspondant aux différentes configurations d'échange. Elle est fondée sur une analyse géométrique des niveaux piézométriques.

Mais cette approche ne prend pas en compte la variation temporelle à plusieurs échelles (journalières à saisonnières) ni la résolution spatiale à laquelle doivent être analysés ces échanges hydrauliques pour une compréhension plus fine des écoulements. La notion de régime transitoire en matière d'échanges nappes/ rivières est l'un des deux axes principaux de ce sujet de thèse.

La répercussion des variations journalières ou hebdomadaires ou saisonnières du niveau des fleuves sur les régimes d'étiage ou de hautes eaux (nappe/fleuve) pourrait être traitée à partir de séries chronologiques de niveau dans le fleuve et de hauteurs piézométriques en nappe. Leur traitement par analyse corrélatoire ou spectrale pourra être envisagé.

La prise en compte de l'échelle spatiale pourrait en partie être appréhendée par des techniques de modélisation à différentes échelles. A grande échelle, une méthode de modélisation 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 sera testée. 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.

Dans les travaux antérieurs, les échanges nappe/rivière ont été confrontés à d'autres paramètres ou métriques biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes). Les métriques biologiques (invertébrés souterrains et macrophytes) seront utilisées, là où les données existent, en tant que critère de validation supplémentaire et en particulier en cas de divergence des résultats (intensité relative et direction des échanges).

Les résultats du modèle global et de l'analyse locale, feront l'objet d'une comparaison complémentaire avec 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 vérifier les mécanismes d'échange entre les nappes et le fleuve (débits contributifs, vitesses d'écoulement, gradients, temps de séjours, localisation des zones de recharge).

Il s'agira de mettre en applications ces méthodes pour évaluer les débits d'échange et leur effet sur la qualité des eaux de surface et souterraines second axe de ce sujet de thèse. On entend par qualité les paramètres de physico-chimie, biologiques, les métaux, les HAP, les PCB et les micropolluants (pesticides).

Les corrélations entre les concentrations en polluants mesurées dans le fleuve et celles relevées dans les piézomètres seront établies par analyse multivariée selon la nature des données (indices, classes, valeurs continues de concentrations). La sensibilité des invertébrés souterrains et de la végétation aquatique à ces variations de qualité ou à ces pollutions permettra de statuer sur leur rôle de détection. Il s'agira également de savoir si cela ne perturbe pas leur pouvoir indicateur sur l'intensité des échanges.

10.2.3. Partenariat

- Partenaires scientifique : ZABR, UMR 5023 Ecologie des hydrosystèmes fluviaux (EHF)
- Acteurs territoriaux : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, ONEMA, Détenteurs de données et de modèles (CNR, EDF, AREVA, EPL, syndicats mixtes, BE,...)

10.2.4. Coordination avec les sujets de recherche de l'Institut Fayol

Cette thèse se situe dans la continuité des travaux menés sur la modélisation spatiale et temporelle des phénomènes continus dans le domaine de l'eau et s'insère dans le projet Echanges nappes/Rhône de l'accord cadre entre la ZABR et l'agence de l'eau Rhône Méditerranée- Corse. Elle s'inscrit dans la thématique 2 (maîtrise des ressources pour l'aménagement du territoire) de l'UR SEPIT (Sciences de l'Environnement pour les Processus Industriels et Territoriaux) et dans le thème « incertitudes et fusion d'information » de l'équipe CROCUS / LSTI. Ce sujet s'inscrit également dans le programme gestion des ressources territoriales de l'Institut Fayol.

10.2.5. 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 (formation doctorale Sciences et génie de l'Environnement)

10.3. Corrélation entre les métriques sur Brégnier-Cordon et sur Donzère-Mondragon

Dans les phases ultérieures de ce projet de recherche, il conviendra de dépasser la méthode consistant à croiser simplement les métriques par superposition cartographique. Il faudra mobiliser des méthodes statistiques, géostatistiques ou d'analyse de données, par exemple, afin de mettre en évidence, le cas échéant, les corrélations existantes entre chacune des métriques. Ces corrélations pourront être recherchées d'une part séparément pour chacun des secteurs étudiés et d'autre part globalement sur l'ensemble des secteurs investigués.

Les principales difficultés de ce travail sont les suivantes :

- recherche de la méthode la plus adaptée à la détermination des corrélations ;
- définition de l'échelle de travail pertinente car les indicateurs n'ont pas tous la même sensibilité spatiale ;
- prise en compte des spécificités et de la nature de chacun des indicateurs (volume, indice, taux...).

Au final, l'existence de corrélations spatiales conduirait à une validation de notre méthodologie interdisciplinaire d'évaluation des échanges nappes/rivière. De plus, ceci permettrait d'affiner le pouvoir indicateur des métriques biologiques sur le plan quantitatif en associant à un indice actuellement qualitatif, une valeur (ou une gamme) de volume d'eau (débit) échangé.

Partenaires et correspondants

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

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

Bibliographie

Métrieque hydraulique

- Anonyme (1955) A l'échelle de Donzère-Mondragon (schémas). *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 164-166.
- Anonyme (1955) Donzère-Mondragon : chiffres et schémas. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 151-163.
- Banque hydro : <http://hydro.eaufrance.fr>
- Bossy M.M. & Chappuis (1955) Ouvrages d'entrée de Donzère. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 225-232.
- Bouvet M. (1955) Les revêtements de batillage du canal de dérivation. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 253-266.
- Caquot A. (1955) Les ouvrages d'art du canal de Donzère-Mondragon. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 301-310.
- CNRa (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. Volet 2 : Hydraulique – Dossiers historiques. Dossier historique : Donzère-Mondragon. DI-CE 99-1237. 46p.
- CNRb (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. Volet 2 : Hydraulique – Diagnostic hydraulique par bief. Diagnostic hydraulique du bief de : Donzère-Mondragon. DIT-HY 02-0049. 48p.
- Craste M. (1955) Construction du barrage de retenue sur le Rhône à Donzère *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 169-184.
- David A. (1955) Le programme agricole, complément de l'aménagement hydroélectrique. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 409-422.
- Delattre P. (1955) La place des ouvrages de Donzère-Mondragon dans le programme d'aménagement du Rhône. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 11-20.
- DIREN-RA (1984) Contribution des services extérieurs du ministère de l'agriculture à la connaissance des ressources en eaux souterraines dans le département de l'Ardèche. SRAE-RA, DDA-Ardèche, 115p.
- DIREN-RA (2001) Département de la Drôme. Bilan hydrogéologique départemental. DIREN-RA, 121p.
- Genevrey F. (1955) Perspectives pour le monde agricole dans les régions avoisinant les travaux de Donzère-Mondragon. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 423-424.
- GEO+ (1999) Etat des lieux de la pollution azotée. Aquifère du département de la Drôme, nappe du Tricastin. CG 26 service de gestion de l'eau, DIREN-SEMA. 9p.
- Guégan B. (1972) Tritium et bilan hydrogéologique en cas de pollution de la nappe alluviale du Rhône entre Donzère (Drôme) et Mondragon (Vaucluse). Thèse de Géodynamique externe (hydrogéologie), Université ParisVI.
- Henry M. (1955) Les problèmes liés aux sables et aux graviers. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 39-54.

Références bibliographiques

- Houette H. (1955) Les travaux de génie civil de la dérivation de Donzère-Mondragon. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 239-252.
- Jacob C. (1955) Site et conditions géologiques de l'aménagement de la chute de Donzère-Mondragon. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 21-35.
- Maire A. (1955) Le rétablissement des communications, de l'écoulement des eaux et de la nappe. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 311-332.
- MES_V1 : http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/dce/MES_V1/
- Miche R. (1955) Etude du canal de dérivation de Donzère-Mondragon et des ouvrages qui le bordent. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 81-100.
- Parascandola M.F. (1982) Synthèse hydrogéologique de la région Rhône-Alpes. BRGM 82 SGN 380 RHA.
- Pavin A. (1955) Construction du bloc usine-déchargeur-écluse de Bollène. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 267-300.
- Poinsart D. (1992) Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides. L'exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon. Thèse de Géographie-Aménagement, Université Lyon 3.
- Saby M. (1955) L'équipement du barrage de retenue de Donzère. *La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien*, Numéro hors série, pp. 185-204.
- SIERM (2005) <http://sierm.eaurmc.fr/telechargement/index.php#prelevements>
- SOGREAH (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide. Volet 3 : Dynamique fluviale – Transport solide. 1^{er} étape : Diagnostic de l'état actuel : analyse par aménagement. CNR, IRS. 250p.
- Tirat M., Cottureau C. & Mongereau N. (2006) Couloir Rhodanien-Provence-Languedoc – Vallée du Rhône. In. Aquifères et eaux souterraines en France, Tome 2. BRGM éditions, pp.658-687.

Métrieque invertébrés souterrains

- Creuzé des Châtelliers, M. 1991. Dynamiques de répartition des biocénoses interstitielles du Rhône en relation avec des caractéristiques géomorphologiques (secteurs de Brégnier-Cordon, Miribel-Jonage et Donzère-Mondragon). Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 161 p.
- Plénet, S., Hugueny, H., Gibert, J. 1996. Invertebrate community response to physical and chemical factors at the river/aquifer interaction zone II. Downstreal from the city of Lyon. *Arch. Hydrobiol.* 136: 65-88

Métrieque macrophytes

- Amoros C., Bornette G. et Pascal Henry C., 2000. A vegetation-based method for ecological diagnosis of riverine wetlands. *Environmental Management*, Vol. 25, Num. 2, p. 211-227
- Bravard J-P. et Clémens A. (sous le dir.), 2008. Le Rhône en 100 questions. ZABR, édité par la GRAIE, 290 p.
- George P., 1980. Tricastin 1980. *Annales de Géographie*, Volume 89, Numéro 494, p. 401- 423
- Georges P., 1931. Le Tricastin, un petit pays des confins du Dauphiné et de la Provence. Etude de

géographie économique et humaine. Les Etudes rhodaniennes, vol. 7.

- Guégan B., 1972. Tritium et bilan hydrogéologique en cas de pollution de la nappe alluviale du Rhône entre Donzère (Drôme) et Mondragon (Vaucluse). Thèse de Géodynamique externe (hydrogéologie), Université ParisVI
- Rivoire E. et Bornette G., 2006. Mise à jour des profils écologiques des espèces végétales aquatiques utilisées pour la méthode de diagnostic fonctionnel des zones humides périfluviales. Non publié
- Suchel J-B., 1957. L'hydraulique agricole dans le couloir rhodanien entre Vienne et Bollène, projets et réalisations. Revue de géographie de Lyon, vol. 32, n° 3, pp 27.

Liste des figures, tableaux et cartes

Liste des figures

Figure 1 : Schémas des hauteurs d'eau et des températures minimales et maximales mensuelles moyennes (1971 – 2000), pour Orange et Montélimar (Météo France)	18
Figure 2 : Altitude comparée des niveaux de nappes et du talweg du Rhône en rive gauche du Vieux-Rhône de l'aval du barrage de retenue (segment 1 au PK 172) à l'amont de la restitution (segment 985 au PK 195).....	49
Figure 3 : Altitude comparée des niveaux de nappes en rive droite du canal de dérivation de l'aval du barrage de garde (segment 1 au PK 0) à l'amont de la restitution (segment 2444 au PK 26). L'usine Blondel se situe environ au niveau du segment n°1150 (PK 17,3).....	49
Figure 4 (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)	69
Figure 5 (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).....	69
Figure 6 (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)	70
Figure 7 (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)	70
Figure 8 : 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)	71
Figure 9 : Répartition des sites sur les axes factoriels 1, 2 et 3 (la couleur des points est indicative de la nature des sites échantillonnés).....	88
Figure 10 : Cercles des corrélations des paramètres physico-chimiques avec les axes factoriels 1, 2 et 3....	88
Figure 11 : Cercle des corrélations de la seconde ACP, avec les axes factoriels 1 et 2	89
Figure 12 : Localisation des sites de la littérature sur le secteur de Donzère-Mondragon : a) localisation des sites sur l'ensemble de la chute ; b) sites au niveau de Saint-Montant ; c) sites au niveau de Pont Saint-Esprit ; c) site au niveau de Mondragon.....	96
Figure 13 : Répartition des 64 stations de mesure en mai 2008 en fonction des affluents et des aquifères superficiels.....	97
Figure 14 : Répartition des 23 stations échantillonnées en août 2008.....	98
Figure 15 : Abondances moyennes des stygobies échantillonnés sur les sites hyporhéiques en mai et position des puits (pt1, pt2 et pt3) échantillonnés à proximité du Rhône.....	100
Figure 16 : Localisation des puits échantillonnés à proximité des rives du Rhône en mai 2008 : a) Puits 1 situé sur la commune de Saint-Montant, b) Puits 2 situé sur la commune de Saint-Just et c) Puits 3 situé à Lapalud.....	101
Figure 17 : Abondances moyennes des stygobies échantillonnés sur les sites en août 2008.	102
Figure 18 : Synthèse des résultats obtenus au cours des deux campagnes d'échantillonnage réalisées en mai et août 2008 sur le secteur de Donzère-Mondragon	105
Figure 19 : Apports de nappe au fleuve : vue 3D	110
Figure 20 : Apports de nappe au fleuve : représentation simplifiée.....	110
Figure 21 : Apports du fleuve à la nappe : vue 3D.....	111
Figure 22 : Apports du fleuve à la nappe : représentation simplifiée	111

Liste des figures, tableaux, cartes et équations

Figure 23 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : vue 3D	112
Figure 24 : Recyclage d'eau superficielle via la nappe vers le fleuve : représentation simplifiée	112
Figure 25 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : vue 3D.....	113
Figure 26 : Apports d'un mélange d'eau de nappe et d'eau recyclée au fleuve : représentation simplifiée	113
Figure 27 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : vue 3D	114
Figure 28 : Pas d'échange entre le fleuve et la nappe : représentation simplifiée	114
Figure 29 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : vue 3D	115
Figure 30 : Colmatage entre la nappe et le fleuve : représentation simplifiée.....	115

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques techniques des barrages à Donzère-Mondragon (d'après Sogreah, 1999 ; Saby, 1955 ; Craste, 1955 ; Anonyme, 1955).....	12
Tableau 2 : Caractéristiques du canal de dérivation (Miche, 1955 ; Houette, 1955 ; Poinart, 1992).....	14
Tableau 3 : Prélèvements d'eau superficielle à Donzère-Mondragon (d'après SIERM, 2005)	17
Tableau 4 : Prélèvements d'eau souterraine à Donzère-Mondragon (d'après SIERM, 2005)	17
Tableau 5. Débit du Rhône sur le secteur de Donzère-Mondragon (CNRa, 1999 ; CNRb, 1999 ; Sogreah, 1999).....	19
Tableau 6 : Evolution de la pente de la ligne d'eau du Rhône en fonction des débits (Sogreah, 1999).....	20
Tableau 7 : Débit de l'Ardèche (Sogreah, 1999 ; Banque Hydro).....	21
Tableau 8 : Débits des affluents du Rhône en rive gauche (Maire, 1995 ; Sogreah, 1999)	21
Tableau 9 : Influence de la pluviométrie sur le niveau de la nappe alluviale (d'après Guégan, 1972).....	32
Tableau 10 : Paramètres physiques de la nappes alluviales de Donzère-Mondragon (Guégan, 1972).....	33
Tableau 11 : Perméabilités des limons.....	33
Tableau 12 : Etats hydrologiques de la nappe et du Rhône à sur la chute CNR de Donzère-Mondragon.....	48
Tableau 13 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en juillet 1968.....	51
Tableau 14 : Caractérisation des échanges en droite du canal de dérivation en juillet 1968.....	52
Tableau 15 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en septembre 1969.....	53
Tableau 16 : Caractérisation des échanges en rive droite du canal de dérivation en septembre 1969	54
Tableau 17 : Caractérisation des échanges en rive gauche du canal de dérivation en septembre 1969	55
Tableau 18 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en juin 2008.....	56
Tableau 19 : Caractérisation des échanges en rive droite du canal de dérivation en juin 2008.....	57
Tableau 20 : Caractérisation des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône en mars 2009	58
Tableau 21 : Caractérisation des échanges en rive droite du canal de dérivation en mars 2009.....	59
Tableau 22 : Bilan global des échanges en rive gauche du Vieux-Rhône.....	64
Tableau 23 : Bilan global des échanges en rive droite du canal de dérivation	64
Tableau 24 : Bilan des échanges par secteur en rive gauche du Vieux-Rhône	65
Tableau 25 : Bilan des échanges pour secteur en rive droite du canal de dérivation.....	65
Tableau 26 : Bilan des échanges sur le canal d'amenée et le canal de fuite en rive droite du canal de dérivation.....	66
Tableau 27 : Comparaison de l'intensité des échanges avec des études antérieures	68
Tableau 28 : Secteur Donzère-Mondragon. Analyses isotopiques, résultats et localisation des prélèvements	72
Tableau 29 : Résultats isotopiques actuellement disponibles sur les précipitations, secteur de Valence	74
Tableau 30 : Résultats isotopiques actuellement disponibles sur les précipitations, secteur d'Avignon.....	74
Tableau 31: Les indices de la méthode de Braun-Blauquet (1932).....	78
Tableau 32 : Coefficients de corrélation entre les différents paramètres	89
Tableau 33 : Distribution des espèces stygobies dans les différentes masses d'eau du secteur	99
Tableau 34 : Représentation comparative des résultats par métriques pour la rive droite du Vieux-Rhône	116
Tableau 35 : Représentation comparative des résultats par métrique pour la rive gauche du Vieux-Rhône	117
Tableau 36 : Représentation comparative des résultats par métriques pour la rive droite du canal de dérivation.....	118

Tableau 37 : Représentation comparative des résultats par métriques pour la rive gauche du canal de dérivation.....	119
Tableau 38 : Bilan de la quantification des échanges nappes/Rhône	126
Tableau 39 : Etat d'avancement du recueil de données par unité d'aménagement CNR (chutes)	127

Liste des cartes

Carte 1 : Découpage administratif de l'aménagement de Donzère-Mondragon (source BDCarthage)	8
Carte 2 : Réseau hydrographique et principaux aménagements sur le secteur de Donzère-Mondragon (Nord).....	10
Carte 3 : Réseau hydrographique et principaux aménagements sur le secteur de Donzère-Mondragon (Sud)	11
Carte 4 : Géologie du secteur de Donzère-Mondragon (Jacob, 1955)	24
Carte 5 : Localisation des sondages (Guégan, 1972)	26
Carte 6 : Localisation des entités hydrogéologiques (référentiel bdrhfv1).....	27
Carte 7 : Carte piézométrique en période sèche du 15 au 30 juillet 1968 (Zoom, Guégan, 1972).....	30
Carte 8 : Carte piézométrique en période humide de septembre 1969 (Zoom, Guégan, 1972)	31
Carte 9 : Localisation des zones captives et libres de la nappe alluviale du Rhône (Zoom, Guégan, 1972) ...	34
Carte 10 : Isopaques des limons dans le secteur de Donzère-Mondragon (Zoom, Guégan, 1972).....	35
Carte 11 : Zonage du comportement de la nappe alluviale (Henry, 1955)	36
Carte 12 : Comportement de la nappe sur le site du CEA et localisation des puits dans ce secteur (Guégan, 1972).....	37
Carte 13 : Localisation du tube de courant étudié par Guégan (1972) et des principaux repères utilisés dans son travail (puits, sondages, stations de jaugeage).....	40
Carte 14 : Ecoulement général de l'aquifère sur le secteur de Donzère-Mondragon et échanges nappe/canal de dérivation/Gaffière-Lauzon (Montage, Guégan, 1972)	42
Carte 15 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en juillet 1968.....	60
Carte 16 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en septembre 1969	61
Carte 17 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en juin 2008.....	62
Carte 18 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en mars 2009.....	63
Carte 19 : Sectorisation comparée des échanges pour la plaine du Tricastin.....	67
Carte 20 : Localisation de l'échantillonnage et valeurs des conductivités en $\mu\text{S}/\text{cm}$	73
Carte 21 : Sites échantillonnés sur le secteur de Donzère-Mondragon.....	77
Carte 22 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques de la plaine alluviale du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon estimé par les exigences écologiques des espèces végétales composant les peuplements aquatiques.....	79
Carte 23 : Niveau relatif d'eutrophisation des milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon estimé via les relevés de végétation.....	81
Carte 24 : Estimation de l'intensité des apports phréatiques aux milieux aquatiques du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon	83
Carte 25 : Apports des versants dans les milieux aquatiques de la plaine du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon (obtenus par combinaison des indices de trophie et d'apports phréatiques estimés indépendamment par la végétation)	84
Carte 26 : Synthèse de l'évaluation des échanges nappe-fleuve dans le secteur de Donzère-Mondragon, reposant sur la valeur indicatrice des peuplements végétaux aquatiques	86
Carte 27 : Localisation et typologie des sites d'échantillonnage (BD Carthage, IGN).....	87
Carte 28 : Projection et interpolation des coordonnées factorielles de l'axe 1, de la seconde ACP sur l'espace géographique de Donzère Mondragon	90
Carte 29 : Projection et interpolation des coordonnées factorielles de l'axe 2, de la seconde ACP sur l'espace géographique de Donzère Mondragon	91
Carte 30 : Carte de synthèse des données physico-chimiques	92
Carte 31 : Interprétation des échanges nappes/Rhône issue du croisement des métriques	120

Table des matières complète

Fiche signalétique.....	I
Table des matières synthétique	III
Résumé	V
1. Introduction	1
1.1. <i>Finalités, objectifs et planification du projet</i>	1
1.1.1. Finalités opérationnelles, objectifs et méthodologie.....	1
1.1.2. Phases de l'étude	2
1.1.3. Phase 1 (2006-2007) et premiers résultats.....	3
1.1.4. Phase 2 (2007-2008).....	3
1.2. <i>Justification du choix de la chute CNR de Donzère-Mondragon</i>	4
1.2.1. Volet hydraulique.....	4
1.2.2. Volet faune : invertébrés souterrains	5
1.2.3. Volet flore : macrophytes.....	5
1.3. <i>Organisation du rapport</i>	5
2. Présentation hydraulique de la chute CNR de Donzère-Mondragon	7
2.1. <i>Localisation géographique et administrative du secteur de Donzère-Mondragon</i>	7
2.2. <i>Aménagements CNR du secteur de Donzère-Mondragon</i>	9
2.2.1. Les barrages.....	11
2.2.1.1. Barrage de retenue.....	12
2.2.1.2. Barrages de garde (PK 0 du canal de dérivation)	12
2.2.1.3. Usine Blondel : bloc usine-déchargeur-écluse de Bollène	13
2.2.2. Le canal de dérivation	13
2.2.3. Les contre-canaux	14
2.2.4. Les siphons	15
2.2.5. Les digues	15
2.2.6. Les revêtements des berges du canal de dérivation.....	16
2.3. <i>Usages de l'eau</i>	16
2.3.1. Plan pour l'irrigation en 1955.....	16
2.3.2. Les usages de l'eau aujourd'hui.....	17
2.4. <i>Hydrologie du secteur de Donzère-Mondragon</i>	18
2.4.1. Un climat méditerranéen soumis aux épisodes cévenoles	18
2.4.2. Le Rhône	18
2.4.2.1. Débits du Rhône, pente et morphologie du lit	18
2.4.2.2. Lignes d'eau et profil en long du fond du lit du Rhône	19
2.4.3. L'Ardèche	21
2.4.4. Les autres cours d'eau	21
2.5. <i>Géologie et hydrogéologie du secteur de Donzère-Mondragon</i>	22
2.5.1. Description générale	22
2.5.2. Entités hydrogéologiques en présence	28
2.5.3. Hydrogéologie de Donzère-Mondragon : La nappe alluviale de la Plaine du Tricastin	28
2.5.4. Description des limons	33
2.5.5. Description du substratum sous-alluvial.....	37
2.5.6. Influence du canal de dérivation sur la nappe.....	37
2.5.6.1. Influence du canal d'amenée	38
2.5.6.2. Influence du canal de fuite	38
2.5.7. Les échanges nappe/rivière	38
2.5.7.1. Le Rhône	39
2.5.7.2. Le canal de dérivation	41
2.5.7.3. Gaffière-Lauzon	41

2.5.8. Les échanges entre aquifères	42
3. Description et présentation des données disponibles	45
3.1. Volet hydraulique	45
3.2. Volet faune : invertébrés souterrains.....	46
3.3. Volet végétation et chimie	46
4. Métrique hydraulique : caractérisation des échanges nappes/Rhône sur la chute CNR Donzère-Mondragon (Bas-Rhône).....	47
4.1. Piézométries de départ, états hydrologique et perméabilités	47
4.2. Altitudes comparées de la nappe et du talweg du Rhône.....	48
4.3. Caractérisations des échanges nappes/Rhône.....	50
4.3.1. Juillet 1968 – Basses-eaux de nappe : Rive gauche du Vieux-Rhône et rive droite du canal de dérivation	50
4.3.2. Septembre 1969 – Moyennes-eaux de nappes: Rive gauche du Vieux-Rhône et rives gauche et droite du canal de dérivation	52
4.3.3. Juin 2008 – Hautes-eaux de nappe : Rive gauche du Vieux-Rhône et rive droite du canal de dérivation	55
4.3.4. Mars 2009 – Moyennes-eaux de nappe: Rive gauche du Rhône court-circuité et rive droite du canal de dérivation	58
4.4. Bilan des échanges sur Donzère-Mondragon.....	64
4.5. Comparaison avec d'autres évaluations des échanges sur Donzère-Mondragon.....	67
5. Métrique isotopique : Utilisation des isotopes stables (¹⁸O) et radioactifs (tritium) pour évaluer les échanges nappe-rivière dans le secteur Donzère-Mondragon	69
5.1. Préambule : apport des isotopes stables	69
5.2. Principe de la méthode.....	71
5.3. Travaux de terrain, résultats préliminaires et perspectives.....	72
5.4. Conclusions	75
6. Métriques végétation aquatique et physico-chimique.....	77
6.1. Métrique hydrobiologique : végétation aquatique	77
6.1.1. Méthodologie et caractéristiques des relevés de végétation	77
6.1.2. Distribution spatiale des diagnostics fonctionnels obtenus.....	78
6.1.3. Interpolation des résultats pour la trophie	80
6.1.4. L'intensité des apports phréatiques	82
6.1.5. Fréquence relative d'espèces associées à des apports souterrains de versant	85
6.1.6. Synthèse.....	85
6.2. Analyses physico-chimiques et alimentation phréatique.....	87
6.2.1. Matériel et méthode.....	87
6.2.2. Résultats des analyses en composantes principales	88
6.2.3. Interprétation des résultats des ACP	89
6.2.4. Validation des résultats et critiques de la méthode.....	92
6.3. Evaluation de la méthode	93
7. Métrique invertébrés souterrains.....	95
7.1. Méthode de caractérisation des origines hydrologiques par leurs signatures faunistiques.....	95
7.2. Stations échantillonnées.....	96
7.3. Analyses et interprétation sur le secteur de Donzère-Mondragon.....	98
7.4. Conclusions et perspectives.....	104
8. Croisement et superposition des métriques	107
8.1. Synthèse rapide des résultats par métriques	107
8.1.1. Métrique hydraulique	107
8.1.2. Métrique isotopique	107
8.1.3. Métrique invertébrés souterrains.....	108
8.1.4. Métriques végétation et physico-chimiques	108
8.2. Analyse comparative des métriques	109
8.2.1. Choix de l'échelle spatiale	121
8.2.2. Interprétation croisée des métriques sur Donzère-Mondragon.....	121
8.2.2.1. Vieux-Rhône rive droite	121

8.2.2.2. Vieux-Rhône rive gauche	121
8.2.2.3. Canal de dérivation rive droite	122
8.2.2.4. Canal de dérivation rive gauche	122
8.2.3. Facteurs explicatifs de ces échanges	122
9. Conclusion	123
9.1. <i>Efficacité des descripteurs</i>	123
9.1.1. Hydraulique	123
9.1.2. Invertébrés	124
9.1.3. Macrophytes et physico-chimie	125
9.2. <i>Bilan par chute CNR</i>	126
9.3. <i>Applicabilité et pertinence de la méthode</i>	127
10. Perspectives	129
10.1. <i>Planification de la phase 4</i>	129
10.1.1. Etude synchrone multi-échelle et multi-métrique des échanges nappes/Rhône et entre masses d'eau souterraines différentes	129
10.1.1.1. Confluence Ardèche/Rhône	129
10.1.1.2. Confluence Aygues/Rhône	129
10.1.2. Echanges en régime transitoire	129
10.1.3. Mise en place d'une Database commune cohérente avec la nomenclature de Database existantes (ex : code BSS)	129
10.1.4. Valorisation résultats	130
10.2. <i>Un sujet de thèse (démarrage en octobre 2010)</i>	130
10.2.1. Contexte/objectif	130
10.2.2. Démarche	130
10.2.3. Partenariat	131
10.2.4. Coordination avec les sujets de recherche de l'Institut Fayol	131
10.2.5. Profil du candidat	131
10.3. <i>Corrélation entre les métriques sur Brégnier-Cordon et sur Donzère-Mondragon</i>	132
Partenaires et correspondants	133
Bibliographie	135
<i>Métrique hydraulique</i>	135
<i>Métrique invertébrés souterrains</i>	136
<i>Métrique macrophytes</i>	136
Liste des figures, tableaux et cartes	139
<i>Liste des figures</i>	139
<i>Liste des tableaux</i>	140
<i>Liste des cartes</i>	141
Table des matières complète	143
Table des matières des annexes	147
Listes des cartes du recueil de cartes	149

Table des matières des annexes

1. Echanges nappes/Rhône sur la chute CNR de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône) : résultats complémentaires.....	1
1.1. <i>Altitudes comparées de la nappe et du talweg du Rhône.....</i>	1
1.2. <i>Caractérisation globale des échanges nappes/Rhône à l'amont de la confluence Rhône-Guiers 1</i>	
1.3. <i>Caractérisation globale des échanges nappes/Rhône à l'aval de la confluence Rhône-Guiers... 5</i>	5
1.4. <i>Bilan sur Brégnier-Cordon.....</i>	6
2. Compléments à la présentation hydraulique de Donzère-Mondragon.....	9
2.1. <i>Généralités concernant le contexte géologique et hydrogéologique de la Vallée du Rhône (de Lyon à la mer méditerranée).....</i>	9
2.2. <i>Le canal de fuite et le rôle des puits de réinfiltration pour maintenir le niveau de la nappe.....</i>	11
3. Méthodes de prélèvements des invertébrés souterrains.....	13
3.1. <i>Prélèvements dans le milieu hyporhéique (sédiments des cours d'eau).....</i>	13
3.2. <i>Prélèvements dans les puits.....</i>	13
3.3. <i>Prélèvements dans les sources.....</i>	14
4. Cahier des charges pour l'étude isotopique sur Donzère-Mondragon.....	15
5. Fiches projets.....	17
5.1. <i>Fiche action recherche valorisation n°A 11 - Phase 2 (2007-2008).....</i>	17
5.2. <i>Fiche action recherche valorisation n°A 1 - Phase 3 (2008-2010).....</i>	20
5.3. <i>Fiche action recherche valorisation n°A 9 - Phase 4 (2010-2012).....</i>	26
6. Fiches de synthèse.....	35
6.1. <i>Phase 1.....</i>	35
6.2. <i>Phase 2.....</i>	37
7. Compte-rendu de terrains et de réunions.....	39
7.1. <i>Sortie terrain à Donzère Mondragon : 7-8 février 2008.....</i>	39
7.2. <i>Sortie terrain complémentaire à Donzère-Mondragon : Vendredi 25 avril 2008.....</i>	56
7.3. <i>Sortie de terrain n°3 à Donzère-Mondragon : Mardi 17 juin 2008.....</i>	59
7.4. <i>Rencontre avec le LADES (LABoratoire de datation Des Eaux Souterraines) : Mercredi 2 juillet 2008.....</i>	62
7.5. <i>Réunion de travail : 2 juillet 2008.....</i>	63
7.6. <i>Comité Plénier : 3 juillet 2008.....</i>	64
7.7. <i>Réunion de travail : Lundi 22 septembre 2008.....</i>	65
7.8. <i>Réunion à la CNR (Lyon) : Mardi 21 octobre 2008.....</i>	67
7.9. <i>Comité Technique : Lundi 20 avril 2009.....</i>	68
7.10. <i>Réunion technique Isotopes : Mardi 16 juin 2009.....</i>	70
7.11. <i>Comité technique : Vendredi 5 février 2010.....</i>	71
7.12. <i>Réunion : 7 avril 2010.....</i>	73

Listes des cartes du recueil de cartes

Carte 1 : Réseau hydrographique et principaux aménagements sur le secteur de Donzère-Mondragon (Nord)	1
Carte 2 : Réseau hydrographique et principaux aménagements sur le secteur de Donzère-Mondragon (Sud)	3
Carte 3 : Carte piézométrique en période sèche du 15 au 30 juillet 1968 (Zoom, Guégan, 1972)	5
Carte 4 : Carte piézométrique en période humide de septembre 1969 (Zoom, Guégan, 1972)	7
Carte 5 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en juillet 1968	9
Carte 6 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en septembre 1969	11
Carte 7 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en juin 2008	13
Carte 8 : Sectorisation des échanges nappe/Rhône en mars 2009	15
Carte 9 : Sectorisation comparée des échanges pour la plaine du Tricastin	17
Carte 10 : Interprétation des échanges nappes/Rhône issue du croisement des métriques	19

