



CARACTÉRISATION DES ÉCHANGES NAPPES/ RIVIÈRES EN MILIEU ALLUVIONNAIRE

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

Milieus alluvionnaires

BASSINS RHÔNE-MÉDITERRANÉE ET CORSE

Septembre 2015

CARACTERISATION DES ÉCHANGES NAPPES/RIVIERES EN MILIEU ALLUVIONNAIRE

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

Auteurs

¹PARAN F, ²ARTHAUD F, ³NOVEL M, ¹GRAILLOT D, ⁴BORNETTE G, ⁵PISCART C,
^{3,9}MARMONIER P, ⁶LAVASTRE V, ⁷TRAVI Y, ⁸CADILHAC L

Contributeurs (par ordre alphabétique)

³Baillet H, ³Capderrey C, ⁹Clémens A, ¹Dechomets R, ¹⁰Doutriaux E, ¹Dujardin F,
³Ferreira D, ¹Gaur S, ¹Germain A, ³Gibert J, ³Jezequel C, ¹¹Lafont M., ¹Lalot E, ¹Mimoun D,
³Puijalon S, ³Rodriguez C, ¹²Roux-Michollet D., ³Simon L, ⁷Stroffek S, ¹⁰Taravel Y,
¹³Winiarski T

1. ENSM-SE – GSE : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SPIN, UMR CNRS 5600 EVS, Département Géo-Sciences et Environnement,
2. US-CARTEL : Université de Savoie, UMR INRA 042, Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques
3. UCBL – LEHNA : Université Claude Bernard Lyon 1, UMR CNRS 5023, Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
4. UMR CNRS 6249, Chronoenvironnement, Université de Franche Comté, Besançon
5. ECOBIO : Université de Rennes 1, UMR CNRS 6553, Ecosystèmes, Biodiversité, Evolution
6. UJM-SE : Université Jean Monnet de Saint-Etienne, UMR CNRS 6524, Magmas et Volcans
7. UAPV – LHA : Université d'Avignon Pays de Vaucluse, Département Hydrogéologie
8. AE-RMC : Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse
9. ZABR : Zone Atelier Bassin du Rhône
10. CNR : Compagnie Nationale du Rhône
11. Irstea : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, Lyon, UR Bely
12. GRAIE : Groupe de Recherche Rhône Alpes sur les Infrastructures et l'Eau
13. ENTPE – LEHNA : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin, UMR CNRS 5023, Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés

Sommaire

Préambule.....	8
Résumé	9
Liste des abréviations, sigles et acronymes	11
Avertissement aux utilisateurs du guide	13
Introduction : Objectifs, organisation et clefs de lecture du guide méthodologique.....	15
I. Contexte et objectifs du guide méthodologique : utilité et questions de départ en réponse à la législation et au service des gestionnaires	16
II. Présentation synthétique des outils : fondements méthodologiques et diagnostics complémentaires	17
III. Organisation du guide méthodologique et cheminement dans le document : clefs de lecture	20
Chapitre 1. Les échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire	23
1.1. Conséquences de la prise en compte des échanges nappes/rivières pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité : quelques exemples.....	24
1.2. Enjeux du global au local (DCE, SDAGE, SAGE, Contrats de milieux...)	25
1.3. Fonctionnement des échanges nappes alluviales/rivières	26
1.4. Panorama succinct des méthodes existantes.....	28
Chapitre 2. Présentation des outils de caractérisation des échanges nappes/rivières : estimation et typologie des échanges.....	31
2.1. Intérêt d'une caractérisation des échanges nappes/rivières multi-méthodes.....	32
2.2. Analyse géomatique hydrodynamique	33
2.3. Méthodes géochimiques.....	34
2.4. Végétaux aquatiques (macrophytes) et physico-chimie des eaux superficielles.....	37
2.5. Invertébrés souterrains et physico-chimie des eaux interstitielles.....	38
2.6. Caractérisation théorique des relations nappes/rivières et typologie pratique	40
2.7. Estimation de la quantité d'eau échangée	45
Chapitre 3. Principes de caractérisation des échanges nappes/rivières à l'aide des différentes méthodes : mesurer, calculer, relever, interpréter	47
3.1. Analyse géomatique hydrodynamique : Protocole, calcul et interprétation des échanges (voir Fiche Pratique n°1 pour plus de détails)	48
3.2. géochimie : Protocole, calcul et interprétation des échanges (voir Fiche Pratique n°2 pour plus de détails)	49
3.3. Végétation aquatique : Protocole, calcul et interprétation des échanges (voir Fiche Pratique n°3 pour plus de détails)	50
3.4. Invertébrés souterrains : Protocole, calcul et interprétation des échanges pour les (voir Fiche Pratique n°4 pour plus de détails)	52
3.5. Quelques mots pour conclure	53

Chapitre 4. Avancer dans l'évaluation des échanges nappes/rivières : définition des objectifs et choix des méthodes 55

4.1. Décrire et définir la zone de travail	56
4.2. Définir les objectifs et les enjeux	58
4.3. Sélectionner au préalable l'échelle de travail	59
4.4. Sélectionner des outils et des méthodes.....	60
4.5. Trouver les données nécessaires : faire le point sur les données disponibles et à acquérir	60
4.6. Synthèse des informations	61

Chapitre 5. Conclure sur les échanges nappes/rivières 65

5.1. Tableau de synthèse pour la comparaison des méthodes : croisement des méthodes, incertitudes et diagnostic synthétique	66
5.2. Cartographie synthétique des résultats	71

Conclusion : Bilan et perspectives 73

Annexes : FICHES PRATIQUES (FP) pour l'application et la mise en œuvre de la méthode de caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvial..... 77

FP_1. Hydro : de la carte piézométrique au modèle TIN	79
I. Lecture de cartes piézométriques / Objectifs et modalités des mesures piézométriques en nappe libre / Fabriquer une carte piézométrique.....	79
II. Générer un modèle TIN et procéder à l'analyse géomatique.....	80
III. Outils de détection des données aberrantes et de reconstitution de données manquantes	83
IV. Check list de terrain pour l'analyse géomatique	85
FP_2. Géochimie : protocole et interprétation	87
I. Procédure de prélèvement et mesures sur site et en laboratoire.....	87
II. Isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène : informations complémentaires	88
III. Tritium	89
IV. Check list de terrain pour la géochimie	90
FP_3. Végétaux aquatiques (macrophytes) : protocole et calcul d'indice	91
I. Echantillonnage	91
II. Liste des principaux guides et ouvrages d'identification des végétaux aquatiques	92
III. Espèces représentatives des apports phréatiques	92
IV. Calculs des indices.....	96
V. Check liste de terrain.....	100
FP_4. Invertébrés souterrains : protocole et indice	101
I. Echantillonnage de la faune interstitielle	101
II. Liste des principaux guides et ouvrages d'identification des invertébrés souterrains	102
III. Calcul de l'indice.....	104
IV. Check liste de terrain.....	106
FP_5. Estimation des coûts (temps de travail)	107
I. Analyse géomatique	107
II. Géochimie.....	107
III. Invertébrés souterrains	108
IV. Végétaux aquatiques.....	108
FP_6. Synthèses des sites diagnostiqués en lien avec le fleuve Rhône	109
I. Brégnier-Cordon confluence Rhône/Guiers	109
II. Donzère-Mondragon confluence Rhône/Ardèche	117
III. Beauchastel confluence Rhône/Eyrieux	133
IV. Péage-de-Roussillon	139
V. Bilan du point de vue quantitatif sur les sites étudiés.....	140

FP_7. Bases de données et informations consultables.....	143
I. Description des listes des sources d'information	143
II. listes des sources d'information par thèmes.....	144
FP_8. Personnes ressources et compétences	149
FP_9. Tableaux et fiches vierges	151
Bibliographie et références	155
I. Utilisées pour la réalisation du guide et citées dans le document	155
II. Pour aller plus loin	158
Listes : Figures, tableaux, cartes, illustrations, repères.....	163
I. Liste des Figures	163
II. Liste des tableaux	164
III. Liste des cartes	165
IV. Liste des illustrations	165
V. Liste des repères	166
Glossaire des termes techniques.....	167



Bancs de graviers dans le lit du Rhône : zone d'échange potentielle entre eaux de surface et souterraines (© G. Poussard)

Préambule

La réalisation de ce guide méthodologique pour évaluer les échanges entre les cours d'eau et les nappes alluviales qui les accompagnent est le fruit d'un important travail de collaboration engagé depuis 2006 entre la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Ce projet de guide est né du besoin pour les gestionnaires, de disposer des connaissances et des outils les plus appropriés et les plus récents pour savoir comment maîtriser au mieux les échanges d'eau à une interface souvent complexe entre les eaux souterraines et les rivières.

La genèse de ce guide s'étend sur plusieurs années car il s'agissait de disposer du plus d'atouts possible pour approcher et comprendre ces phénomènes et anticiper sur les besoins par rapport à certaines préoccupations sociétales importantes comme la protection contre les pollutions, la restauration écologique ou encore la préservation de ressources majeures pour l'alimentation en eau potable.

L'étude des interfaces complexes entre les différents compartiments des hydrosystèmes correspond à une démarche originale et interdisciplinaire associant l'hydrologie, l'hydrogéologie et la biologie animale et végétale. Pour cela, la ZABR a rassemblé et fédéré ses spécialistes sur la question en concertation permanente avec les experts de l'Agence et à l'écoute des gestionnaires.

Ce guide a été réalisé via l'axe thématique «risques environnementaux et vulnérabilité des milieux» de l'accord - cadre conclu entre l'Agence de l'eau et la ZABR en résonance avec les orientations et les enjeux fondamentaux du SDAGE, du Plan Rhône et de la Directive cadre sur l'eau.

Finalement, ce guide méthodologique est dédié à ceux qui en ont eu l'idée, à tous ceux qui y ont de près ou de loin contribué et à tous ceux qui voudront l'utiliser et l'enrichir. Il a vocation à être utilisé, et amélioré au fur et à mesure de son utilisation.

Résumé

La relation gestionnaires/chercheurs est de plus en plus fréquente et mise en avant dans le domaine de l'eau. Ce guide est le fruit de l'articulation entre objectifs scientifiques et objectifs opérationnels pour une finalité commune au binôme gestionnaires/chercheurs. Sa création est l'aboutissement d'un programme de recherche intitulé « Évaluation des échanges nappes/rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface : application au fleuve Rhône et aux aquifères associés », ou de façon abrégée « échanges nappes/Rhône » qui s'est déroulé sur la période 2006-2015. Ce programme constitue une action de recherche de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) conduite avec le soutien de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, labellisée Plan Rhône et intégrée en tant que projet support dans l'OHM-VR (Observatoire Hommes/Milieus pour la Vallée du Rhône). Ce programme de recherche est fortement interdisciplinaire. Sur la base d'une approche multi-méthode, il propose une méthodologie originale pour caractériser les échanges entre les rivières et les nappes alluviales. L'originalité de la démarche présentée dans ce guide est de s'appuyer sur les apports et la complémentarité de différentes méthodes, ou outils, pour réaliser un diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières. Si les expérimentations et la mise au point de la méthodologie ont été effectuées sur le fleuve Rhône, ce guide a toutefois l'ambition de pouvoir être utilisé dans d'autres contextes alluvionnaires, sur d'autres cours d'eau et d'autres bassins versants.

Ce guide est destiné aux acteurs de l'eau, en particulier aux gestionnaires, qui ont besoin d'appréhender les échanges nappes/rivières pour leurs objectifs d'amélioration de la gestion des milieux aquatiques que ce soit d'un point de vue quantitatif ou qualitatif. En milieu alluvial mieux comprendre et connaître les échanges nappes/rivières est souvent une question centrale pour répondre aux enjeux réglementaires déclinés du niveau européen (Directive Cadre Européenne sur l'Eau - DCE) au niveau bassin (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux - SDAGE) et local (Schéma d'aménagement des eaux - SAGE, Contrats de milieux, ...). En effet, la DCE fixe des objectifs de bon état pour les milieux superficiels et souterrains : 1) bon état écologique, chimique et potentiel écologique pour les eaux de surface et 2) bon état chimique et quantitatif pour les eaux souterraines. Elle souligne, de plus, que les eaux souterraines doivent se trouver dans un état qui n'affecte pas la qualité des milieux superficiels et la biodiversité.

Le guide méthodologique est structuré en trois grandes parties :

- 1) les deux premiers chapitres présentent les connaissances et les prérequis nécessaires pour comprendre les échanges nappes/rivières ;
- 2) les trois chapitres suivant expliquent comment caractériser les échanges nappes/rivières ;
- 3) les annexes, ou Fiches Pratiques, fournissent des informations supplémentaires et complémentaires pour mener à bien le diagnostic des échanges nappes/rivières.

La démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières est, quant à elle, organisée selon un cheminement qui conduira l'utilisateur à trouver l'information nécessaire, au moment adéquat et au bon endroit dans le guide. Cette démarche est structurée par l'enchaînement de sept actions principales :

- 0) Bien Démarrer, pour comprendre les échanges nappes/rivières ;
 - 1) Décrire et définir la zone de travail ;
 - 2) Choisir et sélectionner les bons outils en fonction du contexte territorial ;
 - 3) Consulter les informations nécessaires pour choisir en connaissance de cause ;
 - 4) Mesurer et calculer les échanges à partir des outils sélectionnés ;
 - 5) Interpréter les résultats ;
 - 6) Faire la synthèse des résultats ;
 - 7) Cartographier les échanges nappes/rivières.

Les deux premiers chapitres du guide permettent de mieux comprendre les échanges nappes/rivières et de prendre connaissance des outils utilisés pour les caractériser. Ces informations sont essentielles pour se préparer au mieux à l'utilisation du guide.

Le Chapitre 1 présente les conséquences et l'importance des échanges nappes/rivières en termes de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité à partir de plusieurs exemples : 1) apports de nappes aux chenaux actifs d'un cours d'eau qui contribuent au maintien du débit et au tamponnage thermique en période estivale, 2) apports de nappes aux zones humides, essentiels à leur maintien et à leur évolution, 3) apports d'eau de surface aux eaux souterraines d'importance stratégique pour l'alimentation en eau potable.

Il aborde ensuite les aspects législatifs et normatifs de la question, puis donne un aperçu des concepts et principes décrivant le fonctionnement des échanges nappes/rivières et leur variabilité dans le temps et l'espace. Cette partie est agrémentée de schémas permettant de visualiser les principes des échanges nappes/rivières en milieu alluvial et d'encarts contenant les définitions des principaux termes clefs. En fin de guide, un glossaire des termes techniques rassemble les définitions du vocabulaire de spécialiste utilisé au fil des pages.

La Chapitre 2, dans un premier temps, explique l'intérêt d'une approche multi-méthode de caractérisation des échanges nappes/rivières. Cet intérêt réside dans la complémentarité des approches considérant les informations qu'elles peuvent apporter pour l'établissement d'un diagnostic synthétique en combinant les aspects physiques, biologiques et chimiques de la question. Dans un deuxième temps, il décrit de manière synthétique chacun des outils utilisés dans le guide en mettant en avant leurs principes fondamentaux, leur potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivières, mais aussi leurs limites et les précautions à prendre lors de leur utilisation. Dans un troisième temps, ce chapitre présente les différentes configurations (typologie) des échanges nappes/rivières. Cette typologie propose six situations d'échanges différentes illustrées sous forme de schéma : 1) apports d'eau de nappe à la rivière, 2) apports d'eau de la rivière à la nappe, 3) pas d'échange identifié entre la rivière et la nappe, 4) colmatage entre la nappe et la rivière, 5) sous-écoulement, 6) recyclage ou échanges hyporhéiques.

Les trois chapitres suivants présentent la méthodologie de caractérisation des échanges nappes/rivières.

Le Chapitre 3 décrit les grandes étapes du protocole lié à l'utilisation de chacune des méthodes pour mesurer, calculer et interpréter les interactions nappes/rivières : 1) mesures de niveaux d'eau (nappe et rivière), calcul de gradient hydraulique et de débit d'échange (Loi de Darcy) avec la méthode géomatique, 2) échantillonnage et analyse d'eau (souterraine et superficielle) pour déterminer leur signature physico-chimique et isotopique, 3) échantillonnage de faune souterraine et calcul de l'indice d'échange nappes/rivières, 4) relevés floristiques et calcul de la probabilité d'apport phréatique. Des informations plus précises concernant ces protocoles et les coûts liés sont disponibles en annexes (Fiches Pratiques 1, 2, 3 et 4). Des exemples de travaux, réalisés sur le Rhône, sont présentés dans la Fiche Pratique n°6. Dans cette fiche, l'exemple du secteur de Donzère-Mondragon est plus particulièrement détaillé.

La manière de bien choisir les outils est présentée dans le Chapitre 4. Ce chapitre propose une démarche fondée sur des tableaux d'aide à la décision pour choisir les méthodes en connaissance de cause et en fonction : 1) des caractéristiques géographique, hydrologique, géomorphologique et anthropique de la zone de travail, 2) des objectifs à atteindre et des enjeux, 3) des échelles d'espaces et de temps adaptées aux objectifs et enjeux, 4) des données existantes et de celles à acquérir (voir aussi Fiche Pratique n°7), 5) du potentiel et des contraintes de chacune des méthodes.

Une fois les méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières sélectionnées et mises en œuvre sur un terrain d'étude on aboutit à plusieurs diagnostics distincts. Tout l'intérêt de l'approche multi-méthode est d'aboutir à un diagnostic synthétique par croisement des résultats. Le Chapitre 5 explique dans une première partie comment intégrer chacun des résultats dans un tableau de synthèse général. Dans un deuxième temps, il montre comment reporter dans ce tableau les incertitudes concernant le diagnostic effectué à l'aide de chacune des méthodes. Le croisement de ces deux informations conduira à un diagnostic synthétique concernant le sens et l'intensité des échanges nappes/rivières. Une fois la synthèse effectuée, il est possible de dresser la cartographie synthétique des résultats. Afin d'illustrer chacune des étapes de ces deux derniers chapitres, le travail effectué sur Donzère-Mondragon est présenté à titre d'exemple.

Dans la continuité de ce travail, un guide technique, plus synthétique mais couvrant plus de contextes hydrogéologiques et d'outils, sur la question des échanges nappes/rivières, est en préparation. A terme, il conviendra de faire évoluer ces deux guides en les enrichissant de nouvelles méthodes, en explorant de nouveaux contextes hydrogéologiques incluant de nouvelles situations d'échanges et en intégrant les retours d'expérience des utilisateurs. De même, il conviendra à l'avenir de s'intéresser aux relations entre eaux souterraines et milieux humides lorsque les premières les alimentent.

Liste des abréviations, sigles et acronymes

ACP : Analyse en composantes principales	LADES : Laboratoire de datation des eaux souterraines
AEP : Alimentation Eau Potable	LEHNA : Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
AE-RMC : Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse	LHA : Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon
ANTEA : Bureau d'études environnement	MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
AREVA : Groupe industriel français du secteur de l'énergie (mines, nucléaire, énergies renouvelables)	MESO : Masses d'Eau SOuterraines
ARRA : Association Rivière Rhône-Alpes	MESU : Masses d'Eau de SURface
BD ISO : Banque de Données Isotopiques	MOLONARI : Monitoring local des échanges nappe-rivière
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières	NAPROM : NAPpes-Rivières : Observation et Modélisation
CARTEL : Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques	NGF : Nivellement Général de la France
CFC : Chlorofluorocarbones	OHM-VR : Observatoire Hommes/Milieux pour la Vallée du Rhône
CNR : Compagnie Nationale du Rhône	ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
DCE : Directive Cadre Européenne sur l'Eau	PACA : Provence Alpes Côte d'Azur
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement	PK : Point Kilométrique (sur le Rhône le PK0 est fixé à Lyon)
ECOBIO : Ecosystèmes, Biodiversité, Evolution	PVC : Polychlorure de vinyle
ENSM-SE : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne	RD : Rive droite
ENTPE : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat	RG : Rive gauche
EVS : Environnement Ville et Société	RCC : Rhône Court-circuité (Vieux-Rhône)
GDE : Groundwater dependent ecosystem (Ecosystème sous dépendance des eaux souterraines)	RGF : Réseau Géodésique Français
GPS : Global Positioning System (système de géolocalisation mondial)	RMC : Rhône Méditerranée et Corse
GRAIE : Groupe de Recherche Rhône Alpes sur les Infrastructures et l'Eau	SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
GSE : Département Géo-Sciences et Environnement	SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
HDPE : High Density PolyEthylen (Polyéthylène Haute-Densité - PEHD)	SF : Hexafluorure de soufre
IAEA : International Atomic Energy Agency (Agence internationale de l'énergie atomique)	SIG : Système d'Information Géographique
INRA : Institut national de la recherche agronomique	SMIRCLAID : Syndicat Mixte du Rhône Court-Circuité Loire Ardèche Isère Drôme
IRT : Image Infrarouge Thermique	TIN : Triangulated Irregular Network (Réseau de triangles irréguliers)
Irstea : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture	UAPV : Université d'Avignon Pays de Vaucluse
	UCBL : Université Claude Bernard Lyon
	UJM-SE : Université Jean Monnet de Saint-Etienne
	WGS : World Geodetic System (Système géodésique Mondial)
	ZABR : Zone Atelier Bassin du Rhône



Un contre-canal le long du Rhône dérivé dans le secteur de Caderousse (84) potentiellement alimenté par les eaux souterraines (© L. Cadilhac)

Avertissement aux utilisateurs du guide

Ce document est un guide méthodologique qui fait le point sur la question des échanges nappes/rivières en milieu alluvial. Son contenu est à la fois dense en information et détaillé du point de vue technique.

Il sera important d'avoir à l'esprit que les méthodes proposées dans les pages qui suivent ne sont pas adaptées à tous les contextes hydrogéologiques et territoriaux.

La démarche proposée implique de bien définir au préalable les objectifs et les enjeux spécifiques du secteur d'étude (utilisation de la ressource en eau, état écologique, restauration, ...).

En parallèle, il est aussi important de bien cerner les moyens humains et financiers à disposition, afin de s'assurer au préalable de la faisabilité du diagnostic des échanges nappes/rivières. Il est aussi nécessaire de disposer d'une bonne connaissance du territoire d'étude du point de vue géographique, hydrogéologique, géomorphologique et anthropique, pour s'assurer de la pertinence du diagnostic. Ainsi les enjeux territoriaux, les objectifs

à atteindre, les moyens et données disponibles conditionneront le choix de la ou des méthodes et de la démarche à suivre pour caractériser et quantifier, si cela est possible, les échanges nappes/rivières.

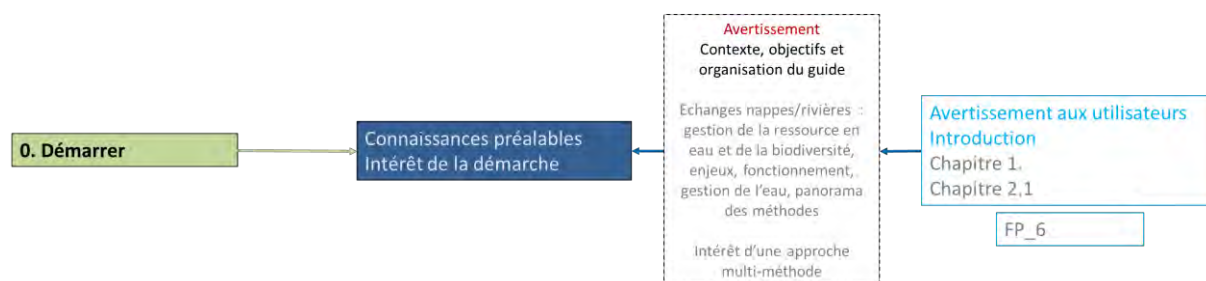
Si ce guide est avant tout destiné à celui qui va être chargé de mener les investigations, il pourra également être utile au maître d'ouvrage qui souhaite faire réaliser une étude par un prestataire extérieur. Dans ce cas, ce document guidera le gestionnaire dans la rédaction du cahier des charges, le suivi et l'évaluation du travail effectué. Ce guide peut aussi être utilisé par le gestionnaire qui ambitionne de réaliser une telle étude en interne.

S'il est possible de lire le guide dans l'ordre des chapitres, nous vous recommandons de bien assimiler le Chapitre 2 (Présentation des outils) et le Chapitre 4 (Choix des méthodes) avant de se lancer dans le diagnostic des échanges nappes/rivières.



Le Rhône à Caderousse (84) (© F. Paran)

Introduction : Objectifs, organisation et clefs de lecture du guide méthodologique



Repère 1 : Prendre en main le guide méthodologique - avertissement et intérêt de la démarche
La démarche complète de cheminement dans le guide méthodologique est présentée figure 1, p19.

Ce guide méthodologique constitue l'aboutissement d'un programme de recherche (Paran et al., 2007, 2008, 2010, 2012) intitulé :

**« Évaluation des échanges nappes/rivières et de la part des apports souterrains
dans l'alimentation des eaux de surface :
application au fleuve Rhône et aux aquifères associés »**

Ce programme initié en 2006 constitue une action de recherche de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) qui a bénéficié du soutien technique et financement de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et qui est labellisée Plan Rhône. Il fait aussi partie des projets supports de l'OHM-VR (Observatoire Hommes/Milieus pour la Vallée du Rhône). Il a été de plus soutenu par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) qui a mis gracieusement ses données à disposition. Ce programme de recherche, appelé de façon abrégée « échanges nappes/Rhône », est fortement interdisciplinaire. Il a permis de développer une méthodologie multi-métrique (ou démarche/diagnostic multi-méthode ou multi-outil) pour permettre de caractériser les échanges entre le Rhône et ses nappes alluviales ; et plus généralement entre les cours d'eau et les aquifères alluviaux.

L'originalité de la démarche présentée dans ce guide est de s'appuyer sur les apports et la complémentarité des différentes méthodes impliquées pour réaliser un diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières. Le guide contient aussi des informations précisant les conditions dans lesquelles les outils proposés sont, ou ne sont pas, utilisables. Si les expérimentations et la mise au point de la méthodologie ont été effectuées sur le fleuve Rhône, ce guide a toutefois l'ambition de pouvoir être utilisé dans d'autres contextes alluvionnaires, sur d'autres cours d'eau et d'autres bassins versants. L'objectif de ce guide est de répondre aux questions suivantes :

Quels sont les outils les plus adaptés pour caractériser les échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire ?



Comment mettre en œuvre ces outils sur le terrain ?

Comment interpréter les résultats obtenus ?

Comment présenter les résultats de manière simple pour une restitution synthétique ?

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU GUIDE METHODOLOGIQUE : UTILITE ET QUESTIONS DE DEPART EN REPOSE A LA LEGISLATION ET AU SERVICE DES GESTIONNAIRES

A qui est destiné ce guide ?

Ce guide est destiné aux gestionnaires qui dans le cadre de leur activité doivent prendre en compte les échanges nappes/rivières.

Quelles sont les contraintes réglementaires qui nécessitent une meilleure connaissance des échanges nappes/rivières ?

Le besoin de gestion coordonnée des eaux souterraines et des eaux de surface est notamment réaffirmé par la DCE. Elle fixe des objectifs de bon état pour les milieux superficiels et souterrains : 1) bon état écologique, chimique et potentiel écologique pour les eaux de surface (MESU) et 2) bon état chimique et quantitatif pour les eaux souterraines (MESO). De plus, la Directive précise que les eaux souterraines doivent se trouver dans un état qui n'affecte pas la qualité des milieux superficiels et la biodiversité (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Si la DCE ne précise pas que l'état des eaux de surface ne doit pas affecter les eaux souterraines, cet aspect reste bien sûr à prendre en compte.

A l'heure actuelle, des travaux sont en cours à l'échelle européenne pour : 1) caractériser l'état des eaux de surface sur des critères biologiques, hydromorphologiques et physico-chimiques et 2) inventorier les masses d'eaux souterraines dynamiquement liées aux eaux de surface pour au final estimer les directions et les taux d'échanges.

Quel est l'intérêt pour les gestionnaires de connaître les échanges nappes/rivières ?

Par ailleurs, dans les projets de nouveaux captages en nappe, une étude d'incidence est demandée par la Loi sur l'eau.

Face à ces questions, il est important pour les gestionnaires :

- d'obtenir une connaissance satisfaisante des fonctionnements liés des milieux de surface et souterrains tenant compte des variations régionales et temporelles,
- d'être en capacité d'agir en connaissance de cause sur l'un ou l'autre des compartiments,
- de disposer de données, d'outils et de méthodes fiables pour apprécier les échanges.

A quoi sert de caractériser les échanges nappes/rivière ?

De manière plus concrète, l'acquisition de telles connaissances et leurs débouchés opérationnels ont pour objectif d'aider le gestionnaire à répondre aux grands enjeux suivants :

- biodiversité et gestion quantitative : apprécier le fonctionnement naturel et la contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau et à l'alimentation des zones humides en particulier à l'étiage (quantité, thermie), discriminer les effets des pressions de prélèvements (en nappe et dans les cours d'eau) du fonctionnement naturel, réorienter les prélèvements et les usages (volumes maximum prélevables) en fonction des enjeux sur les milieux.

- opérations d'aménagement, restauration de cours d'eau : comprendre le fonctionnement a priori des systèmes à restaurer, apprécier a priori l'incidence des interventions au niveau des interactions cours d'eau/nappe, apprécier les bénéfices quantité/qualité a posteriori.

- préservation des ressources AEP actuelles et futures : apprécier la dépendance des nappes aux alimentations superficielles et la vulnérabilité aux transferts de polluants (en particulier pesticides).

- changement climatique : estimer l'incidence à attendre sur les différents compartiments.

Ce guide a donc pour objectifs de contribuer mieux appréhender les interactions nappes/rivières et de proposer différents outils opérationnels de caractérisation des échanges en milieu alluvionnaire. Vis-à-vis utilisateurs, notre souhait est que ce guide les aide :

- acquérir des connaissances sur la question des échanges nappes/rivières,

- mieux connaître les outils utilisés pour leur caractérisation afin qu'il les comprenne et les utilise (ou les fasse utiliser),

- comprendre l'intérêt de mettre en œuvre des méthodes complémentaires de diagnostic.

Quelle aide pour le gestionnaire ?

En d'autres termes, nous espérons que ce guide méthodologique aidera le gestionnaire à se poser les bonnes questions au bon moment face aux enjeux de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité, auxquels il pourra être confronté dans le cadre de ses activités.

II. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES OUTILS : FONDEMENTS METHODOLOGIQUES ET DIAGNOSTICS COMPLEMENTAIRES

Quels sont les outils utilisés et décrits dans le guide pour caractériser les échanges nappes/rivières ?

Le diagnostic pour la caractérisation des échanges nappes/rivières proposé dans ce guide se fonde sur quatre méthodes différentes :

- une analyse géomatique mobilisant une approche hydrogéologique fondée sur le calcul de gradients hydrauliques,

- une analyse géochimique fondée sur la détermination de la signature isotopique et physico-chimique des eaux,

- une analyse biologique fondée sur la détermination de la composition des communautés de végétaux aquatiques (macrophytes),

- une analyse biologique fondée sur la détermination de la composition des communautés d'invertébrés souterrains.

Quels est l'intérêt de s'appuyer un diagnostic multi-méthode ?

Chacune de ces quatre méthodes est en capacité de caractériser les échanges nappes/rivières sous réserve d'obtenir ou d'acquérir les données nécessaires :

- 1) hauteurs d'eau en nappe et en rivière pour l'analyse géomatique,

- 2) composition spécifique et exigences écologiques des espèces d'invertébrés interstitiels et des végétaux aquatiques pour les analyses biologiques,

- 3) analyse d'eaux souterraines et superficielles pour la géochimie.

L'intérêt de la méthodologie présentée dans ce guide ne réside pas dans la capacité de diagnostic d'une seule méthode mais dans la confrontation du diagnostic de chacune de ces méthodes pour aboutir à un diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières jouant sur la complémentarité des informations et connaissances apportées par chacun des outils.

Le tableau 1, après avoir rappelé le principe et les données nécessaires pour chacune des quatre méthodes, synthétise brièvement leurs atouts et inconvénients pour diagnostiquer les échanges nappes/rivières (les éléments donnés ci-dessous sont définis et expliqués au fil des chapitres et des Fiches Pratiques du guide et synthétisés dans le Chapitre 4) :

- Domaine d'applicabilité : si la plupart des outils sont capables de travailler en nappe alluviale libre (Chapitre 1.3), certains comme les invertébrés souterrains permettent aussi un diagnostic en milieu carbonaté ou sur tout type d'aquifère pour les méthodes géochimiques. Cela peut s'avérer intéressant si l'aquifère alluvial étudié est entouré d'encaissants karstiques ou cristallins (Chapitre 1.3).

- Types d'échanges pris en compte : si l'analyse géomatique et les invertébrés souterrains sont assez restrictifs du point de vue de l'espace caractérisé, les autres outils permettent un diagnostic intégré des échanges nappes/rivières à l'échelle de la plaine alluviale.

- Sortie / résultats : outre la caractérisation des échanges nappes/rivières réalisable par tous les outils, certains sont capables de fournir des informations complémentaires. La végétation aquatique (Chapitres 2 et 3) peut apporter des

informations sur le niveau trophique des masses d'eau ou sur la dynamique fluviale (alluvionnement). Les isotopes (Chapitres 2 et 3) quant à eux peuvent nous éclairer sur le temps de séjour des eaux dans le domaine souterrain ou sur leur temps de renouvellement.

- Caractérisation de l'échange pour chaque rive : la plupart des outils permettent de diagnostiquer les échanges distinctement pour la rive droite et la rive gauche d'un cours d'eau.

- Sens de l'échange : la méthode fondée sur la végétation aquatique, contrairement aux autres, ne permet pas de détecter des échanges de la rivière vers la nappe.

- Quantification de l'échange : seule l'analyse géomatique permet une estimation quantitative des échanges nappes/rivières (Chapitre 2.7). Toutefois, la végétation aquatique permet une évaluation semi-quantitative et les isotopes la détermination du taux de mélange entre eaux souterraines et superficielles.

- Autres particularités : l'ensemble des outils n'est pas à même de caractériser la totalité de situations d'échanges (voir typologie des échanges Chapitre 2.6). Par exemple, seuls les invertébrés souterrains sont capables de détecter les situations

de recyclage (échanges alternés entre le fond du cours d'eau et la zone hyporhéique).

Ce panorama rapide du potentiel des outils montre bien l'intérêt de mettre en œuvre un diagnostic multi-méthode pour produire un diagnostic synthétique le plus fiable possible (en jouant sur la confrontation des résultats) et le plus complet possible (en jouant sur la complémentarité des résultats). Toutefois, il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser tout l'arsenal d'outils : tout dépend des objectifs poursuivis, des caractéristiques du terrain d'étude, de l'échelle de travail, et des moyens dont on dispose.

Où trouver de l'aide pour mettre en œuvre ce diagnostic multi-méthode ?

La mise en œuvre complète de l'ensemble des outils et du diagnostic multi-méthode peut s'avérer difficile pour des gestionnaires seuls. Pour leur faciliter la tâche, il leur est possible de s'appuyer sur des personnes ressources à contacter (Fiche Pratique n°8). Au besoin, il est possible d'imaginer de mettre en place un comité de pilotage ou d'experts afin de faciliter la mise en œuvre et le suivi d'une étude, et l'interprétation des résultats.

Méthode	Analyse géomatique	Invertébrés souterrains	Végétation aquatique	Physico-chimie des eaux superficielle	Isotopes
<i>Principe</i>	Calcul de gradients piézométriques	Détermination de la composition des communautés d'invertébrés interstitiels	Détermination de la composition des communautés de végétaux aquatiques	Détermination de la signature chimique des eaux	Détermination de la signature isotopique des eaux
<i>Données nécessaires</i>	Hauteurs d'eau en nappe et rivière Perméabilité de l'aquifère	Exigences écologiques des invertébrés souterrains O ₂ dissous, T°C, pH, conductivité	Exigences écologiques des macrophytes	Concentrations en éléments majeurs O ₂ dissous, T°C, pH, conductivité	Isotopes stables et radioactifs
<i>Domaine d'applicabilité</i>	Nappes libres connectées à une rivière	Nappes libres Milieux carbonatés Zone hyporhéique	Nappes libres	Nappes libres	Tous types d'aquifères
<i>Types d'échanges pris en compte</i>	A travers les berges à l'échelle de tronçons	Par le fond ou par les berges à échelle locale	Intégré à l'échelle des masses d'eau*	Intégré à l'échelle des masses d'eau*	Intégré à l'échelle des masses d'eau*
<i>Sortie Résultat</i>	Gradient hydraulique Débit d'échange	Sens de l'échange Origine de l'eau	Trophie Apport phréatique Alluvionnement	Tampons (thermique, conductivité, éléments majeurs)	Altitude de recharge Renouvellement Apport phréatique
<i>Caractérisation de l'échange pour chaque rive</i>	Oui	Oui	Oui	<i>Difficile</i>	Oui
<i>Sens de l'échange</i>	Oui	Oui	<i>Nappe vers rivière seulement</i>	<i>Nappe vers rivière seulement</i>	Oui
<i>Quantification de l'échange</i>	Oui (m ³ /j ou l/s)	<i>Non</i>	Oui (semi-quantitatif : 4 classes)	<i>Non</i>	Oui (en % de mélange)
<i>Autres particularités du diagnostic</i>	<i>Diagnostic des situations de sous-écoulement indirect</i>	Diagnostic possible des situations de recyclage et de colmatages	Diagnostic combiné végétation aquatique et chimie des eaux superficielles		Diagnostic des situations de colmatage

Tableau 1 : Présentation synthétique du potentiel des méthodes utilisées dans le guide

* : Cours d'eau et nappe alluviale ; En gras les points forts des méthodes et en italique les points faibles concernant le diagnostic des échanges nappes/rivières

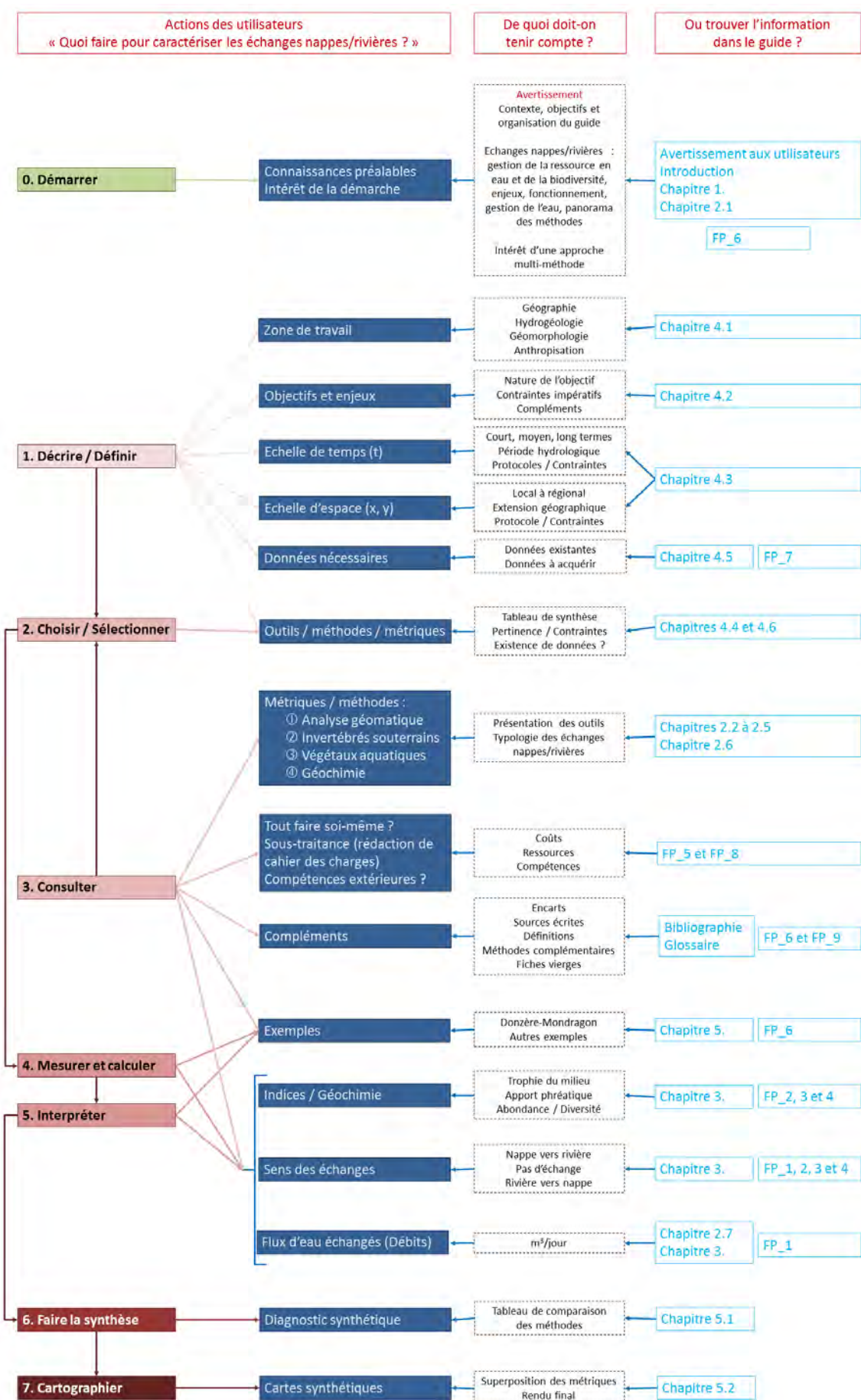


Figure 1 : Démarche complète de cheminement dans le guide méthodologique

III. ORGANISATION DU GUIDE METHODOLOGIQUE ET CHEMINEMENT DANS LE DOCUMENT : CLEFS DE LECTURE

Comment mettre en œuvre le diagnostic multi-méthode des échanges nappes/rivières ?

Le guide a été conçu, et est organisé, pour accompagner l'utilisateur. Ainsi, le plan et la démarche proposés pour le cheminement dans le guide sont étroitement liés. Ils constituent un tout indissociable. Le guide est organisé de manière à rendre son utilisation la plus aisée possible.

Le principe de la démarche de caractérisation multi-méthode des échanges nappes/rivières est schématisé dans la figure 1. La structure du guide, suit un ordre différent et est découpée en deux parties principales.

Structure du guide

Connaissances et prérequis

La première moitié du guide introduit les différentes notions et connaissances préalables indispensables.

Le Chapitre 1 propose une définition des échanges nappes/rivières en milieu alluvial tant du point de vue de leur fonctionnement que des enjeux. Des considérations sur les conséquences des échanges en termes de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité sont aussi présentées.

Le Chapitre 2 présente les outils de caractérisation des échanges utilisés dans le guide et leur potentiel tant du point de vue de l'identification du sens du flux d'eau (Dans quel sens se font les échanges d'eau entre la nappe et la rivière ?) que la quantification du débit du flux d'eau (Quelle est la quantité d'eau échangée entre la nappe et la rivière ou réciproquement ?). Ce chapitre est important car il présente aussi une typologie des situations d'échange (Chapitre 2.6).

Caractérisation des échanges

La seconde moitié du guide propose une assistance au lecteur dans la démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières.

Le Chapitre 3 décrit les protocoles, les modalités de calcul et d'interprétation des échanges nappes/rivières spécifiques à chacune des quatre méthodes : analyse géomatique, végétaux aquatiques, invertébrés souterrains, géochimie dont isotopes et éléments dissous.

Le Chapitre 4 liste les prérequis nécessaires au choix des méthodes en fonction des caractéristiques de la

zone d'étude et des objectifs poursuivis, de l'échelle spatiotemporelle de travail. Ce chapitre indique les données nécessaires dont il faut disposer et synthétise les informations importantes à connaître à propos des outils proposés.

Pour finir, le Chapitre 5 décrit la manière dont il faut s'y prendre pour synthétiser les informations obtenues et pour conclure sur les échanges en répondant aux questions suivantes :

Comment synthétiser le diagnostic multi-méthode des échanges nappes/rivières ?

Comment évaluer les incertitudes concernant le sens et la quantité d'eau échangée ?

Comment cartographier les résultats de manière synthétique ?

Dans les deux derniers chapitres, le cas du secteur de Donzère-Mondragon, étudié dans le cadre du projet échanges nappes/Rhône, est présenté à titre d'exemple et d'illustration.

Une bonne assimilation des chapitres 2 et 4 est essentielle afin d'utiliser ce guide dans les meilleures conditions.

Il est possible de lire le guide de manière linéaire. Toutefois, la mise en œuvre de la démarche nécessite de bien assimiler les Chapitres 2 et 4 présentant respectivement les outils et les conditions de leur utilisation. De plus, des informations complémentaires ou plus détaillées, concernant les méthodes, sont fournies dans les écarts et les annexes (Fiches Pratiques) du guide.

Ainsi, ce guide peut être utilisé comme un document dans lequel on va piocher l'information nécessaire. La démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières, présentée figure 1, ne suit d'ailleurs pas le plan du guide.

Structure de la démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières (Figure 1)

Le principe de la démarche à suivre pour caractériser les échanges nappes/rivières est schématisé dans la figure 1. Elle est divisée en trois parties : 1) à gauche, les actions à effectuer ; 2) au centre, les contraintes dont il faut tenir compte pour avancer dans le travail ; 3) à droite, la localisation dans le guide des informations nécessaires à chaque étape de la démarche.

Encarts, Annexes et Glossaire : des informations supplémentaires et complémentaires

Des **encarts** présents tout au long du guide permettent d'accéder rapidement à de l'information complémentaire par rapport à ce qui est dit dans le texte principal. Les encarts peuvent ainsi contenir des exemples illustratifs, des avertissements, des définitions, des informations importantes qu'il est nécessaire de souligner, des formules mises en évidence, des renvois vers d'autres chapitres ou vers les annexes pour s'orienter lors de la lecture du guide.

Les **annexes** contiennent des **Fiches Pratiques** proposant les informations nécessaires pour mettre en œuvre chacune des méthodes présentées dans ce guide. Elles contiennent aussi des informations supplémentaires : synthèse des diagnostics des échanges nappes/rivières déjà réalisés sur le Rhône, estimation des coûts et des temps de travail, personnes ressources. Une autre fiche pratique oriente vers des bases de données permettant d'acquérir de l'information supplémentaire.

En fin de guide, un **glossaire** rappelle la définition des principaux termes techniques utilisés.

1. Les actions

Le cheminement dans le guide est structuré selon une démarche arborescente. A gauche, sur la figure, est listé sur fond rouge l'enchaînement d'actions à effectuer pour caractériser les échanges. A côté, sur fond bleu, sont mentionnés ce à quoi ces actions devront s'intéresser, c'est-à-dire l'objet de l'action. Cette partie répond à la question :

*Quelles sont les actions à mener ?
Quoi faire pour caractériser
les échanges nappes/rivières ?*

2. Les contraintes

Au centre de la figure, sur fond blanc encadrés de pointillés, sont listés les éléments importants dont il faut tenir compte afin de réaliser correctement chaque action pour chaque objet. Cette partie répond à la question suivante :

*De quoi doit-on tenir compte
pour mener à bien chaque action ?*

3. L'information

A droite de la figure, se trouve une information importante. Celle qui permettra à l'utilisateur de mieux se repérer dans le guide et de ne pas s'y perdre afin de cheminer correctement dans la démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières.

Cette formalisation en trois parties répond donc à une double question :

Comment réaliser les actions ?

*Où trouver l'information dans le guide
pour réaliser chaque action ?*

Démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières : une suite d'actions (Figure 1)

0. Démarrer

Avant toute chose, il est important de prendre connaissance de l'Avertissement aux utilisateurs et de l'Introduction afin d'utiliser le guide en connaissance de cause et de se familiariser avec sa structure et avec la démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières qui y est proposée. Il est important aussi de prendre connaissance :

- du Chapitre 1 pour se familiariser avec la question des échanges nappes/rivières en termes d'enjeux pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité, de fonctionnements, de vocabulaire et de méthodes existantes.

- du Chapitre 2.1 pour bien assimiler l'intérêt d'une approche multi-méthode pour caractériser les échanges nappes/rivières.

1. Décrire / Définir

Il s'agit de la première étape de la démarche décrite dans les Chapitres 4.1 à 4.3 du guide. A l'aide de listes de contrôle et de questions, ces parties permettent de :

- décrire au mieux la zone d'étude sélectionnée (contextes géographiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, anthropiques...),
- définir de manière claire les objectifs (connaissance, restauration, impacts de captages...),
- déterminer logiquement les échelles spatiales (1km, 10km, 100km...) et temporelles (saisons hydrologiques, cycles hydrologiques, changements globaux...) les plus adaptées au site et aux objectifs.

Ici, le site est décrit avant les objectifs car souvent l'utilisateur est attaché à la gestion d'un site en particulier.

Le Chapitre 4.5 met en avant les données nécessaires pour l'utilisation de chacune des méthodes. La Fiche Pratique n°7 propose une liste de sources de données, de bases de données et d'informations utiles.

2. Choisir / Sélectionner

Les Chapitres 4.4 et 4.6 permettent de choisir les méthodes les plus adaptées sur la base des informations organisées dans l'action précédente (Décrire / Définir). Sur cette base, à l'aide de tableaux de synthèse, il est alors possible de sélectionner les méthodes les plus adaptées en étant conscient de leurs limites et en ayant à l'esprit l'effort à effectuer pour le recueil, le traitement et

l'analyse des données (selon leur existence préalable ou non).

3. Consulter

Il s'agit d'une action charnière à réaliser au besoin en parallèle de l'action précédente (Choisir / Sélectionner). Les Chapitres 2.2 à 2.5 proposent une description des outils à disposition et le Chapitre 2.6 la typologie des situations qu'ils peuvent diagnostiquer. Pour bien choisir, la Fiche Pratique n°5 permet de se faire une idée des coûts (en homme/jour) associés à chaque méthode. La Fiche Pratique n°8 donne les coordonnées d'experts pour une aide au choix complémentaire.

La Bibliographie et la Fiche Pratique n°6 sont des sources d'informations importantes pour consulter des documents théoriques de références ou des travaux antérieurs. Le Glossaire, quant à lui, permet d'obtenir ou de se rappeler au besoin, le sens des termes techniques utilisés dans le guide.

4. Mesurer et calculer et 5. Interpréter

Une fois les méthodes sélectionnées, le Chapitre 3 associé aux Fiches Pratiques 1, 2, 3, 4 et 9 donnent les informations nécessaires pour mettre en œuvre le protocole de mesure et de calcul de chacune des méthodes et interpréter les résultats. Le Chapitre 2.7 donne quant à lui des éléments pour estimer de manière quantitative les échanges nappes/rivières. Encore une fois, il est possible de consulter des exemples liés à des travaux antérieurs dans la Fiche Pratique n°6.

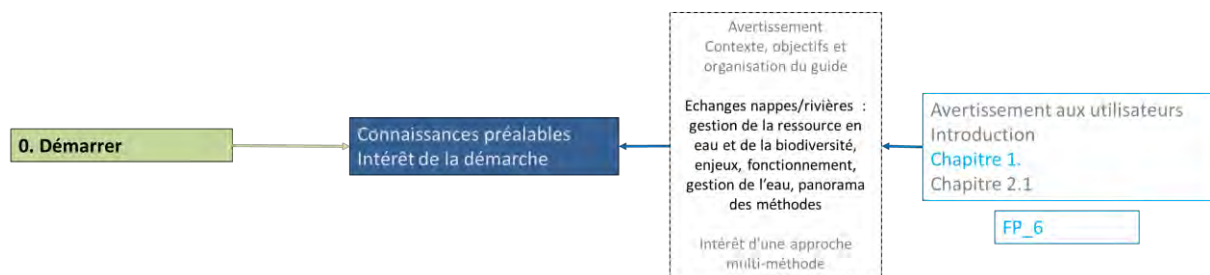
6. Faire la synthèse et 7. Cartographier

La Chapitre 5 est entièrement dédié à la synthèse et à la cartographie des résultats. Ce travail est effectué sur la base des tableaux de comparaison pour aboutir à un diagnostic synthétique tenant compte des incertitudes.



Une libellule sur un contre-canal peuplé d'Elodée du Canada. Cette plante aquatique indique des apports potentiels d'eau souterraine (© F. Paran)

Chapitre 1. Les échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire



Repère 2 : Prendre en main le guide méthodologique - connaissances préalables

Avant de se lancer dans l'explication de la démarche de caractérisation des échanges nappes/rivières, ce chapitre introductif vise à répondre à trois questions pour démarrer :

1. A quoi sert de caractériser les échanges nappes/rivières ?

La réponse à cette question est abordée sous forme d'exemples présentant les conséquences et l'importance des échanges nappes/rivières en termes de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité dans plusieurs cas de figure :

- apports de nappes aux chenaux actifs d'un cours d'eau qui contribuent au maintien du débit et au tamponnage thermique en période estivale,
- apports de nappes aux zones humides essentiels à leur maintien et à leur évolution,
- apports d'eau de surface aux eaux souterraines d'importance stratégique pour l'alimentation en eau potable.

2. Quels sont les enjeux liés aux échanges nappes/rivières ?

Ces enjeux sont abordés du point de vue réglementaire et déclinés du niveau européen (Directive Cadre Européenne sur l'Eau) au niveau bassin et local (SDAGE, Plan Rhône, SAGE, Contrat de milieux...) où mieux comprendre les échanges nappes/rivières est une question centrale.

3. Les échanges nappes/rivières : comment ça marche ?

Une fois les aspects législatifs et normatifs traités, la partie suivante donne un aperçu des concepts et principes décrivant le fonctionnement des échanges nappes/rivières et leur variabilité dans le temps et l'espace. Cette partie est agrémentée de schémas permettant de visualiser les principes des échanges nappes/rivières en milieu alluvial et d'encarts contenant les définitions des principaux termes clefs.

Pour terminer, ce chapitre propose un panorama des méthodes existantes (analyse géomatique, modèles hydrodynamiques, bilans et statistiques, mesures de terrain et échantillonnage, bioindicateurs, géochimie...). Seules quatre de ces méthodes sont présentées dans le guide (analyse géomatique, invertébrés souterrains, végétation aquatique et géochimie).

1.1. CONSEQUENCES DE LA PRISE EN COMPTE DES ECHANGES NAPPES/RIVIERES POUR LA GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU ET DE LA BIODIVERSITE : QUELQUES EXEMPLES

Les échanges nappes/rivières constituent un déterminant essentiel du fonctionnement du cours d'eau et de la vallée alluviale.

Enjeu :

identifier et quantifier les échanges nappes/rivières pour pouvoir gérer

L'identification et la quantification des échanges nappes/rivières a de multiples conséquences en termes de gestion de la ressource en eau et de la biodiversité des organismes vivant dans les rivières, les zones humides associées et les nappes qui alimentent sa plaine alluviale.

Ces conséquences pour la gestion sont successivement présentées ici pour trois cas de figure :

- les apports d'eau souterraine aux chenaux des cours d'eau (notamment le rôle de soutien des débits des cours d'eau),
- les apports d'eau souterraine aux zones humides associées aux cours d'eau,
- les apports d'eau de la rivière vers l'aquifère alluvial.

Pour aller plus loin, la Fiche Pratique n°6 contient des exemples issus de travaux réalisés sur le secteur de Brégnier-Cordon sur le Rhône amont.

Les apports d'eau de nappe aux chenaux actifs des cours d'eau

Les échanges entre une rivière et sa nappe peuvent avoir des conséquences quantitatives et qualitatives importantes pour les eaux de surface des chenaux actifs, particulièrement en étiage estival où les eaux souterraines contribuent au maintien du débit et au tamponnage thermique des eaux de surface.

De tels effets sont surtout sensibles dans les petits cours d'eau et les bras secondaires des gros cours d'eau, où les chenaux sont d'une part peu profonds (donc sensibles à l'ensoleillement) et ont d'autre part un débit suffisamment faible pour que des apports souterrains, même réduits, deviennent en proportion significatifs. Les organismes présents dans ces chenaux sont, pour la plupart,

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

Les apports d'eau de nappe dans les zones humides associées aux cours d'eau

Les apports d'eau souterraine peuvent aussi avoir une importance essentielle sur le maintien et l'évolution des zones humides associées aux cours d'eau. En effet, une part importante de ces zones humides est alimentée par des eaux souterraines (apports diffus ou sous la forme de sources bien localisées).

Ces apports assurent l'existence même de ces zones humides, qui sans eux connaîtraient des assèchements estivaux prolongés, voire disparaîtraient complètement en cas de baisse trop importante des niveaux piézométriques. La survie à long terme de ces systèmes dépendants des apports en eau souterraine exige donc une gestion stricte des prélèvements dans les nappes, en particulier des prélèvements pour irrigation, qui interviennent souvent à des périodes de l'année où le niveau piézométrique est le plus bas.

Les apports souterrains, avec des températures d'eau quasiment constantes toute l'année, contribuent aussi à tamponner thermiquement les systèmes fluviaux. Ils participent donc au maintien d'une flore et d'une faune préférant les eaux fraîches, ayant une forte valeur patrimoniale (c'est-à-dire de fort intérêt écologique et bénéficiant généralement de mesures de protection).

A l'intérieur des sédiments, ces apports souterrains limitent la désoxygénation et l'accumulation d'ammonium phytotoxique. Ils permettent ainsi le maintien d'espèces végétales particulières, sensibles à l'anoxie racinaire, et d'une faune interstitielle (invertébrés souterrains) particulièrement diversifiée dans les sources verticales. Ces organismes possèdent eux-aussi une valeur patrimoniale non négligeable.

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

Les apports d'eau de surface vers la nappe souterraine

Les eaux souterraines des plaines alluviales de la plupart des grands fleuves européens représentent des ressources souvent abondantes et largement utilisées pour satisfaire les différents usages et en particulier l'alimentation en eau potable. Ainsi, de nombreux captages sont implantés dans le lit majeur de ces cours d'eau et alimentent les nombreuses agglomérations situées sur leurs rives,

mais également certains territoires situés en retrait de la vallée.

Du point de vue de sa qualité, les eaux de la nappe alluviale peuvent être menacées non seulement par les activités humaines au droit des plaines alluviales elles-mêmes, mais aussi par des pollutions de l'eau du fleuve qui peuvent être transférées vers la nappe à partir des zones où le cours d'eau recharge l'aquifère.

Du point de vue de la quantité de la ressource en eau, la recharge de l'aquifère par la rivière peut au contraire être considérée comme positive car elle contribue au stock d'eau disponible pour exploitation. La localisation et la quantification de ces apports du cours d'eau vers la nappe sont donc essentielles du point de vue de la gestion de la ressource en eau et de l'alimentation en eau potable.



A gauche - Activité agricole : irrigation par aspersion (© R. Lengereau)



A droite - Activité agricole : traitement phytosanitaire (© R. Domergue)

1.2. ENJEUX DU GLOBAL AU LOCAL (DCE, SDAGE, SAGE, CONTRATS DE MILIEUX...)

La création de ce guide est en lien avec l'axe thématique « Risques environnementaux et vulnérabilité des milieux » de l'Accord Cadre conclu entre l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse et la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR). Ce thème souligne les besoins en connaissance au niveau des zones d'interface (échanges eaux souterraines/eaux superficielles) en résonance avec la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE, 2010) et l'orientation fondamentale du SDAGE (SDAGE, 1996 ; 2010) « Equilibre quantitatif : évolution quantitative des ressources superficielles et souterraines ».

Ces besoins sont aussi affirmés par le Plan Rhône (Plan Rhône, 2007) dans le volet « Qualité des eaux, ressources et biodiversité : compréhension des échanges entre fleuve et aquifères ».

D'une manière plus générale, la DCE, dans l'objectif de l'atteinte du bon état des masses d'eau à l'horizon 2015, indique qu'il est important de prendre en compte l'impact des eaux souterraines sur les eaux de surface et les écosystèmes associés du point de vue quantitatif et qualitatif. Il est donc important de surveiller l'état chimique et quantitatif des masses d'eaux souterraines. Il convient pour cela d'élaborer les outils pour (Vernoux, 2013) :

- 1) étudier les relations entre masses d'eau souterraine (MESO) et masses d'eau de surface (MESU),
- 2) évaluer ces relations,
- 3) prendre les mesures nécessaires.

La compréhension des échanges nappes/rivières répond bien à ce besoin de connaissance des

interfaces qui a été souligné par l'Agence de l'eau RMC et la ZABR en lien avec le développement du Plan Rhône. Etant donné le caractère fortement anthropisé du bassin versant du Rhône, la préservation du patrimoine lié à ses aquifères représente un enjeu important. En conséquence, une méthodologie de caractérisation des échanges entre les cours d'eau et les aquifères alluviaux a donc été développée.

L'élaboration de cette méthodologie est partie du constat que les connaissances scientifiques à

mobiliser sont nombreuses, mais éparées, parfois anciennes et relèvent de disciplines différentes. Pour mieux comprendre les mécanismes d'échange, il est apparu indispensable d'associer les méthodes qui peuvent être mobilisées dans ce domaine (écologie, biodiversité taxonomique et fonctionnelle, géochimie, modèles hydrogéologiques...) en relation avec les conditions de milieu. C'est cette méthodologie qui est présentée aujourd'hui dans ce guide.

1.3. FONCTIONNEMENT DES ECHANGES NAPPES ALLUVIALES/RIVIERES

Nappes alluviales / Aquifères alluviaux : termes clefs

La Figure 3 positionne la plupart des termes définis ci-dessous dans le cas d'une nappe libre. Pour une nappe captive, il faudrait ajouter une couche imperméable (ex : limon) au-dessus du niveau piézométrique. Le gradient de nappe peut-être visualisé en regardant la pente du niveau piézométrique (trait pointillé bleu).

Nappe libre : nappe à l'équilibre avec la pression atmosphérique.

Nappe captive : nappe en charge positionnée entre deux couches imperméables.

Perméabilité : facilité avec laquelle un milieu poreux se laisse traverser par un liquide (vitesse exprimée en m/s).

Substratum (ou formation imperméable) : formation géologique encaissante, sous-jacente à une unité charriée (comme un aquifère alluvial) ou à une couche sédimentaire. En d'autres termes, il s'agit d'une formation géologique sur laquelle reposent des alluvions. Le substratum est généralement considéré comme une formation imperméable, même si des échanges substratum/aquifères alluviaux sont possibles.

Gradient hydraulique (ou gradient de nappe) : pente, variation du niveau d'eau souterraine sur une distance déterminée

Zone saturée : l'ensemble du milieu solide et de l'eau. A saturation, l'aquifère est suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables.

Zone non-saturée : Au-dessus de la zone saturée, l'aquifère comporte une zone « non saturée » où la présence d'eau peut être épisodique (au cours de la saison pluvieuse par exemple).

Zone hyporhéique : elle correspond aux interstices saturés en eau situés sous le lit du cours d'eau et dans les rives qui contiennent une certaine proportion d'eau du chenal. C'est une zone de transition où se font les échanges entre les eaux du cours d'eau et les eaux souterraines.

Niveau piézométrique : altitude ou profondeur (par rapport à la surface du sol) de l'interface entre la zone saturée et la zone non-saturée dans un aquifère. Ce niveau varie en fonction de l'état de la recharge de l'aquifère ou des prélèvements exercés (pompages).

Pour bien comprendre ce que sont les relations nappes alluviales/rivières, il semble nécessaire de rappeler quelques définitions.

Aquifères et nappes alluviales : qu'est-ce que c'est ?

Aquifère et aquifères alluviaux

Un **aquifère** est un milieu solide contenant de l'eau pouvant circuler de façon naturelle ou être mobilisée de façon artificielle (pompage). La présence d'une nappe d'eau souterraine dans le sous-sol est révélée par le recoupement d'un plan d'eau lors du forage de puits ou par la présence de sources. L'eau souterraine circule aisément lorsque le milieu qui la contient est suffisamment perméable.

Les **aquifères alluviaux** sont situés dans des roches meubles, de nature pétrographique variée et de granulométrie hétérogène. Ils sont souvent liés à des dépôts de matériaux (sables, graviers, galets) transportés par les cours d'eau (Collin, 2006 ; Tirat et al., 2006).

Les aquifères alluviaux sont ceux qui nous intéressent principalement dans le cadre de ce guide. Dans l'ouvrage « Le Rhône en 100 questions » (Bravard et Clémens, 2008) les nappes alluviales sont définies de la façon suivante :

Les nappes alluviales sont plutôt constituées de galets, de sables et de graviers. Il s'agit d'aquifères homogènes ou continus à perméabilité d'interstices.

Pour compléter cette première définition des nappes alluviales, l'encart ci-contre propose une série de définitions pour s'approprier le vocabulaire et les termes clefs liés à de telles formations hydrogéologiques.

Comme souvent, l'étude d'un objet (comme les nappes alluviales par exemple) impose de considérer les autres objets qui les entourent. Il est donc important de prendre en compte les relations,

les échanges d'eau potentiels, entre l'aquifère alluvial et d'autres entités (Figure 2).

Il peut s'agir de relations avec :

- les terrains encaissants (latéraux - sur la figure 2 les briques symbolisent les formations aquifères et les tirets sur fond orange les formations imperméables) : si ces terrains sont perméables et plutôt aquifères, alors il peut y avoir un débit significatif des nappes de versants vers la nappe alluviale ou inversement (phénomènes de transfert et de surverse),

- le substratum : un apport à travers le substratum vers les nappes alluviales est quelque fois possible, on parle alors de drainance (sur la figure 2 les formations imperméables sont symbolisées par des tirets sur fond jaune foncé. Les

alluvions quant à elles, sont représentées par des pointillés sur fond jaune clair),

- le ou les cours d'eau : la nappe alluviale peut être rechargée par le cours d'eau lors des périodes d'inondation (crues), ou de hautes-eaux, et inversement soutenir les niveaux du cours d'eau lors des périodes d'étiage.

Dans le cadre de ce guide, nous nous intéresserons à la relation nappes/rivières. On distingue principalement les situations qui suivent (Figure 3) :

- cours d'eau alimentant la nappe,
- cours d'eau drainant la nappe,
- cours d'eau et nappe à l'équilibre.

Dans certains cas, le cours d'eau et la nappe sont indépendants et ne présentent pas de relation et donc pas d'échange, si les berges et le fond du lit sont étanches ou colmatées, par exemple.

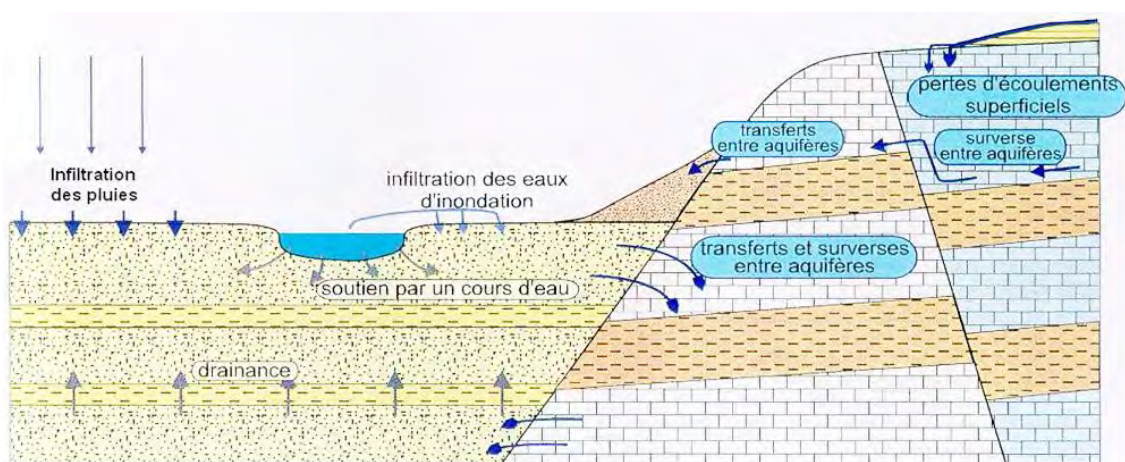


Figure 2 : Interface nappes/rivières et types de relations (© Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse)

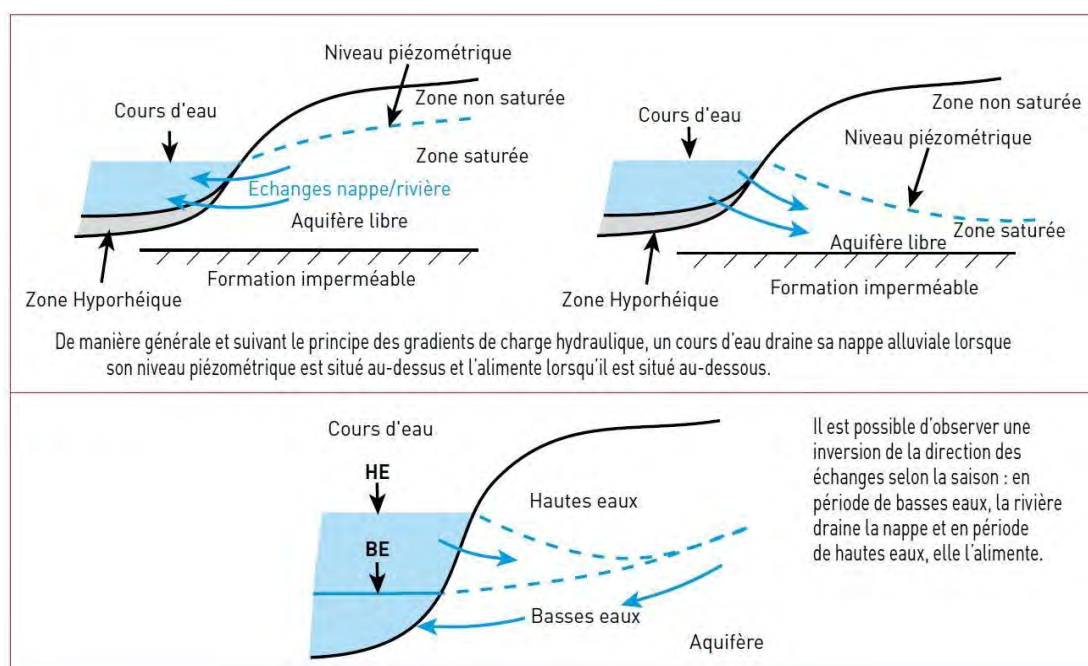


Figure 3 : L'interface nappes/rivières et variabilité des échanges au cours du temps (in Bravard et Clémens, 2008 d'après Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse)

Les relations nappes/cours d'eau sont variables dans l'espace et dans le temps.

Elles peuvent varier du point de vue spatial en fonction de la morphologie du cours d'eau, des hauteurs respectives du fil d'eau de la rivière par rapport à la piézométrie de la nappe, ou encore de la perméabilité des berges ou du fond du lit. Dans le cas des cours d'eau à méandres, on peut observer un passage du cours d'eau vers la nappe à l'amont du méandre et une alimentation de la nappe par la rivière à l'aval.

Du point de vue temporel, des variations saisonnières peuvent être observées sur le court terme selon la saison hydrologique (hautes-eaux, moyennes-eaux, basses-eaux), mais aussi sur le long terme avec les changements globaux (variation de la répartition saisonnière des pluies, phénomènes extrêmes, pressions des usages croissantes).

Les relations nappes/rivières sont souvent perturbées par des ouvrages et/ou des aménagements (barrages, seuils, digues, ouvrages...). De plus, l'état des eaux souterraines et superficielles, liées comme nous venons de le voir sur le plan de la quantité, sont également liées sur le plan de la qualité : une des deux entités aquatiques pouvant potentiellement être source de pollution sur l'autre.

La zone d'interface nappes/rivières est souvent caractérisée par une forte hétérogénéité géologique, de fortes teneurs en carbone organique et par une forte activité biologique et bactérienne. Ces facteurs influencent fortement les transferts à l'interface nappes/rivières (nutriments, solutés, polluants). Un aquifère pollué peut constituer une source de pollution durable pour un cours d'eau, même si la zone hyporhéique est souvent le siège de processus d'atténuation des transferts (biodégradation, élimination des particules en suspension) (Vernoux, 2013).



Activités agricoles et nucléaires dans la plaine de l'Ain (01) (© L. Cadilhac)

1.4. PANORAMA SUCCINCT DES METHODES EXISTANTES

Les méthodes permettant de caractériser les échanges nappes/rivières sont nombreuses. Leurs concepts de base relèvent de champs disciplinaires différents : géomatique, écologie, physique,

statistique, géochimie... Cette partie propose une vision générale, rapide et sans prétention d'exhaustivité des principales méthodes utilisées dans le domaine. Si quatre d'entre elles sont

décrites finement dans le guide, la plupart ne le sont pas spécifiquement. Il est envisagé d'intégrer des informations sur ces méthodes dans des versions ultérieures du guide.

Analyse géométrique ou analyse géomatique

Cette méthode, présentée dans ce guide sous le nom d'analyse géomatique, est fondée sur des cartes piézométriques et le calcul de gradients de nappe à l'aide de Système d'Information Géographique (SIG) et d'outils d'analyse spatiale.

Modèles hydrodynamiques

Il existe différents types de modèles utilisables :

- modèles distribués à base physique (modèles aux différences finies, modèles aux éléments finis, modèles couplés hydrogéologique/hydrologique),
- modèles analytiques non répandus en France,
- modèles mixtes distribués/analytiques.

Modèles, bilans et statistiques

Différentes approches sont possibles :

- bilan de masse entre 2 sections de rivière (ex : jaugeages différentiels),
- analyse spectrale et corrélatrice,
- bilan géochimique et isotopique pour établir les corrélations existantes entre les niveaux de nappe.

Mesures de terrain, relevés et échantillonnage

Il est possible d'effectuer différents types de mesures :

- mesures du flux à l'interface à l'aide de piézomètres disposés le long des berges de la rivière,
- mesures du flux dans un puits en nappe,
- mesures géochimiques incluant la physico-chimie classique (éléments majeurs, température, conductivité, pH) et la chimie isotopique.

Marqueurs biologiques

Ces méthodes sont fondées sur l'utilisation de bioindicateurs. Celles utilisant des végétaux aquatiques (macrophytes) et des invertébrés souterrains (stygobies) sont détaillées dans ce guide.

Autres méthodes

D'autres méthodes plus novatrices sont également envisageables :

- image Infra-Rouge Thermique (IRT) pour détecter les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines,
- fibre optique disposée le long des berges pour détecter les échanges,
- radar géologique pour identifier les niveaux perméables.



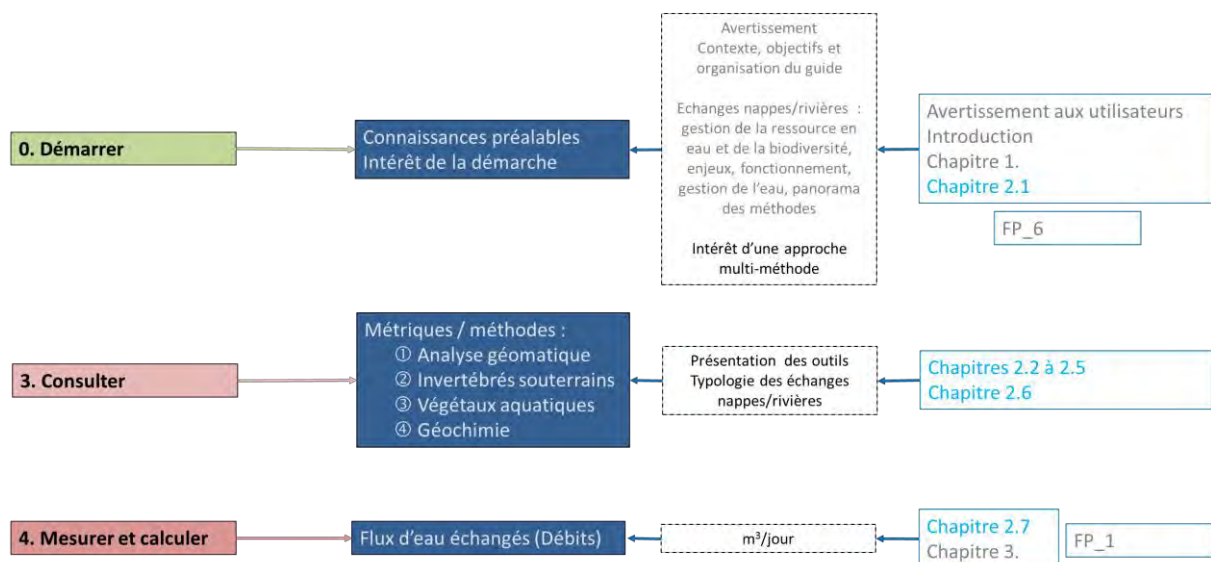
A gauche- Un contre-canal en pied de digue entre canal dérivation et Vieux-Rhône à proximité de Brégner-Cordon (01). Les contre-canaux recueillent les eaux de fuites des digues et potentiellement des eaux souterraines (© F. Paron)

A droite - Le Rhône au PK (Point Kilométrique) 283,5 (Arles, 13). Les PK sont autant de points de repères utiles pour se repérer le long du cours d'une grande rivière ou d'un grand fleuve (© M. Martini)



La végétation aquatique, un indicateur biologique. Lône du Petit-Rhône à proximité de Beauchastel (07) (© F. Paran)

Chapitre 2. Présentation des outils de caractérisation des échanges nappes/rivières : estimation et typologie des échanges



Repère 3 : Découvrir les outils, la typologie des situations d'échanges nappes/rivières et une formule de quantification des flux d'eau

Après avoir présenté des éléments généraux concernant les enjeux réglementaires, le fonctionnement général des échanges nappes alluviales/rivières, les implications en termes de gestion, quelques méthodes existantes et quelques définitions, ce chapitre vise dans un premier temps à expliquer l'intérêt d'une approche multi-méthode de caractérisation des échanges nappes/rivières. Un tel intérêt réside essentiellement dans la complémentarité des approches du point de vue des informations qu'elles peuvent apporter pour l'établissement d'un diagnostic synthétique en combinant les aspects physiques, biologiques et chimiques de la question.

Ce premier paragraphe conclut l'action « Démarrer » (Repère 3). La suite du chapitre répond à la question suivante :

Quels sont les outils/méthodes pour caractériser quels types d'échanges nappes/rivières ?

Il propose des informations générales, mais essentielles, pour se préparer au mieux à l'utilisation du guide. Dans un premier temps chacune des quatre méthodes est décrite de manière synthétique en mettant en avant

ces principes fondamentaux, son potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivières, mais aussi ses limites et les précautions à prendre lors de leur utilisation.

Dans un second temps, ce chapitre présente les différentes configurations (typologie) dont on peut déduire les caractéristiques des échanges à partir des outils. Cette typologie propose six situations d'échanges différentes illustrées sous forme de schéma :

- apports d'eau de nappe à la rivière,
- apports d'eau de la rivière à la nappe,
- pas d'échange identifié entre la rivière et la nappe,
- colmatage entre la nappe et la rivière,
- sous-écoulement,
- recyclage ou échanges hyporhéiques.

Pour terminer, ce chapitre examine les possibilités de quantification des flux d'eau échangés, et notamment la Loi de Darcy.

2.1. INTERET D'UNE CARACTERISATION DES ECHANGES NAPPES/RIVIERES MULTI-METHODES

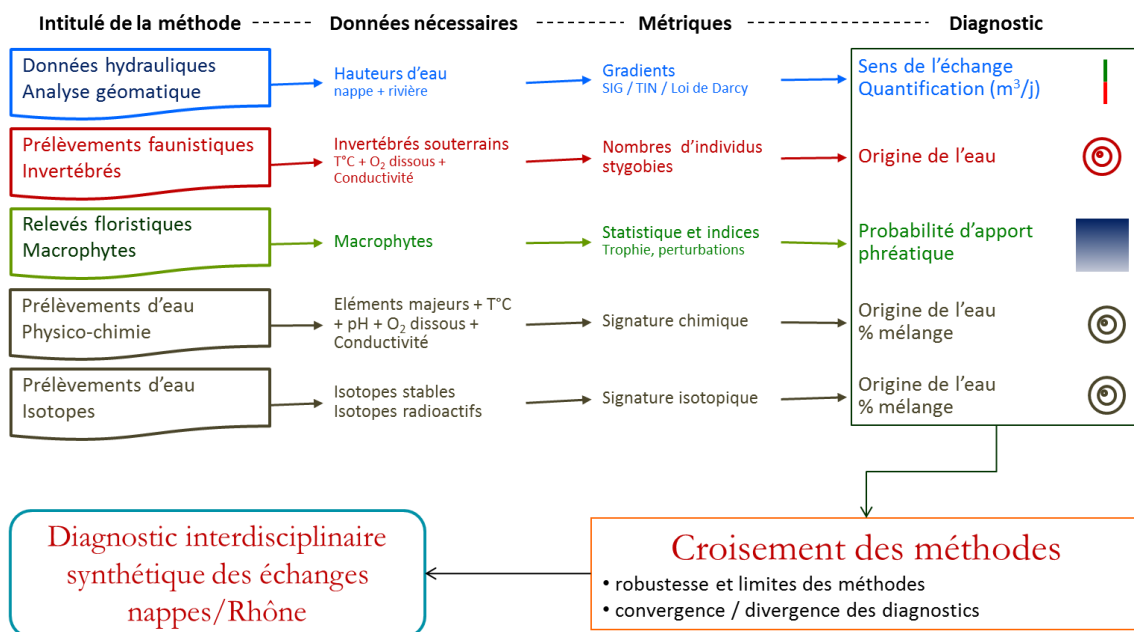


Figure 4 : Schéma de principe conduisant au croisement des méthodes

Comme nous l'avons montré dans les travaux de recherche ayant conduit à la rédaction de ce guide, les méthodes quantitatives physiques d'évaluation des échanges restent relativement approximatives et produisent des résultats dont il est parfois difficile de contrôler l'incertitude. Les données disponibles ne permettent pas toujours une évaluation précise des débits d'échange généralement assez faibles entre les nappes et les rivières. Ainsi, malgré l'intérêt que présentent les formules de l'hydrodynamique et les modèles hydrogéologiques, ceux-ci possèdent différentes limites au niveau de la précision des résultats obtenus. Le calage d'un modèle mathématique est parfois difficile à réaliser, notamment à cause des

conditions limites (contre-canal, fleuve, interface nappes/gravières, colmatage des berges...) et de l'hétérogénéité du secteur. Il est, par exemple, difficile d'estimer le degré de colmatage des berges ou la qualité du niveau piézométrique mesuré dans un puits.

Les résultats produits par les différentes méthodes d'évaluation des échanges que nous avons sélectionnées proposent d'une part une représentation hydrophysique du territoire, essentiellement quantitative, constituée d'objets hydrologiques pour visualiser les relations d'échange (flux). D'autre part, le croisement avec d'autres dimensions hydrobiologiques et hydrochimiques devient très intéressant pour

valider ou infirmer les relations d'échange. Par ailleurs, les corrélations établies entre ces dimensions (invertébrés souterrains, végétaux aquatiques, gradients hydrauliques) pour des secteurs déterminés constitueront à terme une base d'extrapolation sur des secteurs où les données manqueraient pour l'une ou l'autre.

Dans ce type d'approche, on peut souligner l'importance de l'acquisition de connaissances hydrauliques concernant les nappes (piézométrie), les cours d'eau et certains de leurs affluents (ligne d'eau, débit) ; mais aussi l'acquisition de connaissances biologiques afin de tester la cohérence des résultats.

Si pour un secteur étudié, les différents points de vue (hydraulique et biologique) sont cohérents, la quantification du débit d'échange entre la nappe et le fleuve est autorisée. Par la même occasion, s'il s'agit de zones plus anthropisées, des paramètres de qualité (pollution de la nappe vers la rivière ou inversement) seront déduits.

Si les différents points de vue ne convergent pas vers une même évaluation des échanges, un

réexamen des données est nécessaire. Des données complémentaires pourront aussi être acquises pour affiner le diagnostic. Sur le plan hydraulique, un modèle physique pourra être mobilisé, s'il existe, pour obtenir une autre source d'information. Rappelons toutefois que les modèles maillés ne sont pas assez fins pour évaluer des échanges avec la nappe pour chacune des rives du fleuve.

La figure 4 présente de manière synthétique la démarche de caractérisation multi-méthode. Pour chaque méthode (de la gauche vers la droite) est donnée :

- son intitulé,
- les données nécessaires,
- les métriques mises en œuvre (indices, variables, lois ou calculs effectués à partir des données),
- le diagnostic potentiellement réalisable pour les échanges nappes/rivières,
- un dessin symbolisant le type de représentation cartographique des résultats : ponctuel (cercle), linéaire de berge (trait), surfacique (carré).

2.2. ANALYSE GEOMATIQUE HYDRODYNAMIQUE

Présentation de la méthode

Pour les aquifères alluviaux importants on dispose en général de données hydrauliques détaillées sous forme de cartes piézométriques, souvent en basses-eaux, moyennes-eaux, hautes-eaux. On s'intéressera en priorité aux situations de basses-eaux, qui correspondent à des périodes pour lesquelles les enjeux sont souvent importants. En milieu poreux, cas des aquifères alluviaux, l'écoulement de l'eau à travers les berges est exprimé par la Loi de Darcy (Figure 5) – voir encart Chapitre 2.7.

Partant d'une carte piézométrique, digitalisée ou construite par interpolation, et de données de hauteurs d'eau synchrones en rivière, un maillage TIN (Triangulated Irregular Network ou Réseau de Triangles Irréguliers) permet de restituer le modèle 3D de la surface de la nappe. Un TIN contient les informations suivantes (Figure 12) :

- « slope » donne la pente (en %), c'est-à-dire le gradient (i),
- « aspect » qui donne la direction de l'écoulement (angle exprimé en degré).

La rive du cours d'eau constitue une limite de la nappe. Pour le paramètre surface d'infiltration ou d'échange, par convention, faute d'avoir des données plus précises, on prendra une section

d'échange A évaluée à partir de données bathymétriques exprimée en m^2 par mètre linéaire au droit de la rive. Si, ultérieurement, on dispose de données plus précises pour évaluer la grandeur A, il suffira d'appliquer le coefficient multiplicateur ad-hoc pour ajuster les valeurs du débit d'échange.

Au final, l'analyse géomatique permet de diagnostiquer le sens des échanges et de quantifier les volumes échangés sur le linéaire de berge étudié.

Potentiel de caractérisation des échanges

L'approche géomatique a montré l'applicabilité et la simplicité d'utilisation de la Loi de Darcy pour calculer des débits d'échanges nappes/rivières sur les secteurs étudiés. Cette méthode semble aussi adaptée pour travailler sur des cours d'eau de plus petite taille.

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

- reproductibilité secteur après secteur sous réserve d'obtention des données nécessaires (hauteurs d'eau de nappe et de rivière),
- souplesse d'utilisation car des données acquises ultérieurement peuvent être intégrées dans la base de données pour le calcul des débits,

- possibilité, si les données existent, d'une représentation linéaire des échanges sur chacune des berges,

- possibilité de réaliser des bilans à différentes échelles par agrégation des valeurs de débits sur les tronçons de berge. Ceci est assez pratique pour travailler à des échelles compatibles avec les résultats obtenus avec les méthodes biologiques et géochimiques,

- possibilité d'instaurer une pondération en fonction de l'angle existant entre la berge et la direction du gradient de nappe. En effet, la Loi de Darcy ne fonctionne que dans le cas où la nappe et le fleuve ont des écoulements perpendiculaires. Dans les autres cas, le débit calculé avec cette Loi est surévalué,

- possibilité d'automatiser l'enchaînement des fonctions d'analyse spatiale pour un traitement plus rapide.

Limites, précautions à prendre et perspectives d'amélioration

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 (Voir encart au Chapitre 3.1, et Fiche Pratique n°1). En effet, la généralisation de la méthode demande au préalable une évaluation de la marge d'erreur induite par les incertitudes de chacune des variables servant au calcul des débits et des gradients de nappe. Il conviendra de travailler sur la façon de les prendre en compte 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. Les travaux de Lalot (2014) montre un écart de l'ordre de 23% entre les débits d'échanges calculés par analyse géomatique et ceux obtenus par modélisation aux éléments finis. Des débits ont été calculés à partir d'une même piézométrie sur le secteur de Péage-de-Roussillon.

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 colmatage au niveau des berges et les freins au drainage.

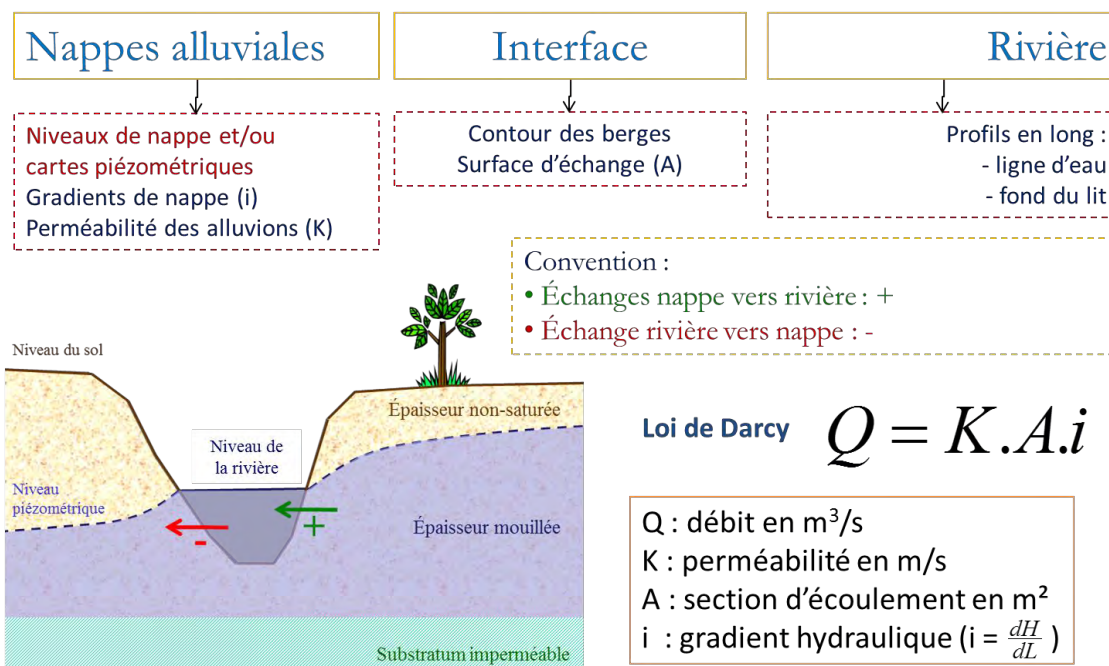


Figure 5 : Estimation des débits d'échange nappes/rivières avec la Loi de Darcy

2.3. METHODES GEOCHIMIQUES

Présentation des méthodes

La géochimie de l'eau peut-être un outil intéressant pour discriminer des eaux d'origines superficielles, interstitielles ou souterraines à condition que des

prélèvements et des analyses soient effectués dans chacun de ces trois compartiments.

Paramètres physico-chimiques

Ces analyses peuvent porter sur des paramètres physico-chimiques classiques tels : les éléments

majeurs (ex : calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , nitrates NO_3^- , phosphates PO_4^{2-}), les éléments trace (ex : sulfates SO_4^{2-}), la température, la conductivité électrique ou la teneur en oxygène dissous.

En étudiant les contrastes des teneurs en éléments chimiques entre les eaux souterraines et de surface, il est possible de déterminer l'origine de l'eau et d'estimer quantitativement des mélanges. Un tel diagnostic est possible sous réserve de disposer :

- d'un calage des éléments chimiques impliqués sur la base de valeurs de référence et d'une connaissance spatiotemporelle des signatures des différents systèmes concernés,

- d'un suivi temporel des masses d'eau en présence à différents débits et différentes saisons.

L'encaissant ou le substratum peuvent jouer sur les contrastes chimiques des eaux selon qu'il s'agit de formations géologiques de type socle ou des roches carbonatées.

Dans le guide, l'utilisation de données de chimie des eaux superficielles est liée au diagnostic des échanges nappes/rivières réalisé avec les végétaux aquatiques (chapitre 3.3) ; l'utilisation de données de chimie des eaux interstitielles est liée au diagnostic effectué avec les invertébrés souterrains (chapitre 3.4).

Isotopes

Le recours aux méthodes isotopiques est moins fréquent. Ces méthodes permettent de caractériser et de déterminer les apports souterrains aux eaux superficielles, et inversement dans la mesure où leurs signatures isotopiques sont bien connues. Les méthodes isotopiques sont souvent utilisées pour le calage des modèles hydrogéologiques.

Les isotopes stables de la molécule d'eau permettent en particulier de déterminer l'origine de la recharge des eaux souterraines en utilisant le gradient d'altitude et les variations saisonnières de la signature isotopique des précipitations. Les isotopes radioactifs sont plus spécifiquement utilisés pour estimer le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. Il est possible d'utiliser différents couples d'isotopes stables comme l'oxygène-16 (^{16}O) et l'oxygène-18 (^{18}O), l'hydrogène et le deutérium (^2H ou D), le carbone-12 (^{12}C) et le carbone-13 (^{13}C) ; et différents traceurs radioactifs ou radiochronomètres (datation des eaux) comme le carbone-14 (^{14}C), le tritium (^3H ou T) et la datation $^3\text{H}/^3\text{He}$. L'isotope radiogénique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et le radon-222 radioactif (^{222}Rn) sont également des éléments utilisés pour identifier des venues d'eau souterraines.

On peut souligner ici l'intérêt des isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O et ^2H) pour étudier les systèmes à fort gradient altitudinal. En effet, les dans hydrosystèmes fortement alimenté à l'amont par l'eau de fonte des neiges et des glaciers, les rivières drainent des eaux fortement appauvries en isotopes lourds, qui se mélangent avec les apports de basse altitude, moins appauvris. Ces mélanges peuvent être caractérisés. Pour cela, on étudie les variations du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'amont à l'aval des cours d'eau, en les comparant aux rapports mesurés localement dans les aquifères et la pluie. Le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, marqueur des équilibres calco-carboniques, peut être un indicateur d'apports d'eaux carbonatées ou de pollutions organiques. Le tritium et le carbone-14 sont des indicateurs du temps de séjour des eaux dans les aquifères. L'utilisation du carbone-14 est toutefois d'usage délicat dans un contexte carbonaté (Lalbat, 2006) et pour des âges récents. Il peut parfois ponctuellement indiquer un apport d'eaux profondes anciennes dans les eaux de surface.

Dans le guide, un exemple de caractérisation des échanges nappes/rivières à l'aide des isotopes est présenté. Il est fondé sur l'utilisation du couple $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ et ^3H . L'encart sur la page suivante propose en complément un tableau de synthèse issu des travaux de Gourcy et Petelet (2011), qui liste le type d'application possible en fonction des substances analysées et des isotopes impliqués.

Potentiel de caractérisation des échanges

Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques pouvant nous renseigner sur l'origine des eaux interstitielles peu profondes, par contrastes avec les valeurs mesurées dans les eaux superficielles, sont assez similaires à ceux utilisés pour caractériser les nappes plus profondes. Le plus simple à mesurer est la conductivité électrique, qui nous renseigne sur la minéralisation de l'eau ; celle-ci est classiquement beaucoup plus forte dans les eaux souterraines situées en région calcaire, par rapport à celles localisées en zones de socle cristallin. Il est aussi possible de mesurer les teneurs en certains ions dont l'origine est connue et qui peuvent alors être utilisés comme signature de l'origine fluviale ou souterraine de l'eau interstitielle. Par exemple, les sulfates qui proviennent de la dissolution des formations de gypses peuvent signer des apports d'eaux de surface (Marmonier et Dole, 1986). Dans un contexte carbonaté les teneurs en calcium peuvent caractériser l'influence des eaux souterraines (Dole-Olivier et Marmonier, 1992).

Isotopes et gaz dissous utilisés pour les études hydrogéologiques (in Gourcy et Petelet-Giraud, 2011)

Isotope(s)	Substance	Application courante
Oxygène-18 (^{18}O) Deutérium (^2H)	H_2O (Eau)	Origine de l'eau, identification des zones de recharge Connections hydrauliques, drainage entre aquifères, identification des eaux anciennes, relations eaux de surface/eaux souterraines
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sr (Strontium)	Identification des échanges entre aquifères , relations eaux de surface/eaux souterraines Origine des polluants
Sulfure-34 (^{34}S) Oxygène-18 (^{18}O)	SO_4^{2-} (Sulfates)	Identification des sources de pollution Acidification
Nitrate-15 (^{15}N) et Oxygène-18 (^{18}O)	NO_3^- (Nitrates)	Origine des nitrates, identification des sources de pollution, processus de dénitrification
*CFC, **SF ₆		Identification de la recharge récente, taux de recharge, flux
Traceurs artificiels		Flux, aires de recharge, vitesses d'écoulement
	Demi-vie (ans)	
Tritium (^3H)	12,32	Identification de la recharge récente , taux de recharge, flux, transport de l'eau dans la ZNS
Carbone-14 (^{14}C)	5730	Dynamique des eaux, identification des eaux anciennes

*Chlorofluorocarbones ; **Hexafluorure de soufre

Les principaux paramètres intéressants pour l'étude des interactions eaux de surface/eaux souterraines sont les suivants : ^2H , ^{18}O , ^3H , ^{222}Rn , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, traceurs artificiels (ex : fluorescéine, éosine...).

Isotopes

La mesure du rapport isotopique de l'hydrogène (D/H) et de l'oxygène (^{18}O et ^{16}O) est communément employée pour caractériser et quantifier les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface (Gonfiantini et al., 1995 ; Walker et Krabbenhoft, 1998). Ces rapports isotopiques sont reportés sous la notation δD et $\delta^{18}\text{O}$ appelée par la suite composition isotopique. Les compositions isotopiques δD et $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines reflètent celles des précipitations dans la zone de recharge.

Le δ (ex : $\delta^{18}\text{O}$ et δD) est calculé avec la formule suivante (Voir Fiche Pratique n°2 pour plus de détail) :

$$\Delta = \left\{ \frac{\text{Réchant.}}{\text{Rstandard}} - 1 \right\} \times 1000$$

Les valeurs du δD et du $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations sont liées à l'histoire des masses nuageuses et à la température de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique : elles seront d'autant plus négatives que la température de condensation de l'eau de pluie sera basse. Lorsque la température de condensation diminue, les précipitations, plus abondantes, sont appauvries en D et ^{18}O .

Ainsi, dans une même région, les δD et $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations diminuent avec l'altitude et avec la température décroissante. En l'absence

d'évaporation significative, la composition isotopique de l'eau des rivières reflète celle des précipitations sur son bassin versant. L'eau des rivières dont le bassin versant est très montagneux est appauvrie en D et ^{18}O à cause de l'effet de l'altitude. Ainsi, la comparaison entre la signature isotopique (δD , $\delta^{18}\text{O}$) des eaux de surface et des eaux souterraines permet souvent de déterminer l'origine des différentes masses d'eau et de quantifier les échanges lorsqu'elles présentent une signature isotopique différente (Négrel et al., 2003).

Données isotopiques sur le bassin du Rhône

Les données publiées de géochimie isotopique (D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) concernant les eaux souterraines et les eaux de surface du bassin du Rhône sont réparties principalement en Suisse (Schürch et Vuataz, 2000 ; Fette et al., 2005), entre Seyssel et Belley (BDISO), au voisinage de Lyon (DeBénédictis, 2004 ; BDISO), dans la zone Bollène-Valréas (Huneau et al., 2000) et dans la région d'Avignon (BDISO).

Limites, précautions à prendre et perspectives d'amélioration

Paramètres physico-chimiques

Certains paramètres physico-chimiques peuvent apporter des renseignements importants, mais leurs teneurs peuvent être modifiées par des activités biologiques, notamment microbiennes susceptibles de changer les équilibres ioniques et le

pH. Par exemple la présence d'ions nitrates (NO_3^-) dans les eaux indique l'apport de contaminants liés aux activités agricoles. La teneur en nitrates dans les eaux peut diminuer très rapidement du fait de la mise en place de processus microbiens de dénitrification (Clément et al., 2002).

La méthode fondée sur les paramètres physico-chimiques mérite d'être améliorée et complétée :

- les mesures d'un même paramètre dans des milieux aquatiques sur des sites différents ne permettent pas toujours de réaliser un diagnostic. Si sur certains secteurs, la conductivité, par exemple, ne permet pas de dégager de tendances, sur d'autres elle permet de signer des apports phréatiques (Voir Fiche Pratique n°6, exemples de la conductivité sur Brégnier-Cordon et Donzère-Mondragon),

- lorsque la distinction entre les nappes alluviales et les nappes de versant est difficile (absence de traceur physico-chimique spécifique ou signatures physico-chimiques peu contrastées). (Voir Fiche Pratique n°6, exemple de la conductivité et de sulfates sur le Rhône)

- il est conseillé d'effectuer les mesures physico-chimiques pendant les moyennes-eaux. Il est 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 relativement plus importants, donc plus visibles chimiquement, mais peut induire en erreur pour l'appréciation de l'intensité des échanges, et même leur direction préférentielle.

Isotopes

Comme pour les paramètres physico-chimiques, les méthodes isotopiques sont fondées sur le contraste des signatures isotopiques des eaux. Les variations saisonnières de ces signatures peuvent permettre de quantifier les échanges latéraux entre les eaux souterraines et les rivières, mais aussi d'évaluer l'altitude de recharge de ces apports (Négre et al., 2003).

Contraste des signatures isotopiques sur le bassin du Rhône

La composition isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène des eaux du Rhône montre des variations saisonnières importantes ($\delta^{18}\text{O} \pm 3\text{‰}$), avec un appauvrissement en D et ^{18}O lorsque la contribution de la fonte des neiges est importante (Schürch et Vuataz, 2000 ; Fette et al., 2005). Le $\delta^{18}\text{O}$ des eaux du Rhône est généralement plus faible que les précipitations locales : par exemple à Lyon, le Rhône est appauvri en ^{18}O de 3‰ en moyenne par rapport aux précipitations.

Ces méthodes présentent plusieurs contraintes pour leur mise en œuvre :

- l'échantillonnage doit être effectué avec soin,
- le coût des analyses peut-être élevé et il est parfois nécessaire de faire appel à un laboratoire spécialisé,
- les eaux analysées doivent posséder des signatures différentes,
- des données ponctuelles ne sont pas suffisantes pour un diagnostic, il est souvent nécessaire de recueillir des chroniques de données,
- l'interprétation des résultats est une affaire de spécialiste.

2.4. VEGETAUX AQUATIQUES (MACROPHYTES) ET PHYSICO-CHIMIE DES EAUX SUPERFICIELLES

Présentation de la méthode

La caractérisation des échanges nappes/rivières à l'aide des végétaux aquatiques (macrophytes) est effectuée à l'aide d'un diagnostic du fonctionnement des annexes alluviales situées à proximité de la rivière. Ce diagnostic repose sur les exigences écologiques des espèces végétales aquatiques vivant dans ces zones humides ou les colonisant. Il permet d'aboutir dans un certain nombre de cas à une évaluation : 1) du niveau de ressources en fonction de l'abondance en nutriments (phosphore, ammoniacale) ou trophie, 2) du degré d'influence des perturbations par la rivière (crues) et 3) des apports d'eaux souterraines (Amoros et al., 2000).

Pour cette méthode, les exigences des espèces en termes de trophie et d'alimentation en eaux souterraines ont été fournies à partir de données floristiques et physico-chimiques collectées dans un lot de 40 annexes alluviales du Haut-Rhône et de l'Ain. Ces données ont été complétées par des données bibliographiques. Cette méthode basée sur les communautés végétales permet un diagnostic rapide et peu coûteux et intègre les échanges sur une période de temps annuelle.

La contrainte est qu'elle ne peut s'appliquer que dans les zones où l'on a pu échantillonner deux espèces au minimum. Cette méthode fondée sur les macrophytes permet de caractériser uniquement les échanges de la nappe vers la rivière.

La caractérisation des paramètres physicochimiques des annexes fluviales, est en lien avec les valeurs références de la rivière (au minimum) et de la nappe (au mieux).

Potentiel de caractérisation des échanges

La méthode basée sur les végétaux aquatiques permet d'intégrer des processus à large échelle temporelle, puisque les végétaux sont intégrateurs des variations saisonnières en termes d'alimentation en eau du milieu. La collecte des données de terrain peu coûteuse en temps et argent permet également de travailler à large échelle spatiale.

La méthode physico-chimique se montre performante surtout pour indiquer les apports des nappes de versant. Les paramètres reliés aux niveaux de trophie et à l'activité biologique interviennent peu dans la méthode (faible pouvoir discriminant de l'ammonium, des phosphates et du pH) ce qui augmente la validité de la méthode.

Les méthodes basées sur les indicateurs végétaux (macrophytes) et physico-chimiques sont donc un complément indispensable. De surcroît, la collecte des données de terrain peut se faire simultanément pour les deux méthodes (végétaux aquatiques et physico-chimie des eaux superficielles).

Le matériel nécessaire est peu coûteux et les compétences requises pour ces deux méthodes : ACP (Analyse en Composantes Principales – voir encart chapitre 3.2), cartographie sous SIG et détermination des espèces végétales) s'acquièrent rapidement.

Limites, précautions à prendre et perspectives d'amélioration

Les deux principales limites de la méthode basée sur les végétaux aquatiques étant :

- qu'elle ne permet pas de détecter les apports de la rivière vers la nappe,
- qu'elle s'applique uniquement aux systèmes où la végétation est présente en partie centrale ou annexe.

Afin de valider définitivement l'outil combiné végétaux aquatiques et physico-chimie, il faudrait le tester sur d'autres secteurs avec une géologie différente. En effet, les résultats pourraient être moins bons sur des secteurs dans lesquels les nappes seraient moins bien différenciées chimiquement.

Pour que la méthode physico-chimique soit généralisable, une adaptation dans les paramètres choisis en fonction du contexte local est nécessaire (ex : utilisation des sulfates comme traceur de la nappe alluviale sur le Haut-Rhône). Une prospection du territoire avec la mesure de nombreux paramètres, suivi du traitement statistique (ACP) des résultats, permettrait de dégager les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines sur le secteur concerné. Cet outil ne se substitue cependant pas, du fait de sa lourdeur et de sa relative imprécision, à l'outil végétation aquatique.

De plus, les analyses physico-chimiques 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.

2.5. INVERTEBRES SOUTERRAINS ET PHYSICO-CHIMIE DES EAUX INTERSTITIELLES

Présentation de la méthode

La faune souterraine, appelée aussi faune stygobie, regroupe un ensemble d'organismes adaptés morphologiquement et physiologiquement à la vie à l'obscurité avec peu de nourriture. Les adaptations morphologiques des stygobies permettent dans certains cas de les distinguer aisément des espèces de surface : réduction ou perte totale des yeux (anophtalmie), forte diminution de la pigmentation du corps (les individus sont généralement de couleur blanche ou claire), appendices parfois allongés et plus fins. On

retrouve ces espèces dans l'ensemble des milieux souterrains (karst, puits, sources, sous-écoulement des cours d'eau, nappes phréatiques et grottes). Toutefois, une même espèce est généralement inféodée particulièrement à un ou deux milieux différents. Ainsi, une espèce vivant dans les grottes, où l'espace n'est pas un facteur limitant, ne sera peut-être pas capable de coloniser les milieux interstitiels (le sous-écoulement des cours d'eau) ou les nappes phréatiques, où seules des espèces de petite taille pourront survivre.

Ces espèces souterraines colonisent donc le milieu interstitiel des cours d'eau et des plaines alluviales.

Ce milieu, associé aux cours d'eau et aux zones humides riveraines, est un écotone entre les écosystèmes de surface et les écosystèmes souterrains (Gibert et al., 1994) avec des caractéristiques physico-chimiques le plus souvent intermédiaires entre celles des eaux de surface et des eaux souterraines (du point de vue de sa variabilité thermique, des teneurs en oxygène ou en sels dissous). Du fait de sa position intermédiaire, il est colonisé par un mélange d'espèces provenant de la surface et d'espèces provenant des eaux souterraines. On peut ainsi considérer plusieurs types écologiques différents dans les communautés des interstices (Thienemann, 1925 ; Marmonier et al., 1993 ; Gibert et al. 1994) : les stygoxènes (présents accidentellement dans les eaux souterraines), les stygophiles occasionnels ou permanents (organismes de surface pouvant effectuer une partie ou la totalité de leur cycle vital aussi bien dans les eaux de surface que dans le milieu interstitiel), les stygobies ubiquistes (organismes strictement inféodés aux eaux souterraines et colonisant tous les habitats souterrains) et enfin les phréatobies (organismes stygobies qui ne colonisent que les habitats interstitiels à forte stabilité physico-chimique).

Dès les années 1980 (Ginet, 1982 ; Marmonier, 1988), il a été établi qu'il existait une relation entre : d'une part l'origine et le mode de circulation des eaux dans les sédiments (apport d'eau souterraine, échange surface souterrain sur de courtes distances, infiltration d'eau de surface vers la nappe) et d'autre part la composition des peuplements interstitiels. Ces différences de composition permettent d'utiliser les peuplements interstitiels comme des descripteurs biologiques des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les apports d'eau souterraine vont par exemple augmenter l'abondance et la richesse taxonomique des stygobies et des phréatobies. A l'inverse, des infiltrations d'eau de surface induisent une diminution de la proportion des stygobies dans le milieu interstitiel au profit des espèces de surface. Un des avantages de l'utilisation de ces communautés animales est d'intégrer les variations temporelles sur une échelle saisonnière et de repérer des arrivées d'eau souterraine mêmes temporaires souvent non détectables par d'autres méthodes. Par contre, les changements brutaux d'origine de l'eau sur de courtes périodes (comme ceux induits par les crues), modifient la répartition des organismes et peut rendre l'interprétation des résultats difficiles.

Potentiel de caractérisation des échanges

La composition des peuplements interstitiels est utilisée pour reconstituer l'origine des eaux baignant les sédiments d'un cours d'eau.

Les points positifs de cette méthode sont :

- 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,
- d'intégrer les échanges nappes/rivières sur des durées de l'ordre de plusieurs semaines, ces organismes étant peu mobiles, ils rendent bien compte des échanges moyens au niveau d'une station de prélèvement,
- mais aussi de traduire les effets des changements saisonniers des niveaux relatifs des nappes et du fleuve.

Exemple de diagnostic sur le bassin du Rhône

Les avantages de méthode fondée sur les invertébrés souterrains sont clairement mis en avant par le diagnostic des échanges nappes/fleuve sur le secteur de Donzère-Mondragon 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 (Voir Fiche Pratique n°6).

Pour finir, les invertébrés constituent la seule méthode capable de diagnostiquer le phénomène de recyclage (Figure 11) et de travailler à une échelle aussi locale.

Limites, précautions à prendre et perspectives d'amélioration

Limites de la méthode fondée sur les invertébrés souterrains sur le bassin du Rhône

Par exemple, ces limites sont clairement visibles sur le secteur de Donzère-Mondragon 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 (Voir Fiche Pratique n°6).

Les limites de l'indicateur « invertébrés souterrains » sont liées :

- 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,

- à la difficulté d'identification des organismes, qui doit être réalisée par des spécialistes,
- 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.

2.6. CARACTERISATION THEORIQUE DES RELATIONS NAPPES/RIVIERES ET TYPOLOGIE PRATIQUE

Les situations d'échanges entre la nappe et la rivière peuvent être différentes dans l'espace et dans le temps. Cette partie, propose une liste des configurations d'échanges possibles, abordées dans un premier temps de manière générale et théorique ; puis, dans un second temps, de manière pratique en s'appuyant sur des blocs diagrammes schématiques et sur des configurations utilisable directement lors de travaux de caractérisation des échanges nappes/rivières.

Vision théorique et générale des relations nappes/rivières

On distingue d'abord les situations dans lesquelles il y a peu ou pas de relations hydrodynamiques :

- nappe peu ou pas développée : le cours d'eau circule sur des formations peu perméables ou imperméables sans nappe phréatique,
- colmatage du lit et des berges (Figure 9) : lorsque le cours d'eau circule lentement (courant faible) le dépôt de fines particules rend le lit et les berges imperméables. Les vitesses d'écoulement peuvent être ralenties par des aménagements. Ceux-ci peuvent aussi empêcher le changement de sens saisonnier des relations ce qui favorise le colmatage. Un colmatage peut déconnecter verticalement la rivière et la nappe en provoquant l'apparition d'une zone non-saturée entre les deux,
- apports indirects : il s'agit d'apports par ruissellement de nappes contenues dans des formations latérales qui ne sont pas en contact avec le cours d'eau constituant le niveau de base,
- écoulement de l'aquifère parallèle au cours d'eau (pas d'échange identifié : figure 8),
- cours d'eau en équilibre avec la nappe (pas d'échange identifié : figure 8),
- enfoncement du lit du cours d'eau pouvant aller jusqu'à une déconnexion de la nappe avec la rivière.

Dans le cas où les échanges se font, et où les relations hydrodynamiques existent, on distingue les cas suivants :

- nappe alimentant le cours d'eau (Figure 6) : lorsque les niveaux piézométriques sont situés au-dessus du niveau du cours d'eau,

- cours d'eau alimentant la nappe (Figure 7) : lorsque les niveaux piézométriques sont inférieurs aux niveaux du cours d'eau,

- relations mixtes : lorsque les deux rives du cours d'eau ne se comportent pas de la même façon, l'une drainant la nappe et l'autre alimentant.

Modifications anthropiques caractéristiques sur le Rhône

Dans le [Chapitre 4.1](#), une courte description des aménagements typiques du Rhône est proposée. Elle est nécessaire pour une bonne compréhension du contexte et de l'exemple de caractérisation des échanges nappes/rivières présenté sur le secteur de Donzère-Mondragon par exemple.

Plusieurs facteurs peuvent entraîner des modifications des échanges :

- variation de la position relative du cours d'eau et de la nappe : l'intensité des échanges peut varier selon que le cours d'eau est entièrement inclus dans l'aquifère ou partiellement inclus dans celui-ci, s'il coule sur le substratum par exemple. De plus, un cours d'eau peut être en situation perchée par rapport à la nappe et son infiltration verticale dans la zone non-saturée de l'aquifère alimente la nappe,
- variations spatiales (exemples figure 10 et figure 11) : le sens et l'intensité des échanges peuvent changer le long d'un cours d'eau. Ceci peut se produire lorsque les variations de la perméabilité des alluvions sont suffisamment importantes pour faire varier le niveau de la nappe. Le méandrage et les « goulets d'étranglement » des nappes alluviales induisent aussi des variations du sens des échanges,
- variations temporelles saisonnières : selon les conditions climatiques saisonnières, le sens des échanges peut être modifié. Par exemple, la rivière peut alimenter la nappe en saison humide et la drainer en saison sèche. Il y a donc une inversion saisonnière de l'échange,
- variations temporelles à long terme : modification des échanges possible suite à la mise en place d'ouvrages (captages, barrages). Elles peuvent aussi également se produire en fonction de l'évolution du climat ou des usages de l'eau,
- apports d'aquifères adjacents : l'apport de réservoirs adjacents peut soutenir le niveau d'une nappe alluviale,

- conditions géomorphologiques des cours d'eau : certaines caractéristiques géomorphologiques comme le méandrage peuvent avoir une influence sur les échanges. Par exemple, en sortie de méandre, le cours d'eau a tendance à drainer la nappe alors qu'en entrée, il aurait plutôt tendance à s'y infiltrer,

- modifications anthropiques comme les ouvrages au « fil de l'eau » et contre-canaux : les contre-canaux ont été construits pour drainer l'eau du cours d'eau s'infiltrant à travers les digues et limiter l'élévation du niveau des nappes phréatiques adjacentes. Ils sont de plus alimentés par les eaux du bassin versant. Pour améliorer l'efficacité des contre-canaux, des forages de décompression (drains verticaux) permettent d'évacuer vers la surface les eaux de la nappe sous pression hydrodynamique et de la stabiliser au niveau désiré. Au contraire, s'il y a risque d'abaissement trop important de la nappe, celui-ci peut être corrigé grâce à des puits de réalimentation ou de petits ouvrages de contrôle des niveaux (vannes, pale-planes). A l'échelle d'un aménagement, on observe que la nappe est plus élevée que son niveau naturel à l'amont de la chute et moins élevée en aval ce qui influe sur les sens d'échange nappes/rivières,

- modifications anthropiques du type pompage : ces derniers peuvent provoquer des phénomènes de réalimentation induite s'ils sont implantés à proximité du cours d'eau et créent un gradient hydraulique entre celui-ci et le point de pompage. Si initialement la rivière alimente la nappe ceci peut

provoquer un abaissement de la nappe. Si au contraire la nappe alimente la rivière ceci peut réduire, supprimer ou inverser le flux,

- modifications anthropiques liées à la réalimentation artificielle des aquifères : il s'agit d'injection d'eau dans la nappe qui font varier son niveau.

Typologie des échanges nappes/rivières

Typologie des échanges nappes/rivières

Le code couleur sélectionné correspond à celui qui est utilisé dans les tableaux de comparaison des méthodes (Chapitre 5).

Pour faciliter la lecture des échanges nappes/rivières, une typologie schématique a été établie. Chacun des types est associé à un code couleur et fait l'objet d'une représentation schématique sous forme de diagramme :

- apports de la nappe vers la rivière (Figure 6) en vert,
- apports de la rivière vers la nappe (Figure 7) en rouge,
- pas d'échange nappes/rivières détecté (Figure 8) en bleu,
- colmatage (Figure 9) en orange,
- sous-écoulement (Figure 10) en brun tanné,
- recyclage ou échanges hyporhéiques (Figure 11) en violet.

Pour chaque type d'échange, les arguments hydrauliques, biologiques ou géochimiques sont indiqués.



A gauche - Un piézomètre de digue de la CNR à Péage-de-Roussillon (38). Ce type d'ouvrage permet de surveiller le niveau d'eau dans les digues (© F. Paran)

A droite - Champ captant de Crépieux-Charmy (69) principale alimentation en eau potable pour l'agglomération lyonnaise (© L. Cadilhac)

Apports d'eau de la nappe à la rivière

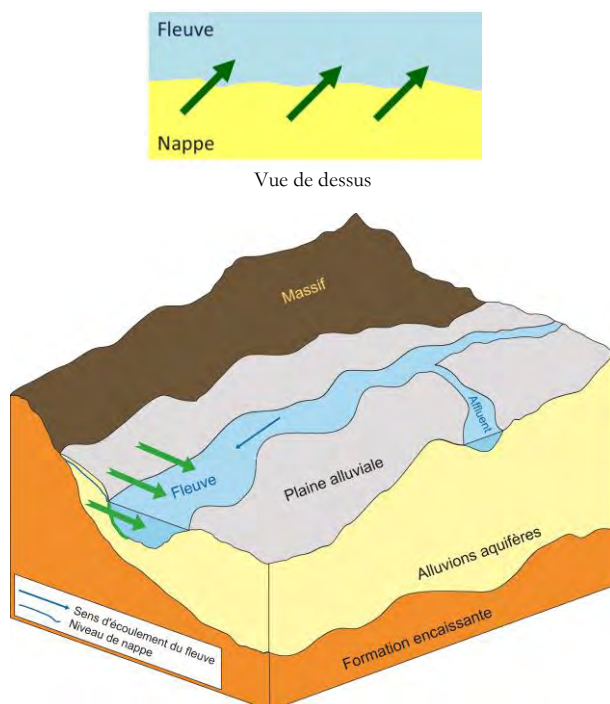


Figure 6 : Apports d'eau de la nappe à la rivière

Cette configuration est détectable par :

- les mesures hydrauliques,
- les prélèvements d'invertébrés souterrains,
- les relevés de végétaux aquatiques,
- les analyses physico-chimiques et isotopiques des eaux de nappe et de rivière.

On peut dire aussi :

- la rivière draine la nappe,
- la nappe alimente la rivière.

Représentation sur les cartes de synthèse :

- linéaire de berge « trait vert plein ».
- sens de l'écoulement « flèches vertes pleines ».

Apports d'eau de la rivière à la nappe

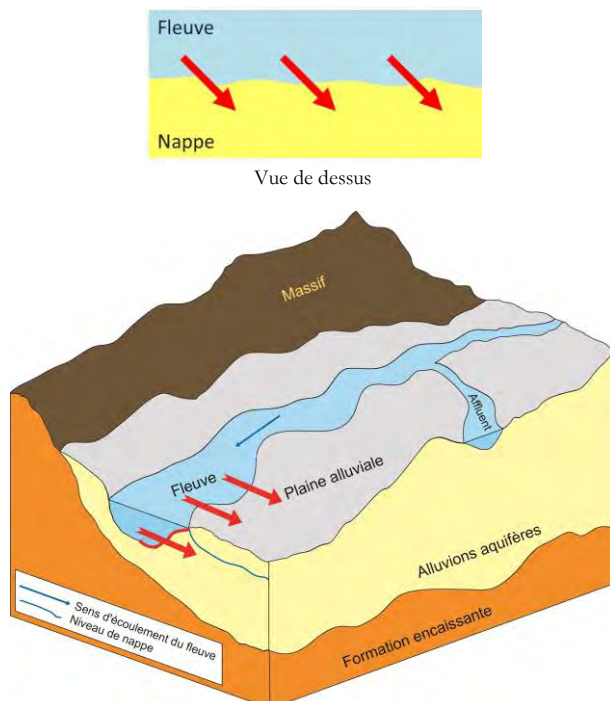


Figure 7 : Apports d'eau de la rivière à la nappe

Cette configuration est détectable par :

- les mesures hydrauliques,
- les prélèvements d'invertébrés souterrains,
- les analyses isotopiques des eaux de nappe et de rivière.

Elle n'est pas détectable avec les végétaux aquatiques.

On peut dire aussi :

- La rivière alimente la nappe.

Représentation sur les cartes de synthèse :

- linéaire de berge « trait rouge plein ».
- sens de l'écoulement « flèches rouges pleines »

Pas d'échange identifié entre la rivière et la nappe

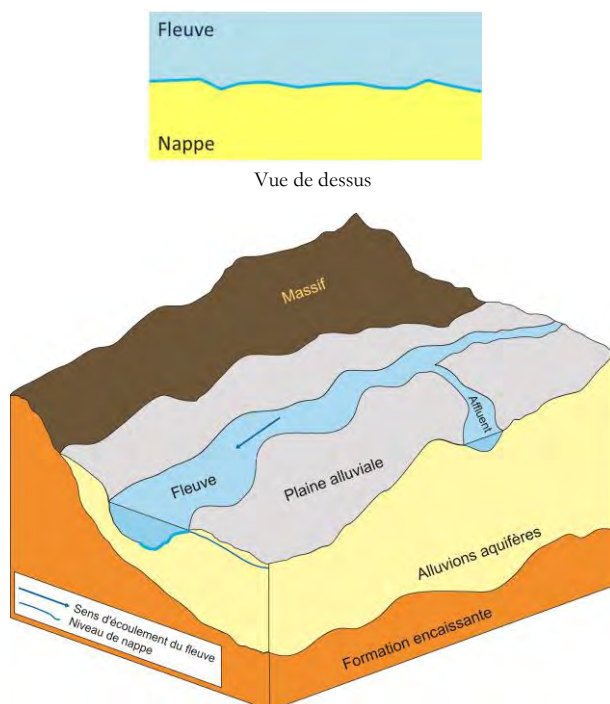


Figure 8 : Pas d'échange identifié entre la rivière et la nappe

Cette configuration est détectable par :

- les mesures hydrauliques,
- les prélèvements d'invertébrés souterrains,
- les relevés de végétaux aquatiques,
- les analyses isotopiques des eaux de nappe et de rivière.

Représentation sur les cartes de synthèse :

- linéaire de berge « trait bleu plein ».

Colmatage entre la nappe et la rivière

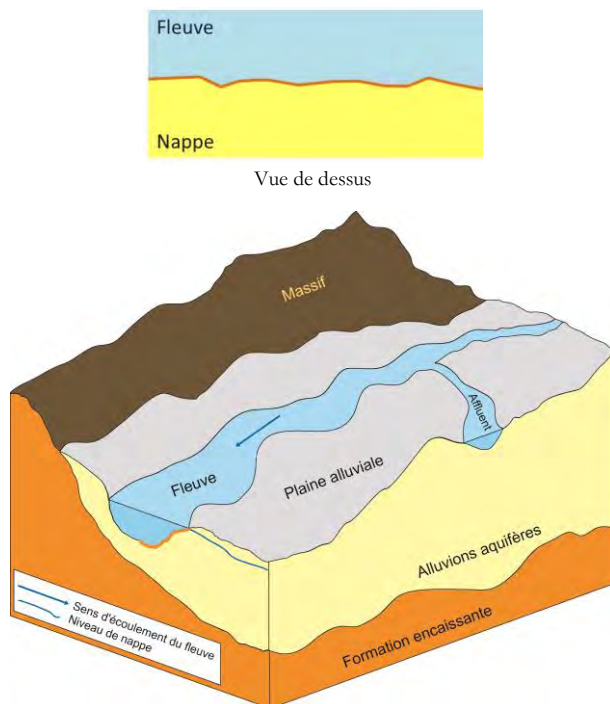


Figure 9 : Colmatage

Cette configuration est détectable par :

- les prélèvements d'invertébrés souterrains,
- les relevés de végétaux aquatiques,
- les analyses isotopiques des eaux de nappe et de rivière.

Exemple : cas où les berges de la rivière sont colmatées. Des pompages d'essai peuvent aussi être mis en œuvre pour diagnostiquer un colmatage.

Représentation sur les cartes de synthèse :

- linéaire de berge « trait orange plein ».

Sous-écoulement

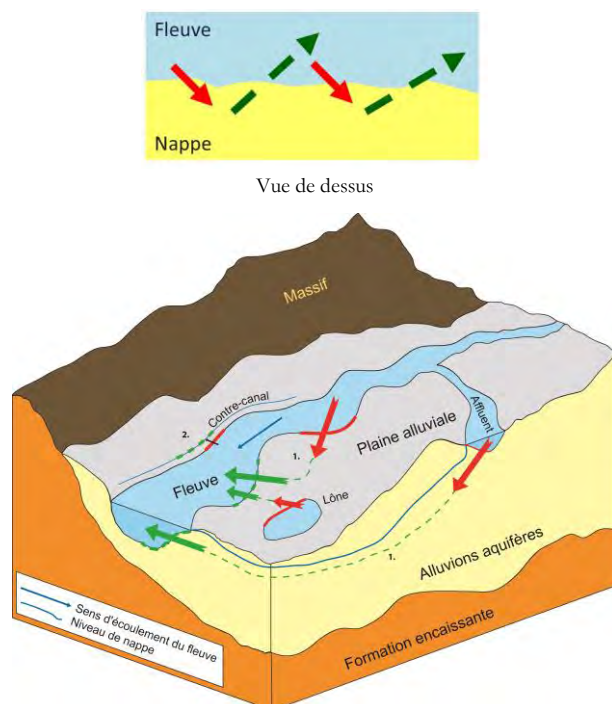


Figure 10 : Sous-écoulement d'eau superficielle

Cette configuration est détectable par :

- les prélèvements d'invertébrés souterrains,
- les relevés de végétaux aquatiques,
- les analyses physico-chimiques des eaux de nappe et de la rivière.

Plus précisément pour cette configuration, il s'agit de reprise du sous-écoulement (underflow) d'eau de surface (rivière) qui s'écoule sur de grandes distances (100 à 1000m) ou latéralement à travers les berges (ex : digues) ou au niveau des lônes.

Représentation sur les cartes de synthèse :

- linéaire de berge « trait vert en pointillé ».
- linéaire de berge « trait rouge en pointillé ».
- sens de l'écoulement « flèches vertes en pointillées ».
- sens de l'écoulement « flèches rouges en pointillées ».

Recyclage ou échanges hyporhéiques

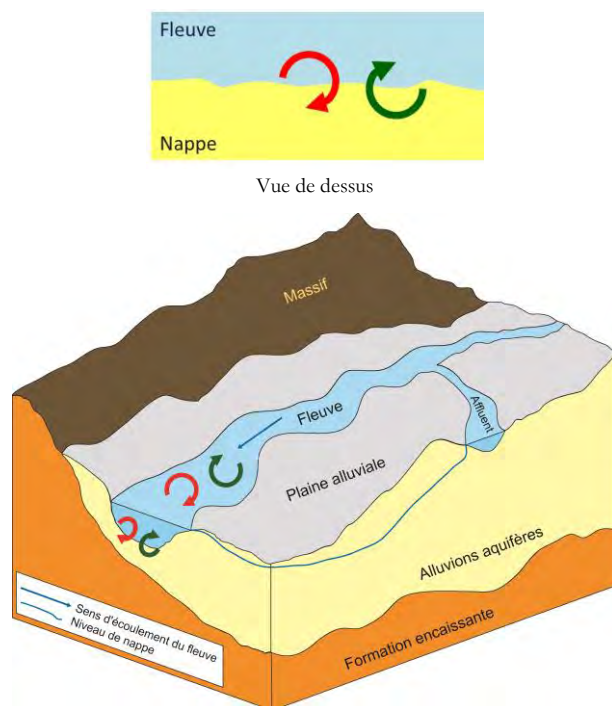


Figure 11 : Recyclage d'eau superficielle ou échanges hyporhéiques

Cette configuration est détectable uniquement par les prélèvements d'invertébrés souterrains.

Plus précisément pour cette configuration, il s'agit de boucles d'infiltration (flèches rouges ci-contre : downwelling) et d'exfiltration (flèches vertes ci-contre : upwelling) d'eau superficielle sur de courtes distances (10 à 100m) dans le lit du cours d'eau (échanges hyporhéiques).

Représentation sur les cartes de synthèse :

- flèche courbée violette pleine.

2.7. ESTIMATION DE LA QUANTITE D'EAU ECHANGEE

Comme nous le verrons par la suite, toutes les méthodes ne permettent pas d'évaluer quantitativement les flux d'eau échangés entre nappes et cours d'eau. Pour celles utilisées dans ce guide, la situation est la suivante :

- invertébrés souterrains : diagnostic du sens de l'échange seulement,
- végétaux aquatiques : diagnostic semi-quantitatif (4 classes d'apport phréatique : nul, faible, moyen, fort),

- analyse géomatique : diagnostic quantitatif fondé sur l'utilisation d'une formule de base de l'hydrodynamique, la loi de Darcy (De Marsily, 1981) qui permet de calculer en fonction des caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité), de données géométriques (bathymétrie) et des niveaux de nappes (cartes piézométriques) des débits d'infiltration à travers des berges perméables.

Loi de Darcy

$$Q = K.A. \frac{dH}{dL}$$

Q : débit en m³/s

A : section d'écoulement (surface d'infiltration ou d'échange) en m²

K : perméabilité en m/s

$\frac{dH}{dL}$: gradient hydraulique [pente (i)] de charge (dH : variation du niveau piézométrique entre 2 puits ; dL : distance entre 2 puits).

Exemple :

Si A = 5m² pour 1m linéaire, K = 3.10⁻²m/s et i = 0,001 alors Q₁ = 0,00015m³/s pour 1m linéaire (soit 0,15l/s pour 1m linéaire). Pour obtenir le débit en m³/jour (Q₂), il suffit de multiplier cette valeur (Q₁) par 86 400 (1 jour = 86 400s).

Q₂ = 12,96m³/jour pour 1m linéaire. Comme nous le verrons par la suite dans le [Chapitre 3.1](#) et dans la [Fiche Pratique n°1](#), il est possible de calculer une [incertitude](#) sur les valeurs de débits d'échange. Il est aussi parfois possible de détecter des données aberrantes et reconstituer des données manquantes. D'autres formules existent pour calculer la quantité d'eau échangée. Par exemple, il est possible d'utiliser la formule de Dupuit, mais elle nécessite plus de données.



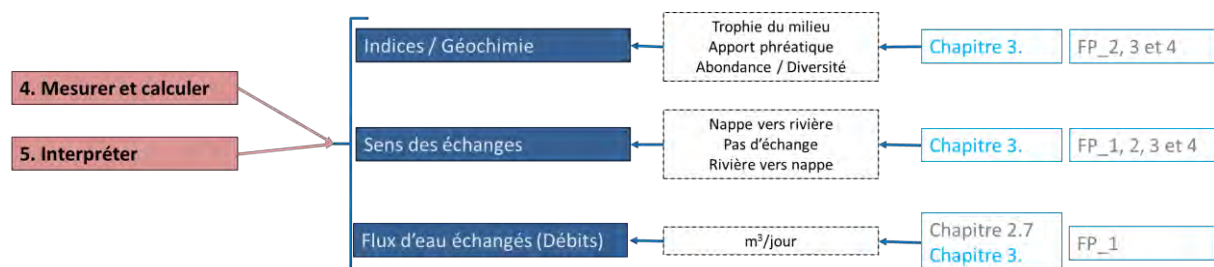
A gauche - Un contre-canal sur le secteur de Brégnier-Cordon (01). La végétation aquatique présente indique-t-elle des apports souterrains ? (© F. Paran)

A droite - Piézomètre de décharge (drain vertical) dans un contre-canal à proximité de Brégnier-Cordon (01) (© F. Paran). Ce type d'ouvrage de décharge permet d'évacuer les eaux de niveaux profonds qui se sont retrouvées sous pression du fait des aménagements de la CNR (La Houille Blanche - Collectif, 1955 ; Coulet et al., 1997).



Roseaux des marais (*Phragmites australis*) dans la pénombre. Cette plante aquatique n'est pas indicatrice d'apports souterrains. Elle révèle des milieux eutrophes à hyper-eutrophes (© M. Mendo)

Chapitre 3. Principes de caractérisation des échanges nappes/rivières à l'aide des différentes méthodes : mesurer, calculer, relever, interpréter



Repère 4 : Mesurer, calculer et interpréter les échanges nappes/rivières

Cette partie propose les informations nécessaires (protocoles) pour caractériser les échanges nappes/rivières sur un linéaire de cours d'eau à l'aide des méthodes décrites dans ce guide. Cette étape du travail doit, bien sûr, être effectuée après avoir sélectionné les méthodes utiles, recherché les données utiles, choisi les méthodes en fonction de leurs avantages et de leurs contraintes (Chapitre 4).

Cette partie répond aux questions suivantes :

Quels sont les protocoles à suivre avec chacune des méthodes pour diagnostiquer les échanges nappes/rivière ?

Comment calculer et interpréter les échanges nappes/rivières à partir des informations et données recueillies avec chacune des méthodes suite à l'application du protocole ?

Dans cette partie les grandes étapes du protocole lié à l'utilisation de chacune des méthodes sont donc décrites de manière succincte pour mesurer, calculer et interpréter les interactions nappes/rivières (Repère 4) :

- mesures de niveaux d'eau (nappe et rivière), calcul de gradient hydraulique et de débit d'échange avec la méthode géomatique,
- échantillonnage et analyse d'eau (souterraine et superficielle) pour déterminer leur signature physico-chimique et isotopique,
- échantillonnage de faune souterraine et calcul de l'indice d'échange nappes/rivières,
- relevés floristiques et calcul de la probabilité d'apport phréatique.

Des informations plus précises concernant ces protocoles et les coûts liés sont disponibles en annexes (Fiches Pratiques 1, 2, 3 et 4). Une fois les données recueillies, il convient d'effectuer une série de calculs et de traitements pour, au final, donner une interprétation des échanges nappes/rivières pour chacune des méthodes. Des exemples de travaux, réalisés sur le Rhône, sont présentés dans la Fiche Pratique n°6. Dans cette fiche, le cas du secteur de Donzère-Mondragon est plus particulièrement détaillé.

Fiches pratiques : Protocoles, calculs et coût

Les Fiches Pratiques n°1 (Analyse géomatique), n°2 (Géochimie), n°3 (Végétaux aquatiques) et n°4 (Invertébrés souterrains) contiennent les informations nécessaires pour une utilisation adéquate de chaque méthode (protocole, matériel, check list de terrain...).

La Fiche Pratique n°5 propose une évaluation des coûts liés à la mise en œuvre de chacun des protocoles.

Le chapitre suivant (Chapitre 4) reviendra sur le principe de cheminement dans le guide et déclinera étape par étape le travail à faire pour sélectionner au mieux les méthodes utiles en fonction des objectifs et du contexte d'étude.

3.1. ANALYSE GEOMATIQUE HYDRODYNAMIQUE : PROTOCOLE, CALCUL ET INTERPRETATION DES ECHANGES (VOIR FICHE PRATIQUE N°1 POUR PLUS DE DETAILS)

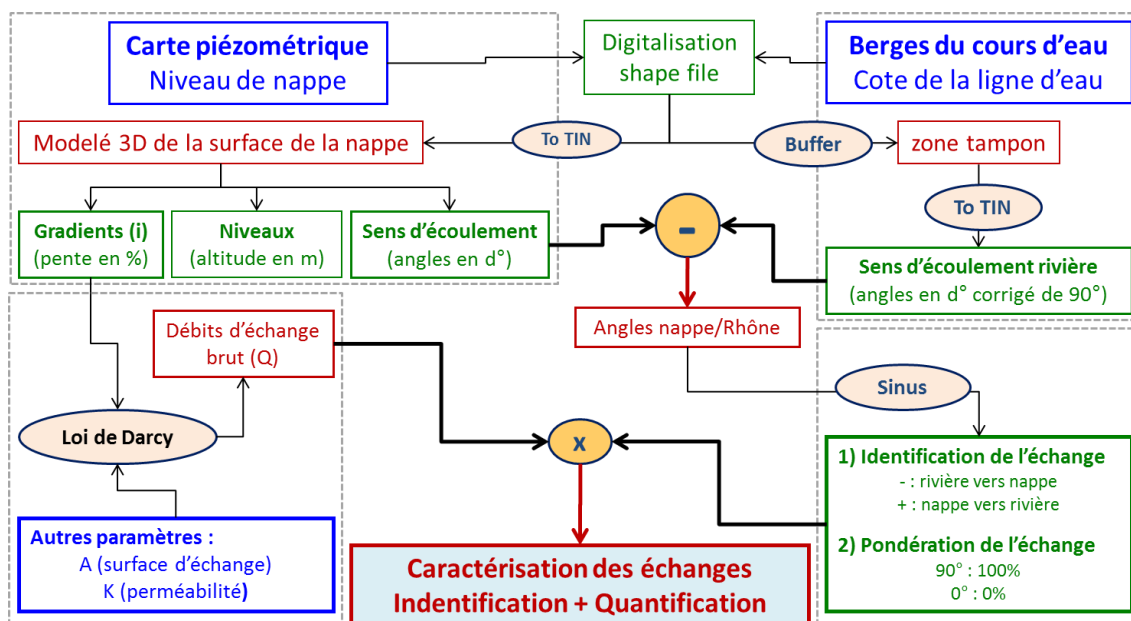


Figure 12 : Présentation synthétique de l'analyse géomatique

Des informations plus détaillées concernant la méthode géomatique sont proposées dans la Fiche Pratique n°1 en fin de guide. La figure 12 présente la méthode géomatique de manière synthétique.

Protocole

Les principales étapes à suivre pour mener à bien l'analyse géomatique des échanges nappes/rivières sont les suivantes :

- recherche des données existantes, prises de contact et sollicitation des détenteurs d'information (niveaux de nappe, cartes piézométriques, niveaux d'eau de la rivière, niveau du fond de la rivière, perméabilité des alluvions, linéaire de berge...),

- repérage des puits et piézomètres et contact auprès des propriétaires ou des gestionnaires (Syndicats, Communes...),
- mesures des niveaux de nappes et nivellement/géolocalisation des puits avec un GPS à précision centimétrique (à défaut décimétrique),
- mesures des niveaux d'eau des cours d'eau (mesure de ligne d'eau à l'aide d'un GPS à précision centimétrique, à défaut décimétrique)
- digitalisation ou construction des cartes piézométriques par interpolation,
- digitalisation des linéaires de berge.

Calcul et interprétation des échanges

L'enchaînement des tâches à effectuer pour l'analyse géomatique est le suivant :

- calcul de l'angle d'écoulement du cours d'eau (TIN),
- calcul de l'angle d'écoulement de la nappe (TIN),
- calcul de l'angle d'échange entre la nappe et le cours d'eau,
- calcul du gradient hydraulique (TIN),
- calcul du débit d'eau échangé et de l'incertitude sur le linéaire de berge concernée à partir de la loi de Darcy en intégrant les valeurs de perméabilité, de surface de la section d'échange,
- pondération du débit calculé en multipliant la valeur obtenue par les sinus de l'angle d'échange entre la nappe et la rivière,
- représentation cartographique des échanges (code couleur, convention de signe, agrégation des résultats),
- transfert des résultats dans le tableau de croisement des méthodes avec les incertitudes (Chapitre 5).

Calcul de l'incertitude liée à la quantification du débit d'échange

La quantification du flux d'eau échangé entre la nappe et le cours est une estimation réalisée avec la **Loi de Darcy**. Il est donc important de connaître l'incertitude pesant sur une telle valeur de débit.

Une façon simple de faire est de calculer une **erreur relative** à partir de chacune des variables de cette loi. La formule pour calculer l'incertitude (en%) est donnée dans la **Fiche Pratique n°1**.

On constate que l'erreur est essentiellement liée à l'incertitude sur les valeurs de perméabilité des alluvions au niveau des berges. Ainsi, de manière simple et générique, on peut estimer l'erreur relative à environ 5000%. En d'autres termes, **le débit calculer varie d'un facteur 50**.

Exemple : Pour la valeur de débit calculée à titre d'exemple dans l'encart sur la Loi de Darcy ($Q=12,96\text{m}^3/\text{jour}$) la fourchette d'incertitude est la suivante :

$Q = 12,96\text{m}^3/\text{jour} [0,26 ; 648]$

Comme le montre cet encart l'estimation des débits à partir de la méthode géomatique est entachée de fortes incertitudes. Pour une estimation plus précise des débits échangés, il conviendra de les comparer à ceux obtenus par modélisation mathématique.

3.2. GEOCHIMIE : PROTOCOLE, CALCUL ET INTERPRETATION DES ECHANGES (VOIR FICHE PRATIQUE N°2 POUR PLUS DE DETAILS)

Des informations plus détaillées concernant la méthode géochimique sont proposées dans la Fiche Pratique n°2 en fin de guide.

ACP :

Analyse en Composante Principale

L'analyse en composantes principales, ou **ACP** est une méthode permettant de discriminer les éléments entre eux sur la base de leur proximité statistique. Autrement dit, l'ACP permet de déterminer le taux de similitude entre différentes variables. Elle est fréquemment utilisée afin d'extraire de l'information à partir de séries de données. Elle permet de réduire le nombre de variables, tout en minimisant la perte d'information.

L'ACP est d'utilisation courante dans de nombreux domaines (Lalot, 2014). Cette technique peut être utilisée pour :

- montrer les similitudes de comportement entre différents paramètres,
- réduire le nombre de paramètres à étudier lors d'analyses chimiques.

Protocole

La stratégie d'échantillonnage à suivre pour la méthode géochimique est la suivante :

- repérage des puits et piézomètres et des accès aux cours d'eau ou aux plans d'eau,
- choix de la période de prélèvement (conditions hydrologiques),
- prélèvements d'eau et analyses.

Si dans la plupart des cas, le prélèvement peut être effectué au bord du cours d'eau, dans certains secteurs plus délicats, il peut être effectué à partir d'un pont à l'aide d'une corde ou d'un filin assez long.

Calcul et interprétation des échanges

Physico-chimie des eaux superficielles (méthode végétaux aquatiques)

Les paramètres physico-chimiques sont étudiés via une analyse en composantes principales normée (ACP) :

Conductivité : les fortes valeurs de conductivité sont fréquemment associées à une alimentation phréatique alcaline.

Température : la température de l'eau phréatique est attendue comme stable et proche de 13°C. En période printanière et estivale (moment des échantillonnages végétation et physico-chimie des eaux superficielles), de faibles températures sont associées à une alimentation en eau souterraine.

Nitrates : lorsque les aquifères sont fréquemment contaminés par les nitrates, les sites présentant de fortes valeurs pourraient être alimentés par des apports souterraines.

pH : le pH est la variable la moins explicative des échanges nappes/rivières, mais elle permet de détecter des pics de productivité primaire pouvant influencer les autres paramètres.

Physico-chimie des eaux interstitielles (méthode invertébrés souterrains)

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

- certains ne servent qu'à évaluer la qualité locale de l'habitat des organismes. Il s'agit par exemple des teneurs en oxygène dissous, en matière organique ou du pH. En effet, une eau localement désoxygénée ne permet pas l'installation des organismes les plus exigeants (Malard et Hervant, 1999). De même, un pH trop acide est extrêmement défavorable aux crustacés qui doivent à chaque mue renouveler leur carapace

riche en carbonate de calcium. Ces caractéristiques ne renseignent que sur les conditions régnant localement et les limites à l'implantation d'une faune abondante et diversifiée (Claret et al., 1999), mais ne nous informent en rien sur l'origine des eaux interstitielles, leur lien avec des aquifères profonds par exemple,

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

Isotopes

Pour quantifier les échanges nappes/rivières de manière simple, il est possible de réaliser un simple bilan de masse. Si l'on connaît, par exemple, le δD de l'eau de la rivière en amont des échanges supposés (δDr), le δD de l'eau à l'endroit où le mélange nappes/rivières est supposé (δDm), et la composition isotopique de l'eau de la nappe (δDn), il est possible de calculer la fraction d'eau de la rivière (f) dans le mélange.

La formule de calcul est détaillée dans la Fiche Pratique n°2 concernant les méthodes géochimiques en fin de guide.

3.3. VEGETATION AQUATIQUE : PROTOCOLE, CALCUL ET INTERPRETATION DES ECHANGES (VOIR FICHE PRATIQUE N°3 POUR PLUS DE DETAILS)

Des informations plus détaillées concernant la méthode fondée sur la végétation aquatique sont proposées dans la Fiche Pratique n°3 en fin de guide. La figure 13 présente de manière synthétique, la méthode fondée sur la végétation aquatique.

Protocole

Le protocole à suivre pour la méthode « végétaux aquatiques » couplée à la chimie des eaux superficielles est le suivant :

- vérification du contexte climatique,
- repérage des zones en eaux (lônes, contre-canaux, cours d'eau, gravières...),
- relevés floristiques dans les zones en eau,

- mesures de conductivité et de température de l'eau in situ,

- prélèvements d'eau et analyses d'éléments dissous au laboratoire.

Abondance relative : recouvrement du transect (%)	Mode de répartition des espèces
1 : < 5%	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 2 : Les indices de la méthode Braun-Blanquet (1932)

La méthode utilisée pour les relevés floristiques correspond à des transects de 2 mètres, perpendiculairement à l'axe d'écoulement, suivant la taille du milieu échantillonné (ex : bras mort de plusieurs centaines de mètres de longueur), plusieurs prélèvements peuvent être réalisés, à des intervalles réguliers (espacés de 25m ou 50m selon la longueur de l'annexe fluviale et la pression d'échantillonnage possible).

Les différentes espèces végétales sont identifiées sur le terrain ou prélevées et déterminées en laboratoire grâce à des flores (Fiche Pratique n°3, tableau 15), leurs abondances étant estimées sur le site grâce au double indice d'abondance de Braun-Blanquet (Tableau 2). Ces indices permettent d'avoir l'abondance relative de chaque espèce sur le transect ainsi que leur mode de répartition.

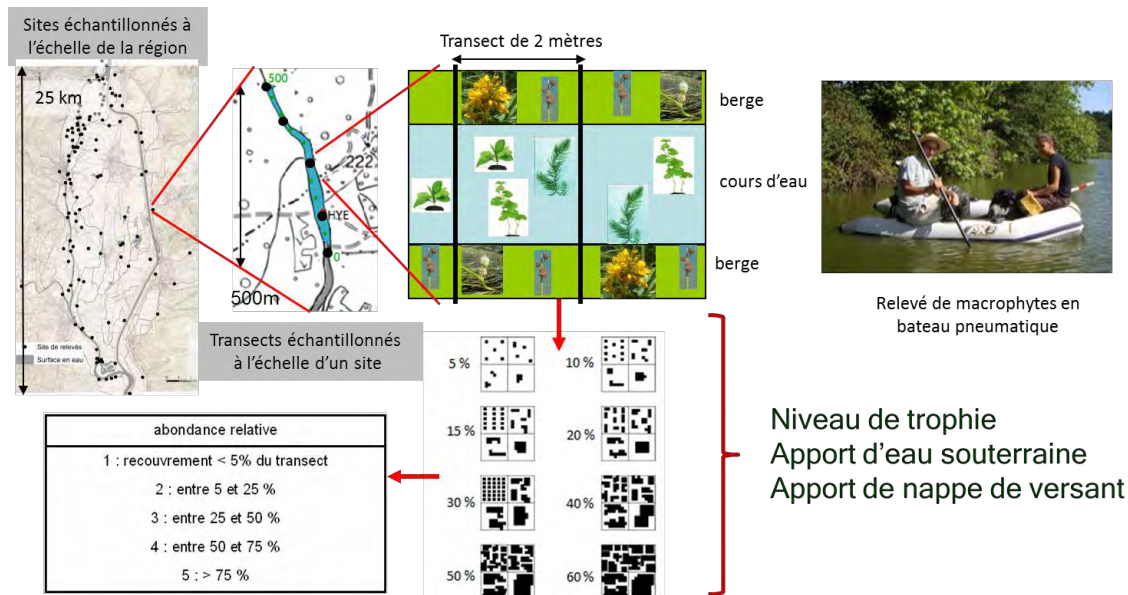


Figure 13 : Présentation synthétique de la méthode fondée sur la végétation aquatique

Calcul et interprétation des échanges

Cette méthode nécessite de calculer plusieurs indices : indices d'état trophique, indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques et indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant.

Méthode de calcul et interprétation des indices d'état trophique

L'état trophique d'un site est obtenu grâce à la multiplication de l'abondance relative de chaque espèce estimée sur le terrain par son code indicateur pour chaque classe de trophie : Oligo-, Méso-, Eu- et Hyper-eutrophe notés respectivement O, M, E et HE (Tableau 15, Fiche Pratique n°3). La somme de ces produits est ensuite additionnée puis exprimée en pourcentage. L'état trophique présentant le pourcentage le plus élevé est considéré comme le plus représentatif pour le relevé. Lorsque ce pourcentage est identique ou très proche pour deux classes de trophie, les deux résultats sont gardés. Par contre, si celui-ci est identique pour trois classes différentes, alors le résultat est considéré comme non significatif et n'est pas pris en compte.

Méthode de calcul et interprétation de l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques

L'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques est obtenu en sommant les valeurs d'affinité des espèces pour les milieux thermiquement stables, ce qui traduit une affinité pour les sites alimentés en eaux souterraines.

L'intensité des apports phréatiques peut ensuite être définie selon quatre classes :

- nulle, si la somme des oui moins la somme des non est négative ou égale à zéro,
- faible, si la somme des oui moins la somme des non est comprise entre zéro et quatre,
- moyenne, si la somme des oui moins la somme des non est comprise entre cinq et neuf,
- forte si la somme des oui moins la somme des non est strictement supérieure à neuf.

Indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant

Afin de mettre en rapport les informations sur le niveau d'eutrophisation et l'intensité des apports

phréatiques, un indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant est utilisé.

Les valeurs des deux indices sont alors multipliées pour chaque site. Suivant le résultat de cette

multiplication, la probabilité d'apport issu de la nappe de versant est établie :

- nulle, lorsque le résultat est 0 ou 1,
- faible, lorsque le résultat est 2,
- moyenne, lorsque le résultat est 3,
- forte, lorsque le résultat est 4, 6 ou 9.

3.4. INVERTEBRES SOUTERRAINS : PROTOCOLE, CALCUL ET INTERPRETATION DES ECHANGES POUR LES (VOIR FICHE PRATIQUE N°4 POUR PLUS DE DETAILS)

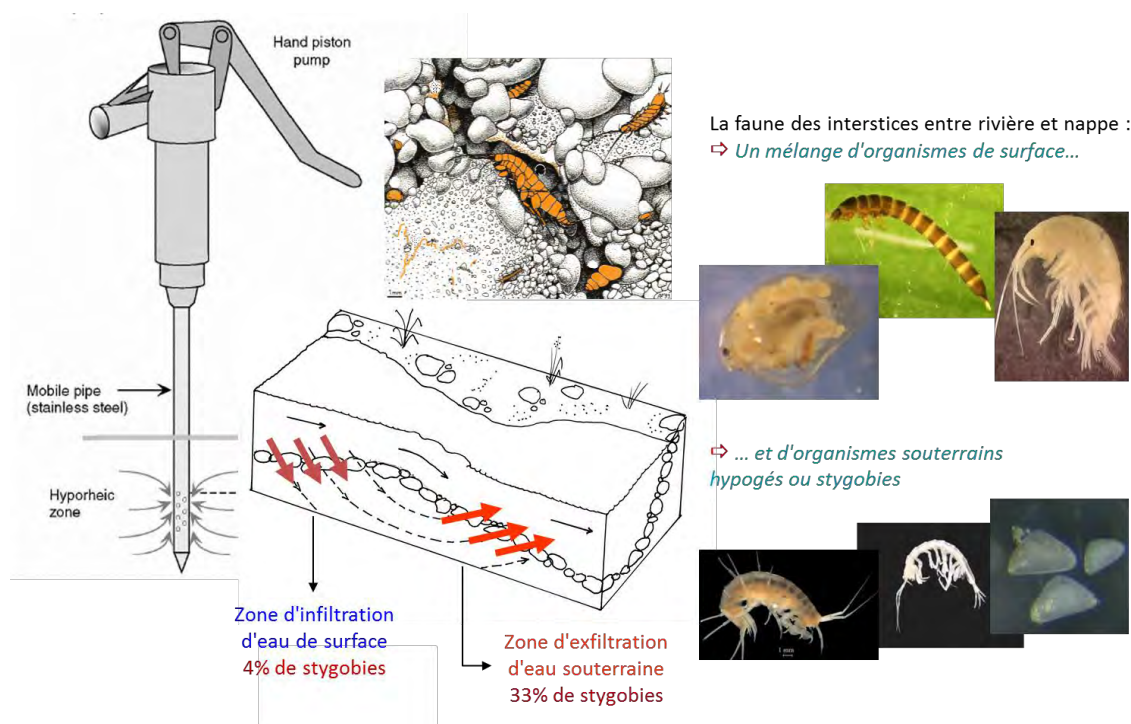


Figure 14 : Présentation synthétique de la méthode fondée sur les invertébrés souterrains (© J. Gibert et P. Marmonier)

Des informations plus détaillées concernant la méthode fondée sur la végétation aquatique sont proposées dans la Fiche Pratique n°4 en fin de guide. La figure 14 présente de manière synthétique la méthode fondée sur les invertébrés souterrains.

Protocole

Les étapes à suivre pour la méthode « invertébrés souterrains » couplée à la chimie interstitielle des eaux sont les suivantes :

- vérification du contexte climatique,
- repérage des puits et piézomètres et des accès aux cours d'eau ou aux plans d'eau,
- échantillonnage des invertébrés,
- mesures de conductivité et de température de l'eau interstitielle in situ,
- prélèvement d'eau interstitielle et analyse d'éléments dissous en laboratoire.

L'utilisation des invertébrés interstitiels pour la localisation des zones d'échanges entre eau de surface et eau souterraine nécessite un échantillonnage rigoureux. Il doit être, si possible, extensif des communautés souterraines pour être représentatif : le milieu interstitiel où ces échanges sont étudiés (aussi bien sous le cours d'eau que sous les zones humides riveraines), mais aussi dans les puits situés dans la plaine alluviale et les sources de bordure de la vallée. Il s'agit d'estimer la diversité régionale de la faune souterraine dans le secteur considéré et sur l'ensemble des aquifères latéraux (rives droite et gauche).

Quels que soient la méthode et l'habitat échantillonné (milieu interstitiel ou hyporhéique (Bou et Rouch, 1967), puits, sources), les échantillons de faune interstitielle sont complétés par une physico-chimie simple des eaux au point de prélèvement, en surface et à 50cm de profondeur :

température (°C), conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), teneurs en oxygène dissous (mg/l) et en certains ions (classiquement calcium, nitrates, sulfates et chlorures). De même il est indispensable de connaître les caractéristiques physico-chimiques des eaux des aquifères latéraux en analysant l'eau de sources ou de puits situés sur ces aquifères.

Calcul et interprétation des échanges

Le calcul de l'indice d'échange rivières/nappes est basé sur l'abondance des organismes stygobies en intégrant les traits écologiques des espèces. En effet, les organismes souterrains peuvent être répartis en quatre classes écologiques (Marmonier 1988, Dole-Olivier et al. 1993) :

- Classe 1 : organismes vivant à faible profondeur dans les sédiments et présents dans une grande diversité d'habitats souterrains. Ils sont considérés comme ubiquistes et leur abondance est notée N1,
- Classe 2 : organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéiques du fleuve à faible profondeur dont l'abondance est notée N2,
- Classe 3 : organismes stygobies ubiquistes présents à toutes les profondeurs dans le fleuve, la nappe riveraine et les karsts dont l'abondance est notée N3,
- Classe 4 : organismes phréatobies présents uniquement en profondeur dans la nappe ou espèces strictement karstiques, dont l'abondance est notée N4.

Le calcul de l'indice intègre une pondération des abondances des stygobies par rapport à leurs classes écologiques. L'indice d'échange (Ie) se calcule donc de la façon suivante :

$$Ie = N1 + 2.N2 + 5.N3 + 10.N4$$

L'interprétation de l'indice doit être faite en tenant compte de l'écologie des espèces présentes et de sa cohérence avec les caractéristiques physico-chimiques de l'eau interstitielle au point de prélèvement (en surface et à 50cm de profondeur) :

- lorsque cet indice possède une valeur forte, les eaux interstitielles doivent être chargées en éléments minéraux, traduisant des apports d'eau ayant circulé sur de longues distances dans les sédiments : (1) apports d'eau de la nappe ou (2) apports de karsts latéraux,
- lorsque cet indice possède une valeur intermédiaire, il peut correspondre : (1) soit à des apports faibles d'eau souterraine profonde ; (2) soit à du recyclage de l'eau de surface sur de faibles distances,
- lorsque cet indice est faible ou égal à 0, l'abondance totale de l'assemblage interstitiel et la physico-chimie de l'eau doivent être pris en considération. Il peut correspondre : (1) soit à un secteur où l'eau de surface s'infiltre dans les sédiments ; (2) soit à un secteur aux sédiments colmatés.

3.5. QUELQUES MOTS POUR CONCLURE

La mise en œuvre des protocoles de mesure, relevé ou d'échantillonnage, puis la réalisation des calculs pour chacune de méthodes conduit à l'interprétation des échanges nappes/rivières.

A ce stade, on obtient donc un diagnostic des échanges nappes/rivières par méthode sélectionnée. Il est, à ce niveau et sans technique complémentaire, difficile de conclure de manière générale et synthétique sur les échanges nappes/rivières tant l'information peut-être dense et riche pour chacun des outils mobilisés. De plus, si les diagnostics sont réalisés par des personnes différentes ou sous-traités par des organismes distincts, les résultats risquent fort d'être présentés selon des logiques et des référentiels différents.

Il est donc impératif de disposer à l'avance :

- d'un document synthétisant le potentiel et les limites de chacune des méthodes,
- d'une méthode permettant de croiser les résultats des méthodes pour aboutir à un diagnostic

fonctionnel synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur étudié.

Ces deux aspects sont présentés dans les deux chapitres qui suivent (Chapitre 4 et Chapitre 5).



Barrage à Donzère (26). Le débit qui s'écoule à l'aval fixe la côte de la ligne d'eau dans le vieux Rhône, laquelle influence à son tour le niveau de la nappe alluviale (© F. Paran)

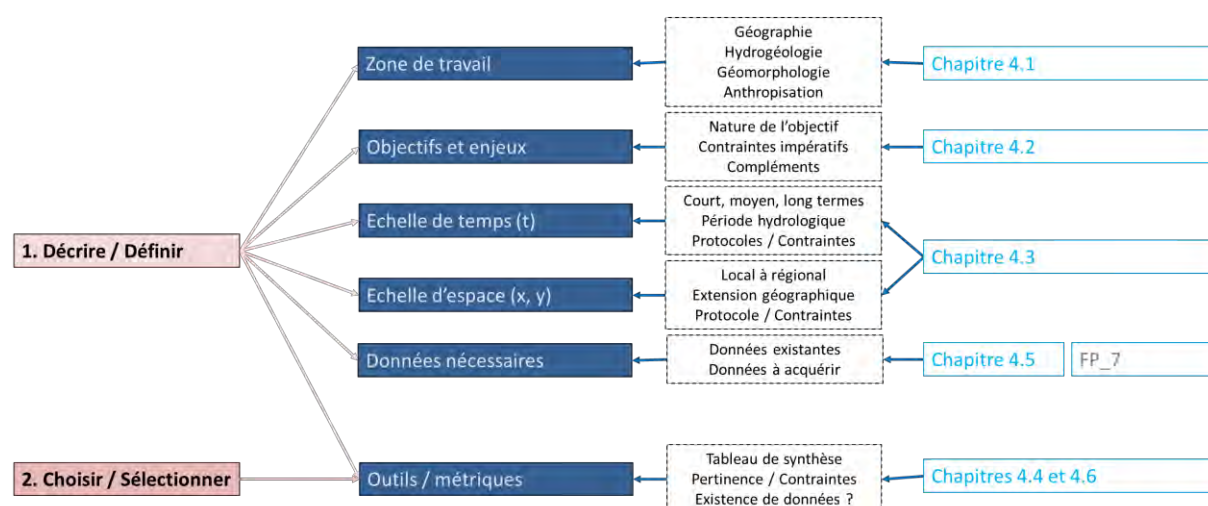


Un canal drainant la nappe alluviale dans le marais de Chautagne (73) (© L. Cadilhac)



Aigrette garzette (*Egretta garzetta*) : un oiseau des zones humides dont l'existence et la pérennité dépendent souvent de l'apport d'eaux souterraines (© R. Domergue)

Chapitre 4. Avancer dans l'évaluation des échanges nappes/rivières : définition des objectifs et choix des méthodes



Repère 5 : Bien choisir et bien utiliser les méthodes

Comment sélectionner les outils (ou méthodes) en connaissance de cause pour qu'ils soient adaptés aux objectifs et au terrain d'étude ?

Avant de répondre à cette question et d'entamer la lecture de ce chapitre, il est nécessaire de bien maîtriser les chapitres précédents : le choix ou la sélection des méthodes étant plus simple quand on les connaît. Ce chapitre propose une démarche fondée sur des tableaux d'aide à la décision pour choisir les méthodes en connaissance de cause et en fonction (Repère 5) :

- des caractéristiques géographique, hydrologique, géomorphologique et anthropique de la zone de travail,
- des objectifs à atteindre et des enjeux,
- des échelles d'espaces et de temps adaptées aux objectifs et enjeux,
- des données existantes et de celles à acquérir (voir aussi Fiche Pratique n°7),
- du potentiel et des contraintes de chacune des méthodes.

Dans chacun de ces tableaux la dernière colonne « Check O/N » permet de statuer sur les caractéristiques de la zone de travail, ainsi que sur la nature des objectifs à atteindre et des échelles de temps et d'espace. Dans cette partie, les tableaux sont complétés, à titre d'exemple, en regard avec les travaux que nous avons effectué sur le secteur de Donzère-Mondragon. Des tableaux vierges sont disponibles dans la Fiche Pratique n°9.

4.1. DECRIRE ET DEFINIR LA ZONE DE TRAVAIL

Les travaux ayant conduit à la rédaction de ce guide ont essentiellement été conduits sur le fleuve Rhône. A titre d'exemple, la figure 15 et l'encart qui

suit, présentent la configuration typique, liée aux aménagements CNR, dont nous avons dû tenir compte.

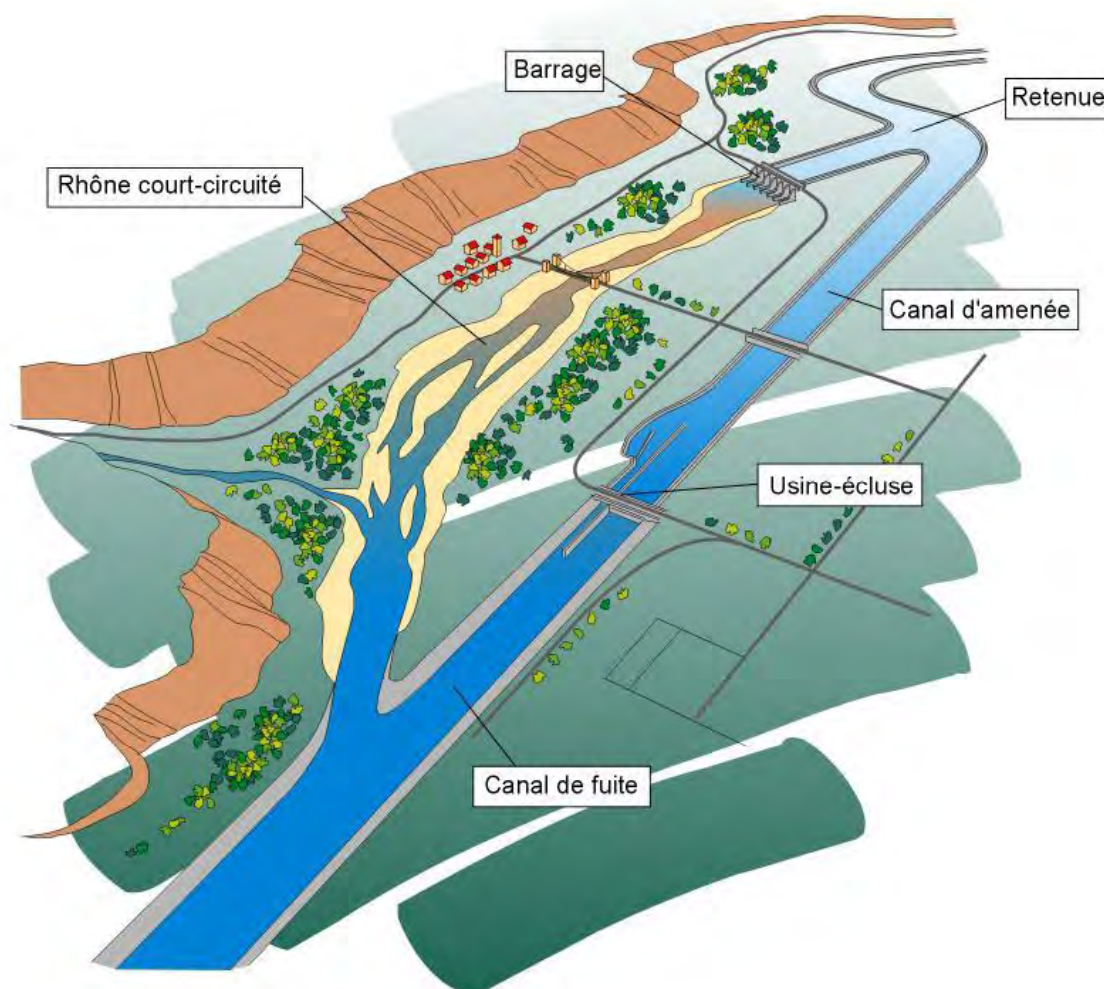


Figure 15 : Aménagement type du Rhône (© Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse)

Description d'un aménagement CNR au fil de l'eau type

Les principaux éléments d'un aménagement CNR type sont les suivants (Figure ci-dessus) :

- **retenue** : secteur à l'amont des barrages sur le Rhône et formant un plan d'eau,
- **Vieux-Rhône** : ancien lit du Rhône court-circuité par un barrage,
- **barrage** : ouvrage court-circuitant le Rhône,
- **canal de dérivation** : chenal endigué permettant le contrôle des flux d'eau passant dans les turbines de l'usine-écluse. On distingue le canal d'amené à l'amont de l'usine-écluse et le canal de fuite à l'aval,
- **usine-écluse** : ouvrage permettant la production d'hydro-électricité et le passage des péniches,
- **Rhône-vif** : secteur aval de la restitution (confluence du Vieux-Rhône et du canal de dérivation),
- **contre-canaux** : drainent les eaux d'infiltration du canal de dérivation.

On peut rencontrer d'autres ouvrages sur les aménagements CNR :

- **siphons** : siphons sous le canal de dérivation pour assurer le passage de l'eau drainée de la rive gauche à la rive droite, par exemple,
- **puits d'infiltration** : permettent l'infiltration d'eau des contre-canaux pour soutenir le niveau de la nappe au niveau du canal de fuite,
- **drains verticaux (ouvrages de décharge)** : soulagent les digues de la pression de l'eau d'infiltration.

Description Zone de travail		Eléments importants	Intérêt	Facteurs limitant l'application des méthodes	Check O/N
<i>Position</i> <i>Contexte géographique</i>		Position par rapport aux dernières glaciations	Biogéographie des invertébrés souterrains	Limite nord d'applicabilité de la méthode « invertébrés souterrains » (Belley pour le Rhône)	N
		Position p/r à la zone méditerranéenne	Biogéographie des végétaux aquatiques	Limite sud de l'applicabilité sous-réserve de la méthode « végétaux aquatiques » (Orange pour le Rhône)	N
<i>Nappe alluviale</i> <i>Contexte hydrogéologique</i>		Libre	Condition optimale	-	O
		Semi-captive	Comportement différent en période de hautes-eaux	Applicabilité sous réserve de l'analyse géomatique	O
		Captive	Comportement spécifique de la nappe	Analyse géomatique non applicable – loi de Darcy inapplicable	N
		Monocouche	Condition optimale pour la caractérisation des échanges	Attention aux hétérogénéités (lentilles d'argile)	O
<i>Cours d'eau et plaine</i> <i>Contexte géomorphologique</i>		Confluence	Dépôt de sédiments fins (1) Apports possibles de la nappe accompagnant l'affluent du cours d'eau principal	Raréfaction des communautés souterraines (1) Extension limitée de la zone alluviale	O
		Méandre	Inversion des échanges selon la position dans le méandre	-	O
		Bancs de graviers	Diagnostic du recyclage possible par les invertébrés	-	O
		Mouille	Dépôt de sédiments fins	Raréfaction des communautés souterraines	O
		Paléochenal	Chenal d'écoulement préférentiel pour la nappe Hot spot d'invertébrés souterrains et de végétaux aquatiques	Fréquence d'érosion par les crues trop élevée (végétaux aquatiques et invertébrés) Altération chimique trop importante (eutrophisation, phytosanitaire)	O
		Connexion zone humide/chenal	Erosion ou alluvionnement	Raréfaction des communautés souterraines Raréfaction ou changement des communautés végétales	O
		Caractère temporaire ou pérenne de la zone humide	Fréquence et variation des échanges	Raréfaction ou changement des communautés végétales	O
<i>Contexte anthropique</i>	<i>Canal de dérivation</i>	Nature du fond	Etat colmaté ou non	Absence de sous-écoulement si colmaté	O
		Altitude du fond par rapport à la nappe	Ecoulement de nappe sous le canal	-	O
	<i>Contre-canal</i>	Débit	Degré de colmatage du canal d'amenée	-	O
		Origine de l'eau	Drainage d'eau d'origines différentes	-	O
		Entretien	Curage du contre-canal	Raréfaction des communautés végétales	N
	<i>Obstacles</i>	Barrage / seuil	Relèvement de la ligne d'eau à l'amont, abaissement à l'aval Echanges avec les contre-canaux	Echanges nappes/rivières déportés à l'aval de l'endroit étudié	O
	<i>Gravières</i>	En exploitation	Abaissement de la ligne d'eau de nappe	Essentiellement végétaux aquatiques pionniers ou absence Pas d'invertébrés souterrains	O
		Post-exploitation	Réhabilitation en plan d'eau	-	O

Tableau 3 : Définir/décrire la zone de travail – Check list appliquée au secteur de Donzère-Mondragon

Définir la zone de travail

Ce tableau liste les éléments importants à connaître pour bien décrire le site de travail afin de bien choisir en connaissance de cause chacune des méthodes. Les champs qui composent ce tableau sont les suivants :

- **description de la zone de travail** : découpage de la zone d'étude en 4 grands contextes à prendre en compte,
- **critères** : éléments de contexte qu'il est important de prendre en compte
- **intérêt** : décrit la raison pour laquelle la prise en compte d'un critère est importante,
- **facteurs limitant l'application des méthodes** : explicite les problèmes rencontrés pour l'application des méthodes par rapport à l'existence des critères sur les sites à étudier,
- **check (O/N)** : colonne permettant d'indiquer la présence (O) ou l'absence (N) d'un critère sur le site d'étude. Dans ce tableau, la colonne est remplie selon la configuration du site de Donzère-Mondragon.

La zone de travail et ses caractéristiques doivent être appréhendées du point de vue du contexte géographique, hydrogéologique, géomorphologique et anthropique.

Le tableau 3 propose une check list permettant de vérifier que toutes les informations nécessaires pour décrire le contexte correspondant au site d'étude ont bien été recueillies (réponses par oui ou non – O/N).

Dans ce tableau, l'intérêt de chacun des éléments de description est précisé. De plus, les limites des méthodes qu'il est possible d'utiliser sont indiquées selon les caractéristiques du site d'étude.

Par exemple la méthode « végétaux aquatiques » atteint ses limites en zone méditerranéenne, alors que la méthode « invertébrés souterrains » atteint les siennes sur la partie amont du Rhône à partir du secteur de Belley (Ain).

La colonne check list dans le tableau 3 est renseignée pour le secteur de Donzère-Mondragon. Du point de vue géographique, ce site est sous influence méditerranéenne, il faudra donc utiliser la méthode « végétaux aquatiques » avec précaution. Du point de vue hydrogéologique, il faudra prendre en compte le caractère semi-captif de la nappe alluviale sur certains secteurs qui rend inutilisable la méthode géomatique, notamment en période de hautes-eaux de nappe quand celle-ci est sous pression. Le Vieux-Rhône quant à lui, est caractérisé par la présence de plusieurs affluents, dont l'Ardèche, de seuils et de mouilles. Le secteur est fortement anthropisé avec la présence de nombreux ouvrages, aménagements et activités.

4.2. DEFINIR LES OBJECTIFS ET LES ENJEUX

Les objectifs et les enjeux liés au site doivent être définis avec soin. Le tableau 4 donne une liste contenant des exemples d'objectifs : connaissance du fonctionnement global des échanges nappes/rivières, réhabilitation, restauration de milieux aquatiques, protection des captages AEP, protection de milieux aquatiques, infiltration d'eau en nappe pour constituer des réserves, étudier l'impact des eaux superficielles sur les eaux souterraines et inversement.

Sur le secteur de Donzère-Mondragon, l'objectif affiché était au départ un objectif de compréhension du fonctionnement global des échanges nappes/rivières. Il s'agissait aussi de mettre au point la méthode diagnostic multi-méthode utilisée dans ce guide et de tester la validité des méthodes biologiques sur un secteur méditerranéen.

Définir les objectifs et les enjeux

Ce tableau liste des exemples de différents types d'enjeux et objectifs à atteindre. Ceux-ci, selon qu'ils sont associés à tel ou tel objet de l'hydrosystème feront surgir différentes contraintes potentielles dont il faudra tenir compte lors de l'étude.

Les champs qui composent ce tableau sont les suivants :

- **nature** : liste d'objectifs potentiels,
- **cible éventuelle** : objets hydrologiques sur lesquels pèsent les objectifs,
- **contraintes/impératifs** : éléments à réaliser impérativement afin d'atteindre les objectifs fixés,
- **études complémentaires à réaliser ou à consulter** : si les méthodes du guide ne peuvent à elles seules satisfaire à la réalisation de l'objectif visé, il est peut-être nécessaire de faire appel à des études complémentaires,
- **check (O/N)** : colonne permettant d'indiquer la présence (O) ou l'absence (N) d'un objectif sur le site d'étude. Dans ce tableau, la colonne est remplie selon l'objectif que nous devons atteindre pour le site de Donzère-Mondragon.

Nature	Cible éventuelle	Contraintes/Impératifs	Etudes complémentaires à réaliser ou à consulter	Check O/N
<i>Connaissance du fonctionnement global du secteur</i>	Compartiments superficiels et souterrains de l'hydrosystème	Echelle kilométrique Diversité des éléments interconnectés de l'hydrosystème	Bilan hydrogéologique	O
<i>Restauration Réhabilitation</i>	Zone humide alluviale	Echelle locale Variations saisonnières	Diagnostic écologique patrimonial Diagnostic hydraulique	N
	Méandre du chenal	Connaître les arrivées d'eau souterraine favorisant le refroidissement de l'eau		N
	Gravière			N
<i>Pollution Protection</i>	Zone à protéger (captage, zone humide patrimoniale, pollution thermique)	Echelle locale Suivi en continu des niveaux d'eau et de la physico-chimie	Diagnostic industriel et socio-économique	N
<i>Impact quantitatif des captages à proximité de la rivière</i>	Ancien/existant	Echelle très locale < 1km Suivi en continu des niveaux d'eau	Essai de pompage Modélisation	N
	Nouveau/prévu	Echelle très locale < 1km	Etude d'impact	N
<i>Stockage d'eau pour le futur (recharge de nappe)</i>	A partir du fleuve	Echelle locale Paramètres et données	Modélisation et simulation	N
	A partir des contre-canaux			N
<i>Autres</i>	A définir	-	-	N

Tableau 4 : Définir les objectifs et les enjeux – check list appliquée au secteur de Donzère-Mondragon

Sélection espace/temps	Période / extension géographique	Protocole	Méthodes pertinentes	Check O/N
<i>Echelle de temps</i>	Hiver (Hautes-eaux)	1 campagne au moins	Hydraulique (Analyse SIG)	N
	Moyennes-eaux	1 campagne au moins	Hydraulique (Analyse SIG), invertébrés, isotopes	O
	Eté (Basses-eaux)	1 campagne au moins	Hydraulique (Analyse SIG), invertébrés, isotopes	O
	Moyen terme (2 à 3 ans)	1 campagne annuelle en été	Végétaux aquatiques	N
	Long terme (changement climatique)	Campagnes anciennes conformes aux prérequis du guide (géoréférencement, nivellement, identification des espèces, abondance)	Données anciennes faunistiques et floristiques, hydrauliques (Analyse SIG), isotopes	N
<i>Echelle spatiale</i>	100m	Effort d'échantillonnage adapté	Invertébrés, végétaux aquatiques, isotopes	O
	1km à 20km		Invertébrés, végétaux aquatiques, isotopes, hydrauliques (Analyse SIG)	O
	20 à 100km		végétaux aquatiques, isotopes	N

Tableau 5 : Sélectionner des échelles de temps et d'espace – check list appliquée au secteur de Donzère-Mondragon

4.3. SÉLECTIONNER AU PREALABLE L'ECHELLE DE TRAVAIL

Une fois le site d'étude décrit et les objectifs définis, il faut déterminer l'échelle spatiotemporelle de travail, en lien avec les objectifs (Tableau 5).

Il est important de bien sélectionner les échelles d'espaces (échelle hectométrique à plurikilométriques) et de temps (échelle saisonnière à annuelle) auxquelles on souhaite travailler

(Tableau 5) en fonction des objectifs et enjeux sélectionnés précédemment (Tableau 4).

Sur le secteur de Donzère-Mondragon, compte-tenu de notre objectif de connaissance, nous avons décidé de travailler à l'échelle spatiale du PK : les résultats sont agrégés au ½PK à une échelle hectométrique. La principale contrainte quand on travaille à l'échelle spatiale locale repose sur la

quantité et la densité de données nécessaires pour une caractérisation des échanges nappes/rivières conforme à cette échelle.

Pour l'échelle temporelle, nous avons décidé de travailler à l'échelle saisonnière caractéristique de période hydrologique : moyennes-eaux, basses-eaux, la méthode géomatique n'étant pas adaptée

ici à l'étude des hautes-eaux de nappe compte-tenu de son caractère semi-captif sur le sud. Toutefois, la synthèse finale n'intègre que les moyennes-eaux car la méthode « végétaux aquatiques » ne donne qu'un résultat annuel intégré. La principale contrainte liée au choix de l'échelle de temps est le nombre de campagne de relevés à effectuer.

4.4. SELECTIONNER DES OUTILS ET DES METHODES

Pour terminer, il reste à choisir les outils (méthodes) utiles et nécessaires à la réalisation du diagnostic des échanges nappes/rivières et des objectifs sélectionnés. Dans un premier temps, un examen des données existantes (pertinence, qualité) ou à acquérir (voire à reconstituer) peut conduire au choix de telle ou telle méthode en fonction de l'effort financier ou en homme/jour que l'on peut consentir pour cela. Sur le secteur de Donzère-Mondragon, nous avons travaillé à partir de données hydrauliques existantes. Un effort d'échantillonnage, de relevés et d'analyse a dû être accepté pour les méthodes biologiques.

La liste des données nécessaires pour chacune des méthodes est fournie dans la partie suivante (Chapitre 4.5). Pour finaliser la sélection des méthodes, la dernière partie de ce chapitre (Chapitre 4.6) présente le potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivières de chacune des quatre méthodes (Tableaux 6 et 7) proposées dans ce guide (hydraulique, invertébrés,

végétaux aquatiques et géochimie) mais aussi leurs limites et inconvénients.

Définir les échelles de temps et d'espace

Ce tableau comprend les éléments dont il faut tenir compte pour le choix de l'échelle spatiotemporelle. Les champs qui le composent sont les suivants :

- **sélection espace/temps** : éléments liés au temps ou à l'espace,
- **période / extension géographique** : échelles de temps et d'espace considérées,
- **protocole** : contraintes d'échantillonnage ou de relevé adaptées à l'échelle spatiotemporelle sélectionnée,
- **méthodes pertinentes** : méthodes (outils) utilisables selon l'échelle spatiotemporelle considérée,
- **check (O/N)** : colonne permettant d'indiquer la sélection (O) ou non (N) de la, ou des, échelles spatiotemporelles pertinentes dans le cadre de l'étude. Dans ce tableau, la colonne est remplie selon l'objectif que nous devons atteindre pour le site de Donzère-Mondragon.

4.5. TROUVER LES DONNEES NECESSAIRES : FAIRE LE POINT SUR LES DONNEES DISPONIBLES ET A ACQUERIR

Sans données, la caractérisation des échanges nappes/rivières s'avère impossible. Il conviendra donc dans un premier temps d'identifier et de récupérer les données existantes. Celles-ci peuvent se trouver dans la bibliographie ou dans les rapports ayant fait suite à différents travaux (études, thèses, stages...), ou stockées dans des bases de données. Dans ce cas, il peut être nécessaire d'acheter des données ou de prévoir des conventions de mise à disposition avec les détenteurs de ces données.

Dans un second temps, un travail d'acquisition de données pourra être envisagé si l'existant n'est pas suffisant ou en inadéquation avec les objectifs fixés. Il conviendra donc de fixer l'effort d'acquisition (densité, fréquence) en fonction de ces objectifs. Cette approche nécessite souvent de prévoir des journées de terrain avec déplacement, l'achat de

matériel et la mise en place d'un protocole d'échantillonnage (prélèvements, relevés).

Rechercher des données

La **Fiche Pratique n°7** propose une sélection des bases de données consultables en ligne pour la localisation ou récupération de données existantes.

Données hydrauliques

Les données nécessaires pour effectuer la caractérisation des échanges nappes/rivières à partir de la méthode géomatique sont les suivantes :

- linéaire des berges étudiées,
- niveaux de nappe ou cartes piézométriques datées et calées NGF,
- niveaux d'eau de la rivière, des îlots et des contre-canaux synchrones avec les niveaux de nappe,

- niveaux du fond de la rivière (talweg),
- perméabilité des alluvions pour déduire ceux à affecter au niveau des berges,
- profils bathymétriques pour calculer la surface de la section d'échange ou surface utile (A). Cette surface est calculée en soustrayant le niveau piézométrique (nP) au niveau du fond de la rivière (nFR) :

$$A = nP - nFR$$

Un travail sur les variations saisonnières nécessitera plusieurs jeux de données à différentes dates, sélectionnées en fonction des objectifs, par exemple de situations hydrauliques caractéristiques.

Données biologiques

Les données nécessaires pour effectuer la caractérisation des échanges nappes/rivières à partir des invertébrés souterrains et des végétaux aquatiques sont les suivantes :

- composition spécifique des communautés d'invertébrés souterrains,
- composition spécifique des communautés de végétaux aquatiques.

Comme pour les données hydrauliques, un travail sur les variations saisonnières à partir des

invertébrés souterrains nécessitera plusieurs jeux de données à différentes dates. Pour les végétaux aquatiques, seules les variations annuelles pourront être envisagées.

Données géochimiques

Les données nécessaires pour effectuer la caractérisation des échanges nappes/rivières à partir de mesures in situ ou d'analyses géochimiques en laboratoire sont les suivantes :

- température de l'eau,
- pH,
- conductivité de l'eau,
- teneurs en éléments dissous dans l'eau. Les éléments usuellement mesurés sont les éléments majeurs comme Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{2-} , HCO_3^- . Il est rare qu'une analyse chimique soit partielle car la balance ionique doit être vérifiée. On a donc généralement besoin de toutes les espèces majeurs. Des éléments traces peuvent aussi être analysés selon les particularités des sites,
- composition isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau.

Comme précédemment, un travail sur les variations saisonnières nécessitera des chroniques de données.

4.6. SYNTHÈSE DES INFORMATIONS

Deux tableaux mettent en avant le potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivières de chacune des méthodes (Tableau 6) et proposent une vision synthétique des contraintes liées à leur utilisation (Tableau 6).

Le tableau 7 reprend les principales contraintes rencontrées selon les différents contextes (géographique, hydrogéologique, anthropique) sur lesquelles elles s'appliquent, selon les informations nécessaires pour les mettre en œuvre, et selon les échelles spatiales et temporelles sélectionnées au vue des objectifs.

Le tableau 6 reprend le potentiel de caractérisation des échanges nappes/rivières de chacune des

méthodes et des types d'échanges qu'il est possible de caractériser (sens du flux et débit du flux) sur chaque berge, ou non. Les dernières lignes de ce tableau synthétisent les points forts et les points faibles de chacune des méthodes.

Coûts et ressources

La [Fiche Pratique n°5](#) présente une estimation du coût et du temps nécessaires pour le diagnostic des échanges nappes/rivières à partir de chacune des méthodes. La [Fiche Pratique n°8](#) propose une liste de personnes ressources à contacter.

	Analyse géomatique	Invertébrés souterrains	Végétation aquatique	Physico-chimie des eaux superficielle	Isotopes
<i>Principe de la méthode</i>	Calcul de gradients piézométriques (Loi de Darcy), TIN	Composition des communautés d'invertébrés interstitiels	Composition des communautés de végétaux aquatiques	ACP sur les données	Composition des isotopes de l'eau
<i>Types d'échanges pris en compte</i>	Latéraux, à travers les berges à l'échelle de tronçons Interface nappes/rivières (section plan)	Par le fond ou par les berges Localement, toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	Intégré à l'échelle des masses d'eau Toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	Intégré à l'échelle des masses d'eau	Intégré à l'échelle des masses d'eau
<i>Sortie</i>	Gradient hydraulique (i) Débit d'échange (Q)	Direction/sens de l'échange Origine de l'eau	Trophie Apport phréatique Alluvionnement	Tampons (thermique, conductivité, éléments majeurs)	Altitude de recharge Renouvellement Apport phréatique
<i>Caractérisation de l'échange pour chaque rive</i>	Oui	Oui	Oui	Difficile	Oui
<i>Sens de l'échange</i>	Oui	Oui	Nappe vers rivière seulement	Nappe vers rivière seulement	Oui
<i>Quantification de l'échange</i>	Oui (m ³ /j ou l/s)	Non	Oui (semi-quantitatif)	Non	Oui (en %)
<i>Nappe vers rivière</i>	++	++	++	++	++
<i>Rivière vers nappe</i>	++	++	+	0	++
<i>Absence d'échange</i>	+	0	+	0	+
<i>Colmatage</i>	0	+	0	0	+
<i>Sous-écoulement</i>	+	++	++	++	++
<i>Recyclage</i>	0	++	0	0	0
<i>Points forts</i>	Rapide, simple, peu de données, extension spatiale, agrégation spatiale	Echantillonnage rapide, sites complexes, origine de l'eau (discrimination de différents aquifères)	Rapide, peu coûteux, intégration des échanges sur une période annuelle	Coût raisonnable, quantification des processus	Quantification des mélanges (en %)
<i>Points faibles</i>	Milieux alluviaux libres uniquement, existence et précision des données de départ	Pas de quantification, échelle locale, variabilité biogéographique, compétence en systématique, traitement en laboratoire long	Présence de végétation, semi-quantitatif, homogénéité de la qualité des eaux	Nécessité d'échantillonner plusieurs fois	Acquisition de chroniques de données, coût des analyses, interprétation difficile

Tableau 6 : Potentiel des méthodes

0 : méthode non adaptée ; + : méthode adaptée mais limitée ; ++ : méthode recommandée



Flux d'eau : un aspect difficile à quantifier pour les échanges nappes/rivières (© M. Mendo)

	Analyse géomatique	Invertébrés souterrains	Végétation aquatique	Physico-chimie	Isotopes
Position géographique	-	Hors position nord par rapport aux dernières glaciations	Hors zone méditerranéenne	Fond géochimique naturel	Référentiel international
Contexte hydrogéologique conseillé	Nappe libre connectée à la rivière	Nappe libre, milieu carbonaté dont karst (hors cristallin)	Nappe libre	-	-
Contexte géomorphologique	-	-	-	-	-
Contexte anthropique	-	-	Eutrophisation et phytosanitaires	Pollution extrême	Présence de centrale nucléaire pour le tritium
Informations nécessaires	Hauteurs de nappe et de rivières, cartes piézométriques, perméabilité des berges, surface d'infiltration	Exigences écologiques des espèces (stygobies), contexte biogéographique	Exigences écologiques des espèces (trophie, perturbations, apports de nappe), contexte biogéographique	Référentiel Au minimum les valeurs pour la rivière/fleuve, au mieux les valeurs pour la nappe	Référentiel Valeurs pour les différents compartiments de l'hydrosystème
Echelle spatiale de représentativité des échanges	0,5 à 1km	<100m	0,1 à 2km Dépend de la densité d'échantillonnage	0,1 à 2km Dépend de la densité d'échantillonnage	0,1 à 2km Dépend de la densité d'échantillonnage
Echelle temporelle	Possibilité de travailler sur les variations saisonnières suivant disponibilité de données instantanées sous hypothèse de régime permanent	Possibilité de travailler sur les variations saisonnières (peu sensible aux fluctuations journalières)	Intégration annuelle sur un relevé estival	Pas de données ponctuelles (chroniques)	Pas de données ponctuelles (chroniques)

Tableau 7 : Synthèse et résumé des contraintes pour l'utilisation de chaque méthode

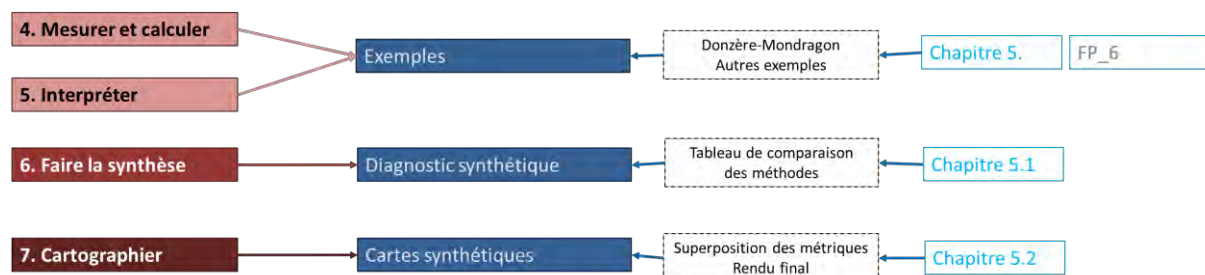


Un contre-canal du Rhône (26). Outre les fuites de digues et les apports d'eaux souterraines, les contre-canaux recueillent parfois les eaux de petites rivières (© L. Cadilhac)



Un méandre du fleuve Rhône. La morphologie d'un cours d'eau, notamment le méandrage, peut avoir une influence sur les échanges nappes/rivières (© G. Poussard)

Chapitre 5. Conclure sur les échanges nappes/rivières



Repère 6 : Synthétiser et cartographier les échanges

Une fois les méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières sélectionnées et mises en œuvre sur un terrain d'étude, on aboutit à plusieurs diagnostics distincts. Tout l'intérêt de l'approche multi-méthode est d'aboutir à un diagnostic synthétique par croisement des résultats.

Comment tirer des conclusions des mesures et calculs effectués précédemment avec chacune des méthodes impliquées et comment aboutir à un diagnostic synthétique multi-méthode des échanges nappes/rivières ?

Pour ce faire, ce chapitre propose dans une première partie d'intégrer chacun des résultats dans un tableau de synthèse général. Ce tableau devra être complété en tenant compte du code couleur affecté à chacun des types d'échanges tel qu'il a été défini dans le chapitre 2.6.

Dans un premier temps, il faudra agréger les résultats selon les échelles d'espace et de temps sélectionnées et des unités fonctionnelles repérées (ex : masses d'eaux, tronçons de rivière compris entre 2 affluents, zone de confluence). Il est possible par exemple d'effectuer un découpage avec les PK (Points Kilométriques) pour remplir le tableau de synthèse. Dans un deuxième temps, il est nécessaire de reporter dans ce tableau les incertitudes concernant le diagnostic effectué à l'aide de chacune des méthodes. Le croisement de ces deux informations conduira à un diagnostic synthétique concernant le sens et l'intensité des échanges nappes/rivières. Une fois la synthèse effectuée, il est possible de dresser la cartographie synthétique des résultats.

Afin d'illustrer chacune des étapes de ce dernier chapitre, le travail effectué sur Donzère-Mondragon est présenté à titre d'exemple.

5.1. TABLEAU DE SYNTHÈSE POUR LA COMPARAISON DES MÉTHODES : CROISEMENT DES MÉTHODES, INCERTITUDES ET DIAGNOSTIC SYNTHÉTIQUE

Considérations générales

Sur les trois grands secteurs étudiés à titre de sites témoins pour l'élaboration de ce guide, il apparaît que le croisement des méthodes (hydraulique, invertébrés, végétaux aquatiques, physico-chimie et isotopes) permet de réaliser un diagnostic globalement convergent des échanges nappes/rivières. Ce diagnostic est rendu possible grâce aux informations apportées par chacune des méthodes. Ces informations peuvent être de même nature ou complémentaires :

- de même nature, si elles permettent le diagnostic d'un même phénomène,
- complémentaires, si elles autorisent le diagnostic de phénomènes différents ou si elles comblent les lacunes en données.

Secteurs diagnostiqués dans le projet échanges nappes/Rhône

Sur le secteur de **Donzère-Mondragon Rhône/Ardèche**, l'interprétation a conduit à découper le linéaire de berge impliqué en un nombre réduit de secteurs :

- Vieux-Rhône rive droite (RD) : 4 secteurs (30km),
- Vieux-Rhône rive gauche (RG) : 3 secteurs (30km),
- Canal de dérivation RD : 3 secteurs (28km),
- Canal de dérivation RG : 1 secteur (28km),
- Ardèche RG : 2 secteurs (8km),
- Ardèche rive droite : 1 secteur (1km).

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

- Vieux-Rhône RG : 1 secteur (10km),
- Vieux-Rhône RD : 1 secteur (5km),
- Canal de dérivation RG : 1 secteur (4km),
- Canal de dérivation RD : 6 secteurs (10km),
- Eyrieux RG : 1 secteur (6km),
- Eyrieux RD : 1 secteur (2km).

En plus de cet avant-goût, la **Fiche Pratique n°6** propose des fiches synthétiques décrivant les travaux et présentant les résultats du diagnostic multi-méthode des échanges nappes/rivières effectué sur 5 aménagements CNR du Rhône : **Brégnier-Cordon, Péage-de-Roussillon, Donzère-Mondragon et Beauchastel**.

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

- de détecter les apports du cours d'eau 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, seulement possible avec les isotopes,
- de détecter les colmatages, possible uniquement avec les invertébrés et les isotopes,
- de détecter le phénomène de recyclage, possible seulement avec les invertébrés.

Croisement des méthodes Perspectives

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 méthodes, afin d'essayer d'associer par exemple, une gamme de débit de nappe à un indice biologique,
 - sur une **méthode de pondération des méthodes plus** aboutie pour une interprétation plus fine, voire plus rigoureuse, du croisement des méthodes,
 - sur une **meilleure synchronisation** de l'acquisition des données dans le temps et dans l'espace.
- Mais en attendant mieux, cette première évaluation est un bon début.

De plus, l'absence de données hydrauliques sur certaine portion des secteurs étudiés rend les informations complémentaires fournies par les autres méthodes essentielles. 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/rivières par croisement des méthodes a nécessité :

- un dialogue interdisciplinaire approfondi entre spécialistes du domaine,
- la compréhension mutuelle et l'acceptation des phénomènes spécifiques diagnostiqués par chacune des méthodes, 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.

Tableau de croisement des méthodes : sectorisation des relations nappes/rivières

Le tableau 8 reprend et résume la typologie des méthodes présentée au Chapitre 2.6 avec le même code couleur associé. Ce code couleur doit être utilisé pour le remplissage de la partie gauche du tableau de croisement des méthodes (exemples : tableaux 10 et 11) afin de synthétiser visuellement le diagnostic de chacune des méthodes à l'échelle spatiale sélectionnée.

Qualité du diagnostic de sectorisation des échanges et incertitudes

Une fois ce premier travail réalisé, il convient de compléter la partie droite du tableau portant sur la qualité de chacun des diagnostics. Le tableau 9 présente de manière synthétique des exemples d'incertitudes liées à chacune des méthodes. Nous proposons trois classes de qualité du diagnostic associées à un code couleur et un code numérique :

- bon : 0 (blanc)
- incertitude : -2 (jaune clair)
- douteux : -5 (jaune foncé).

Le code couleur et la valeur numérique devront être reportés dans le tableau de comparaison des méthodes selon l'échelle spatiale sélectionnée (ex : PK ou ½PK).

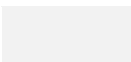
Code couleur	Autres informations
	Méthode non-utilisée dans le diagnostic
	Pas de données / pas de site d'échantillonnage
Code couleur	Typologie des échanges
	Echange de la nappe vers la rivière
	Echange de la rivière vers la nappe
	Pas d'échange détecté
	Colmatage
	Sous-écoulement
	Recyclage

Tableau 8 : Typologie des échanges : codes couleurs pour le croisement des méthodes

méthodes	Exemples d'incertitudes sur l'identification du sens de l'échange		
	Bon	Incertain	Douteux
	0	-2	-5
<i>Hydraulique</i>	- Nombreuses mesures de niveaux de nappes (1 tous les 500m) - Carte piézométrique interpolée à l'aide d'outils géostatistiques - Mesures de la ligne d'eau rivière synchrone de la piézométrie (1 tous les 500m) - Profil bathymétrique	- Peu de mesures de niveaux de nappe - Carte piézométrique interpolée manuellement - Amont et aval du secteur de berge (incertitude du TIN)	- Trop de peu de mesures de niveaux de nappe - Piézométrie non datée et non nivelée
<i>Invertébrés souterrains</i>	- Faune diversifiée - Absence de colmatage	- Faune peu diversifiée - Espèces ubiquistes - Présence de genres à écologie mal connue	- Absence régionale de faune stygobie - Instabilité hydrologique récente (après une crue)
<i>Végétaux aquatiques (macrophytes)</i>	- Forte densité de site (1 tous les 500m)	- Proportion importante d'espèces ubiquistes	- Hyper-eutrophisation - Recouvrement végétal très faible - Instabilité hydrologique récente (après une crue)
<i>Physico-chimie des eaux de surface</i>	- Fort contraste entre nappe et surface - Mesure de qualité de nappe en parallèle	- Contexte anthropique (agriculture)	- Mesures ponctuelles - Contexte anthropique (forte pollution)
<i>Isotopes</i>	- Contraste suffisant entre les différentes masses d'eau - Mesure en basses ou moyennes-eaux	- Contexte anthropique	- Mesures ponctuelles - Mesures en hautes-eaux

Tableau 9 : Tableau des incertitudes

Commentaires sur les deux exemples de tableaux de croisement des méthodes

Le tableau 10 concerne la rive gauche du Vieux-Rhône

Du point de vue qualité du diagnostic, celui-ci est globalement bon :

- il a été réalisé de manière optimale pour les végétaux aquatiques (Mphyt.),
- il n'a pas été possible sur certains secteurs pour les invertébrés souterrains (Invert.) du fait de l'absence de stygobie dans certains échantillons d'où la note de -5 à l'aval du secteur,
- il a été réalisé de manière optimale pour l'analyse géomatique (Hydro.) outre les incertitudes liées à la construction du TIN sur les bords du secteur (tronçons amont et aval, note de -2),
- les données chimiques (Chim.) de par leur nature ponctuelle sont utilisées ici à titre indicatif (note de -5).

Pour cette rive du Vieux-Rhône les diagnostics convergent bien et permettent une interprétation des échanges complémentaire :

- A l'amont du secteur (PK171 à 186), on observe globalement un flux d'eau vers le fleuve avec l'analyse SIG (Hydro/SIG), les végétaux aquatiques (Macrophytes) et la chimie. Les invertébrés ne détectent aucun échange de manière locale. Compte-tenu du diagnostic fondé sur l'analyse SIG un flux d'eau vers le Rhône a été retenu pour la synthèse. Les végétaux aquatiques et la chimie permettent de déterminer l'origine de ce flux : 1) de la nappe de versant côté Drôme vers le Vieux-Rhône à l'amont ; 2) du canal de dérivation vers la nappe puis vers le Vieux-Rhône (sous-écoulement),

- A l'aval du secteur (PK186 à 200), on observe globalement un flux d'eau du Vieux-Rhône vers la nappe avec l'analyse SIG. Cette information n'est pas démentie par les macrophytes qui ne détectent pas d'apport de nappe. Les invertébrés, sur le tronçon où la qualité du diagnostic est bonne, nous apportent une information complémentaire : des phénomènes de recyclage ont lieu dans le chenal du Vieux-Rhône. La chimie, malgré la qualité du diagnostic, laisse suspecter un sous-écoulement de l'Ardèche vers la nappe du Rhône.

Le tableau 11 concerne la rive droite du canal de dérivation

Du point de vue qualité du diagnostic, celui est globalement bon, pour les mêmes raisons citées précédemment dans le commentaire du tableau 10.

Pour cette rive du canal de dérivation, le diagnostic est un peu plus compliqué à réaliser :

- A l'amont (PK1 à 18), on observe globalement un flux d'eau du contre-canal vers la nappe avec l'analyse SIG. Les méthodes « invertébrés souterrains » et « végétaux aquatiques » permettent de déterminer plus précisément ce flux d'eau : il s'agit d'un sous-écoulement du canal de dérivation à travers les digues vers le contre-canal, puis vers la nappe. A l'amont du secteur, les macrophytes laissent suspecter un apport de nappe de versant côté Drôme aux contre-canaux. Ce flux transite sous le canal de dérivation,

- A l'aval (PK18 et 28), l'analyse SIG diagnostique un apport de nappe vers le contre-canal longeant le canal de fuite. Les macrophytes ne détectant pas d'apport de nappe, il s'agit vraisemblablement du sous-écoulement du Vieux-Rhône transitant par la nappe pour rejoindre le contre-canal puis le canal de fuite. Ce comportement est en accord avec le diagnostic effectué précédemment sur la rive gauche du Vieux-Rhône.

Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières : quelques conseils pour trancher

Pour terminer, il reste la partie centrale du tableau de comparaison des méthodes à renseigner. C'est celle qui contient le diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières. Ce diagnostic doit intégrer les diagnostics issus de chacune des méthodes en tenant compte des incertitudes.

Nous pouvons donner les conseils suivants afin d'établir au mieux le diagnostic fonctionnel des relations nappes/rivières du site sélectionné :

- effectuer le diagnostic à partir des méthodes proposant la meilleure qualité d'information. Dans notre exemple, il s'agit globalement des méthodes analyse SIG, invertébrés souterrains et végétaux aquatiques,

- éliminer si possible les méthodes proposant une qualité d'information douteuse. Dans notre exemple, il s'agit des méthodes physico-chimique et isotopique,

- en cas de doutes, ou pour trancher utiliser la ou les méthodes possédant la meilleure qualité d'information, sous réserve que le diagnostic soit compatible avec les connaissances sur l'hydrogéologie du secteur. Par exemple, l'analyse SIG n'est pas très fiable sur les bouts amont et aval des secteurs étudiés. En rive gauche du Vieux-Rhône PK199 à 200 l'absence d'apport de nappe diagnostiqué par les végétaux aquatiques infirme le diagnostic de l'analyse SIG,

Donzère-Mondragon - Vieux-Rhône - Rive gauche						PK	Diagnostic synthétique	PK	Qualité des diagnostics				
PK	Hydro/SIG	Invertébré	Macrophyte	Chimie	Isotope				Hydro.	Invert.	Mphyt.	Chim.	Iso.
	03/2009	05/2008	07/2008	07/2008	06/2008								
	ME	ME	ME	ME	ME								
171	Q+		Q+ Nappe versant Drôme			171	Q+ Nappe versant Drôme	171	-2				
171.5						171.5							
172						172							
172.5						172.5							
173						173							
173.5				173.5		0	0	0	-5				
174			Rhône dérivé	174									
174.5				174.5									
175				175									
175.5				175.5									
176				176									
176.5			176.5										
177				177									
177.5				177.5									
178		Rhône dérivé	Rhône dérivé	178							178		
178.5				178.5									
179				179									
179.5	179.5												
180	180												
180.5	180.5												
181	181												
181.5	181.5												
182	182												
182.5	182.5												
183	183	-5											
183.5	183.5												
184	184												
184.5	184.5												
185	185												
185.5	185.5												
186	186												
186.5	186.5												
187	187												
187.5	187.5												
188	188												
188.5	188.5												
189	189												
189.5	189.5												
190	190												
190.5	190.5												
191	191												
191.5	191.5												
192	192												
192.5	192.5												
193	193												
193.5	193.5												
194	194												
194.5	194.5												
195	195												
195.5	195.5												
196	Ardèche ?		196	Ardèche ?	196	-5							
196.5			196.5										
197			197										
197.5			197.5										
198			198										
198.5	198.5												
199	Q+		199	Q- Vieux-Rhône	199	-2							
199.5			199.5										
200			200										

Tableau 10 : Comparaison des méthodes et diagnostic synthétique compte-tenu des incertitudes : Exemple pour la rive gauche du Vieux-Rhône à Donzère-Mondragon

[Hydro : -2] : Amont et aval du secteur de berge étudié (incertitude liée au TIN)

[Chim. et Iso. : -5] : données ponctuelles

[Invert. : -5] : absence de stygobie ou colmatage

Donzère-Mondragon - Canal de dérivation (contre-canal) - Rive droite						PK	Diagnostic synthétique	PK	Qualité des diagnostics				
PK	Hydro	Invertébré	Macrophyte	Chimie	Isotope				Hydro.	Invert	Mphyt.	Chim.	Iso.
	03/2009	05/2008	07/2008	07/2008	06/2008								
	ME	ME	ME	ME	ME								
0						0		0					
0.5						0.5		0.5					
1						1		1					
1.5						1.5		1.5					
2						2		2					
2.5						2.5		2.5					
3						3		3					
3.5						3.5		3.5					
4						4		4					
4.5						4.5		4.5					
5						5		5					
5.5						5.5		5.5					
6						6		6					
6.5						6.5		6.5					
7						7		7					
7.5						7.5		7.5					
8						8		8					
8.5						8.5		8.5					
9						9		9					
9.5						9.5		9.5					
10						10		10					
10.5						10.5		10.5					
11						11		11					
11.5						11.5		11.5					
12						12		12					
12.5						12.5		12.5					
13						13		13					
13.5						13.5		13.5					
14						14		14					
14.5						14.5		14.5					
15						15		15					
15.5						15.5		15.5					
16						16		16					
16.5						16.5		16.5					
17						17		17					
17.5						17.5		17.5					
18						18		18					
18.5						18.5		18.5					
19						19		19					
19.5						19.5		19.5					
20						20		20					
20.5						20.5		20.5					
21						21		21					
21.5						21.5		21.5					
22						22		22					
22.5						22.5		22.5					
23						23		23					
23.5						23.5		23.5					
24						24		24					
24.5						24.5		24.5					
25						25		25					
25.5						25.5		25.5					
26						26		26					
26.5						26.5		26.5					
27						27		27					
27.5						27.5		27.5					
28						28		28					

Tableau 11 : Comparaison des méthodes et diagnostic synthétique compte-tenu des incertitudes : Exemple pour la rive droite du canal de dérivation (contre-canal) à Donzère-Mondragon

[Hydro : -2] : Amont et aval du secteur de berge étudié (incertitude liée au TIN)

[Chim. et Iso. : -5] : données ponctuelles

- considérer un diagnostic comme pertinent, ou fortement probable, que s'il est construit à partir de 2 ou 3 méthodes avec une bonne qualité d'information,

- en cas de fortes incohérences entre le diagnostic des méthodes, ou de fortes incertitudes, il est sans doute nécessaire de travailler à partir de nouvelles données ou de réaliser des études complémentaires. Celles-ci peuvent être aussi menées pour éclaircir des interrogations. Par exemple, il serait intéressant de vérifier l'hypothèse de sous-écoulement de l'Ardèche en rive gauche du Vieux-Rhône (PK197). Celle-ci est rendue plausible par la présence d'un paléochenal coupant le méandre.

En plus de ces quelques éléments, nous conseillons de disposer d'une bonne connaissance hydrogéologique du secteur afin de pouvoir trancher en cas de problèmes. Par ailleurs,

certaines typologies d'échanges peuvent cohabiter sans être incompatibles :

- le phénomène de recyclage n'est pas exclusif de tout autres types de relations nappes/rivières. Sur un même tronçon, les situations « apport du fleuve à la nappe » ou encore « drainage de la nappe par le fleuve », par exemple, peuvent coexister avec la situation « recyclage » (ex : PK189 à 195,5 en rive gauche du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon),

- le phénomène de sous-écoulement peut quant à lui nécessiter une interprétation à l'échelle de la plaine. Il n'est donc pas incompatible avec les situations « apport du fleuve à la nappe » ou encore « drainage de la nappe par le fleuve ». Par exemple, l'eau du fleuve alimentant la nappe en rive gauche du Vieux-Rhône (PK186 à 199) s'infiltre à travers la plaine pour alimenter le canal de dérivation en rive droite (PK18 à 28).

5.2. CARTOGRAPHIE SYNTHETIQUE DES RESULTATS

Pour finir, il est important de dresser une carte de synthèse (Carte 1) :

- d'une part pour avoir une vision générale spatialisée du fonctionnement du site étudié du point de vue des échanges nappes/rivières ;
- d'autre part pour mieux comprendre des phénomènes se déroulant à l'échelle de la plaine comme la situation de sous-écoulement.

Comme il n'est pas possible de tout représenter sur une même carte seule la sectorisation fonctionnelle la plus pertinente est indiquée, ainsi que les hypothèses les plus intéressantes.

Pour accompagner la carte de synthèse présentée ci-avant, nous proposons, ci-après, de manière simplifiée et synthétique, un diagnostic rédigé des relations nappes/rivières sur le secteur de Donzère-Mondragon confluence Rhône/Ardèche.

Ardèche rive droite

- PK8 à 3 : apport de nappe à l'Ardèche et recyclage PK6 à 3,
- PK3 à 0 : pas d'échange identifié.

Ardèche rive gauche

- PK2 à 1 : sous-écoulement de l'Ardèche à travers la plaine vers l'Ardèche.

Vieux-Rhône rive droite

- PK170 à 182 : apport de nappe du versant ardéchois au Vieux-Rhône,
- PK182 à 187 : sous-écoulement du Vieux-Rhône à travers la plaine vers le Vieux-Rhône et Recyclage PK186 à 189,

- PK187 à 201 : sous-écoulement de l'Ardèche à travers la plaine vers le Vieux-Rhône (hypothèse probable à vérifier).

Vieux-Rhône rive gauche

- PK170 à 176 : apport de nappe du versant drômois (passant sous le canal de dérivation/amenée) au Vieux-Rhône,

- PK176 à 186 : sous-écoulement du Rhône (canal de dérivation/amenée) à travers la plaine vers le Vieux-Rhône,

- PK186 à 201 : apport du Vieux-Rhône à la nappe et recyclage PK189 à 193. Au niveau du PK197 des apports du sous-écoulement de l'Ardèche (passant sous le Vieux-Rhône) à la nappe sont possibles (hypothèse très probable compte-tenu de la présence d'un paléochenal coupant le méandre du Vieux-Rhône, à vérifier).

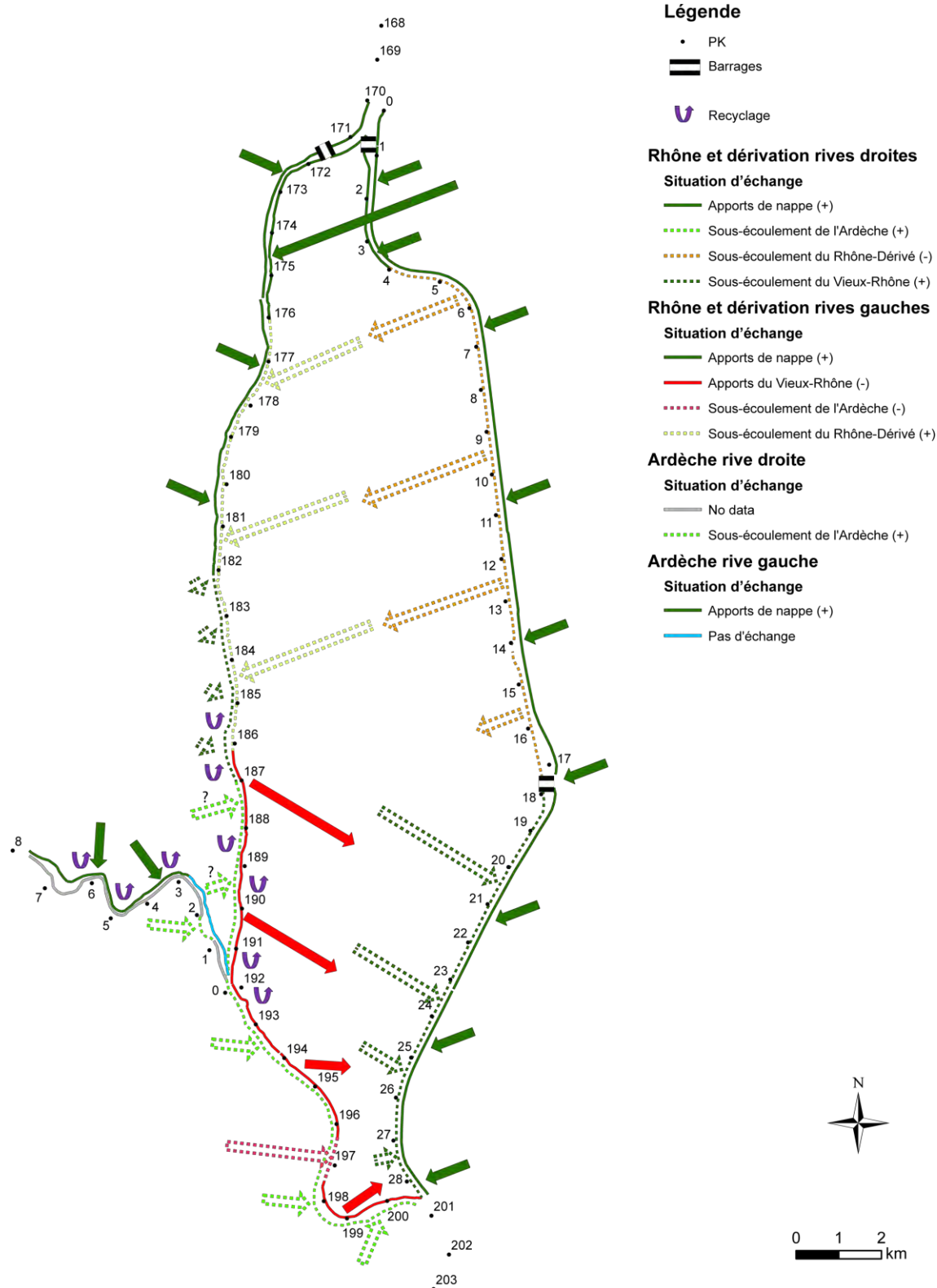
Canal de dérivation rive gauche

- PK0 à 28 : apport de nappe au contre-canal. Les analyses ponctuelles fondées sur les isotopes montrent que l'eau des contre-canaux contient de 33% (PK2 et 4) à 90% d'eau de nappe (PK8 et 9).

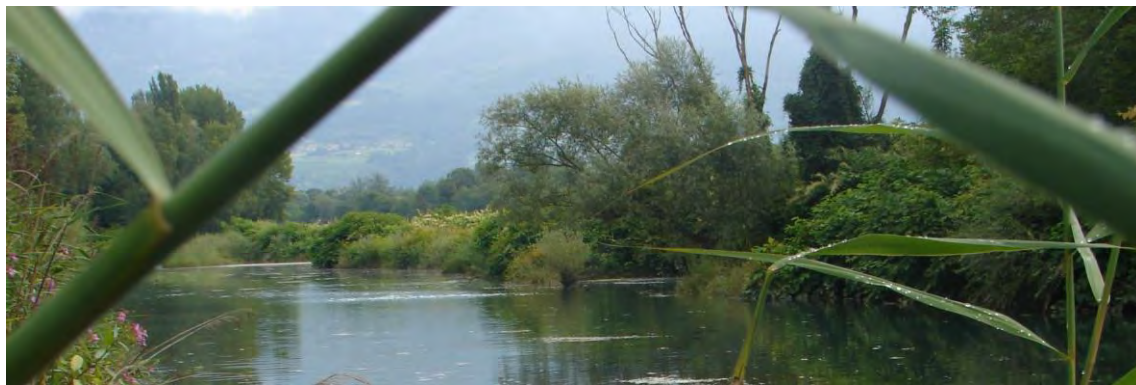
Canal de dérivation rive droite

- PK0 à 4 : apport de nappe du versant drômois (passant sous le canal de dérivation/amenée) au contre-canal,

- PK4 à 17 : apport du contre-canal à la nappe,
- PK17 à 28 : apport de la nappe au canal de dérivation/fuite (sous-écoulement du Vieux-Rhône à travers la plaine vers le canal de dérivation/fuite).



Carte 1 : Diagnostic synthétique multi-méthode des échanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère Mondragon – Carte générée à partir de sorties SIG retouchées avec un logiciel de dessin vectoriel



Le Rhône dans la plaine de Chautagne (73), un secteur complexe du point de vue hydrogéologique où des zones tourbeuses recouvrent les alluvions (© P. Pautrat)

Conclusion : Bilan et perspectives

Ce guide méthodologique vise à aider les utilisateurs à caractériser les échanges nappes/rivières pour les milieux alluvionnaires.

Les deux principales interrogations de départ qui ont motivé la création de ce document sont les suivantes :

Quels sont les outils les plus adaptés dans les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappes/rivières ?

Comment procéder et quelle est la marche à suivre pour caractériser ces échanges ?

Ce guide propose de répondre à ces questions grâce à un cheminement qui, au fil des pages, permet à l'utilisateur de travailler avec plusieurs méthodes selon les caractéristiques de sa zone d'étude, les enjeux locaux, l'échelle de travail et la disponibilité de données suffisantes. Ce guide fournit aussi une assistance pour mettre en œuvre chacune des méthodes, croiser, interpréter, synthétiser les résultats et finalement cartographier les échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire.

Quatre méthodes complémentaires pour caractériser les échanges nappes alluviales/rivières

Le guide propose quatre méthodes adaptées pour apprécier les échanges nappes/rivières en contexte alluvionnaire :

1) Modélisation simplifiée (SIG), analyse géomatique pour l'évaluation des gradients d'échange nappes/rivières. Cette méthode permet de déterminer non seulement le sens des échanges mais aussi d'estimer leur intensité en calculant un débit. Il est nécessaire de disposer de niveaux d'eau

en rivière et en nappe, ainsi que de valeurs de perméabilité et d'épaisseur de l'aquifère.

2) Invertébrés souterrains (Stygobies), indicateurs biologiques des origines superficielles ou souterraines de l'eau. Cette méthode fondée sur l'analyse des communautés d'invertébrés interstitiels et leurs exigences écologiques permet de déterminer le sens des échanges et l'origine des eaux notamment dans le compartiment hyporhéique.

3) Végétation aquatique (Macrophytes), indicateurs biologiques semi-quantitatifs des apports de nappe. Cette méthode fondée sur les communautés végétales aquatiques et leurs exigences écologiques permet non seulement de repérer les zones d'apports de nappe aux rivières, mais apporte aussi des informations sur le niveau trophique de milieux aquatiques et sur la dynamique de l'alluvionnement.

4) Géochimie (ions dissous et isotopes), déterminant les signatures chimiques des eaux pour discriminer leurs origines et quantifier les mélanges. Cette méthode s'appuie sur les contrastes existant dans la géochimie des eaux pour déterminer non seulement des apports phréatiques, mais encore pour estimer des temps de séjour, des vitesses d'écoulement, des altitudes de recharges.

Un guide qui offre la possibilité de réaliser un diagnostic synthétique des interactions nappes/rivières en croisant les résultats et informations issus de chacune des méthodes mises en œuvre

Si chacune de ces méthodes peut être utilisée seule, l'intérêt du guide est de proposer une approche

interdisciplinaire permettant un diagnostic synthétique des interactions nappes/rivières en s'appuyant sur chacune des méthodes utilisées. Le diagnostic synthétique croisé ainsi obtenu, s'appuie sur une typologie des échanges nappes/rivières établie pour différentes configurations.

Une méthodologie testée sur le fleuve Rhône et transposable sur d'autres cours d'eau

Ces méthodes ont été testées et améliorées sur plusieurs secteurs du fleuve Rhône caractérisés par la présence d'aquifères libres à semi-captifs et d'aménagements hydrauliques (Brégnier-Cordon, Péage-de-Roussillon, Beauchastel, Donzère-Mondragon). Ces méthodes ont également été testées sur les portions aval de certains affluents du Rhône non aménagés (Ardèche, Eyrieux, Drôme). Les tests réalisés montrent qu'il s'agit de méthodes robustes et aisément transposables pour la

compréhension des échanges nappes/rivières en milieu alluvial.

Un guide méthodologique qui servira de fondement à des travaux ultérieurs sur les échanges nappes/rivières.

Dans la continuité de ce travail, le projet NAPROM financé par l'ONEMA, à vocation plus nationale, vise à poursuivre cette approche sur d'autres bassins versants, intégrant d'autres méthodes de diagnostic pour d'autres natures d'aquifères

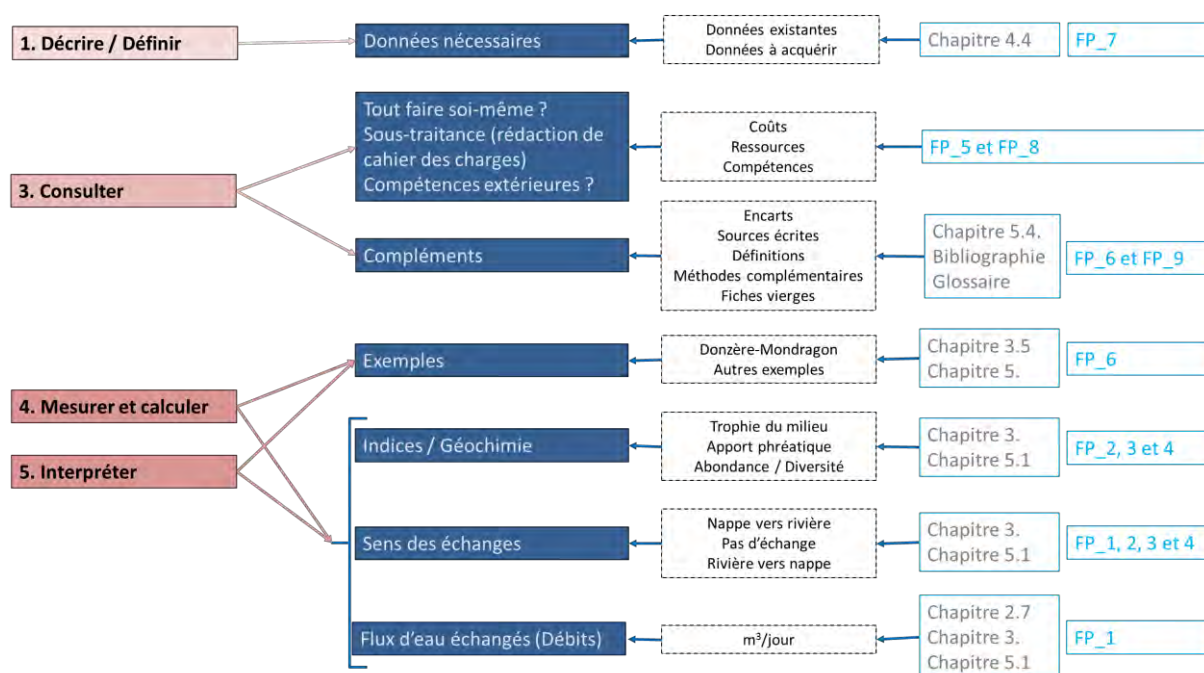
Pour les milieux alluvionnaires le projet de guide technique national renverra sur le présent guide sur les aspects méthodologiques.

Sur le bassin du Rhône les travaux se poursuivent avec la mise au point de nouveaux outils et méthodes pour caractériser les échanges en domaine karstique.



Un barrage de castor sur un contre-canal du côté de Brégnier-Cordon (01) (© F. Paran)

Annexes : FICHES PRATIQUES (FP) pour l'application et la mise en œuvre de la méthode de caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvial



Repère 7 : Lien entre chapitres du guide et Fiches Pratiques

Comme cela a déjà été évoqué à plusieurs reprises dans le guide, les annexes sont composées de Fiches Pratiques qui permettent d'obtenir des informations complémentaires par rapport à son contenu principal. Ces fiches proposent aussi des sources d'informations supplémentaires. En somme, les annexes répondent à la question suivante :

Où trouver des informations complémentaires et supplémentaires ?

Les annexes sont composées de 9 Fiches Pratiques : 7 concernant les méthodes, 1 synthétisant les résultats sur les sites où nous avons précédemment diagnostiqué les échanges nappes/rivières sur le Rhône et 2 proposant des sources d'informations complémentaires.

Informations complémentaires pour chacune des méthodes

FP_1. Hydro

Cette fiche apporte les informations nécessaires pour lire et fabriquer une carte piézométrique. Elle apporte des informations complémentaires pour générer un modèle TIN, procéder à l'analyse géomatique et effectuer les différents calculs (angle d'échange, débit, incertitude).

Des informations complémentaires, issues du travail de thèse de Lalot (2014) décrivent des outils de détection des données aberrantes et de reconstitution de données manquantes.

FP_2. Géochimie

Cette fiche décrit les procédures de prélèvement, les protocoles de mesures sur site et en laboratoire pour la géochimie. Des compléments d'information sont aussi disponibles pour la chimie isotopique.

FP_3. Végétaux aquatiques

Cette fiche présente le protocole d'échantillonnage des macrophytes ainsi qu'une liste des principaux ouvrages de détermination des végétaux aquatiques, accompagnée de quelques illustrations de plantes. De plus, la méthode de calcul des différents indices est détaillée (trophie, apport phréatique, alluvionnement, indice global).

FP_4. Invertébrés souterrains

Comme pour les végétaux aquatiques, cette fiche contient le protocole d'échantillonnage de la faune interstitielle et une liste d'ouvrages d'identification des invertébrés souterrains, accompagnée de quelques photos. Le calcul de l'indice γ est détaillé.

Chacune des 4 fiches précédentes (FP_1, 2, 3 et 4) est accompagnée d'un check liste du matériel nécessaire pour effectuer le travail de terrain.

FP_5. Estimation des coûts (temps de travail)

Pour chaque méthode, une estimation des coûts est présentée sous forme de tableau. Ces coûts sont donnés en nombre de jours de travail et en nombre de personnes nécessaires.

FP_6. Synthèses des sites diagnostiqués sur le fleuve Rhône

Les sites étudiés dans le cadre du projet échanges nappes/Rhône sont présentés sous forme de fiches

synthétiques dans cette annexe. Les échanges nappes/rivières ont été caractérisés pour les secteurs suivants :

- Brégnier-Cordon,
- Péage-de-Roussillon,
- Beauchastel,
- Donzère-Mondragon.

Ces fiches synthétiques sont organisées de la façon suivante :

- Description rapide du site (localisation, débits caractéristiques du Rhône, géologie et hydrogéologie, aménagements CNR),
- Données utilisées,
- Résultats et cartes de synthèse,
- Références bibliographiques.

Pour Brégnier-Cordon, des exemples concernant les conséquences de la prise en compte des échanges nappes/rivières pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité sont donnés. De plus, deux approches complémentaires fondées sur des indicateurs paysagers et géomorphologiques permettent de compléter le diagnostic des échanges nappes/rivières sur le secteur. Des compléments d'information sur cette question issus des travaux de thèse de Capderrey (2013) sont aussi présentés.

FP_9. Tableaux et fiches vierges

Cette fiche contient les tableaux et fiches vierges pour l'aide à la sélection des outils présentés dans ce guide.

Sources d'informations supplémentaires

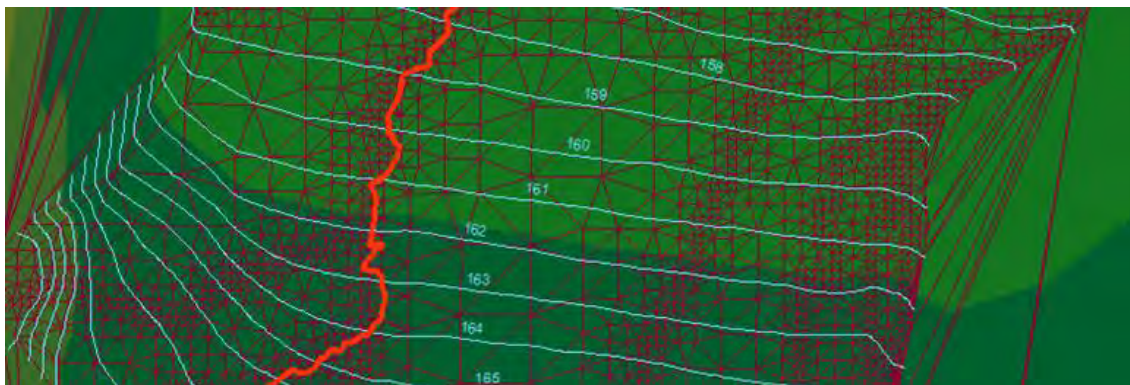
Les deux dernières Fiches Pratiques renvoient vers des sources d'informations supplémentaires : bases de données et personnes ressources.

FP_7. Bases de données consultables

Organisée sous forme de tableau, cette fiche recense les principales sources de données, principalement accessibles en ligne, qui peuvent être utiles pour se lancer dans la caractérisation des échanges nappes/rivières.

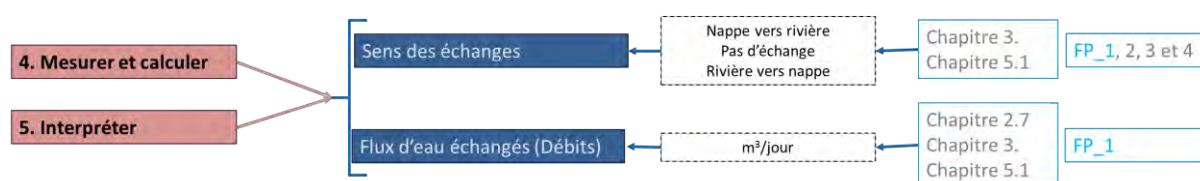
FP_8. Personnes ressources et compétences

Cette fiche contient les coordonnées électroniques et les compétences des personnes ayant participé à l'élaboration de la méthodologie interdisciplinaire de caractérisation des échanges nappes/rivières.



TIN de la nappe de l'III (triangles violets). La rivière est indiquée par le trait rouge et les courbes piézométriques de la nappe en bleu avec l'altitude en mètres.

FP_1. HYDRO : DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE AU MODELE TIN



Repère 8 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°1

I. Lecture de cartes piézométriques / Objectifs et modalités des mesures piézométriques en nappe libre / Fabriquer une carte piézométrique

Quand on regarde une carte piézométrique, le sens d'écoulement de l'eau souterraine se fait perpendiculaire aux isopièzes (courbe isochrone pour laquelle tous les points ont la même cote) dans le sens de la pente (des cotes les plus élevées vers les cotes les plus basses).

Généralités

Pour connaître, évaluer, mesurer le niveau d'eau dans les nappes phréatiques, il faut disposer de points d'observation dans le milieu naturel. Ces mesures ponctuelles pourront être interpolées pour réaliser une cartographie du niveau de la nappe (carte piézométrique). Une telle interpolation peut être effectuée à la main ou en utilisant les algorithmes appropriés (ex : fonctions d'interpolation du logiciel ARCGIS).

Les piézomètres sont des points d'observation. Ce sont des forages de diamètre réduit (environ 200mm) tubés généralement en PVC qui sont creusés sur au moins les 2/3 de l'épaisseur de la nappe.

Les piézomètres ne sont pas creusés jusqu'au substratum imperméable qui constitue le fond (mur) de l'aquifère. En effet, l'eau souterraine doit pouvoir pénétrer dans le piézomètre afin que son niveau dans le piézomètre soit en équilibre avec la

nappe (s'il s'agit d'une nappe libre) et donc représentatif du niveau dans la nappe.

Protocole de mesure

La mesure du niveau d'eau dans la nappe s'effectue à l'aide d'un matériel portable qui est une sonde sonore ou/et lumineuse. Le capteur est situé à l'extrémité d'un ruban gradué. Lorsque le capteur de la sonde rentre en contact avec l'eau du piézomètre, un contact électrique s'établit et actionne un témoin sonore ou/et lumineux en surface. Il faut alors arrêter le déroulement du ruban et repérer la profondeur à laquelle se situe l'eau souterraine sur le ruban gradué.

A cette mesure de profondeur, il faudra retrancher la hauteur du piézomètre dépassant au-dessus du niveau du sol. Une mesure fiable nécessite un nivellement précis réalisé à l'emplacement du piézomètre (coté NGF). Dans ces conditions, l'erreur de mesure peut être minimale et de l'ordre de 2 à 3cm.

Ce protocole est applicable aux mesures de niveau d'eau dans les puits. Le niveau mesuré est soumis à des fluctuations qui dépendent le plus souvent de conditions saisonnières, qui influencent les périodes de hautes-eaux et les périodes de basses-eaux (étiages) dans les nappes.

Précautions

Attention !!

Les mesures de niveau d'eau souterraine dans les piézomètres et le puits peuvent devenir difficiles pour plusieurs raisons :

- (1) Piézomètre ou puits obstrué ou fermé,
- (2) Colmatage du fond du piézomètre ou du puits,
- (3) Nivellement inexistant ou faux.

Dans le cas (1), cela rend la mesure impossible, pour (2) et (3) la mesure ne sera pas représentative.

Pour réaliser une campagne de mesures, il est indispensable d'effectuer ces mesures pendant la

même période. Chaque mesure doit être identifiée avec sa date.

Autres usages

L'examen de la carte piézométrique indiquant les courbes d'égale altitude de l'eau de la nappe (courbes hydroisohypses) permettra : 1) d'identifier les zones de dômes ou de creux piézométriques ; 2) de calculer le gradient hydraulique ou pente de la nappe,

Les piézomètres peuvent être aussi équipés avec des enregistreurs de niveau en continu.

Des prélèvements pour analyse sont possibles dans les piézomètres à l'aide de matériel approprié (préleveur en piézométrie).



Drain vertical ou piézomètre de décharge d'une nappe en charge dans un contre-canal à Brégnier-Cordon (01) (© F. Paran)

II. Générer un modèle TIN et procéder à l'analyse géomatique

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

La méthode permet de calculer et représenter l'angle d'échange entre une nappe et un cours d'eau, pour des aquifères alluviaux, ceci afin de déterminer le potentiel d'échange. Par exemple, si l'échange se fait dans le sens nappe vers rivière et si le sens d'écoulement de la nappe est perpendiculaire à celui du cours d'eau, l'échange sera potentiellement important ; si au contraire les deux écoulements sont parallèles, l'échange sera nul.

Il convient donc de calculer et représenter les sens d'écoulement du fleuve et de la nappe pour connaître l'angle d'échange. Cette méthode est fondée sur l'utilisation des propriétés des TIN (Triangulated Irregular Network). Ils sont utilisés pour générer des surfaces, constituées d'un réseau de triangles irréguliers, à partir de données ponctuelles ou linéaires. Chaque triangle contient une valeur d'altitude (elevation), de pente (slope) et d'angle (aspect).

Les boîtes à outils indiquées dans la procédure ci-dessous sont celles proposées par le logiciel SIG ArcInfo (ARCGIS version 10.1 ©Esri).

Géoréférencement des données

Certaines données ou informations disponibles uniquement au format papier ou au format numérique image (ex : jpeg, tiff) doivent être au préalable géoréférencées afin de pouvoir être utilisées sous SIG. Dans ArcInfo la fonction permettant cette action s'appelle « Georeferencing ». Pour la France, le système de projection géographique sélectionnée est

généralement le Lambert 93 (RGF 1993 Lambert-93). Il est aussi possible de travailler dans un système de coordonnées géographiques, par exemple, le WGS 84 (World Geodetic System 1984 – Système géodésique Mondial, révision de 1984).

Digitalisation des données

Une fois le géoréférencement d'une image effectué, il est nécessaire de digitaliser l'information qui nous intéresse au format « shapefile » (shp). Il est possible de créer trois types de « shapefile » avec la fonction « Create Features » :

- « shapefile » de points : pour digitaliser par exemple le positionnement de puits,
- « shapefile » de polygones : pour digitaliser par exemple les courbes isopièzes d'une carte piézométrique,
- « shapefile » de polygones : pour digitaliser par exemple des champs de perméabilité.

En plus de l'information géographique, les « shapefile » contiennent des tables attributaires dans lesquelles il est possible de stocker l'information liée aux objets digitalisés (ex : niveaux de nappes, valeurs de perméabilité des alluvions...).

Génération des TIN

Générer des Tin sous ArcInfo s'effectue avec la fonction « Create TIN ». Deux TIN doivent être créés : un TIN de nappe et un TIN cours d'eau.

Génération du TIN cours d'eau

La création du TIN cours d'eau a pour objectif de disposer de données et d'une représentation du sens d'écoulement du cours d'eau. La couverture de départ dont on doit disposer est un « shapefile » de polygones des berges (lônes ou contre-canaux selon le cas) d'une rive du cours d'eau en contact avec la nappe. Il est bien sûr possible de travailler consécutivement sur la rive gauche et la rive droite.

Pour obtenir le sens d'écoulement, la démarche, présentée ici de manière simplifiée, est la suivante :

- découpage de la polygone des berges en petits segments indépendants avec la fonction « Split line at vertices »,
- création d'une zone tampon de 100m autour de la polygone de berge du cours d'eau avec la fonction « Buffer »,
- génération d'un TIN à partir de la polygone représentant la berge du cours d'eau étudié et la limite fixée par la zone tampon avec la fonction « Create TIN ».

Pour calculer l'orientation des segments on construit un tampon (buffer) de 100m sur la polygone de berge (non splitée); une valeur quelconque (100 par exemple) a été affectée à la

ligne limite extérieure du tampon, les rives proprement dites restant à une valeur de 0. Le TIN circonscrit au fleuve et à la zone tampon donne pour chaque triangle une valeur « aspect » (angle) qui correspond à la perpendiculaire au vecteur de rive local ; la pente (slope) est de 100% (45°), dans tout le buffer. L'orientation de chaque vecteur unitaire de rive est calculée par simple soustraction de 90° à l'angle d'orientation.

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

Il est ensuite nécessaire de transformer le TIN en triangle (shapefile de polygone) avec la fonction « Tin to triangle » pour affecter les valeurs d'angle à chaque polygone triangle. Pour finir, l'affectation des valeurs d'angles des polygones triangles aux segments de berge se fait avec la fonction « Intersect ». Cette dernière opération permet d'obtenir une couverture SIG pour représenter le sens d'écoulement du cours d'eau. Si la rivière s'écoule approximativement vers l'ouest, l'angle est d'environ 270°, si elle s'écoule approximativement vers le sud, l'angle est d'environ 180°. Ce sens est identique à celui que l'on peut interpréter sur une carte topographique quand on connaît la source et l'exutoire d'un fleuve. Si cette lecture est quasi intuitive pour le cerveau humain, elle nécessite, comme nous venons de le voir, plusieurs opérations pour être réalisée sous SIG.

Génération du TIN de nappe

La création du TIN de nappe a pour objectif de disposer de données et d'une représentation du sens d'écoulement de la nappe. La couverture de départ est un « shapefile » de polygones d'une carte piézométrique. Il est de plus nécessaire d'utiliser des « shapefile » contenant les limites du secteur étudié (polygones), le niveau du cours d'eau synchrone (polygones ou points) afin de générer un TIN cohérent avec le comportement de l'aquifère sur le secteur. Pour obtenir le sens d'écoulement de la nappe, la démarche, présentée ici de manière simplifiée, est la suivante :

- génération d'un TIN avec les couvertures citées ci-dessus (« Create TIN »),
- transformation du TIN en triangle (« Tin to triangle »),
- affectation des valeurs d'angles des polygones triangles aux segments de berge (« Intersect »).

Cette dernière opération permet d'obtenir une couverture représentant le sens d'écoulement de la nappe au niveau des berges du cours d'eau. Si la nappe s'écoule approximativement vers le sud-ouest l'angle est d'environ 235°, si elle s'écoule approximativement vers le nord-ouest l'angle est d'environ 315°. Le sens d'écoulement de la nappe est le même que celui obtenu après interprétation d'une carte piézométrique : c'est-à-dire perpendiculaire aux isopièzes dans le sens de la pente.

Il est ainsi possible de créer une carte du niveau piézométrique de la nappe en 3 dimensions.

Calcul de l'angle d'échange

L'angle d'échange nappes/cours d'eau (D) est obtenu par soustraction de l'angle marquant le sens d'écoulement de la nappe à celui du cours d'eau. Cette opération s'effectue dans la table attributaire du « shapefile » de berge, qui contient les deux valeurs d'angles, avec la fonction « Field calculator » permettant d'effectuer des soustractions.

Selon le cas, on peut observer des secteurs où l'écoulement de la nappe et du cours d'eau sont quasiment parallèles (de 20° à -20°) et donc les échanges nuls ; des secteurs où la rivière draine la nappe (angles de 80° à 100°) ; des secteurs où le cours d'eau alimente la nappe (angles de -80° à 100°).

Calcul du débit échangé

Il est possible de représenter les débits de nappe à l'interface nappes/rivières à l'aide des gradients calculés (i) dans le TIN de nappe (pente ou slope) en utilisant la Loi de Darcy. La fonction « Intersect » utilisée précédemment a permis d'affecter l'information des triangles du TIN à chaque segment de la polyligne de berge. Pour chacun de ces segments il conviendra aussi d'attribuer :

- une valeur de perméabilité des alluvions (K en m/s),
- une valeur de section d'échange (A en m²) évaluée par soustraction du niveau de nappe à l'interface nappes/rivières et niveau du fond du cours d'eau,
- une valeur pondérant l'intensité de l'échange. On utilise ici le sinus de l'angle d'échange (D). Pour calculer le sinus de cet angle, il faut penser à transformer un angle généralement exprimé en degrés en un angle exprimé en radian. Cette transformation peut être effectuée selon la formule suivante :

$$\theta_{rad} = \theta_{deg} \cdot (\pi/180)$$

avec $\pi/180 = 0,017453293$

Le calcul de débit échangé se fait donc dans la table attributaire avec la formule suivante :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = K \cdot A \cdot i \cdot \sin(D)$$

Pour obtenir le débit en m³/jour il suffit de multiplier la valeur obtenue par 86 400 ; en effet 1 journée vaut 86 400 secondes.

Pour obtenir le débit total échangé pour chaque segment de polyligne de berge, il faut ensuite multiplier la valeur de débit obtenue par la longueur (L) du segment de polyligne considéré (en m).

Détermination de l'incertitude (erreur relative) sur le débit calculé

L'erreur relative sur l'estimation du calcul du débit peut être obtenue en utilisant la formule suivante :

$$\Delta Q/Q = \Delta K/K + \Delta i/i + \Delta A/A + \Delta \sin(D)/\sin(D)$$

Avec $\Delta Y/Y = (Y_{max} - Y_{min}) / Y_{moyen}$

Pour éclaircir cette formule, nous proposons un exemple. Tout d'abord, commençons par calculer l'erreur relative sur la perméabilité des alluvions, variable importante dans la Loi de Darcy.

$$\Delta K/K = (K_{max} - K_{min}) / K_{moyen}$$

D'une manière générale, on peut considérer la perméabilité dans les alluvions comprise entre $5 \cdot 10^{-4}$ (Kmin) et $5 \cdot 10^{-2}$ m/s (Kmax). Si l'on considère la Kmoyen comme la moyenne de ces deux valeurs ($K_{moyen} = 2,53 \cdot 10^{-2}$), alors l'erreur relative sur la perméabilité est la suivante :

$$\Delta K/K = (5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}) / 2,53 \cdot 10^{-2}$$

$\Delta K/K = 1,96$ (soit 196%)

Si l'on prend, une valeur de perméabilité moyenne des alluvions issue de la littérature ($K = 10^{-3}$), ce qui a plus de sens, alors :

$\Delta K/K = 49,5$ (soit 4950%)

On peut calculer ensuite l'erreur relative sur les autres variables de la Loi de Darcy :

Pour le gradient (i), si l'on estime une erreur sur (H) de 10cm et de 25m sur (L) alors :

$\Delta i/i = 0,25$ (soit 25%)

Avec des données plus précises, soit une erreur sur (H) de 1cm et de 1m sur (L) alors :

$\Delta i/i = 0,022$ (soit 2,2%)

Pour la section d'échanges (A), si l'on estime une erreur de 5m alors :

$$\Delta A/A = 1 \text{ (soit 100\%)}$$

Pour terminer, si l'on estime une erreur de 10° sur l'angle d'échange (D) alors :

$$\Delta \sin(D)/\sin(D) = 0,35 \text{ (soit 35\%)}$$

Au total si on additionne les valeurs relatives pour chaque variable, avec la meilleure précision pour (i) et en tenant compte d'une perméabilité moyenne des alluvions donnée par la littérature alors :

$$\Delta Q/Q = 49,5 + 0,022 + 1 + 0,35$$

$$\Delta Q/Q = 50,872 \text{ (soit 5087,2\%)}$$

Avec la moyenne des perméabilités on obtient :

$$\Delta Q/Q = 1,96 + 0,022 + 1 + 0,35$$

$$\Delta Q/Q = 3,332 \text{ (soit 333,2\%)}$$

Ces exemples, nous montrent que c'est la perméabilité qui est la source d'erreur principale.

Sur le secteur de Donzère-Mondragon, en reprenant des erreurs relatives identiques sur les variables (i), (A) et $\sin(D)$ et en considérant l'erreur relative sur (K) de la façon suivante :

$$\Delta K/K = (2 \cdot 10^{-2} - 2,5 \cdot 10^{-3}) / 5 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta K/K = 3,5 \text{ (soit 350\%)}$$

Au final, on considère une erreur relative sur le secteur de Donzère-Mondragon égale à :

$$\Delta Q/Q = 4,87 \text{ (soit 487\%)}$$



Extraction de granulats en milieu alluvionnaire(01): on observe l'affleurement de la nappe alluviale (© L. Cadilhac).
La présence de gravières peut modifier les écoulements souterrains et influencer sur les échanges nappes/rivières.

III. Outils de détection des données aberrantes et de reconstitution de données manquantes

Dans de nombreux cas, les données disponibles sous formes de séries temporelles (précipitations, niveaux piézométriques, niveaux d'eau en rivière,...) présentent des lacunes, ou des valeurs aberrantes. Les appareillages d'enregistrement en continu tombent en effet parfois en panne. Des dérives dans le temps, des phénomènes « d'écrtages », ou encore des modifications de la sensibilité des capteurs, peuvent apparaître, après un certain intervalle de temps de mesure. A cela, des erreurs

humaines peuvent parfois s'ajouter : par exemple, apparition de sauts de valeurs lorsque deux morceaux de chronique sont mis bout à bout, absence de correction temporaire des effets atmosphériques (pour les niveaux piézométriques).

Par conséquent, il peut s'avérer nécessaire, avant toute utilisation ultérieure des données, de commencer par identifier les périodes sur lesquelles les données paraissent aberrantes.

De nombreuses méthodes existent, pour détecter les données aberrantes :

- un contrôle des valeurs limites peut être effectué : celles-ci appartiennent-elles à l'intervalle attendu ? A titre d'illustration, des précipitations ne peuvent être négatives !

- la détection visuelle, à partir d'un tracé graphique des observations, est souvent possible et offre la possibilité de détecter aisément une grande partie des irrégularités. Le principal problème de cette méthode provient du fait que les choix réalisés dépendent fortement de l'opérateur,

- une comparaison de la distribution statistique des données entre différents intervalles peut permettre de détecter des anomalies qui ne sont pas toujours identifiables visuellement (test du Khi-deux par exemple), et surtout l'effet « observateur » est diminué. Le choix qui doit être fait est celui du pourcentage de probabilité que l'on définit comme risque d'erreur acceptable pour établir que les différentes séries ont, ou non, la même distribution. Le tracé d'une variable en fonction d'une autre (par exemple un niveau piézométrique mesuré en deux points voisins) offre une possibilité d'identification des périodes sur lesquelles le comportement de ces variables s'écarte,

- Les analyses multivariées (ACP, analyse en composantes principales notamment) peuvent être utilisées afin de détecter des valeurs anormales (comme des séries temporelles dont le comportement diffère de toutes les autres),

- des modèles qui permettent de reproduire les signaux observés à partir d'autres facteurs, dits explicatifs, sont également utiles (leurs fonctionnements sont décrits par la suite). Lorsque le signal modélisé diffère fortement du signal observé, ce dernier peut être mis en doute.

Une thèse sur la question

Cette partie sur la question de la détection de valeurs aberrantes et de reconstitution de données fait partie du travail de thèse d'Eric Lalot (2014) intitulé : « Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières - application au Rhône ».

Dans le cadre de ce travail, trois types d'outils sont mobilisés : les modèles déterministes, les modèles boîte noire et les modèles d'analyse multivariée spatiale. La complémentarité des résultats obtenus avec ces méthodes est analysée sur le secteur de Péage-de-Roussillon, un secteur à forts enjeux socio-économiques concernant les usages de l'eau.

Au final le choix des méthodes est large et celles-ci sont de complexités très variables. Le choix entre les différentes méthodes de détection des données aberrantes dépend avant tout du type d'anomalie

présent dans les chroniques et de l'importance attachée à la détection des données aberrantes.

Enfin, il est nécessaire de remarquer qu'aucune technique ne pourra établir de manière certaine que les données aberrantes détectées sont réellement erronées. Des phénomènes physiques non pris en compte peuvent expliquer ces données. Le rejet de celles-ci pourrait alors conduire à une perte d'information. Au final ce sera toujours à l'utilisateur de trancher.

Quelques définitions

Ecrêtage : suppression d'une partie de l'amplitude d'un signal.

Modèle boîte noire : modèle qui permet de représenter le fonctionnement d'un système sans prendre en compte son fonctionnement interne réel.

Une fois la chronique « nettoyée », c'est-à-dire les données aberrantes écartées, quatre solutions existent :

- la première consiste à ne rien faire. Cette méthode est surtout valable lorsque les données manquantes sont peu nombreuses et qu'aucun traitement ultérieur des données n'est effectué (par exemple, si une représentation graphique des résultats suffit),

- une deuxième solution consiste à ne conserver que les plages de valeurs sur lesquelles aucune donnée n'est manquante. Cela n'est envisageable que s'il existe des intervalles sans lacunes suffisamment importants,

- des méthodes de repondération qui augmentent artificiellement le poids des valeurs jugées exactes, par rapport aux données lacunaires, peuvent parfois être utilisées, en fonction du traitement que l'on fait subir aux données. Il s'agit toutefois d'une méthode qui pose problème, surtout lorsque les périodes lacunaires diffèrent selon les séries de données,

- enfin, une reconstitution des données manquantes peut être nécessaire. Des méthodes stochastiques ou déterministes sont, à ce titre, employées.

Dans le premier cas, les valeurs manquantes peuvent être tirées aléatoirement à partir d'une distribution de probabilité connue (par exemple une loi normale). Il est cependant nécessaire de connaître le type de distribution des données.

Dans le second cas la reconstitution ne prend pas en compte les phénomènes aléatoires. On peut ainsi choisir de remplacer les données lacunaires par la moyenne des observations disponibles sur les plages non lacunaires. Toutefois, lorsque les lacunes sont trop nombreuses, le résultat n'est pas forcément satisfaisant.

Une meilleure solution consiste à tenter de reproduire la vraie donnée manquante. Cette reproduction peut faire appel à d'autres facteurs. Ainsi, le niveau piézométrique de la nappe peut être reconstitué à partir des « facteurs explicatifs » que sont la pluie, les volumes prélevés ou le niveau d'eau d'une rivière voisine. Il s'agit de choisir, non seulement les facteurs explicatifs, mais également le type de modèle qui doit être utilisé. Dans le cadre de la thèse d'Éric Lalot, des modèles « boîte noire » à entrée-sortie linéaire, et non linéaire, ont, tous deux, été utilisés. Des modèles à bases physique peuvent également être employés. La démarche consiste alors à caler les paramètres du modèle durant une période sur laquelle aucune lacune n'est présente. Dans un second temps, une fois le modèle calé, les données manquantes peuvent être

reconstituées, en gardant le même jeu de paramètre du modèle.

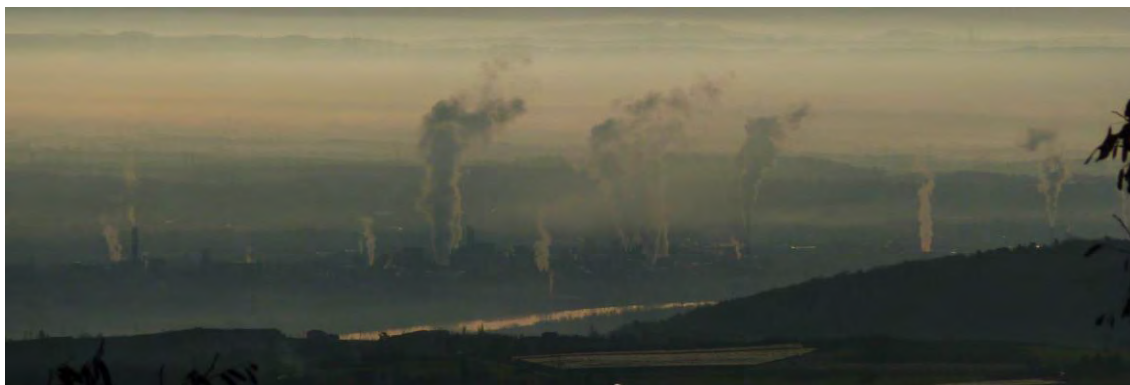
La reconstitution déterministe des données manquantes présuppose une connaissance préalable du système suffisamment importante. Lorsque tel n'est pas le cas un modèle stochastique peut-être préférable.

Dans certaines circonstances (cas de l'analyse en composante principale par exemple) des méthodes robustes, qui minimisent l'influence des valeurs aberrantes, ont été développées. Il est alors parfois possible de s'affranchir de la détection des valeurs aberrantes, puis de la reconstruction des chroniques. Toutefois, lorsque l'origine des erreurs est connue, et que celles-ci sont détectables, on gagnera généralement à remédier aux erreurs.

IV. Check list de terrain pour l'analyse géomatique

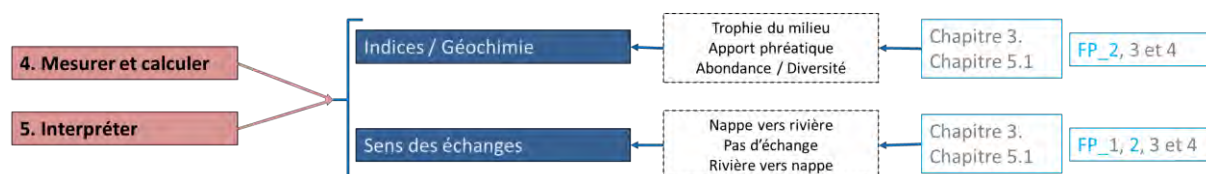
	Check
Matériel de mesure	
Sonde piézométrique	
Sonde bathymétrique	
Conductimètre	
Thermomètre	
GPS + antenne	
Appareil photographique	
Matériel d'enregistrement en continu	
Sondes enregistreuses,	
Socles des sondes	
Système de fixation des sondes	
Ordinateur de terrain	
Prise de notes	
Carnet de terrain / Fiche de terrain	
Crayon papier	
Orientation et informations	
Cartes IGN 1/25 000°	
Cartes géologiques BRGM 1/50 000°	
Boussole	
Marteau de géologue	
Rapports et études	
Outils et petit matériel	
Trousse de secours	
Caisse à outils	
Topofil	
Navigation	
Bateau gonflable + rames	
Gonfleur électrique et à pied	
Gilets de sauvetage + casques	
Moteur électrique + batterie + support	
Socle pour GPS et antenne	
Bidons et sacs étanches	

Tableau 12 : Check list de terrain pour l'analyse géomatique



L'eau souterraine : un enjeu pour l'industrie chimique. Ici dans la vallée du Rhône à Péage-de-Roussillon (38). Des activités pouvant être à même de perturber la chimie des eaux des nappes (© L. Cadilhac)

FP_2. GEOCHIMIE : PROTOCOLE ET INTERPRETATION



Repère 9 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°2

I. Procédure de prélèvement et mesures sur site et en laboratoire

Si pour les eaux superficielles, les prélèvements peuvent se faire directement, pour les eaux souterraines le prélèvement sera réalisé par pompage. L'IAEA (International Atomic Energy Agency) recommande de purger 3 fois le puits ou le piézomètre avant prélèvement. Une fiche rédigée par cette agence donne de nombreux renseignements concernant les procédures de prélèvement (IAEA, 2013).

Le pH, la température, la conductivité, la teneur en oxygène dissous et l'alcalinité des eaux souterraines seront mesurés in situ. Il est important de suivre les recommandations du constructeur des appareils de mesure, afin de bien respecter le temps de stabilisation des sondes pour l'obtention d'une valeur des paramètres fiables.

L'eau sera par la suite prélevée dans des flacons HDPE (High Density PolyEthylen) de 100ml pour les échantillons destinés à la mesure des concentrations des éléments majeurs et dans des flacons en verre ambré de 20ml entièrement remplis pour les échantillons destinés à l'analyse des isotopes de l'eau. Les échantillons seront par la suite acheminés au laboratoire de préférence stockés dans une glacière et à l'abri de la lumière. Au laboratoire, les échantillons seront stockés à 5°C et à l'abri de la lumière (réfrigérateur).

L'acquisition des données de pH, de température et de conductivité par exemple, pourra être automatisée par l'utilisation de sondes enregistreuses laissées à demeure dans les piézomètres ou les puits. Ceci permettra d'obtenir des séries temporelles de données physico-chimiques.

La concentration des éléments majeurs (Na^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} , PO_4^{2-}) sera mesurée en laboratoire sur des appareillages spécifiques (ex : chromatographie ionique). La filtration préalable de l'échantillon à 0,45 microns est nécessaire. Au besoin et selon les caractéristiques du site étudié, des éléments traces peuvent être visés. L'acquisition de l'alcalinité sur le terrain et de la concentration des éléments majeurs en laboratoire permet de calculer la balance ionique de l'échantillon considéré et ainsi de vérifier la qualité des mesures de concentration.

Aucun traitement préalable à la mesure ne sera appliqué aux échantillons de l'eau destinés à l'analyse des isotopes d'eau. L'acquisition des données $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ sera réalisée par des techniques de laboratoire sophistiquées (ex : spectrométrie de masse ou spectromètre d'absorption laser).

L'investissement pour réaliser soi-même les mesures isotopiques sur les prélèvements d'eau est

important. Il peut donc être plus économique de sous-traiter les analyses à un laboratoire spécialisé. Dans ce cas, il est impératif de suivre les préconisations du prestataire.

A titre d'information, en 2013, l'achat d'un appareil pour analyser soi-même les isotopes est de l'ordre de 70 000€. Le coût de l'analyse d'un couple d'isotope pour un échantillon est de l'ordre de 60€, celle des anions/cations est de l'ordre de 30€.

II. Isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène : informations complémentaires

Les isotopes stables de l'eau (^{18}O , ^{16}O , Deutérium ou ^2H) sont utilisés pour identifier l'origine des eaux dans des environnements variés (Coplen et Kendall, 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. Elle s'exprime en rapport isotopique ($R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ pour $^2\text{H}/^1\text{H}$). Elle se mesure en δ pour mille par rapport à un standard (SMOW) de valeur voisine à la composition isotopique moyenne des océans :

$$\Delta = \{R_{\text{échant.}}/R_{\text{standard}} - 1\} \times 1000$$

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}O) que la température est basse.

Le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD des précipitations alimentant les rivières et les nappes sont donc principalement contrôlés par la température de surface lors de la formation des pluies : on observe un effet de latitude qui ne sera pas visible dans les études à l'échelle d'une section de bassin versant dans le contexte du Rhône, auquel se superposent un effet saisonnier et également un effet d'altitude qui seront tous deux visibles à l'échelle d'un site d'étude.

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 si elles sont d'origine océanique (Figure 16).

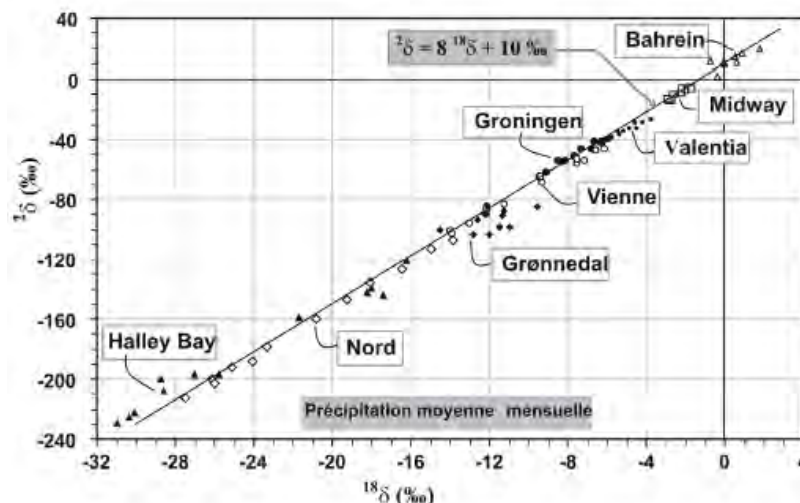


Figure 16 : Relation δD vs $\delta^{18}\text{O}$ pour les eaux de pluie. La droite des eaux météoriques mondiales est définie par la relation $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$. D'après Mook (2000)

L'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau étant considérés comme des éléments conservatifs dans les zones tempérées (pas d'évaporation significative) et en domaine de surface/subsurface sur de courtes périodes de temps, le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD

des eaux acquis lors de la formation des pluies sera conservé une fois que l'eau aura rejoint le système eau de surface/cours d'eau. La distribution des données δD , $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de rivières sur un diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$ décrira également une droite appelée droites des eaux météoriques locales. 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 ; Maréchal and Etcheverry, 2003 ; Barbieri et al., 2005).

Du fait de sa thermodépendance, le $\delta^{18}\text{O}$ 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}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 et des rivières marqués en moyenne par des valeurs de l'ordre de -10‰ à -11‰ (Rhône, Durance, Var) dans un contexte isotopique des zones basses, aux alentours 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.

$$^{18}\text{O}_m = f \cdot \delta^{18}\text{O} + (1 - f) \cdot \delta^{18}\text{O}_n$$

Avec :

$\delta^{18}\text{O}$: $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de la rivière en amont des échanges supposés

$\delta^{18}\text{O}_m$: $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau à l'endroit où mélange nappes/ rivière est supposé

$\delta^{18}\text{O}_n$: composition isotopique de l'eau de la nappe
f : fraction d'eau de la rivière dans le mélange.

De la même manière on notera δD la composition isotopique de l'hydrogène dans la molécule d'eau et on pourra utiliser ce paramètre pour des calculs de mélange.

Réalisée à partir de données ponctuelles dans l'espace et dans le temps, une telle approche reste semi-quantitative. Pour évaluer des flux, de manière quantitative, il est nécessaire d'acquérir des chroniques de données à partir de prélèvements espacés dans le temps.

Des mesures de radon-222 constituent une méthode alternative pour calculer les flux échangés entre nappes et rivières. Des mesures en continu sont possibles dans les cours d'eau. L'interprétation se fait après calibration de telles valeurs par rapport à des mesures en nappe.

III. Tritium

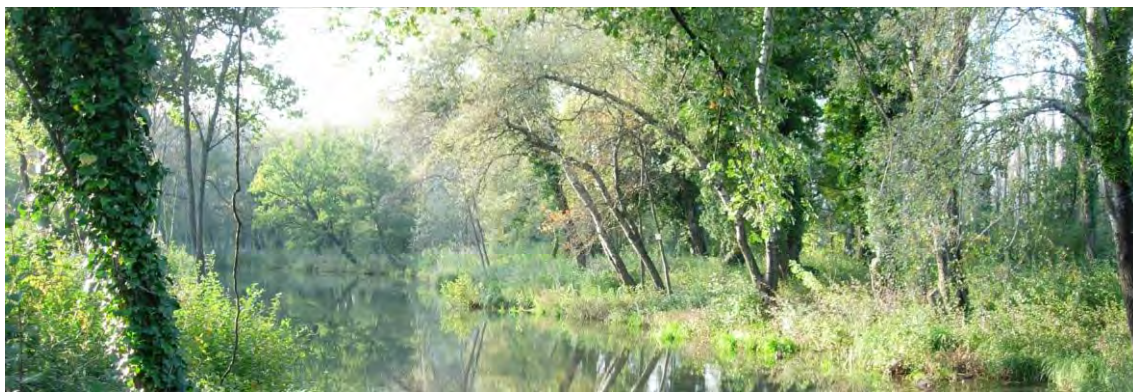
Le tritium est un isotope radioactif de période relativement courte (12,43 ans) qui permet, en général, de dater les eaux relativement récentes, mais sur une période très courte, de l'ordre d'un cycle hydrologique, et pour des concentrations élevées, il peut aussi être utilisé comme un marqueur stable. 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'hydrosystème. 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.

IV. Check list de terrain pour la géochimie

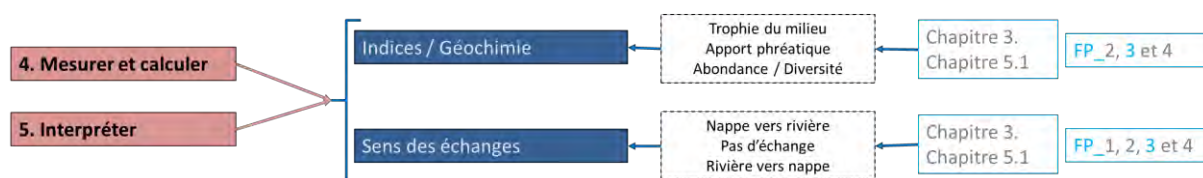
	Check
Matériel de mesure in situ	
Conductimètre	
Thermomètre	
Oxymètre	
pH-mètre	
Kit de Hach pour la mesure de l'alcalinité	
Flacon (pour faciliter la mesure)	
Matériel de prélèvement	
Flacon HDPE (Hight Density Poly-Ethylen) de 100ml (Eléments majeurs)	
Flacon en verre ambré de 20ml pour les isotopes (éviter les bulles d'air dans le prélèvement)	
Puits : pompe pour piézomètre, batterie portable, filtres et unités de filtrations, pompe à vide manuelle pour la filtration, bouteille d'échantillonnage	
Milieu interstitiel : piézomètre mobile, tête de frappe, masse, pompe péristaltique ou seringue de grande taille, bouteille d'échantillonnage	
Matériel d'enregistrement en continu	
Sondes enregistreuses	
Préleveurs	
Prise de notes	
Carnet de terrain / Fiche de terrain	
Crayon papier	

Tableau 13 : Check liste de terrain pour la géochimie



Une lône sur le secteur de Donzère-Mondragon. Certaines lônes sont fortement alimentées par les eaux souterraines (© P. Pautrat)

FP_3. VEGETAUX AQUATIQUES (MACROPHYTES) : PROTOCOLE ET CALCUL D'INDICE



Repère 10 : Liens entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°3

I. Echantillonnage

Les prélèvements sont effectués sur les points d'eau et zones humides (lônes, lacs, gravières, bords des cours d'eau...) non asséchées et accessibles. La méthode utilisée pour les relevés, identique sur tous les sites, est un transect de 2 mètres, perpendiculairement à l'axe d'écoulement. Suivant la taille du milieu échantillonné (ex : lônes de plusieurs centaines de mètres de longueur), plusieurs prélèvements sont réalisés (Figure 17).

Les différentes espèces végétales sont identifiées sur le terrain ou prélevées et déterminées en laboratoire grâce à des flores, leurs abondances étant estimées sur le site grâce au double indice d'abondance de Braun-Blanquet (1932) (Tableau 14). Ces indices permettent d'avoir 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 14 : Double indice d'abondance Braun-Blanquet (1932)



Azolla sp. sur une lône à proximité de Caderousse (84) : une plante qui témoigne d'apports souterrains (© F. Paran)

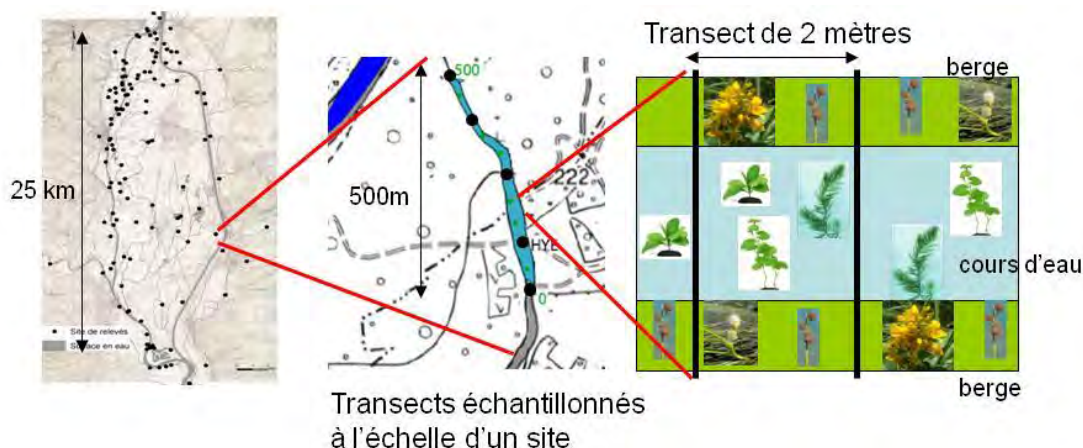


Figure 17 : Méthode d'échantillonnage des végétaux aquatiques et des macrophytes

II. Liste des principaux guides et ouvrages d'identification des végétaux aquatiques

Nous proposons une liste d'ouvrages qui aideront pour la détermination à l'espèce les végétaux aquatiques :

- Aeschimann D, Burdet HM, Arnoux A, Palese R, Perret P (2012) Flore de la Suisse Le nouveau Binz 3ème édition. Edition Haupt.
- Bailly B, Schaefer O (2010) Guide illustré des Characées du nord-est de la France. Edition du Conservatoire botanique national de Franche-Comté.
- Eggenberg S (2013) Flora Vegetativa - Un guide pour déterminer les plantes de Suisse à l'état végétatif 2ème édition. Edition Rossolis.

- Lambinon J, Delvosalle L, Jaques Duvigneaud J (2012) Nouvelle flore de la Belgique du G. D. de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines 6ème édition. Edition du Jardin botanique national de Belgique.

- Lauber K, Wagner G, Gygas A (2012) Flora Helvetica 4ème édition. Edition Haupt.

- Montégut J (1993) Le milieu aquatique : connaissance, entretien, désherbage. Association de Coordination Technique Agricole.

III. Espèces représentatives des apports phréatiques

Les illustrations des espèces présentées ci-avant (Illustrations 1 à 14) permettront de se faire une idée de ce à quoi ressemblent les végétaux

aquatiques dont la note d'apport phréatique est forte (=2).

Ces illustrations sont tirées de la Flore de Montégut (1993).



Une zone humide en relation avec la nappe alluviale (38) (© L. Cadilhac)

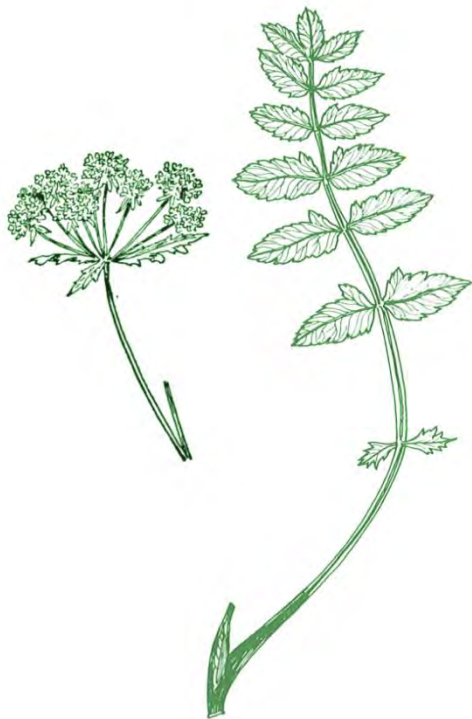


Illustration 1 (à gauche) : *Berula erecta* in Montégut (1993)
Illustration 2 (à droite) : *Chara major* in Montégut (1993)

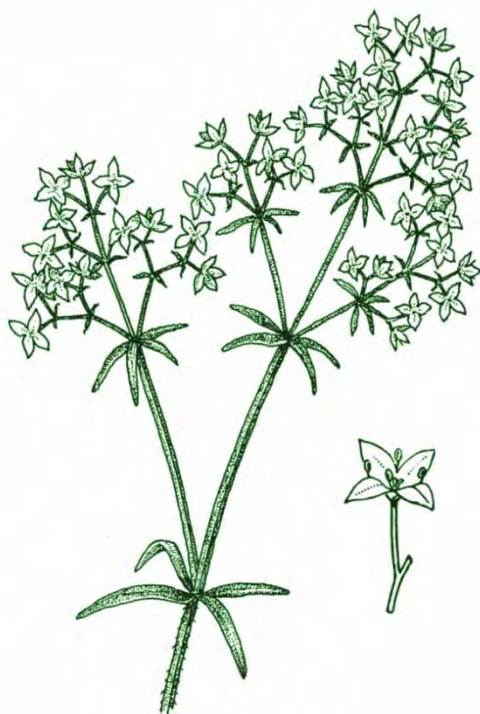
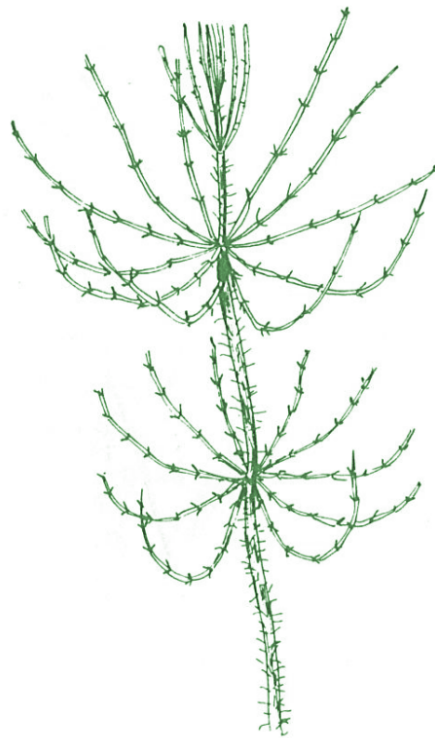


Illustration 3 (à gauche) : *Galium palustre* in Montégut (1993)
Illustration 4 (à droite) : *Groenlèndia densa* in Montégut (1993)



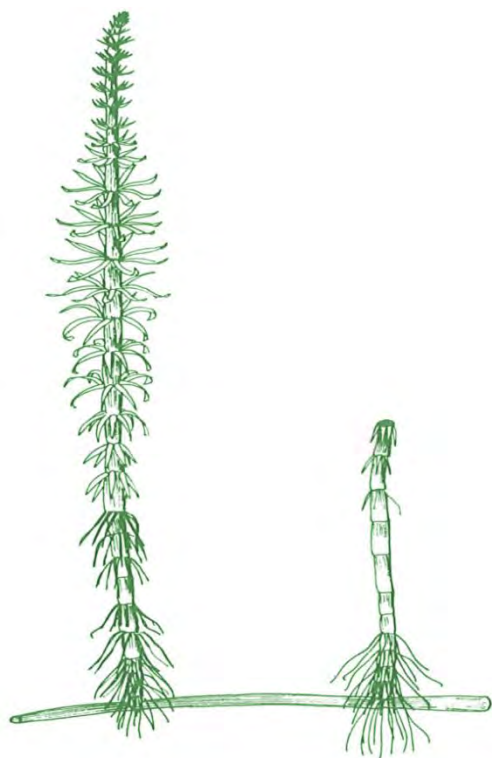


Illustration 5 (à gauche) : *Hippuris vulgaris* in Montégut (1993)

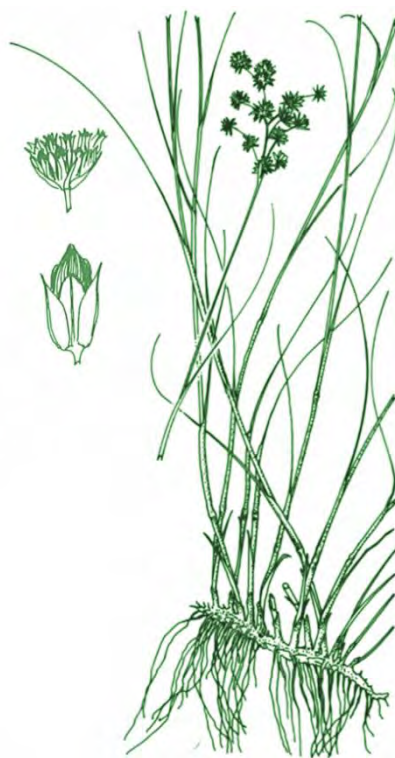


Illustration 6 (à droite) : *Juncus articulatus* in Montégut (1993)



Illustration 7 (à gauche) : *Lysimachia vulgaris* in Montégut (1993)



Illustration 8 (à droite) : *Mentha aquatica* in Montégut (1993)



Illustration 9 (à gauche) : *Myosotis scorpioides* in Montégut (1993)
Illustration 10 (à droite) : *Potamogeton coloratus* in Montégut (1993)

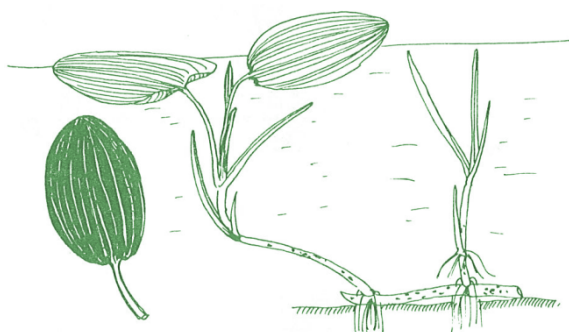


Illustration 11 (à gauche) : *Potamogeton natans* in Montégut (1993)
Illustration 12 (à droite) : *Ranunculus trichophyllus* in Montégut (1993)





Illustration 13 (à gauche) : *Sparganium emersum* in Montégut (1993)



Illustration 14 (à droite) : *Veronica anagallis-aquatica* in Montégut (1993)

IV. Calculs des indices

1) Notes pour chacune des espèces de végétaux aquatiques indicatrices (Tableau 15).

2) Exemple de calcul de l'indice trophique sur un site localisé sur le secteur de Donzère-Mondragon (Tableau 16).

3) Exemple de calcul de l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques sur un site localisé sur le secteur de Donzère-Mondragon (Tableau 17).

4) Exemple de calcul de l'indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe de versant sur un site localisé sur le secteur de Donzère-Mondragon. Cet indice est calculé en mettant en rapport les informations sur le niveau d'eutrophisation et

l'intensité des apports phréatiques, obtenues précédemment et à l'aide du Tableau 18.

Les valeurs des deux indices sont alors multipliées pour chaque site. Suivant le résultat de cette multiplication, la probabilité d'apport issu de la nappe de versant est établie :

- nulle, lorsque le résultat est 0 ou 1,
- faible, lorsque le résultat est 2,
- moyenne, lorsque le résultat est 3,
- forte, lorsque le résultat est 4, 6 ou 9.

5) Exemple de calcul du niveau relatif de perturbations sur un site localisé sur le secteur de Donzère-Mondragon (Tableau 19).

Espèces	Niveau de trophie				Alimentation souterraine		Perturbations par les crues				
	O	M	E	HE	O	N	Nul.	Fbl.	Moy.	Fr.	All.
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	0.5	3	2	0	0	0	1	3	2	1	2
<i>Azolla filiculoides</i>	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0
<i>Baldellia ranunculoides</i>	2	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0
<i>Berula erecta</i>	3	3	0.5	0.5	2	0	2	3	3	3	2
<i>Bidens tripartita</i>	0	0	2	2	0	0	1	1	1	1	0
<i>Callitriche platycarpa</i>	0.5	2	2	2	1	0	0.5	2	3	2	0.5
<i>Carex acutiformis</i>	1	2	3	1	0	0	3	3	0.5	0.5	0
<i>Carex elata</i>	0	0	0	0	0	0	3	3	2	0.5	0.5
<i>Carex pseudocyperus</i>	0	2	3	3	0	0	3	2	0	0	0
<i>Carex sp.</i>	0	0	0	0	0	0	3	3	1	0	0
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0.5	0.5	2	3	0	1	1	1	1	1	2
<i>Chara globularis</i>	0	0	2	0	1	0	0	2	0.5	0	0
<i>Chara hispida</i>	2	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0
<i>Chara major</i>	0.5	3	0.5	0	2	0	2	3	2	0.5	0
<i>Chara vulgaris</i>	1	3	2	0	1	0	0	3	3	2	0
<i>Chara sp</i>	1	1	1	0	2	0	1	2	1	1	0
<i>Cladium mariscus</i>	3	2	0	0	1	0	3	2	0	0	0
<i>Eleocharis acicularis</i>	2	3	0.5	0.5	1	0	0	2	3	2	0
<i>Elodea canadensis</i>	0.5	2	2	2	1	0	0.5	2	3	2	2
<i>Elodea nuttallii</i>	0	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2
<i>Equisetum fluviatile</i>	2	2	0	0	0	0	2	2	2	0	2
<i>Fontinalis antipyretica</i>	0.5	2	2	0	1	0	0	0	0	2	0
<i>Galium palustre</i>	2	3	1	1	2	0	0	0	0	0	0
<i>Glyceria fluitans</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0
<i>Groenlandia densa</i>	2	3	0	0	2	0	0	2	3	3	2
<i>Hippuris vulgaris</i>	3	2	0.5	0	2	0	2	2	3	1	3
<i>Hottonia palustris</i>	0	0	0	0	1	0	2	2	3	2	2
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	0	0	2	2	1	0	3	0	0	0	0
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Iris pseudacorus</i>	0	0	0	0	0	0	2	3	2	0.5	2
<i>Juncus articulatus</i>	3	3	2	0	2	0	2	3	2	1	0
<i>Juncus subnodulosus</i>	2	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0
<i>Lemna gibba</i>	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0
<i>Lemna minor</i>	0.5	0.5	2	3	0	1	0	0	0	0	0
<i>Lemna trisulca</i>	0	2	2	2	1	0	2	3	2	0	0
<i>Ludwigia palustris</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
<i>Luronium natans</i>	2	2	0	0	1	0	0	2	2	0	0
<i>Lycopus europaeus</i>	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
<i>Lysimachia nummularia</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0
<i>Lysimachia vulgaris</i>	0	0	0	0	2	0	2	3	0.5	0	3
<i>Lythrum salicaria</i>	2	3	2	0.5	0	0	3	2	1	1	3
<i>Mentha aquatica</i>	3	3	2	0.5	2	0	2	3	2	0.5	3
<i>Menyanthes trifoliata</i>	2	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Myosotis scorpioides</i>	3	3	2	0.5	2	0	0.5	3	2	2	2
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0.5	2	3	3	0	0	1	2	2	3	3
<i>Myriophyllum verticillatum</i>	0	0	0	0	1	0	3	3	2	0	2
<i>Najas marina</i>	0	0.5	2	2	0	1	0	2	2	3	2
<i>Najas minor</i>	0	0.5	2	2	0	0	0	0	0	2	2
<i>Nasturtium officinale</i>	1	1	1	0	1	0	0	2	3	3	0
<i>Nuphar lutea</i>	0.5	2	2	3	0	0	3	2	2	0.5	3
<i>Nymphaea alba</i>	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0

Tableau 15 : Notation pour les espèces de végétaux aquatiques et de macrophytes

Niveau trophique : O – Oligotrophe ; M – Mésotrophe ; E- Eutrophe ; HE- Hyper-eutrophe

Alimentation souterraine : O – Oui ; N – Non

Perturbations par les crues : Nul. – Nulles ; Fbl. – Faibles ; Moy. – Moyennes ; Frt – Fortes ; All. - Alluvionnement

Espèces	Niveau de trophie				Alimentation souterraine		Perturbations par les crues				
	O	M	E	HE	O	N	Nul.	Fbl.	Moy.	Fr.	all.
<i>Nymphoides peltata</i>	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oenanthe fistulosa</i>	2	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0
<i>Oenanthe fluviatilis</i>	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Peucedanum palustre</i>	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
<i>Phalaris arundinacea</i>	0	0	0	0	0	0	0.5	2	2	3	3
<i>Phragmites australis</i>	1	2	2	3	0	0	3	2	1	1	2
<i>Polygonum amphibium</i>	0	0	2	1	0	0	2	2	0.5	0	0
<i>Polygonum hydropiper</i>	1	1	1	0.5	0	0	0.5	2	2	3	2
<i>Potamogeton coloratus</i>	3	2	2	0	2	0	2	2	0	0	0
<i>Potamogeton compressus</i>	0	0	2	0	1	0	2	3	0	0	0
<i>Potamogeton crispus</i>	0	0	2	1	0	0	1	1	1	1	0
<i>Potamogeton lucens</i>	0	1	1	1	1	0	3	3	0	0	2
<i>Potamogeton natans</i>	2	3	0.5	0.5	2	0	2	3	3	1	0.5
<i>Potamogeton nodosus</i>	0	0.5	2	3	0	1	0	2	2	3	3
<i>Potamogeton pectinatus</i>	0.5	2	3	3	0	1	0	0	0.5	3	3
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	0	0	2	2	1	0	0	0	0.5	0	2
<i>Potamogeton pusillus</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	2
<i>Ranunculus circinatus</i>	1	1	1	0	1	0	0	2	3	3	2
<i>Ranunculus fluitans</i>	0	2	2	2	0	0	0	0	0	3	0
<i>Ranunculus</i>	2	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0
<i>Ranunculus trichophyllus</i>	1	1	1	0	2	0	0	2	3	2	0
<i>Riccia fluitans</i>	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0
<i>Rorippa amphibia</i>	0	2	3	1	0	0	1	1	2	3	3
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	0	2	2	0	0	0	0	3	2	0	2
<i>Samolus valerandi</i>	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Scirpus lacustris</i>	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Scutellaria galericulata</i>	0	0	0	0	0	0	2	3	1	1	0
<i>Sparganium emersum</i>	3	3	2	0.5	2	0	0	3	3	2	2
<i>Sparganium erectum</i>	0	1	1	1	0	0	3	3	0	0	2
<i>Sparganium minimum</i>	2	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0
<i>Spirodela polyrrhiza</i>	0	0	2	2	0	0	1	1	1	1	0
<i>Stratiotes aloides</i>	0	0	2	2	0	0	2	2	2	0	0
<i>Theliparis palustris</i>	2	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0
<i>Trapa natans</i>	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Typha latifolia</i>	0	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Utricularia minor</i>	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Utricularia vulgaris</i>	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0
<i>Vallisneria spiralis</i>	0	0	2	1	0	0	0	0	0	3	0
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	3	2	1	1	2	0	0	2	2	1	2
<i>Veronica beccabunga</i>	1	1	1	0	0	0	0	2	2	2	0
<i>Wolffia arrhiza</i>	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Zanichellia palustris</i>	0	2	2	0	1	0	0	0.5	0	0	0

Tableau 15 (suite) : Notation pour les espèces de végétaux aquatiques et de macrophytes

Niveau trophique : O – Oligotrophe ; M – Mésotrophe ; E- Eutrophe ; HE- Hyper-eutrophe

Alimentation souterraine : O – Oui ; N – Non

Perturbations par les crues : Nul. – Nulles ; Fbl. – Faibles ; Moy. – Moyennes ; Frt – Fortes ; All. – Alluvionnement

Site 16		Niveau de trophie					Niveau de trophie calculé				
Espèces	Abondance		O	M	E	HE		O	M	E	HE
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1	X	0,5	0,5	2	3	=	0,5	0,5	2	3
<i>Elodea nuttallii</i>	3	X	0	2	2	2	=	0	6	6	6
<i>Lemna minor</i>	2	X	0,5	0,5	2	3	=	1	1	4	6
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1	X	0,5	2	3	3	=	0,5	2	3	3
<i>Polygonum hydopiper</i>	1	X	1	1	1	0,5	=	1	1	1	0,5
<i>Potamogeton nodosus</i>	1	X	0	0,5	2	3	=	0	0,5	2	3
<i>Potamogeton pectinatus</i>	1	X	0,5	2	3	3	=	0,5	2	3	3
								Total			
								3,5	13	21	24,5
								%			
								5,6	20,9	33,8	39,5

Tableau 16 : Calcul de l'indice trophique à Donzère-Mondragon

La plus grande valeur concerne le niveau de trophie hyper-eutrophe (39,5) ce qui indique que cette station est plutôt hyper-eutrophe

Site 16		Alimentation en eau souterraine	
Espèces	Abondance	Oui	Non
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1	0	1
<i>Elodea nuttallii</i>	3	0	0
<i>Lemna minor</i>	2	0	1
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1	0	0
<i>Polygonum hydopiper</i>	1	0	0
<i>Potamogeton nodosus</i>	1	0	1
<i>Potamogeton pectinatus</i>	1	0	1
Total		0	4
Calcul de l'indice		$0 - 4 = -4$ et $-4 < 0$ donc les apports phréatiques sont nuls	

Tableau 17 : Calcul de l'indice de fréquence relative à Donzère-Mondragon

La valeur de l'indice est -4, ce qui indique que les apports phréatiques sont nuls.

Trophie	Apport phréatique
hyper-eutrophe = 0	nul = 0
eutrophe = 1	faible = 1
mésotrophe = 2	moyen = 2
oligotrophe = 3	fort = 3

Tableau 18 : Codage des indices de trophie et d'apport phréatique.

Dans le cadre du site situé sur le secteur de Donzère-Mondragon (hyper eutrophe = 0 et apport phréatique nul = 0), on obtient une valeur de 0 en multipliant les deux indices, ce qui indique que la probabilité d'apports issus de la nappe de versant est nulle.

Site 16		Perturbation par les crues					Perturbation par les crues						
Espèces	Abondance		A	F	M	F	All		A	F	M	F	All
<i>C. demersum</i>	1	X	1	1	1	1	2	=	1	1	1	1	2
<i>E. nuttallii</i>	3	X	0	0	2	2	2	=	0	0	6	6	6
<i>L. minor</i>	2	X	0	0	0	0	0	=	0	0	0	0	0
<i>M. spicatum</i>	1	X	1	2	2	3	3	=	1	2	2	3	3
<i>P. hydopiper</i>	1	X	0,5	2	2	3	2	=	0,5	2	2	3	2
<i>P. nodosus</i>	1	X	0	2	2	3	3	=	0	2	2	3	3
<i>P. pectinatus</i>	1	X	0	0	0,5	3	3	=	0	0	0,5	3	3

Total	2,5	7	13,5	19	19
Total / Σ Abondance	0,25	0,7	1,35	1,9	1,9

Tableau 19 : Calcul du niveau relatif de perturbation à Donzère-Mondragon (A : Aucune ; F : Faible ; M : Moyenne ; All : Alluvionnement)

La plus grande valeur concerne le niveau de perturbation forte (1,9) ce qui indique que cette station est soumise à de forte perturbation par les crues.

V. Check liste de terrain

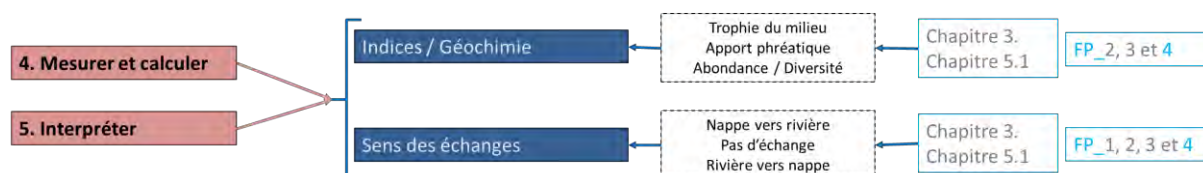
	Check
Matériel de mesure	
Règle de 2m	
Râteau télescopique	
Prise de notes	
Fiches de relevé végétation	
Bloc note	
Crayon(s) papier(s) si vite tombés dans l'eau	
Orientation et informations	
GPS, Topofil ou cartographie permettant de connaître la distance entre les transects	
Navigation	
Bateau (+ gonfleur) + rames	

Tableau 20 : Check liste de terrain pour la végétation aquatique



Gros plan sur un banc de graviers du Rhône : une interface d'importance pour les échanges eaux souterraines/eaux superficielles (© G. Poussard)

FP_4. INVERTEBRES SOUTERRAINS : PROTOCOLE ET INDICE



Repère 11 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°4

I. Echantillonnage de la faune interstitielle

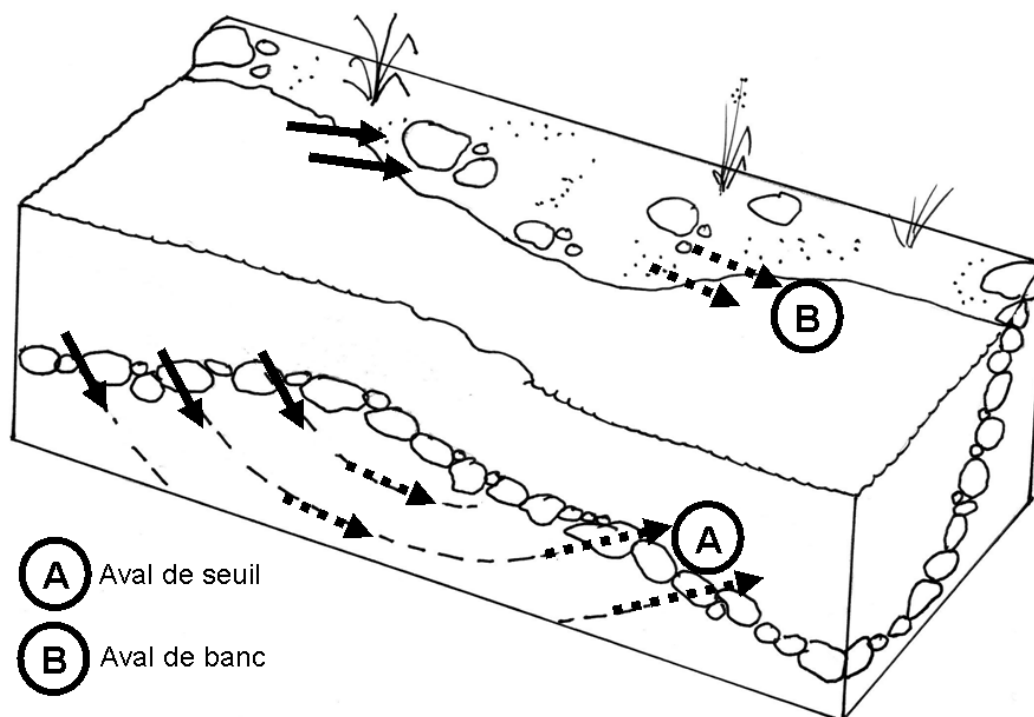


Figure 18 : Localisation des zones de remontée d'eau souterraine vers la surface dans la succession seuil-mouille d'un cours d'eau (Définie selon des critères géomorphologiques : doit être vérifiée à chaque cas).

Prélèvements dans le milieu interstitiel ou hyporhéique (sédiment des cours d'eau)

L'échantillonnage d'invertébrés dans les sédiments des cours d'eau et des zones humides est réalisé à l'aide de la méthode Bou-Rouch (Bou & Rouch, 1967). Les points de prélèvement sur chaque station doivent être positionnés sur des zones à forte probabilité d'apport d'eau souterraine, c'est-à-dire en aval de banc de gravier (en rive droite et gauche, figure 18) ou de seuil ou encore directement sur des zones de sources visibles (sources artésiennes, patch de sédiment clair indiquant une arrivée d'eau souterraine, etc...).

L'équipement (Illustration 15) comporte une sonde en acier de 5cm de diamètre et d'une longueur de 1,5 à 1,8m, perforée à son extrémité (6 rangées d'orifices de 5mm de diamètre). La longueur de la sonde peut s'adapter en fonction de la hauteur d'eau dans le milieu échantillonné.

La sonde est enfoncée dans le sédiment à l'aide d'une masse jusqu'à une profondeur de 50cm pour pomper 10 litres d'un mélange eau/sédiment dans un seau gradué à l'aide d'une pompe à main de type Norton. Trois prélèvements différents sont réalisés sur chaque point d'échantillonnage pour tenir compte de la variation spatiale de la faune. Le mélange est filtré sur place à l'aide d'un tamis avec un vide de maille de 100µm, puis il est stocké dans une boîte étanche après fixation avec de l'alcool à 96°. Finalement, les invertébrés sont triés, comptés et identifiés au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

Prélèvements dans les puits

L'échantillonnage d'invertébrés dans les puits est plus difficile. Dans tous les cas, les prélèvements sont impossibles dans les puits dont la crépine est équipée d'une chaussette car elle empêche la faune d'y pénétrer.

Dans les puits dont l'eau n'est pas utilisée pour l'alimentation, la première étape consiste à déposer des filets circulaires (ou balances) lestés de pierres

et appâtés (morceaux de foie ou de saucisson sec) dans le fond du puits. Les filets seront retirés le lendemain. La seconde étape correspond à un pompage de 40 litres à l'aide d'une pompe à piston, identique à celle utilisée dans la méthode Bou-Rouch ; la pompe est fixée sur un tuyau d'arrosage lesté d'environ 15m. Cette méthode permet l'échantillonnage de la faune non-carnivore qui n'est pas attirée par les appâts.

En revanche, le pompage manuel, à cause de la pression qui s'exerce sur le tuyau, n'est possible qu'à condition que le niveau piézométrique du puits ne dépasse pas 7 à 8m et que la profondeur totale de celui-ci ne soit pas supérieure à 17m. Dans le cas contraire, le pompage est remplacé par l'utilisation d'un filet à plancton vertical (ou filet Cvetkov, Illustration 16) qui permet de mettre en suspension et de collecter les invertébrés en faisant d'amples mouvements de haut en bas. Dans les puits utilisés comme source d'eau potable, l'utilisation de filets appâtés n'est pas possible et l'échantillonnage sera basé uniquement sur le pompage ou le filet à plancton.

Dans tous les cas, les échantillons seront filtrés sur place à l'aide d'un tamis avec un vide de maille de 100µm, puis stockés dans une boîte étanche après fixation avec de l'alcool à 96°. Finalement, les invertébrés sont triés, comptés et identifiés au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

Prélèvements dans les sources

L'échantillonnage des invertébrés dans les sources peut être réalisé à l'aide de filets à dérive (à la tombée de la nuit pour éviter des réactions de fuite des organismes souterrains). Les filets (Illustration 17) seront retirés le lendemain puis un pompage de type Bou-Rouch est réalisé lorsque la texture du fond de la source permet d'y enfoncer la sonde. Lorsque la forme de la source ne permet pas d'utiliser un filet à dérive, des petits filets appâtés avec des morceaux de viandes saignants ou du saucisson sec peuvent aussi être utilisés.

II. Liste des principaux guides et ouvrages d'identification des invertébrés souterrains

Il n'existe actuellement pas de clef de détermination simplifiée des invertébrés souterrains. Ce travail est généralement l'affaire de spécialistes. Nous pouvons toutefois conseiller quelques ouvrages de référence :

- Amphipodes : Ginet R (1996) Bilan Systématique du genre Niphargus en France, Société Linnéenne de Lyon, 242p.

- Isopodes : Henry JP, Magniez G (1983) Crustacés Isopodes (Principalement Asellotes). Association Française de Limnologie, 39p.

- Ostracodes : Meisch C (2000) Freshwater ostracoda of western and central Europe. Spektrum Akad. Verlag, Gustav Fischer, 522p.

- Copépodes et Mollusques : pas d'ouvrage disponible, contacter un spécialiste.

Les planches (illustrations) présentées ci-dessous permettront de se faire une idée de ce à quoi ressemblent les invertébrés souterrains : crustacés

ostracodes (Illustrations 18 et 19) et crustacés amphipodes (Illustrations 20 et 21).

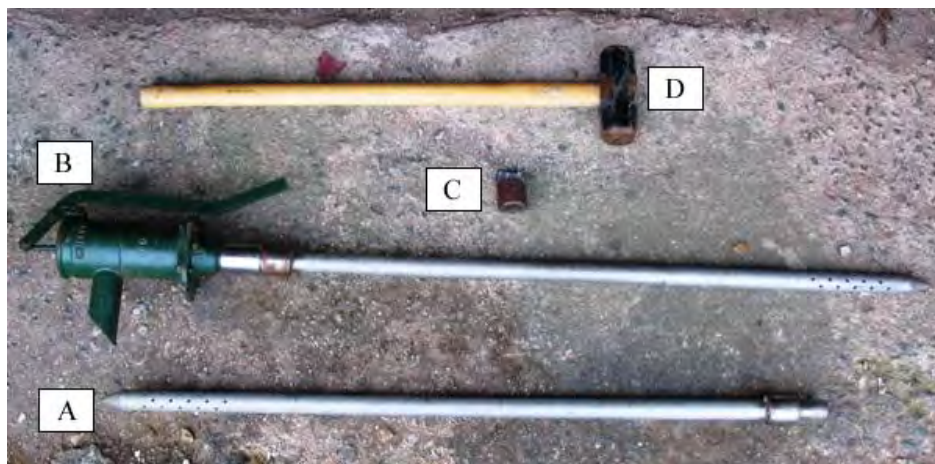


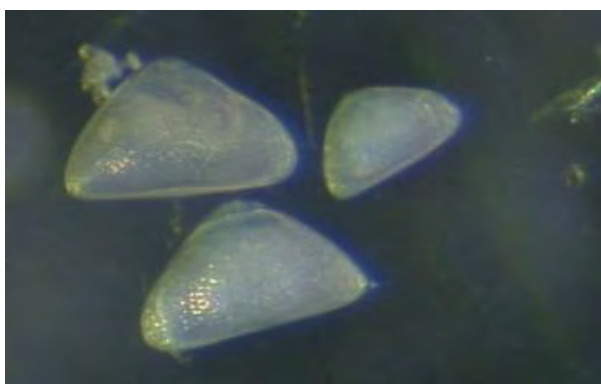
Illustration 15 : Equipement nécessaire pour un pompage à l'aide de la méthode Bou-Rouch : A) sonde en acier avec crépine ; B) tête de pompage à piston ; C) tête de frappe pour enfoncer la sonde en acier ; D) masse (© P. Marmonier)



Illustration 16 : Equipement nécessaire pour un pompage dans des puits dont la profondeur total (>17m) ou le niveau piézométrique (>8m) ne permettent pas l'utilisation d'une pompe manuelle (© P. Marmonier)



Illustration 17 : Filet à dérive utilisé dans les sources (© P. Marmonier)

Illustration 18 (à gauche) : *Fabaformiscandona breuili* (© P. Marmonier)Illustration 19 (à droite) : *Niphargus rhenorhodanensis* (© P. Marmonier)Illustration 20 (à gauche) : *Proasellus cavaticus* (© P. Marmonier)Illustration 21 (à droite) : *Schelencandona triquetra* (© P. Marmonier)

III. Calcul de l'indice

Le calcul de l'indice d'échange rivière/nappe est basé sur l'abondance des organismes stygobies en intégrant les traits écologiques des espèces. En effet, les organismes souterrains peuvent être répartis en quatre classes écologiques (Marmonier, 1988 ; Dole-Olivier et al. 1993) :

Classe 1 : organismes vivant à faible profondeur dans les sédiments et présents dans une grande diversité d'habitats souterrains (sources, rivières, karst), ils sont considérés comme ubiquistes (exemple : *Niphargopsis casparyi*) et leur abondance est notée N1.

Classe 2 : organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéique du fleuve à faible profondeur (exemple : *Fabaformiscandona wegeli*), dont l'abondance est notée N2.

Classe 3 : organismes stygobies ubiquistes présents à toutes les profondeurs dans le fleuve, la nappe riveraine et les karsts (exemples : *Niphargus rhenorhodanensis*, *Islamia* sp.), dont l'abondance est notée N3.

Classe 4 : organismes phréatobies présents uniquement en profondeur dans la nappe (exemples : *Bathynella* sp., *Salentinella* sp., *Microcharon* sp.) ou d'espèces strictement karstiques (exemple : *Niphargus virei*), dont l'abondance est notée N4.

Le calcul de l'indice intègre une pondération des abondances des stygobies par rapport à leurs classes écologiques. L'indice d'échange (Ie) se calcule donc de la façon suivante :

$$Ie = N1 + 2.N2 + 5.N3 + 10.N4$$

L'interprétation de la signification de l'indice doit être faite en tenant compte de l'écologie des espèces présentes et de sa cohérence avec les caractéristiques physico-chimiques de l'eau interstitielle au point de prélèvement (en surface et à 50cm de profondeur) (Figure 19) :

Lorsque cet indice possède une valeur forte...

...les eaux interstitielles doivent être chargées en éléments minéraux, traduisant des apports d'eau ayant circulée sur de longues distances dans les sédiments (forte conductivité, ou teneurs importantes en calcium par exemple). L'origine de l'eau souterraine alimentant la station peut être estimée en considérant les caractéristiques écologiques des espèces présentes les plus exigeantes envers le milieu souterrain :

(1) présence d'espèces phréatobies pour des apports d'eau de la nappe phréatique,

(2) présence d'espèces karstiques pour des apports provenant des marges de la plaine alluviale (karsts latéraux).

Ce diagnostic de l'origine de l'eau n'est possible que si la biodiversité souterraine régionale est bien connue.

Lorsque cet indice possède une valeur intermédiaire...

...il peut correspondre :

(1) soit à des apports faibles d'eau souterraine profonde, les espèces présentes sont

préférentiellement des stygobies ubiquistes (classe 3) et la chimie des eaux interstitielles est caractéristique d'eau profonde (forte conductivité et teneurs en ions),

(2) soit à du recyclage de l'eau de surface sur de faibles distances, les espèces présentes sont des organismes vivant à faible profondeur (classe 2) et la chimie des eaux interstitielles est proche de celle des eaux de surface.

Lorsque cet indice est faible ou égal à 0...

...l'abondance totale de l'assemblage interstitiel et la physico-chimie de l'eau doivent être pris en considération. Il peut correspondre :

(1) soit à un secteur où l'eau de surface s'infiltre dans les sédiments. Les abondances sont alors fortes et l'eau interstitielle possède des caractéristiques proches des eaux de surface (en termes de conductivité électrique, d'ions dissous et d'oxygénation),

(2) soit à un secteur aux sédiments colmatés. Les abondances sont alors faibles et l'eau interstitielle est désoxygénée, avec une conductivité et des teneurs en ions dissous importantes.

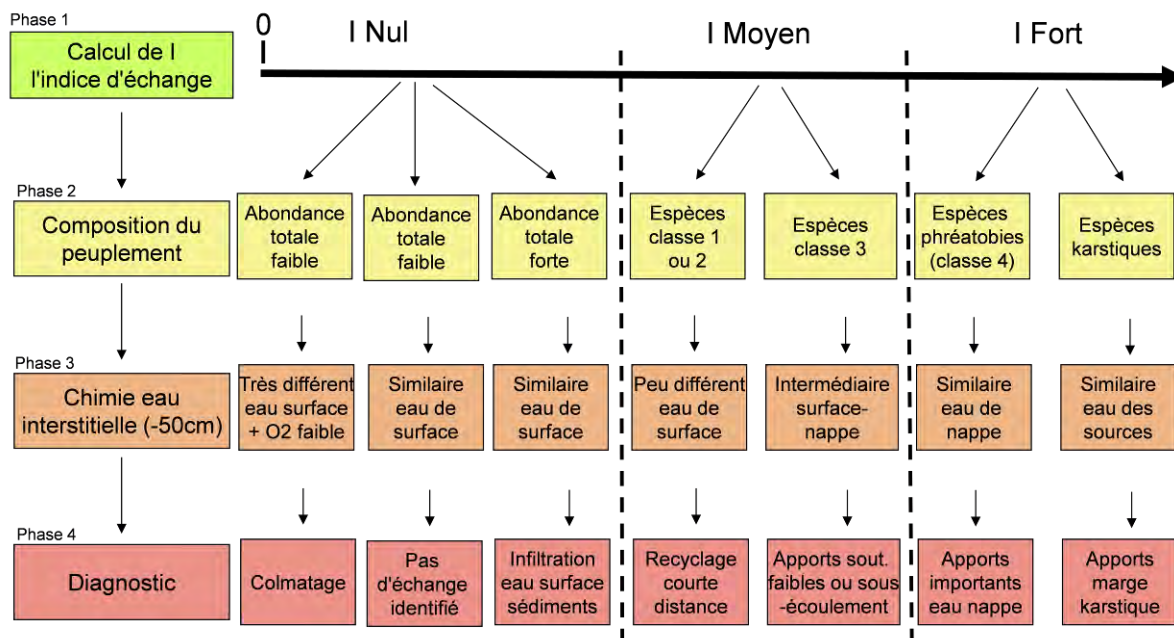
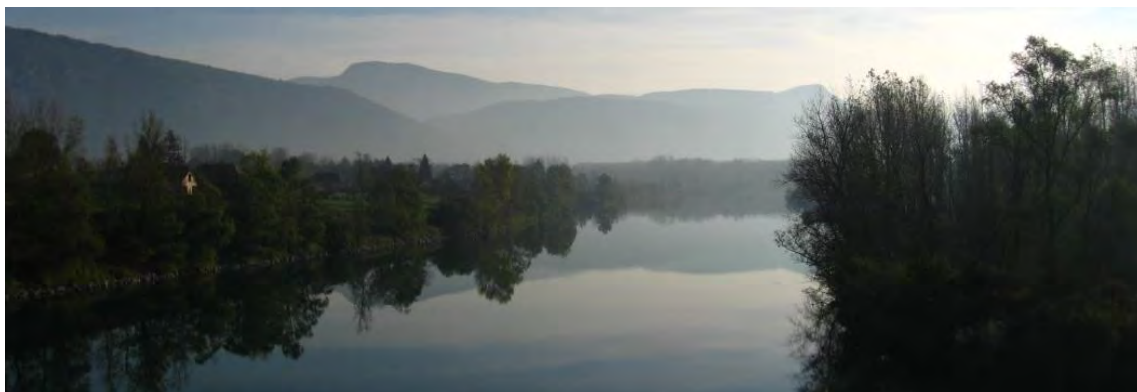


Figure 19 : Calcul de l'indice « invertébrés souterrains »

IV. Check liste de terrain

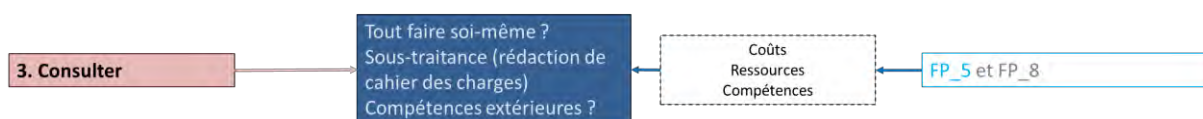
	Check
Matériel prélèvement en puits ou piézomètres	
Pompe à clapet (Bou-Rouch ou autre marque)	
Tuyau d'arrosage (15m)	
Filet (maille 100µm)	
Seaux (10l de 1 à 5)	
Flacons (boîtes) pour échantillons	
Étiquettes + marqueur	
Alcool à 96°	
Eau de rinçage	
Pissettes	
Matériel de prélèvement dans la zone hyporhéique	
Piézomètre métallique	
Pompe à clapet (Bou-Rouch)	
Masse et tête de frappe	
Clef à chaîne	
Pompe péristaltique ou grosse seringue	
Filet (maille 100µm)	
Seaux (10l de 1 à 5)	
Flacons (boîtes) pour échantillons	
Étiquettes + marqueur	
Alcool à 96°	
Eau de rinçage	
Pissettes	
Prise de notes	
Carnet de terrain / Fiche de terrain	
Crayon papier	

Tableau 21 : Check list de terrain pour la méthode « invertébrés souterrains »



Le Rhône au pont d'Evieu (01 et 38) (© L. Cadilhac)

FP_5. ESTIMATION DES COUTS (TEMPS DE TRAVAIL)



Repère 12 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°5

Les coûts donnés dans cette partie sont exprimés en temps et en nombre de personnes impliquées. Ces coûts sont estimatifs et peuvent varier en fonction des difficultés rencontrées et de l'expérience acquise dans le domaine. Ils

permettent de se faire une idée du temps à consacrer à la caractérisation des échanges nappes/rivières, qu'on décide de faire le travail soi-même ou de sous-traiter.

I. Analyse géomatique

Tâches	Temps (jours)	Coût (homme/jour)
Bibliographie		
Recherche bibliographique (hydrogéologie)	10	1
Recherche de données (hydrologie, hydrogéologie)	10	1
Lecture bibliographie	15	1
Synthèse bibliographique	15	1
Terrain		
Reconnaissance	2	2
Nivellement des puits ou piézomètres (GPS)	10 puits/jour	2
Relevé de la ligne d'eau d'un cours d'eau (GPS)	15km/jour	4
Relevé bathymétrique de la profondeur d'un cours d'eau	4 tronçons/jour	3
Relevé piézométrique	25 puits/jour	2
Jaugeage (mesure de débit)	4 sections/jour	4
Traitement SIG pour		
Préparation des données pour l'analyse géomatique	10	1
Analyse géomatique (traitement SIG)	5	1
Calcul des débits et des incertitudes	2	1
Rendu		
Production de carte	1	1
Rédaction d'une note de synthèse	2	1

II. Géochimie

Physico-chimie des eaux superficielles

Tâches	Temps (jours)	Coût (homme/jour)
Echantillonnage in situ (pH, T°, Conductivité, O ₂ dissous)	30km / jour	2 personnes/jour
Analyse en laboratoire (prélèvement, conditionnement, transport)	15km / jour	1 personne / jour
Analyse des données	10km / jour	1 personne / jour
Cartographie et synthèses	10km / jour	1 personne / jour

Physico-chimie des eaux souterraines et interstitielles

Tâches	Temps (jours)	Coût (homme/jour)
Echantillonnage in situ (pH, T°, Conductivité, O ₂ dissous)	10 échant. / jour	2 personnes/jour
Analyse en laboratoire (prélèvement, conditionnement, transport)	1 paramètre / jour	1 personne / jour
Analyse des données	5 jours	1 personne / jour
Cartographie et synthèses	5 jours	1 personne / jour

Isotopes

Tâches	Temps (jours)	Coût (homme/jour)
Echantillonnage in situ	30km / jour	2 personnes/jour
Analyse en laboratoire (prélèvement, conditionnement, transport)	15km / jour	1 personne / jour
Analyse des données	10km / jour	1 personne / jour
Cartographie et synthèses	10km / jour	1 personne / jour

III. Invertébrés souterrains

Tâches	Temps (jours)	Coût (homme/jour)
Echantillonnage des invertébrés souterrains	10 échant. / jour	2
Tri	1 échant. / jour	1
Identification (une affaire de spécialistes de groupes taxonomiques)	2 jours / échant.	1 par groupe
Analyse de données	10	1

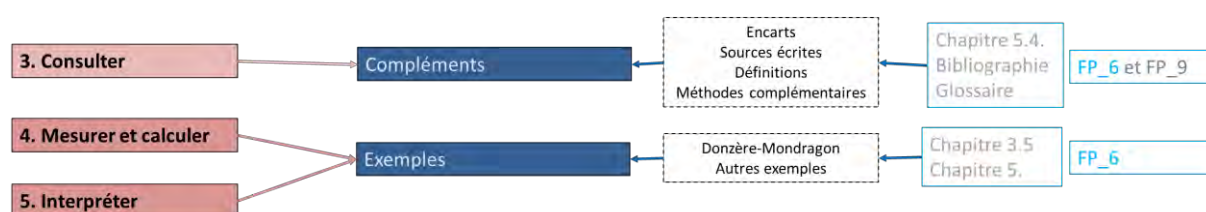
IV. Végétaux aquatiques

Tâches	Temps (jours)	Coût (homme/jour)
Echantillonnage de la végétation	5km / jour	2 personnes/jour
Analyse des données	10km / jour	1 personne / jour
Cartographie et synthèses	10km / jour	1 personne / jour



Le Rhône amont à proximité du pont de Groslée (01 et 38) (© F. Barratier)

FP_6. SYNTHÈSES DES SITES DIAGNOSTIQUES EN LIEN AVEC LE FLEUVE RHÔNE



Repère 13 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°6

Sur le cours du fleuve Rhône, trois secteurs ont déjà fait l'objet d'une caractérisation multi-méthode des échanges nappes/rivières : un secteur test sur le Rhône-Amont, Brégnier-Cordon confluence Rhône/Guiers (Paran et al., 2007 et 2008) et deux secteurs sur le Rhône-Aval, Beauchastel confluence Rhône/Eyrieux (Paran et al., 2012) et Donzère-Mondragon confluence Rhône/Ardèche (Paran et al., 2010 et 2012). De plus des éléments de diagnostic fondés sur la méthode hydraulique (analyse géomatique) sont proposés pour le secteur de Péage-de-Roussillon (Paran et al., 2008). Cette fiche met à disposition sous forme synthétique une description rapide de chacun des sites, la liste des données utilisées et les principaux résultats.

I. Brégnier-Cordon confluence Rhône/Guiers

Description rapide du site

Localisation : environ 100km à l'amont de Lyon (Carte 2).

Régime climatique : nivo-glaciaire.

Débits caractéristiques du Rhône : En période de basses-eaux, le débit du Rhône à Brens est d'environ $160\text{m}^3/\text{s}$ (soit $13\,824\,000\text{m}^3/\text{j}$) et le débit réservé plancher du Vieux-Rhône est de $65\text{m}^3/\text{s}$ (soit $5\,616\,000\text{m}^3/\text{j}$). Le débit moyen est de l'ordre de $360\text{m}^3/\text{s}$ et peut atteindre $1\,900\text{m}^3/\text{s}$ pour des crues cinquantennales.

Géologie et hydrogéologie : Ce secteur est géologiquement caractérisé par des terrains secondaires à dominante calcaire et marno-calcaire (réservoirs aquifères karstiques) et par des alluvions quaternaires de faible superficie dans les vallées. On observe aussi des molasses, dépôts d'origine marine du Miocène (Burdigalien, Tortonien). Cette

molasse repose généralement sur des formations argileuses ou marneuses de l'Oligocène. La géologie du coude de Brégnier-Cordon composé de sables moyens à grossiers est peu connu car il y a peu de forages.

D'après la littérature, l'aquifère alluvial est constitué de dépôts fluviatiles sablo-graveleux sur une dizaine de mètres d'épaisseur. Dans ce type de formation, les perméabilités sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5}m/s selon la granulométrie des sables. Au contact du Rhône, la nappe alluviale est alimentée en période de hautes-eaux par le fleuve. Lors des étiages, elle est au contraire drainée. La plus forte zone de contact entre les eaux du fleuve et les eaux souterraines s'établit au niveau de la confluence avec le Guiers. Elle est renforcée par la mise en place d'un seuil artificiel en palplanches qui surélève la ligne d'eau de l'affluent par rapport au Rhône.

Aménagement CNR : l'aménagement CNR actuel a été mis en service en 1984. Celui-ci est organisé comme tous les ouvrages au fil de l'eau (Figure 15, carte 2). Il est prévu pour turbiner au maximum $780\text{m}^3/\text{s}$. Le débit réservé sur le Vieux-Rhône représente $1/6^{\text{e}}$ du module depuis 2004, avec un débit plancher de $65\text{m}^3/\text{s}$. Ces débits réservés doivent permettre de limiter les facteurs d'altération, tel l'arrêt du transport solide sur le Rhône court-circuité qui provoquent entre autres une accentuation de l'érosion des berges, un abaissement des nappes phréatiques, un ralentissement des écoulements souterrains et superficiels, des problèmes d'eutrophisation et de concentration en fer/manganèse. L'aménagement de Brégnier-Cordon concerne 28km de Rhône entre La Balme (Savoie) et Evieu (Ain) avec une retenue de 12km, un canal d'amenée de 5km (dans la dépression de l'ancien lac de Pluvis), un canal de fuite de 3km débouchant à Evieu, une hauteur de chute maximale de 14,3m et une production annuelle de 360 millions de kW/h.

Données utilisées

Les données utilisées pour le diagnostic multi-méthode des échanges nappes/rivières sont les suivantes :

- carte piézométrique basses-eaux du 7 février 1990 (Rampnoux, 1992),
- données macrophytes préexistantes, collectées lors d'une précédente étude (Henry et Amoros, 1999) et campagne de terrain à l'été 2007 (macrophytes et physico-chimie),
- données invertébrés issues d'études précédentes (Martin, 1978 ; Creuzé des Châtelliers, 1991 ; Marmonier et al., 1997 ; Claret et al., 1999 ; Marmonier et al., 2000) et campagnes de terrain en octobre 2007 et mars 2008 (invertébrés et physico-chimie),
- données isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et δD), campagne de mars 2007.

Résultats et carte de synthèse

Les résultats spatialisés (analyse géomatique, invertébrés souterrains et végétation aquatique) sont présentés carte 3. Concernant les débits d'échange, la valeur Q renvoie au débit estimé et exprimé en $\text{m}^3/\text{jour}/\text{km}$ pour une surface d'échange de 4m^2 . Ils ont été agrégés sur des secteurs homogènes.

Rive gauche de Brégnier-Cordon :

- PK115 à 112 (Rhône-Vif) : l'indice macrophyte indique une probabilité d'apport au fleuve par la nappe nulle. Le débit de nappe ponctuel calculé est très faible, de l'ordre de $0,05\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ soit $150\text{m}^3/\text{j}$,

- PK112 à 111 (Rhône-Vif) : la probabilité d'apport selon l'indice macrophyte reste nulle,

- PK111 à 110 (Retenue) : l'interprétation hydraulique calculée par analyse spatiale indique une alimentation de la nappe par le fleuve pour un débit moyen faible de l'ordre $0,07\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ soit $48\text{m}^3/\text{j}$. La méthode « invertébrés souterrains » met en avant des échanges importants sur ce secteur, avec des apports à la nappe en provenance du Rhône (écoulement superficiel et/ou sous-écoulement souterrain) et d'autres plus profonds en provenance de la nappe d'accompagnement et/ou du karst de versant. La méthode macrophytes, quant à elle, indique des apports nuls de l'aquifère. Les analyses isotopiques tendraient à confirmer les apports karstiques détectés par les invertébrés. Une pollution de l'eau du karst, la rendant eutrophe, combinée à un débit phréatique modéré, pourrait expliquer cette contradiction. Des analyses isotopiques complémentaires sur ce secteur seraient les bienvenues pour arrêter un résultat,

- PK110 à 106 (Retenue) : sur ce secteur l'indice macrophyte propose un apport de nappe nul à faible, ce qui est confirmé par la méthode hydraulique avec un débit moyen de nappe de l'ordre de $0,05\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ soit $191\text{m}^3/\text{j}$,

- PK106 à 102,5 (Retenue) : sur cette zone, les 3 méthodes sont en accord et mettent en évidence une alimentation de la nappe par le fleuve. Selon, la méthode hydraulique le débit moyen est de l'ordre $0,11\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ soit $362\text{m}^3/\text{j}$,

- PK102,5 à 99 (Vieux-Rhône) : ce secteur montre une très bonne convergence de l'interprétation des 3 méthodes. Les macrophytes indiquent des apports de nappe moyens à élevés notamment au niveau du PK100 et du PK99 (confluence avec le Guiers). Les invertébrés souterrains confirment cette tendance. Le débit moyen de nappe calculée par analyse spatiale est de l'ordre de $0,37\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ soit $1\,550\text{m}^3/\text{j}$ avec un débit plus fort au niveau du PK100,

- PK99 à l'aval (Vieux-Rhône, Rhône-Vif) : l'indice macrophyte indique des apports faibles à nuls par une nappe de versant qui n'entre pas dans la plaine. Elle est repoussée aux marges par le fleuve qui est en exhaussement sur ce secteur. On distingue toutefois quelques couloirs d'alimentation par des nappes de versant. Ceci est confirmé par les invertébrés et les calculs de débits (avant aménagement) même s'ils semblent surévalués par endroit (entre $0,05$ et $1,42\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$).

Rive droite de Brégnier-Cordon :

- PK115 à 114,5 (Rhône-Vif) : les macrophytes indiquent des apports de nappe faibles,

- PK114,5 à 111 (Rhône-Vif) : les macrophytes indiquent des apports de nappe nuls. Selon la méthode hydraulique, le débit ponctuel de nappe est très faible et de l'ordre de $0,02\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$, soit $70\text{m}^3/\text{j}$ sur la longueur,

- PK111 à 108 (Retenue) : l'indice macrophyte met en évidence des apports karstiques moyens à élevés. Le débit ponctuel moyen de la nappe est de l'ordre de $0,15\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$, soit $450\text{m}^3/\text{j}$ sur la longueur,

- PK108 à 105 (Retenue) : on observe des apports karstiques nuls à moyens selon les macrophytes. Le débit ponctuel (avant aménagement) était de l'ordre de $0,17\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ soit $510\text{m}^3/\text{jour}$ sur la longueur,

- PK105 à 103 (Retenue) : l'indice macrophyte distingue un couloir d'alimentation karstique et des apports faibles à moyens. Le débit ponctuel (avant aménagement) était de l'ordre de $0,82\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$ soit $1\,640\text{m}^3/\text{j}$ sur la longueur. Pour ce dernier, si le sens de l'échange est bon, le débit semble surévalué, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation des lignes d'eau due au barrage,

- PK103 à 100 (Canal de dérivation) : pas de données,

- PK100 à 92 (Canal de dérivation, Restitution) : sur ce secteur l'indice macrophytes évalue les apports de nappes entre moyens et élevés. Il met en évidence un couloir d'alimentation préférentiel au niveau du Gland confirmé par les invertébrés,

- PK92 à l'aval (Restitution, Rhône-Vif) : sur ce secteur peu d'apports phréatiques selon les invertébrés souterrains et les macrophytes. Pour ces derniers, le fleuve est en exhaussement et alimente la nappe. A l'extrémité aval, on observe le drainage d'une nappe de versant (apport moyen). Le débit ponctuel calculé ($0,35\text{m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$) est en désaccord avec les autres méthodes, mais il s'agit d'une valeur avant aménagement.

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

Il s'agit du secteur situé entre la rive gauche du canal de dérivation et la rive droite du Vieux-Rhône. Les méthodes biologiques indiquent des résurgences karstiques profondes en provenance du Mont Cordon, notamment au niveau du PK100 (Canal de dérivation).

Conséquence de la prise en compte des échanges nappes/rivières pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité : exemples

Apports d'eau de nappe aux chenaux actifs

Exemple 1 : Les contre-canaux courant en rive droite et gauche du Rhône à l'amont de

l'embouchure du canal de dérivation, ont le Vieux-Rhône comme exutoire à l'aval du barrage de Champagnieux (PK103 retenue). Ils drainent non seulement l'eau des nappes, mais aussi les fuites des digues et les apports de petits affluents. De plus à l'amont de la confluence du Guiers la lône de Rossillon alimente le Vieux-Rhône. Sur le secteur de Brégnier-Cordon, jusqu'à la confluence du Guiers les apports des contre-canaux soutiennent le chenal court-circuité. Leur apport, avec celui des nappes, en basses-eaux, représente environ 6% du débit réservé du Vieux-Rhône ($65\text{m}^3/\text{s}$). A titre comparatif, les apports du Guiers en basses-eaux correspondent à 26% du débit du Vieux-Rhône.

Exemple 2 : Du point de vue de la thermie du fleuve, les apports souterrains observés dans le chenal court-circuité du pied du barrage de dérivation (PK103 retenue) jusqu'à l'aval de la confluence avec le Guiers (PK99 Vieux-Rhône), contribuent certainement au maintien de zones d'eau plus froide dans cette partie du fleuve. Ces apports d'eaux froides sont le plus souvent localisés en aval de seuils (de radiers) et en aval de bancs de graviers où les eaux interstitielles regagnent la surface (zones d'exfiltration ou « upwelling »). Dans ces secteurs, une exploitation trop intensive de la nappe aurait sans doute des conséquences biologiques importantes pour les organismes les plus psychrophiles (organismes aimant les eaux plus froides) vivant dans le fleuve court-circuité. Il convient donc de veiller à une gestion raisonnée de ces nappes en n'augmentant pas de manière incontrôlée les volumes pompés.

Apports de nappe dans les zones humides associées au fleuve

Exemple 1 : L'assèchement des zones humides aura un impact plus ou moins important sur leur fonctionnement selon son intensité. Lorsque l'intensité de l'assèchement reste faible (substrat maintenu humide), l'exondation facilite le piégeage des nutriments et la transformation de l'azote organique en azote gazeux (auto-épuration). Ces exondations modérées ne détruisent pas les organes souterrains des végétaux, qui peuvent ainsi recoloniser les zones humides après perturbation. En cas d'assec plus drastique, on observe au contraire dans la littérature une tendance au relargage des nutriments dans les milieux aquatiques, ce qui peut provoquer des blooms algaux et une eutrophisation des zones humides. Dans les zones humides oligotrophes (relativement pauvres en nutriments), l'impact des exondations devrait être modéré. L'impact des assecs pourrait être plus drastique, car de nombreuses zones humides oligotrophes fonctionnent comme des

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

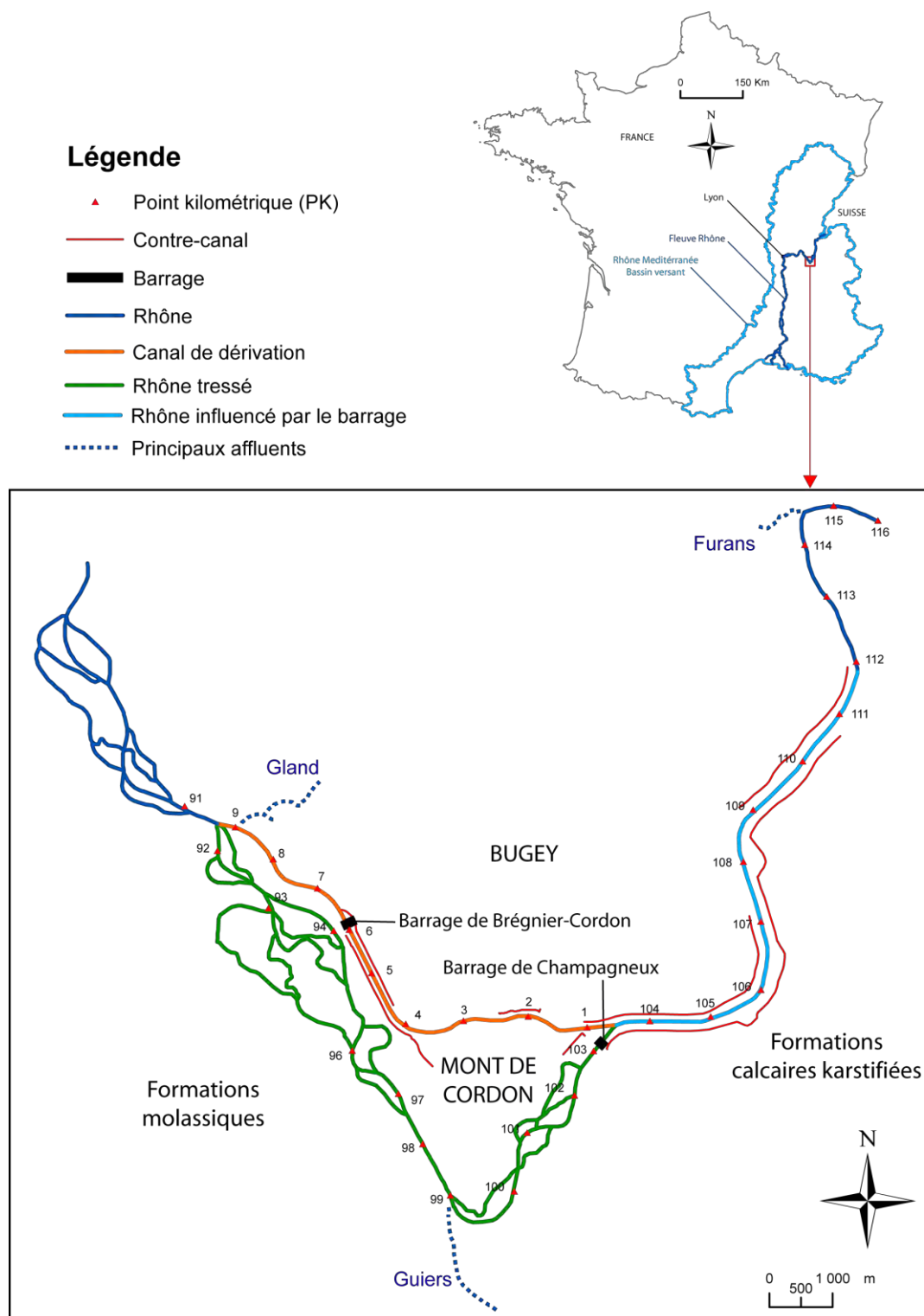
Exemple 2 : Les contre-canaux des aménagements CNR ont pour rôle de drainer les eaux des nappes et du fleuve s'infiltrant au travers des digues du canal d'amenée et de limiter ainsi l'engorgement des sols agricoles les plus proches. Ils drainent aussi une partie des eaux de la plaine alluviale et pour deux d'entre eux, située à l'ouest du Mont Cordon (entre Vieux-Rhône et canal de dérivation), des eaux d'origine plus profonde. Cette origine profonde a été démontrée par la collecte d'organismes phréatobies à une très faible profondeur sous la surface du sédiment (*Parabathynella sp.*, *Crangonyx subterraneus*, *Salentinella argelieri*, *Niphargus fontanus* et *Niphargus kochianus*). Cette faune possède une forte valeur patrimoniale, liée à sa rareté dans ce secteur du Rhône ayant subi les dernières glaciations. Les populations découvertes à Brégnier-Cordon constituent pour ces espèces la limite extrême orientale de leur recolonisation du corridor fluvial. Ces organismes sont absents du milieu interstitiel peu profond des paléo-chenaux, sans doute à cause de leur colmatage par les sédiments fins et la matière organique. Dans ce secteur du Rhône, les contre-canaux et les nappes qui les alimentent, représentent donc des systèmes à forte valeur patrimoniale qu'il convient de protéger par une gestion raisonnée des prélèvements d'eau souterraine et en évitant toute implantation d'activité polluante à leur proximité. Ceci vise à protéger le potentiel écologique du fleuve déjà bien altéré par son aménagement historique.

Apports d'eau de surface vers la nappe souterraine

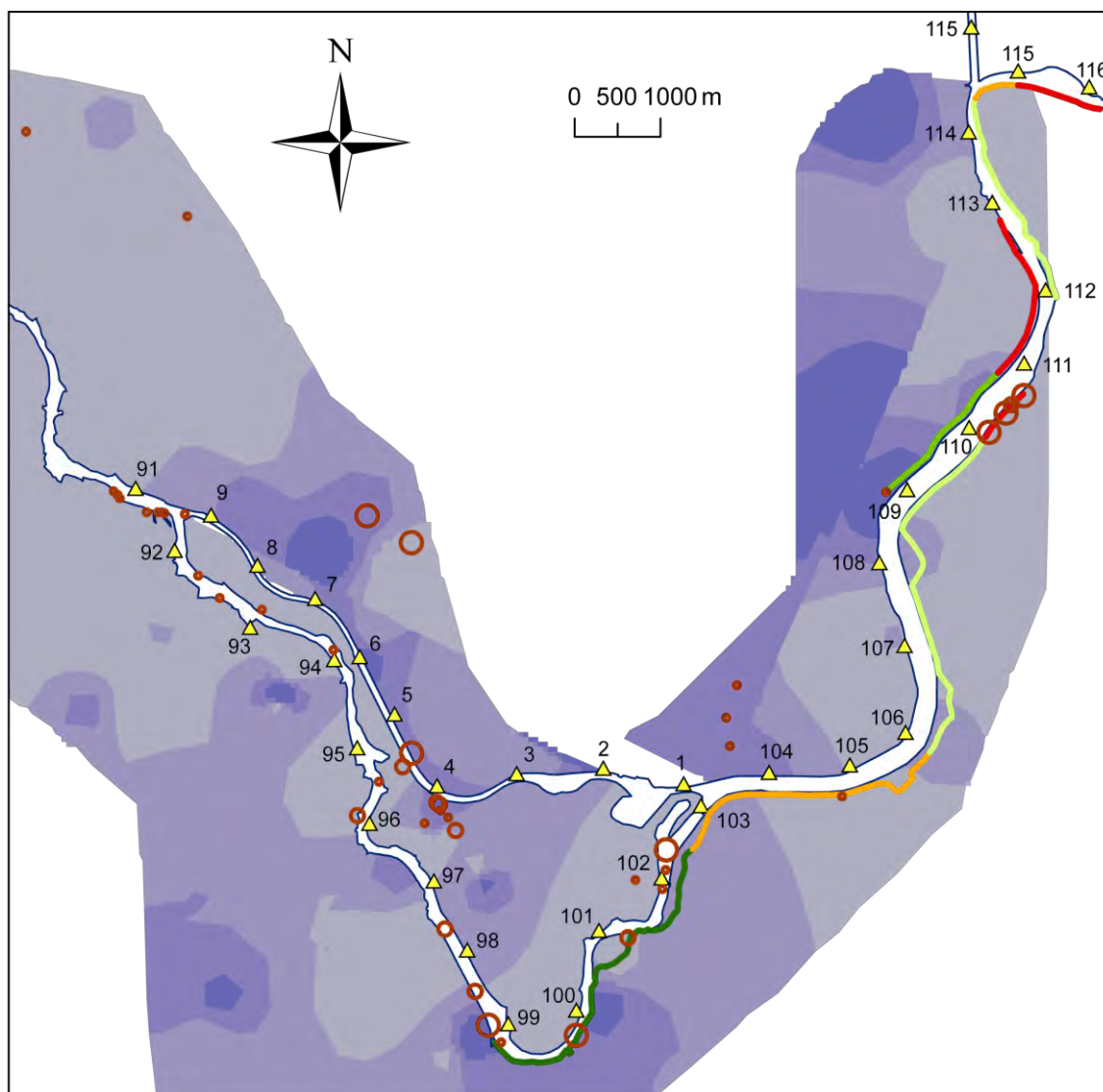
Exemple : Sur le secteur de Brégnier-Cordon, le fleuve recharge la nappe en rive gauche en amont du barrage de Champagneux court-circuitant le Vieux-Rhône (PK103 retenue) et à l'amont de la zone du lieu-dit « Les Rubattiers » (PK109). Ces zones pourraient, après étude, constituer des sites privilégiés d'implantation de forages pouvant bénéficier de réalimentation par le Rhône. Le champ captant du Grand Gravier situé à Ternay, à proximité de Lyon est quant à lui déjà largement exploité et fortement réalimenté par le fleuve (environ 80% des eaux captées proviennent du Rhône).

Indicateurs paysagers et géomorphologiques : deux approches complémentaires permettant d'interpréter les résultats

Le Rhône est un fleuve récent qui n'a pas encore atteint son profil d'équilibre, et qui se subdivise en trois unités biogéographiques limitées par la confluence avec la Saône (zone amont correspondant au sud-ouest de la région centre-européenne et zone en aval de Lyon correspondant à la région européenne atlantique), et 100km environ en aval de Lyon, par la région climatique méditerranéenne. Le Rhône amont se caractérise par une dynamique active jusqu'au 19^{ème} siècle, et par une grande diversité de formes fluviales. La plupart des travaux d'endiguements ont eu lieu entre 1880 et 1890, et les grands barrages hydro-électriques ont été édifiés durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Ce secteur de cours d'eau a subi plusieurs épisodes d'exhaussement (ex : époque postglaciaire) en alternance avec des épisodes de méandrage (ex : époque gallo-romaine) voire d'incision (depuis le début du 20^{ème} siècle). Au début du 19^{ème} siècle, le Rhône amont présente encore des patrons de formes fluviales contrastés : tressage à Chautagne et à Miribel, anastomose et méandrage en aval de la confluence avec la rivière d'Ain, et parcours linéaire de la gorge de Saint-Alban à Loyettes. Cette diversité résulte de la combinaison de la nature et de la quantité de la charge de fond, et de la pente de la plaine alluviale holocène, le tressage correspondant à un secteur en exhaussement, c'est-à-dire à une charge de fond grossière et abondante et une pente forte. Actuellement, 4 patrons qui coexistent sur le Haut-Rhône, vont structurer les échanges nappes/rivières.



Carte 2 : Localisation et présentation du secteur de Brégnier-Cordon



Légende

▲ PK

□ Fleuve Rhône

Analyse géomatique

Rhône vers nappe (Q en m³/j/km)

— Moyen (- 1284 / -583)

— Faible (- 157 / - 151)

Nappe vers Rhône (Q en m³/j/km)

— Faible (111 / 465)

— Moyen (2170)

— Fort (12968)

Invertébrés souterrains

Apport souterrain
(% espèces stygobies)

• Nul (0%)

○ Faible (1 à 8%)

○ Moyen (8 à 15%)

○ Fort (15 à 20%)

○ Très fort (>20%)

Indice macrophyte

Probabilité d'apport phréatique

■ Nul

■ Faible

■ Moyen

■ Fort

Carte 3 : Superposition de l'interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes méthodes sur le secteur de Brégnier-Cordon

Une thèse sur la question

Le travail de thèse de Cécile Capderrey (2013) intitulé : « Effets de la géomorphologie des rivières en tresses sur les communautés d'invertébrés aquatiques et sur la structuration génétique des populations du crustacé isopode souterrain *Proasellus walteri* » avait pour objet d'estimer l'influence des échanges d'eau entre eau de surface et eau souterraine dans les rivières en tresse (rivières à multiples chenaux et importante charge sédimentaire). Ces cours d'eau traversent alternativement de vastes plaines et des rétrécissements de vallées ou canyons. Cette géomorphologie influence fortement les échanges d'eau entre la rivière avec sa nappe : les eaux de surface alimentant le milieu hyporhéique en entrée de plaine alluviale, les eaux souterraines remontant vers la surface des sédiments à l'approche des canyons (zone de moindre épaisseur sédimentaire). A une échelle plus réduite, les eaux de surface pénètrent dans les bancs de gravier en amont et les eaux souterraines en sortent par l'aval. Les communautés d'invertébrés sont fortement structurées par ces échanges, les amonts de bancs sont les plus attractifs pour les organismes benthiques, car ils contiennent de grandes quantités de matière organique et d'oxygène. Les avals de bancs, particulièrement en zone de rétrécissement de la plaine alluviale, sont les plus riches en espèces souterraines, car les eaux interstitielles sont tamponnées par les apports souterrains. Cette étude a également permis de mettre en évidence un effet de la géomorphologie des rivières en tresses sur la structuration génétique des populations de l'isopode souterrain *P. walteri*. Ces populations sont de grande taille et sont structurées spatialement par la succession des canyons, qui représentent autant de barrières à leur dispersion.

Dans le secteur de Brégnier-Cordon à Evieu, on distingue de grands méandres relictuels datant de la période gallo-romaine, du moyen-âge ancien et des 8 et 19^{ème} siècles. Cette section de plaine se caractérise par des sédiments plutôt fins (sables, limons) et une pente faible. Dans ce secteur s'est développé secondairement un style tressé qui a conduit à un exhaussement de la partie médiane de la plaine alluviale, et qui a détruit partiellement les méandres au cours du 17 et 18^{ème} siècles. Par conséquent, la plaine dans le secteur de Brégnier-Cordon est constituée aujourd'hui par l'emboîtement de deux unités géomorphologiques, une unité à tressage mobile et en exhaussement au centre de la plaine qui contribue à alimenter l'aquifère, et une unité plus figée, à méandres et anastomoses, aux marges de la plaine, qui devrait contribuer à drainer les aquifères (latérale ou alluviale). Les endiguements et l'aménagement de Brégnier-Cordon ont entraîné la diminution, voire la cessation de la divagation du lit, et par conséquent : un arrêt de l'exhaussement, des inondations associées et un enfoncement de la nappe d'accompagnement de la rivière d'1 à 2m. On devrait donc observer dans ce contexte une simplification fonctionnelle du secteur, une incision

du lit mineur et un drainage des aquifères, sauf au droit du canal d'amenée, où la nappe d'accompagnement est probablement encore mise en charge (malgré les contre-canaux) par le fleuve (Bravard & al. 1986 ; Bravard, 1987 ; Bornette & al., 1994). La connaissance de la manière dont se sont organisées les unités géomorphologiques et leur altitude relative permet :

1) de mieux expliquer les patrons d'échange observés à l'échelle du secteur,

2) de comprendre comment ces patrons ont évolué et sont susceptibles d'évoluer dans le futur.

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

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

Références bibliographiques citées

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

Creuzé des Châtelliers M (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, 161p.

Henry C, Amoros A (1999) La vallée du Rhône, étude préalable à la mise en place d'une gestion intégrée : diagnostic des potentialités évolutives, typologie et cartographie des lînes sur l'ensemble

du Rhône, chute de Brégnier-Cordon (AIN). Rapport CNR et Agence de l'eau RMC.

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

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

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

Rampnoux JP (1992) Aquifères n°12, 12bis, 12ter et 13, Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la vallée du Rhône et de la basse vallée du Guiers en rive savoyarde, Synthèse des données générales existantes sur la nappe alluviale. CG Savoie, DDAF Savoie, 34p.

Références complémentaires

Tirat M, Cottureau C, Mongereau N (2006) Vallée du Rhône. In. *Aquifères et eaux souterraines*,

2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 2, 658-687.

Chauve P (2006) Jura. In. *Aquifères et eaux souterraines*, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 2, 561-590.

Coulet M, Vebard B, Monnet P (1997) Impacts des aménagements hydroélectriques sur l'écosystème Rhône. FRAPNA Lyon, 181p.

Dufour S (2005) Contrôles naturels et anthropiques de la structure de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme, Rhône). Mémoire de thèse de doctorat, Université Jean Moulin, Lyon 3, 244p.

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

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



Barrage CNR sur le Rhône à proximité de Brégnier-Cordon (01) (© F. Paran)

II. Donzère-Mondragon confluence Rhône/Ardèche

Description rapide du site

Localisation : 170km environ au sud de Lyon et à une centaine de kilomètres au nord d'Arles (25km au sud de Montélimar et à 33km au nord d'Orange), l'aménagement CNR de Donzère-Mondragon est situé principalement dans la plaine du Tricastin (Carte 4).

Ce territoire s'étend sur une trentaine de kilomètres du nord au sud et sur une quinzaine de kilomètres d'est en ouest.

Usages de l'eau et enjeux : 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 se font aussi bien en eau souterraine, dans les nappes alluviales, 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 22).

Concernant les eaux souterraines (Tableau 23), le total prélevé est bien moindre, mais les usages plus variés. Si on regroupe les différents usages présentés dans le tableau 23 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).

Régime climatique : méditerranéen à épisodes cévenols.

Débits caractéristiques du Rhône : débit moyen annuel du Rhône à Donzère : $1\,625\text{m}^3/\text{s}$; débit maximum turbinable : $1\,800\text{m}^3/\text{s}$ à partir des années 1960 et de $1\,980\text{m}^3/\text{s}$ à partir de l'année 1986 ; débit réservé du Vieux-Rhône (PK172 à 201) : $60\text{m}^3/\text{s}$; débit moyen annuel de l'Ardèche (affluent principal) : $64,7\text{m}^3/\text{s}$.

Géologie et hydrogéologie : Le secteur de Donzère-Mondragon est situé entre deux défilés du Rhône : le premier, au nord dans les calcaires urgoniens entre Viviers et Saint-Montant en rive droite et entre Chateauneuf-du-Rhône 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 6km pour une longueur de 25km, soit une superficie d'environ 120km^2 .

	milliers m^3/an	%
Total eaux superficielles	5 219 968,00	100
Industriel (restitution directe ou autres usages)	3 566,90	0,07
Irrigation par aspersion	889,20	0,02
Réalimentation des milieux souterrains	13,20	0,0003
Refroidissement des centrales thermiques (fil de l'eau)	5 215 498,70	99,91

Tableau 22 : Prélèvements d'eau superficielle à Donzère-Mondragon (d'après Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 2005)

	milliers m^3/an	%
Total eaux souterraines	10 760,80	100
Distribution publique	4 526,10	42,06
Climatisation (circuit ouvert - restitution souterraine)	329,40	3,06
Industriel (restitution directe ou autres usages)	1 866,00	17,34
Irrigation par aspersion	1 153,95	10,72
Irrigation par goutte à goutte	1 727,79	16,06
Irrigation par ruissellement	124,76	1,16
Mode de vie communautaire	507,20	4,71
Refroidissement des centrales thermiques (fil de l'eau)	525,60	4,88

Tableau 23 : Prélèvements d'eau souterraine à Donzère-Mondragon (d'après Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 2005)

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. Les formations géologiques superficielles de cette plaine sont des alluvions actuelles. Celles-ci sont recouvertes de limons.

Les terrasses latérales (alluvions anciennes), 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. L'entité principale est connue sous le code RHD15, ou Alluvions quaternaires de la vallée du Rhône en aval de Viviers. Les principales caractéristiques de cette formation sont les suivantes carte 5 :

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

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. L'entité se poursuit en rive gauche du canal de dérivation où l'on trouve à la fois des alluvions récentes au nord entre Donzère et la Berre et au sud entre Bollène et la restitution ; et des alluvions plus anciennes. 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 est en contact avec des formations aquifères alluviales de seconde zone. Il s'agit des entités 155a (notamment alluvions du Lez), 155d et 155c 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 localement perméables.

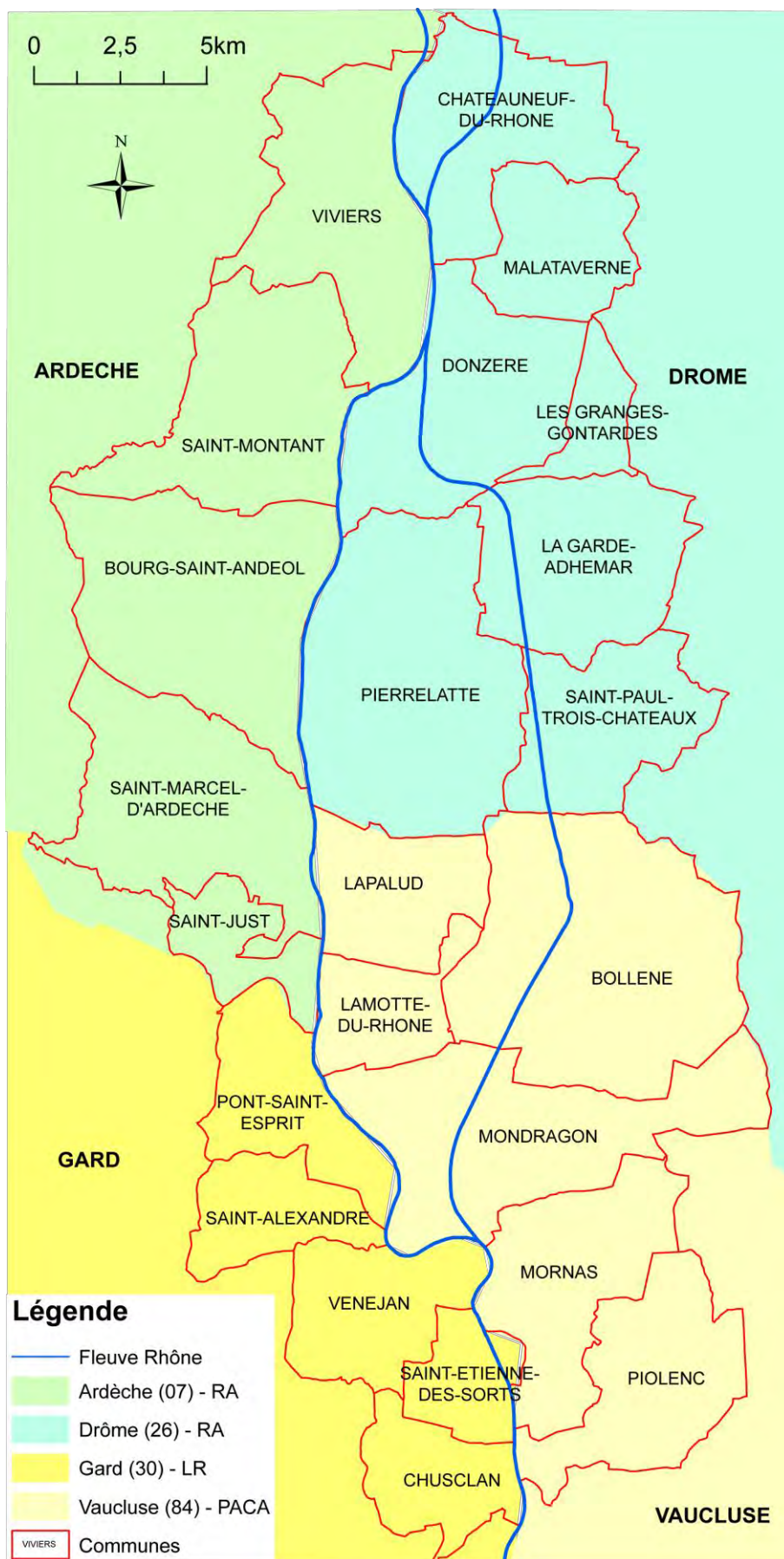
Aménagement CNR (Cartes 6 et 7) : Le chantier pour la mise en place des ouvrages du secteur de Donzère-Mondragon était considéré à l'époque comme un des plus gros d'Europe. Le commencement des études a été initié en 1942. L'achèvement des travaux et la mise en service a eu lieu sur la période 1952-1954. 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). L'usine Blondel, située au PK17,3 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 22m en moyenne. La construction de l'usine Blondel a nécessité $438\,000\text{m}^3$ de béton et un terrassement d'un volume de 3,6 milliards de m^3 .

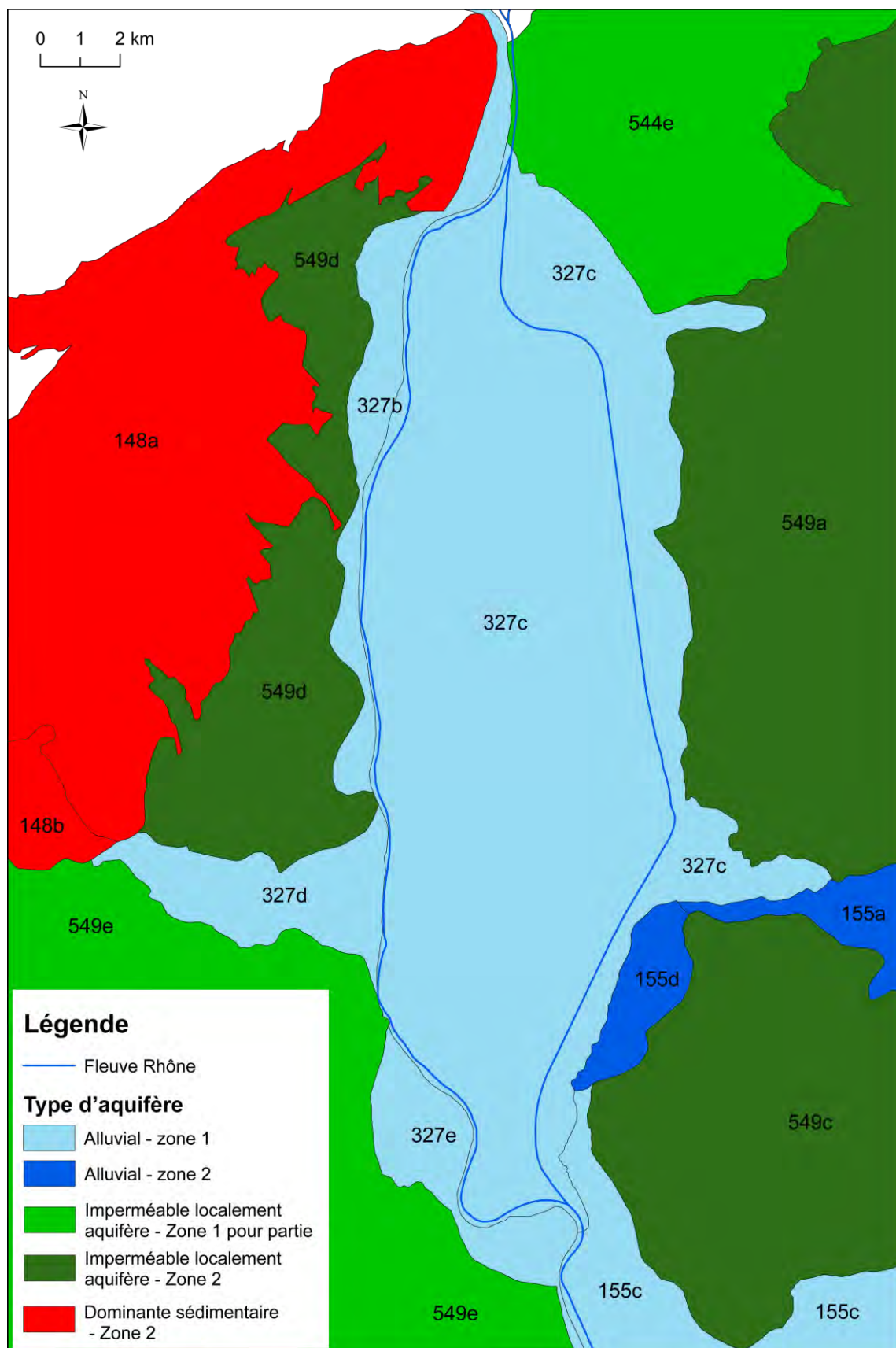
Il a aussi été nécessaire de construire des siphons, des déversoirs, des contre-canaux, des digues avec ou sans revêtement, des écluses, des ponts et des prises d'eau pour l'irrigation. Ces ouvrages servent d'une part au bon fonctionnement de l'usine hydroélectrique mais aussi au maintien du niveau phréatique 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.

D'une manière générale, l'aménagement comprend (Cartes 6 et 7) :

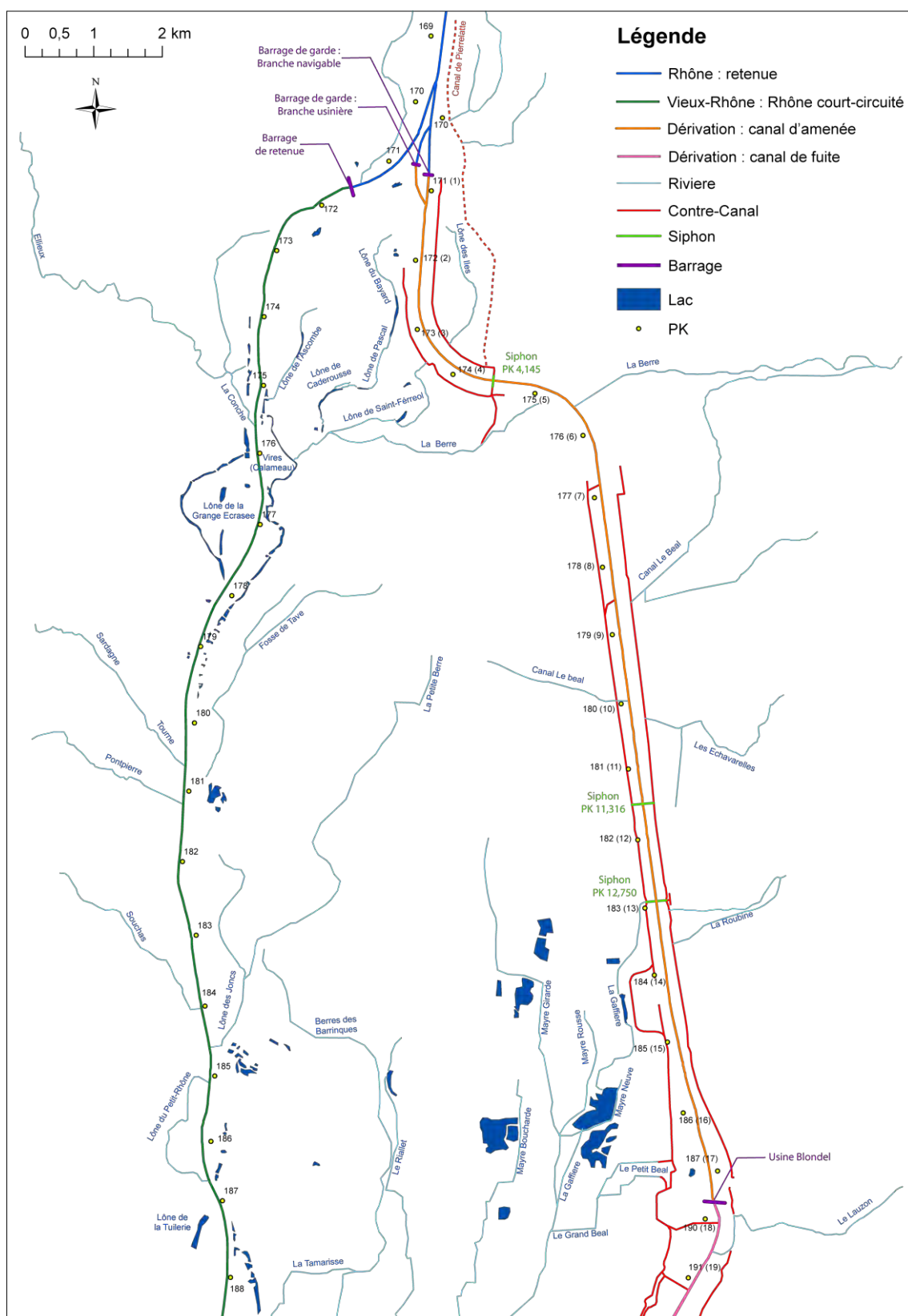
- 4 barrages (1 barrage de retenu à l'amont du Vieux-Rhône, 2 barrages de garde à l'amont du canal de dérivation, 1 barrage-usine « Blondel » sur le canal de dérivation PK18),
- des seuils,
- un canal de dérivation : permet le contrôle des flux d'eau passant dans les turbines de l'usine Blondel (Canal d'amené : PK0 à 17 ; Canal de fuite : PK17 à 28),
- des contre-canaux : drainent les eaux d'infiltration du canal de dérivation,
- 3 siphons sous le canal de dérivation pour assurer le passage de l'eau drainée de la rive gauche à la rive droite,
- des puits d'infiltration : permettent l'infiltration d'eau des contre-canaux pour soutenir le niveau de la nappe au niveau du canal de fuite,
- des drains verticaux : soulagent les digues de la pression de l'eau d'infiltration.



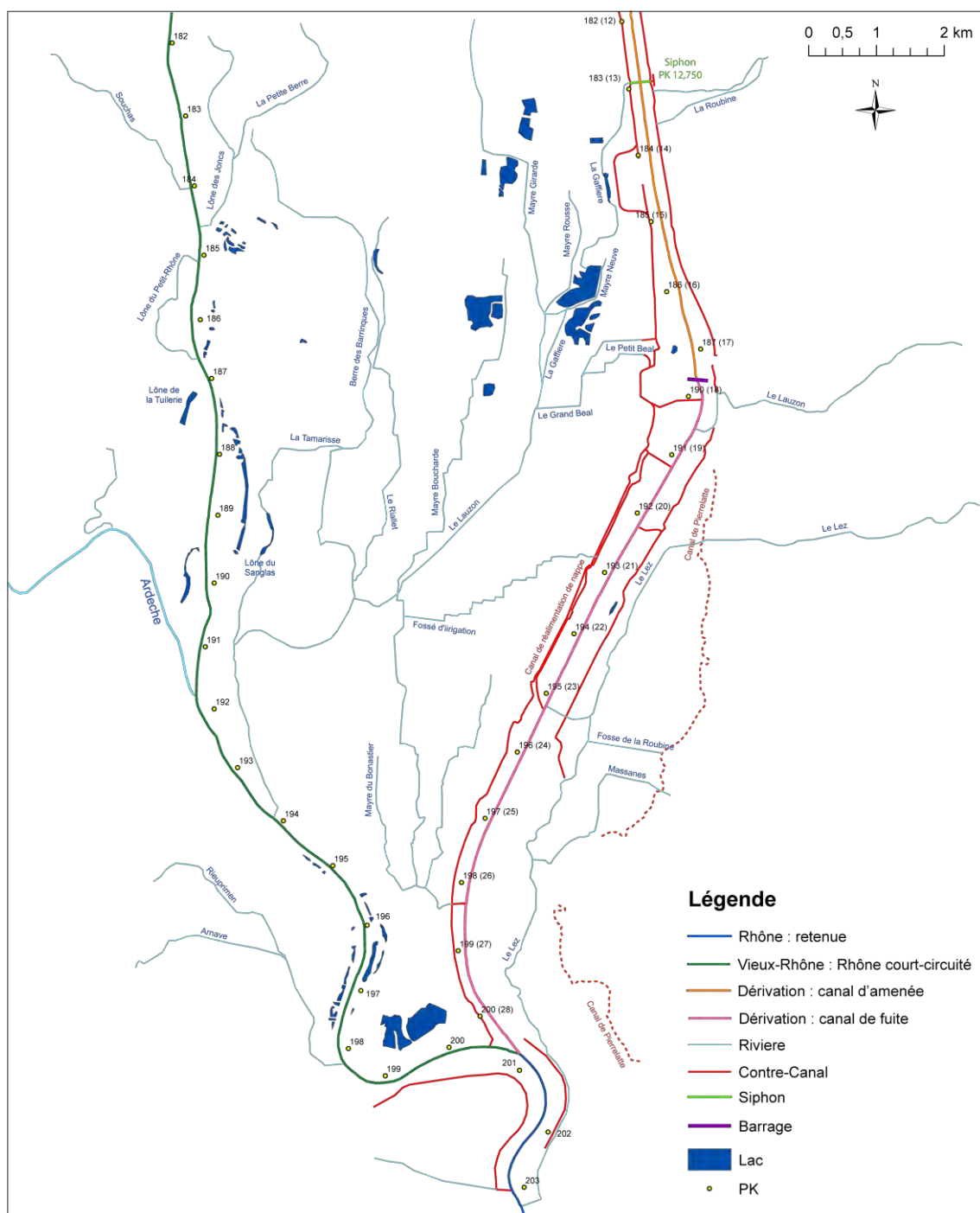
Carte 4 : Localisation administrative du secteur de Donzère-Mondragon



Carte 5 : Les entités hydrogéologique en présence sur le secteur de Donzère-Mondragon
(Source : BDRHF V1 ; BD Carthage IGN)



Carte 6 : Localisation des objets hydrologiques et des aménagements hydrauliques sur le secteur de Donzère-Mondragon – Moitié nord (Source : BD Carthage IGN)



Carte 7 : Localisation des objets hydrologiques et des aménagements hydrauliques sur le secteur de Donzère-Mondragon – Moitié sud (Source : BD Carthage IGN)

Données utilisées

Les données utilisées pour le diagnostic multi-méthode des échanges nappes/rivières sont les suivantes :

- Campagnes piézométriques : piézométries anciennes contexte de basses-eaux (BE) de nappe du 15 au 20 juillet 1968 et contexte de moyennes-eaux (ME) de nappe pour septembre 1969 (Guégan, 1972) ; piézométries récentes contexte de hautes-eaux (HE) de nappe pour 9 juin 2008 et contexte de

moyennes-eaux (ME) de nappes pour le 16 mars 2009 (étude ANTEA pour AREVA) et piézométrie CNR pour la confluence Rhône/Ardèche (27 avril 2011),

- Perméabilités des alluvions : modélisation ANTEA pour AREVA,
- Cotes du talweg du Rhône : données CNR,
- Cotes du niveau d'eau du Rhône : données CNR,
- Fiches entités hydrogéologiques et couvertures spatiales : données AE-RMC,

- Débits du Rhône et de l'Eyrieux : Banque Hydro,

- Anciennes données invertébrés de 1989 (Creuzé des Châtelliers, 1991) et 1994 (Plénet et al. 1996) et échantillonnage invertébrés et physico-chimie en mai et septembre 2008 (moyennes-eaux) et juin 2010 (confluence Rhône/Ardèche),

- Relevés macrophytes et physico-chimie du juin-juillet 2009 (moyennes-eaux),

- Campagne de terrain d'avril et juin 2008 pour les isotopes (^{18}O et Tritium).

Analyse géomatique

La carte 8 présente le diagnostic des échanges nappes/Rhône réalisé à partir de la carte piézométrique (ANTEA/AREVA) du mois de mars 2009 (moyennes-eaux) pour la rive gauche du Vieux-Rhône et la rive droite du canal de dérivation au niveau du contre-canal. Sur cette carte, le code couleur est le suivant :

- en vert clair et vert foncé les secteurs où le fleuve draine la nappe,

- en orange et rouge les secteurs où le fleuve alimente la nappe.

Dans les deux cas les débits d'échangés sont exprimés en m^3/jour .

Pour le Vieux-Rhône rive gauche (Carte 8) la sectorisation est la suivante :

- PK171 à 185,5 : la nappe alimente le fleuve. Sur ce secteur, d'une longueur d'environ 15km, si on considère une erreur relative d'un facteur 5, l'apport de nappe au fleuve est de $131\,257\text{m}^3/\text{jour}$ [26 251 ; 656 285] soit $8\,786\text{m}^3/\text{jour/km}$ [1 757 ; 43 930],

- PK185,5 à 199 : le fleuve alimente la nappe. Sur ce secteur, d'une longueur d'environ 12,5km, si on considère une erreur relative d'un facteur 5, les apports d'eau du fleuve à la nappe sont de l'ordre de $-96\,935\text{m}^3/\text{jour}$ [-19 387 ; -484 675] soit $-7\,721\text{m}^3/\text{jour/km}$ [-1 544 ; -38 605],

- PK199 à 200,5 : la nappe alimente le fleuve de manière marginale.

Globalement, les secteurs sur lesquels on n'identifie pas d'échange représentent environ 3km.

Pour le canal de dérivation rive droite (Carte 8) la sectorisation est la suivante :

- PK171 (1) à 190 (18) : le contre-canal alimente la nappe. Sur ce secteur, d'une longueur d'environ 16,6km, si on considère une erreur relative d'un facteur 5, les apports du fleuve à la nappe sont de $-86\,995\text{m}^3/\text{jour}$ [-17 399 ; -434 975] soit $-5\,230\text{m}^3/\text{jour/km}$ [-1 046 ; -26 150],

- PK190 (18) à 200 (28) : la nappe alimente le contre-canal. Sur ce secteur, d'une longueur

d'environ 11km, si on considère une erreur relative d'un facteur 5, l'apport de nappe au fleuve est de $127\,894\text{m}^3/\text{jour}$ [25 578 ; 639 470] soit $11\,569\text{m}^3/\text{jour/km}$ [2 313 ; 57 845].

Globalement, les secteurs sur lesquels on n'identifie pas d'échanges représentent environ 850m.

Invertébrés souterrains

Les prélèvements d'invertébrés ont été effectués sur deux périodes. La carte 9 présente le diagnostic synthétique. Seuls les résultats concernant la période de moyennes-eaux en mai 2008 sont présentés, car seuls utilisés pour le diagnostic synthétique. Les résultats concernant la période de basses-eaux d'août 2008 confirment le potentiel de la méthode à diagnostiquer des variations saisonnières.

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

- Les affluents de rive droite. La faune stygobie est 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*, indiquent 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 ubiquistes 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 sont 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. La faune retrouvée dans les puits apporte quelques éléments complémentaires. Pour la commune de Saint-Montant, l'absence de stygobie est confirmée par l'absence d'échange dans ce secteur entre le Rhône et les aquifères du versant Ardèche. En revanche la présence, dans un puits proche de la confluence avec l'Ardèche, du gastéropode karstique *Spiralix cf. puteana*, caractéristique de l'Ardèche montre une alimentation en eau à partir du karst ardéchois sur la commune de Saint-Just et jusqu'à environ 1km des berges du Rhône. En ce qui concerne les trois sites localisés dans la plaine de Pierrelatte, 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 à l'aval du secteur où l'absence totale de faune stygobie confirme le colmatage important observé dans cette partie de la plaine de Pierrelatte.

- les affluents de rive gauche. Comme les affluents du versant côté Ardèche, les affluents côté Drôme, à l'exception du Lauzon, ont une faune stygobie bien présente. 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 n'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'échange au niveau de Donzère. En revanche les arrivées d'eau souterraines sont 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, indique 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 indique une alimentation par des eaux du Rhône, probablement issues de pertes 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.

Macrophytes et végétaux aquatiques

La carte 10 dresse la 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 hydrogéologiques 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 PK176, 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 PK179 et le PK182, 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 PK187 et du PK192,5 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.

Physico-chimie des eaux superficielles

La carte de synthèse (Carte 10) a été réalisée à partir des cartes interpolées des valeurs de chimie 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 hydrogéologique 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 passent sous le canal de dérivation pour alimenter les milieux aquatiques. Les contre-canaux drainent la nappe alluviale du Rhône qui est 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 récupère 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'infiltreront 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 est donc 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 présentent 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'infiltreront 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 zone 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 aquatiques de la partie sud/est du territoire d'étude.

Isotopes (Tritium et $\delta^{18}\text{O}$)

Les prélèvements d'eau ont été réalisés en avril et juin 2008 (moyennes-eaux). L'objectif était d'évaluer les signatures isotopiques (dosage du tritium et mesure du $\delta^{18}\text{O}$) des différents « corps d'eau » et surtout leurs différences relatives qui permettent le traçage.

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.

Pour le 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, 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, 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 30UT, caractéristique de 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.

Pour la composition isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$), d'une manière générale, les eaux du Rhône présentent des valeurs négatives, de l'ordre de -10‰ à l'entrée et à la sortie du secteur de 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 (eaux superficielles locales) 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 entre les différentes masses d'eau sur la zone d'étude, aussi bien pour le $\delta^{18}\text{O}$ 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 ces traceurs naturels, 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'amont (à hauteur du PK2 en rive gauche du canal de dérivation) 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 d'une 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 contre-canal en rive gauche du canal de dérivation au PK9 draine essentiellement des eaux locales. Le contre-canal en rive droite à l'aval du barrage de garde sur le Vieux-Rhône, reçoit également une alimentation importante depuis les versants (plus d'un tiers),
- La Lône de la Grange Ecrasée se caractérise par une alimentation essentiellement par des eaux locales, alors que la Lône de Saint-Ferréol est principalement alimentée par les eaux du Rhône.

Synthèse des résultats par méthode

Analyse géomatique

L'étude hydraulique des échanges nappes/Rhône à partir de la méthode géomatique, est fondée sur une piézométrie de moyennes-eaux datée de mars 2009.

Les résultats de ce diagnostic peuvent être présentés synthétiquement de la manière suivante :

- on observe deux situations différentes pour la rive droite du canal de dérivation : il y a alimentation de la nappe du PK1 au PK18 au niveau du canal d'amenée et drainage de la nappe entre les PK18,5 et 28 au niveau du canal de fuite,

- Pour la rive gauche du Vieux-Rhône, le fleuve draine la nappe entre les PK171 et 185,5, puis les échanges s'inversent sur la partie aval où le fleuve alimente la nappe (PK186 à 199).

Un complément à ce diagnostic pour la confluence Rhône/Ardèche a été réalisé à partir d'une piézométrie de moyennes-eaux datée d'avril 2011. Les résultats sont les suivants :

- la nappe alimente le Vieux-Rhône en rive droite sur tout le linéaire étudié (PK186 à 192). Les flux échangés sont relativement faibles,

- l'Ardèche en rive gauche est principalement alimentée par la nappe sur le linéaire étudié amont, entrecoupé par quelques secteurs dans les méandres où les échanges s'inversent. Sur la partie aval, au niveau de la confluence avec le Rhône, c'est l'Ardèche qui alimente la nappe. Les flux échangés restent relativement faibles.

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 :

- des espèces ubiquistes,
- des espèces caractéristiques des masses d'eau du versant ardéchois,
- des espèces caractéristiques de la nappe du Rhône,
- 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 (PK173 à 175, PK180, PK185 à 189) en basses-eaux. En moyennes-eaux, la situation est identique sauf entre les PK185 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 PK175 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 PK9 et 12,5 en moyennes comme en basses-eaux,

- En rive gauche du canal de dérivation, entre les PK0 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 PK4 au PK21, puis une zone colmatée du PK21,5 au PK23, enfin, une zone d'apports de nappe mélangés à des eaux du fleuve du PK23,5 au PK25,5. En basses-eaux, une même zone de mélange se situe entre les PK7 et 9. A l'aval, entre les PK9,5 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.

En juin 2010, une nouvelle campagne de prélèvements a été effectuée sur le même secteur afin de déterminer si les apports souterrains côté Ardèche arrivent jusqu'au Rhône.

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

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

Végétaux aquatiques (macrophytes) et physico-chimie des eaux superficielles

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 PK169 et 187. Les végétaux quant à eux montrent des apports plus diffus et sur de plus courts linéaires de berges : entre les PK169 et 178,5, entre les PK179 et 182, ainsi qu'au niveau des PK187 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 PK169 et 177 pour la chimie et entre le PK169 à 182 pour la végétation (sauf au niveau du PK176,5 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 PK0 et 29 pour la chimie, et entre les PK0 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 PK0 et 12 pour la chimie, et entre les PK0 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.

Isotopes

L'étude isotopique des échanges nappes/Rhône est fondée sur deux 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' $\delta^{18}\text{O}$ et le Tritium.

Les résultats de ces deux 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 PK171 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 PK176 et 178 ; 2) un colmatage du plan d'eau échantillonné entre les PK187 et 188,

- En rive droite du canal de dérivation, les analyses décèlent des apports du Rhône à la nappe entre les PK3 et 5.

- En rive gauche du canal de dérivation, des apports latéraux au Rhône sont perceptibles entre les PK2 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 PK8 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.

Résultats et carte de synthèse

Pour ce secteur, les principaux résultats sont donnés dans le corps du guide et plus précisément dans le Chapitre 5 qui présente les tableaux de croisements des métriques (Tableaux 10 et 11) et la carte de synthèse (Carte 11).

Références bibliographiques citées

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, 161p.

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.

Plénet S, Hugueny H, Gibert J (1996) Invertebrate community response to physical and chemical factors at the river/aquifer interaction zone II. Downstream from the city of Lyon. Arch. Hydrobiol. 136: 65-88

Références complémentaires

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, 169-184.

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, 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.

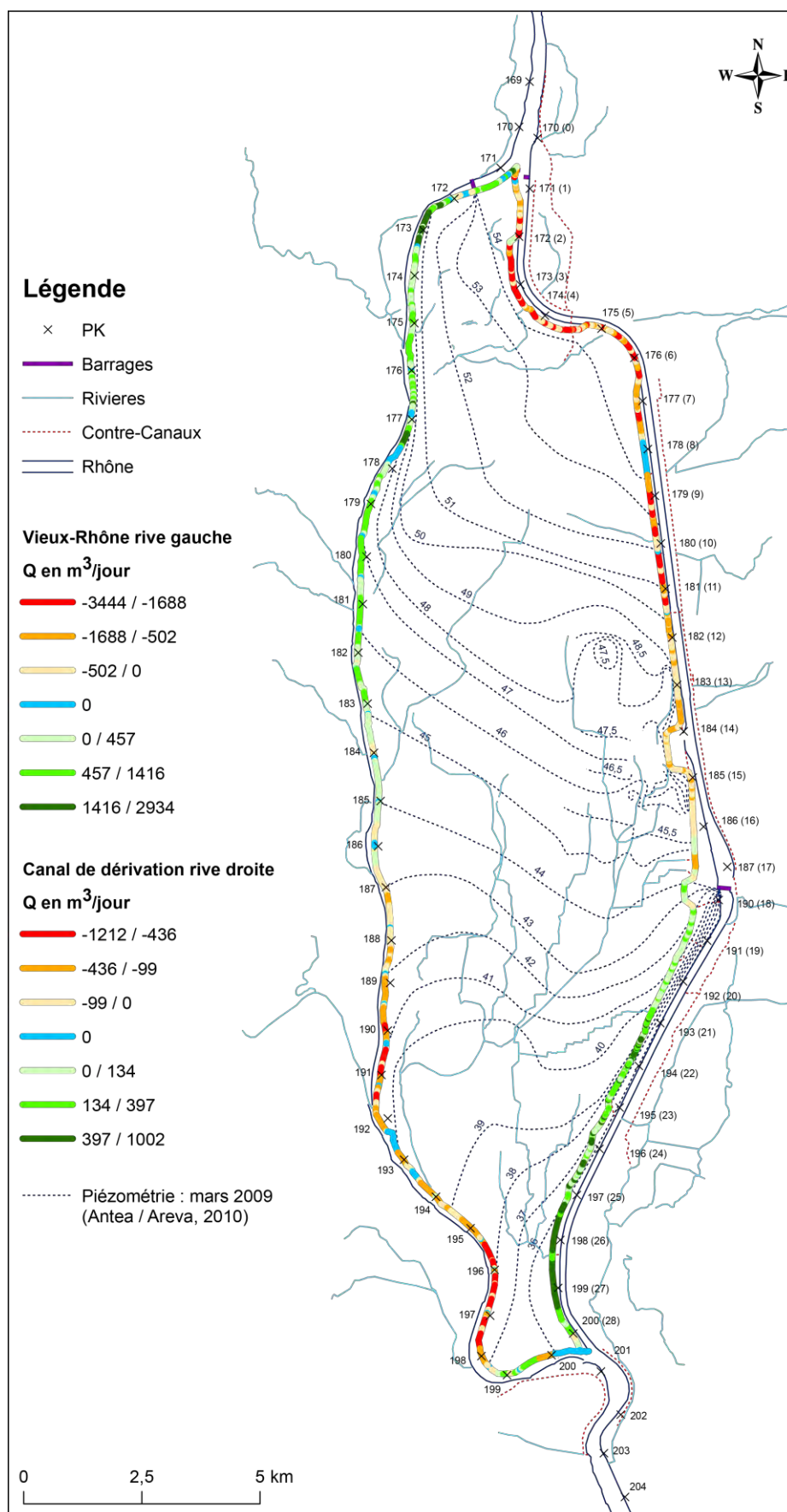
La Houille Blanche - Collectif (1955) Construction du barrage de retenue sur le Rhône à Donzère La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série.

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

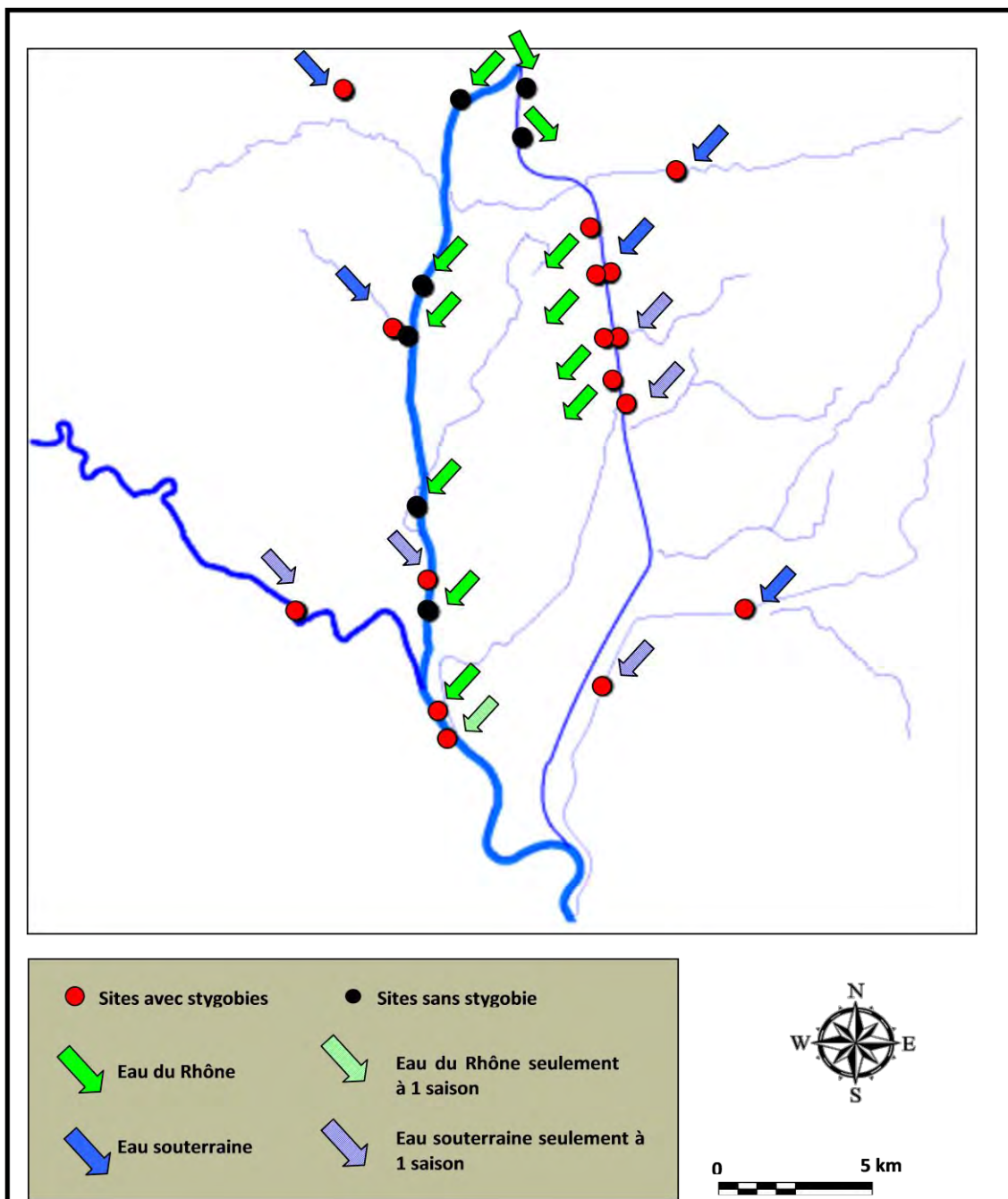
Pavin A (1955) Construction du bloc usine-déchargeur-écluse de Bollène. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série, 267-300.

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.

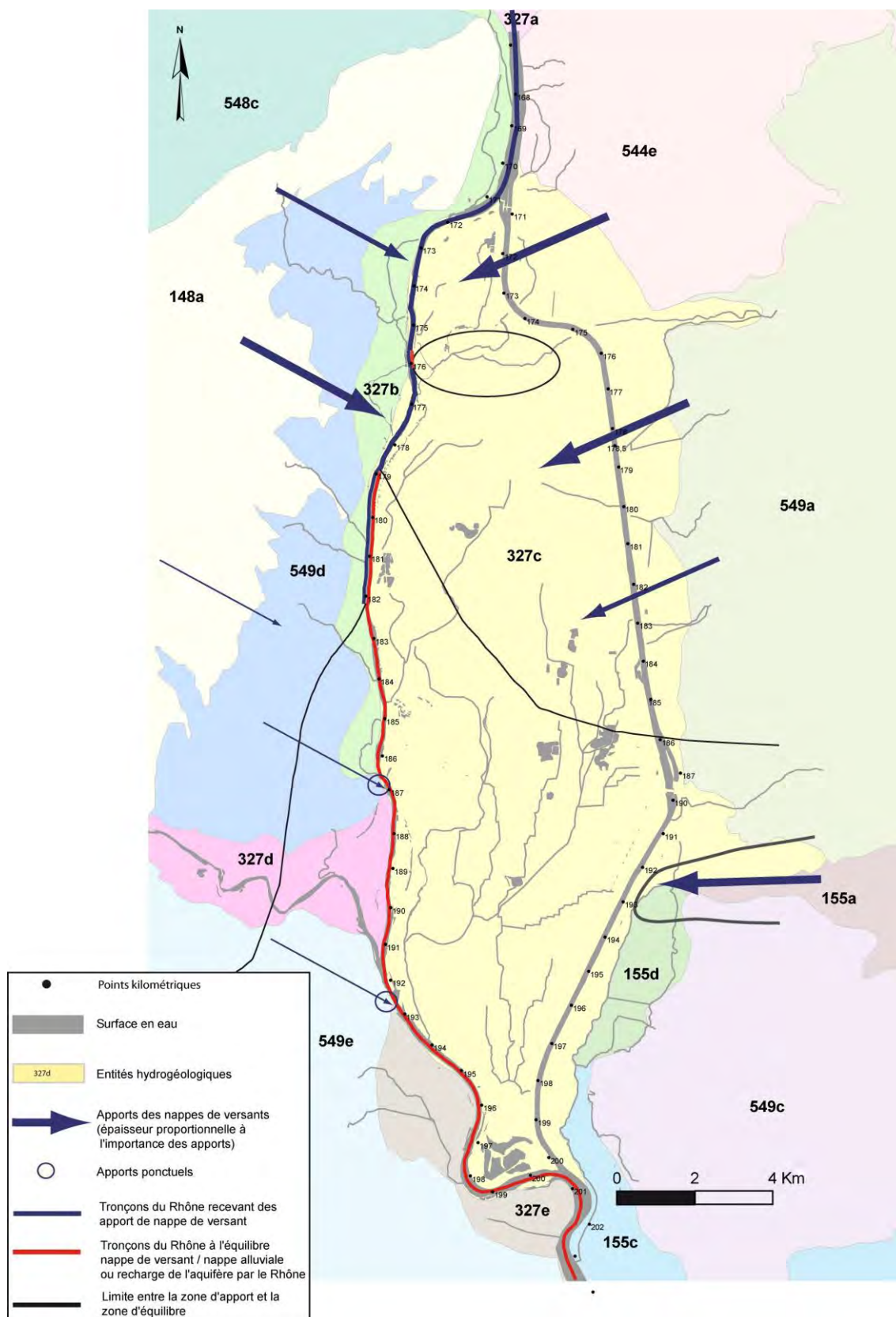
SOGREAH (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide. Volet 3 : Dynamique fluviale – Transport solide. 1er étape : Diagnostic de l'état actuel : analyse par aménagement. CNR, IRS. 250p.



Carte 8 : Diagnostic du point de vue de la méthode géomatique sur Donzère-Mondragon (Mars 2009, moyennes-eaux) – Carte générée à partir de sorties SIG retouchées avec un logiciel de dessin vectoriel

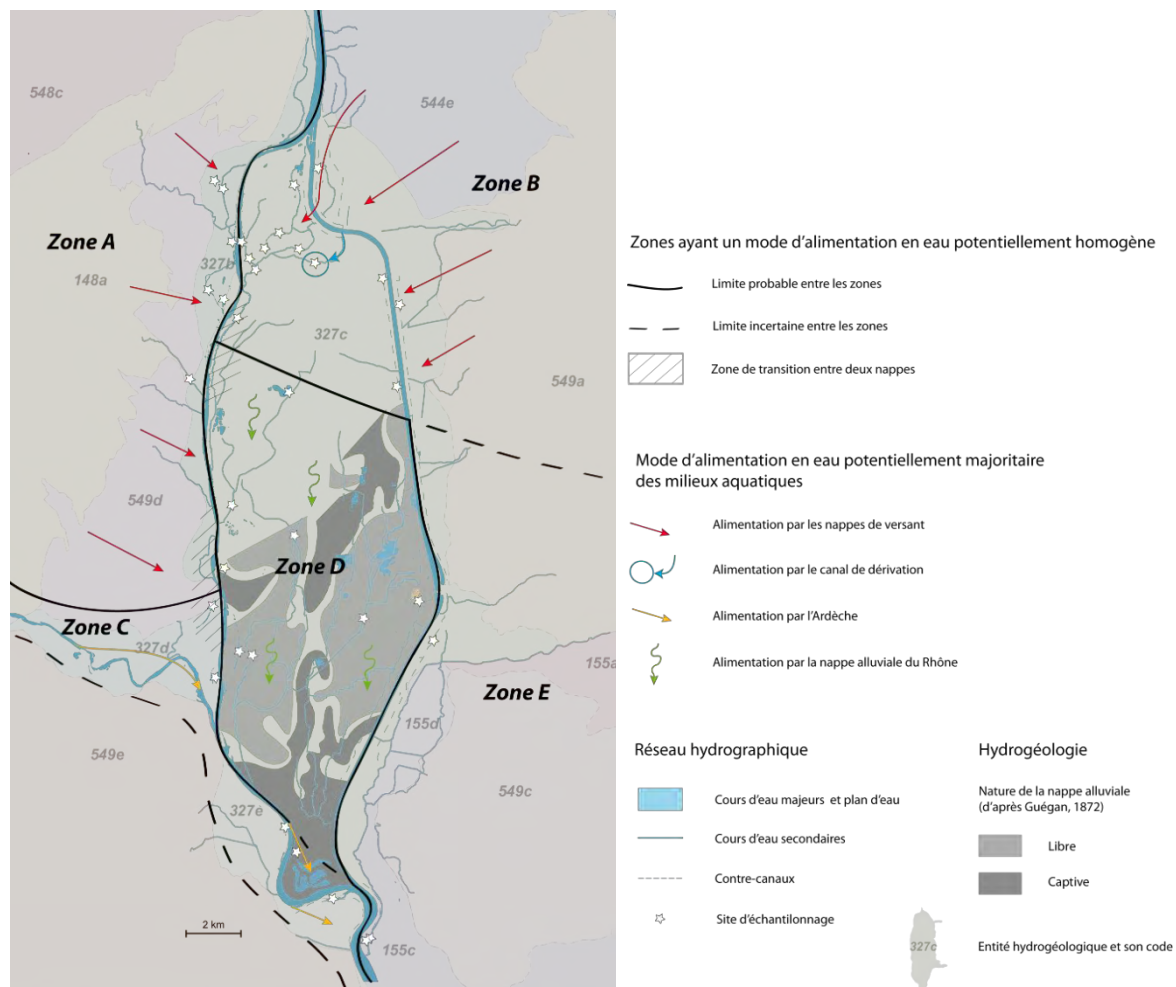


Carte 9 : Diagnostic du point de vue des invertébrés souterrains (+physico-chimie des eaux interstitielles) sur Donzère-Mondragon (Mai 2008, moyennes-eaux et août 2008, basses-eaux)



Carte 10 : Diagnostic du point de vue des macrophytes et végétaux aquatiques sur Donzère-Mondragon (juin-juillet 2008, moyennes-eaux/basses-eaux)

Les numéros en gras sur la carte codent les entités hydrogéologiques en présence d'après le Référentiel Hydrogéologique Français version 1 (BDRHFv1) : aquifères alluviaux du Rhône (327a, 327b, 327c, 327d, 327e, 155c), autres aquifères alluviaux (155a, 155d), entités imperméables localement aquifères (544e, 549a, 549c, 549d, 549e), entités sédimentaires (148a, 148b)



Carte 11 : Diagnostic du point de vue de la physico-chimie des eaux superficielles sur Donzère-Mondragon (juin-juillet 2008, moyennes-eaux/basses-eaux)



Vue du canal de dérivation à Donzère-Mondragon sur la route de digue jalonnée par les piézomètres CNR de surveillance (© F. Paron)

III. Beauchastel confluence Rhône/Eyrieux

Description rapide du site

Localisation (Carte 12) : ce site est situé à l'aval de Valence entre les aménagements CNR de Bourg-lès-Valence et de Baix-le Logis Neuf. Sur ce secteur, le Rhône délimite les départements de l'Ardèche en rive droite et le département de la Drôme en rive gauche

Régime climatique : méditerranéen à épisodes cévenols

Débits caractéristiques du Rhône : module : $1\,400\text{m}^3/\text{s}$ (quinquennale sèche : $1\,100\text{m}^3/\text{s}$; quinquennale humide : $1\,700\text{m}^3/\text{s}$) ; QMNA (Débit mensuel minimum annuel) : $700\text{m}^3/\text{s}$ (Biennale) ; $560\text{m}^3/\text{s}$ (quinquennale) ; crue biennale : $3\,800\text{m}^3/\text{s}$; débits réservés du Vieux-Rhône à de l'aménagement VNR de Beauchastel : $10\text{m}^3/\text{s}$ de septembre à mars et $20\text{m}^3/\text{s}$ d'avril à août.

Géologie et hydrogéologie (Carte 13) : Sur le secteur de la chute CNR de Beauchastel, il y a essentiellement une seule entité hydrogéologique alluviale en présence. Cette entité est entourée de 4 entités adjacentes et repose sur 2 autres comme substratum.

Entité alluviale principale : RHD14, Alluvions quaternaires de la vallée du Rhône de Tain l'Hermitage à Viviers :

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

Aquifères adjacents à RHD14 :

- 603c (rive droite) : Vivarais Cévennes / Doux et Heyrieux (Formations cristallophylliennes et magmatiques),
- 603k (rive droite) : Formations cristallophylliennes et magmatiques dans les bassins versants de l'Eyrieux et de l'Ouvèze,
- 154b1 (rive gauche) : Alluvions anciennes des basses-terrasses entre la confluence de l'Isère et de la Drôme,
- 154c (rive gauche) : Plaine de Valence Sud.

Substratum de RHD14 :

- MIO3 (nord du secteur) : Formations molassiques du Bas-Dauphiné,
- PLIO3 (sud du secteur) : Argiles bleues du Pliocène inférieur de la moyenne Vallée du Rhône,

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

Aménagement CNR (Carte 12) : L'aménagement CNR de Beauchastel s'étend du PK109 au nord de Valence jusqu'au PK127 en aval de la confluence avec l'Eyrieux. Cet aménagement a été construit entre 1957 à 1963, date de la mise en service. Il produit 1,2 milliard de kWh/an. Le barrage de retenue, court-circuitant le Rhône, est sis au niveau de Charmes-sur-Rhône au PK119,6. La Vieux-Rhône rejoint le canal de dérivation au PK126,6. Ce dernier débutant au PK119,2. L'unité de production hydroélectrique, la centrale-déchargeur-écluse de Beauchastel, se trouve entre les PK4 et 5 sur le canal de dérivation. Comme tous les aménagements au fil de l'eau, on note la présence de contre-canaux.

Données utilisées

Les données utilisées pour le diagnostic multi-méthode des échanges nappes/rivières sont les suivantes :

- Campagnes piézométriques CNR (Octobre 1985, 26-30 septembre 2003 – basses-eaux, 1 juin 2007 – moyennes-eaux humides),
- Cotes du talweg du Rhône : données CNR,
- Cotes du niveau d'eau du Rhône : données CNR,
- Fiches entités hydrogéologiques et couvertures spatiales : données AE-RMC,
- Débits du Rhône et de l'Eyrieux : Banque Hydro,
- Echantillonnage invertébrés et physico-chimie en juillet 2012 (moyennes-eaux),
- Relevés macrophytes et physico-chimie du 18 au 21 juin 2012 (moyennes-eaux).

Résultats et carte de synthèse

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

La carte 14 présente les résultats spatialisés :

- les points et cercles rouges localisent les sites échantillonnés pour les invertébrés. Leur taille est proportionnelle au nombre d'individus stygobies identifiés, indicateurs d'apports souterrains,
- les segments colorés localisent les portions de berge pour lesquelles le diagnostic hydraulique a été effectué. Les segments vert foncé et vert clair indiquent des secteurs où la nappe alimente le cours d'eau, en bleu des secteurs où il n'y a pas

d'échange, en rouge et orange des secteurs sur lesquels le cours d'eau alimente la nappe. Les débits échangés sont en m³/s,

- les plages colorées dans un dégradé de vert localisent la probabilité d'un apport de nappe au cours d'eau en se fondant sur l'indice macrophytes. La probabilité d'apport de nappe est plus forte pour les tons foncés et plus faible (voire nulle) pour les tons les plus clairs. Pour finir, les petites touffes bleues positionnent les sites échantillonnés pour les macrophytes.

Pour synthétiser l'information ci-avant, et de manière simplifiée, la carte 15 propose un diagnostic synthétique des échanges sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux. Le tableau 24 présente un bilan quantitatif comparé des échanges.

Les échanges diagnostiqués sur le secteur peuvent être résumés de la façon suivante :

Eyrieux rive gauche :

- PK0 à 6 : pas d'échange / recyclage PK6 à 3.

Eyrieux rive droite :

- PK2 à 4 : sous-écoulement de l'Eyrieux à travers la plaine vers l'Eyrieux / recyclage PK4 à 2,
- PK0 à 0,5 : pas d'échange.

Canal de dérivation rive gauche/retenue :

- PK2 à 6 : pas d'échange.

Vieux-Rhône rive droite et aval :

- PK120,5 à 127 : pas d'échange.

Vieux-Rhône rive gauche et aval :

- PK119,5 à 130 : apport de nappe au Vieux-Rhône.

Canal de dérivation rive droite/retenue :

- PK115 à 116,5 : la nappe alimente le contre-canal,
- PK116,5 à 118 : pas d'échange,
- PK118 à 118,5 : la nappe alimente le contre-canal,
- PK118,5 à 119,5 : le contre-canal alimente la nappe,
- PK0 à 4,5 : la nappe alimente le contre-canal,
- PK4,5 à 6 : pas d'échange.

Références bibliographiques

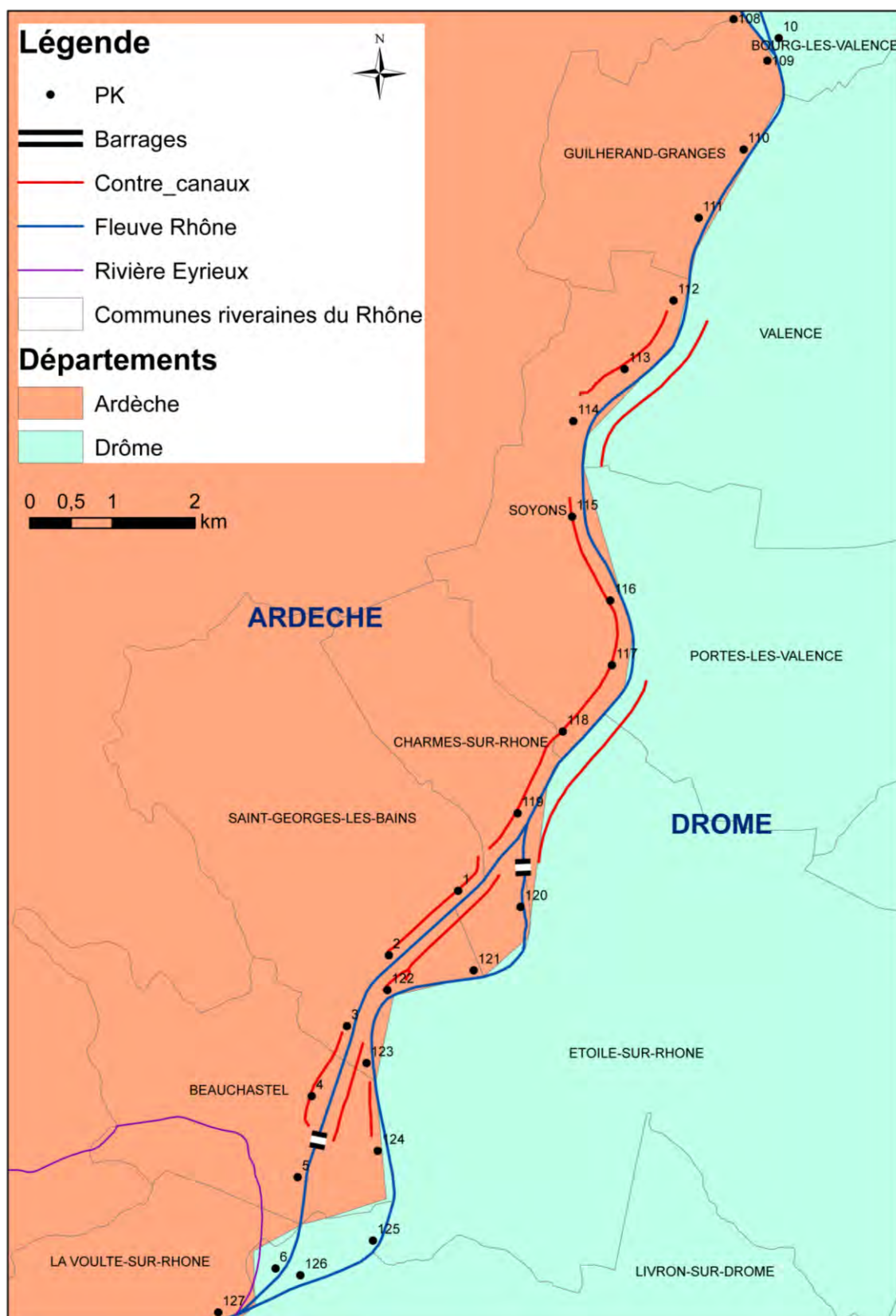
CNRa (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. Volet 2 : Hydraulique – Dossiers historiques. Dossier historique : Beauchastel. DI-CE 99-925. 46p.

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

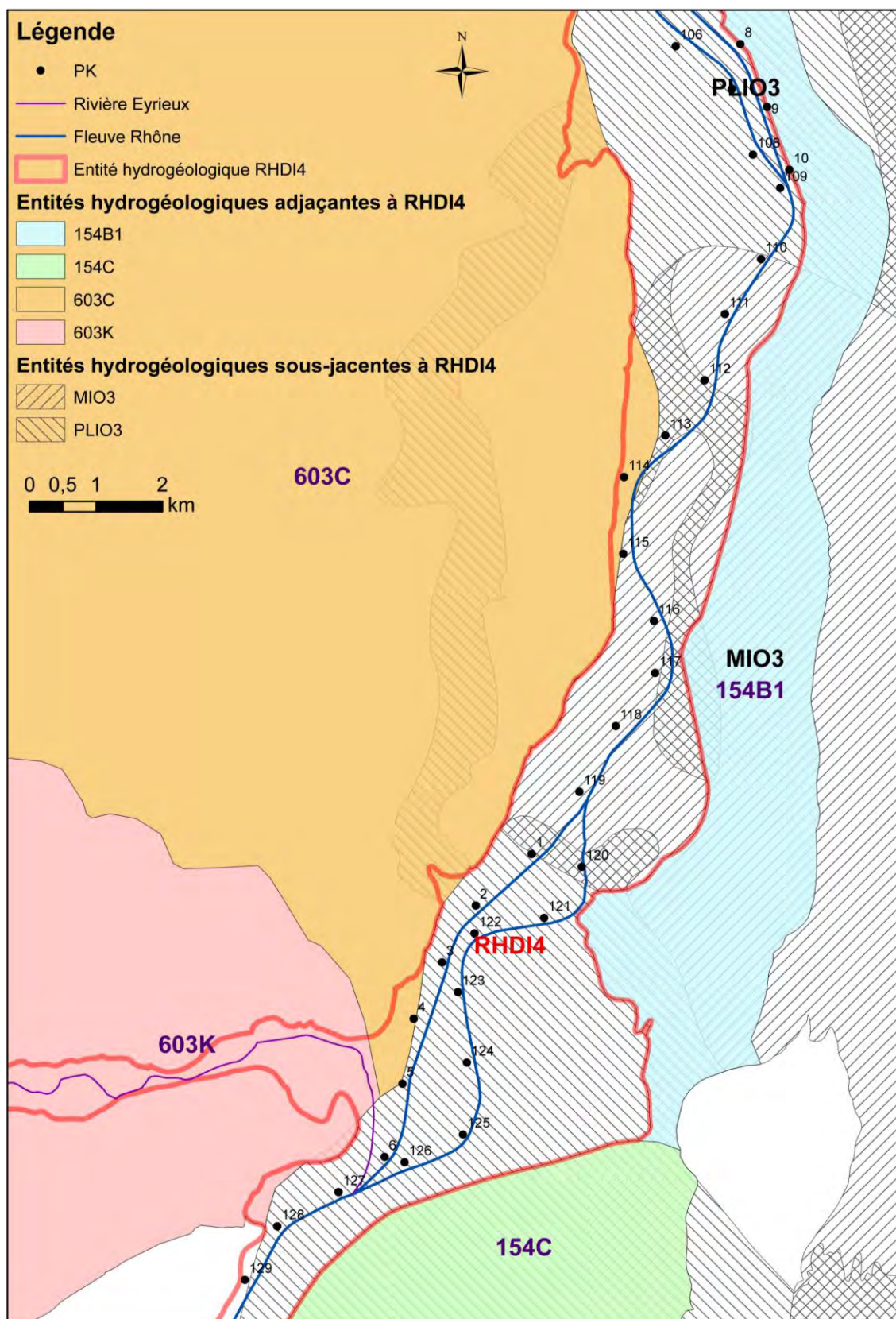
Tableau 24 : Bilan quantitatif des échanges sur Beauchastel



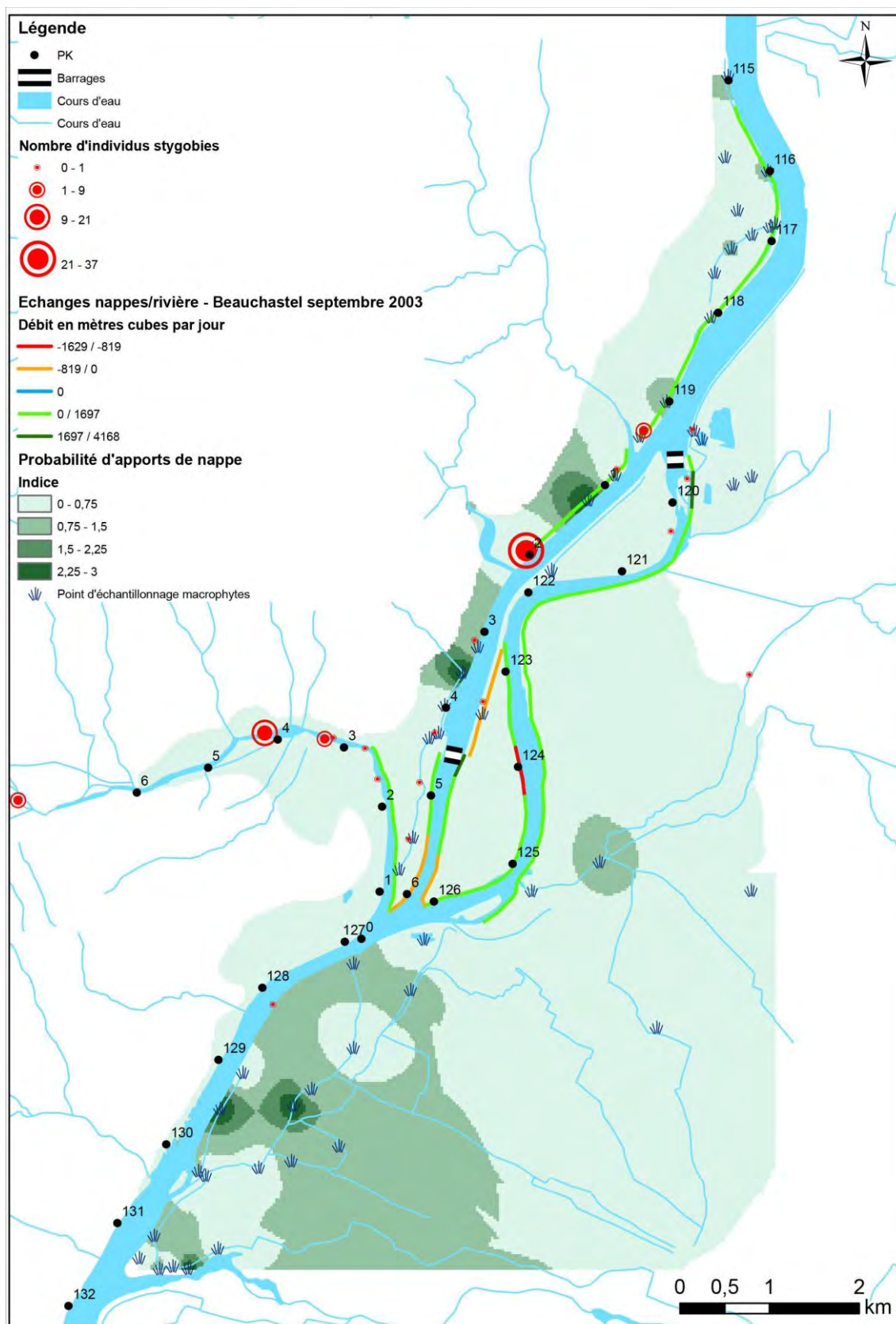
Barrage CNR sur le Rhône à proximité de Beauchastel (84) (© F. Paran)



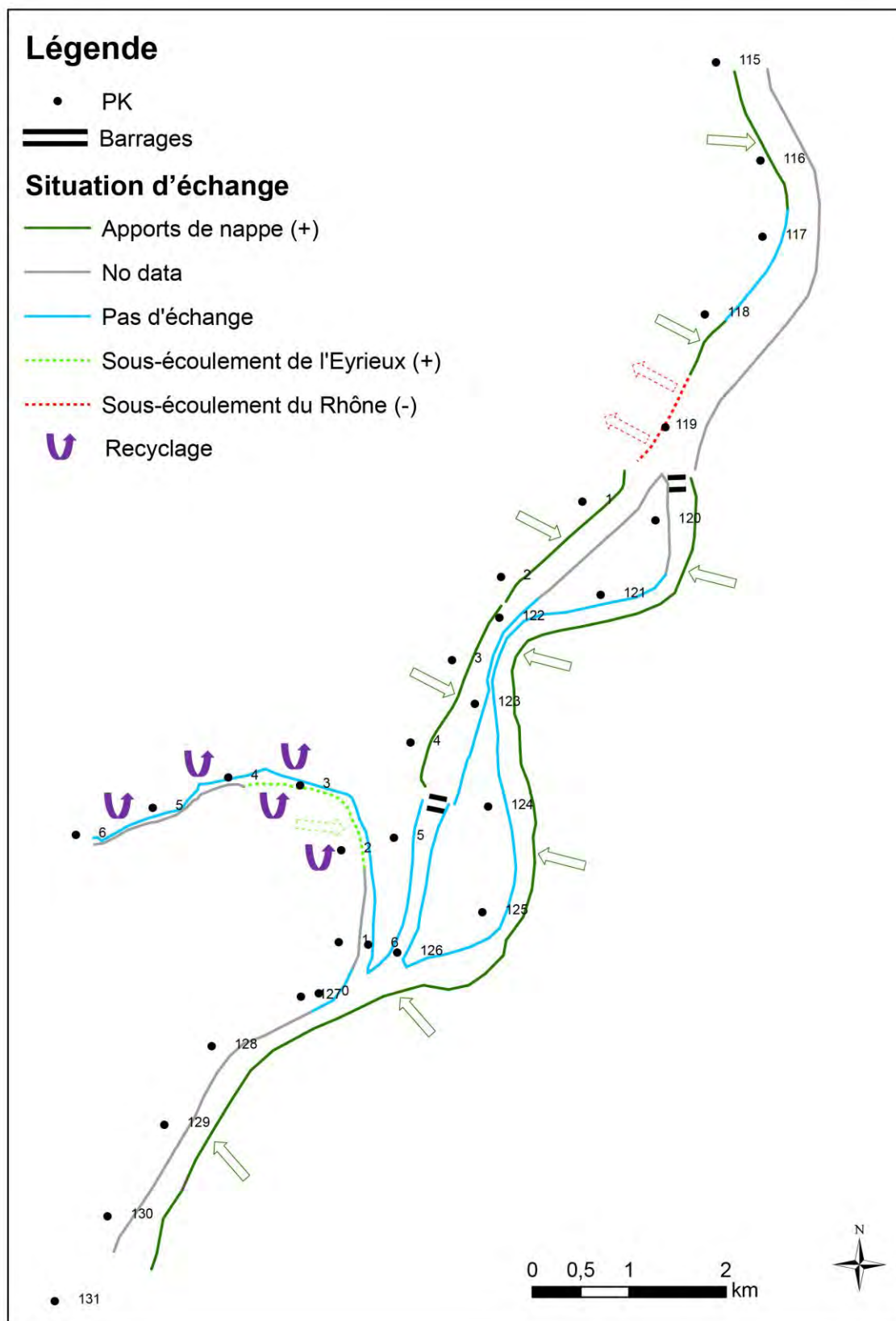
Carte 12 : Localisation et présentation du secteur de Beaucaistel



Carte 13 : Entités hydrogéologiques sur le secteur de Beauchastel



Carte 14 : Superposition spatiale des méthodes sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux



Carte 15 : Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux



Berge érodée de l'Eyrieux, un affluent du Rhône à proximité de Beauchastel (84) (© F. Paran)

IV. Péage-de-Roussillon

Description rapide du site

Localisation : La chute de Péage-de-Roussillon est située à environ 50km à l'aval de Lyon. Elle comprend l'île de la Platière, les formations alluviales de la rive droite du Vieux-Rhône à Limony et celles de la rive gauche entre le barrage de Saint-Pierre de Bœuf au nord et la restitution à Saint-Rambert d'Albon au sud.

Régime climatique : nivo-pluvial.

Débits caractéristiques du Rhône : module interannuel à Ternay (30km en amont) : $1\,040\text{m}^3/\text{s}$; QMNA5 (débit minimal mensuel quinquennal) : 340 à $390\text{m}^3/\text{s}$; Q5 : $3\,900\text{m}^3/\text{s}$; Q10 : $4\,000\text{m}^3/\text{s}$.

Géologie et hydrogéologie : Sur le plan géologique, le substratum de la nappe est constitué de roches pliocènes bleues et localement de granites. A l'ouest, on observe des roches cristallines et à l'est des formations quaternaires glaciaires (moraines sans aquifère étendu et sans continuité hydraulique avec la nappe alluviale du Rhône). Il existe une gouttière (paléo-vallée) depuis La Platière jusqu'au barrage EDF-CNR. Les alluvions sont de 2 types : terrasses fluvio-glaciaires (grossières) et fluviales (sables, galets, localement limons qui les recouvrent sur au maximum 2 à 6m) dont l'épaisseur varie de 20 à 30m. La perméabilité moyenne est de 10^{-3}m/s . Des essais de pompage donnent des valeurs approchantes : essais de pompage OSIRIS (6.10^{-3} à 14.10^{-3}m/s) et essais de pompage à Limony (5.10^{-3} à $6.1.10^{-3}\text{m/s}$).

D'après la littérature, la nappe est alimentée par :

- le Vieux-Rhône au nord et sur le versant ouest de la zone de Limony,

- les collines morainiques des terrasses würmiennes et post-würmiennes (petits galets et graviers polygéniques, matrice sableuse) au pied de la bordure Est,

- les vallées de la Sanne et du Dolon qui constituent des apports non-négligeables,

- la dépression de Bièvre-Valloire au sud qui constitue un apport important (2 à $3\text{m}^3/\text{s}$) à la nappe du Rhône (alluvions sablo-graveleuses épaisses de 15 à 20m ; succession de nappes fluvio-glaciaires à perméabilités de 10^{-3} à 10^{-2}m/s).

Sur le secteur de Péage-de-Roussillon les prélèvements dans les eaux superficielles du Rhône sont limités à $3\,700\text{m}^3$ en 2004 alors que les prélèvements dans la nappe sont très importants pour atteindre un total d'environ $73\,000\,000\text{m}^3$ pour l'année 2003. Ils se répartissent de la façon suivante :

- AEP : $5\,000\,000\text{m}^3$ en 2003, commune de Péage-de-Roussillon (SIGEARPE), secteurs de Peyraud et Limony (SIE Annonay-Serrières), commune de Saint-Rambert d'Albon,

- Industrie : $63\,000\,000\text{m}^3$ en 2003, OSIRIS (Péage-de-Roussillon), LINDE gaz (Salaise-sur-Sanne), TREDIPEC-TREDI (Salaise-sur-Sanne), EUROFLOAT (Salaise-sur-Sanne),

- Agriculture : $5\,300\,000\text{m}^3$.

Les rejets des STEP sont de $24\,600\text{m}^3/\text{an}$.

Aménagement CNR : L'aménagement CNR est constitué d'un canal de dérivation de 11,5km de long terminé par un barrage dont la hauteur de chute est de 15,3m pour un tirant d'eau de 11m (cote 143,4m). Le débit maximum turbinable est de $1\,600\text{m}^3/\text{s}$. Au niveau du canal de dérivation, la

berge est bétonnée intégralement en rive droite. Sur la rive gauche la berge est aussi bétonnée de Péage-de-Roussillon au port de Salaise-Sablons : le reste est enroché. Le fond du canal, quant à lui est non-bétonné, et vraisemblablement colmaté par des limons. Il est perché par rapport à l'aquifère. Le Vieux-Rhône présente un débit réservé de $10\text{m}^3/\text{s}$ de septembre à mars et de $20\text{m}^3/\text{s}$ d'avril à août. En cette période le tirant d'eau est de 11m (cote 143,42m NGF en amont et 132,29m NGF en aval). Peu après la restitution, on observe un seuil, le seuil de Peyraud : 131,6m NGF (chute de 2,5m). Au niveau de l'île de la Platière, les contre-canaux présentent un débit de 2 à $3\text{m}^3/\text{s}$.

Données utilisées

- carte piézométrique du 10 juin 2005 (BURGEAP, 2007a ; 2007b).

Résultats et comparaison avec un travail de modélisation

BURGEAP estime d'après son modèle que l'alimentation totale du Vieux-Rhône par la nappe sur le secteur, est d'environ $2\text{m}^3/\text{s}$, rives droite et gauche confondues, ce qui représente $172\,800\text{m}^3/\text{jour}$ pour une perméabilité moyenne comprise entre $4 \cdot 10^{-3}$ et 10^{-2}m/s et une surface utile

que nous fixerons par hypothèse à 10m (le fleuve est ici plus large et plus profond qu'à Brégnier-Cordon). L'apport de la nappe au fleuve, déterminé par analyse spatiale, est compris entre $82\,040\text{m}^3/\text{jour}$ (soit $0,95\text{m}^3/\text{s}$). Cette valeur est inférieure à celle calculée par le modèle. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que nos calculs ne tiennent pas compte des apports en rive droite. Toutefois, la majorité des apports se fait en rive gauche.

Références bibliographiques citées

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

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

V. Bilan du point de vue quantitatif sur les sites étudiés

Le tableau suivant (Tableau 25) présente un bilan quantitatif des échanges d'eau de la nappe vers le Rhône ou les cours d'eau (Eyrieux et Ardèche) sur les sites étudiés. Pour chacune des chutes CNR étudiées, les résultats sont donnés pour chacune des rives étudiées et repérés à l'aide PK.

Les débits d'échanges sont exprimés en m^3/s et m^3/j pour la totalité de la longueur des tronçons de cours d'eau étudiés. Ils sont aussi exprimés de manière unitaire en $\text{m}^3/\text{j}/\text{km}$ et en $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ afin de permettre les comparaisons.



Un cygne tuberculé (© F. Paran)

Secteur	Chutes CNR	Date PK	Estimation de l'apport de la nappe au Rhône							
			Rive gauche				Rive droite			
			m ³ /j	m ³ /s	m ³ /j/km	m ³ /s/km	m ³ /j	m ³ /s	m ³ /j/km	m ³ /s/km
Haut-Rhône	Brégnier-Cordon	Février 1990 111 à 99 RG	47 160	0,55	5 655	0,065	-			
Rhône-Moyen	Péage-de-Roussillon	Juin 2005 51 à 63 RG	82 040	0,95	13 232	0,153	-			
Rhône-Aval	Beauchastel	Septembre 2003 119,5 à 126 RG 122,5 à 126 RD	18 738	0,22	2 787	0,032	5 375	0,06	1726	0,02
		Juin 2007 119,5 à 126 RG 122,5 à 126 RD	13 867	0,16	2 063	0,024	3	3.10 ⁻⁵	110	1.10 ⁻³
	Eyrieux	Septembre 2003 0 à 3 RG	1 227	0,01	645	0,007	-			
		Juin 2007 0 à 3 RG	28	3.10 ⁻⁴	17	2.10 ⁻⁴				
	Donzère-Mondragon	Mars 2009 170 à 195 RG	131 257	1,52	8 786	0,10				
		Avril 2011 186 à 192 RD					1 150	0,013	276	3.10 ⁻³
	Ardèche	Avril 2011 0 à 8	1 830	0,05	1022	0,012	-			

Tableau 25 : Bilan quantitatif



Le Vieux-Rhône et la île de la Platière vue de haut à proximité du pont de Serrière (42) (© F. Paran)



Le Rhône à Lyon (69) (© G. Poussard)

FP_7. BASES DE DONNEES ET INFORMATIONS CONSULTABLES



Repère 14 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°7

Cette Fiche Pratique propose une liste, non exhaustive, de sources d'informations, de métadonnées et de données généralement accessibles en ligne. Il peut s'agir de portails d'accès, de référentiels, de portails documentaires, de portails d'informations, de sites web, de géorépertoires, de portails d'accès à des données ou de portails géomatiques.

I. Description des listes des sources d'information

Contenu

L'information décrivant ces sources est contenue dans des tableaux. La colonne de gauche contient le nom et le type de la source. La colonne de droite quant à elle contient :

- le lien internet (http) pour accéder à la source (mise à jour : novembre 2013),
- un descriptif rapide de son contenu,
- des informations sur les producteurs de données et les gestionnaires de la source,
- les conditions d'accès à l'information.

Listes

Les tableaux suivants (Tableaux 26 à 32) proposent un regroupement des sources par thèmes :

- informations et données sur l'eau à l'échelle nationale française (ex : Sandre, EauFrance, Gest'Eau...),
- sources spécifiques au bassin du Rhône (ex : MetaZABR, CNR, AE-RMC...),
- informations et données spécifiques aux eaux superficielles (ex : Banque Hydro, ROE...) et aux eaux souterraines (ex : ADES, InforTerre, DBLISA...),
- sources spécifiques aux invertébrés souterrains (ex : Pascalis...) et aux végétaux aquatiques et zones humides (ex : Tela Botanica, Carmen...),
- informations et données moins spécifiques à la thématique de l'eau mais qui peuvent s'avérer utiles (ex : Géoportail IGN, DRIAS...).



Ecluse du pont de Jons (69) (© D. Palanque)

II. listes des sources d'information par thèmes

Eau : général

Nom	Lien d'accès internet et résumé du contenu (mise à jour novembre 2013)
SANDRE <i>Portail d'accès aux référentiels</i>	Lien : http://www.sandre.eaufrance.fr/
	Contenu : met à disposition le référentiel des données sur l'eau du système d'information sur l'eau (SIE).
	Producteurs de données : les producteurs de données publiques engagés dans la mise en cohérence de leurs données dans le cadre du système d'information sur l'eau (SIE).
	Gestionnaires : Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (Sandre).
	Condition d'accès : accès libre aux référentiels nationaux sur l'eau.
Eaufrance <i>Portail d'accès</i>	Lien : http://www.eaufrance.fr/
	Contenu : ce portail est le point d'entrée du système d'information sur l'eau (SIE). Il a pour but de faciliter l'accès à l'information publique dans le domaine de l'eau en France.
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Liste de portails Eaufrance <i>Portail d'accès</i>	Lien : http://www.eaufrance.fr/spip.php?page=portail
	Contenu : la diffusion des données disponibles dans le cadre du système d'information sur l'eau (SIE) s'organise, en particulier, autour de plusieurs portails internet, tous accessibles depuis le portail parent (www.eaufrance.fr).
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Disc'eau <i>Référentiel</i>	Lien : www.sandre.eaufrance.fr/disceau
	Contenu : la description des dispositifs de collecte
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Documentation sur l'eau <i>Portail documentaire</i>	Lien : http://www.documentation.eaufrance.fr/
	Contenu : permet l'accès aux documents techniques sur l'eau et les milieux aquatiques, produits en français
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Gest'Eau <i>Portail d'accès aux informations sur les outils</i>	Lien : http://gesteau.eaufrance.fr/
	Contenu : site des outils de gestion intégrée de l'eau, il propose des informations sur les documents de planification que sont les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), ainsi que sur les contrats de milieux (rivière, baie, nappe).
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Agences de l'eau <i>Site web</i>	Lien : http://www.lesagencesdeleau.fr/
	Contenu : portail internet des Agences de l'eau.
	Gestionnaires : Les Agences de l'eau établissement public du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE).
	Condition d'accès : libre.
Economie <i>Référentiel</i>	Lien : www.economie.eaufrance.fr
	Contenu : accès aux sources de données économiques du système sur l'eau.
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Glossaire <i>Référentiel</i>	Lien : www.glossaire.eaufrance.fr
	Contenu : glossaire sur l'eau
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Image <i>Référentiel</i>	Lien : www.image.eaufrance.fr
	Contenu : le site des données images de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.

Pollutions <i>Référentiel</i>	Lien : www.pollutions.eaufrance.fr
	Contenu : contient les données sur les pollutions des milieux aquatiques en France.
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Rapportage <i>Référentiel</i>	Lien : www.rapportage.eaufrance.fr
	Contenu : le site des données sur l'eau rapportées à l'Union européenne.
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Res'eau <i>Extranet SIE</i>	Lien : www.reseau.eaufrance.fr
	Contenu : le site des acteurs du Système d'information sur l'eau.
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
Surveillance <i>Référentiel</i>	Lien : www.surveillance.eaufrance.fr
	Contenu : site permettant de rendre compte des programmes de surveillance des bassins et de diffuser le rapport de mise en œuvre.
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
ONEMA <i>Site web</i>	Lien : http://www.onema.fr/L-information-sur-les-ressources
	Contenu : information sur l'eau, les milieux aquatiques et leurs usages
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques)
	Condition d'accès : libre

Tableau 26 : Source d'information : eau – général

Eau : Rhône

Nom	Lien d'accès internet et résumé du contenu (mise à jour novembre 2013)
MetaZABR <i>Géorépertoire</i>	Lien : http://metazabr.lyon.cemagref.fr/
	Contenu : le géorépertoire présenté ici constitue un portail ouvert sur les connaissances acquises sur l'état écologique du bassin versant du Rhône, dans les domaines géomorphologique, hydrologique, biologique, sociologique et économique.
	Producteurs de données : membres de la ZABR
	Gestionnaires : Cemagref
	Condition d'accès : libre
Bassin Rhône-Méditerranée <i>Site web</i>	Lien : http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/
	Contenu : regroupe les informations et les données sur l'eau et les milieux aquatiques produites par les services publics (Etat et Agence de l'eau) répartis sur les 5 régions de son territoire.
	Producteurs de données : les services publics (Etat et Agence de l'eau)
	Gestionnaires : eaufrance
	Condition d'accès : libre
CNR InfoRhône <i>Site web</i>	Lien : http://www.inforhone.fr/inforhone/FR/Commun/index.aspx
	Contenu : informations sur les conditions de navigation sur le Rhône, les débits et niveaux, ainsi que les aménagements et infrastructures du Rhône.
	Producteurs de données : Compagnie Nationale du Rhône (CNR)
	Gestionnaires : Compagnie Nationale du Rhône (CNR)
	Condition d'accès : libre
DREAL Rhône-Alpes <i>Site web</i>	Lien : http://www.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/
	Contenu : portail internet de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement, et du Logement Rhône-Alpes (DREAL Rhône-Alpes)
	Gestionnaires : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement, et du Logement Rhône-Alpes (DREAL Rhône-Alpes)
	Condition d'accès : libre

Tableau 27 : Source d'information : eau - Rhône

Eaux superficielles

Nom	Lien d'accès internet et résumé du contenu (mise à jour novembre 2013)
Banque HYDRO <i>Accès à la base de données</i>	Lien : http://www.hydro.eaufrance.fr/
	Contenu : stocke les mesures de hauteur d'eau en provenance de 3 500 stations de mesure (dont 2 400 sont actuellement en service) implantées sur les cours d'eau français et permet un accès aux données signalétiques des stations (finalité, localisation précise, qualité des mesures, historique, données disponibles...).
	Producteurs de données : il s'agit essentiellement des services de l'Etat, directions régionales de l'Environnement, services de prévision des crues, directions départementales de l'agriculture et de la forêt, Agences de l'eau, mais aussi d'Electricité de France ou d'organisme de recherche (CEMAGREF, universités,...), ainsi que des compagnies d'aménagement (la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne, la Compagnie nationale du Rhône, la Société du canal de Provence, la Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône-Languedoc...).
	Gestionnaires : le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (service du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable).
	Condition d'accès : la consultation ne nécessite pas de formalité, le téléchargement est soumis à l'ouverture d'un compte et à l'attribution d'un identifiant et d'un mot de passe. L'accès aux données et leur rapatriement sont également possibles via un logiciel client gratuit appelé HYDRO2, à installer sur PC.
Hydroréel <i>Portail d'accès aux données</i>	Lien : http://www.rdbmrc.com/hydroréel2/carto.php
	Contenu : contient des données hydrométriques en temps réel du Bassin Rhône-Méditerranée.
	Producteurs de données : différents producteurs de données (services administratifs, gestionnaires des réseaux et ouvrages du bassin).
	Gestionnaires : DREAL Rhône-Alpes, DREAL du bassin Rhône Méditerranée (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement, et du Logement Rhône-Alpes).
	Condition d'accès : visualiseur en libre accès.
Vigicrues <i>Portail d'accès aux informations</i>	Lien : http://www.vigicrues.gouv.fr/
	Contenu : contient les cartes de vigilance crues (prévision des inondations) .
	Producteurs de données : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE).
	Gestionnaires : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE).
	Condition d'accès : visualiseur en libre accès.
ROE <i>Référentiel</i>	Lien : http://www.eaufrance.fr/ressources/documents/carte-eaufrance-obstacles-a-l
	Contenu : contient le référentiel des obstacles à l'écoulement sur les cours d'eau (ROE).
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.
SYRAH <i>Site web</i>	Lien : http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/maly/pole-onema-irstea/hydromorphologie-et-alterations-physiques
	Contenu : contient les informations sur l'hydromorphologie et altérations physiques.
	Producteurs de données : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement de l'Agriculture (IRSTEA) et l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA).
	Gestionnaires : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement de l'Agriculture (IRSTEA).
	Condition d'accès : libre.

Tableau 28 : Source d'information : eau - surface

Eaux souterraines

Nom	Lien d'accès internet et résumé du contenu (mise à jour novembre 2013)
ADES <i>Accès à la base de données</i>	Lien : http://www.ades.eaufrance.fr/
	Contenu : contient des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines.
	Producteurs de données : il s'agit essentiellement des services de l'Etat , Agences de l'eau, Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), Agences Régionales de Santé (ARS) : données de la base SISE-EAUX du ministère chargé de la Santé, base alimentée par le contrôle sanitaire concernant les eaux souterraines captées pour la production d'eau potable (uniquement les données sur les eaux brutes), collectivités territoriales (conseils généraux, régionaux, syndicats de gestion d'aquifères, communautés de communes, parcs naturels), autres organismes chargés de missions publiques, ainsi que industriels dans le cadre du suivi des Installations Classées et Sites Pollués.
	Gestionnaires : le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières).
	Condition d'accès : la consultation ne nécessite pas de formalité, les professionnels de l'eau doivent faire une demande d'accès avec authentification ou se rapprocher de la cellule d'animation d'Ades.

InfoTerre <i>Portail géomatique d'accès aux données</i>	Lien : http://infoterre.brgm.fr/
	Contenu : diffuse les données géoscientifiques du BRGM : cartes géologiques du 1/1 000 000 au 1/50 000, dossiers de la Banque de données du Sous-Sol et logs géologiques, cartes des risques naturels et industriels, données sur les eaux souterraines, dont BDISO 2007 : French Isotopic Data Base on groundwater, surface water and rainwater.
	Producteurs de données : il s'agit essentiellement du BRGM, mais aussi du Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA).
	Gestionnaires : BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières).
	Condition d'accès : visualiseur de données géoscientifiques en libre accès.
BDLISA <i>Accès à la base de données</i>	Lien : http://services.sandre.eaufrance.fr/telechargement/geo/BDLISA/0/
	Contenu : contient la base de données nationale des nappes souterraines (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères).
	Producteurs de données : les services régionaux du ministère chargé de l'écologie, les agences et offices de l'eau, les services régionaux du service géologique régional (BRGM), mais des collectivités territoriales, des organismes de recherche et des bureaux d'étude.
	Gestionnaires : service public d'information sur l'eau : eaufrance.
	Condition d'accès : libre.

Tableau 29 : Source d'information : eau – aquifères

Invertébrés souterrains

Nom	Lien d'accès internet et résumé du contenu (mise à jour novembre 2013)
PASCALIS <i>Site web</i>	Lien : http://www.pascalis-project.com/
	Contenu : liste des espèces souterraines et des localisations pour 5 pays européens
	Producteurs de données : divers
	Gestionnaires : European Commission
	Condition d'accès : auprès de Louis Deharveng (NMHN) ou de Florian Malard (LEHNA, Université Lyon 1).
Thèse David FERREIRA	Lien : http://umr5023.univ-lyon1.fr/index.php?pid=360&lang=fr
	Contenu : synthèse des occurrences des organismes hypogés en France
	Producteurs de données :
	Gestionnaires :
	Condition d'accès : librement téléchargeable Université Lyon 1

Tableau 30 : Source d'information : invertébrés souterrains

Végétaux aquatiques et zones humides

Nom	Lien d'accès internet et résumé du contenu (mise à jour novembre 2013)
TELA BOTANICA <i>Site web</i>	Lien : http://www.tela-botanica.org/site:accueil
	Contenu : contient des informations sur la systématique des végétaux en France.
	Producteurs de données : divers.
	Gestionnaires : Association TELA BOTANICA
	Condition d'accès : libre.
Conservatoires botaniques <i>Site web</i>	Lien : http://www.fcbn.fr/
	Contenu : portail internet de la fédération des Conservatoires botaniques nationaux
	Gestionnaires : la fédération des Conservatoires botaniques nationaux
	Condition d'accès : libre.
Programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône	Lien : http://restaurationrhone.univ-lyon1.fr/cartes/carte_rhone.php
	Contenu : suivie des lînes restaurées sur le Rhône (dont données de végétation)
	Producteurs de données :
	Gestionnaires :
	Condition d'accès : libre.

Carmen <i>Portail d'accès</i>	Lien : http://www.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/cartes-carmen-de-diffusion-de-la-a96.html
	Contenu : cartes Carmen de diffusion de la Dreal Rhône-Alpes sur les Zones Humides (surtout info sur les types de zones humides présentes à proximité des rivières donc sur les sites potentiels pour l'échantillonnage)
	Producteurs de données : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement, et du Logement Rhône-Alpes (DREAL Rhône-Alpes)
	Gestionnaires : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement, et du Logement Rhône-Alpes (DREAL Rhône-Alpes)
	Condition d'accès : libre
Zones humides <i>Site web</i>	Lien : www.zones-humides.eaufrance.fr
	Contenu : site des milieux humides.
	Gestionnaires : ONEMA (l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
	Condition d'accès : libre.

Tableau 31 : Source d'information : végétation aquatique et zones humides

Autres

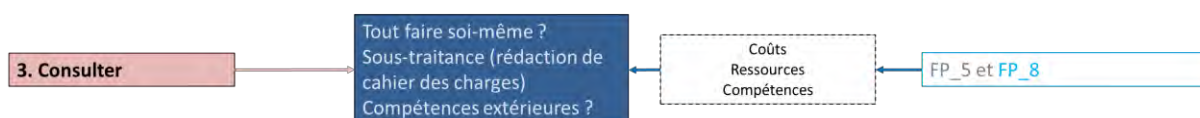
Nom	Lien d'accès internet et résumé du contenu (mise à jour novembre 2013)
Géoportail IGN <i>Portail géomatique d'accès aux données</i>	Lien : http://www.geoportail.gouv.fr/accueil
	Contenu : contient les données géographiques numériques de l'IGN (photos aériennes, cartes à toute échelle, représentations des bâtiments et du parcellaire cadastral, hydrographie, altitude, limites administratives, noms de lieux, etc.) mais également de nombreuses données publiques produites par des partenaires (espaces naturels, sites protégés, zonages d'occupation du sol, géologie, description du littoral, prévisions des marées, vidéos historiques, zones urbaines sensibles ou zones franches urbaines, zones à risque, patrimoine naturel ou culturel...).
	Producteurs de données : il s'agit essentiellement de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), de l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP), de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE).
	Gestionnaires : l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière)
	Condition d'accès : visualiseur en libre accès
Geocatalogue <i>Géorépertoire</i>	Lien : http://www.geocatalogue.fr/SearchTileForward.do
	Contenu : inventorie les différentes sources d'informations géographiques publiques.
	Producteurs de données : services de l'État, établissements publics, collectivités territoriales ou toute autre organisation publique.
	Gestionnaires : BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières).
DRIAS <i>Site web</i>	Condition d'accès : libre
	Lien : http://www.drias-climat.fr/
	Contenu : met à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat. Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques.
	Producteurs de données : IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), CNRM-GAME.
	Gestionnaires : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE).
	Condition d'accès : libre.

Tableau 32 : Source d'information : autres sources d'information



Le Rhône au pont de la Loi (01 et 73) (© G. Poussard)

FP_8. PERSONNES RESSOURCES ET COMPETENCES



Repère 15 : Liens entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°8

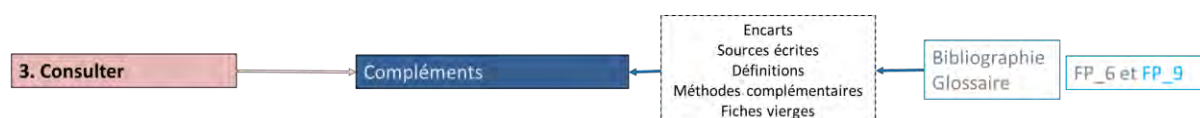
Compétences	Noms et prénoms	Organismes	Adresses e-mail
Hydrogéologie	Cadilhac Laurent	Agence de l'eau RMC	laurent.cadilhac@eaurmc.fr
	Graillot Didier	GSE, ENSM-SE	didier.graillot@mines-stetienne.fr
Analyse géomatique	Paran Frédéric	GSE, ENSM-SE	frederic.paran@mines-stetienne.fr
Invertébrés souterrains et physico- chimie des eaux interstitielles	Marmonier Pierre	LEHNA, Univ. Lyon 1	pierre.marmonier@univ-lyon1.fr
	Piscart Christophe	ECOBIO, Univ. Rennes 1	christophe.piscart@univ-rennes1.fr
	Florian Malard	LEHNA, Univ. Lyon 1	florian.malard@univ-lyon1.fr
	Marie-José Dole-Olivier	LEHNA, Univ. Lyon 1	marie-jose.olivier@univ-lyon1.fr
Végétation aquatique et physico-chimie des eaux superficielles	Bornette Gudrun	LEHNA, Univ. Lyon 1	gudrun.bornette@univ-fcomte.fr
	Arthaud Florent	CARRTEL, Univ. Savoie	florent.arthaud@univ-savoie.fr
Physico-chimie et chimie isotopique des eaux	Lavastre Véronique	Magmas et Volcans, Univ. Saint-Etienne	veronique.lavastre@univ-st-etienne.fr
ZABR	Clémens Anne	GRAIE, Villeurbanne	anne.clemens@zabr.org

Tableau 33 : Personnes ressources et compétences (Février 2014)



Une péniche sur le canal de dérivation à Péage-de-Roussillon (38) (© F. Paran)

FP_9. TABLEAUX ET FICHES VIERGES



Repère 16 : Liens entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°9

Nature	Cible éventuelle	Contraintes/Impératifs	Etudes complémentaires à réaliser ou à consulter	Check O/N
<i>Connaissance du fonctionnement global du secteur</i>	Compartiments superficiels et souterrains de l'hydrosystème	Echelle kilométrique Diversité des éléments interconnectés de l'hydrosystème	Bilan hydrogéologique	
<i>Restauration Réhabilitation</i>	Zone humide alluviale	Echelle locale Variations saisonnières	Diagnostic écologique patrimonial Diagnostic hydraulique	
	Méandre du chenal	Connaître les arrivées d'eau souterraine favorisant le refroidissement de l'eau		
	Gravière			
<i>Pollution Protection</i>	Zone à protéger (captage, zone humide patrimoniale, pollution thermique)	Echelle locale Suivi en continu des niveaux d'eau et de la physico-chimiques	Diagnostic industriel et socio-économique	
<i>Impact quantitatif des captages à proximité de la rivière</i>	Ancien/existant	Echelle très locale < 1km Suivi en continu des niveaux d'eau	Essai de pompage Modélisation Etude d'impact	
	Nouveau/prévu	Echelle très locale < 1km		
<i>Stockage d'eau pour le futur (recharge de nappe)</i>	A partir du fleuve	Echelle locale Paramètres et données	Modélisation et simulation	
	A partir des contre-canaux			
<i>Autres</i>	A définir	-	-	

Tableau 34 : Définir les objectifs et les enjeux – fiche vierge

Description Zone de travail		Eléments importants	Intérêt	Facteurs limitant l'application des méthodes	Check O/N
<i>Position</i> <i>Contexte géographique</i>		Position par rapport aux dernières glaciations	Biogéographie des invertébrés souterrains	Limite nord d'applicabilité de la méthode « invertébrés souterrains » (Belley pour le Rhône)	
		Position p/r à la zone méditerranéenne	Biogéographie des végétaux aquatiques	Limite sud de l'applicabilité sous-réserve de la méthode « végétaux aquatiques » (Orange pour le Rhône)	
<i>Nappe alluviale</i> <i>Contexte hydrogéologique</i>		Libre	Condition optimale	-	
		Semi-captive	Comportement différent en période de hautes-eaux	Applicabilité sous réserve de l'analyse géomatique	
		Captive	Comportement spécifique de la nappe	Analyse géomatique non applicable – loi de Darcy inapplicable	
		Monocouche	Condition optimale pour la caractérisation des échanges	Attention aux hétérogénéités (lentilles d'argile)	
<i>Cours d'eau et plaine</i> <i>Contexte géomorphologique</i>		Confluence	Dépôt de sédiments fins (1) Apports possibles de la nappe accompagnant l'affluent du cours d'eau principal	Raréfaction des communautés souterraines (1) Extension limitée de la zone alluviale	
		Méandre	Inversion des échanges selon la position dans le méandre	-	
		Bancs de graviers	Diagnostic du recyclage possible par les invertébrés	-	
		Mouille	Dépôt de sédiments fins	Raréfaction des communautés souterraines	
		Paléo-chenal	Chenal d'écoulement préférentiel pour la nappe Hot spot d'invertébrés souterrains et de végétaux aquatiques	Fréquence d'érosion par les crues trop élevée (végétaux aquatiques et invertébrés) Altération chimique trop importante (eutrophisation, phytosanitaire)	
		Connexion zone humide/chenal	Erosion ou alluvionnement	Raréfaction des communautés souterraines Raréfaction ou changement des communautés végétales	
		Caractère temporaire ou pérenne de la zone humide	Fréquence et variation des échanges	Raréfaction ou changement des communautés végétales	
<i>Contexte anthropique</i>	<i>Canal de dérivation</i>	Nature du fond	Etat colmaté ou non	Absence de sous-écoulement si colmaté	
		Altitude du fond par rapport à la nappe	Écoulement de nappe sous le canal	-	
	<i>Contre-canal</i>	Débit	Degré de colmatage du canal d'amenée	-	
		Origine de l'eau	Drainage d'eau d'origines différentes	-	
		Entretien	Curage du contre-canal	Raréfaction des communautés végétales	
	<i>Obstacles</i>	Barrage / seuil	Relèvement de la ligne d'eau à l'amont, abaissement à l'aval Echanges avec les contre-canaux	Echanges nappes/rivières déportés à l'aval de l'endroit étudié	
	<i>Gravières</i>	En exploitation	Abaissement de la ligne d'eau de nappe	Essentiellement végétaux aquatiques pionniers ou absence Pas d'invertébrés souterrains	
		Post-exploitation	Réhabilitation en plan d'eau	-	

Tableau 35 : Définir la zone de travail – fiche vierge

Nom du site - Cours d'eau - Rive						PK	Diagnostic synthétique	PK	Qualité des diagnostics				
PK	Hydro/SIG	Invertébré	Macrophyte	Chimie	Isotope				Hydro.	Invert.	Mphyt.	Chim.	Iso.
	Date	Date	Date	Date	Date								
	ME	ME	ME	ME	ME								
0						0		0					
1						1		1					
2						2		2					
3						3		3					
4						4		4					
5						5		5					
6						6		6					
7						7		7					
8						8		8					
9						9		9					
10						10		10					
11						11		11					
12						12		12					
13						13		13					
14						14		14					
15						15		15					
16						16		16					
17						17		17					
18						18		18					
19						19		19					
20						20		20					
21						21		21					
22						22		22					
23						23		23					
24						24		24					
25						25		25					
26						26		26					
27						27		27					
28						28		28					
29						29		29					
30						30		30					
31						31		31					
32						32		32					
33						33		33					
...						...		...					
n						n		n					

Tableau 36 : Comparaison des méthodes et diagnostic synthétique compte-tenu des incertitudes : tableau vierge

Sélection espace/temps	Période / extension géographique	Protocole	méthodes pertinentes	Check O/N
<i>Echelle de temps</i>	Hiver (Hautes-eaux)	1 campagne au moins	Hydraulique (Analyse SIG)	
	Moyennes-eaux	1 campagne au moins	Hydraulique (Analyse SIG), invertébrés, isotopes	
	Eté (Basses-eaux)	1 campagne au moins	Hydraulique (Analyse SIG), invertébrés, isotopes	
	Moyen terme (2 à 3 ans)	1 campagne annuelle en été	Végétaux aquatiques	
	Long terme (changement climatique)	Campagnes anciennes conformes aux prérequis du guide (géoréférencement, nivellement, identification des espèces, abondance)	Données anciennes faunistiques et floristiques, hydrauliques (Analyse SIG), isotopes	
<i>Echelle spatiale</i>	100m	Effort d'échantillonnage adapté	Invertébrés, végétaux aquatiques, isotopes	
	1km à 20km		Invertébrés, végétaux aquatiques, isotopes, hydrauliques (Analyse SIG)	
	20 à 100km		végétaux aquatiques, isotopes	

Tableau 37 : Sélectionner des échelles de temps et d'espace – fiche vierge



Un château en ruine dominant le Rhône (© G. Poussard)

Bibliographie et références



Repère 17 : Démarche et bibliographie

I. Utilisées pour la réalisation du guide et citées dans le document

Rapports projet échanges nappes/Rhône

Paran F, Arthaud F, Baillet H, Bornette G, Déchomets R, Ferreira D, Germain A, Gibert J, Graillot D, Jezequel C, Lafont M, Lalot E, Marmonier P, Novel M, Piscart C, Puijalon S, Rodriguez C, Simon L, Travi Y (2007, 2008, 2010 et 2012) Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface. Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapports finaux et fiches de synthèse phases 1, 2, 3 et 4, Action recherche valorisation ZABR. AE-RMC, ENSM-SE, LEHNA, CEMAGREF Lyon.

Hydrogéologie et analyse SIG

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

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

Collin JJ (2006) Les aquifères alluviaux. In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 1, 74-90.

de Marsily G (1981) Hydrogéologie Quantitative. Masson.

Lalot E (2014) Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières - application au Rhône. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.

Paran F, Graillot D, Lalot E, Marmonier P, Bornette G, Piscart C, Arthaud F, Flipo N, Mouhri A, Habets F, Thierion C, Rejiba F, Bodet L, Guérin R, Tallec G, Chatelier M, Douez O, Maugis P (2012) Caractérisation des échanges nappes/rivières à l'échelle du tronçon ou du linéaire par méthode expérimentale ou par modélisation jusqu'à l'échelle régionale. NAPROM (NAPPes-Rivières : Observation et Modélisation). Rapport final année 1et 2, ONEMA.

Rampnoux JP (1992) Aquifères n°12, 12bis, 12ter et 13, Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la vallée du Rhône et de la basse vallée du Guiers en rive savoyarde, Synthèse des données générales existantes sur la nappe alluviale. CG Savoie, DDAF Savoie, 34p.

Végétaux aquatiques (macrophytes)

Aeschimann D, Burdet HM, Arnoux A, Palese R, Perret P (2012) Flore de la Suisse Le nouveau Binz 3ème édition. Edition Haupt.

Amoros C, Bornette G, Pascal Henry C (2000) A vegetation-based method for ecological diagnosis of

riverine wetlands. *Environmental Management*, Vol. 25, Num. 2, 211-227.

Bailly B, Schaefer O (2010) Guide illustré des Characées du nord-est de la France. Edition du Conservatoire botanique national de Franche-Comté.

Braun-Blanquet J (1932) Plant sociology. (translation by H.S. Conard, G.D. Fuller). 18 + 439 p. Mac Graw-Hill Book Co. Inc. New York.

Eggenberg S (2013) Flora Vegetativa - Un guide pour déterminer les plantes de Suisse à l'état végétatif 2ème édition. Edition Rossolis.

Henry C, Amoros A (1999) La vallée du Rhône, étude préalable à la mise en place d'une gestion intégrée : diagnostic des potentialités évolutives, typologie et cartographie des lînes sur l'ensemble du Rhône, chute de Brégnier-Cordon (AIN). Rapport CNR et Agence de l'eau RMC.

Lambinon J, Delvosalle L, Jaques Duvigneaud J (2012) Nouvelle flore de la Belgique du G. D. de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines 6ème édition. Edition du Jardin botanique national de Belgique.

Lauber K, Wagner G, Gyga A (2012) Flora Helvetica 4ème édition. Edition Haupt.

Montégut J (1993) Le milieu aquatique : connaissance, entretien, désherbage. Association de Coordination Technique Agricole.

Invertébrés souterrains

Bou C, Rouch R (1967) New researches in subterranean aquatic fauna. *C R Acad Sci* 265 : 369-370.

Capderrey C (2013) Effets de la géomorphologie des rivières en tresses sur les communautés d'invertébrés aquatiques et sur la structuration génétique des populations du crustacé isopode souterrain *Proasellus walteri*. Thèse de doctorat, Université Lyon 1.

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

Creuzé des Châtelliers M (1991) Dynamique de répartition des biocénoses interstitielles du Rhône en relation avec des caractéristiques géomorphologiques. Thèse doctorale, Université Claude-Bernard, Lyon I, 161p.

Dole-Olivier MJ, Creuzé des Châtelliers M, Marmonier P (1993) Repeated gradients in subterranean landscape - Example of the stygofauna in the alluvial floodplain of the Rhône river (France). *Arch. Hydrobiol.*, 127, 4, 451-471.

Gibert J, Stanford JA, Dole-Olivier MJ, Ward JV (1994) Basic attributes of groundwater ecosystems and prospects for research. In: *Groundwater Ecology*, J Gibert, DL Danielopol, Stanford JA Ed., Academic Press, San Diego, 7-40.

Ginet R (1982) Structure et fonctionnement des écosystèmes du Haut-Rhône français. XXIV. Les amphipodes des eaux interstitielles en amont de Lyon - *Pol. Arch. Hydrobiol.*, 29(2): 231-237.

Ginet R (1996) Bilan Systématique du genre *Niphargus* en France, Société Linnéenne de Lyon, 242p.

Henry JP, Magniez G (1983) Crustacés Isopodes (Principalement Asellotes). Association Française de Limnologie, 39p.

Marmonier P (1988) Biocénoses interstitielles et circulation des eaux dans le sous-écoulement d'un chenal aménagé du Haut Rhône français. Thèse Université Lyon I (France), 2 tomes, 1-161 et 1-108.

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

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

Marmonier P, Vervier P, Gibert J, Dole-Olivier MJ (1993) Biodiversity in Ground Waters. *Trends Ecol. Evol.*, 8: 392-395.

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

Meisch C (2000) Freshwater ostracoda of western and central Europe. *Spektrum Akad. Verlag, Gustav Fischer*, 522p.

Plenet S, Hugueny H, Gibert J (1996) Invertebrate community response to physical and chemical factors at the river/aquifer interaction zone II. Downstream from the city of Lyon. *Archiv für Hydrobiologie*, 36: 65-88.

Thienemann (1925) Die Binnengewässer Mitteleuropas. Eine limnologische Einführung. Die Binnengewässer. Schweizerbart Verh. Stuttgart, 1, 1255.

Tirat M, Cottureau C, Mongereau N (2006) Vallée du Rhône. In: *Aquifères et eaux souterraines*, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 2, 658-687.

Physico-chimie

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

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

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

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.

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

Marmonier P, Claret C, Dole-Olivier MJ (2000) Interstitial fauna in newly created floodplain canals of a large regulated river. *Regulated rivers*, 16: 23-36.

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

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

Isotopes

Barbieri M, Boschetti T, Petitta M, Marco T (2005) Stable isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Appl. Geochem.* 20, 2063-2081

Chapman JB, Lewis B, Litus G (2003) Chemical and isotopic evaluation of water sources to the fens of southPark, Colorado. *Environ. Geol.* 43, 533-545.

Coplen TB, Kendall C (2000) Stable isotope and oxygen isotope ratios for selected sites of the U.S. Geological Survey's NASQAN and Benchmark surface-water networks: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-160, 409p.

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

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

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

Gourcy L, Petelet-Giraud E (2011) Utilisation des outils isotopiques pour la délimitation des aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable. Rapport BRGM/RP-59729-FR, 62p.

Gurrieri JT, Furniss G (2004) Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods. *J. Hydrol.* 297, 187-208.

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

iaea (2013) Sampling Procedures for Isotope Hydrology.

<http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/Sampling%20booklet%20web.pdf>

Kendall C, Caldwell AE (1998) *Isotope Tracers in Catchment Hydrology* (1998), C Kendall and JJ McDonnell Eds), Elsevier Science B.V., Amsterdam.

Lalbat F (2006) Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France). Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

Maréchal JC, Etcheverry D (2003) The use of ^3H and ^{18}O tracers to characterize water inflows in alpine tunnels. *Appl. Geochem.* 18, 339-351.

Mook WG (2000) Environmental isotopes in the hydrological cycle. Vol. II Atmospheric water and Vol III Surface water. WG Mook eds. IAEA technical documents in hydrogeology n°39.

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

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

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

Fleuve Rhône

Bravard JP (1987) The Rhône river from the leman lake to Lyon city. La Manufacture, Lyon.

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

Bravard JP, Clémens A (2008) Le Rhône en 100 questions. GRAIE.

Coulet M, Vebard B, Monnet P (1997) Impacts des aménagements hydroélectriques sur l'écosystème Rhône. FRAPNA Lyon, 181p.

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

Creuzé Des Châtelliers M, Reygrobellet JL (1990) Interactions between geomorphological processes, benthic and hyporheic communities: first results on

a by-passed canal of the french Upper Rhône River. *Regulated Rivers: Research & Management*, 5: 139-158.

La Houille Blanche - Collectif (1955) Construction du barrage de retenue sur le Rhône à Donzère La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série.

Documents cadre

Dce (2000)

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Directive-cadre-EAU.html>

Plan Rhône (2007) La Plan Rhône. Un grand projet de développement durable.

<http://www.planrhone.fr/front/index.php>

Sdage (1996, 2010) Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Rhône-Méditerranée.

<http://www.eaurmc.fr/>

Vernoux JF (2013) Evaluer l'impact des eaux souterraines sur les eaux de surface et les écosystèmes associés. Mise en œuvre dans le cadre de la DCE. TMS, 3.

II. Pour aller plus loin

Croisement des méthodes

Graillot D, Paron F, Bornette G, Marmonier P, Piscart C, Cadilhac L (2014) Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges. *SpringerPlus*. 2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.

<http://www.springerplus.com/content/3/1/68>

Graillot D, Paron F, Mimoun D, Bornette G, Gibert J, Cadilhac L (2008) Coupling groundwater modeling with biology to identify strategic water resources. In: *Proceedings of the conference "ModFlow and More: Ground Water and Public Policy"*, organisée par Colorado School of Mines, Golden, USA, May 2008, 209-213.

Paron F, Graillot D, Bornette G, Marmonier P, Arthaud F, Piscart C, Cadilhac L (2012) Development of practical guidebook for water managers: a tree structured approach to characterize exchanges between alluvial aquifers and the Rhône River. *IS RIVER*, Conférence Internationale, Lyon, France, Juin 2012.

Paron F, Graillot D, Dechomets R, Marmonier P, Bornette G (2009) Les relations usages des sols/ressources en eaux souterraines envisagées

selon une double perspective dans le cas d'échanges nappes/rivière - Application au fleuve Rhône. Milieux poreux et transferts hydriques, *Bulletin du groupe francophone humidimétrie et transfert en milieux poreux*, 54, 27-32.

Paron F, Graillot D, Lalot E, Marmonier P, Bornette G, Piscart C, Arthaud F, Flipo N, Mouhri A, Habets F, Thierion C, Rejiba F, Bodet L, Guérin R, Tallec G, Chatelier M, Douez O, Maugis P (2013) Caractérisation des échanges nappes/rivières à l'échelle du tronçon ou du linéaire par méthode expérimentale ou par modélisation jusqu'à l'échelle régionale. *NAPROM (NAPpes-Rivières : Observation et Modélisation)*. Rapport final année 1et 2, ONEMA.

Paron F, Mouhri A, Arthaud F, Bodet L, Bornette G, Chatelier M, Flipo N, Graillot D, Guérin R, Habets F, Marmonier P, Piscart C, Rejiba F, Tallec G, Thierion C, Augeard B, Maugis P (2013) *NAPROM (NAPpes-Rivières, Observation et Modélisation)* Synthèse méthodologique multi-site et multi-critère des échanges nappes/rivières. Colloque annuel du programme de recherche PIREN-Seine, CNRS, Paris, février 2013.

Hydrogéologie et analyse géomatique

Bakalowicz M (2006) Aquifères karstiques. In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 1, 59-73.

Bouillin O, Bellegarde B, Gouisset Y, Martelat A (2006) Couloir rhodanien - Provence Languedoc. Molasse du Miocène. In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 2, 688-693.

Chauve P (2006) Jura. In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 2, 561-590.

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.

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.

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

Lachassagne P, Wyns R (2006) Aquifères socles. In. Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 1, 43-51.

Lamotte C (2011) Synthèse hydrogéologique du Languedoc Roussillon – Bassin Rhône Méditerranée Rapport final BRGM/RP-60305-FR.

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

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

Sogreah (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide. Volet 3 : Dynamique fluviale – Transport solide. CNR, IRS. 250p.

Roux JC (2006) Aquifères et eaux souterraines, 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed.

Roux JC (2006) Vulnérabilité des aquifères aux pollutions. In. Aquifères et eaux souterraines. 2

tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed., Tome 1, 96-102.

Paran F (2009) Modéliser pour mieux gérer l'eau selon les besoins des hommes et des écosystèmes. Dossier : A la conquête de l'eau, Le mensuel de l'Université, juin 2009.

Paran F, Dechomets R, Graillot D (2008) Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale. Géomatique expert, 64, 73-79.

Végétaux aquatiques (macrophytes)

Allorge P (1922) Les associations végétales du Vexin français. Thèse, Univ. Paris. 342 p.

Baillet H (2009) Evaluation des échanges entre eau de surface et eau souterraine par les indicateurs végétaux : origine des aquifères, évaluation semi-quantitative des échanges, vulnérabilité des écosystèmes – Mémoire SSE Géographie-Environnement-Tourisme, Université Lumière Lyon 2, UMR 5023.

Blandin P (1986) Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. Bull. ecol., 17 (4): 215-307

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

Britto DT, Siddiqi MY, Glass ADM, Kronzucker HJ (2001) Futile transmembrane NH₄⁺ cycling: a cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 98, 4255-4258.

Carbiener R (1982) Brunnwasser. Encyclopédie d'Alsace, vol. 1 : 891-900.

Carbiener R (1988) Les associations végétales, biorévélatrices des échanges hydrologiques eaux de surface-eaux souterraines. In : Kobus HR et Zilliox L eds., Nitratbelastung des Grundwassers. Mitteilungen Inst.f. Wasserbau, Stuttgart, Heft 71 : 171-200

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

Henry CP, Amoros C (1996) Are the banks a source of recolonization after disturbance : an experiment on aquatic vegetation in a former channel of the Rhône River ? Hydrobiologia, 330: 151-162.

Onandia M, de Bikuna BG, Benito I (1996) Aquatic Plants in Relation to Environmental Factors in Northern Spain. Journal of Environmental Management, 47, 123-137.

Rivoire E, 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.

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

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

Schwarz WL, Malanson GP, Weirich FH (1996) Effect of landscape position on the sediment chemistry of abandoned-channel wetlands. *Landscape Ecology*, 11, 27-38.

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

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

Invertébrés souterrains

Balazuc J (1954) Les Amphipodes troglobies et phréatobies de la faune gallo-rhénane. *Arch. Zool. Exp. Gén.*, 91, 153-193.

Bernasconi R (1994) Le genre *Moitesseria* bgt, 1863 en France : révision, inventaire et description de *M. corsica* n. sp.; (Mollusca Gastropoda Prosobranchia Hydrobiidae). *Mémoires de Biospéléologie*, 21, 7-20.

Boeters HD, Falkner G (2003) Die Bythiospeen des Rhône-Genists (Gastropoda: Hydrobiidae). *Heldia*, 5, 1-6.

Bou C (1974) Recherches sur les eaux souterraines -25- Les méthodes de récolte dans les eaux souterraines interstitielles. *Ann. Spéléol.*, 29, 611-9.

Boulton AJ, Dole-Olivier MJ, Marmonier P, (2003) Optimizing a sampling strategy for assessing hyporheic invertebrate biodiversity using the Bou-Rouch Method: within-site replication and sample volume. *Arch. Hydrobiol.*, 156, 431-456.

Boulton AJ, Dole-Olivier MJ, Marmonier P (2004) Effects of sample volume and taxonomy resolution on assessment of hyporheic assemblage

composition sampled using a Bou-Rouch pump. *Archiv Hydrobiol.* 159, 327-355.

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

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

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

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

Dole-Olivier MJ, Marmonier P (1992) Patch distribution on interstitial communities: prevailing factors. *Freshwater Biology*, 27: 177-191.

Dole-Olivier MJ, Marmonier P, Beffy JL (1997) Response of invertebrates to lotic disturbance: is the hyporheic zone a patchy refugium. *Freshwater Biology*, 37: 257-276.

Dollfus A (1897) Sur deux types nouveaux de Crustacés Isopodes appartenant à la faune souterraine des Cévennes. *C. R. Acad. Sc. Fr.* 125, 130-131.

Ginet R (1990) Répartition en France de l'Amphipode hypogé *Niphargopsis casparyi* (Pratz)(Crustacea). *Bull. Soc. Linn. Lyon*, 59, 350-356.

Kibichii S, Baars JR, Kelly-Quinn M (2009) Optimising sample volume and replicates using the Bou-Rouch method for the rapid assessment of hyporheic fauna. *Mar. Freshwat. Res.*, 60, 83-96

Marmonier P, Creuzé des Châtelliers M, Dole-Olivier MJ, Plénet S, Gibert J (2000) Rhône groundwater systems. In *Ecosystems of the world*, vol 30. Subterranean ecosystems. H Wilkens, DC Culver et WF Humphreys Eds., Elsevier Publ., 513-531.

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

Schellenberg A (1951) Un *Niphargus* nouveau du sud-est de la France. *Bull. Mus. Nat. Hist. Nat.*, 23, 187-189.

Serban E (1989) Taxa nouveaux des Bathynellidés d'Europe (Bathynellacea, Podophallocarida, Malacostraca). *Trav. Inst. Spéol. "Emile Racovitza"* 28, 3-17.

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

Vervier P (1988) Hydrologie et dynamique des peuplements aquatiques souterrains : comparaison de deux systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 219p.

Fleuve Rhône

CNRa (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. Volet 2 : Hydraulique – Dossiers historiques. Dossier historique : Beauchastel. DI-CE 99-925. 46p.

CNRb (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. Volet 2 : Hydraulique – Diagnostic hydraulique par bief. Diagnostic hydraulique du bief de : Donzère-Mondragon. DIT-HY 02-0049. 48p.

Collectif (1955) Construction du barrage de retenue sur le Rhône à Donzère La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série.

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

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, 11-20.

Dufour S (2005) Contrôles naturels et anthropiques de la structure de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme, Rhône). Mémoire de thèse de doctorat, Université Jean Moulin, Lyon 3, 244p.

George P (1980) Tricastin 1980. *Annales de Géographie*, Volume 89, Numéro 494, 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.

Pavin A (1955) Construction du bloc usine-déchargeur-écluse de Bollène. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors-série, 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.

Suchel JB (1957). L'hydraulique agricole dans le couloir rhodanien entre Vienne et Bollène, projets et réalisations. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 32, n° 3, 27.

Sogreah (1999) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône.

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

Autres

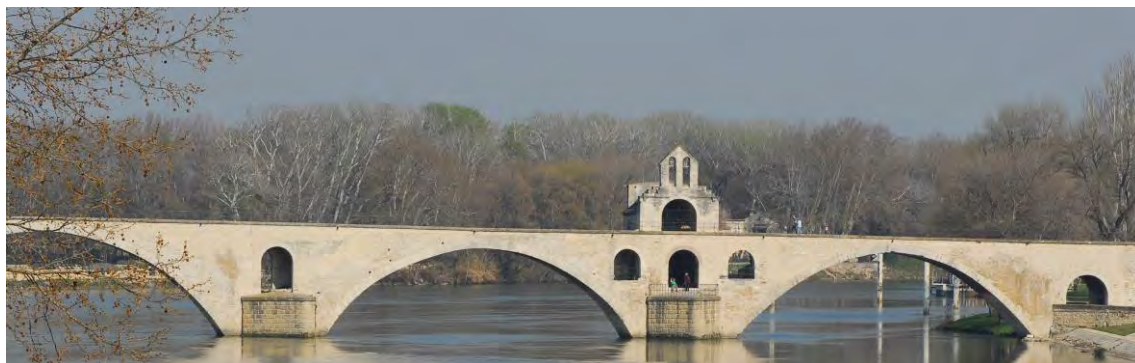
Danneville L (1995) Contribution des eaux souterraines aux débits et à la qualité des eaux de surface : exemple de la Garonne, de ses sources à la confluence du Tarn. Thèse de doctorat, Université Paris 11.

Galay VJ (1983) Causes of river bed degradation. *Water Resource Research* 19:1057-1090.

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

Gicc (2005) Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion. Projet GICC-Rhône, Rapport final révisé, version courte, ENSMP, BRGM, CEMAGREF, CNRS, EDF, MétéoFrance 23p.

Hupp CR, Osterkamp WR (1985) Bottomland vegetation distribution along Passage Creek, Virginia, in relation to fluvial landforms. *Ecology* 66:670-681.



Le Rhône à Avignon (84) (© M. Mendo)

Listes : Figures, tableaux, cartes, illustrations, repères

I. Liste des Figures

Figure 1 : Démarche complète de cheminement dans le guide méthodologique	19
Figure 2 : Interface nappes/rivières et types de relations (© Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse)	27
Figure 3 : L'interface nappes/rivières et variabilité des échanges au cours du temps (in Bravard et Clémens, 2008 d'après Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse	27
Figure 4 : Schéma de principe conduisant au croisement des méthodes	32
Figure 5 : Estimation des débits d'échange nappes/rivières avec la Loi de Darcy.....	34
Figure 6 : Apports d'eau de la nappe à la rivière.....	42
Figure 7 : Apports d'eau de la rivière à la nappe.....	42
Figure 8 : Pas d'échange identifié entre la rivière et la nappe	43
Figure 9 : Colmatage	43
Figure 10 : Sous-écoulement d'eau superficielle	44
Figure 11 : Recyclage d'eau superficielle ou échanges hyporhéiques	44
Figure 12 : Présentation synthétique de l'analyse géomatique	48
Figure 13 : Présentation synthétique de la méthode fondée sur la végétation aquatique	51
Figure 14 : Présentation synthétique de la méthode fondée sur les invertébrés souterrains (© J. Gibert et P. Marmonier)	52
Figure 15 : Aménagement type du Rhône (© Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse)	56
Figure 16 : Relation δD vs $\delta^{18}O$ pour les eaux de pluie. La droite des eaux météoriques mondiales est définie par la relation $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$. D'après Mook (2000)	88
Figure 17 : Méthode d'échantillonnage des végétaux aquatiques et des macrophytes	92
Figure 18 : Localisation des zones de remontée d'eau souterraine vers la surface dans la succession seuil-mouille d'un cours d'eau (Définie selon des critères géomorphologiques : doit être vérifiée à chaque cas).	101
Figure 19 : Calcul de l'indice « invertébrés souterrains »	105

II. Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation synthétique du potentiel des méthodes utilisées dans le guide.....	18
Tableau 2 : Les indices de la méthode Braun-Blanquet (1932)	50
Tableau 3 : Définir/décrire la zone de travail – Check list appliquée au secteur de Donzère-Mondragon.....	57
Tableau 4 : Définir les objectifs et les enjeux – check list appliquée au secteur de Donzère-Mondragon.....	59
Tableau 5 : Sélectionner des échelles de temps et d'espace – check list appliquée au secteur de Donzère-Mondragon	59
Tableau 6 : Potentiel des méthodes	62
Tableau 7 : Synthèse et résumé des contraintes pour l'utilisation de chaque méthode	63
Tableau 8 : Typologie des échanges : codes couleurs pour le croisement des méthodes	67
Tableau 9 : Tableau des incertitudes.....	67
Tableau 10 : Comparaison des méthodes et diagnostic synthétique compte-tenu des incertitudes : Exemple pour la rive gauche du Vieux-Rhône à Donzère-Mondragon.....	69
Tableau 11 : Comparaison des méthodes et diagnostic synthétique compte-tenu des incertitudes : Exemple pour la rive droite du canal de dérivation (contre-canal) à Donzère-Mondragon.....	70
Tableau 12 : Check list de terrain pour l'analyse géomatique	85
Tableau 13 : Check liste de terrain pour la géochimie	90
Tableau 14 : Double indice d'abondance Braun-Blanquet (1932).....	91
Tableau 15 : Notation pour les espèces de végétaux aquatiques et de macrophytes.....	97
Tableau 16 : Calcul de l'indice trophique à Donzère-Mondragon	99
Tableau 17 : Calcul de l'indice de fréquence relative à Donzère-Mondragon	99
Tableau 18 : Codage des indices de trophie et d'apport phréatique.....	99
Tableau 19 : Calcul du niveau relatif de perturbation à Donzère-Mondragon (A : Aucune ; F : Faible ; M : Moyenne ; All : Alluvionnement)	100
Tableau 20 : Check liste de terrain pour la végétation aquatique	100
Tableau 21 : Check list de terrain pour la méthode « invertébrés souterrains ».....	106
Tableau 22 : Prélèvements d'eau superficielle à Donzère-Mondragon (d'après Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 2005)	117
Tableau 23 : Prélèvements d'eau souterraine à Donzère-Mondragon (d'après Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 2005)	117
Tableau 24 : Bilan quantitatif des échanges sur Beauchastel.....	134
Tableau 25 : Bilan quantitatif.....	141
Tableau 26 : Source d'information : eau – général	145
Tableau 27 : Source d'information : eau - Rhône	145
Tableau 28 : Source d'information : eau - surface	146
Tableau 29 : Source d'information : eau – aquifères	147
Tableau 30 : Source d'information : invertébrés souterrains	147
Tableau 31 : Source d'information : végétation aquatique et zones humides	148
Tableau 32 : Source d'information : autres sources d'information	148
Tableau 33 : Personnes ressources et compétences (Février 2014)	149
Tableau 34 : Définir les objectifs et les enjeux – fiche vierge	151
Tableau 35 : Définir la zone de travail – fiche vierge	152
Tableau 36 : Comparaison des méthodes et diagnostic synthétique compte-tenu des incertitudes : tableau vierge.....	153
Tableau 37 : Sélectionner des échelles de temps et d'espace – fiche vierge	154

III. Liste des cartes

<i>Carte 1 : Diagnostic synthétique multi-méthode des échanges nappes/rivières sur le secteur de Donzère Mondragon – Carte générée à partir de sorties SIG retouchées avec un logiciel de dessin vectoriel</i>	72
<i>Carte 2 : Localisation et présentation du secteur de Brégnier-Cordon</i>	113
<i>Carte 3 : Superposition de l'interprétation des échanges nappes/Rhône selon les différentes méthodes sur le secteur de Brégnier-Cordon</i>	114
<i>Carte 4 : Localisation administrative du secteur de Donzère-Mondragon</i>	119
<i>Carte 5 : Les entités hydrogéologique en présence sur le secteur de Donzère-Mondragon</i>	120
<i>Carte 6 : Localisation des objets hydrologiques et des aménagements hydrauliques sur le secteur de Donzère-Mondragon – Moitié nord (Source : BD Carthage IGN)</i>	121
<i>Carte 7 : Localisation des objets hydrologiques et des aménagements hydrauliques sur le secteur de Donzère-Mondragon – Moitié sud (Source : BD Carthage IGN)</i>	122
<i>Carte 8 : Diagnostic du point de vue de la méthode géomatique sur Donzère-Mondragon (Mars 2009, moyennes-eaux) – Carte générée à partir de sorties SIG retouchées avec un logiciel de dessin vectoriel</i>	129
<i>Carte 9 : Diagnostic du point de vue des invertébrés souterrains (+physico-chimie des eaux interstitielles) sur Donzère-Mondragon (Mai 2008, moyennes-eaux et août 2008, basses-eaux)</i>	130
<i>Carte 10 : Diagnostic du point de vue des macrophytes et végétaux aquatiques sur Donzère-Mondragon (juin-juillet 2008, moyennes-eaux/basses-eaux)</i>	131
<i>Carte 11 : Diagnostic du point de vue de la physico-chimie des eaux superficielles sur Donzère-Mondragon (juin-juillet 2008, moyennes-eaux/basses-eaux)</i>	132
<i>Carte 12 : Localisation et présentation du secteur de Beauchastel</i>	135
<i>Carte 13 : Entités hydrogéologiques sur le secteur de Beauchastel</i>	136
<i>Carte 14 : Superposition spatiale des méthodes sur la chute CNR de Beauchastel et à la confluence Rhône/Eyrieux</i>	137
<i>Carte 15 : Diagnostic synthétique des échanges nappes/rivières sur le secteur de Beauchastel Rhône/Eyrieux</i>	138

IV. Liste des illustrations

<i>Illustration 1 (à gauche) : Berula erecta in Montégut (1993)</i>	93
<i>Illustration 2 (à droite) : Chara major in Montégut (1993)</i>	93
<i>Illustration 3 (à gauche) : Galium palustre in Montégut (1993)</i>	93
<i>Illustration 4 (à droite) : Groenlandia densa in Montégut (1993)</i>	93
<i>Illustration 5 (à gauche) : Hippuris vulgaris in Montégut (1993)</i>	94
<i>Illustration 6 (à droite) : Juncus articulatus in Montégut (1993)</i>	94
<i>Illustration 7 (à gauche) : Lysimachia vulgaris in Montégut (1993)</i>	94
<i>Illustration 8 (à droite) : Mentha aquatica in Montégut (1993)</i>	94
<i>Illustration 9 (à gauche) : Myosotis scorpioides in Montégut (1993)</i>	95
<i>Illustration 10 (à droite) : Potamogeton coloratus in Montégut (1993)</i>	95
<i>Illustration 11 (à gauche) : Potamogeton natans in Montégut (1993)</i>	95
<i>Illustration 12 (à droite) : Ranunculus trichophyllus in Montégut (1993)</i>	95
<i>Illustration 13 (à gauche) : Sparganium emersum in Montégut (1993)</i>	96
<i>Illustration 14 (à droite) : Veronica anagallis-aquatica in Montégut (1993)</i>	96
<i>Illustration 15 : Equipement nécessaire pour un pompage à l'aide de la méthode Bou-Rouch : A) sonde en acier avec crépine ; B) tête de pompage à piston ; C) tête de frappe pour enfoncer la sonde en acier ; D) masse (© P. Marmonier)</i>	103
<i>Illustration 16 : Equipement nécessaire pour un pompage dans des puits dont la profondeur total (>17m) ou le niveau piézométrique (>8m) ne permettent pas l'utilisation d'une pompe manuelle (© P. Marmonier)</i>	103

<i>Illustration 17 : Filet à dérive utilisé dans les sources (© P. Marmonier)</i>	103
<i>Illustration 18 (à gauche) : Fabaeformiscandona breuili (© P. Marmonier)</i>	104
<i>Illustration 19 (à droite) : Niphargus rhenorhodanensis (© P. Marmonier)</i>	104
<i>Illustration 20 (à gauche) : Proasellus cavaticus (© P. Marmonier)</i>	104
<i>Illustration 21 (à droite) : Schelencandona triquetra (© P. Marmonier)</i>	104

V. Liste des repères

<i>Repère 1 : Prendre en main le guide méthodologique - avertissement et intérêt de la démarche</i>	15
<i>Repère 2 : Prendre en main le guide méthodologique - connaissances préalables</i>	23
<i>Repère 3 : Découvrir les outils, la typologie des situations d'échanges nappes/rivières et une formule de quantification des flux d'eau</i>	31
<i>Repère 4 : Mesurer, calculer et interpréter les échanges nappes/rivières</i>	47
<i>Repère 5 : Bien choisir et bien utiliser les méthodes</i>	55
<i>Repère 6 : Synthétiser et cartographier les échanges</i>	65
<i>Repère 7 : Lien entre chapitres du guide et Fiches Pratiques</i>	77
<i>Repère 8 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°1</i>	79
<i>Repère 9 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°2</i>	87
<i>Repère 10 : Liens entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°3</i>	91
<i>Repère 11 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°4</i>	101
<i>Repère 12 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°5</i>	107
<i>Repère 13 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°6</i>	109
<i>Repère 14 : Lien entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°7</i>	143
<i>Repère 15 : Liens entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°8</i>	149
<i>Repère 16 : Liens entre les chapitres du guide et la Fiche Pratique n°9</i>	151
<i>Repère 17 : Démarche et bibliographie</i>	155
<i>Repère 18 : Démarche et glossaire</i>	167



Reflets sur le Rhône (© M. Mendo)

Glossaire des termes techniques



Repère 18 : Démarche et glossaire

Cette partie propose un glossaire des termes techniques utilisés dans le guide. La plupart des définitions sont tirées du glossaire du SDAGE RMC. Les termes définis à l'aide de ce glossaire sont marqués par le chiffre 1 en exposant après le mot concerné (1 : Thesaurus du SDAGE - le SDAGE RMC : Glossaire et index, Vol. 4 : <http://www.eaurmc.fr/le-bassin-rhone-mediterranee/le-sdage-du-bassin-rhone-mediterranee.html>).

D'autres définitions proviennent du glossaire réalisé dans le cadre du projet ONEMA NAPROM (NAPpes-Rivières : Observation et Modélisation) (Paran et al., 2012). Ces définitions sont issues de plusieurs sources :

- 2 : Glossaire eaufrance :

<http://www.glossaire.eaufrance.fr/>

- 3 : 1001 mots de l'environnement et du développement durable, Recyconsult :

<http://www.dictionnaire-environnement.com/>

- 4 : Glossaire international d'hydrologie :

<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglu.htm>

- 5 : A glossary of hydrogeological terms, John M. Sharp, Department of Geological Sciences, Jackson School of Geosciences, The University of Texas, Austin, Texas, USA:

<http://www.geo.utexas.edu/faculty/jmsharp/sharp-glossary.pdf>

- * : Dictionnaire Larousse

<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>

Pour compléter ces sources, une dernière série de définition est issue du glossaire de cartographie (6) : Glossaire de cartographie - Comité Français de Cartographie : <http://www.sigvar.org/frontblocks/pratique/glossaire.php>

Comme pour les définitions tirées du glossaire du SDAGE RMC, le chiffre en exposant après le mot concerné renvoie à la source d'où est issue la définition.

Pour les mots ne possédant pas de renvoi, les définitions sont soit issues de la bibliographie, les références sont alors indiquées entre parenthèses, soit proposées par les rédacteurs du guide.

A

Abondance^{2,3}

Paramètre d'ordre quantitatif servant à décrire une population. Le dénombrement exhaustif d'une population, animale ou végétale, est généralement impossible. Par extension, elle désigne un nombre d'individus dans une catégorie donnée : population, recrutement, stock, rapportée à une unité de temps ou de surface².

L'abondance relative correspond au nombre total des individus d'une espèce par rapport au nombre total des individus de toutes les espèces présentes, par unité de surface ou de volume³.

ACP

L'analyse en composantes principales, ou ACP est une méthode permettant de discriminer les éléments entre eux sur la base de leur proximité statistique. Dit autrement, l'ACP permet de déterminer le taux de similitude entre différentes variables. Elle est fréquemment utilisée afin d'extraire de l'information à partir de séries de données. Elle permet de réduire le nombre de variables, tout en minimisant la perte d'information.

L'ACP est d'utilisation courante dans de nombreux domaines (Lalot, 2014). Cette technique peut être utilisée pour : 1) montrer les similitudes de comportement entre différents paramètres, 2) réduire le nombre de paramètres à étudier lors d'analyses chimiques.

Aggradation

Élévation progressive de l'altitude du lit d'un cours ou d'une plaine alluviale suite aux dépôts de sédiments transportés par ce même cours d'eau (Hupp et al., 1985; Galay, 1983).

Alimentation d'une nappe ou apport (au sens hydrogéologique)¹

Volume d'eau alimentant une nappe souterraine sur une durée donnée.

Alimentation en Eau Potable (AEP)¹

Ensemble des équipements, des services et des actions qui permettent, en partant d'une eau brute, de produire une eau conforme aux normes de potabilité en vigueur, distribuée ensuite aux consommateurs. On considère 4 étapes distinctes dans cette alimentation : prélèvements - captages, traitement pour potabiliser l'eau, adduction (transport et stockage), distribution au consommateur.

Analyse spatiale⁶

L'analyse spatiale désigne les opérations qui tirent parti de la répartition spatiale des objets géographiques. Les fonctions d'analyse s'appuient sur les relations topologiques.

Anastomosé²

Se dit d'un ensemble de chenaux qui s'entrecroisent dans un large lit majeur, ou un delta, bien pourvu en défluent de toute sorte et de bras séparés par des hauts fonds. Le terme, emprunté au langage médical, n'est utilisé en hydrologie que sous forme d'adjectif : on parle en effet de rivière anastomosée.

Anophthalmie

Réduction ou perte totale des yeux (adaptation morphologique permettant de distinguer les stygobies des espèces de surface).

Annexes fluviales¹

Ensemble des zones humides au sens de la définition de la loi sur l'eau (« terrains exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau, de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hydrophiles pendant au moins une partie de l'année ») en relation permanente ou temporaire avec le milieu courant par des connections soit superficielles soit souterraines : iscles, îles, brotteaux, lônes, bras morts, prairies inondables, forêts inondables, ripisylves, sources et rivières phréatiques...

Voir aussi : [Espace alluvial](#).

Anoxie³

Condition d'un milieu exempt d'oxygène libre mais qui comporte des formes oxydées (exemple des nitrates). Cette condition permet la dénitrification des eaux. Désigne également les microorganismes qui se développent dans un milieu pauvre en oxygène. L'anoxie est la cause essentielle des troubles et de la mort provoquée par l'asphyxie.

Anthropique (anthropogénique, anthropisé)^{5,*}

Créé, causé, ou induit par les actions humaines⁵.

Se dit d'un paysage, d'un sol, d'un relief dont la formation résulte essentiellement de l'intervention de l'homme*.

Aquifère¹

Formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables (formations poreuses et/ou fissurées) et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation (drainage, pompage...).

Aquifères alluviaux

Voir aussi : [Nappe alluviale](#).

Auto-épuration¹

Ensemble des processus biologiques (dégradation, consommation de la matière organique, photosynthèse, respiration animale et végétale...), chimiques (oxydoréduction...), physiques (dilution, dispersion, adsorption...) permettant à un écosystème aquatique équilibré de transformer ou d'éliminer les substances (essentiellement organiques) qui lui sont apportées (pollution). On doit distinguer l'autoépuration vraie (élimination de la pollution) de l'autoépuration apparente (transformation, transfert dans l'espace ou dans le temps de la pollution). Les organismes vivants (bactéries, champignons, algues...) jouent un rôle essentiel dans ce processus. L'efficacité augmente avec la température et le temps de séjour. La capacité d'autoépuration d'un écosystème est limitée et peut être inhibée (toxique notamment).

B**Balance ionique³**

Bilan sur deux colonnes (cations et anions) des résultats de l'analyse d'une eau, lorsque les teneurs sont exprimées en milliéquivalents par litre ou en degrés français. Les totaux s'équilibrent car dans une solution aqueuse saline la somme des cations est égale à celle des anions.

Bassin hydrogéologique¹

Aire de collecte considérée à partir d'un exutoire ou d'un ensemble d'exutoires, limitée par le contour à l'intérieur duquel se rassemblent les eaux qui s'écoulent en souterrain vers cette sortie. La limite est la ligne de partage des eaux souterraines.

Bassin versant¹

Surface d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac. Le bassin versant se définit comme l'aire de collecte considérée à partir d'un exutoire, limitée par le contour à l'intérieur duquel se rassemblent les eaux précipitées qui s'écoulent en surface et en souterrain vers cette sortie. Aussi dans un bassin versant, il y a continuité : 1) longitudinale, de l'amont vers l'aval (ruisseaux, rivières, fleuves) ; 2) latérale, des crêtes vers le fond de la vallée ; 3) verticale, des eaux superficielles vers des eaux souterraines et vice versa. Les limites sont la ligne de partage des eaux superficielles.

Bathymétrie²

Équivalent sous-marin de la topographie, c'est-à-dire description du relief immergé grâce à l'étude de la nature des fonds d'un milieu aquatique et de leur profondeur. Les résultats de ces études sont traduits par des cartes bathymétriques.

Biodiversité¹

Elle rend compte de la diversité biologique d'un espace donné en fonction notamment de l'importance numérique des espèces animales ou végétales présentes sur cet espace, de leur originalité ou spécificité, et du nombre d'individus qui représentent chacune de ces espèces.

Bras mort¹

Ancien bras plus ou moins déconnecté du lit principal du fait du déplacement de celui-ci au fil des temps ou des mécanismes de sédimentation. Milieu caractéristique des lits majeurs en bordure des rivières à méandres et à tresses.

Bioindicateurs²

Indicateur constitué par une espèce (ou un groupe d'espèces) végétale ou animale dont la présence renseigne sur certaines caractéristiques physico-chimiques ou biologiques de l'environnement ou sur l'incidence de certaines pratiques. Les effets sont observables au niveau de l'individu et se traduisent par des altérations morphologiques, comportementales, tissulaires ou physiologiques (croissance et reproduction).

C**Captage¹**

Dérivation d'une ressource en eau. Au sens restreint, désigne tout ouvrage utilisé couramment pour l'exploitation d'eaux de surface ou souterraines.

Champ captant¹

Zone englobant un ensemble d'ouvrages de captages prélevant l'eau souterraine d'une même nappe.

Coordonnées⁶

Couple (ou triplet) de valeurs algébriques permettant de positionner un point dans un repère de référence.

Coordonnées géographiques⁶

Couple de valeurs exprimées en degrés sexagésimaux ou décimaux, ou en grades,

appelées longitude et latitude, exprimant la position d'un point situé à la surface de la Terre.

Coordonnées planimétriques⁶

Valeurs exprimant la position d'un point sur un plan horizontal par rapport à un système de référence constitué de deux axes perpendiculaires et d'un point d'origine issus de la projection cartographique utilisée.

Court-circuité¹

Se dit d'un tronçon de cours d'eau auquel on a soustrait artificiellement tout ou partie de son débit naturel du fait d'aménagements de type prise d'eau, centrale hydroélectrique, etc. (exemples : Rhône court-circuité (ou Vieux-Rhône), tronçon court-circuité). Le débit ainsi utilisé est restitué après utilisation le plus généralement à l'aval, ou, plus rarement, dans un autre cours d'eau.

D

Débit¹

Volume d'eau qui traverse une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps. Les débits des cours d'eau sont exprimés en m^3/s avec au minimum trois chiffres significatifs (ex : $1,92m^3/s$, $19,2m^3/s$, $192m^3/s$). Pour les petits cours d'eau, ils sont exprimés en l/s. Les débits d'exploitation des eaux pour les usages sont suivant les cas exprimés aussi en m^3/mn , m^3/h , m^3/j , m^3/an . Il en est de même pour les débits d'eaux souterraines.

Débit moyen annuel¹

Débit moyen sur une année : il est obtenu le plus souvent en faisant la moyenne des débits moyens journaliers de l'année.

Débit d'étiage d'un cours d'eau¹

Débit minimum d'un cours d'eau calculé sur un temps donné en période de basses eaux. Ainsi pour une année donnée on parlera de : débit d'étiage journalier, débit d'étiage de n jours consécutifs, débit d'étiage mensuel : moyenne des débits journaliers du mois d'étiage.

Débit mensuel¹

Débit moyen sur un mois : il est obtenu le plus souvent en faisant la moyenne des débits moyens journaliers du mois.

Débit réservé¹

Débit minimal éventuellement augmenté des prélèvements autorisés sur le tronçon influencé. Il est exprimé notamment dans les cahiers des charges et les règlements d'eau.

Dénitrification¹

Deuxième étape de l'élimination biologique de l'azote, réalisée notamment dans les stations d'épuration. La dénitrification est la réduction des nitrates (NO_3^-) en azote gazeux (N_2) par des bactéries en situation d'anoxie. Un milieu en anoxie est tel que l'oxygène sous sa forme dissoute en est absent. Ce phénomène est différent de la consommation des nitrates par les végétaux.

Déphosphatation¹

Traitement spécifique (physico-chimique ou biologique) d'une eau usée qui vise la réduction de sa concentration en phosphate.

Digitalisation⁶

En matière de géomatique, la digitalisation est un processus spécifique consistant à transformer les informations contenues sur un document graphique en données vectorielles (points, lignes, surfaces...). L'opération est réalisée manuellement par un opérateur, soit en pointant les éléments à saisir sur un document papier à l'aide d'un curseur et d'une table à digitaliser, soit en les pointant sur un écran informatique si le document a été préalablement numérisé.

Downwelling

Secteur où les eaux de surface regagnent la zone interstitielle (zones d'infiltration).

Drainance⁵

Dans les eaux souterraines, passage d'un flux d'eau à travers une formation semi-perméable à partir ou à destination d'un aquifère contigu supérieur ou inférieur.

E

Eau interstitielle

Voir : [Hyporhéique](#).

Eau de surface¹

Toutes les eaux qui s'écoulent ou qui stagnent à la surface de l'écorce terrestre (lithosphère).

Eaux souterraines¹

Toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol en contact direct avec le sol ou le sous-sol et qui transitent plus ou moins rapidement (jour, mois, année, siècle, millénaire) dans les fissures et les pores en milieu saturé ou non.

Echange nappes/rivières

Voir : [Alimentation d'une nappe et Relation nappe-rivière](#).

Ecosystème (voir aussi hydrosystème)¹

Un écosystème est constitué par l'association dynamique de deux composantes en constante interaction : 1) un environnement physico-chimique, géologique, climatique ayant une dimension spatiotemporelle définie : le biotope ; 2) un ensemble d'êtres vivants caractéristiques : la biocénose. L'écosystème est une unité fonctionnelle de base en écologie qui évolue en permanence de manière autonome au travers des flux d'énergie. L'écosystème aquatique est généralement décrit par : les êtres vivants qui en font partie, la nature du lit, des berges, les caractéristiques du bassin versant, le régime hydraulique, la physico-chimie de l'eau... et les interrelations qui lient ces différents éléments entre eux.

Ecosystèmes associés

Ensemble d'écosystèmes en relation permanente ou temporaire avec le milieu courant par des connections soit superficielles soit souterraines : îles, bras morts, prairies inondables, forêts inondables, ripisylves, sources et rivières phréatiques...

Ecotone³

Écotone est un terme écologique qui définit une zone délimitant deux milieux naturels.

Ecotoxicité¹

Toxicité vis-à-vis des organismes vivants, l'homme étant exclu (pour l'homme on utilise plutôt le terme de « toxicologie »).

Espace alluvial¹

Terme générique désignant d'une façon générale l'espace construit en fond de vallée par le dépôt des alluvions d'une rivière. Au sens large, il inclue les différents milieux et zonages associés : lit mineur, lit majeur, espace de liberté, annexes etc....

Eutrophie³

Eau ou milieu riche en sels minéraux nutritifs (en particulier, nitrates et phosphates).

Voir aussi : **Trophie**.

Eutrophisation¹

Enrichissement des cours d'eau et des plans d'eau en éléments nutritifs, essentiellement le phosphore et l'azote qui constituent un véritable engrais pour les plantes aquatiques. Elle se manifeste par la prolifération excessive des végétaux dont la respiration nocturne puis la décomposition à leur mort provoquent une diminution notable de la teneur en oxygène. Il s'en suit, entre autres, une diversité animale et

végétale amoindrie et des usages perturbés (alimentation en eau potable, loisirs,...).

Exhaussement.

Voir : **Aggradation**.

F**Faune interstitielle**

Invertébrés souterrains du milieu interstitiel.

Fonctionnement des hydrosystèmes¹

Ensemble des phénomènes physiques (hydrauliques, érosifs,...), biologiques et de leurs interactions qui ont lieu au sein de l'hydrosystème. Ainsi la grande diversité des communautés végétales et animales (biocénoses) ne s'exprime que grâce à la dynamique fluviale (alternance de crue et d'étiage, de dépôts et d'érosion,...). Ces phénomènes sont influencés par les différents usages et peuvent contribuer à leur satisfaction.

G**Géochimie³**

Discipline des sciences de la Terre qui étudie la composition chimique et isotopique des matériaux géologiques tels que les roches, les sols, les minéraux, les eaux et les gaz, leur distribution quantitative, leurs combinaisons, leurs migrations (dispersion, concentration) dans l'environnement. Pour l'analyse de la composition chimique des matériaux géologiques, la géochimie utilise les techniques d'analyse chimique et isotopique développées en physique et en chimie. Depuis quelques années, une importance croissante est accordée à la surveillance de la pollution. L'étude de la dispersion de substances polluantes (métaux lourds, molécules toxiques...) dans les eaux, les sols et l'atmosphère est très utilisée pour déterminer ou prévenir cette pollution afin de mieux gérer l'impact de l'homme à la surface de la Terre.

Géodésie⁶

Science de la détermination mathématique des dimensions et de la forme de la Terre, ainsi que des variations de son champ de gravité.

Géoïde⁶

Surface équipotentielle particulière du champ de pesanteur terrestre, assimilable, en dehors des terres émergées, au niveau moyen des mers. Le géoïde sert de surface de référence pour la détermination des altitudes.

Géolocalisation⁶

Détermination des coordonnées géographiques d'un objet à la surface ou au voisinage de la Terre.

Géomatique⁶

Ensemble des méthodes et techniques de l'informatique appliquée aux moyens d'acquisition, de traitement et de représentation visuelle des données géoréférencées.

Géomorphologie¹

Discipline qui étudie les formes de relief et leur mobilité, leur dynamique. Dans le cadre des hydrosystèmes, l'analyse porte sur la géométrie du lit des cours d'eau et les causes de ses transformations spatiales (de l'amont vers l'aval) ou temporelles en relation avec la modification des flux liquides et solides, la dynamique de la végétation riveraine, les interventions humaines. Il s'agit donc d'une science d'interface et de synthèse qui fait appel à des données naturalistes et expérimentales (hydraulique et hydrologie notamment) et à des données issues des sciences humaines (histoire, économie agricole...).

Géoréférencement⁶

Processus qui consiste à établir une relation (mathématique) entre des coordonnées papier (exemple: centimètres ou millimètres) sur une carte planaire et des coordonnées réelles (géographiques). Le géoréférencement nécessite de connaître les coordonnées d'un certain nombre de points (points de calage ou TIC) dans l'un et l'autre des systèmes.

GPS (Global positioning system)⁶

Système permettant de déterminer les coordonnées géographiques d'un point du globe à partir de l'observation des signaux radio émis par des satellites en orbite autour de la terre. En fonction de la méthode d'utilisation, du nombre et du type de récepteurs exploités, la précision obtenue sur les coordonnées varie de 100 mètres à quelques centimètres. Ces satellites ont été mis en orbite par les États-Unis d'Amérique.

Gradient de nappe / gradient hydraulique

Pente, variation du niveau d'eau souterraine sur une distance déterminée.

H**Hydrobiologie¹**

Science qui étudie la vie des organismes aquatiques.

Hydrodynamique fluviale¹

Science qui étudie le comportement physique du fluide constitué par l'eau et les matériaux qu'elle contient. C'est une application aux cours d'eau de l'hydrodynamique, elle-même branche de la mécanique des fluides. Elle permet d'appréhender les processus d'évolution des cours d'eau : action du fluide sur les matériaux du lit, caractéristiques de l'écoulement, dissipation de l'énergie du cours d'eau par transport de ces matériaux.

Hydrologie⁴

Science qui traite des eaux que l'on trouve à la surface de la Terre, ainsi qu'au-dessus et au-dessous, de leur formation, de leur circulation et de leur distribution dans le temps et dans l'espace, de leurs propriétés biologiques, physiques et chimiques et de leur interaction avec leur environnement, y compris avec les êtres vivants.

Science qui étudie les processus qui régissent les fluctuations des ressources en eau des terres émergées et traite des différentes phases du cycle hydrologique.

Hydrosystème¹

Ensemble des éléments d'eau courante, d'eau stagnante, semi-aquatiques, terrestres, tant superficiels que souterrains et leurs interactions. Ce concept s'applique surtout pour les cours d'eau d'une certaine importance susceptibles de développer une plaine alluviale comprenant une mosaïque d'éléments suffisamment grands pour assurer le développement de communautés vivantes différenciées.

Hydrogéologie²

Science des eaux souterraines, comprise dans les sciences de la Terre. L'hydrogéologie réunit la connaissance des conditions géologiques et hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, les mouvements et les propriétés des eaux souterraines, ainsi que les applications de ces connaissances aux actions humaines sur les eaux souterraines, notamment à leur prospection, à leur captage et à leur protection.

Hyporhéique²

La zone hyporhéique est constituée de l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface. Si le cours d'eau s'écoule sur un substratum imperméable, il ne développera pas de zone hyporhéique. La zone hyporhéique peut être constituée exclusivement d'eau de surface

(cas des rivières perchées au-dessus de la nappe alluviale) ou caractérisée par un mélange d'eau de surface et d'eau souterraines (lorsque les échanges avec la nappe existent). Ces différentes configurations se succèdent le long d'une même rivière, les têtes de bassin présentent une zone hyporhéique réduite ou absente contrairement à la plaine alluviale. La zone hyporhéique joue un rôle important dans l'autoépuration du cours d'eau.

Hyper-eutrophe

Milieu très riche en nutriments.

Voir aussi : [Trophie](#).

I

Incision¹

Phénomène d'enfoncement du lit d'un cours d'eau sous l'action de l'érosion¹.

Interdisciplinaire³

Terme qui s'applique à des activités, des problèmes et des projets qui dépassent les capacités d'une seule discipline et qui impliquent donc des apports et des interactions de plusieurs disciplines. L'interdisciplinarité peut conduire à un dépassement des disciplines concernées et aboutir à des notions transdisciplinaires.

Interface*

Limite commune à deux systèmes, limite permettant les échanges entre ces systèmes.

Interpolation⁶

Reconstitution, en général approximative, d'une grandeur continue à partir d'un ensemble discret de valeurs de cette grandeur.

Isobathes⁶

Ligne joignant des points de même valeur de sonde.

Isohypse⁶

Ligne joignant des points de même altitude.

Isoligne⁶

Ligne joignant des points d'égale valeur. Exemples : courbes de niveau ou isohypses (même altitude), isobathes (même valeur de sonde), isochrones (même valeur de temps ou de durée)...

Isopièze

Courbe joignant les points d'égale altitude piézométrique d'une nappe d'eau souterraine.

Isotope

Le mot « Isotope » est composé du grec *isos* « égal, le même » et *topos* « lieu, place », proprement « qui occupe la même place », faisant référence à la classification chimique de la table de Mendeleïev. En effet pour un même élément chimique, il peut exister différents noyaux : si le nombre de protons est toujours égal à Z , le nombre de neutrons peut varier et on parle alors d'isotopes de l'élément chimique. Les isotopes d'un même élément chimique ont le même numéro atomique ($Z=p$), ils portent le même nom et occupent la même place dans la table de Mendeleïev, ils diffèrent par leur masse atomique ($M=p+n$). Ainsi, le noyau de l'atome d'oxygène est composé de 8 protons (p) pouvant être accompagnés de 8, 9 ou 10 neutrons (n) pour former respectivement les isotopes stables oxygène-16 (^{16}O), ^{17}O et ^{18}O . On parle alors d'isotope léger pour l' ^{16}O et d'isotope lourd pour l' ^{18}O . Par opposition aux isotopes stables présents dans une proportion constante et connue à l'état naturel, les isotopes radioactifs ont des proportions qui varient avec le temps dans les systèmes géologiques (Gourcy et Petelet, 2011).

L

Lambert⁶

Projection réglementaire en France métropolitaine, la projection Lambert est une projection conique conforme. La surface de projection est un cône sécant le long de deux parallèles. Dans le but de minimiser les déformations, la France est découpée en 9 zones couvrant chacune 2° de latitude et se superposant de 50% à ses voisines. Pour les besoins d'amplitude nationale, une projection conique conforme, appelée « projection Lambert 93 », a également été définie pour couvrir l'ensemble de la France métropolitaine.

Lône¹

Terme consacré dans le bassin du Rhône aux annexes fluviales : bras secondaire obturé à l'amont (soit naturellement, soit par une digue submersible), bras mort, bras isolé, ancien méandre. Ces formations constituent des zones de reproduction et de croissance pour une multitude d'espèces, et des zones refuge en cas de pollution. Leur degré de vieillissement dépend directement des conditions de leur alimentation en eau (alimentation permanente par de l'eau superficielle ou souterraine, intermittente lors des crues...).

M

Macrophytes³

Désigne l'ensemble des plantes aquatiques macroscopiques.

Masse d'eau²

Portion de cours d'eau, canal, aquifère, plan d'eau ou zone côtière homogène. Il s'agit d'un découpage élémentaire des milieux aquatiques destinée à être l'unité d'évaluation de la directive cadre sur l'eau 2000/60/CE. Une masse d'eau de surface est une partie distincte et significative des eaux de surface, telles qu'un lac, un réservoir, une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières. Pour les cours d'eau la délimitation des masses d'eau est basée principalement sur la taille du cours d'eau et la notion d'hydro-écorégion. Les masses d'eau sont regroupées en types homogènes qui servent de base à la définition de la notion de bon état. Une masse d'eau souterraine est un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères. On parle également, hors directive cadre sur l'eau, de masse d'eau océanique pour désigner un volume d'eau marin présentant des caractéristiques spécifiques de température et de salinité.

Méandre²

Tronçon compris entre deux points d'inflexion successifs. A l'extérieur de la courbe (ou extrados) la berge concave est érodée, abrupte, propice à l'érosion latérale. A l'intérieur de la courbe (ou intrados) la berge convexe est en pente douce, propice à la sédimentation des bancs alluvionnaires. Il existe deux grands types de méandres, les méandres encaissés et les méandres libres, et un type intermédiaire, les méandres contraints.

Mesotrophe³

Désigne un milieu aquatique dont la teneur en éléments minéraux nutritifs est de valeur moyenne.

Voir aussi : **Trophie**.

Milieu¹

Terme général peu précis scientifiquement, utilisé pour désigner un ensemble présentant des conditions de vie particulières : milieu aquatique, milieu fluvial, milieu estuarien, milieu lacustre, milieu terrestre (forestier, montagnard,...).

Milieu interstitiel

Voir : **Hyporhéique**.

N

Nappe alluviale

Nappe d'eau souterraine circulant dans des formations alluviales composées de matériaux (galets, graviers, sables) apportés et déposés par les eaux des cours d'eau. Ces nappes sont le plus souvent libres et en relation avec un cours d'eau.

Nappe captive

Nappe d'eau souterraine qui circule entre deux couches de terrains imperméables. Elle est recouverte, totalement ou partiellement, par une couche de terrain imperméable. Ces nappes sont sous pression.

Nappe d'accompagnement^{1,2}

Nappe d'eau souterraine voisine d'un cours d'eau, en connexion hydraulique avec celui-ci et dont les propriétés hydrauliques sont très liées à celles du cours d'eau. L'exploitation d'une telle nappe induit une diminution du débit d'étiage du cours d'eau, soit parce que la nappe apporte moins d'eau au cours d'eau, soit parce que le cours d'eau se met à alimenter la nappe.

Nappe libre

Nappe dont la surface est libre, c'est-à-dire à la pression atmosphérique. La surface d'une nappe libre fluctue donc sans contrainte.

Nappe phréatique¹

Première nappe rencontrée lors du creusement d'un puits. Nappe généralement libre, c'est-à-dire dont la surface est à la pression atmosphérique. Elle peut également être en charge ou captive (sous pression) si les terrains de couverture sont peu perméables. Elle circule, lorsqu'elle est libre, dans un aquifère comportant une zone non saturée proche du niveau du sol.

Nitrification¹

Première phase de l'élimination biologique de l'azote, réalisée notamment dans les stations d'épuration. La nitrification est le traitement d'une eau usée qui vise la transformation de l'ammonium (NH_4^+) en nitrate (NO_3^-).

Niveau piézométrique¹

Niveau atteint par l'eau dans un tube atteignant la nappe. Il peut être reporté sur une carte piézométrique.

O

Oligotrophe³

Milieu pauvre en éléments nutritifs. On y trouve peu de matières organiques et une forte teneur en oxygène dissous.

Voir aussi : **Trophie**.

P

Projection cartographique⁶

Formule mathématique permettant de passer de la surface courbe d'un ellipsoïde à la surface plane d'une carte, d'un plan ou de l'écran. La projection transforme les coordonnées géographiques (longitudes et latitudes) en coordonnées planes (X et Y). Toute projection génère des déformations pouvant altérer les distances, les surfaces, les formes ou encore les directions. Une projection conforme conserve les angles et les formes. Une projection équivalente conserve les surfaces.

Patrimoine (au sens eau patrimoniale)¹

Terme employé dans l'article 1 de la loi sur l'eau pour insister sur la nécessité de préserver la richesse, le capital ressource existant pour les générations futures.

Périmètre de protection de captage d'eau potable¹

Limite de l'espace réservé réglementairement autour des captages utilisés pour l'alimentation en eau potable, après avis d'un hydrogéologue agréé. Les activités artisanales, agricoles et industrielles, les constructions y sont interdites ou réglementées afin de préserver la ressource en eau, en évitant des pollutions chroniques ou accidentelles. On distingue réglementairement trois périmètres : le périmètre de protection immédiate où les contraintes sont fortes (interdiction d'activités), le périmètre de protection rapprochée où les activités sont restreintes, le périmètre éloigné pour garantir la pérennité de la ressource.

Perméabilité

Facilité avec laquelle un milieu poreux se laisse traversée par un liquide (vitesse exprimée en m/s).

Phréatobie

Organismes stygobies qui ne colonisent que les habitats interstitiels à forte stabilité physico-chimique (Thienemann, 1925 ; Marmonier et al., 1993 ; Gibert et al. 1994).

Piézomètre²

Au sens strict, dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un système aquifère, qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression. Le concept de piézomètre a été étendu à l'ensemble des ouvrages artificiels (puits, forages, gravières,...) ou naturels (avens, grottes,...) qui permettent l'accès aux eaux souterraines et utilisés pour la mesure de leur niveau ou de leur pression.

Profil en long²

Profil qui permet de caractériser la pente du cours d'eau ou plus généralement le talweg d'écoulement. Cette pente tend à diminuer vers l'aval (profil concave), différents style fluviaux se succédant d'amont vers l'aval.

Psychrophile³

Organismes aimant les eaux plus froides.

Désigne un organisme dont la température optimale de croissance est inférieure à 20°C.³

R

Rabattement de nappe¹

Abaissement en un point du niveau piézométrique sous l'effet d'un prélèvement d'eau dans la nappe, de l'abaissement d'une ligne d'eau d'un cours d'eau en relation avec la nappe ou sous l'effet de travaux de terrassement...

Recouvrement

Le degré de recouvrement est déterminé par la projection verticale des organes végétaux aériens sur le sol et exprimé par la proportion... du terrain considéré par rapport à l'air considérée (Allorge, 1922, p48).

Régime hydraulique¹

Ensemble des variations de l'état et des caractéristiques d'une formation aquatique qui se répètent régulièrement dans le temps et dans l'espace et passent par des variations cycliques, par exemple saisonnières.

Relation rivière-nappe¹

Echange d'eau dans un sens ou dans l'autre entre une nappe et un cours d'eau. Suivant le niveau de la ligne d'eau, et les saisons, la nappe alimente le cours d'eau ou est alimentée par celui-ci.

Réseau hydrographique¹

Ensemble des milieux aquatiques (lacs, rivières, eaux souterraines, zones humides, etc.) présents

sur un territoire donné, le terme de réseau évoquant explicitement les liens physiques et fonctionnels entre ces milieux.

Réseau piézométrique¹

Ensemble de puits d'observation ou de piézomètres, répartis méthodiquement, dans lesquels des mesures périodiques sont réalisées avec une fréquence appropriée, pour connaître les variations de charge hydraulique d'une nappe.

Richesse taxonomique

Nombre d'espèces.

Rhône court-circuité

Voir : Court-circuité.

S

Saturée (zone) / Non-saturée

La zone saturée est l'ensemble du milieu solide et de l'eau. L'aquifère est suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. La zone non-saturée est située au-dessus de la zone saturée, l'aquifère peut comporter une zone « non saturée » où la présence d'eau peut être épisodique (au cours de la saison pluvieuse par exemple).

Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE)¹

Document de planification fixant, pour un périmètre hydrographique cohérent, des objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur, de protection quantitative et qualitative de la ressource en eau. Le SAGE est établi par une Commission Locale de l'Eau et est approuvé par le préfet. Il est doté d'une portée juridique car les décisions dans le domaine de l'eau doivent être compatibles avec ses dispositions. Les SAGE doivent eux-mêmes être compatibles avec le SDAGE.

SIG⁶

Approche technologique : un SIG est un ensemble organisé intégrant le matériel, le logiciel et les données géographiques nécessaires pour permettre la saisie, le stockage, l'actualisation, la manipulation, l'analyse et la visualisation de toutes les formes d'informations géoréférencées. Approche fonctionnelle : c'est un ensemble coordonné d'opérations généralement informatisées, destinées à transcrire et utiliser un ensemble d'information (géographique) sur un même territoire. Ce dispositif vise particulièrement à

combiner au mieux les différentes ressources accessibles : bases de données, savoir-faire, capacité de traitement selon les applications qui lui sont demandées. Pour Michel Didier (« utilité et valeur de l'information géographique » Économica, 1990) : « ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à fournir et extraire commodément des synthèses utiles à la décision ».

Soutien d'étiage¹

Action d'augmenter le débit d'un cours d'eau en période d'étiage à partir d'un ouvrage hydraulique (barrage réservoir ou transfert par gravité ou par pompage...).

Sténotherme³

Désigne des êtres vivants qui présentent un intervalle de tolérance faibles aux variations de température dont des espèces d'algues qui ne supportent pas de grandes variations thermiques. Elles se rencontrent dans les niveaux inférieurs où l'homogénéisation des masses d'eau est plus grande.

Stygobie

Ensemble d'organismes adaptés morphologiquement et physiologiquement à la vie à l'obscurité avec peu de nourriture. Les adaptations morphologiques des stygobies permettent dans certains cas de les distinguer aisément des espèces de surface : réduction ou perte totale des yeux (anophtalmie), forte diminution de la pigmentation du corps (les individus sont généralement de couleur blanche ou claire), appendices parfois allongés et plus fins. Les stygobies ubiquistes sont des organismes strictement inféodés aux eaux souterraines et colonisant tous les habitats souterrains ((Thienemann, 1925 ; Marmonier et al., 1993 ; Gibert et al. 1994).

Stygophiles

Ensemble d'organismes dont la présence est occasionnelle ou permanente dans les eaux souterraines. Il s'agit d'organismes de surface pouvant effectuer une partie ou la totalité de leur cycle vital aussi bien dans les eaux de surface que dans le milieu interstitiel (Thienemann, 1925 ; Marmonier et al., 1993 ; Gibert et al. 1994).

Stygoxènes

Ensemble d'organismes présents accidentellement dans les eaux souterraines ((Thienemann, 1925 ; Marmonier et al., 1993 ; Gibert et al. 1994).

Substratum⁵

Niveau inférieur des sédiments dans un remplissage fluviatile, déposés par accrétion verticale probablement pendant une période de hausse des niveaux de base⁵.

Formation géologique sous-jacente à une unité charriée (substratum d'une nappe) ou à une couverture sédimentaire*.

Syndicat de rivière¹

Syndicat regroupant les collectivités territoriales (communes, départements) compétentes géographiquement sur une vallée ou une partie importante de celle-ci, dont l'objet est de mener toutes actions concernant la gestion de la rivière et de ses affluents (assainissement, restauration des milieux, travaux d'entretien, animation de la politique locale sur ce thème, etc.).

Système aquifère¹

Ensemble de terrains aquifères constituant une unité hydrogéologique. Ses caractères hydrodynamiques lui confèrent une quasi-indépendance hydraulique (non-propagation d'effets en dehors de ses limites). Il constitue donc à ce titre une entité pour la gestion de l'eau souterraine qu'il renferme.

T**Thalweg / Talweg²**

Ligne de fond d'une vallée. Dans une vallée drainée, le talweg est le lit du cours d'eau.

Se définit par opposition à la ligne de crête (ou « ligne de faite » ou « ligne de partage des eaux »). L'espace compris entre deux talwegs est appelé « interfluve ».

Taxon²

Chacun des niveaux hiérarchiques utilisés dans les classifications biologiques pour regrouper des espèces ayant des traits communs : classe, ordre, famille, genre, espèce...

Toxiques (composés toxiques)¹

Substances pouvant entraîner des troubles graves chez un organisme vivant et éventuellement provoquer la mort.

Tresse²

Espace de divagation d'un lit mineur d'un cours d'eau comportant plusieurs bras en évolution permanente.

Trophie

Niveau de ressources en fonction de l'abondance en nutriments (notamment phosphore, ammoniacque). Les niveaux trophiques (Classes de trophie/État trophique) servent à classer les lacs selon leur degré de productivité biologique, leur état pouvant varier : d'oligotrophe (relativement pauvres en nutriments) à hyper-eutrophe (très riche en nutriments).

U**Upwelling**

Secteurs où les eaux interstitielles regagnent la surface (zones d'exfiltration).

V**Valeur patrimoniale**

Voir : Patrimoine.

Vieux-Rhône

Voir : [Court-circuité](#).

Z**Zone humide¹**

« Terrains exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ». Ces zones sont des espaces de transition entre la terre et l'eau (ce sont des écotones). Comme tous ces types d'espaces particuliers, elles présentent une forte potentialité biologique (faune et flore spécifiques). Elles servent notamment d'étape migratoire, de lieu de reproduction et/ou d'hivernage pour de nombreuses espèces d'oiseaux d'eau et de poissons, chaque zone humide constituant ainsi le maillon d'une chaîne (ou corridor) indispensable à la survie de ces espèces. En outre, elles ont un rôle de régulation de l'écoulement et d'amélioration de la qualité des eaux. (Article 2 de la loi sur l'eau 92-3).

Zone hyporhéique

Voir : [Hyporhéique](#).

Zone saturée

Voir : [Saturée](#).

Zone non-saturée

Voir : [Saturée](#).

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (AE-RMC) sans qui ce projet n'aurait pas existé. Rien n'aurait été possible sans leur soutien logistique, technique et financier.

Nous tenons à remercier tout particulièrement les relecteurs qui ont contribué à l'amélioration de ce guide : Julien Bigué de l'Association Rivière Rhône-Alpes (ARRA), Chrystel Fermond et Jérôme Duval du Syndicat Mixte de la Rivière Drôme (SMRD), Tanya Naville du Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Abords (SM3A), Gaëlle Le Béhec du Syndicat de la Basse Vallée de l'Ain (SBVA), Sylvain Reynaud de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), Isabelle Jacquélet d'Electricité de France (EDF) et Yvette Paran.

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au développement du projet et à l'élaboration du guide que ce soit pour leur participation à des réunions, à des visites de terrain, aux comités techniques et pléniers ; pour la mise à disposition d'informations, de contacts, de publications, de rapports, d'études ou de données ; pour leurs conseils avisés ou leur aide.

Nous pouvons ainsi remercier (par ordre alphabétique) : Bénédicte Augeard (ONEMA), Milanka Babic (UAPV-LHA), Olivier Banton (UAPV-LHA), Mireille Batton-Hubert (ENSM-SE), Sarah Bonneville (MEDDE), Benoit Borot (Idées Eaux), Jean-Paul Bravard (ZABR), Agnès Brenot (BRGM), Pierre Chauve, Philippe Crochet (Antea), Laurent Vernay (DREAL Rhône-Alpes), Pierre-François Delsouc (SMIRCLAID), Cécile Doukouré (EDF), Marie-José Dole-Olivier (LEHNA), Claude Drogue (Université de Montpellier), Philippe Dupont (ONEMA), Jean-Michel Faton (Réserve naturelle des Ramières), Pascal Fenart (Hydrofis), Patrice Florens (Areva), Anne Gangloff (SMIRCLAID), Pierre Joly (LEHNA), Ahmed Khaladi (CNR), Mohamed Krimissa (EDF), Gérard Nicoud (Université de Savoie), Patrick Lachassagne (BRGM), Pascal Maugis (ONEMA), Robert Meriaudeau (Maire de Brégnier-Cordon), Bruno Muscat (Syndicat du Haut-Rhône), Thomas Pelte (AE-RMC), Anne Perrissin (Grand Lyon), Hervé Piegay (UMR 5600 EVS), Séverin Pistre (Université de Montpellier), Bernard Pont (Réserve Naturelle de l'Île de la Platière), Nicolas Roche (EDF), Georges Truc (Syndicat Mixte du Bassin Versant du Lez), Virginie Vergnaud (LADES), Vincent Wawrzyniak (UMR 5600 EVS).

Crédit photographique

Couverture : Vallée du Guil à l'amont de sa confluence avec la Durance – Hautes-Alpes (© G. Poussard)

Document : La source de la photographie est indiquée entre parenthèses après l'intitulé pour chaque cliché

Pour en savoir plus sur la ZABR et le projet «échanges nappes/Rhône» : www.graie.org/zabr/index.htm

CARACTÉRISATION DES ÉCHANGES NAPPES/RIVIÈRES EN MILIEU ALLUVIONNAIRE

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

L'élaboration de ce guide est l'aboutissement d'un projet de recherche interdisciplinaire portant sur le fleuve Rhône. Ce projet fait partie des actions de recherche soutenues par la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et financées par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

Ce guide répond à la question suivante : « Quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappes/rivières ? ». Il est destiné en particulier aux techniciens et aux gestionnaires des différents organismes et structures intervenant sur l'eau et les milieux aquatiques.

Ce guide valorise les résultats des travaux de recherche effectués depuis 2006 sur la question des échanges nappes/rivières à l'échelle du bassin du Rhône. Il détaille les différentes méthodes utilisables pour qualifier et quantifier les échanges. Ces méthodes fondées sur des approches hydrauliques, biologiques ou géochimiques peuvent être utilisées seules ou combinées. Si ces travaux ont été conduits sur le Rhône, la méthodologie interdisciplinaire proposée est utilisable sur l'ensemble des cours d'eau en milieu alluvionnaire.