

## ETUDE DE LA GESTION QUANTITATIVE ET DES DEBITS DU RHONE EN PERIODE DE « BASSES EAUX »



**PHASE 1 - CARACTERISATION DU TERRITOIRE DU FLEUVE RHONE  
ET BILAN DES INFLUENCES ANTHROPIQUES PASSES, ACTUELLES  
ET FUTURES POSSIBLES**

*Document C - Rapport thématique sur les nappes en  
interaction avec le Rhône*



Edition finale - Octobre 2014



L'étude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux comporte les documents listés ci-dessous. Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

<b>Synthèse de l'étude</b>	
Synthèse	Etude de la gestion quantitative du fleuve Rhône à l'étiage : Principaux résultats - Synthèse de l'étude en 100 pages précédée d'un résumé de 6 pages
<b>Phase 1 - Caractérisation du territoire du fleuve Rhône et Bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles</b>	
A	Rapport principal de phase 1
B	Rapport thématique sur l'irrigation dans le bassin du Rhône
C	Rapport thématique sur les nappes en interaction avec le Rhône
D	Fiche de synthèse sur les ouvrages hydroélectriques situés sur la partie française du bassin du Rhône
E	Fiche de synthèse sur l'hydrologie du Rhône alpestre et l'influence des ouvrages hydrauliques suisses
F	Résumé de la phase 1
<b>Phase 2 - Etude des étiages historiques ; Reconstitution des débits désinfluencés et Evaluation de l'empreinte des influences anthropiques sur les débits du Rhône</b>	
A	Rapport principal de mission 1 : Etude des étiages historiques
B	Rapport principal de mission 2 : Reconstitution des débits désinfluencés et évaluation des empreintes des influences anthropiques sur les débits
C	Rapport thématique Hydrogéologie : Estimation des impacts des prélèvements en nappes sur le débit du Rhône
D	Rapport thématique Hydrométrie : Etude critique des débits mesurés aux stations d'étude
E	Résumé de la phase 2
<b>Phase 3 - Détermination des conditions limites (débits et températures) à maintenir dans le fleuve pour l'alimentation en eau potable et le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité</b>	
A	Rapport principal de phase 3
B	Résumé de la phase 3
C	Impact d'une baisse des débits d'étiage sur la salinisation des hydrosystèmes souterrains en Camargue
D	Impact d'une baisse de débit du fleuve sur les usages préleveurs en nappe alluviale
<b>Phase 4 - Détermination des conditions limites de débits pour les espèces</b>	
A	Rapport principal de phase 4
B	Résumé de la phase 4
<b>Phase 5 - Synthèse des débits limites pouvant être définis dans le Rhône et Approche des volumes prélevables</b>	
A	Rapport principal de phase 5
B	Résumé de la phase 5
<b>Phase 6 - Etude de la sensibilité des étiages du Rhône à des scénarios prospectifs</b>	
A	Rapport principal de phase 6
B	Résumé de la phase 6



	<b>BRL ingénierie</b> <b>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001</b> 30001 NIMES CEDEX 5
	Sous-traitants

<b>Date de création du document</b>	<b>Avril 2013</b>
<b>Contact</b>	<b>Sébastien Chazot</b> sebastien.chazot@brl.fr

<b>Titre du document</b>	<b>Phase 1 – Document C : Rapport thématique sur les nappes en interaction avec le Rhône</b>
<b>Référence du document :</b>	<b>800420_Ph1_C_Hydrogeologie</b>
<b>Indice :</b>	<b>VFb</b>

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
12 avril 2013	1.0		Pascal Fénart (HYDROFIS)	Sébastien Chazot
9 août 2013	2.0		Pascal Fénart (HYDROFIS)	Sébastien Chazot
Mars 2014	3.0		Pascal Fénart (HYDROFIS)	Sébastien Chazot
Octobre 2014	VFb		Pascal Fénart (HYDROFIS)	Sébastien Chazot



# ETUDE DE LA GESTION QUANTITATIVE ET DES DEBITS DU RHONE EN PERIODE DE « BASSES EAUX »

## Phase 1 – Document C : Rapport thématique sur les nappes en interaction avec le Rhône

<b>PREAMBULE.....</b>	<b>1</b>
<b>SYNTHESE.....</b>	<b>4</b>
<b>1. DONNEES SUR LA NAPPE ALLUVIALE DU RHONE .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Géométrie des réservoirs alluviaux</b>	<b>7</b>
1.1.1 Données issues des cartes géologiques au 1 :50 000	8
1.1.2 Données issues de la BD LISA	23
1.1.3 Données relatives aux zones stratégiques pour l'AEP	26
1.1.4 Données issues des synthèses départementales	28
1.1.5 Données issues des synthèses régionales	29
1.1.6 Données sur la piézométrie	29
1.1.7 Données sur les paramètres hydrodynamiques	30
1.1.8 Approche spécifique pour la région PACA	32
<b>1.2 Colmatage des berges</b>	<b>35</b>
1.2.1 Problématique	35
1.2.2 Recherche documentaire	35
1.2.3 Données utiles pour appréhender les dynamiques de colmatage	45
1.2.4 Premiers avis	50
<b>2. EVOLUTIONS METHODOLOGIQUES.....</b>	<b>55</b>
<b>2.1 Considération générales</b>	<b>55</b>
2.1.1 Eléments de méthode	55
2.1.2 Vers une méthode expéditive d'estimation de l'impact d'un prélèvement en nappe sur le débit estival du Rhône	56
2.1.3 Redéfinition des nappes en interaction potentielle avec le système Rhône	57
<b>2.2 Sectorisation de la nappe alluviale du Rhône</b>	<b>61</b>
2.2.1 Stratégie globale	61
2.2.2 Sectorisation liée aux ouvrages	61
2.2.3 Sectorisation liée aux types d'encaissements géologiques	64
2.2.4 Sectorisation liée à l'interface nappe-rivière	71
<b>2.3 Stratégie de modélisation</b>	<b>75</b>
2.3.1 Approche détaillée : la nappe alluviale du Rhône	75
2.3.2 Approche systématique : les nappes alluviales des affluents.	76
2.3.3 Approche phénoménologique : les formations annexes	78
<b>3. REFERENCES DOCUMENTAIRES .....</b>	<b>83</b>

---

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Profil en long du Rhône.....	2
Figure 2 : Esquisse du soubassement pliocène et interprétation d la morphologie pontienne (L'Homer et al., 1987) .....	9
Figure 3 : Organisation des cours du Rhône à la fin de l'époque romaine (L'Homer et al., 1987). .....	10
Figure 4 : Fronts glaciaires en Bièvre-Valloire (Chenevoy et al., 1976).....	17
Figure 5 : Systèmes fluvio-glaciaires de l'Est Lyonnais .....	18
Figure 6 : Schéma du système aquifère de l'Est Lyonnais (Collin et al., 1973) .....	19
Figure 7 : Perméabilités des séries aquifères de l'Est Lyonnais (Collin et al., 1973).....	19
Figure 8 : Schéma structural de la zone jurassienne (d'après Kerrien et al., 1990). .....	20
Figure 9 : Schéma hydrogéologique de la plaine genevoise (d'après Donzeau et al., 1997).....	22
Figure 10 : Ensemble des entités hydrogéologiques de la BD LISA correspondant à la nappe alluviale globale du Rhône et aux plaines alluviales latérales participant au fonctionnement des alluvions principaux du Rhône. ....	24
Figure 11 : Exemple de l'entité hydrogéologique sur la plaine de Pierrelatte « Alluvions de la vallée du Rhône de Viviers à Mornas » .....	25
Figure 12 : Zones stratégiques (en jaune) correspondant à l'entité hydrogéologique (BD LISA, en rouge) de la plaine alluviale de Pierrelatte .....	27
Figure 13 : Localisation de la plaine de Pierrelatte (avec son entité BD LISA en rouge) appartenant à 4 départements. ....	28
Figure 14 : Pentés hydrauliques moyennes du Rhône (d'après SOGREAH, 1999).....	36
Figure 15 : Illustration du phénomène de colmatage des berges (d'après Lallemand-Barrès, 1985).....	40
Figure 16 : Bilan bathymétrique des ouvrages CNR (d'après Bravard et Clémens, 2008).....	43
Figure 17 : Profils bathymétriques (traits noir) associés à des points cotés renseignant une profondeur, le long du canal de Donzère Mondragon et du Vieux-Rhône associé.....	45
Figure 18 : Exemple de hauteurs d'eau (en rouge) pour la crue Générale1 - exemple de la section du Rhône à l'amont du barrage de Péage-Roussillon .....	46
Figure 19 : Coupe hydrologique au niveau du barrage de retenue de Péage-Roussillon .....	47
Figure 20 : Tracé des hauteurs d'eau modélisées pour une crue de type GENERAL1 suivant la position du Pk. ....	47
Figure 21 : Débits caractéristiques par ouvrages .....	48
Figure 22 : Exemple de débits (en rouge) pour la crue Générale1 - exemple de la section du Rhône à l'amont du barrage de Péage-Roussillon.....	49
Figure 23 : Correspondance entre granulométrie et perméabilité (Castany, 1982).....	50
Figure 24 : Courbe de Hjulstrom .....	51
Figure 25 : Exemple de la répartition des débits – Canaux de Miribel et Jonage en 1986 (d'après Poinart et al., 1989). ....	52
Figure 26 : Liste initiale des nappes en interaction potentielle.....	57
Figure 27 : Nouvelle liste des nappes en interaction potentielle. ....	59
Figure 28 : Sectorisation proposée en fonction des ouvrages CNR. ....	62
Figure 29 : Exemples de niveaux d'eau du Rhône en crue pour la détermination de l'influence amont des ouvrages de retenue.....	63

Figure 30 : Grille de sectorisation en fonction de l'influence hydraulique des encaissants géologiques. ....	64
Figure 31 : Zoom exemple de la sectorisation au niveau du barrage de Chancy, avec un extrait du secteur alluvionnaire du Rhône en rive droite (polygone bleu clair). ....	65
Figure 32 : Extrait de la sectorisation dans l'Est Lyonnais. ....	66
Figure 33 : Exemple de secteur en relation avec une formation carbonatée de « petite dimension ». ....	67
Figure 34 : Exemple de secteur avec une influence latérale d'un encaissant carbonaté de grande dimension. ....	68
Figure 35 : Zoom sur un secteur en contact entre un grand bassin molassique. ....	69
Figure 36 : Exemple d'influence latérale par une nappe alluviale majeure : secteur de confluence avec l'Ain. ....	70
Figure 37 : Exemple du profil bathymétrique du Pk n°186 (Amont de Lyon). ....	71
Figure 38 : Exemple du profil au Pk n°186 avec les sections de linéaire d'échange en marron. ....	72
Figure 39 : Exemple du profil au Pk n°186 en amont de Lyon avec la section mouillée estimée en hachuré. ....	73
Figure 40 : Schéma de principe de la représentation du colmatage dans les modèles maillés. ....	74
Figure 41 : Relations possibles entre cours d'eau et nappe. ....	76
Figure 42 : Moyennes mensuelles des pluies efficaces (station de Bron). ....	79
Figure 43 : Distribution annuelle des pluies efficaces de 1970 à 2009 (station de Bron). ....	80



# PREAMBULE

L'Agence de l'Eau RMC a confié à BRLingénierie, associé à Hydrofis et Hepia (sous-traitants), la réalisation de l'étude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux.

Le Rhône est souvent considéré comme une ressource pléthorique et susceptible de satisfaire de nombreux usages (prélèvements pour l'eau potable, l'industrie ou l'irrigation, production hydroélectrique, refroidissement de centrales nucléaires, navigation, etc.). **On peut cependant s'interroger sur l'évolution de sa capacité à satisfaire, à terme, en périodes d'étiage, tous ces usages, conjointement avec une garantie du bon état des milieux aquatiques associés**, compte tenu de plusieurs paramètres, en particulier :

- ▶ des perspectives d'évolution des usages prélevant dans le fleuve ou sa nappe ;
- ▶ des perspectives de modification de son régime hydrologique et de la température de ses eaux sous l'influence du changement climatique ;
- ▶ l'émergence de divers projets de substitution ou de développement de ressource pour amener de l'eau du fleuve (eau superficielle ou nappe) vers des bassins voisins ne disposant pas des ressources suffisantes pour satisfaire leurs besoins (alimentation en eau potable, usage agricole, usage industriel) ;
- ▶ l'apparition de périodes de tensions, en particulier lors d'épisodes caniculaires et/ou d'étiage prononcé. Certaines années récentes se sont illustrées par des températures d'eau élevées (en particulier 2003 et 2006), qui ont conduit EDF à diminuer la production des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE).

Ces différents points soulignent l'importance de la question clé posée par le cahier des charges de l'étude : « **Quelle est la capacité du fleuve Rhône à répondre à l'ensemble des usages actuels et à venir tout en assurant le fonctionnement des milieux aquatiques ?** ». Plus précisément, l'étude doit apporter des réponses aux questions suivantes :

- ▶ Est-il pertinent de considérer le Rhône comme une ressource pléthorique ?
- ▶ Quelles sont les composantes du débit du Rhône (contributions des glaciers, du manteau neigeux, du Lac Léman, des affluents, de la pluviométrie...) et les différents leviers influençant les débits d'étiage ?
- ▶ Quels sont les impacts des variations de débits et de température sur les différents usages ?
- ▶ Quels seuils de débit ne faut-il pas dépasser sur le fleuve pour ne compromettre ni la vie biologique, ni les usages prioritaires (eau potable/sécurité civile) ?

L'étude est découpée en six phases chronologiques.

La phase 1 caractérise le territoire de l'étude et dresse un bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles, à l'échelle du bassin versant, sur les eaux superficielles et les eaux souterraines : gestion du lac Léman, barrages, transferts hydroélectriques, prélèvements pour l'irrigation, l'eau potable, l'industrie et le refroidissement des centrales nucléaires.

La phase 2 reconstitue, au droit des six stations hydrométriques de référence, les débits non influencés par les prélèvements et évalue l'empreinte des influences anthropiques sur ces débits.

La phase 3 examine les conditions limites (débits et températures) à maintenir dans le fleuve pour l'alimentation en eau potable et le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité.

La phase 4 s'interroge sur les conditions limites de débit à maintenir pour les poissons.

Les phases 5 et 6 font la synthèse des débits limites pouvant être définis à ce stade dans le Rhône et évaluent les effets possibles d'une augmentation des prélèvements sur les étiages du Rhône.

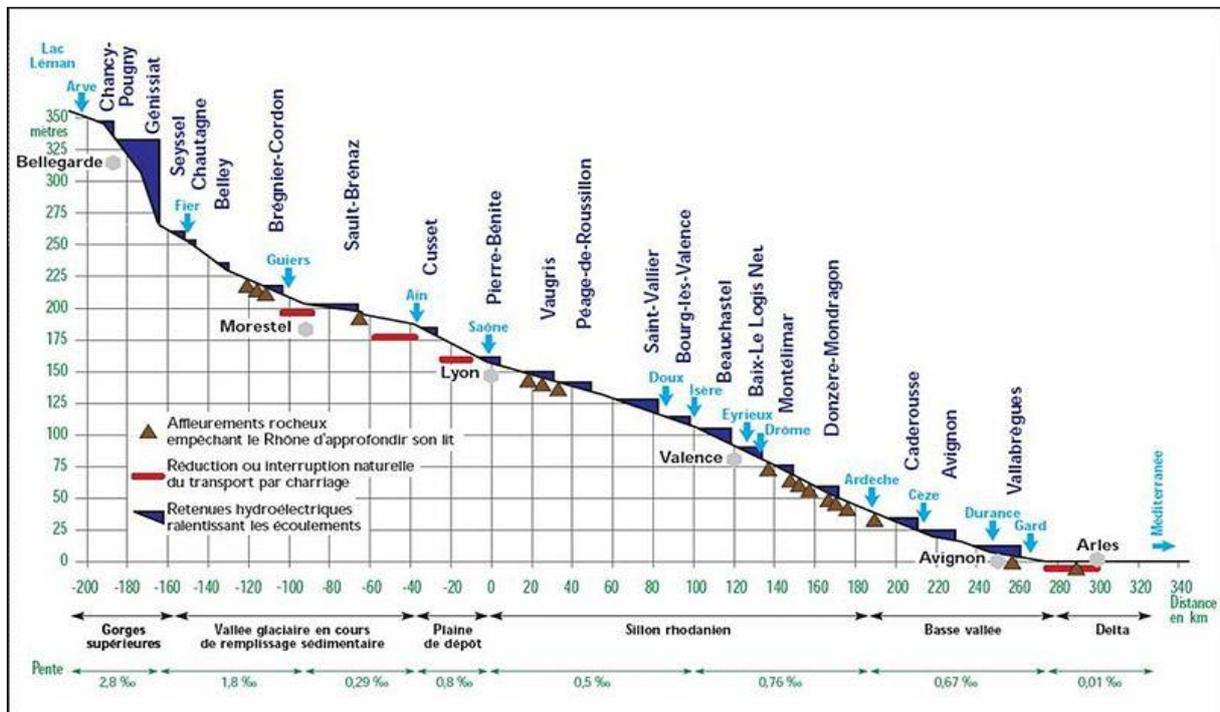
La présente note constitue le rapport thématique « Hydrogéologie » de phase 1 ; elle vise à faire le point sur les données acquises en phase 1 concernant les nappes en interaction avec le système Rhône, et à étudier les évolutions méthodologiques liées à la consistance et à l'étendue des données acquises.

Rappelons qu'à ce stade de l'étude, les données recueillies doivent servir à la sectorisation de la nappe alluviale du Rhône, puis à une phase de modélisation pour estimer la part des prélèvements en nappes qui sera soustraite aux débits estivaux du fleuve.

Il était prévu de recoller spatialement toutes les cartes piézométriques récoltées pour essayer de mettre en évidence les zones d'équilibre, de perte ou d'alimentation. Parallèlement, il s'agissait de caractériser le linéaire du fleuve en termes de degré de colmatage des berges. Pour ce faire, il était prévu de recoller les informations suivantes par secteurs hydrogéologiques (20 km de long) :

- ▶ Pente du fil de l'eau ;
- ▶ Secteurs de moindre énergie hydraulique liés à la présence d'ouvrages régulateurs ;
- ▶ Sections mouillées.

Figure 1 : Profil en long du Rhône.



L'objectif initial était de proposer en fonction des amplitudes de ces paramètres, une méthode expéditive de classement des secteurs hydrogéologique en trois catégories : colmatage important, colmatage moyen et colmatage faible ou inexistant.

- ▶ Colmatage important : on supposera les échanges nappe-rivière faibles/négligeables, voire inexistantes.
- ▶ Colmatage moyen/cours d'eau à l'équilibre ;
- ▶ Colmatage moyen/cours d'eau alimentant ;
- ▶ Colmatage moyen/cours d'eau drainant ;
- ▶ Colmatage faible/cours d'eau à l'équilibre ;
- ▶ Colmatage faible/cours d'eau alimentant ;
- ▶ Colmatage faible/cours d'eau drainant.

Puis il s'agissait, dans un deuxième temps, de proposer une clé de détermination des impacts sur les débits estivaux du Rhône liés aux prélèvements en nappes.

**Le présent rapport concerne la phase 1 de l'étude. Il présente les données collectées et leur potentielle intégration dans la méthode à appliquer. C'est principalement l'objet du premier chapitre.**

**Cependant, au vu de la complexité du sujet, il nous a paru nécessaire de l'étendre à des considérations méthodologiques. En effet, rappelons que l'étude se propose de traiter la problématique de la naturalisation des débits du fleuve. Pour ce faire, une récolte de toutes les données de prélèvement dans le bassin versant du Rhône est en cours de réalisation par BRLi. Elle intéresse donc à la fois les prélèvements à destination de l'alimentation en eau potable, mais aussi les prélèvements industriels et agricoles, et ce pour tous types de nappes dans ce bassin versant.**

Dans les chapitres suivants, nous proposons donc une redéfinition du système avec une proposition de nappes en potentielle interaction avec le Rhône sur la base de considérations hydrogéologiques. Puis, nous détaillons les implications méthodologiques sur les stratégies de sectorisation et de modélisation.

## SYNTHESE

S'agissant du volet hydrogéologique de l'étude, la principale problématique est celle des impacts des prélèvements par forage dans les nappes d'eau souterraine, sur les débits estivaux du fleuve. Ce paragraphe fait **la synthèse des données collectées pour répondre à cette problématique. Il présente aussi les évolutions méthodologiques induites par les données disponibles et la spécificité du système Rhône.**

Concernant les données collectées, notons les éléments suivants :

- ▶ La géométrie et le comportement hydrogéologique sont globalement bien décrits pour la nappe alluviale du Rhône. Cette nappe a fait l'objet de multiples investigations et ses caractéristiques sont reportées dans de nombreuses synthèses et référentiels. Une lacune de synthèse avait été identifiée pour la nappe en région PACA ; des approches spécifiques ont donc été mises en œuvre pour bien appréhender la géométrie des réservoirs dans cette zone.
- ▶ Une des problématiques majeures est celle de la relation aux encaissements pour la nappe alluviale du Rhône. Certaines nappes latérales sont susceptibles de venir suralimenter les alluvions de manière significative. Les données disponibles permettent une bonne identification et une bonne caractérisation de ces encaissements.
- ▶ Les échanges nappes-rivière peuvent être partiellement contrôlés par les phénomènes de colmatage. Un point particulier a été réalisé sur cette problématique : état des connaissances en général et en particulier sur le Rhône. Sur la base des éléments consultés, il apparaît qu'aujourd'hui le Rhône se distingue par la faiblesse du transport sableux grossier ou graveleux par charriage. Les dépôts de fond ou de berge sont majoritairement des sables fins, remobilisés régulièrement lors des épisodes de crues. Les limons sont majoritairement rapportés à la mer ; leur dépôt se limite aux avants-ports des écluses, à certains bras morts ou plans d'eau et à l'amont immédiat des ouvrages de retenue. Les études consultées montrent aussi que la problématique du colmatage correspond principalement à la pénétration des fines dans le cas de forts gradients hydrauliques dans le sens rivière-nappe (cas des canaux d'aménée et de la proximité de champs captants). C'est dans ces secteurs que le colmatage est fort et permanent.

**A la fin de cette première phase de l'étude, on peut donc considérer que les données disponibles sont suffisantes pour appliquer la méthodologie proposée.**

Selon les éléments proposés dans le CCTP, BRLi propose un système dit « Rhône », composé des éléments suivants :

- ▶ Le fleuve et ses affluents directs ;
- ▶ La nappe d'accompagnement ;
- ▶ Les nappes latérales en interaction forte avec le système Rhône.

Dans le cadre de la méthodologie globale mise en place, notre intervention est centrée sur la problématique de l'impact des prélèvements souterrains, à l'échelle du bassin versant, sur les débits estivaux du Rhône. A ce sujet, rappelons une considération d'ordre général : « L'eau va toujours à la rivière ». Cela signifie que dans les conditions naturelles usuelles, le réseau superficiel draine en période d'étiage les nappes qu'il traverse. Si nous nous intéressons aux échanges entre nappes et rivières, nous concevons intuitivement que seul importe l'aspect transitoire des phénomènes puisque tout prélèvement effectué dans une nappe constitue tôt ou tard un préjudice pour le réseau superficiel. Nous proposons donc de distinguer prélèvements permanents et prélèvements temporaires dans les nappes :

- ▶ Tout prélèvement permanent dans une nappe dans le bassin versant du Rhône sera considéré comme un préjudice direct et proportionnel au débit estival du fleuve ;

- ▶ Les prélèvements temporaires devront faire l'objet d'approches plus détaillées. Rappelons qu'il s'agit majoritairement de prélèvements estivaux à destination de l'irrigation par les agriculteurs.

**Il en résulte que le travail d'analyse hydrogéologique à venir portera principalement sur les nappes sollicitées pour l'irrigation en période estivale. Il s'agit principalement des nappes suivantes :**

- ▶ Nappes alluviales quaternaires, dont la nappe d'accompagnement du Rhône ;
- ▶ Nappes fluvio-glaciaires, caractérisées par une forte productivité, des niveaux piézométriques proches du sol et des surfaces affleurantes plus ou moins planes ;
- ▶ Nappes des séries mollassiques miocènes. Bien que moins productives, ces nappes se trouvent à de faibles profondeurs et font l'objet de nombreux prélèvements à destination de l'agriculture.

Notons l'hypothèse forte d'absence de prélèvements importants à destination de l'agriculture dans les aquifères karstiques et les aquifères fissurés. Ce type d'aquifère présente des caractéristiques peu propices au développement d'importants prélèvements pour l'agriculture : des difficultés de captage, des reliefs forts, des sols peu développés, etc.

Pour déterminer l'impact potentiel des prélèvements estivaux dans les masses d'eau souterraine, nous proposons une méthodologie dite en « poupées russes », en fonction de la complexité des systèmes hydrogéologiques et du degré de précision attendue de l'approche :

- ▶ Pour la nappe alluviale du Rhône, nous mettrons en œuvre une approche combinant une sectorisation du Rhône et une approche par modélisation hydrodynamique détaillée. Il s'agit de se doter d'une grille d'analyse pour chaque configuration hydrogéologique possible ; cette grille d'analyse résultera d'une approche par analyses de sensibilité afin d'intégrer au mieux toute la complexité de l'aquifère alluvial rhodanien (variation des paramètres hydrodynamiques, distance aux berges, degré de colmatage supposé, impact des aménagements, influence des encaissements).
- ▶ Pour les nappes alluviales des affluents du Rhône, nous proposons une approche avec une grille d'analyse basée sur les paramètres suivants : débit de pompage et distance aux affluents. Les paramètres hydrodynamiques seront fixés de manière arbitraire comme des constantes et on fera implicitement l'hypothèse de l'absence de colmatage des berges susceptible de réduire les échanges nappes rivière. Cette grille d'analyse sera définie par l'exploitation de la formule de Theis (1935).
- ▶ Pour les nappes fluvio-glaciaires et les aquifères mollassiques, une approche de type phénoménologique par modélisation hydrodynamique (modèle maillé simplifié de grande échelle) sera mise en œuvre. Rappelons en effet que les systèmes fluvio-glaciaires, bien que très perméables, sont diversement connectés au système Rhône : connexion souterraine pour certains d'entre eux (Garon, nappes de l'Est Lyonnais, etc.) ou par le biais de résurgences aux limites des systèmes (systèmes de la plaine du Léman, systèmes de la région de Vienne). Il s'agira donc de déterminer pour quelle distance et à partir de quelle gamme de débit, les prélèvements dans ces deux types de systèmes sont susceptibles de venir impacter les débits estivaux du Rhône. On observe la même problématique pour les aquifères mollassiques, bien que moins perméables. Ces systèmes sont connectés au système Rhône selon les mêmes modalités : connexions souterraines (secteur du Haut Dauphiné) ou via des résurgences aux limites du système (bassins mollassiques du Bas Dauphiné et du Comtat).



# 1. DONNEES SUR LA NAPPE ALLUVIALE DU RHONE

## 1.1 GEOMETRIE DES RESERVOIRS ALLUVIAUX

Dans ce chapitre, nous présentons les sources des données sur la géométrie et l'hydrodynamique des réservoirs qui constituent la nappe d'accompagnement du Rhône. Il s'agit principalement de données documentaires.

Parallèlement, un certain nombre de couches SIG ont pu être reportées dans un projet ArcGIS (ArcGIS Basic v.10.1) afin de visualiser l'ensemble des informations associées aux réservoirs alluviaux ainsi que leurs aquifères adjacents.

Plusieurs types d'information sont donc utilisés :

- ▶ Un fond IGN au 1 :25 000 permettant d'avoir un repère géographique et une visualisation de la topographie et de l'aménagement du Rhône ;
- ▶ Des fonds géologiques au 1 :250 000ème et 1 :50 000 ;
- ▶ Des données de topographie précises issues de la « base de données Rhône » transmise par BRLi (« BDT\_RHONE », couche « Courbes\_de\_niveau ») qui peuvent s'avérer utiles pour l'observation précise du relief aux abords du fleuve ;
- ▶ Les limites de bassins versants effectuées par BRLi : le bassin versant total du Rhône (« BV\_Rhone ») et les sous-bassins versants (« sous\_BV ») comprenant ceux des principaux affluents du Rhône ;
- ▶ Les points d'affluence et les points SDAGE transmis également par BRLi qui permettent de visualiser la première proposition de sectorisation hydrologique effectuée ; les points de localisation des centrales nucléaires sont également reportés ;
- ▶ Le référentiel BD LISA du BRGM, découpage en entités hydrogéologiques à précision régionale recouvrant tout le bassin Rhône-Méditerranée et Corse ;
- ▶ La couche des zones stratégiques (étude ANTEA-SAFEGE de 2010) ;
- ▶ Le mur et le toit des alluvions du Rhône (« Isohypses\_Mur » et « Isohypses\_Toit », couches SIG provenant de la BD LISA « DonneesHydrogeol\_BOU\_FRC\_RHA » ;
- ▶ Des données de piézométrie « Isopieze » issues également de la BD LISA dans le dossier « DonneesHydrogeol\_BOU\_FRC\_RHA », permettant de visualiser pour une majorité de plaines alluviales des instantanés piézométriques ; ces informations sont associées à une couche concernant le sens d'écoulement des nappes « Sens\_ecoulement » ;
- ▶ Des données de piézométrie sur la région PACA permettant également de visualiser les isopièzes correspondants ; ils ne sont malheureusement pas associés à des valeurs de niveau piézométrique (plaine de l'Ouvèze, secteurs d'Avignon, Caderousse, Arles, Vallabrègues, plaine de Sorgues, Aigues-Ouvèze, Graveson Maillane et la plaine d'Orange) ;
- ▶ L'ensemble des ouvrages et des aménagements de la base de données ROE (« roe\_version3\_20111115\_system\_L93 ») tels que les barrages et les seuils par exemple ;
- ▶ Une couche répertoriant les principaux champs captant existants (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse « Captages\_AEP ») ;
- ▶ Des données de bathymétrie suivant plusieurs profils (avec les points cotes) discrétisant tout le Rhône environ tous les 500 m ;
- ▶ Les cours d'eau de la BD Carthage (IGN) avec les couches « COURS\_D\_EAU » (polylignes) et « HYDROGRAPHIE\_SURFACIQUE » (pour visualiser l'étendue du cours d'eau du Rhône) qui sont complétés par des données issues de la « BDT\_RHONE » reportant les tronçons du Rhône, son lit mineur (donnée surfacique), les surfaces en eau (telles que les lacs) et les berges (donnée surfacique correspondant par exemple aux îles).

Certaines de ces données sont associées à des documents descriptifs plus ou moins précis qui sont présentés dans les parties suivantes. Afin d'illustrer l'utilisation des données et des documents mis à disposition, le secteur de la plaine de Pierrelatte (depuis le Nord de la commune de Caderousse à l'aval jusqu'à la clue de Donzère en amont) est choisi comme exemple.

A partir des données documentaires, plusieurs types de paramètres hydrodynamiques ont pu être reportés pour chaque aquifère référencé en tant qu'entité hydrogéologique, aquifère départemental, régional ou d'intérêt stratégique majeur. Les principaux paramètres sont globalement concordants entre les différentes sources et concernent principalement la perméabilité. Les données d'épaisseur et de profondeur d'eau associées à la piézométrie sont aussi assez bien renseignées pour la nappe alluviale du Rhône.

Ce panel de données est reporté dans le projet ArcGIS dans chaque table attributaire (couches des zones stratégiques et des entités alluviales de la BD LISA). Les informations quantitatives issues de la synthèse départementale sont reportées dans ces tables attributaires afin d'obtenir une base de données complète référencée servant à la future sectorisation et à la modélisation.

## 1.1.1 Données issues des cartes géologiques au 1 :50 000

### 1.1.1.1 Zone de delta

Elle est couverte par les cartes géologiques des Saintes-Maries-de-la-Mer, d'Eyguières, de Istres et d'Arles. Les dépôts fluviaux sont décrits comme limono-sableux.

A Arles, en tête du delta, le fleuve se divise en deux bras. Le Grand Rhône (50 km de long) a une profondeur d'une dizaine de mètres diminuant à l'embouchure (4 m). Sa largeur atteint 400 m au voisinage de son débouché dans la mer. Sa pente moyenne est de 10 cm/km. Son débit moyen est de 1400 m<sup>3</sup>/s à Arles; dans les crues exceptionnelles, il peut atteindre 6300 m<sup>3</sup>/s. Le Petit Rhône a une longueur de 60 km. Sa profondeur moyenne est de 3 à 6 m. Son débit est très inférieur à celui du Grand Rhône.

Dans la Petite Camargue, la médiane des alluvions est de l'ordre de 200 microns. La composition moyenne des sables est la suivante :

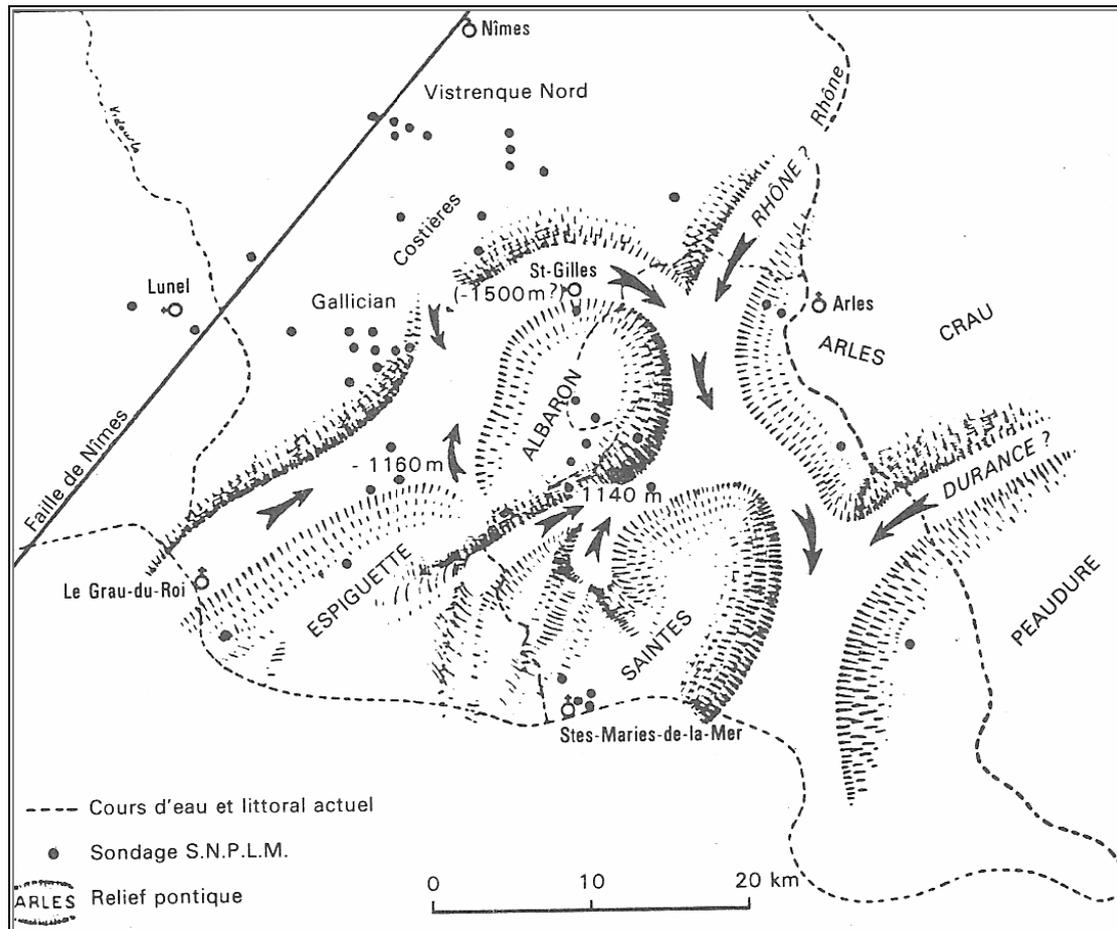
- ▶ quartz : 40 à 50 %,
- ▶ débris carbonatés : 30 à 40 %,
- ▶ feldspath : 10 à 25 %,
- ▶ micas : 15 à 20 % (muscovite et biotite parfois altérées en chlorite),
- ▶ débris organiques : < 5 %.

Les argiles sont constituées principalement d'illite et de chlorite, accessoirement de kaolinite, d'interstratifiés illite-montmorillonite et peut-être de montmorillonite.

Le substratum rocheux sur lequel reposent les séries fluviales est d'une grande complexité. On peut observer des formations allant du Miocène au Pléistocène. La succession de périodes glaciaires et d'interglaciaires chauds ou tempérés se traduit dans la dynamique sédimentaire par une série alternée de phases de creusement des vallées et de remblaiement de celles-ci.

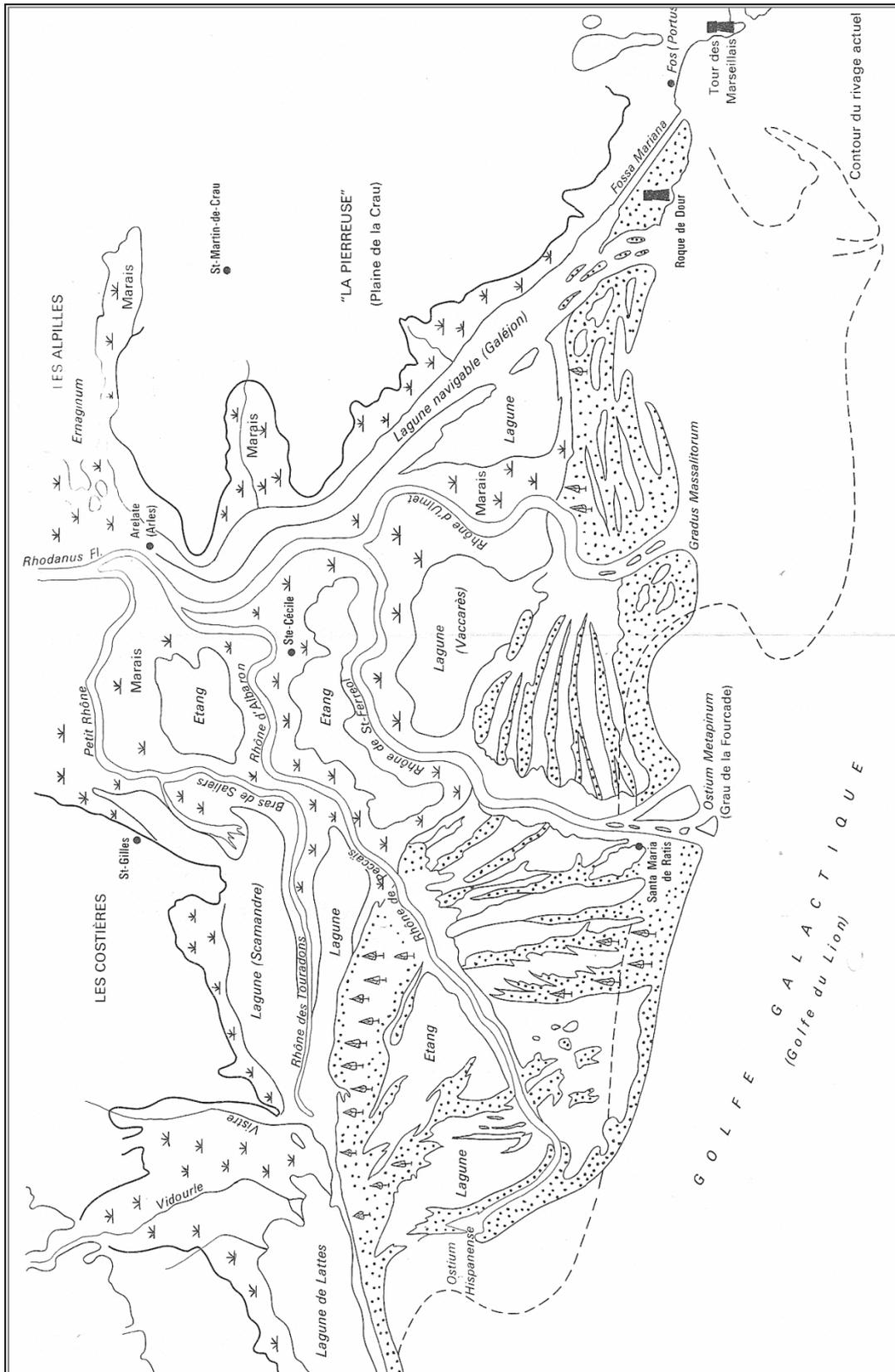
Rappelons que cette zone fera l'objet d'une étude particulière dans le cadre de la mission, centrée sur la problématique du biseau salé.

Figure 2 : Esquisse du soubassement pliocène et interprétation d la morphologie pontienne (L'Homer et al., 1987)



Les reconstitutions paléo géographiques du delta permettent de bien mesurer le degré d'aménagement actuel du delta.

Figure 3 : Organisation des cours du Rhône à la fin de l'époque romaine (L'Homer et al., 1987).



### 1.1.1.2 Bas Rhône

C'est un vaste domaine qui part des Alpilles au Sud jusqu'à la région de Valence. Dans ce secteur, le Rhône est dans un contexte géologique spécifique avec un soubassement rocheux dominé par les séries calcaires de l'Urgonien et de vastes bassins oligocènes en rive gauche.

Ce secteur est décrit par les cartes géologiques de Nîmes, Châteaurenard, Avignon, Orange, Valréas, Pont Saint Esprit, Bourg Saint Andréol, Montélimar, Crest et Valence.

#### AVAL D'AVIGNON

Les fonds des vallées du Gardon et du Rhône sont occupés par une épaisse couche d'alluvions. La partie supérieure, la seule qui réponde à la désignation d'alluvions holocènes, est essentiellement sablo-limoneuse. Elle peut renfermer des galets, plus nombreux, selon toute vraisemblance, dans l'axe des anciens cours majeurs du Rhône.

Peu de sondages profonds ont été effectués dans la basse vallée du Gardon. Seul le sondage 6-165 renseigne sur leur épaisseur (15 m) et donne quelques indications sur la lithologie de ces alluvions. 2 à 3 m de sables limoneux surmontent une douzaine de mètres de sables et « graviers » (galets). Le substrat est miocène. Par contre, de nombreux sondages ont été effectués à proximité du cours actuel du Rhône par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). Les alluvions fines holocènes ont une épaisseur moyenne de 5 m en amont de Beaucaire. Elles s'épaississent en aval, dépassant 10 m en aval de Tarascon. Au-dessous de cette formation, les sondages rencontrent des alluvions plus grossières à galets et matrice sableuse. Ces alluvions ont une épaisseur assez régulière, de l'ordre de 20 m, et reposent généralement sur des argiles grises très probablement plaisanciennes.

Dans la plaine du Rhône en aval de Beaucaire, on identifie :

- ▶ Un réservoir supérieur, quaternaire, renfermant une nappe superficielle de faible épaisseur et d'assez médiocre intérêt, car contenue dans des formations hétérogènes et de faible perméabilité ;
- ▶ Un réservoir inférieur, villafranchien et quaternaire, renfermant la nappe principale de la région, captive pour sa plus grande part sous des passées de marnes et de tourbes. La profondeur du toit de ce niveau aquifère augmente en allant du nord-ouest (bordure de la Costière) au sud-est (val du Rhône) et son épaisseur varie entre 15 et 25 mètres. Les transmissivités sont comprises entre  $10^{-1}$  et  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

La piézométrie de ces deux nappes, malgré quelques différences locales, exprime bien les origines diverses de leur alimentation tout en mettant en évidence leurs relations avec le Rhône, qui ne sont pas les mêmes sur les deux rives : en rive droite, on observe une alimentation permanente par le Rhône ; en rive gauche, le Rhône joue au contraire un rôle de drain, l'écoulement des nappes vers le sud-ouest étant favorisé par la bonne perméabilité des alluvions d'un ancien lit du fleuve développé durant le Quaternaire entre la Montagnette et les Alpilles (à l'est de la feuille Nîmes), région où des irrigations importantes assurent l'essentiel de l'alimentation souterraine.

Dans la plaine du Rhône, en amont de Beaucaire, bien que les épaisseurs soient plus réduites qu'en aval de Beaucaire, ces alluvions possèdent une très bonne transmissivité en général - comprise entre  $10^{-1}$  et  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

### ENTRE LE DEFILE DE MORNAS ET LE DEFILE DE CADEROUSSE

Les alluvions récentes de la vallée du Rhône, perméables, renferment une nappe en liaison avec le fleuve et largement utilisée par l'irrigation ou les alimentations riveraines (station de pompage du Syndicat Rhône-Aygues-Ouvèze à Mornas). Les alluvions anciennes (terrasses Wurmiennes et rissiennes) dominent au contraire dans la vallée de l'Ouvèze et de l'Aygues ; elles renferment également une nappe drainée par ces rivières, mais les perméabilités sont assez faibles. La plaine alluviale de l'Aygues présente la particularité d'être drainée en amont d'Orange par un ruisseau, la Meyne, s'écoulant parallèlement, ce qui occasionne dans ce secteur une abondance d'émergences. Les alluvions récentes des rivières drainent les nappes de terrasses et sont utilisées pour l'alimentation en eau potable des centres (Sainte-Cécile-les-Vignes, captage d'Encausse, Sérignan).

Plusieurs forages traversent de 10 à 14 m d'alluvions graveleuses.

La carte géologique d'Orange ne donne pas d'information sur les épaisseurs de sédiments et leurs perméabilités.

### PLAINE DE DONZERE-MONDRAGON

Dans la plaine de Pierrelatte, les alluvions sont décrites comme des limon sableux avec intercalation de lentilles graveleuses plus ou moins grossières. Le substratum est constitué des marnes du Pliocène marin.

Dans le secteur de Bourg-Saint-Andréol, Les alluvions holocènes se répartissent habituellement en deux niveaux séparés par une dénivellation de l'ordre de 3 à 6 m ; on distingue ainsi :

- ▶ Alluvions fluviales des très basses terrasses. Elles correspondent aux formations qui supportent la plaine d'inondation et sont généralement couronnées par un à deux mètres de sédiments fins à très fins (sables argileux, limons).
- ▶ Alluvions récentes de lit majeur (sables, graviers, cailloutis), limons de débordement, vasières de bras morts. Elles comportent les classiques cailloutis et sables que l'on observe à l'étiage dans le lit majeur, ainsi que les dépôts plus fins (vases, limons à fraction organique) qui s'opèrent dans les zones à mise en eau plus ou moins temporaires (méandres, bras morts ou "lones", dépressions marécageuses). Au sud de Bourg-Saint-Andréol (Ile de la Souteyranne), la formation alluviale récente comporte moins de 5 m de sables, galets et graviers, surmontés par 3 à 4 m de limons sableux. D'une façon générale, les alluvions récentes de la plaine rhodanienne reposent sur un substratum pliocène raviné et leur épaisseur est de l'ordre de 10 à 15 m ; elles comportent une proportion très variable de sédiments fins (limons en passées lenticulaires) et de matériaux grossiers (cailloutis, galets).

Dans le secteur de Pont-Saint-Esprit, l'ensemble des alluvions est en général épais de l'ordre de 14 à 16 m, d'après plusieurs sondages implantés sur les deux rives dont l'ancien captage de Pont-Saint-Esprit (16 m). Toutefois cette épaisseur n'est que de 10 m au nouveau captage. Sous les alluvions, la plupart de ces sondages rencontrent des marnes plaisanciennes, sans doute creusées de chenaux profonds de quelques mètres. L'existence de chicots de substrat crétacé ne peut cependant pas être exclue. L'épaisseur respective des graviers et des matériaux fins (limons) est très variable. Deux sondages de la rive gauche traversent 11,5 et 13 m de graviers sous 4,8 et 1,7 m de limons. Si l'un des sondages de la rive droite est comparable, d'autres traversent une forte épaisseur de limons (8 m à la Paillasse, Saint-Alexandre) ou des graviers pour l'essentiel (11 m au Colombier, Pont-Saint-Esprit).

La plaine est limitée au Nord par la cluse de Donzère. les alluvions du Rhône sont alors limitées par des pointements de calcaires crétacés, dans un étroit goulet d'environ 1000 m

### PLAINE DE MONTELMAR :

Cette plaine est limitée au sud par le défilé de Viviers-Donzère et au nord par celui de Cruas-Meysse.

Les alluvions post-wurmiennes (ou récentes ou holocènes) ont été subdivisées en alluvions des lits majeurs (Fzb) et alluvions des plaines d'inondation des grandes crues formant terrasse au-dessus des cours d'eau (Fza) :

- ▶ Fza. Les alluvions des plaines d'inondation du Rhône sont très étendues et généralement constituées par des limons sablo-argileux gris de débordement dans lesquels se mêlent, sporadiquement, quelques lentilles graveleuses grossières. L'épaisseur est très variable selon les lieux et oscille entre 0,5 et 5 m (sondages CNR) pour une moyenne de 2 m. Au-dessous, on retrouve une épaisseur variable elle-même de cailloutis grossiers polygéniques.
- ▶ Fzb. Les alluvions des lits majeurs comprennent suivant les endroits des dépôts tantôt caillouteux, tantôt limoneux ou argileux, semblables à ceux précédemment décrits.

Grâce aux travaux nécessités par l'aménagement du Rhône, l'hydrogéologie de cette vallée est assez bien connue (rapports BURGEAP et BRGM). L'épaisseur des alluvions récentes est supérieure à 10 m ; elle atteint parfois 20 à 30 m comme au sud de Montélimar. Les alluvions anciennes sont moins intéressantes car plus argileuses et moins perméables.

La nature du substratum des alluvions n'est pas précisée. On notera que sur leurs bordures latérales, les alluvions sont en contact principalement avec les aquifères carbonatés du Crétacé à faciès urgonien. Au niveau de Montélimar, on observe bien un contact avec des systèmes alluviaux des affluents mais il est limité spatialement. Les alluvions récentes du Roubion et du Jabron sont assez restreintes et peu épaisses (1 à 2 m) dans la moitié est du territoire de la feuille, se développent plus largement à l'ouest et atteignent leur maximum dans le cône de déjection surbaissé édifié conjointement par les deux rivières à leur débouché dans la vallée du Rhône et sur lequel se trouve la ville de Montélimar. L'épaisseur de ses alluvions varie en moyenne de 7-8 m à 1-2 m du centre vers la périphérie. Celles-ci sont constituées de limons mais aussi souvent d'argiles de couleur gris-brun, qui fossilisent généralement des cailloutis grossiers, quelquefois le substratum.

### DEFILE DE CRUAS

Dans ce secteur, la plaine alluviale du Rhône est limitée en rive droite et en rive gauche par les reliefs importants (de 300 à 500 m NGF), composés de calcaires à faciès urgoniens ou de calcaires marneux de l'Hauterivien. Elle présente une largeur moyenne d'environ 2 km.

Les alluvions actuelles et récentes sont composées de sables, graviers, galets et limons.

Entre Baix et Cruas, les alluvions reposent sur le Crétacé (le fond du chenal pliocène étant plus à l'est) et la largeur de divagation est réduite à 1,5 ou 2 kilomètres.

### 1.1.1.3 Moyen Rhône

C'est un vaste domaine qui part du défilé de Cruas et arrive dans la région lyonnaise. Dans ce domaine, le Rhône est dans un contexte géologique spécifique avec des roches de socle (bordure orientale du Massif Central) en rive droite et de grands ensembles sédimentaires principalement tertiaires et/ou quaternaires en rive gauche.

Ce secteur est décrit par les cartes géologiques de Crest, Valence, Tournon, Serrières, Vienne, Givors et Lyon.

#### BASSIN DE VALENCE

Les alluvions actuelles et récentes sont composées de sables, graviers, galets et limons.

Plus précisément, on peut distinguer deux ensembles dans les alluvions récentes du Rhône, de l'Isère et de l'Eyrieux : le lit majeur (Fz) et la plaine d'inondation (Fzi), formant deux niveaux séparés par une dénivellation faible (3 à 5 m), creusés dans les basses terrasses Wurmiennes. Ces niveaux ne se prolongent pas à l'est, mais sont présents à l'ouest, le long de la vallée de l'Eyrieux où ils n'ont pas été séparés.

- ▶ Le long du Rhône, le lit majeur est très étroit. Localement, les méandres du fleuve ont élargi le lit par sapement latéral des basses terrasses et laissé à sec une petite plaine alluviale ne dominant que de peu l'étiage. Il s'agit d'alluvions polygéniques à galets bien roulés et matrice sableuse abondante, directement remaniées des alluvions Wurmiennes, sans dépôt fin supérieur. L'épaisseur est variable du nord (9 m au Nord d'Aiguille, 16 m aux Combeaux) au centre du territoire de la feuille (11 à 16 m à Bourg-lès-Valence). On note des consolidations locales en poudingues (griffe).
- ▶ Alluvions fluviales et torrentielles des plaines d'inondation. 3 à 5 m au-dessus du lit majeur, une très basse terrasse (ferme Morgan, les Iles du Chiez) se trouve généralement au-dessus des crues ordinaires, sauf des plus fortes. Elle est constituée par les mêmes alluvions que le lit majeur et les terrasses encadrantes et recouverte d'une épaisseur de 1 à 2 m de sables fins gris, bien lités, plus ou moins limoneux ou argileux selon les endroits (limons d'inondation). Ils reposent directement sur les cailloutis non altérés et ne paraissent eux-mêmes avoir subi aucune altération superficielle (terres noires sablo-limoneuses). Cette très basse terrasse se développe particulièrement rive droite du Rhône au sud de Bourg-lès-Valence et rive gauche (les Iles du Chiez), peu au nord (Châteaubourg) et au confluent de l'Isère (Maison-Girard, au Nord d'Aiguille). L'épaisseur des alluvions est plus forte au nord (14,50 m au Sud de Buchillon) et au centre (16 m à Bourg-lès-Valence) qu'au sud (12 m aux Iles du Chiez). Rive droite, elles n'apparaissent que dans la vallée de l'Eyrieux et sont constituées de sables ou de limons siliceux.

Dans les environs de Valence, l'épaisseur moyenne de l'aquifère est généralement supérieure à 10 m, atteignant 25 m dans certains secteurs (cuvette des Josserands, au débouché de la Véore). Plus au nord, l'épaisseur moyenne est comprise entre 10 et 15 m. La perméabilité moyenne des alluvions est élevée (4 à  $6 \cdot 10^{-3}$  m/s).

Au confluent de la Drôme, le Rhône s'est étalé sur une largeur atteignant 6 km, les apports de la Drôme l'ayant refoulé progressivement vers l'ouest. Dans ce secteur, les sondages de la CNR ont traversé une épaisseur d'alluvions sablo-graveleuses de 9 à 18 m (même en un point 22 m).

Dans la vallée de l'Isère, ce sont des cailloutis polygéniques à galets alpins qui apparaissent dans les anciens méandres asséchés par les aménagements hydroélectriques. Il s'agit simplement d'alluvions grossières remaniées sur place et superficiellement par divagation et sapement latéral des terrasses Wurmiennes lors des petites crues. La plaine alluviale actuelle de l'Isère, entre Rhône et Herbasse, est constituée d'une couverture superficielle de limon de débordement gris sombre, de 0 à 3 m d'épaisseur, mais qui ravine une couche d'alluvions caillouto-sableuses d'épaisseur plus réduite que celle du Rhône (de 7 à 10 m seulement). Le substratum sous-jacent est formé par les argiles bleues pliocènes jusqu'à Beaumont-Montoux, remplacées plus à l'est (amont) par la molasse miocène qui affleure d'ailleurs au fond du lit de l'Isère à Châteauneuf-sur-Isère.

Les aménagements hydroélectriques ont fait disparaître partout le lit majeur du Rhône, celui de l'Isère n'apparaissant plus que dans le secteur compris entre Châteauneuf et la RN 7.

La carte géologique de Crest fait apparaître les anciens lits du Rhône (lônes), quand ils n'ont pas été détruits ou masqués par les travaux de la Compagnie nationale du Rhône. On peut constater que les limites communales suivent parfois des lits abandonnés (totalement ou partiellement), ce qui témoigne des déplacements du lit principal du Rhône pendant la période historique.

Concernant les encaissements géologiques, on observe une complexité certaine :

- ▶ Le Pliocène se rencontre donc sous l'actuelle vallée du Rhône, sauf dans la section entre Valence et Charmes (épigénie de Touloud) et forme deux diverticules sous la plaine de Valence, l'un en direction de Montélier, l'autre au sud de Malissard. En effet, un mouvement épigénique de soulèvement général, à la limite Miocène-Pliocène (phase rhodanienne), a provoqué l'enfoncement sur place du réseau hydrographique et le Rhône a creusé une profonde vallée de caractère épigénique entre Saint-Péray et Saint-Georges-les-Bains, taillée dans le granité de Tournon et sa couverture sédimentaire. Ce creusement atteint plusieurs centaines de mètres de profondeur. Rappelons qu'au début du Pliocène, un mouvement de subsidence généralisé a provoqué la transgression de la mer qui, remontant progressivement du sud, a envahi le réseau hydrographique précédemment formé. C'est ainsi que se sont accumulées d'épaisses séries d'argiles alternant parfois avec des silts et des sables. On retrouve ainsi des affleurements de ces argiles et sables dans toute la dépression de Saint-Péray—Saint-Georges-les-Bains, sous les alluvions rhodaniennes du Günz qui les ravinent.
- ▶ En rive droite, les terrains cristallins n'ont que de très faibles ressources en eaux souterraines donnant des émergences à très faible débit, fréquemment tarées en période de sécheresse.
- ▶ En rive gauche, les alluvions sont suralimentées par les séries aquifères du bassin de Valence. Le bassin de Valence correspond à une vaste accumulation de formations tertiaires (calcaires, marnes, molasse, sables et conglomérats). A l'Oligocène, une détente tectonique est-ouest provoque une fracturation méridienne dans la vallée du Rhône et l'individualisation puis l'affaissement du fossé subsident de Valence. Bien délimité latéralement, il a une quinzaine de kilomètres de large et une soixantaine de long dans le sens nord-sud. Il n'apparaît pas en surface mais ses bords abrupts, correspondant à des failles normales, ont été mis en évidence par la géophysique. A l'ouest, la limite du bassin suit exactement le Massif-Central, sous les alluvions actuelles du Rhône, tandis qu'à l'est elle se situe à quelque distance du front subalpin du Vercors. Le fond cristallin de la dépression se trouverait au minimum à 4 500 m de profondeur, le Tertiaire ayant à lui seul plus de 2 000 m d'épaisseur. Dessous, le Secondaire serait probablement complet. A noter que les séries tertiaires sont recouvertes par épandage alluvial généralisé sur tout le piedmont bas-dauphinois (plateaux de Chambaran-Bonnevaux), dans les vallées du Rhône, de l'Isère et de leurs affluents. Ainsi, les nappes des basses terrasses Wurmiennes, où circule une nappe continue, se raccordent finalement au niveau du Rhône par l'intermédiaire des alluvions récentes. Il n'y a pas de niveaux aquifères perchés, ce qui est un trait particulier à cette région. L'épaisseur de l'aquifère varie entre 5 et 10 mètres. La perméabilité moyenne se situe vers  $3,7 \cdot 10^{-3}$  m/s à Valence,  $2,3 \cdot 10^{-2}$  à  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s au sud de la ville. Ces alluvions sont elles-mêmes suralimentées par les sables mollassiques, qui présentent une certaine perméabilité ( $5 \cdot 10^{-6}$  à  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s, jusqu'à  $10^{-4}$  m/s pour certains niveaux plus grossiers, mais consolidés ou fissurés, très locaux).

### DEFILE DE ST VALLIER

L'actuelle plaine alluviale du Rhône, en pente douce (environ 5 %) de Saint Vallier au nord (+127 à 128 m) à la Roche-de-Glun au sud (117 à 118 m), est constituée d'une couche superficielle de limon sableux de débordement, épaisse de 0 à 4 m, qui ravine inégalement une couche d'alluvions caillouto-sableuse d'épaisseur variable comprise en moyenne entre 15 et 20 m, mais pouvant atteindre, à l'occasion de surcreusements locaux (mouilles), quelques 30 à 40 m (par exemple en face de Serves, au Sud de Vion, entre Tain et Tournon).

Le substratum raviné par les cailloutis est pour l'essentiel constitué par les argiles marines bleues du Pliocène, les granités et les gneiss localement et près des versants, dans la partie épigénique de la vallée au nord de Tain, notamment à Serves, Vion et du pont de Crozes à la Table du Roi.

En rive gauche et en rive droite, la plaine alluviale est limitée par les reliefs composés de roche de socle, réputées peu perméables.

La perméabilité moyenne est estimée à  $6.10^{-3}$  m/s.

### BAS DAUPHINE

Sur son tracé depuis Condrieu jusqu'à Andancette, le Rhône présente une configuration particulière avec en rive droite les roches de socle du Massif Central et en rive gauche un contact très étendu avec les séries fluvio-glaciaires du Bas Dauphiné.

La vallée du Rhône est tapissée par des alluvions modernes sablo-caillouteuses et polygéniques. Leur surface est irrégulière, elle porte la trace des anciens bras du fleuve. Un limon de débordement argilo-sableux, plus ou moins micacé, forme une couverture superficielle discontinue. L'épaisseur des alluvions rhodaniennes est d'environ une vingtaine de mètres. Il est possible que la partie la plus profonde des alluvions corresponde à un matériel glaciaire simplement remanié par les eaux courantes. Le substratum est le Pliocène ou le socle cristallophyllien.

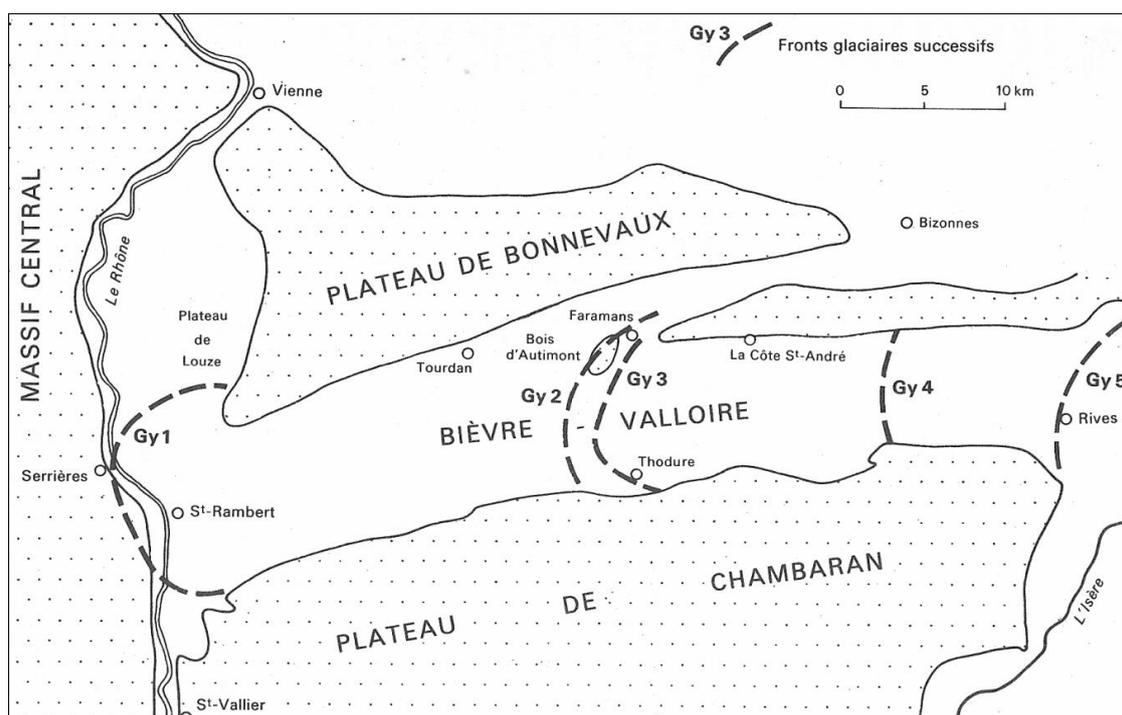
Les principales ressources aquifères sont celles des formations quaternaires du couloir rhodanien et de la Bièvre-Valloire.

Les alluvions fluviales modernes et Wurmiennes constituent, de part et d'autre du fleuve, les formations aquifères les mieux connues et les plus exploitées. Leur épaisseur est de l'ordre de 20 à 30 m, pouvant atteindre 40 à 50 m, à la verticale des terrasses Wurmiennes. Les alluvions reposent sur les argiles pliocènes ou localement sur le socle granitique (rive droite du Rhône) ; leur perméabilité moyenne est de  $10^{-3}$  m/s. La nappe est alimentée par le Rhône et par les versants, selon les secteurs et les périodes de crue ou d'étiage considérés. Ainsi, en rive gauche, du Péage-de-Roussillon aux Sablons, l'action des pompes industrielles (débit 6000 m<sup>3</sup>/h) crée un puissant cône de dépression du toit de la nappe, dont l'alimentation est assurée à la fois par le Rhône (principalement) et par les terrasses fluvio-glaciaires.

Entre Chanas et Saint-Rambert-d'Albon, l'apport de la nappe de la Bièvre-Valloire oriente le courant de la nappe vers le fleuve, tant en étiage qu'en crue. En rive droite du Rhône, de Limony à Peyraud, la nappe est alimentée en toute période, simultanément par le fleuve et le versant, puis par le Rhône jusqu'à Andance. Au sud d'Andance et d'Andancette, l'alimentation de la nappe se fait en étiage (par les petits cônes torrentiels de la rive droite ou par les terrasses, rive gauche. En période de hautes eaux, le Rhône recharge la nappe : son influence efface celle des versants.

La Bièvre-Valloire, large vallée d'origine glaciaire, possède un réseau hydrographique sous-dimensionné par rapport à la superficie de son bassin versant. Il en résulte une prédominance des écoulements souterrains sur ceux de surface, due à l'importance des infiltrations. En étiage, les rivières sont alimentées par des émergences de la nappe, telles l'Oron, la Veuze, l'Argentelle et le Dolon. Ces rivières se réinfiltrent rapidement ; seules les fortes crues traversent la basse Valloire par les exutoires du Dolon, des Collières et de l'Argentelle.

Figure 4 : Fronts glaciaires en Bièvre-Valloire (Chenevoy et al., 1976)



Les alluvions fluvio-glaciaires de cette vallée sont disposées en terrasses d'épaisseur comprise entre 30 et 50 m pour les formations FGy4 et FGy2 et de 15 à 30 m pour celles de FGys passant à 30-50 m à l'Ouest de Coinaud. La perméabilité de l'aquifère est en moyenne de  $10^{-3}$  m/s pouvant atteindre localement  $10^{-2}$  m/s. La nappe s'écoule vers l'ouest en direction du Rhône qui en constitue son niveau de base, soit directement, soit par la nappe des alluvions modernes. Elle est sub-affleurante dans le secteur de Manthes ; elle s'approfondit régulièrement vers l'ouest pour atteindre 15 m au droit d'Anneyron, et 30 à 35 m au sud de Saint-Rambert.

Les infiltrations des eaux de surface déterminent des variations du niveau piézométrique de 3 à 5 m, pouvant atteindre 10 m entre Manthes et Anneyron. Ces fluctuations s'atténuent près des zones d'émergence et du Rhône. Les sources issues de cet aquifère ont des débits élevés ; sources de Manthes : 300 l/s ; du moulin de Golley à Chanas : 100 l/s et de l'Argentelle à Anneyron : 20 l/s (débits d'étiage).

Une récente étude piézométrique de l'aquifère démontre que les couloirs fluvio-glaciaires insérés dans le Miocène drainent la nappe de la molasse. Les sources issues de cette formation sont souvent de faible débit, mais pérennes.

### DEFILE DE VIENNE

De Pierre-Bénite jusqu'à Serrières, le système alluvial du Rhône est posé sur des roches de socle, en rive droite comme en rive gauche. Dans le secteur de Roussillon, le socle est masqué par des dépôts morainiques d'une vingtaine de mètres d'épaisseur, sur le plateau de Louze qui présente des altitudes supérieures d'environ 100 mètres par rapport à la plaine alluviale.

La vallée du Rhône est tapissée par des alluvions modernes sablo-caillouteuses et polygéniques. La surface est irrégulière, elle porte la trace des anciens bras du fleuve. Un limon de débordement argilo-sableux, plus ou moins micacé, forme une couverture superficielle, discontinue. L'épaisseur des alluvions rhodaniennes est d'environ une vingtaine de mètres. L'épaisseur des alluvions rhodaniennes est de 21 m à Saint-Fons pour atteindre graduellement 35 m vers Givors. Il est possible qu'une partie des alluvions, la plus profonde, corresponde à un matériel glaciaire simplement remanié par les eaux courantes.

Le substratum des alluvions est le Pliocène ou le socle cristallophyllien. Celui-ci peut même affleurer dans le lit du fleuve (Saint-Alban).

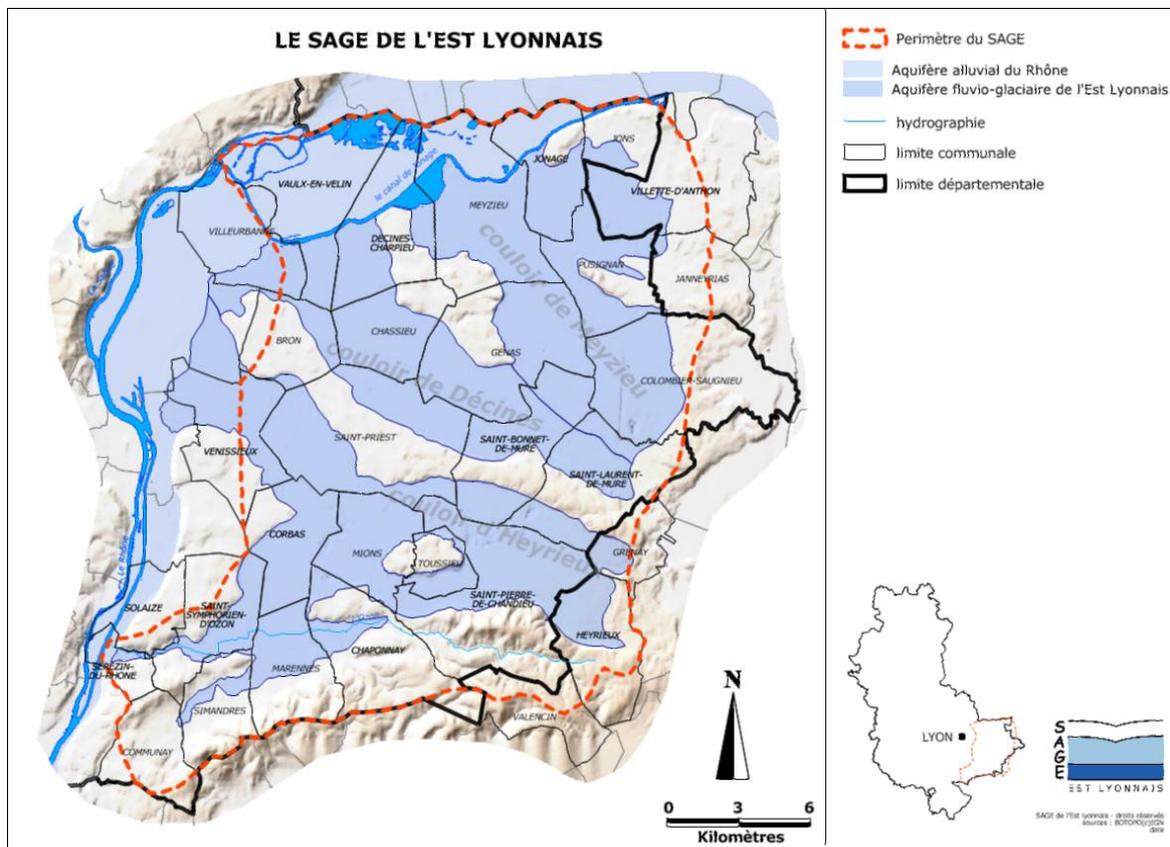
A noter des particularités locales : à Givors et à Sérezin, on observe le raccordement de deux nappes fluvioglacières de petite dimension à la nappe alluviale du Rhône.

### 1.1.1.4 Haut Rhône

#### SYSTEME DE L'EST LYONNAIS

Entre Pierre Bénite et Vertrieu, le Rhône se trouve dans une configuration particulière. En rive droite, le système alluvial est au contact des séries molassiques du Miocène (argiles et sables, marnes et conglomérats) de Pierre-Bénite à Jonage ; plus à l'Est de Jonage, le système Rhône est suralimenté par deux couloirs fluvioglaciers (couloir de la Valbonne et couloir de Blyes) et par la nappe alluviale de l'Ain. En rive gauche, le système alluvial est suralimenté par les nappes fluvioglacières dites de l'Est Lyonnais.

Figure 5 : Systèmes fluvioglaciers de l'Est Lyonnais

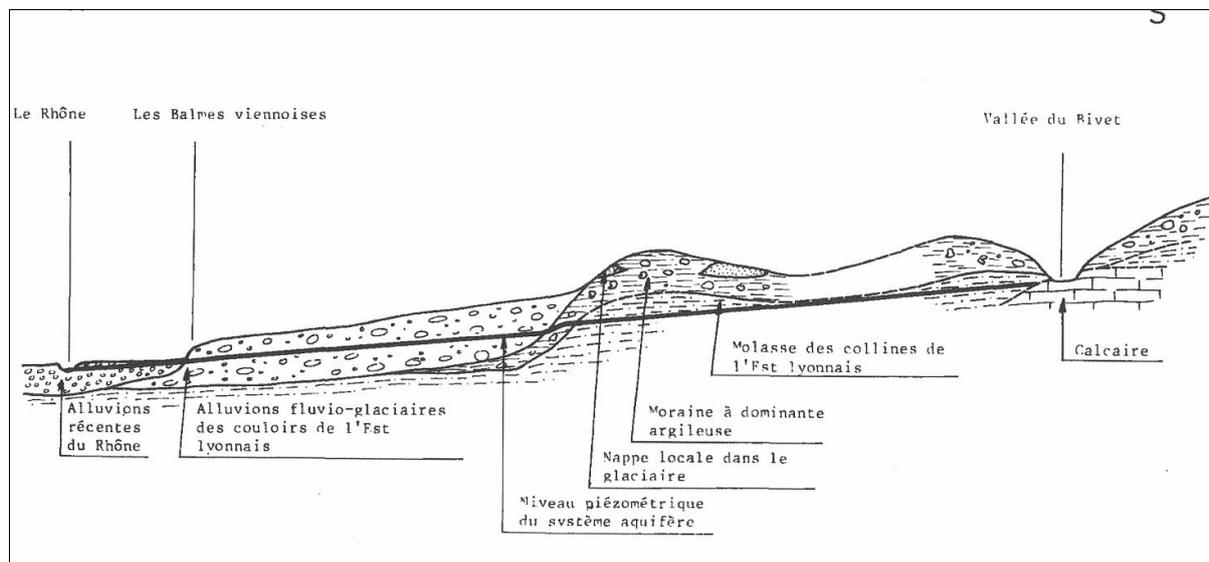


Collin et al. (1973), propose une description détaillée du système de l'Est Lyonnais. La composition de ces nappes alluviales est toujours la même :

- ▶ à la base, au fond de la vallée, des dépôts glaciaires, moraines de faciès argileux dominant avec blocs erratiques, datant de la phase immédiatement antérieure ;
- ▶ au-dessus, des dépôts liés au complexe glaciaire, de faciès très irrégulier en fonction des avancées et reculs successifs du front glaciaire : moraines de tous faciès, glacio-lacustre, fluvioglacière, etc. ;
- ▶ au sommet, en surface de la plaine, le caractère fluvioglacière s'accroît : les eaux de fusion ont lessivé la partie supérieure des dépôts puis, à mesure que le glacier s'éloignait, elles ont apporté et étalé des alluvions fluvioglacières de plus en plus distales.

La disposition relative des formations aquifères est bien représentée par la figure ci-dessous.

Figure 6 : Schéma du système aquifère de l'Est Lyonnais (Collin et al., 1973)



A noter que les alluvions fluvioglaciales sont globalement plus perméables que les alluvions modernes (deux fois plus environ) et que la molasse a une perméabilité assez forte (30 fois plus faible que celles des alluvions modernes).

Figure 7 : Perméabilités des séries aquifères de l'Est Lyonnais (Collin et al., 1973)

Formation	Fourchette	valeur moyenne
Molasse	$1 \cdot 10^{-4}$ à $2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Glaciaire	$10^{-5}$ à $10^{-3}$	
Fluvio-glaciaire	$2 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Alluv. modernes	$2 \cdot 10^{-3}$ à $1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$

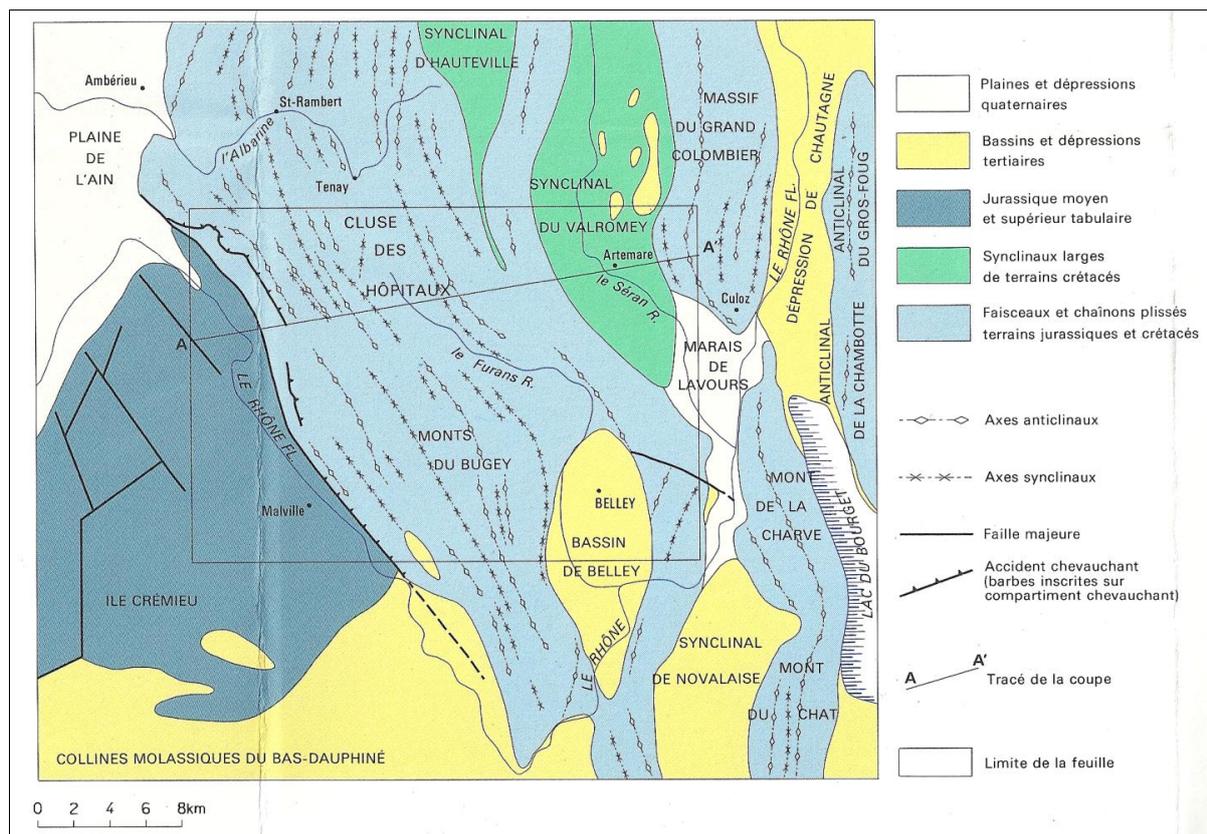
Dans ce secteur, la vaste plaine alluviale rhodanienne recèle une nappe particulièrement importante puisqu'elle est alimentée latéralement par le plateau dombiste et par tous les couloirs en plus de sa propre alimentation longitudinale par la pluie et le fleuve. Si jadis elle conditionna directement l'essor de la ville de Lyon, elle reste sollicitée par de nombreuses industries et fut ou reste exploitée pour l'eau potable de la Communauté urbaine.

Selon Nicolas et al. (2004), l'épaisseur moyenne des alluvions modernes du Rhône dans la région lyonnaise est de l'ordre de 20 m. Leur travail de reconstitution de la géométrie des réservoirs montre que cette épaisseur est relativement variable et que l'on observe localement des surcreusements avec 50 mètres d'alluvions.

## LA ZONE JURASSIENNE

A partir de Vertrieu et jusqu'à la frontière suisse, le Rhône parcourt un territoire marqué par une géologie complexe, caractéristique des pays montagneux. Il traverse d'abord un vaste ensemble carbonaté qui correspond au plateau tabulaire subhorizontal de l'île Crémieu (altitude moyenne de 250 m NGF), puis les reliefs formés par les formations crétacées et jurassiques du Jura, intensément faillées et plissées (monts du Bugey). Sur son parcours, l'appareil alluvial va être en contact avec de vastes dépressions quaternaires, liées à la dynamique érosive à l'oeuvre durant les dernières glaciations et avec les grands bassins mollassiques miocènes.

Figure 8 : Schéma structural de la zone jurassienne (d'après Kerrien et al., 1990).



Tout le territoire a été recouvert par le glacier du Rhône qui, progressivement d'est en ouest, s'est étendu au-delà des moraines internes de Lagnieu jusqu'en bordure du plateau dombois. Il a exercé une puissante érosion, marquée surtout par de profonds surcreusements sous le marais de Lavours mais surtout dans la vallée du Rhône où le fond du bassin de Malville est au voisinage du zéro NGF, 200 m ou plus sous le niveau du fleuve. C'est aussi l'érosion sous-glaciaire qui a creusé le système des couloirs de la dépression de Belley, par un courant de sens nord-sud. Le glacier a aussi engendré de nombreux dépôts : moraines sur les reliefs où s'individualisent plusieurs systèmes frontaux secondaires, fort empatement des dépressions latérales préexistantes ; alluvions glacio-lacustres latérales et de fond de vallée, alluvions fluvio-glaciaires de retrait accompagnant la déglaciation. Ces vallées ont subi ensuite l'action fluviale et torrentielle dont on peut distinguer deux épisodes principaux, notamment dans la vallée du Rhône : un épisode ancien, probablement fini-wurmien, qui se manifeste sous la forme d'une basse terrasse et un épisode plus récent, représenté par la plaine alluviale du Rhône et les fonds des vallées. Enfin l'ensemble est parsemé de nombreux petits lacs et tourbières, situés dans des dépressions fermées dont l'origine est soit un surcreusement, soit une fusion de loupes de glace morte en milieu alluvial.

Les formations carbonatées du Jurassique sont aquifères et il peut y avoir localement suralimentation des alluvions du Rhône par ces formations. Ces formations karstiques sont caractérisées par des réseaux noyés profonds, difficiles à explorer. Les karsts sont réputés très compartimentés.

Les séries hétérogènes des bassins mollassiques miocènes peuvent aussi être aquifères :

- ▶ La partie nord du bassin mollassique du Bas-Dauphiné correspond à une vaste accumulation d'abord, sédimentaire terrigène, détritique sableuse, puis marine à l'Helvétien, puis finalement de nouveau détritique avec un comblement par les produits d'érosion des reliefs alpins. Les séries au contact des alluvions modernes sont principalement sableuses. Les épaisseurs cumulées sont de plusieurs centaines de mètres. Comme la perméabilité de la molasse est très variable, car la lithologie des bancs successifs n'est pas homogène, on peut avoir plusieurs niveaux de sources sur une même verticale.
- ▶ Dans le bassin de Belley, le remplissage miocène prend un développement considérable (plus de 100 mètres d'épaisseur). Le conglomérat à gros blocs grossièrement arrondis et perforés repose sur la surface irrégulière des calcaires urgoniens, eux-mêmes taraudés par des organismes lithophages. Localement, on voit une matrice grésoglaucconieuse cimenter le conglomérat. La suite de la série miocène est principalement constituée par un sable mollassique blond, micacé, à îlots grésifiés, englobant localement des galets mous.
- ▶ Dans la dépression de Chautagne, le Miocène est décrit comme une molasse gris verdâtre ou gris bleu. Parfois oxydée sur une grande épaisseur, elle prend alors une teinte jaune-ocre. C'est un grès glaucconieux à ciment calcaire avec de rares intercalations calcaires.

Le lit majeur du Rhône forme une plaine alluviale de largeur très variable, quelques mètres au-dessus du lit mineur encaissé d'où n'émergent que quelques îles, localement recreusée par des méandres fossiles.

Au passage de l'île Crémieu, la nappe d'alluvions s'élargit dans la zone des méandres entre Bouvesse et Villebois, où elle est épaisse de 10 à 25 m et repose sur des sables miocènes. Plus à l'amont les nombreux sondages CNR montrent, sur les argiles et sables glacio-lacustres du bassin de Malville, deux couches successives :

- ▶ des graviers à la base, ravinant les dépôts lacustres sous-jacents sur plusieurs mètres, qui présentent une épaisseur très irrégulière due à la chenalisation (1 à plus de 10 m) ;
- ▶ des limons superficiels plus ou moins sableux, dépôts de débordement, d'épaisseur également irrégulière pour les mêmes raisons (1 à 6 m).

Dans le secteur de Brégnier-Cordon, les alluvions comportent des galets, des sables, mais aussi des lentilles d'argile et des limons à tourbes. Ces alluvions sont entièrement fraîches, non altérées. En surface elles peuvent comporter quelques décimètres de limon qui supportent un sol grisâtre, mais pas d'altération brune.

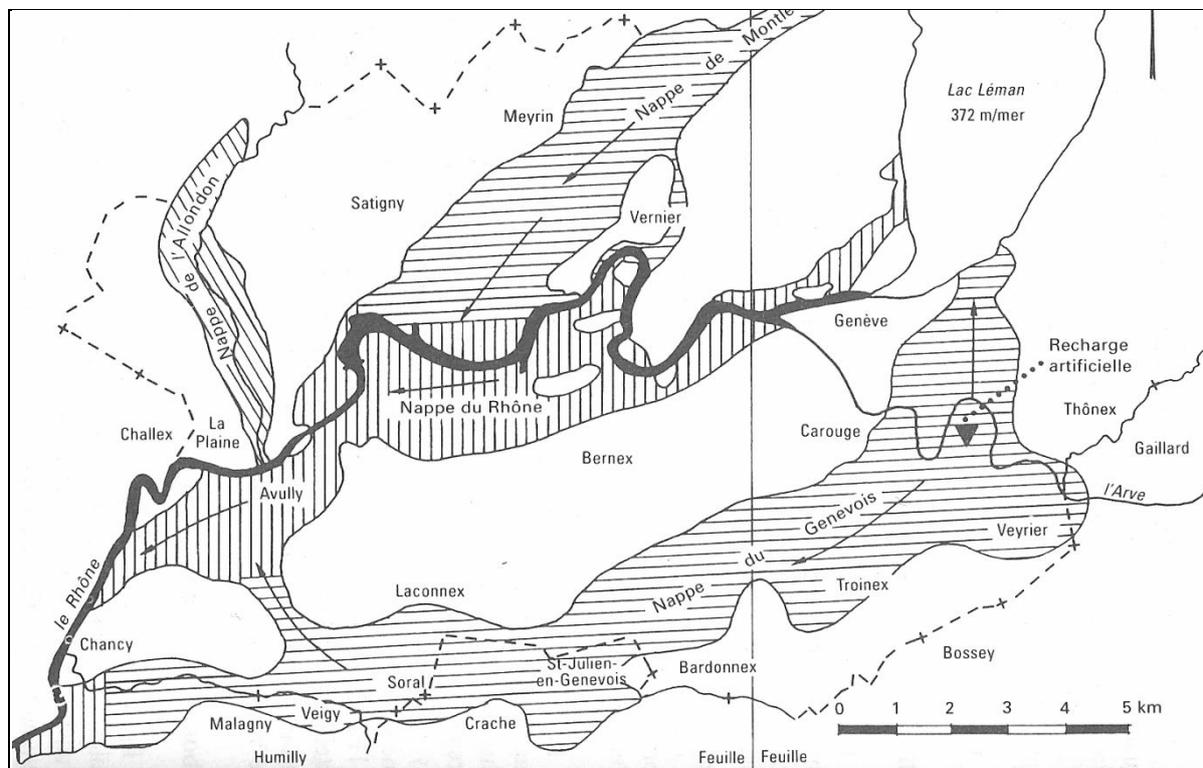
Plus à l'amont, dans les dépressions de Belley et de Chautagne, les descriptions des alluvions sont lacunaires : pas de description précise des faciès, pas d'épaisseurs pour ces accumulations sédimentaires. Gidon (1970) donne cependant des informations utiles sur le comportement hydrogéologique des alluvions : les alluvions du Rhône, en Chautagne où se prolongeait autrefois le lac du Bourget, en Lavours et dans la région de Cressin où les pentes étaient très faibles, sont recouvertes d'argiles tourbeuses post-glaciaires, imperméables, qui donnent naissance à de vastes marais. L'imperméabilité de ces formations superficielles permet la mise en charge des nappes aquifères de la vallée du Rhône en Chautagne, avec production, à la limite des formations argileuses et des éboulis des pentes ou des formations glaciaires, de grosses sources ascendantes. Des sondages exécutés pour la Compagnie du Rhône entre Chindrieux et Serrières-en-Chautagne ont permis de constater des venues artésiennes débitant à 3 à 4 m au-dessus de la surface du sol.

A noter que localement les alluvions modernes du Rhône reposent sur de fortes accumulations sédimentaires quaternaires. En effet, des lacs de dimensions très variables ont accompagné les deux extensions glaciaires Würmiennes et leur retrait. Ces lacs se situaient soit en bordure du glacier contre les versants montagneux, soit dans des surcreusements (bassins de Malville, du Bourget), soit entre des masses de glace morte abandonnées dans les vallées par le glacier en récession (bassin de Belley). Les faciès sont variables selon les dimensions du dépôt (extension et profondeur du lac) et la proximité des apports (torrents locaux, affluents fluvio-glaciaires, glacier). Ils passent d'argiles et silts lités de fond à des sables et graviers deltaïques puis à des cailloutis à blocs de surface, de composition pétrographique dépendant des apports.

Citons comme fortes accumulations de sédiments palustres :

- ▶ La dépression de Maville (plus de 200 m de sédiments à dominante argileuse et limoneuse) ;
- ▶ Les marais de Lavours, spatialement très étendus, qui correspondent à un diverticule de la plaine marécageuse de Chautagne (plus de 30 m de sédiments lacustres à palustres).

Figure 9 : Schéma hydrogéologique de la plaine genevoise (d'après Donzeau et al., 1997).



Plus à l'amont, dans le bassin genevois, l'extension des nappes souterraines principales est dictée par la morphologie du toit de la molasse à la fin du Tertiaire. En particulier, les nappes d'eau sont contrôlées par la géométrie des sillons : les anciens talwegs peuvent atteindre la cote 300 m. Les nappes ont des axes SW-NE sauf celle de l'Allondon qui est NW-SE.

Dans la topographie, les sillons sont peu marqués, étant presque entièrement comblés par les formations glaciaires quaternaires. Les aquifères les plus productifs sont des graviers sableux à lentilles de sable, limons et argiles à blocs. Localement, ils comportent des niveaux à ciment de calcite donnant des bancs de poudingues. La perméabilité de Darcy est ainsi très variable : en moyenne elle s'élève à  $1-2 \cdot 10^{-3}$  m/s mais peut atteindre  $5 \cdot 10^{-7}$  à  $3 \cdot 10^{-2}$  m/s.

## 1.1.2 Données issues de la BD LISA

La BD LISA est la base de données des limites des systèmes aquifères réalisée par le BRGM à plusieurs échelles de caractérisation. L'ensemble des entités hydrogéologiques à précision régionale constitue un travail de sectorisation hydrogéologique, référentiel de base à utiliser dans le cadre de la mission. Des fiches descriptives souvent accompagnées de coupes géologiques et des références utilisées apportent des informations telles que la structure du réservoir et les paramètres hydrodynamiques de l'entité concernée.

Les documents associés à chaque entité sont en général : une fiche descriptive (comprenant souvent une ou plusieurs coupes géologiques et un log stratigraphique), un extrait de la carte géologique correspondant au secteur (1 :50 000), un extrait de carte IGN au 1 :25 000 reportant un instantané piézométrique, une carte du mur des alluvions et une carte du toit des alluvions.

La fiche descriptive présente le contexte géographique et géomorphologique ainsi que la géologie. L'entité hydrogéologique est ensuite décrite plus en détail.

Des informations quantitatives sont reportées.

*Par exemple, pour la plaine de Donzère Mondragon :*

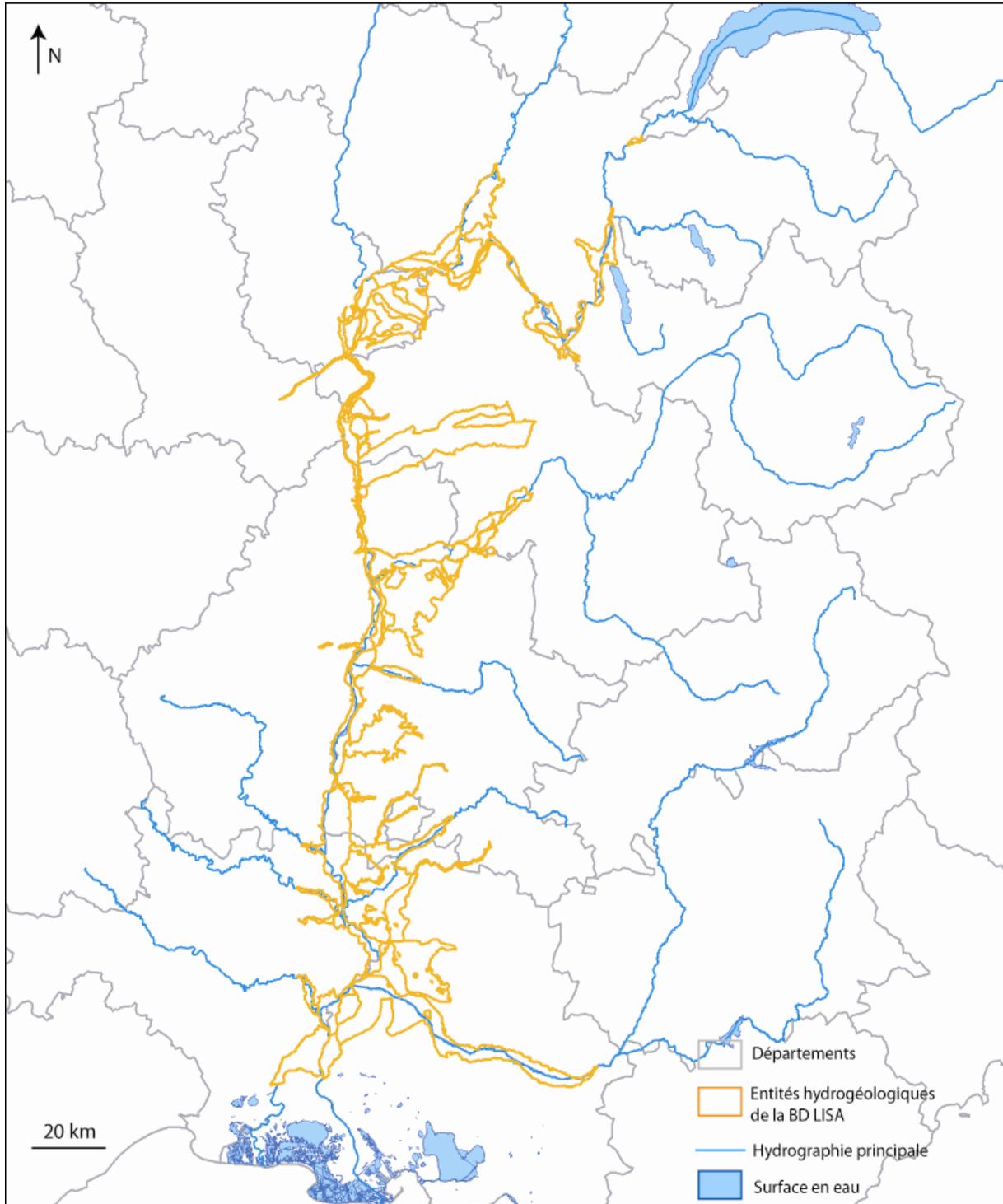
- ▶ Des données moyennes de perméabilité du réservoir sectorisées en zones, comme par exemple les alluvions en rive droite du Rhône qui ont une perméabilité de  $1.10^{-3}$  m/s sauf dans les niveaux plus grossiers où ce paramètre atteint  $3.10^{-3}$  m/s ;
- ▶ Des données d'épaisseur du réservoir reportées également suivant ces différentes zones géographiques, les alluvions en rive droite du Rhône atteignant par exemple 30 m vers Donzère ;
- ▶ Des données d'épaisseur de la couche limoneuse sus-jacente (globalement de 1 à 3 m par exemple au niveau des alluvions en rive droite) ;
- ▶ Un tableau résumant certains paramètres hydrodynamiques comme une moyenne de transmissivité pour l'entité, une profondeur de l'eau moyenne, une épaisseur mouillée, et parfois des données de porosité (ce n'est pas le cas de cette entité) ;
- ▶ Des données concernant les prélèvements pour l'AEP (exemple du captage de Donzère avec  $0,564 \text{ Mm}^3/\text{an}$ ).

En ce qui concerne les données piézométriques, les données SIG (couche « Isopièzes ») sont disponibles pour ce secteur et correspondent bien à la piézométrie reportée sur fond IGN. La couche SIG possède un attribut indiquant la date de réalisation de la campagne piézométrique ayant abouti à la création de cette carte.

De la même façon, les données « documentaires » et SIG sur le mur et le toit des alluvions sont concordantes.

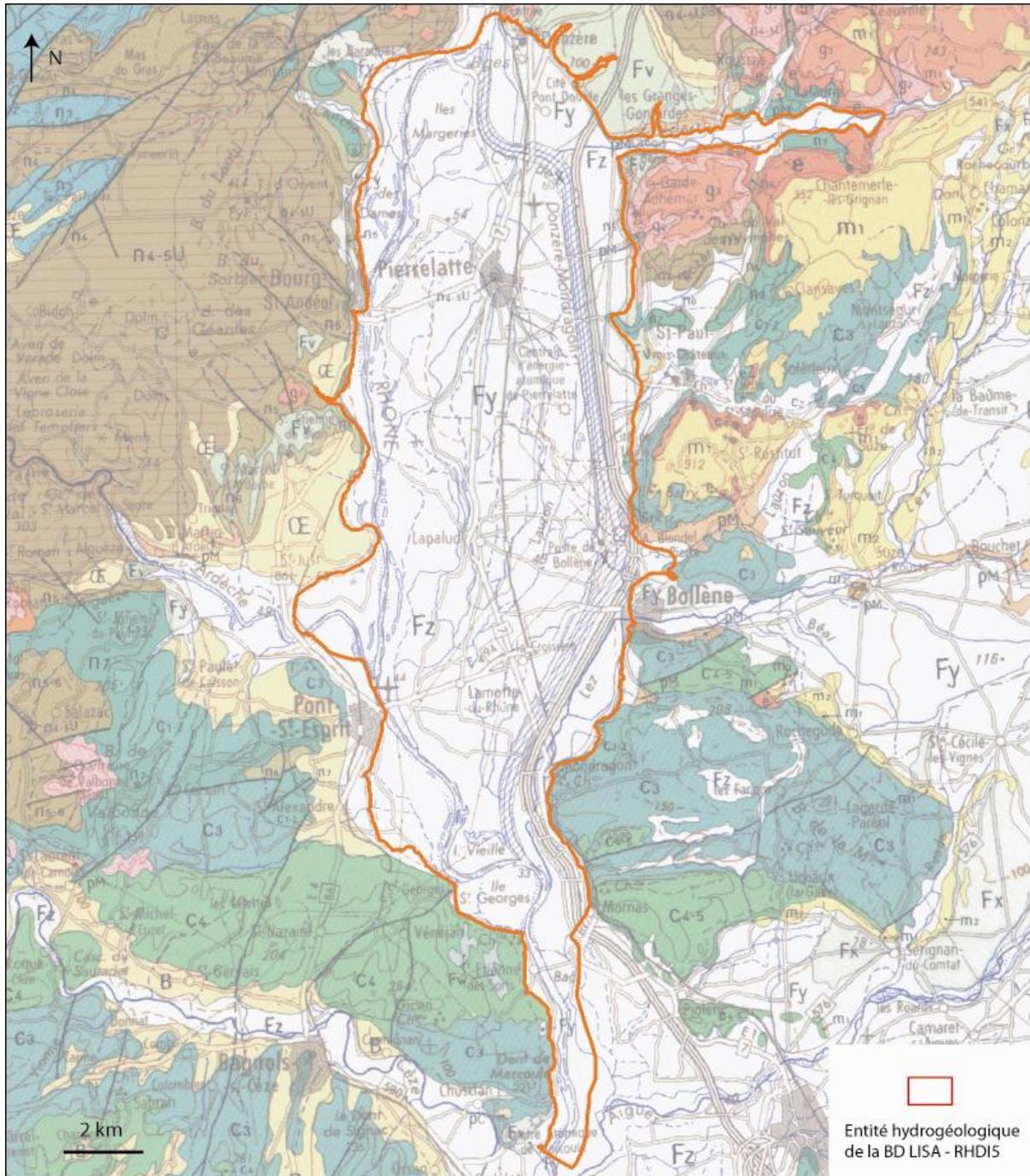
En ce qui concerne toutes les entités correspondant aux alluvions du Rhône et de ses principaux affluents, certains documents et données viennent à manquer. C'est le cas des secteurs suivants : les alluvions situées entre la Camargue et Caderousse (région PACA) (données sur le mur et le toit des alluvions manquantes, isopièzes sans valeurs de niveau piézométrique), les secteurs de Saulce-sur-Rhône, St-Vallier et de Chasse-sur-Rhône pauvres en informations et correspondant à des zones de couloirs alluviaux étroits.

Figure 10 : Ensemble des entités hydrogéologiques de la BD LISA correspondant à la nappe alluviale globale du Rhône et aux plaines alluviales latérales participant au fonctionnement des alluvions principaux du Rhône.



Si nous prenons comme exemple la plaine de Pierrelatte (figure suivante), cette dernière correspond à l'entité hydrogéologique des « Alluvions de la vallée du Rhône de Viviers à Mornas » (code : RHD15)

Figure 11 : Exemple de l'entité hydrogéologique sur la plaine de Pierrelatte « Alluvions de la vallée du Rhône de Viviers à Mornas »



La BD LISA nous permet donc de parcourir un panel d'informations complètes souvent généralisées (données quantitatives moyennées) mais qui pourront être utilisés par la suite :

- ▶ Informations géologiques (limites du réservoir aquifère, nature du substratum...);
- ▶ Données d'épaisseur des alluvions et de la couche limoneuse sus-jacente ;
- ▶ Paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité) ;
- ▶ Données de prélèvements pour l'AEP.

Les informations délivrées par la BD Lisa donnent donc une bonne description hydrogéologique permettant d'avoir un support de base à la compréhension des réservoirs alluviaux et à leur future sectorisation dans le cadre de la mission.

### 1.1.3 Données relatives aux zones stratégiques pour l'AEP

Ce zonage est issu du travail réalisé pour l'Agence de l'eau RM&C, par le groupement SAFEGE, Antea et Sepia Conseil (2010) : « Nappe alluviale du Rhône, Identification et protection des ressources en eau souterraine majeures pour l'alimentation en eau potable. »

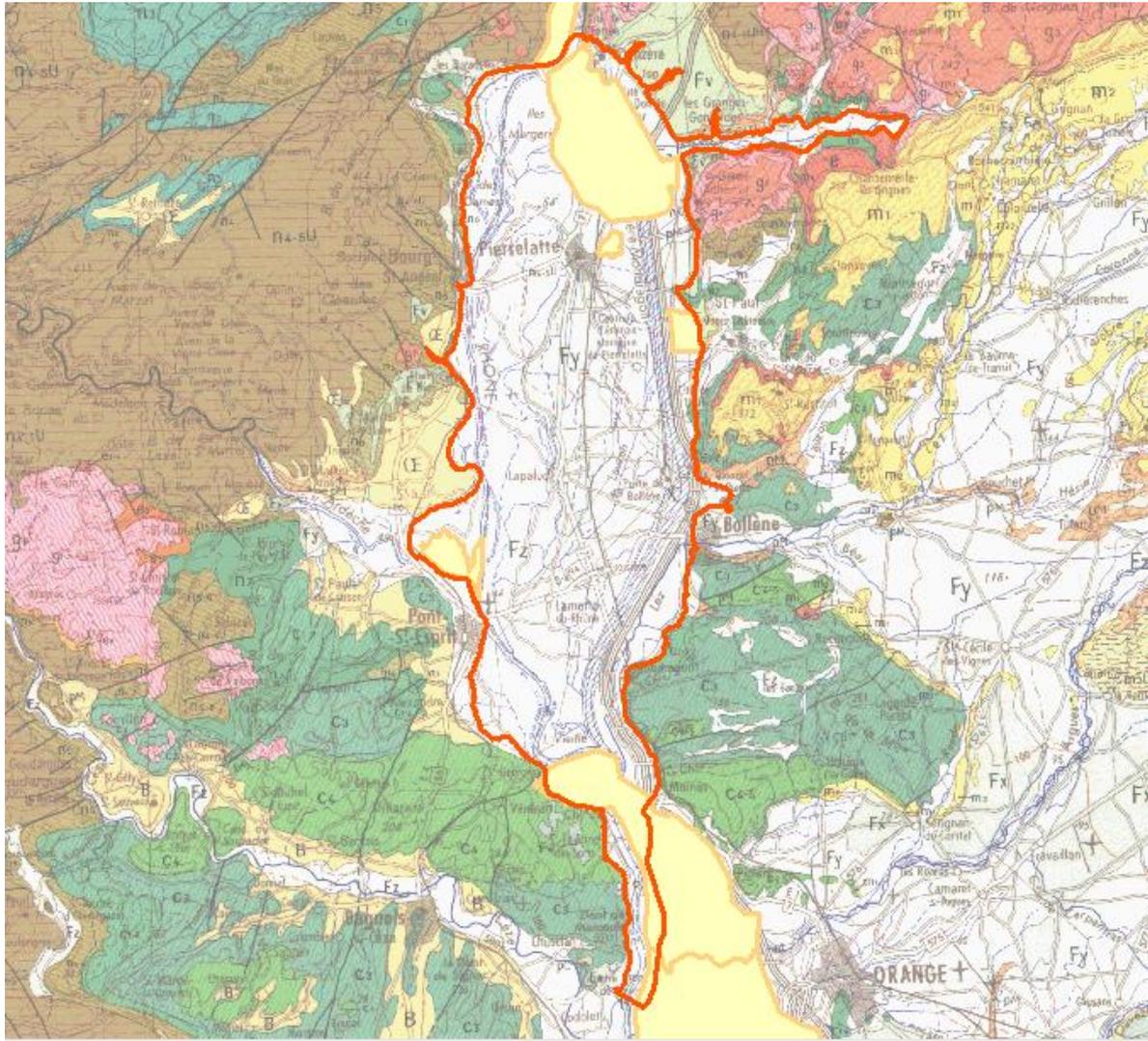
44 zones associées à la nappe alluviale globale du Rhône existent à ce jour, la table SIG comprenant un numéro d'identification et un nom. Le Volume 2 du rapport cité ci-dessus (Fiches descriptives des zones majeures identifiées et cartes de localisation, annexes) est un descriptif de toutes ces zones.

Comme nous le verrons plus loin dans la synthèse des données bibliographiques, des informations sur les paramètres hydrodynamiques ont été reportées pour chacune de ces zones jugées d'intérêt stratégique. Malheureusement, ces données issues de différentes sources ne sont pas référencées et peu de données d'épaisseur sont reportées.

*Par exemple, la plaine de Pierrelatte correspond à cinq zones stratégiques (figure suivante) : la plus amont se nomme par exemple « Plaine de Pierrelatte » (n°26f). la fiche descriptive de cette dernière permet d'obtenir plusieurs informations d'ordre hydrogéologique : le contexte géologique, des paramètres hydrodynamiques (perméabilité de  $1,2 \cdot 10^{-2}$  à  $7 \cdot 10^{-3}$  m/s, transmissivité de  $2 \cdot 10^{-1}$  à  $2 \cdot 10^{-2}$ , porosité à 15%), une épaisseur de tranche d'eau (8 à 15 m). Enfin, des précisions sur l'état des prélèvements dans la zone aquifère indiquent des valeurs mais sont souvent incomplètes (le prélèvement au niveau du captage de Donzère est par exemple absent).*

Ces informations reportées pour chacune des 44 zones sont concordantes avec les descriptifs hydrogéologiques de la BD LISA et leur sont parfois complémentaires. Cependant, elles sont généralement plus « succinctes ».

Figure 12 : Zones stratégiques (en jaune) correspondant à l'entité hydrogéologique (BD LISA, en rouge) de la plaine alluviale de Pierrelatte



### 1.1.4 Données issues des synthèses départementales

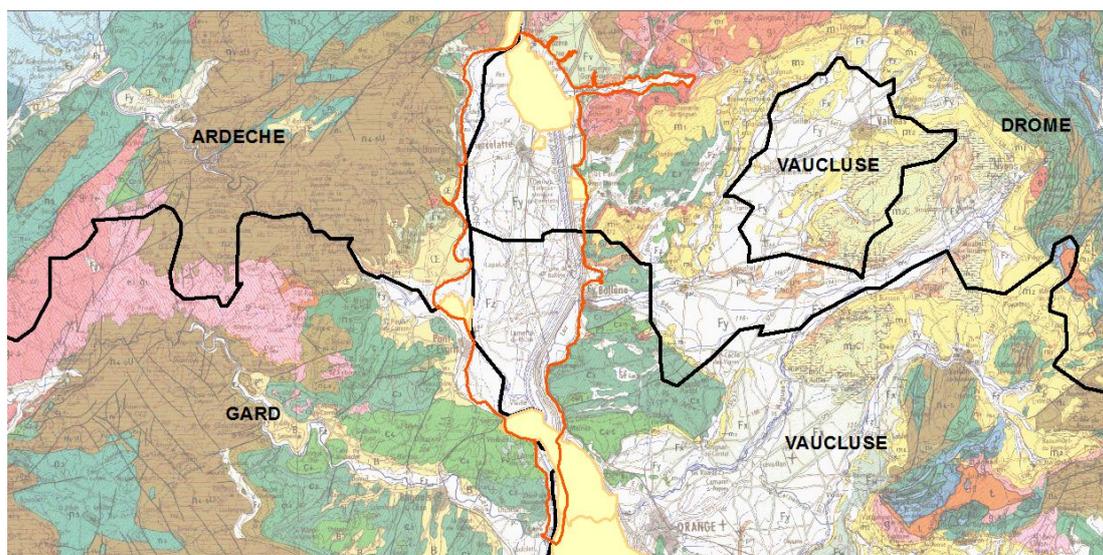
Dans la région Rhône-Alpes, la Direction régionale de l'environnement (DIREN) avait entrepris un travail de synthèse important qui s'est concrétisé par la définition de synthèses hydrogéologiques départementales. Elles concernent l'Isère, l'Ardèche (1984), le Rhône (1994) et la Drôme (2001).

Notons que les départements du Gard (Languedoc-Roussillon), du Vaucluse et des Bouches-du-Rhône (Provence-Alpes-Côte d'Azur), dans lesquels le Rhône s'écoule, ne présentent pas de synthèse de ce type.

C'est une source importante d'informations sur la géométrie et les paramètres hydrodynamiques des séries aquifères.

*Si nous reprenons l'exemple de la plaine de Pierrelatte, elle recouvre différents départements (figure suivante) : le Gard, l'Ardèche et principalement la Drôme et le Vaucluse. L'aquifère n°5 de la synthèse départementale de la Drôme « Plaine de Pierrelatte-Tricastin » correspond par exemple à la moitié amont de l'entité BD LISA. Les données piézométriques qui y sont renseignées sont moins précises que les données précédemment décrites (données SIG et reportées sur papier IGN pour la BD LISA) ; les sens d'écoulement et les niveaux piézométriques sont cependant concordants avec les précédentes données. Des données d'épaisseur sont renseignées (les sables et graviers ont une épaisseur maximum de 15 m surmontés de 2 à 6 m de limons).*

Figure 13 : Localisation de la plaine de Pierrelatte (avec son entité BD LISA en rouge) appartenant à 4 départements.



Il s'avère que la majorité des limites des aquifères de ces synthèses départementales concordent bien avec la base de données BD LISA. Le descriptif des aquifères est également bien renseigné, avec des informations pouvant être complémentaires à la BD LISA, mais reste cependant peu précis (souvent peu de données sur les paramètres hydrodynamiques).

### 1.1.5 Données issues des synthèses régionales

Le BRGM a édité en 1982 une synthèse régionale qui concerne seulement la région Rhône-Alpes comprenant les départements de l'Ardèche (07), la Drôme (26), la Loire (42), l'Isère (38), le Rhône (69), l'Ain (01), la Savoie (73) et la Haute-Savoie (74).

Notons que les départements du Gard (Languedoc-Roussillon), du Vaucluse et des Bouches-du-Rhône (PACA), dans lesquels le Rhône s'écoule, ne présente pas de synthèse de ce type.

La synthèse s'organise en un découpage des différents aquifères rencontrés sur la région. Ces derniers sont associés à un code et une fiche descriptive présentant des données structurales, les caractéristiques du réservoir, l'exploitation du réservoir et des « termes du bilan hydrogéologique ».

Des cartes papier permettent de localiser ces aquifères mais au vu de la petite échelle et de la qualité du document, la visibilité est pauvre (carte globale et zooms peu lisibles) et un report sur SIG n'est pas possible du fait du manque de précision que cela engendrerait.

Pour un aquifère, les données structurales permettent d'avoir des informations sur le type d'écoulement du milieu (poreux par exemple), la nature du réservoir, du substratum, les conditions aux limites du réservoir, des données quantitatives moyennes sur la porosité, l'épaisseur mouillée et la réserve. La partie « exploitation du réservoir » donne des informations sur la perméabilité, la profondeur de l'eau, la fluctuation de la nappe, sa vulnérabilité, une appréciation de la perméabilité et de la couverture locale de limons. Un bilan est finalement proposé pour appréhender l'état de la réserve.

Les données quantitatives sont finalement peu ou pas explicitées et non référencées.

L'échelle d'étude de cette synthèse ne se prête pas également aux objectifs de la mission, elle permet néanmoins de confirmer ou d'infirmer certaines données plus locales issues des synthèses départementales et de la BD LISA. Le dernier inconvénient est le manque de données sur certains départements concernés par l'étude.

### 1.1.6 Données sur la piézométrie

Les données disponibles sur la piézométrie sont issues de différentes sources :

- ▶ Des données SIG et documentaires (report sur papier avec un fond topographique) de la BD LISA de campagnes piézométriques ;
- ▶ Données plus « lissées » issues des synthèses départementales.

Ces deux sources d'informations sont globalement concordantes et constituent une base de données générale et utile à la compréhension de l'état des nappes alluviales.

La construction d'ouvrages sur le Rhône par la Compagnie Nationale du Rhône est systématiquement associée à une étude sur l'état de la piézométrie. Perturbant les conditions aux limites de la nappe alluviale, ce type d'informations serait intéressant à exploiter. Ces données très localisées et donc très précises ne sont cependant pas disponibles car non diffusables par la CNR.

## 1.1.7 Données sur les paramètres hydrodynamiques

### 1.1.7.1 Cartes géologiques au 1 :50 000

Plusieurs types de paramètres hydrodynamiques ont pu être reportés pour chaque aquifère référencé en tant qu'entité hydrogéologique, aquifère départemental, régional ou d'intérêt stratégique majeur. Les principaux paramètres sont globalement concordants entre les différentes sources et concernent principalement la perméabilité. Les données d'épaisseur et de profondeur d'eau associées à la piézométrie sont aussi assez bien renseignées pour la nappe alluviale du Rhône.

Ce panel de données est reporté dans le projet ArcGIS dans chaque table attributaire (couches des zones stratégiques et des entités alluviales de la BD LISA). Les informations quantitatives issues de la synthèse départementale sont reportées dans ces tables attributaires afin d'obtenir une base de données complète référencée servant à la future sectorisation et à la modélisation.

De même, afin de finaliser la recherche d'éléments de connaissance sur les nappes alluviales du Rhône, nous avons consulté les notices des cartes géologiques au 1 :50 000 suivantes, qui couvrent le secteur d'études :

- |                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| ▶ Saintes Maries de la mer. | ▶ Valence.               |
| ▶ Istres.                   | ▶ Tournon.               |
| ▶ Arles.                    | ▶ Serrières.             |
| ▶ Nîmes.                    | ▶ Vienne.                |
| ▶ Avignon.                  | ▶ Givors.                |
| ▶ Chateaurenard.            | ▶ Lyon.                  |
| ▶ Orange.                   | ▶ Rumilly.               |
| ▶ Pont Saint Esprit.        | ▶ Belley.                |
| ▶ Valréas.                  | ▶ La Tour du pin.        |
| ▶ Bourg Saint Andréol.      | ▶ Montluel.              |
| ▶ Montélimar.               | ▶ Seyssel.               |
| ▶ Crest.                    | ▶ St Julien en Genevois. |

On y trouve parfois une description précise de la géométrie du réservoir et/ou des propriétés hydrodynamiques.

### 1.1.7.2 Etude globale sur les relations entre le Rhône et sa nappe alluviale (Grillot et al., 2008 ;Grillot et al., 2010)

On y trouve les informations suivantes d'ordre général :

- ▶ Les aquifères d'alluvions modernes de la vallée du Rhône sont constitués d'un mélange hétérogène de sables, graviers et galets (incluant des niveaux argileux parfois tourbeux) d'une épaisseur allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, notamment à l'amont des étroits rocheux et au niveau des paléochenaux. Tirat & al. (2006) considèrent des épaisseurs de 5 à 10 m comme faibles, de 10 à 20 m moyennes, de 20 à 30 m comme fortes et de plus de 30 m comme très fortes dans le contexte rhodanien. L'épaisseur des alluvions modernes diminue du nord vers le sud et de la rive gauche du Rhône vers la rive droite.
- ▶ La perméabilité horizontale de ces formations varie de  $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  m/s. Elle peut atteindre  $10^{-1}$  m/s (île du Grand Gravier, vallée du Garon ou vallée du Dolon) ou des valeurs plus faibles ( $10^{-4}$  m/s en Camargue, en rive droite à Saint-Vallier ou Tain-l'Hermitage).
- ▶ La perméabilité verticale, quant à elle, est dix fois inférieure du fait de la structure stratifiée de l'aquifère. La transmissivité est comprise entre  $10^{-1}$  et  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s et le coefficient d'emménagement entre 10 à 15 % (5 % sur certains secteurs).
- ▶ La couverture des limons est constituée de sables fins, silts et argiles d'une épaisseur de 2 à 8 m formant une couche protectrice (à la pollution par exemple) du fait de leur très faible perméabilité allant de 10-5 m/s à la base dans des horizons sableux à  $10^{-7}$  à  $10^{-9}$  m/s au sommet dans des horizons limoneux.

- ▶ La fluctuation de la nappe est de l'ordre de 3 à 4 m et peut être transmise sur de grandes superficies même si le temps de réaction et l'amplitude diminuent quand on s'éloigne du fleuve. Le temps d'adaptation de la nappe à une crue dépasse couramment un mois. Lors des étiages de longue durée, on peut observer un raccordement de la nappe au niveau du fleuve selon une pente forte. D'une manière générale, la nappe ne s'adapte pas rapidement aux différents états du fleuve ce qui traduirait de faibles échanges.

Trois secteurs ont été particulièrement étudiés : le secteur de Brégnier-Cordon, le secteur de Péage-Roussillon, le secteur de Donzère Mondragon.

Pour Brégnier Cordon, on y trouve les informations suivantes :

- ▶ Les paramètres hydrodynamiques présentent une grande variabilité : la perméabilité en zone alluvionnaire varie de  $1.10^{-5}$  à  $1.10^{-2}$  m/s, la transmissivité varie quant à elle de  $1.10^{-4}$  à  $1.10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s.

Pour Péage de Roussillon, on y trouve les informations suivantes :

- ▶ Les alluvions sont de deux types : terrasses fluvioglaciales (grossières) et fluviales (sables, galets, localement limons qui les recouvrent sur au maximum 2 à 6 m) dont l'épaisseur varie de 20 à 30m. La perméabilité moyenne est de  $10^{-3}$  m/s. Des essais de pompage donnent de 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  $6,1.10^{-3}$  m/s).

Pour Donzère Mondragon, on y trouve les informations suivantes :

- ▶ D'une manière générale, l'épaisseur du remplissage holocène (alluvions graveleuses et couverture limono-sableuse) est comprise entre 7 et 30 m. Au niveau du canal d'amenée elle varie de 10 à 22 m, et 19 à 40 m au niveau du canal de fuite. De Donzère à la confluence avec l'Ardèche, le remplissage holocène est réduit au niveau du Fleuve Rhône. A l'aval, les épaisseurs d'alluvions fluviales sont plus considérables. A la hauteur de Pont-Saint-Esprit, la couche de sables et graviers est d'une quinzaine de mètres.
- ▶ Perméabilité moyenne de la couche d'alluvions : 2mm/s ( $2.10^{-3}$ m/s). La perméabilité horizontale est plus forte que la perméabilité verticale. Les valeurs locales de perméabilité peuvent être 15 fois plus fortes à 200 fois plus faibles par rapport à la moyenne. La perméabilité des limons est de l'ordre de  $10^{-5}$ m/s pour les horizons les plus sableux et grossiers (généralement les horizons supérieurs). Ailleurs, elle est plus faible ( $10^{-7}$  à  $10^{-9}$ m/s pour les limons les plus argileux).

Ces études permettent aussi d'appréhender la complexité et la variété des situations hydrogéologiques au droit des aménagements de la CNR.

- ▶ Ainsi, à Donzère Mondragon, le canal d'amenée entaille les alluvions sur toute leur épaisseur. Il est en position d'alimentation de la nappe sur sa rive droite mais il est lui même alimenté par la nappe sur sa rive gauche (effet barrage aux écoulements naturels). Ce n'est pas le cas à Péage de Roussillon avec un canal de dérivation "posé" sur les alluvions, qui est ainsi en position d'alimenter la nappe sur ses deux rives.
- ▶ Les matériaux des digues sont beaucoup moins perméables que les alluvions dont ils proviennent (Jacob, 1955). Selon Miche (1955), les berges du canal de dérivation (digues) ont une perméabilité deux à quatre fois plus faible que la perméabilité moyenne des alluvions ( $2.10^{-3}$ m/s) car les matériaux ont été remaniés. La perméabilité varie selon le type de digues : digues perméables en alluvions remaniées :  $K=10^{-3}$  m/s ; digues semi-perméables en tout-venant :  $K=10^{-4}$  m/s ; digues imperméable en limon :  $K=10^{-6}$ m/s. De plus, il y a un colmatage rapide par dépôts des limons du Rhône. Ainsi, quelques mois après la mise en service les fuites des digues du canal de dérivation sont estimées à  $1\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ . Le fond du canal quant à lui est considéré imperméable du fait de la disposition horizontale des bancs d'alluvions et du colmatage par les limons du Rhône.

### 1.1.8 Approche spécifique pour la région PACA

Pour la région PACA, une approche spécifique a été mise en place afin de répondre au manque de données sous format SIG, quant à la nappe alluviale du Rhône.

En effet, nous avons constaté une absence de données SIG sur la géométrie du réservoir alluvial (cartes toit et mur de la nappe), depuis le défilé de Mornas jusqu'à la mer. Pour faire face à cette lacune, nous avons organisé une collecte d'informations sur la géométrie du réservoir, par l'exploitation systématique des données de forage renseignées de la banque de données du sous-sol (BSS) entretenue par le BRGM.

De même, cette portion du secteur d'étude se caractérise par l'absence de synthèses départementales détaillées. Il nous a donc semblé utile de faire le point sur les données accessibles, via un certain nombre d'études à caractère local ou régional.

#### 1.1.8.1 Données documentaires

##### SYNTHESE SUR LA NAPPE ALLUVIALE DE LA BASSE DURANCE ET DE LA CRAU (BOSSY, 1965) :

On y trouve les informations suivantes :

- ▶ Description cadre géographique, géologique, comblement alluvial et nappe alluviale entre Chateaurenard, Avignon et Tarascon ;
- ▶ Carte des points de mesure ;
- ▶ Carte de la surface piézométrique entre 1 m et 5 m ;
- ▶ Carte des amplitudes moyennes des variations de la nappe ;
- ▶ Carte de la profondeur de la surface piézométrique ;
- ▶ Carte du mur des limons.

##### UTILISATION DES EAUX SOUTERRAINES COMME SOURCE DES POMPES A CHALEUR (EDF-BRGM, 1982) :

On y trouve les informations suivantes :

- ▶ Carte de l'exploitation des eaux souterraines afin de visualiser les terrains perméables, imperméables et alluviaux ;
- ▶ Cartes des courbes iso piézométriques dans toute la zone du Rhône (département des Bouches du Rhône et du Vaucluse).

##### ETUDE DES RELATIONS NAPPE-RIVIERE DU BASSIN RHONE-MEDITERRANEE (SCHINDLER, 2006) :

On y trouve les informations suivantes :

- ▶ Description des mécanismes régissant les échanges nappe/rivière sur chaque secteur du Rhône ;
- ▶ Tableau récapitulatif contenant la lithologie, le type d'échange nappe/rivière par tronçon le long du Rhône. ;
- ▶ En basse Provence occidentale, les grands cours d'eau du Quaternaire (Rhône et Durance) ont entaillé les reliefs calcaires, déposant des matériaux constituant les vastes plaines alluviales. Les alluvions reposent sur un substratum d'argiles et de marnes pliocène, sous un couvert limoneux. Dans les dépôts anciens du fleuve s'écoule, parallèlement au fleuve, une riche nappe alluviale particulièrement développée dans les bassins successifs.

**DESCRIPTION DE LA NAPPE DE LA PLAINE ALLUVIALE DE RIVE GAUCHE DU RHONE ENTRE DONZERE ET MORNAS (HENRY ET AL. 1954) :**

- ▶ Description détaillée du secteur entre Donzère et Mornas ;
- ▶ Description du secteur et géologie : nappe naturelle libre, vallée creusée dans le calcaire et grès crétacé, 2 nappes avec une dans le limon et une dans le sable et graviers ;
- ▶ Epaisseurs des niveaux sous le fleuve : 2-6m de limons imperméable, 2-15m de sable et gravier perméable. ;
- ▶ Description des deux nappes avec mesures de perméabilité et débit : La nappe s'écoule vers le sud-ouest avec un débit de 65L/s, un rabattement de 3m et un coefficient de perméabilité de  $2.10^{-3}$  m/s ;
- ▶ 90 % du débit de la nappe circule dans moins d'un tiers de l'épaisseur du milieu mouillé.

**AQUIFERES DU COULOIR RHODANIEN (TIRAT ET AL., 2006)**

On y trouve les informations suivantes :

- ▶ Description générale de l'aquifère : il est formé principalement d'alluvions composées d'un mélange hétérogène de sable, gravier et galet avec des épaisseurs comprises entre 1 et 20 m et recouvert d'une couche de limon. De nombreux ouvrages ont été réalisés aux abords du Rhône. Des mesures ont été faites :
  - perméabilité des limons de 10-5 m/s en base et 10-9 au sommet,
  - perméabilité horizontale des alluvions : 10-3 m/s à 10-2 m/s,
  - transmissivité de 10-1 à 10-2 m/s,
  - coefficient d'emmagasinement de 10 à 15 %.
- ▶ Hydrodynamique des eaux souterraines : deux nappes (une dans les alluvions et une dans les limons) mais seule celle des alluvions présente un intérêt. Bouleversement de la surface piézométrique dû aux aménagements du CNR. En général, la nappe est à 5-10m de profondeur. L'épaisseur mouillée est de 10 à 30 m. L'écoulement de la nappe se fait du versant vers le fleuve avec une pente de 0,3 à 0,4 %. L'alimentation de la nappe se fait par le Rhône, le versant de la vallée, les cours d'eau secondaires, les précipitations et l'infiltration. Le drainage de la nappe se fait par le court circuitage du Rhône, les champs captant, les aquifères adjacents et les rivières affluentes.
- ▶ Qualité des eaux souterraines : la composition de l'eau de la nappe a considérablement évolué au cours du temps. Le profil hydrochimique est de type bicarbonaté calcique. L'hydrométrie est de 15°F pour le Rhône et de 40°F pour l'eau du versant. La résistivité se situe entre 2000 et 3000 ohms/cm. Il y a présence de nitrate, fer et manganèse. La nappe est vulnérable aux pollutions provenant de l'agriculture, du transport, de l'industrie, des ressources et des autres cours d'eau.
- ▶ Données sur l'exploitation de la ressource : eau potable, eau industrielle et eau agricole
- ▶ Bilan de la ressource : nappe réalimentée par le fleuve par réalimentation induite. La nappe est surexploitée. Les entrées d'eau sont la pluviométrie, les cours d'eau du Rhône, les échanges entre aquifères et l'irrigation. Les sorties d'eau sont le drainage par le cours d'eau du Rhône, les échanges entre aquifères, l'évapotranspiration et les prélèvements en nappe.

**ETUDES LOCALES DE CHAMP CAPTANT (CIRON ET AL., 1992 ; RABIER, 1979 ; DUROZOY, 1977; POUL, 1975; JUNCY ET POUL, 1975; LAVIE ET PUTALLA, 1974; DELLERY ET JONQUET, 1967) :**

Ces études ont permis de recenser les caractéristiques et les propriétés hydrodynamiques de la nappe alluviale du Rhône dans différents secteurs :

- ▶ Champ captant de Mornas ;
- ▶ Champ captant de la Saignone ;
- ▶ Champs captant d'Orange ;
- ▶ Champ captant de Beaucaire ;
- ▶ Recherche d'eau dans le secteur d'Avignon ;
- ▶ Ile de la Barthelasse ;
- ▶ Bassin écrêteur de crue de Meyne.

### 1.1.8.2 Données de forage

L'analyse de la base de données du BRGM a permis de collecter un nombre important d'informations sur les forages renseignés (près de 140 ouvrages), pour ainsi reconstituer la géométrie de la nappe. Ces données rassemblent donc les profondeurs du substratum, des alluvions ainsi que des limons.

Le tableau ci-dessous illustre la nature des données obtenues :

Ville	X	Y	Piezoetrie	Profondeur	Profondeur	Profondeur	Epaisseur	Epaisseur	Epaisseur	Reference	Nature Substratum
MORNAS (84083)	790219	1913645	3,95	15,1	3,8	1,1	11,15	11,3	2,7	09141X0035/S3	Argile Bleue
CADEROUSSE (84027)	793406	1903959	3,23	12,8	6,5		9,57	6,3	6,5	09145X0057/N210	Marne bleue pliocene
SORGUES (84129)	801535	1892014	3,3	17	4,6		13,7	12,4	4,6	09406X0544/A226	Marne miocene
TARASCON (13108)	789068	1869522	1,4	27	9	0	25,6	18	9	09665X0077/F2	Argile bleu substratum
BOULBON (13017)	789021	1878288		27	6,3	1,5		20,7	4,8	09661X0022/S	Argile bleu substratum
BARBENTANE (13010)	839625	6314694		21,8	2,4	1,2		19,4	1,2	09661X0033/S	Calcaire Hauterivien
AVIGNON (84007)	844774	6316150	2,5	13,8	3,8	0,4	11,3	10	3,4	09406X0666/S2	Marne
ORANGE (84087)	840897	6339310	2,35	17,8	8,1	1	15,45	9,7	7,1	09145X0058/N255	Marne bleue pliocene

## 1.2 COLMATAGE DES BERGES

### 1.2.1 Problématique

Le colmatage des berges et du fond d'un cours d'eau traduit le phénomène de dépôt de particules fines sur les berges et le fond, qui vont s'accumuler et former une couche moins perméable que les alluvions constitutifs de l'aquifère. Ils vont ainsi limiter plus ou moins fortement les échanges entre le cours d'eau et sa nappe alluviale.

C'est un phénomène complexe car très variable :

- ▶ Il est variable spatialement : variabilité spatiale entre fond et berge sur un même profil, variabilité longitudinale en fonction de la distance aux ouvrages de régulation qui perturbent le transport sédimentaire, etc. ;
- ▶ Il est aussi variable dans le temps : les dynamiques de dépôt et de transport sont principalement contrôlées par les vitesses de courant et une même section du cours d'eau va voir ces dynamiques évoluer dans le temps en fonction de la dynamique du cours d'eau. Ainsi, une section colmatée localement peut se voir "décaper" lors de crues décennales à centennales.

Pour ces raisons, le colmatage des berges est souvent constaté a posteriori. La perte de perméabilité des berges conduit à une diminution des échanges nappe-rivière qui sera constatée soit sur les cartes piézométriques, soit par une baisse de productivité des champs captants.

**La question que nous abordons dans le cadre de cette étude est celle de sa détermination a priori : peut-on estimer le degré de colmatage d'un fleuve comme le Rhône en fonction de paramètres géomorphologiques et hydrauliques ?**

Ces phénomènes sont d'une grande complexité. L'approche systémique reconnaît que l'espace fluvial peut être divisé en un nombre infini de zones considérées comme des systèmes ouverts (Landon, 1996). Chaque zone est alors le résultat du jeu d'un ensemble de variables interdépendantes : climat, géologie, débit liquide et débit solide, géométrie du lit, etc. Kondolf (1997) estime que la complexité des phénomènes est telle que les modèles de transport de sédiments peuvent seulement fournir des estimations ou des tendances ; leur simplification est telle que leur utilité en est réduite : ils ont du mal à prendre en compte l'hétérogénéité spatiale et temporelle des sédiments, les variations de rugosité hydraulique.

Pour le Rhône en particulier, l'état de l'art présente en général les grands cours d'eau méditerranéens comme caractérisés par une granulométrie grossière, surtout dans la partie amont et moyenne des cours d'eau. Les dépôts des lits majeurs sont plus souvent sableux ou limoneux que limono-argileux à argileux (Ballais, 2008).

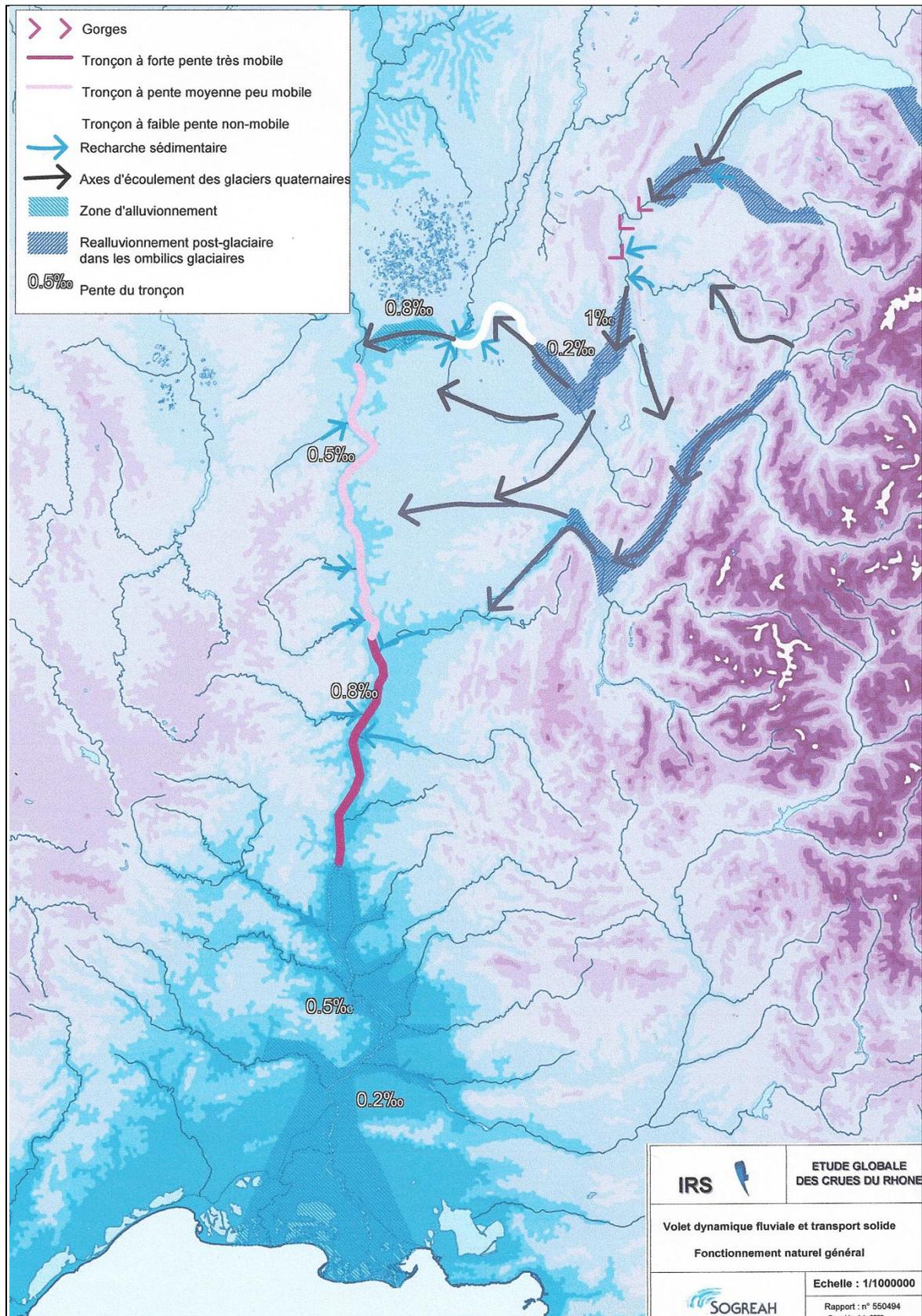
### 1.2.2 Recherche documentaire

#### 1.2.2.1 Etudes spécifiques sur le Rhône

Dans le cadre de l'étude globale sur le Rhône, SOGREAH (1999) a réalisé une étude dédiée aux phénomènes de dépôts solides dans le Rhône. On y trouve les informations utiles à la bonne compréhension de la problématique traitée :

- ▶ Le Rhône y est sectorisé en fonction de sa pente moyenne (cf. figure ci-après) ;
- ▶ Les données de la CNR mettent en évidence la difficulté – mainte fois signalée – de caractériser finement les alluvions d'un cours d'eau, en raison de la variabilité des caractéristiques des dépôts dans un lit fluvial en fonction des conditions de leur mise en place. On notera qu'il n'est pas possible de mesurer aujourd'hui la granulométrie des matériaux actifs du Rhône naturel : les retenues sont le siège de dépôts de sédiments fins et les Vieux Rhône ont connu des phénomènes de pavage souvent marqués à l'aval des barrages.

Figure 14 : Penthes hydrauliques moyennes du Rhône (d'après SOGREAH, 1999)



- ▶ Il apparaît ainsi nettement qu'il n'y a pas de logique amont/aval dans la taille des sédiments, contrairement au schéma théorique classique d'un appareil fluvial (décroissance de la taille des sédiments vers l'aval par usure et surtout tri granulométrique). Cela s'explique aisément sur le Rhône : l'absence de continuité du transit des graviers même avant tout aménagement ne pouvait pas permettre une telle logique amont/aval. En conséquence, la recharge sédimentaire locale par les affluents et le stock sédimentaire propre du Rhône (dépôts glaciaires ou fluvio-glaciaires, ou fluviatiles anciens) influait seule sur la taille des alluvions.
- ▶ Le diamètre moyen des alluvions mesurées depuis Génissiat jusqu'à Montélimar, est d'environ 40 à 50 mm. Dans le delta, il est de 20 mm. Cela met en évidence qu'hormis les secteurs soumis à un alluvionnement accompagné d'un tri granulométrique, où la décroissance de la taille des matériaux accompagne la réduction de pente (les matériaux les plus grossiers sont déposés les premiers), il n'est guère possible de mettre en évidence des évolutions significatives de la taille des matériaux d'amont en aval par l'observation (où la variabilité des mesures masque d'éventuelles différences significatives).
- ▶ De nombreuses mesures permettent l'observation de l'absence de sables de la classe 0.4/5 mm dans les dépôts alluviaux du fleuve (hors delta) ; localement, les dépôts de berge ne dépassent pas un  $d_{50}$  de  $200\mu$  et un  $d_{99}$  de  $500\mu$ . Les aménagements CNR sont évoqués pour expliquer ce déficit : les apports de sables grossiers, comme de galets, seraient interrompus, et les galets observés aujourd'hui proviendraient d'une remobilisation du stock en place ; les sables grossiers plus mobiles auraient déjà été évacués. Il est de fait en tout cas que même visuellement, les sables grossiers semblent absents du paysage sur les berges du Rhône : aux graviers et galets du fond succèdent sur les berges des alternances de dépôts limoneux ou sableux fins en fonction des conditions de dépôt propres à chaque crue.
- ▶ L'effet des aménagements CNR sur les phénomènes de transport est bien décrit. Le premier impact des retenues est de réduire la pente hydraulique. Il n'y a que pour les crues exceptionnelles que la pente tend vers la pente naturelle. Lorsque le débit du Rhône dépasse le débit d'équipement de la dérivation, les vannes du barrage sont progressivement ouvertes. L'ouverture des vannes de fond permet la chasse des matériaux déposés à l'amont immédiat du barrage. Il serait cependant abusif de parler alors de transparence du barrage. En effet, tant qu'il demeure une perte de charge au barrage, la pente amont est inférieure à la pente naturelle, et ne permet qu'un transit partiel des graviers jusqu'au barrage. L'ouverture des vannes de fond permet l'évacuation des sédiments accumulés devant le barrage, mais pas le transit de toute la charge de fond amont. Ce n'est que lorsque que la perte de charge au barrage devient négligeable que l'on peut véritablement parler de transparence totale. La crue assure alors non seulement le transit des apports d'amont, mais également la reprise d'une partie de la sédimentation de la retenue. Cette transparence totale n'est assurée qu'à partir de la crue centennale.
- ▶ Le rapport entre le débit centennal et le module est de 5 sur le Rhône, tandis qu'il atteint 25 sur la Durance et dépasse 100 sur l'Ardèche. Cette régularité du régime conduit à un transit de gravier peu intense mais très fréquent (plus de 100 jours par sur de nombreux tronçons). Certes, les crues majeures jouaient autrefois un rôle important de remodelage complet du lit. Mais entre le débit dépassé 1 jour tous les 10 ans et le débit dépassé 10 jours/an, le rapport des débits solides est compris entre 2 et 2.5 sur le Rhône, tandis que la fréquence de ces débits est dans un rapport 100. On constate ainsi que les hautes eaux jusqu'à la crue annuelle assurent près de 98 % du transit des graviers. Des simulations semblent montrer que les gravillons, jusqu'à 10 mm en général, semblent capables de franchir en partie la plupart des retenues.
- ▶ Il n'y a que dans les tronçons à faible pente, où le style tend vers un lit unique peu mobile (plaine de Sault-Brenaz sans doute, mais surtout Saône et partie terminale du Rhône en Camargue), que les sédiments fins jouent un rôle plus important dans la formation des berges.

Les travaux de fixation du lit, notamment pour la navigation, ont supprimé la capacité de divagation du Rhône, et donc de remobilisation des limons déposés sur les marges boisées. Les crues débordantes continuent de déposer des matières en suspension : les lînes du Rhône présentent d'ailleurs des formes très fraîches de dépôt, le plus souvent très triées (succession de dépôts de sables fins et de limons selon les conditions d'écoulement propres à chaque crue). Ce processus de colmatage s'auto entretient : le dépôt de fines favorise le développement de la végétation, qui à son tour piège les sédiments fins, etc. Ce processus se ralentit au fur et à mesure que la fréquence des crues capables de submerger la zone diminue. La faible mobilité du lit conduit parfois même à un enlimentement des bancs vifs. C'est ainsi que la CNR doit procéder, par exemple dans le Vieux Rhône de Donzère, à des opérations de délimonage des bancs avec charruage. Ces opérations sont fréquentes à l'aval de l'Isère. Une opération exceptionnelle de délimonage a été conduite vers 1983 : plusieurs millions de mètres cubes de matériaux fins ont été brassés dans le lit du Rhône court-circuité.

Pour le Haut-Rhône, les apports de l'Arve se déposent dans les retenues de Verboix et Chancy-Pougny. Ces dépôts sont repris lors de chasses triennales effectuées par les Suisses à Verboix et accompagnées par une gestion des retenues du Haut-Rhône. Le barrage de Génissiat lamine le transit des sédiments pour respecter des valeurs plafond de concentration de 5 g/l (15 g/l en pointe pendant 30'). Environ 500 000 m<sup>3</sup> de sédiments s'accumulent ainsi à chaque chasse. Sur les autres retenues du Haut Rhône, les barrages sont fermés pendant ces chasses pour préserver les Vieux Rhône. Les sédiments transitent par la dérivation. Des dépôts sont observés dans les retenues, sans que des problèmes majeurs soient observés.

Il n'y a pas sur le Bas Rhône de gestion spécifique des ouvrages vis-à-vis des matières en suspension. Les dépôts de sédiments fins sont notables sur la plupart des retenues. Les dépôts pénalisants pour l'exploitation des aménagements, surtout vis-à-vis de la navigation, sont remobilisés : les matériaux dragués sont remis en mouvement en étant déversés soit au droit de fosses profondes, soit dans le canal de dérivation, soit parfois pour constituer des « îlots écologiques ». Environ 1 Mm<sup>3</sup> de matériaux fins sont ainsi remobilisés chaque année sur le Bas-Rhône. Il est net que la problématique de gestion des limons se fait sentir surtout à l'aval de l'Isère. Il ne semble pas cependant y avoir une tendance systématique à la réduction de la largeur des retenues par enlimentement à partir des berges, comme cela a pu être observé sur la Moyenne-Durance (retenue de l'Escale et de Cadarache). Contrairement à la Durance, les retenues du Rhône sont étroitement endiguées, ce qui limite à l'évidence les restrictions du lit par enlimentement.

La sédimentation des limons induit une réduction du transit de matières en suspension (MES) estimé à 20-30 Mt/an entre 1900 et 1950, et 10 Mt/an aujourd'hui. Le transport de MES se fait pour des débits supérieurs à 3000 m<sup>3</sup>/s qui nécessitent l'ouverture des vannes de fond. La fraction majoritaire (environ 75 %) des MES correspond à des limons (5 à **µ50 m**).

Pour finir, citons l'étude référence réalisée dans le cadre de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) sur les relations du fleuve Rhône avec sa nappe alluviale (Graillot et al., 2010). Dans les approches proposées, le colmatage n'est jamais étudié en tant que tel ; il est constaté et discuté a posteriori, principalement au vu des données de piézométrie. On y trouve cependant des informations détaillées sur les dynamiques de colmatage au droit des aménagements hydrauliques :

A noter que dans le cadre de cette étude (Graillot et al., 2007), une proposition de sectorisation a été réalisée. Elle est basée sur les travaux de Schindler (2006) ; le fleuve est ainsi divisé en 47 tronçons lithologiques et en 36 tronçons pour les relations d'échanges. Ce travail a été réalisé uniquement sur la base d'une analyse bibliographique et cartographique. Les hypothèses proposées sont intéressantes car elles distinguent la rive gauche et la rive droite et elles prennent en compte certains aménagements ainsi que les variations saisonnières. Bien que très pertinente vis-à-vis de la problématique des échanges nappes-rivière (sur la base des données piézométriques), cette sectorisation ne propose pas d'éléments de connaissance sur les dynamiques de colmatage.

### 1.2.2.2 Etudes sur les relations entre prélèvements et débit des cours d'eau

Le BRGM a conduit un nombre important d'études pour une formalisation mathématique de la part prélevée en rivière lors de pompages en nappe. Citons :

- ▶ Etude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel (Lelièvre, 1969) ;
- ▶ Méthodes d'évaluation de l'impact des prélèvements réalisés dans les nappes d'accompagnement sur les eaux superficielles associées (BRGM, 1995) ;
- ▶ Impact sur le débit des cours d'eau des prélèvements d'eau souterraine des nappes connexes aux rivières (BRGM, 1996) ;
- ▶ Echanges nappe-rivière et transport de pesticides : cas des alluvions de l'Hérault, en présence et en l'absence de pompages. Site de Pézénas et Florensac (Aquilina et al., 2001) ;
- ▶ Relations nappe-rivière et impact des prélèvements d'eau souterraine sur le débit des cours d'eau dans le bassin de la Juine et de l'Essone (Vernoux et al., 2001).

Dans ces approches, le colmatage est souvent réduit à un paramètre limitatif des échanges et est considéré comme une variable de calage. Dans cette approche générale, le paramètre n'est pas pris en compte dans le calcul des volumes soutirés aux cours d'eau.

Une analyse détaillée de ces approches sera proposée en phase 3 de la mission, dont l'un des objectifs est de proposer une formulation simple des relations entre prélèvements en nappe alluviale et perte de débit dans le Rhône.

### 1.2.2.3 Etudes à visée phénoménologique

Les études à visée phénoménologique sur le colmatage sont relativement nombreuses.

Citons :

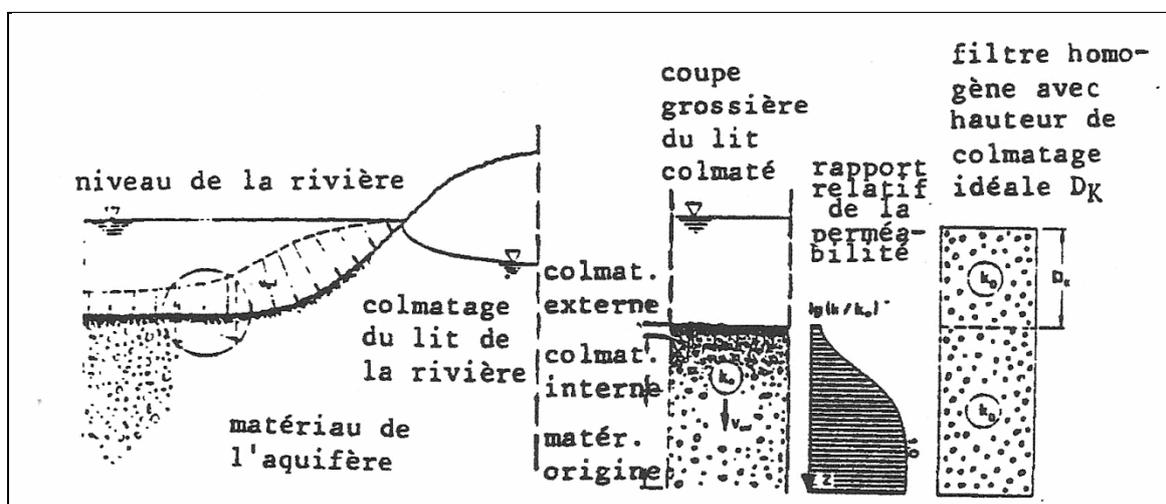
- ▶ Etude du colmatage de l'interface gravière/nappe (Blanchard et al., 1991) ;
- ▶ Colmatage et décolmatage des forages (Lallemand-Barrès, 1985) ;
- ▶ Colmatage et effet filtre des berges (Darmendrail, 1986).

On y trouve certaines informations utiles à la bonne compréhension de la problématique traitée :

- ▶ La zone colmatée a un effet important sur les transferts de polluants dissous ou solides, que l'on nomme « effet filtre ». Cet effet résulte de phénomènes physico-chimiques complexes, difficiles à appréhender. Ils sont au delà de la problématique abordée qui se concentre sur les aspects quantitatifs des transferts nappes rivières.
- ▶ D'un point de vue hydrodynamique, le colmatage des berges est souvent représenté par une couche d'interface d'épaisseur  $E$  et de perméabilité  $K$ . C'est la quantification de ces paramètres qui est difficile dans une logique a priori.
- ▶ Dans le détail, les agents responsables du colmatage sont de trois types : les MES, les matières dissoutes et les gaz susceptibles de réagir dans cette zone d'interface. On a donc un phénomène contrôlé par de nombreux facteurs, mécaniques mais aussi chimiques et biologiques. A noter que le colmatage est un phénomène qui varie en fonction du temps.

- ▶ Un des processus les plus importants du colmatage est le blocage des pores par des particules en suspension. Il est lié aux dimensions relatives pores-particules. Une analyse très fine de ce mécanisme est proposée par Darmendrail (1986). Dans la plupart des systèmes alluviaux, la plus grande partie de la filtration s'effectue dans les 10 à 20 premiers cm de la berge. Ce phénomène est directement dépendant du sens d'échange entre la rivière et sa nappe. A une macro-échelle, on peut considérer que la pénétration des particules fines dans le massif affecte principalement les zones d'alimentation de la nappe par la rivière (canaux de dérivation ou champs captant avec forts rabattements). A noter qu'il y a une forte corrélation positive entre la vitesse de pores (contrôlée par le gradient hydraulique) et la profondeur de pénétration du colmatage dans le massif. Si la vitesse de pores est grande, le colmatage est interne ; par contre, si elle est faible, il se forme rapidement une couche colmatée à l'extérieur du milieu poreux qui empêche l'infiltration des particules.
- ▶ La mesure du colmatage est rare. Il est plutôt d'usage de déterminer ses effets indirectement par une analyse des variations d'amplitude des signaux piézométrique au regard des amplitudes du niveau d'eau dans la rivière.

Figure 15 : Illustration du phénomène de colmatage des berges (d'après Lallemand-Barrès, 1985).



#### 1.2.2.4 Etudes locales

Le BRGM a conduit un nombre important d'études sur les phénomènes de colmatage des berges, pour des gravières comme pour des cours d'eau, sur le Rhône ou pour d'autres nappes alluviales.

Citons :

- ▶ Ile du grand Gravier (Dubar et al., 1993) ;
- ▶ Parc de la Tête d'Or (Rousselot et Camus, 1971) ;
- ▶ Champ captant de Comps (BRGM, 1993) ;
- ▶ Site de Crépieu-Charmy (Barthelemy, 1969; Barthelemy, 1979; Suais et al., 1987) ;
- ▶ Champ captant de Strasbourg (Buard, 1990) ;
- ▶ Champ captant de la Saignonne : relation avec la Durance (Barbut et Garnier, 1990) ;
- ▶ Nappe alluviale du Var (Garnier et Henry, 1977);
- ▶ Problématique du colmatage des gravières dans la nappe alluviale de la Garonne (Vandenbeusch et Roche, 1975) et de la Loire (Blanchard et al. 1991).

Une étude approfondie de ces études sera réalisée pour essayer de mieux contraindre la méthodologie.

Dans ces études, on trouve les éléments de connaissance suivants, utiles à notre mission :

- ▶ Les investigations détaillées réalisées sur le lac de la Tête d'Or montrent qu'en contexte de bras mort ou de lacs connectés, les dépôts vaseux de fond peuvent atteindre 1 à 2 m au bout de 100 ans. Dans ce contexte hydrodynamique défavorable, les perméabilités mesurées des dépôts de fond sont comprises entre 1 et  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s. Les perméabilités verticales dans les alluvions sont 4 fois plus faibles que les perméabilités horizontales.
- ▶ Le champ captant de Crépieu Charmy a fait l'objet de multiples investigations. La majorité de l'eau prélevé (plus de 90 %) provient des bras du Rhône et à ce titre, ces travaux insistent sur la forte vulnérabilité du champ captant aux phénomènes de colmatage. En 1978, la chasse des sédiments accumulés dans les retenues de Génissiat, Verbois et Chancy-Pougny avait conduit à une chute spectaculaire des niveaux piézométriques en quelques jours ; cet événement avait conduit à d'importants travaux de dragage sur les trois bras du Rhône. L'épaisseur moyenne de curage était alors de l'ordre du mètre.
- ▶ Le champ captant de l'île du grand Gravier a fait l'objet d'une étude complète pour déterminer sa vulnérabilité. Les observations montrent la complexité des phénomènes de colmatage : dans le secteur Nord où le fleuve vient suralimenter la nappe alluviale, le colmatage est faible car on est dans un méandre caractérisé par une forte vitesse de courant ; ceci montre les approximations des approches en grand : les phénomènes de colmatage sont localement complexes car liés aux dynamiques locales (concavité et convexité des rives). A noter que les observations de berge montrent un grano classement qui va de galets à matrice sableuse à des séries sablo-argileuses. Les dépôts limoneux sont inexistantes sur les berges ; les auteurs notent néanmoins que les plus faibles valeurs de perméabilité sont systématiquement situées sur les berges du Rhône, ce qui pourrait bien traduire une pénétration des fines dans le réservoir. L'eau en provenance du Rhône représente de 75 à 90 % de l'eau prélevée (pour des débits allant de 600 à 2400 m<sup>3</sup>/h). L'analyse synchrone des variations du niveau du Rhône et du niveau piézométrique permet de quantifier la zone colmatée : ils déterminent ainsi une zone très colmatée (K de l'ordre de  $10^{-6}$  m/s) d'environ 2 m, puis une zone moins colmatée (K de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s) sur environ 40 m. La modélisation hydrodynamique montre que les échanges par le fond sont marginaux, même à l'étiage (< 20 %).
- ▶ Sur le champ captant de Comps destiné à l'AEP de la ville de Nîmes, de nombreuses investigations ont été menées pour mieux cerner les phénomènes de colmatage. Elles sont basées sur les observations synchrones des variations de niveau dans le Rhône et de niveaux piézométriques. Cette approche permet d'estimer des perméabilités associées à la zone de colmatage comprises entre 1 à  $15 \cdot 10^{-6}$  m/s. Sur ce champ captant, les rabattements sont plurimétriques.
- ▶ Les mesures par pompage dans la nappe alluviale du Var au droit d'une zone colmatée permettent d'estimer que si le colmatage affecte une épaisseur d'environ 1 m, alors sa perméabilité serait comprise entre 2 et  $10 \cdot 10^{-5}$  m/s. Les études sur d'autres nappes apportent peu d'informations (nappe du Rhin et de la Durance) : le colmatage y est considéré comme un paramètre de calage ou comme un phénomène local induisant des pertes de productivité sur les ouvrages d'exploitation.
- ▶ Les mesures par pompage réalisées dans l'aval hydraulique de gravière dans la nappe alluviale de la Garonne montrent une perte de la perméabilité d'un facteur 100 par entraînement des fines dans le réservoir graveleux. Et au bout de quelques années seulement (soit K compris entre  $10^{-4}$  et  $10^{-5}$  m/s pour la zone colmatée). Une autre étude sur des gravières en bord de Loire montre une nette différence entre berges (sédiments sableux, partiellement colmatés par l'intrusion de fines) et fond (sédiments vaseux) ; on observe un fort gradient en termes de pourcentage de fines selon la position verticale dans la berge (ce qui explique la faiblesse des échanges à l'étiage).

### 1.2.2.5 Etude pour l'identification et la protection des ressources en eau souterraine majeures pour l'alimentation en eau potable (SAFEGE-ANTEA, 2010)

Cette étude apporte peu d'informations utiles pour notre mission.

- ▶ La première partie de l'étude concerne un état des lieux des prélèvements en nappe alluviale. On y trouve une liste des champs captant implantés dans la nappe alluviale du Rhône pour l'AEP. Ceci étant, les données récoltées correspondent à des volumes prélevés par champ captant. Elles proviennent de l'exploitation des données Agence et des rapports annuels des délégataires. On n'y trouve aucune information sur des problèmes de productivité de ces champs captant.
- ▶ La seconde partie de l'étude concerne la définition de secteurs dits stratégiques (ressource structurante et zone d'intérêt futur). Pour les ZIF, les critères de sélection font apparaître la potentialité de l'aquifère alluvial, qui dépend des paramètres hydrodynamiques et des épaisseurs des zones saturées. Ceci étant, les informations ont été obtenues à partir des avis des hydrogéologues agréés pour les captages existants, de la base de données du sous-sol pour les coupes géologiques et d'études hydrogéologiques locales. Ces informations sont partiellement reportées dans les fiches de synthèse : on y trouve généralement des valeurs de perméabilité (ou de transmissivité) mais peu de valeurs d'épaisseur. Ajoutons que ces connaissances ne sont pas tracées (absence de références bibliographiques).

La problématique de la connexion entre la nappe et le fleuve, ainsi que celle du colmatage des berges, n'est pas adressée dans cette étude.

### 1.2.2.6 Le Rhône en 100 questions

Selon les auteurs de cet ouvrage, le transport de sédiments fins s'est réduit depuis un siècle, mais reste important.

- ▶ Le transport des sédiments fins n'est vraiment perturbé que par les grands barrages réservoirs (Serre-Ponçon, Vouglans...). Les barrages de basse chute (la plupart des aménagements du Rhône, les retenues de la moyenne Durance, etc.) ne perturbent guère le passage des sédiments fins.
- ▶ La politique de restauration des terrains en montagne conduite depuis 1880 a aussi réduit à la source la production de sédiments fins. Les estimations donnent un transit à Arles de l'ordre de 10 millions de tonnes/an de sédiments fins aujourd'hui, contre 20 millions de tonnes/an dans les années 1950 et peut-être 30 millions de tonnes/an à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.
- ▶ Avec la raréfaction des apports de graviers et sa chenalisation, le lit du fleuve est aujourd'hui figé. Les dépôts de sédiments fins sur les berges se produisent comme avant mais ne sont plus repris (sauf crue exceptionnelle). Ils tendent donc à s'accumuler.

Cet ouvrage propose une approche macro des phénomènes sédimentaires et de leurs relations avec les aménagements hydroélectriques. Sur le domaine qui lui est concédé, la CNR doit s'assurer en permanence du maintien des caractéristiques du chenal de navigation (pour le Rhône navigable), et du respect du principe de non-aggravation des niveaux en crue. Ces missions supposent une surveillance de l'évolution des fonds du Rhône. Celle-ci est assurée par un bateau hydrographique (le Frédéric Mistral) et quatre vedettes.

Les fonds du Rhône sont levés au moins tous les cinq ans en l'absence de crue et après chaque crue décennale. Il est possible, à partir du suivi bathymétrique (hauteur des fonds), d'établir un bilan sédimentaire à l'échelle de la durée de vie des aménagements CNR, qui ont aujourd'hui entre 20 et 60 ans. A cette fin, pour chaque chute, il a été procédé à la comparaison du lever bathymétrique le plus récent au lever disponible le plus proche de la mise en service. Les bilans sédimentaires réalisés à partir des données bathymétriques ne distinguent pas la nature des sédiments (graviers, sables, limons). En outre, ils sont entachés d'une incertitude importante (équivalente à une épaisseur de 3 cm sur la surface considérée).

Le tableau suivant montre que les phénomènes sont complexes. Les excédents ne sont pas systématiques dans les retenues ; les déficits semblent généralisés sur les tronçons de Vieux-Rhône.

Il serait intéressant de pouvoir distinguer les sédiments fins des sédiments grossiers mais la bathymétrie ne le permet pas. Le lit avant aménagement était en règle générale constitué de gravier. On peut ainsi considérer que le déficit des Vieux-Rhône est un déficit de gravier. Le bilan dans les retenues est équilibré mais on peut penser que, sur la même période que celle sur laquelle est observée l'évolution bathymétrique, les graviers extraits (de l'ordre de 10 millions de m<sup>3</sup>) ont probablement été remplacés par des sédiments fins.

Figure 16 : Bilan bathymétrique des ouvrages CNR (d'après Bravard et Clémens, 2008).

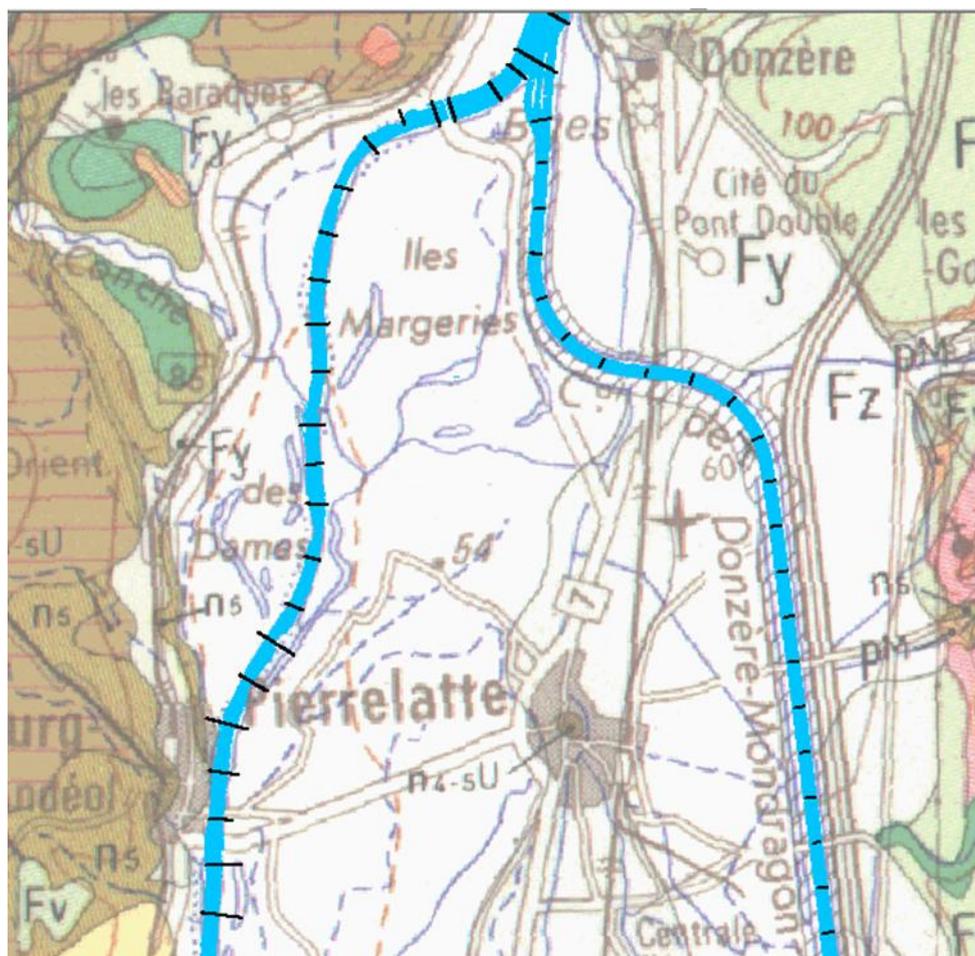
<b>BILAN BATHYMÉTRIQUE DE CHAQUE CHUTE CNR DU RHÔNE</b> (source CNR)							
Chute	Année de mise en service	Tronçon	Date du lever complet le plus ancien	Date du lever complet le plus récent	Excédent (+) ou déficit (-) en m <sup>3</sup> à la date du dernier lever		
					Retenue	Vieux-Rhône	Ensemble de la chute
Génissiat	1948	retenue	nov-54	jan-03	<b>11 700 000</b>		11 700 000
Seyssel	1951	retenue	jan-65	oct-03	17 000		17 000
Chautagne	1980	retenue	avr-87	jan-04	698 000		-952 000
		Vieux-Rhône	juil-79	jan-03		-1 650 000	
Belley	1982	retenue	avr-84	fév-03	1 134 000		3 052 000
		canal d'aménée	avr-84	oct-03	2 187 000		
		Vieux-Rhône	avr-94	fév-04		-269 000	
Brégnier-Cordon	1984	retenue	aoû-87	nov-03	466 000		824 000
		canal d'aménée	aoû-87	nov-03	388 000		
		Vieux-Rhône	mai-92	fév-99		-30 000	
Sault-Brénaz	1986	retenue	avr-90	déc-03	725 000		641 000
		Vieux-Rhône	jan-90	mars-02		-84 000	
<b>Total Haut Rhône hors Génissiat</b>							<b>3 582 000</b>
Pierre-Bénite	1966	retenue	mai-68	déc.2004	-1 840 000		-384 000
		Vieux-Rhône	nov-68	déc-01		-2 000 000	
Vaugris	1980	retenue	nov-81	fév-02	-2 600 000		-2 600 000
Péage-de-Roussillon	1977	retenue	juil-80	nov.2004	-405 000		-368 000
		Vieux-Rhône	jan-69	juil-98		37 000	
Saint-Vallier	1971	retenue	avr-74	juil. à oct. 03	-790 000		-671 000
		Vieux-Rhône	jan-76	juin-01		119 000	
Bourg-lès-Valence	1968	retenue	mars-69	mars à mai 2004	188 000		-952 000
		Vieux-Rhône	avr-69	sep-05		-1 140 000	
Beauchastel	1963	retenue	avr-69	oct-03	465 000		881 000
		Vieux-Rhône	nov-63	juin-04		416 000	
Baix-le-Logis-Neuf	1960	retenue	jan-57	avr-04	-650 000		-870 000
		Vieux-Rhône	jan-62	oct. à déc.04		-220 000	
Montélimar	1957	retenue	jan-57	déc-04	-303 000		-720 000
		Vieux-Rhône	oct-62	janv. à juil.03		-417 000	
Donzère-Mondragon	1952	retenue	juil-57	avr-04	-770 000		-4 790 000
		Vieux-Rhône	jan-53	juil.2003 à avril 2006		-4 020 000	
Caderousse	1975	retenue	mars-77	mai-04	1 699 000		1 389 000
		Vieux-Rhône	jan-85	mai-04		-310 000	
Avignon	1973	retenue	mars-77	mai-04	-1 150 000		-1 187 000
		Bras d'Avignon	76 et 88	juil-04		-135 000	
		Bras de Villeneuve	77 et 88	sep-04		98 000	
Vallabrègues	1970	retenue	jan-70	sep-04	-1 900 000		-3 100 000
		Vieux-Rhône	jan-70	mars-03		-1 200 000	
Arles	1973	courant libre	jan-74	mars-99		-385 000	-385 000
<b>Total Bas Rhône hors Génissiat</b>							<b>-17 213 000</b>
<b>Bilan hors Génissiat</b>					<b>-2 441 000</b>	<b>-11 190 000</b>	<b>-10 049 000</b>
<b>Bilan avec Génissiat</b>					<b>9 259 000</b>	<b>-11 190 000</b>	<b>1 651 000</b>

## 1.2.3 Données utiles pour appréhender les dynamiques de colmatage

### 1.2.3.1 Données bathymétriques

Les données de bathymétrie du Rhône sont visualisables sur SIG. Elles sont issues de la « BDT\_RHONE » transmise par BRLi. Elles s'organisent en profils transversaux au cours du Rhône, qui sont associés à des points renseignant la profondeur du fond du cours d'eau, ce qui permet de visualiser le profil vertical. Ces données discrétisent tout le Rhône tous les 500 m (environ 1 600 profils).

Figure 17 : Profils bathymétriques (traits noir) associés à des points cotés renseignant une profondeur, le long du canal de Donzère Mondragon et du Vieux-Rhône associé



Chaque profil est constitué de points géoréférencés en X, Y et Z, avec une précision de l'ordre de 5 cm. Les points sont généralement espacés de 5 à 10 m.

### 1.2.3.2 Données sur le fil de l'eau

Nous n'avons pas trouvé dans les documents consultés de données consolidées sur le fil d'eau dit "moyen", cette information permettant d'estimer les surfaces d'échange fleuve-nappe en situation "normale".

En revanche, le fil d'eau pour des crues infradécennales a pu être extrait de l'étude globale Rhône (CNR, 1999). Il est alors possible d'estimer la vitesse du courant en fonction de la section et du débit du Rhône. Ces données du niveau d'eau en crue décennale sont en effet associées à des données de débit. Ces deux données sont répertoriées dans des tableaux par point kilométrique (Pk) : ce sont des valeurs modélisées suivant différents scénarios et classées par sections encadrées par les ouvrages de retenue. Les valeurs Pk décroissent de 186 à 0 pour la partie en amont de Lyon (confluence avec la Saône où le Pk est à 0) et oscillent ensuite de 0 à 262 pour la partie aval.

Sont utilisées les données du scénario GENERAL1 dont les valeurs modélisées se rapprochent de données en crue de fréquence quinquennale à décennale. Ces crues sont considérées ici car elles représentent un état hydraulique capable de remobiliser fréquemment les dépôts de berge et de fond.

Ces données de hauteur d'eau et de débit ont été récoltées sur les sections du Rhône unique (pas de dérivation associée) et les sections de Vieux Rhône : les canaux de dérivation ne sont pas renseignés. Grâce au projet SIG dans lequel les données de bathymétrie peuvent être visualisées (partie 1 de la note), les différents ouvrages utilisés dans l'étude globale ont donc pu être associés à un Pk et leur localisation vérifiée.

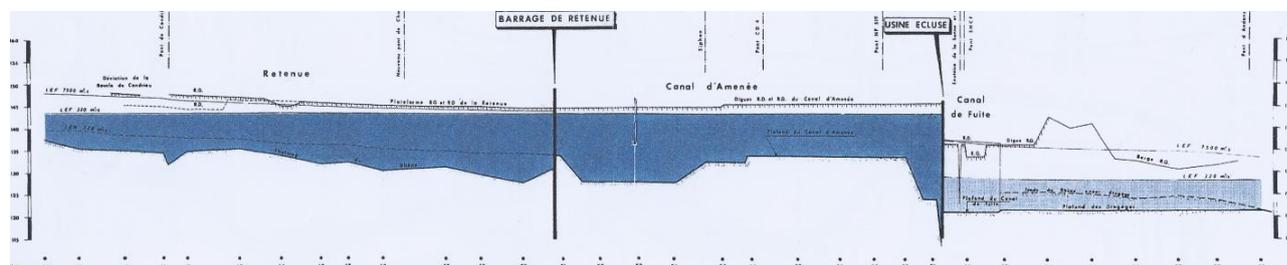
Voici ci-dessous un extrait de l'étude globale avec l'exemple de la section du Rhône comprise entre les Pk 34.2 et 50.2 (ouvrage de Péage-Roussillon) :

Figure 18 : Exemple de hauteurs d'eau (en rouge) pour la crue Générale1 - exemple de la section du Rhône à l'amont du barrage de Péage-Roussillon

Enveloppe des niveaux maximums calculés pour différents scénarios														
	GENERAL 5		GENERAL 3BIS		GENERAL 1		GENERAL 2BIS		OCEAN 1		OCEAN 3BIS		OCEAN 4	
Profil	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)
PK34.200	7437	150.00	7297	149.90	5518	148.52	6964	149.64	4704	147.79	6125	149.00	5544	148.53
PK35.000	7445	149.59	7306	149.50	5522	148.20	6969	149.24	4705	147.50	6132	148.65	5545	148.21
PK36.000	7054	149.11	6958	149.02	5525	147.77	6720	148.76	4707	147.13	6070	148.19	5543	147.77
PK37.000	6139	148.89	6061	148.80	5340	147.45	5882	148.53	4701	146.78	5522	147.92	5352	147.45
PK38.000	7477	148.53	7340	148.44	5538	147.07	6985	148.16	4709	146.41	6160	147.54	5548	147.07
PK39.000	7485	148.07	7349	147.98	5541	146.65	6989	147.71	4710	146.03	6167	147.10	5549	146.65
PK40.150	7494	147.31	7359	147.22	5546	145.88	6993	146.93	4712	145.36	6175	146.30	5550	145.88
PK41.650	7505	146.69	7369	146.61	5551	145.38	6999	146.35	4713	144.94	6183	145.76	5551	145.38
PK42.600	7515	146.19	7380	146.12	5556	144.95	7004	145.86	4714	144.57	6192	145.29	5553	144.95
PK43.600	7519	145.88	7384	145.81	5559	144.68	7007	145.56	4714	144.35	6195	144.99	5553	144.69
PK44.600	7518	145.66	7384	145.59	5559	144.47	7007	145.33	4714	144.18	6195	144.77	5553	144.48
PK45.550	7518	145.26	7384	145.19	5559	144.16	7007	144.95	4484	143.94	6194	144.41	5554	144.16
PK46.500	7518	145.08	7384	145.02	5558	144.02	6991	144.78	4420	143.85	6194	144.25	5542	144.02
PK47.400	7518	144.94	7384	144.88	5558	143.91	6990	144.65	4418	143.78	6194	144.13	5541	143.92
PK48.200	7518	144.61	7385	144.56	5558	143.67	6989	144.34	4417	143.62	6194	143.84	5540	143.68
PK49.200	7518	144.36	7385	144.31	4400	143.50	6989	144.10	4416	143.51	6193	143.62	4402	143.54
PK50.200	7518	144.06	7386	144.01	4401	143.37	6988	143.82	4415	143.37	4480	143.37	4402	143.41

Les données à l'étiage et les données « moyennes » ne sont donc pas utilisées. A l'étiage, le niveau d'eau reste très constant, comme nous pouvons le voir sur la figure suivante.

Figure 19 : Coupe hydrologique au niveau du barrage de retenue de Péage-Roussillon

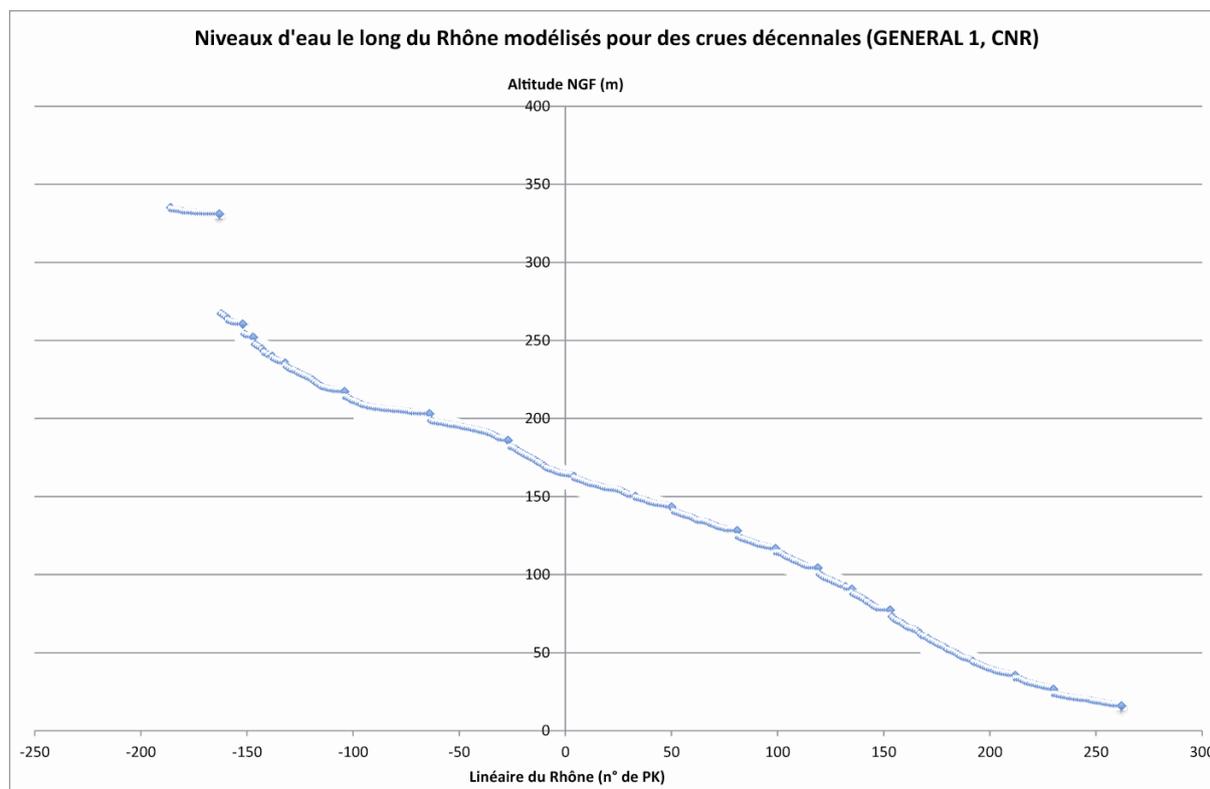


Il n'y a quasiment pas de variations de hauteur lorsqu'on se place dans l'amont immédiat d'une retenue. Pour un niveau de crue, une hausse de la hauteur d'eau est visible plus on s'éloigne du barrage de retenue et plus la crue est forte.

Les niveaux d'eau que nous étudions sont compris entre les niveaux d'étiage et les niveaux de crue décennale. Les variations de hauteur de ce niveau intermédiaire sont de l'ordre du mètre (1 à 5 m) et ne se distinguent pratiquement plus lorsqu'on approche le barrage. La démarche que nous adoptons surestime donc localement (en aval immédiat des retenues ou des usines) les hauteurs, mais nous considérons ces différences minimes et négligeables pour notre étude.

Les différentes valeurs de niveau d'eau issues de ce scénario sont reportées ci-dessous.

Figure 20 : Tracé des hauteurs d'eau modélisées pour une crue de type GENERAL1 suivant la position du PK.



### 1.2.3.3 Données sur les débits

Dans le cadre de la méthodologie proposée, il est utile de connaître les débits d'étiage, les débits moyens et les débits de crue centennale dans les différentes sections du fleuve. Ceci permet, en connaissant une section, de calculer une vitesse de courant moyenne.

Les débits d'étiage ont été extraits de l'étude globale du Rhône (CNR, 1999). Ils sont donnés au droit de chaque aménagement, ainsi que les débits réservés pour les tronçons de Vieux Rhône.

Les débits moyens et les débits en crue décennale du Rhône sont aussi tirés de cette étude (CNR, 1999). Ils sont définis comme débit de référence, aménagement par aménagement. Pour les débits dans les Vieux Rhône en crue décennale, SAFEGE (2002) a produit une approche hydraulique par modélisation. Le tableau ci-dessous en propose une synthèse.

Figure 21 : Débits caractéristiques par ouvrages

AMENAGEMENT	Q moyen	Q10	Q10 Vieux Rhône	Q étiage	Q réservé Vieux Rhône à l'étiage
Génissiat	330	2000	1250	120	5
Chautagne	400	2350	1000	160	10/20
Belley	400	2350	900	160	25/60
Brégnier-Cordon	380	1800	1000	160	80/100
Saultz Brénat	440	1800	1100	180	20/60
Pierre-Bénite	820	4400	3000	330	10
Vaugris	820	4700	3000	320	Pas de dérivation
Péage de Roussillon	830	4700	3000	320	10/20
Saint-Vallier	1000	-	3000	250	5/10
Bourg-lès-Valence	850	-	3000	350	10/20
Beauchastel	1540	5700	3500	560	10/20
Baix le Logis Neuf	1610	6000	4000	560	10/20
Montélimar	1560	6000	4200	560	15/60
Donzère Mondragon	1625	6800	4800	590	60
Caderousse	1500	7200	4100	530	5
Avignon	1600	7200	3000 + 3000	560	405
Vallabrègue	1360	8400	6200	560	10

Comme pour les niveaux d'eau du fleuve, des données de débits (en m<sup>3</sup>/s) ont donc été également reprises grâce à l'étude globale Rhône. Elles correspondent à un Pk et à une valeur de hauteur d'eau reportée déjà plus haut (cf. figure 18).

Figure 22 : Exemple de débits (en rouge) pour la crue Générale1 - exemple de la section du Rhône à l'amont du barrage de Péage-Roussillon

Enveloppe des niveaux maximums calculés pour différents scénarios															
	GENERAL 1		GENERAL 3BIS		GENERAL 1		GENERAL 2BIS		OCEAN 1		OCEAN 3BIS		OCEAN 4		
Profil	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	Débit	Z (m NGF)	
PK34.200	7437	150.00	7297	149.90	5518	148.52	6964	149.64	4704	147.79	6125	149.00	5544	148.53	
PK35.000	7445	149.59	7306	149.50	5522	148.20	6969	149.24	4705	147.50	6132	148.65	5545	148.21	
PK36.000	7054	149.11	6958	149.02	5525	147.77	6720	148.76	4707	147.13	6070	148.19	5543	147.77	
PK37.000	6139	148.89	6061	148.80	5340	147.45	5882	148.53	4701	146.78	5522	147.92	5352	147.45	
PK38.000	7477	148.53	7340	148.44	5538	147.07	6985	148.16	4709	146.41	6160	147.54	5548	147.07	
PK39.000	7485	148.07	7349	147.98	5541	146.65	6989	147.71	4710	146.03	6167	147.10	5549	146.65	
PK40.150	7494	147.31	7359	147.22	5546	145.88	6993	146.93	4712	145.36	6175	146.30	5550	145.88	
PK41.650	7505	146.69	7369	146.61	5551	145.38	6999	146.35	4713	144.94	6183	145.76	5551	145.38	
PK42.600	7515	146.19	7380	146.12	5556	144.95	7004	145.86	4714	144.57	6192	145.29	5553	144.95	
PK43.600	7519	145.88	7384	145.81	5559	144.68	7007	145.56	4714	144.35	6195	144.99	5553	144.69	
PK44.600	7518	145.66	7384	145.59	5559	144.47	7007	145.33	4714	144.18	6195	144.77	5553	144.48	
PK45.550	7518	145.26	7384	145.19	5559	144.16	7007	144.95	4484	143.94	6194	144.41	5554	144.16	
PK46.500	7518	145.08	7384	145.02	5558	144.02	6991	144.78	4420	143.85	6194	144.25	5542	144.02	
PK47.400	7518	144.94	7384	144.88	5558	143.91	6990	144.65	4418	143.78	6194	144.13	5541	143.92	
PK48.200	7518	144.61	7385	144.56	5558	143.67	6989	144.34	4417	143.62	6194	143.84	5540	143.68	
PK49.200	7518	144.36	7385	144.31	4400	143.50	6989	144.10	4416	143.51	6193	143.62	4402	143.54	
PK50.200	7518	144.06	7386	144.01	4401	143.37	6988	143.82	4415	143.37	4480	143.37	4402	143.41	

Notons que certains problèmes récurrents sont rencontrés en lien avec la validité de ces données de débits. Il est en effet observé que localement les valeurs chutent brutalement à l'amont de certains ouvrages, alors qu'aucune configuration hydrologique, géomorphologique et/ou hydrogéologique ne l'expliquerait. Après consultation de la CNR, il s'agit en réalité d'erreurs : ces débits décroissants correspondent en fait aux dérivées qui ont des débits moins importants que les Vieux Rhône en période de crue. Ces erreurs ne seront pas prises en compte.

## 1.2.4 Premiers avis

### 1.2.4.1 Considérations physiques

Il est couramment admis que le transport de matériaux solides en rivière se fait sous deux formes (Malavoi et al., 2011) :

- ▶ par charriage sur le fond lorsque ces matériaux dépassent un certain diamètre et que le courant ne peut les mettre en suspension ; ils se déplacent alors en contact quasi-permanent avec le fond par roulement et petits sauts ;
- ▶ en suspension lorsque les matériaux sont suffisamment fins et le courant suffisamment puissant pour les transporter au sein de la colonne d'eau.

Rappelons que la perméabilité moyenne des alluvions de la nappe d'accompagnement du Rhône est comprise entre  $10^{-2}$  et  $10^{-3}$  m/s (graviers à sables grossiers de diamètre comprise entre 0,1 et 50 mm).

Le colmatage va donc intéresser les classes granulométriques suivantes ( $K < 10^{-4}$  m/s) :

- ▶ Sables fins à très fins (0,005 < d10 < 0,1 mm) ;
- ▶ Silts : d10 compris 0,001 à 0,005 mm.

Figure 23 : Correspondance entre granulométrie et perméabilité (Castany, 1982).

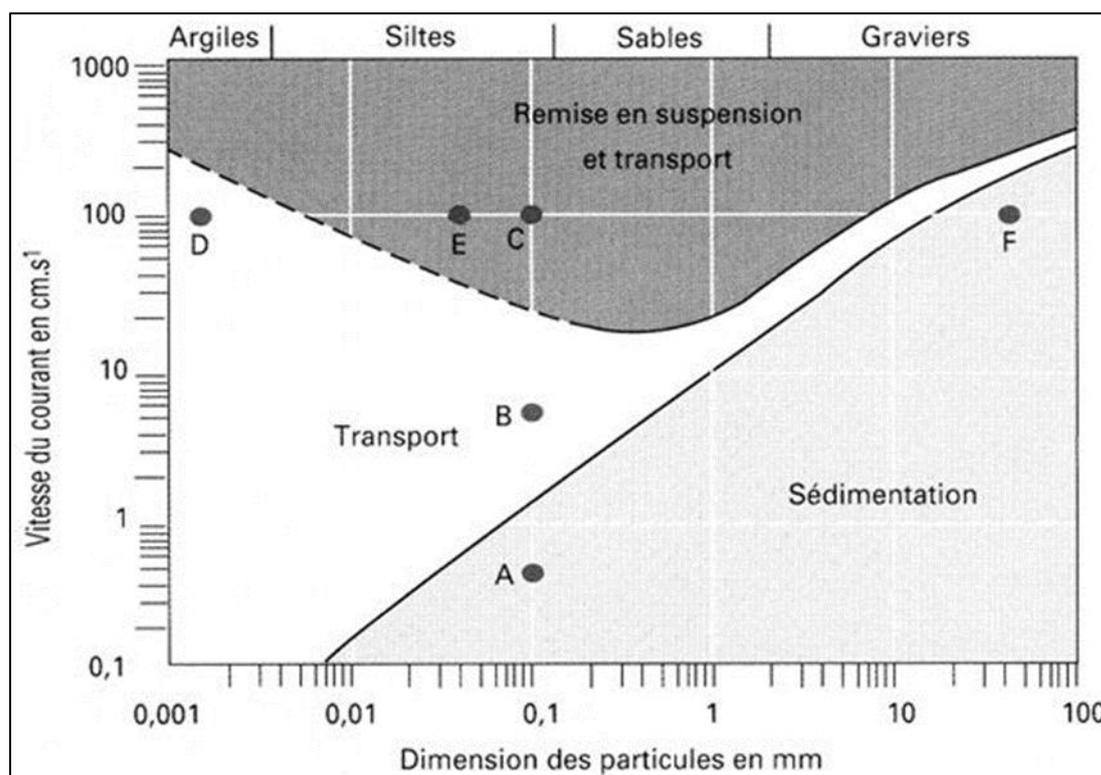
$-\log_{10} K \text{ (m/s)}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
<b>Perméabilité</b>	perméable			semi-perméable				imperméable								
<b>À pollution</b>	bon				satisfaisant				mauvais							
<b>matériau dominant</b>	gravier		sable		sable fin, silt, limon, vase											
<b>matériau accumulé</b>									grès		calcaire		granite			
$-\log_{10} \rho_s \text{ (kg/m}^3\text{)}$	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6		
$\log_{10} d \text{ (mm)}$	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5		

(Température de l'eau = 20°C)

On peut observer qu'à cette gamme de granulométrie correspond une gamme étendue de perméabilité, de  $10^{-4}$  à  $10^{-8}$  m/s.

La question qui se pose est donc celle de la granulométrie des sédiments fins susceptibles de se déposer au fond ou sur les berges du fleuve. La courbe de Hjulstrom permet une approche en première approximation pour répondre à cette interrogation (cf. figure suivante).

Figure 24 : Courbe de Hjulstrom



On peut noter que selon la courbe de Hjulstrom, le colmatage par des sables très fins ( $K < 10^{-5}$  m/s) se fait principalement pour des vitesses de courant inférieures à 1 cm/s.

La courbe de Hjulstrom présente une limite très nette au niveau du couple « diamètre 0,5 mm - vitesse 20 cm/s », que beaucoup interprètent comme une limite charriage/suspension. Notons cependant que ce même sable de 0,5 mm pourra être transporté en suspension pour des vitesses plus importantes. La classe des sables toute entière est une classe intermédiaire entre le charriage et la suspension, fonction des vitesses d'écoulement et de la turbulence. On comprend mieux aussi grâce à cette courbe le caractère « transitoire » du transport par charriage. Au-delà de cette valeur de l'ordre de 0,5 mm, si le grain est mis en mouvement pour une certaine vitesse d'écoulement, il se redépose pour une valeur à peine inférieure, alors que, lorsque l'on est dans la classe des limons, une fois le grain en mouvement, il se déplace vers l'aval sensiblement à la même vitesse que l'eau et ne se déposera plus que sous des conditions hydrauliques quasi-stagnantes.

Un autre paramètre contrôlant les mécanismes de dépôt et de remise en suspension des fines est la contrainte de cisaillement adimensionnelle  $\theta$  qui représente le rapport de force entre les forces responsables de l'entraînement des particules est celles responsables de leur stabilité (Gayraud et al., 2002) :

$$\theta = RS / [d_{50} \cdot (G_s - 1)]$$

- ▶ Avec R le rayon hydraulique (approximativement égal à la profondeur moyenne),
- ▶ S la pente de la ligne d'énergie,
- ▶  $d_{50}$  la diamètre médian des matériaux du lit,
- ▶ et  $G_s$  la densité des sédiments en place.

On notera la relation de proportionnalité entre la pente hydraulique, la profondeur du cours d'eau et la capacité à remobiliser les fines.

### 1.2.4.2 Cas du Rhône

Dans le cas du Rhône, l'approche des dynamiques de colmatage est complexifiée par le caractère très aménagé du cours d'eau.

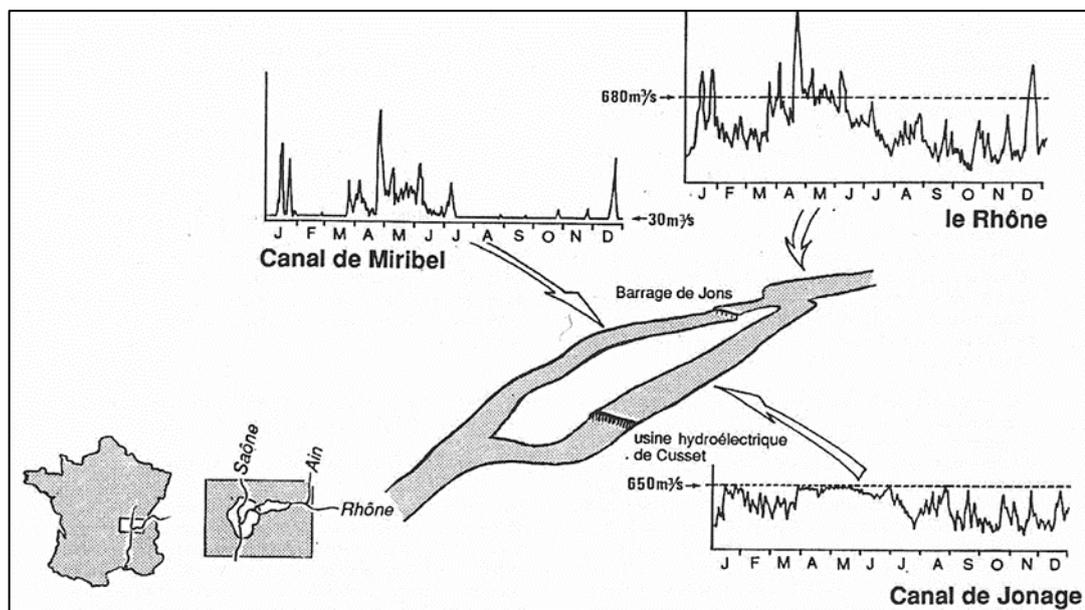
De manière très générale, il est admis que la grande majorité des barrages à long temps de séjour (généralement hauts et de volume important) bloquent intégralement et définitivement la charge solide de fond. C'est pour cette raison que l'on observe généralement une érosion progressive intense en aval de ces ouvrages. On observe aussi des stockages de plus ou moins longue durée en amont d'ouvrages de faible hauteur ainsi qu'en amont d'ouvrages de franchissement ou encore dans d'anciennes fosses d'extraction en lit mineur, voire dans des gravières en lit majeur ayant « capturé » le cours d'eau. Il s'agit là d'un stockage temporaire dont la durée, du fait des « aménagements », dépasse largement la durée « normale » de stockage dans des conditions naturelles d'écoulement.

Pour le Rhône, de nombreux travaux de recherche ont approché directement ou indirectement les dynamiques de sédimentations en cours suite aux aménagements : Klingeman et al., 1994 ; Savey, 1982 ; Poinart et al., 1989 ; Bravard, 1993 ; Tricart et Bravard, 1991 ; Kondolf, 1997 ; Malavoi et Souchon, 2002 ; Souchon et Nicolas, 2011.

Concernant les dynamiques de sédimentation en général, rappelons les éléments suivants :

- Le charriage qui résulte de l'érosion du lit est très fortement atténué par les aménagements qui ont réduit la pente de la ligne d'eau. Il n'est pas nul pour autant, avec d'importants transits de sables et de graviers qui se font dans le fond du lit lors des crues de fréquence au moins annuelle. La charge de fond est réputée caillouteuse. A ce sujet, rappelons la spécificité hydraulique induite par les ouvrages de la CNR : les débits dans les parties court-circuitées commencent à croître au delà des débits réservés lorsque le débit du Rhône à l'amont des ouvrages de retenue excède les débits turbinables. Ce fonctionnement crée une exagération des vitesses de croissance et de décroissance. Les tronçons court-circuités se comportent comme des rivières de rang inférieur aux eaux peu profondes, bien reliées aux circulations phréatiques, d'autant plus qu'elles sont épargnées par les flux de vidange.

Figure 25 : Exemple de la répartition des débits - Canaux de Miribel et Jonage en 1986 (d'après Poinart et al., 1989).



- ▶ Le transport par suspension provient fort peu du lit du fleuve mais surtout du bassin versant. Bien que ralenties par les aménagements, les vitesses des courants sont la plupart du temps suffisantes pour éviter la décantation de ces sédiments et ceux-ci sont donc majoritairement conduits à la mer. A deux exceptions près : la retenue de Génissiat et les avants-ports d'écluses.
- ▶ L'étude des dépôts associés aux crues (sédimentation en plaines, dans les fonds et les berges de lônes ou bras abandonnés, ...) montre qu'il s'agit principalement de sables fins avec des médianes comprises entre 150 et 300 microns et le percentile le plus grossier entre 300 et 600 microns. Localement, dans les zones de moindre vitesse (bras morts, arrières des levées), les dépôts présentent une granulométrie plus réduite : entre 5 et 50 microns. C'est donc ce type de sédiments qui va majoritairement constituer les dépôts de fond ou de berges, entre deux crues significatives qui vont conduire à leur remobilisation. Les auteurs s'accordent sur l'absence de charges en sables moyens et grossiers ; cela serait dû à une moindre mobilisation en tête de bassin versant et à des piègeages dans les retenues positionnées sur les principaux affluents.
- ▶ L'infiltration dans la zone hyporhéique est bien décrite par Gayraud et al. (2002). La profondeur de pénétration des particules est influencée par la taille des particules transportées, l'homogénéité des particules qui constituent l'armure et la taille des pores. Les auteurs considèrent que lors d'un apport ponctuel de sédiments fins, la profondeur maximale de pénétration varie entre 2,5 et 5 fois le  $d_{90}$  (diamètre non dépassé par 90 % des particules) de l'armure, en fonction du diamètre des sédiments fins et des conditions d'écoulement. Dans des conditions expérimentales, il a été démontré qu'un apport de sédiments localisé dans le temps n'influence que les dix-quinze premiers centimètres. En effet le colmatage de cette zone forme une barrière qui se comporte comme un filtre et empêche la pénétration en profondeur des particules plus fines. Toutefois, compte tenu de la durée et de la répétition des apports de sédiments qui se produisent en milieu naturel, ceux-ci migrent probablement plus profondément ce qui conduit à leur stockage en profondeur. Du point de vue spatial, compte tenu des échanges qui se produisent entre la surface et l'hyporhéos, les zones d'infiltration pourraient être plus sensibles au colmatage que les zones d'exfiltration et les zones où l'écoulement est laminaire. En théorie, ces échanges verticaux ont une influence secondaire par rapport aux facteurs cités précédemment (concentration et taille des MES, taille des particules de l'armure...). Néanmoins, en reproduisant en canal expérimental un gradient hydraulique vertical suffisamment fort, il a été démontré que le colmatage ne se développe pas sur les zones d'exfiltration, contrairement à ce qui se passe dans les zones d'infiltration. De plus, une phase d'exfiltration à la suite d'une phase d'infiltration permet d'expulser les sédiments fins qui se sont accumulés pendant l'infiltration. Les auteurs citent une étude basée sur la répartition verticale des sédiments fins dans l'hyporhéos d'un cours d'eau suisse. En moyenne, les zones d'exfiltration présentent une concentration en sédiments fins (organiques et inorganiques) maximale à 0,50 m de profondeur tandis qu'elle est maximale à 1,50 m dans les zones d'infiltration et les zones à écoulement horizontal.

Concernant l'impact des aménagements sur les dynamiques de sédimentation :

- ▶ La cause principale des perturbations réside dans la diminution et la régularisation des vitesses qui sont produites par l'accroissement de la section en travers et la réduction de la pente de la ligne d'eau. Le phénomène est d'autant plus marqué que les fluctuations verticales de niveau n'excèdent pas 0,50 à 1 m en fonctionnement quotidien ou à l'occasion des crues.

- La question majeure est la sédimentation des matières en suspension dans les réservoirs, notamment dans celui de Verbois à l'aval de Genève. Tous les trois ans, une vidange permet la chasse d'un faible tonnage de graviers et de troubles ; les fines transitent par l'ouvrage de Chancy-Pougny et par le réservoir de Génissiat dont le plan d'eau est, pour l'occasion, abaissé par la Compagnie nationale du Rhône. Depuis l'accident de 1978, année où la chasse intempestive provoqua une grave pollution sur le Rhône amont, la technique des vidanges est bien maîtrisée mais doit composer avec la présence des ouvrages à dérivation de Chautagne, Belley, Brégner-Cordon et Sault-Brenaz achevés entre 1981 et 1986. Les retenues, et notamment leurs secteurs de surlargeur, sont le siège d'un rapide dépôt de matières en suspension qui change progressivement les caractéristiques géométriques des plans d'eau. Sur le Rhône aval, les apports en suspension de l'Isère sont également responsables de dépôts importants que les crues ne peuvent évacuer complètement. Au total, la réduction des vitesses et le dépôt corrélatif des fines provoquent une modification de la nature des biocénoses.

## 2. EVOLUTIONS METHODOLOGIQUES

### 2.1 CONSIDERATION GENERALES

#### 2.1.1 Eléments de méthode

Selon les éléments proposés dans le CCTP, BRLi propose un système dit Rhône, composé des éléments suivants :

- ▶ le fleuve et ses affluents directs ;
- ▶ la nappe d'accompagnement ;
- ▶ les nappes latérales en interaction forte avec le système Rhône. Ces nappes étaient proposées dans le CCTP, suite à un premier travail d'identification réalisé au sein de l'Agence.

Notons que les nappes latérales proposées correspondent soit à des nappes alluviales (relation directe avec un cours d'eau affluent du Rhône), soit à des nappes fluvioglaciaires (corps sédimentaire hérité des périodes de glaciation avec une relation indirecte, voire inexistante, avec le réseau hydrographique superficiel). Précisons que toutes les nappes alluviales ne faisaient pas partie de la première définition proposée. Ajoutons qu'en dehors du système Rhône restent les aquifères karstiques, les aquifères complexes de zones de montagne, les aquifères fissurés (en particulier dans le Massif Central) ou les grands bassins molassiques (en particulier les accumulations miocènes en rive gauche du Rhône).

Dans le cadre de la méthodologie globale mise en place, notre intervention est centrée sur la problématique de l'impact des prélèvements souterrains, à l'échelle du bassin versant, sur les débits estivaux du Rhône.

A ce sujet, rappelons une considération d'ordre général : « L'eau va toujours à la rivière ». Cela signifie que dans les conditions naturelles usuelles, le réseau superficiel draine en période d'étiage les nappes qu'il traverse. Si nous nous intéressons aux échanges entre nappes et rivières, nous concevons intuitivement que seul importe l'aspect transitoire des phénomènes puisque tout prélèvement effectué dans une nappe constitue tôt ou tard un préjudice pour le réseau superficiel.

Il en résulte les considérations générales suivantes :

- ▶ A l'échelle du bassin versant, tout prélèvement constant dans le temps implique une perte équivalente au réseau hydrographique et donc au Rhône. Illustrons : si on prélève par pompage dans un forage 100 l/s en continu 12 mois sur 12 mois dans une nappe karstique qui vient alimenter un affluent du Rhône, on peut considérer que le Rhône subit un préjudice de 100 l/s sur son débit d'étiage. C'est la majorité des prélèvements pour AEP qui sont dans cette situation (prélèvements pseudo constants durant l'année).
- ▶ Inversement, il n'existe pas de règle simple pour anticiper l'impact d'un prélèvement transitoire sur les débits estivaux des cours d'eau. La part du débit prélevé en nappes susceptibles de venir en préjudice aux cours d'eau dépend de nombreux paramètres : paramètres hydrodynamiques, distance entre cours d'eau et points de prélèvements, degré de colmatage des berges, etc.

### 2.1.2 Vers une méthode expéditive d'estimation de l'impact d'un prélèvement en nappe sur le débit estival du Rhône

Au vu des considérations développées ci-dessus, nous proposons de distinguer prélèvements permanents et prélèvements temporaires dans les nappes.

- ▶ Tout prélèvement permanent dans une nappe dans le bassin versant du Rhône sera considéré comme un préjudice direct et proportionnel au débit estival du fleuve. Par simplicité, l'affectation aux sous-bassins hydrologiques sera réalisée en prenant comme hypothèse que le bassin hydrogéologique correspond au bassin hydrographique.
- ▶ Les prélèvements temporaires devront faire l'objet d'approches plus détaillées. Rappelons qu'il s'agit majoritairement de prélèvements estivaux à destination de l'irrigation par les agriculteurs.

**Il en résulte que le travail d'analyse hydrogéologique porte principalement sur les nappes sollicitées pour l'irrigation en période estivale. Il s'agit principalement des nappes suivantes :**

- ▶ Nappes alluviales quaternaires, dont la nappe d'accompagnement du Rhône ;
- ▶ Nappes fluvio-glaciaires, caractérisées par une forte productivité, des niveaux piézométriques proches du sol et des surfaces affleurantes plus ou moins planes ;
- ▶ Nappes des séries mollassiques miocènes. Bien que moins productive, ces nappes se trouvent à de faibles profondeurs et font l'objet de nombreux prélèvements à destination de l'agriculture.

Notons l'hypothèse forte d'absences de prélèvements importants à destination de l'agriculture dans les aquifères karstiques et les aquifères fissurés. Ce type d'aquifères présente des caractéristiques peu propices au développement d'importants prélèvements pour l'agriculture : des difficultés de captage, des reliefs forts, des sols peu développés, etc.

Pour déterminer l'impact potentiel des prélèvements estivaux dans les masses d'eau souterraine, nous proposons une méthodologie dite en « poupées russes », en fonction de la complexité des systèmes hydrogéologiques et du degré de précision attendue de l'approche :

- ▶ Pour la nappe alluviale du Rhône, nous mettrons en œuvre une approche combinant une sectorisation du Rhône et une approche par modélisation hydrodynamique. Il s'agit de se doter d'une grille d'analyse pour chaque configuration hydrogéologique possible. Cette grille d'analyse résultera d'une approche par analyses de sensibilité afin d'intégrer au mieux toute la complexité de l'aquifère alluvial rhodanien (variation des paramètres hydrodynamiques, distance aux berges, degré de colmatage supposé, impact des aménagements, influences des encaissements).
- ▶ Pour les nappes alluviales des affluents du Rhône, nous proposons une approche avec une grille d'analyse basée sur les paramètres suivants : débit de pompage et distance aux affluents. Les paramètres hydrodynamiques seront fixés de manière arbitraire comme des constantes et on fera implicitement l'hypothèse d'une absence de colmatage des berges susceptible de réduire les échanges nappes rivière. Cette grille d'analyse sera définie par l'exploitation de la formule de Theis (1935).
- ▶ Pour les nappes fluvio-glaciaires, une approche de type phénoménologique par modélisation hydrodynamique (modèle maillé simplifié de grande échelle) sera mise en œuvre. Rappelons en effet que les systèmes fluvio-glaciaires, bien que très perméables, sont indirectement connectés au système Rhône : connexion souterraine pour certains d'entre eux (Garon, nappes de l'Est Lyonnais, etc.) ou par le biais de résurgences aux limites des systèmes (systèmes de la plaine du Léman, systèmes de la région de Vienne). Il s'agira donc de déterminer pour quelle distance et à partir de quelle gamme de débit les prélèvements dans ces deux types de systèmes sont susceptibles de venir impacter les débits estivaux du Rhône.

- ▶ De la même façon, pour les grands bassins molassiques, une approche de type phénoménologique par modélisation hydrodynamique (modèle maillé simplifié de grande échelle) sera mise en œuvre sur la même trame que celle proposée pour les systèmes fluvio-glaciaires. Ces systèmes, bien que moins perméables, sont connectés au système Rhône selon les mêmes modalités : connexions souterraines (secteur du Haut Dauphiné) ou via des résurgences aux limites du système (bassins molassiques du Bas Dauphiné et du Comtat). Il s'agira donc de déterminer pour quelle distance et à partir de quelle gamme de débit les prélèvements dans ces systèmes sont susceptibles de venir impacter les débits estivaux du Rhône.

Avec ces trois types d'aquifères (nappe alluviale du Rhône, nappes alluviales des affluents, nappes fluvio-glaciaires et bassins molassiques), on couvre la totalité des systèmes aquifères susceptibles d'être impactés par les prélèvements estivaux. En effet, rappelons qu'ils correspondent à la majorité des aquifères interagissant. Restent les aquifères karstiques que l'on observe depuis le bas jusqu'au haut-Rhône. Ces systèmes se caractérisent toutefois par des morphologies de plateaux ou de chaînes de montagne peu propices au développement agricole ; les prélèvements estivaux destinés à l'irrigation y sont marginaux.

### 2.1.3 Redéfinition des nappes en interaction potentielle avec le système Rhône

Le CCTP stipule que nous nous intéressons au fleuve Rhône depuis le lac Léman jusqu'à la mer et qu'il doit être notamment étudié dans sa « dimension latérale ». Cela nécessite la définition du lien qu'il entretient avec ses affluents, la nappe alluviale et les nappes dites latérales.

L'étude hydrogéologique correspondant à cette dimension latérale s'étend donc aux nappes souterraines susceptibles de venir contribuer in fine au débit du Rhône en période estivale. Leurs limites géographiques sont situées dans le bassin versant du Rhône défini en début d'étude.

Le CCTP liste ces aquifères latéraux considérés comme contributifs à l'alimentation du fleuve et sa nappe alluviale : ils correspondent plus exactement à 32 aquifères issus de la base de données de l'Agence de l'eau.

Figure 26 : Liste initiale des nappes en interaction potentielle.

<i>Alluvions de la Bièvre</i>
<i>Alluvions de la basse vallée du Guiers</i>
<i>Terrasses fluvio-glaciaires du Rhône entre Vertrieu et Saint Romain de Jalionas</i>
<i>Alluvions de la plaine de l'Ain</i>
<i>Formations fluvio-glaciaires de Meximieux à Montluel</i>
<i>Alluvions anciennes du paléo-Rhône à Saint-Genis-Laval</i>
<i>Alluvions de la vallée du Garon</i>
<i>Alluvions des terrasses de Beausemblant</i>
<i>Alluvions de l'Ozon</i>
<i>Alluvions de la Varèze</i>
<i>Formations glaciaires du plateau de Louze, de Saint-Prim et de Salaise-sur-Sanne</i>
<i>Alluvions du Doux</i>
<i>Alluvions du Gier</i>
<i>Alluvions de l'Isère en amont de la confluence avec le Rhône</i>
<i>Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire</i>

<i>Formations fluvioglaciales du couloir de Meyzieu</i>
<i>Formations fluvioglaciales du couloir de Décines-Chassieu</i>
<i>Formations fluvioglaciales du couloir d'Heyrieux</i>
<i>Alluvions de la Drôme (aval de Crest)</i>
<i>Alluvions anciennes de la plaine de Valence</i>
<i>Alluvions anciennes des basses terrasses entre la confluence de l'Isère et de la Drôme</i>
<i>Alluvions anciennes des terrasses de l'Isère</i>
<i>Alluvions de la plaine de la Valdaine</i>
<i>Alluvions des hautes terrasses de Donzère</i>
<i>Alluvions de l'Aigues et du Lez</i>
<i>Alluvions de l'Ouvèze</i>
<i>Alluvions des Sorgues et de la Nesque</i>
<i>Alluvions récentes de la Basse Durance</i>
<i>Alluvions de l'Ardèche à la confluence du Rhône</i>
<i>Alluvions quaternaires de la basse vallée de la Cèze</i>
<i>Alluvions quaternaires de la Tave</i>
<i>Alluvions quaternaires du Bas Gardon en aval de Remoulins</i>

Lors des premières phases d'échange avec BRLi, il est apparu que cette liste est trop restrictive. D'autres nappes sont susceptibles d'impacter les débits estivaux du Rhône en cas de prélèvements l'été.

Après observation globale de l'ensemble des systèmes aquifères du bassin versant, nous proposons donc l'addition de certaines nappes souterraines jugées potentiellement contributives au système hydrologique du Rhône et à la piézométrie de sa nappe alluviale.

Cette proposition est sujette à un arbitrage demandé à l'Agence de l'eau le 24/01/13.

S'il est décidé de continuer à travailler sur les nappes annoncées dans le CCTP ainsi que celles proposées, voici la liste des objets à étudier :

Figure 27 : Nouvelle liste des nappes en interaction potentielle.

Code Masse d'eau souterraine (Agence)	Nom Masse d'eau souterraine (Agence)	Code BD Lisa (BRGM)
6101	Alluvions anciennes de la Vistrenque et des Costières	150A, 150B, 150C, 150E, 150D
6135	Formations plio-quadernaires de la Dombes	151A2
6209	Conglomérats du plateau de Valensole ?	PAC04C
6218	Molasses miocènes du Comtat ?	PAC04A
6219	Molasses miocènes du Bas Dauphiné entre les vallées de l'Ozon et de la Drôme	MIO3
6225	Sables et graviers pliocènes du Val de Saône	PLIO1
6303	Alluvions de la Plaine de Bièvre-Valloire	152K
6304	Alluvions de la Plaine de Chambéry	385
6306	Alluvions de la vallée du Doubs	17A
6308	Alluvions de l'Arc en Maurienne	384
6313	Alluvions de l'Isère aval de Grenoble	325D
6314	Alluvions de l'Isère Combe de Savoie et Grésivaudan	325A, 325B
6315	Alluvions de l'Ognon	320A, 320B, 60A
6319	Alluvions des vallées de Vienne (Véga, Gère, Vesonne, Sévenne)	152O, 152P
6321	Alluvions du Drac amont et Séveraisse	PAC14A1
6327	Alluvions du Roubion et Jabron - plaine de la Valdaine	369
6334	Couloirs de l'Est lyonnais (Meyzieu, Décines, Mions)	152C, 152D, 152E
6337	Alluvions de la Drôme	154C1, 154C2
6340	Alluvions de la Bourbre - Cattelan	152H
6341	Alluvions du Guiers - Herretang	543B1
6342	Formations fluvio-glaciaires du couloir de Certines - Bourg-en-Bresse	151A5
6344	Alluvions de la Saône en amont du confluent de l'Ognon	19A
6346	Alluvions de la Bresse - plaine de Bletterans	87E uniquement plaine de Bletterans
6347	Alluvions Durance amont	PAC02A
6349	Alluvions de la Bresse - plaine de la Vallière	87F
6517	Domaine sédimentaire du Genevois et du Pays de Gex (molasses et formations IVaires)	117A, 117B
6103new1	Alluvions anciennes de la Plaine de Valence	154A, 154B1
6103new2	Alluvions anciennes terrasses de Romans et de l'Isère	152M
6201new2	Formations glaciaires et fluvio-glaciaires du Bas-chablais, terrasses Thonon et Delta de la Dranse	177C2, 177C3
6219new2	Formations quadernaires en placage discontinu du Bas Dauphiné et terrasses region de Roussillon	152S, 152R, 543B3, 152X2
6301new1	Alluvions des plaines du Comtat Aigues Lez	PAC01A1
6301new2	Alluvions des plaines du Comtat Ouvèze	PAC01A2
6301new3	Alluvions des plaines du Comtat Sorgues	PAC01A3
6302new1	Alluvions de la Bléone	PAC02H
6302new2	Alluvions de l'Asse	PAC02I
6302new3	Alluvions de la moyenne Durance	PAC02C

Code Masse d'eau souterraine (Agence)	Nom Masse d'eau souterraine (Agence)	Code BD Lisa (BRGM)
6302new4	<i>Alluvions de la Durance moyenne panache pollution historique aval St Auban</i>	PAC04C
6302new5	<i>Alluvions basse Durance</i>	PAC02E
6305new1	<i>Alluvions de la Saône entre le confluent du Doubs et le seuil de Tournus</i>	BOU19D
6305new2	<i>Alluvions Saône entre seuil de Tournus et confluent avec le Rhône</i>	151X, 540X, 621B
6307new1	<i>Alluvions de la Savoureuse</i>	322A
6307new2	<i>Alluvions de l'Allan, Allaine et Bourbeuse</i>	323A
6309new1	<i>Alluvions de l'Arve</i>	324A
6309new2	<i>Alluvions du Giffre</i>	323
6317new1	<i>Alluvions de la rive gauche du Drac et secteur Rochefort</i>	325C découpé RG Drac et romanche eau bonne qualité
6317new2	<i>Alluvions Drac-Romanche sous influence pollutions historiques industrielles Jarrie et Pont-de-Claix</i>	325C découpé sur base extension secteur 6317b
6317new3	<i>Alluvions aggro grenobloise confluent Isère / Drac</i>	325C découpé sur base secteur sous aggro
6317new4	<i>Alluvions de la Romanche vallée d'Oisans, Eau d'Olle et Romanche aval</i>	326
6320new1	<i>Alluvions de la Saône entre les confluent de l'Ognon et du Doubs</i>	BOU19C
6320new2	<i>Alluvions de la basse vallée de la Loue entre Quingey et la confluence avec le Doubs</i>	10A, 10B
6320new4	<i>Alluvions interfluve Saone-Doubs - panache pollution historique industrielle</i>	ancien secteur 6320c
6324new3	<i>Alluvions de la Cèze</i>	327F
6325b_new	<i>Alluvions du Garon</i>	621D
6329new2	<i>Alluvions plaine de la Tille (superficielle et profonde)</i>	BOU21A
6329new3	<i>Alluvions de l'Ouche, de la Dheune, de la Vouge et du Meuzin</i>	BOU23B, BOU26A, BOU24A, BOU25A
6339new1	<i>Plaine de l'Ain amont</i>	94B pp, 95B9
6339new2	<i>Plaine de l'Ain aval</i>	94B pp, 151F1
6345new1	<i>Alluvions de l'interfluve Breuchin - Lanterne en amont de la confluence</i>	14A découpé au niveau du verrou triasique
6345new2	<i>Alluvions de la Lanterne et de ses affluents en aval de la confluence Breuchin-Lanterne</i>	14A découpé au niveau du verrou triasique
6347new	<i>Alluvions du Buëch</i>	PAC02G

Comme argumenté ci-avant, les nouvelles nappes souterraines proposées sont soit des aquifères de type fluvio-glaciaires, des nappes alluviales d'affluents directs ou indirects du Rhône ou de grands bassins molassiques venant alimenter le système Rhône.

Rappelons que cette possible extension du système ne préjuge en rien de l'avis final sur les interactions supposées. Il s'agit, dans un premier temps, d'étendre la liste des nappes en possibles interactions ; puis, dans un deuxième temps, d'étudier leur dynamique afin de qualifier leur inertie et donc de pouvoir estimer la réalité des impacts des prélèvements sur le débit du fleuve.

## 2.2 SECTORISATION DE LA NAPPE ALLUVIALE DU RHONE

### 2.2.1 Stratégie globale

Nous proposons un travail de sectorisation de la nappe alluviale du Rhône, suivant trois approches complémentaires :

- ▶ Une première sectorisation de la nappe alluviale au regard de la position des ouvrages de retenue permettant de délimiter des secteurs sous influence ou non des ouvrages de la CNR.
- ▶ Une deuxième sectorisation de la nappe alluviale en fonction de la présence de formations aquifères susceptibles de venir suralimenter localement la nappe. Elle est basée sur une analyse de la piézométrie et des formations géologiques encadrant la vallée alluvionnaire, afin de parvenir à une délimitation de zones influencées ou non par la piézométrie de ces structures dites encaissantes.
- ▶ Une troisième sectorisation de la nappe alluviale liée aux facteurs d'échange nappe-rivière. Elle sera basée sur une analyse statistique de la géométrie du lit mineur du Rhône, à laquelle nous associons un indice du degré potentiel de colmatage.

La combinaison de ces trois approches méthodologiques de sectorisation du Rhône nous permettra d'obtenir une mosaïque de zones correspondant à des paramètres et des critères supposés homogènes. Ce panel d'informations reporté sur SIG (format commun sur ArcGIS comme précisé dans le CCTP) facilitera alors la lecture des caractéristiques d'un secteur donné associé à un ou plusieurs prélèvements.

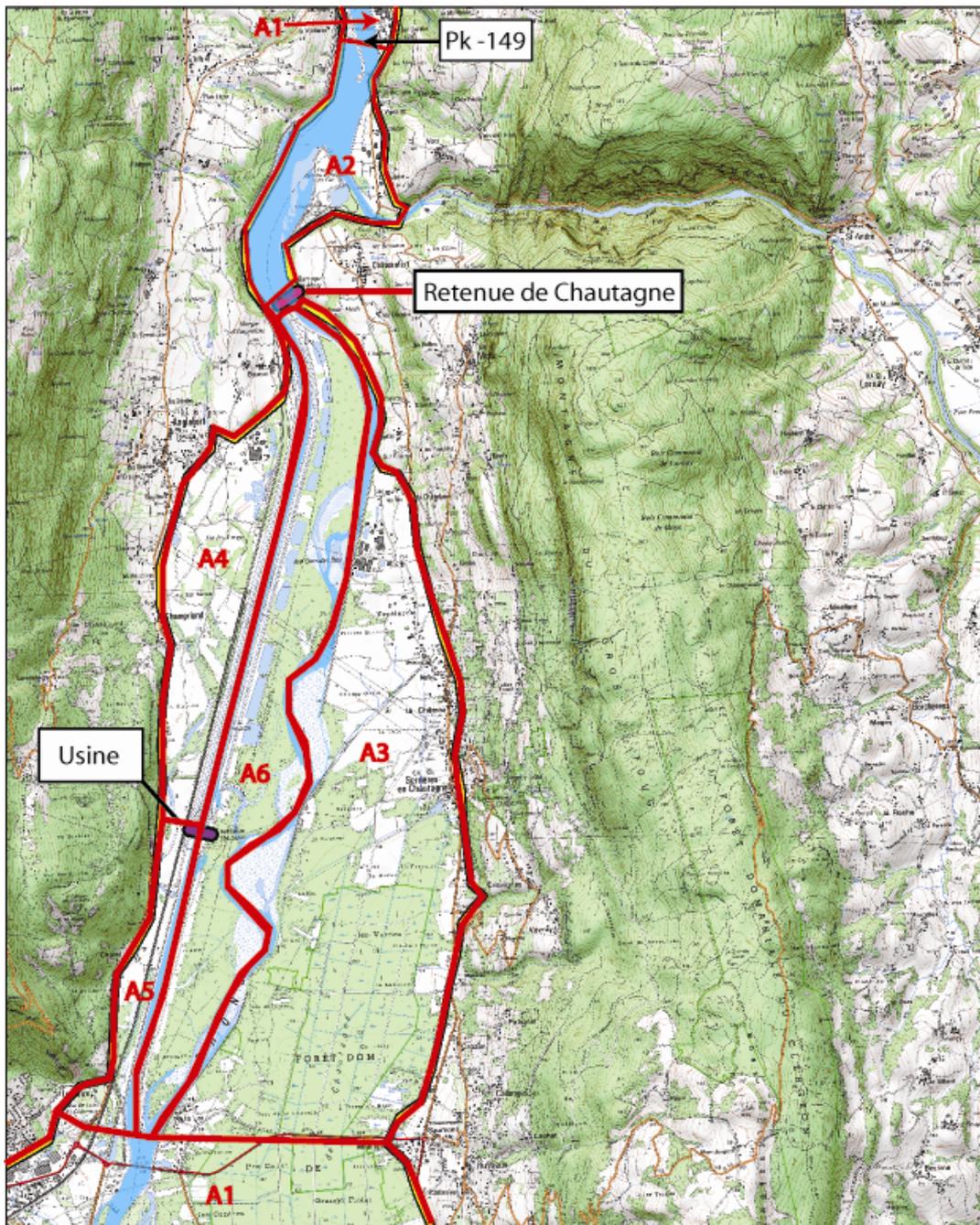
### 2.2.2 Sectorisation liée aux ouvrages

Une première sectorisation liée à la position des ouvrages de retenue du Rhône est tout d'abord proposée. Il s'agit de découper le contour alluvial en six types selon la typologie suivante :

- ▶ A1 : secteur alluvial supposé peu ou pas influencé par les aménagements ;
- ▶ A2 : nappe en rive droite ou gauche du Vieux Rhône à l'amont direct de la retenue ;
- ▶ A3 : nappe en rive droite ou gauche du Vieux Rhône à l'aval de la retenue et en connexion avec le Vieux Rhône ;
- ▶ A4 : nappe en association potentielle avec le canal d'amenée et ses contre-canaux ;
- ▶ A5 : nappe en association potentielle avec le canal de fuite ;
- ▶ A6 : partie centrale du système de dérivation/Vieux Rhône que nous pouvons définir comme « terre-plein » ou « îlot » (système mixte potentiellement influencé par les canaux de dérivation et de fuite, mais aussi par les Vieux Rhône).

Ces zones sont en effet différemment influencées par l'hydraulique du Rhône. Une différence existe notamment entre le canal d'amenée et de fuite : le plus souvent, le canal d'amenée, en position haute car endigué, alimente la nappe alluviale alors que le canal de fuite draine celle-ci. De la même façon, le colmatage des berges et du fond des canaux d'amenée est très important alors que les Vieux-Rhône sont régulièrement « nettoyés » des dépôts de fines par les crues. De la même façon, les forts gradients hydrauliques entre les canaux d'amenée et les nappes alluviales induisent une pénétration des fines dans les réservoirs. Les Vieux-Rhône et les canaux de fuite étant généralement alimentés par les nappes, ce phénomène n'est pas observé à leur proximité.

Figure 28 : Sectorisation proposée en fonction des ouvrages CNR.



La délimitation entre les secteurs A1 et A2 se base sur les données de niveau d'eau du Rhône définis en crue de type GENERALE1 (crue de récurrence quinquennale). Ainsi, lorsqu'à l'amont d'une retenue, un gradient plus faible, voire une pente inexistante, est observée (cf. tableau ci-dessous.), cette section du fleuve est alors considérée comme appartenant à la famille A2 (amont immédiat d'une retenue).

Figure 29 : Exemples de niveaux d'eau du Rhône en crue pour la détermination de l'influence amont des ouvrages de retenue.

Ouvrages	PK	Niv. Eau (Alti. NGF)
Seysssel Retenue	-152	260.5
	-151	254
	-150	253
	-149	252.4
	-148	252.3
	-147	252.1
Chautagne Retenue	-146	247.4
	-145	246.2
	-144	245.4
	-143	244.7
	-142	243.3
	-141	241.1
Chautagne Usine	-140	240.7
	-139	239.6
	-138	240
	-137	238
	-136	237.2
	-135	236.6
	-134	235.9

Cette sectorisation permet de classer des zones de nappes alluviales associées à des typologies d'échanges nappe-rivière très différentes.

Elle fait l'objet d'un report sur SIG d'une couche de polygones.

### 2.2.3 Sectorisation liée aux types d'encaissants géologiques

Un second travail de sectorisation est proposé afin de délimiter les zones alluviales sous influence ou non de la piézométrie des encaissants géologiques.

**L'idée directrice est qu'un prélèvement en nappe alluviale peut être partiellement ou totalement alimenté par des venues d'eau en provenance de ces formations aquifères encaissantes. La dynamique potentielle d'impact sur les débits estivaux du fleuve risque ainsi d'en être altérée. Il est donc impératif de bien identifier les secteurs de nappe potentiellement suralimentés par ces formations encaissantes.**

Rappelons que les données disponibles nécessaires à la réalisation de cette sectorisation sont les suivantes :

- ▶ des données piézométriques issues de différentes sources
  - Données SIG et documentaires (report sur papier avec un fond topographique) de la BD LISA de campagnes piézométriques ;
  - Données plus « lissées » issues des synthèses départementales) ;
- ▶ des fonds géologiques au 1 :250 000 et 1 :50 000 recouvrant la vallée du Rhône et ses abords.

Plusieurs configurations hydrogéologiques se rencontrent suivant la géométrie du réservoir alluvial et des aquifères adjacents. En effet, suivant la nature des terrains encaissants, ou formations « latérales » aux alluvions du Rhône, leurs potentielles nappes peuvent plus ou moins influencer la piézométrie de ces alluvions récentes.

Figure 30 : Grille de sectorisation en fonction de l'influence hydraulique des encaissants géologiques.

Sectorisation Nature de l'encaissant géologique aquifère	Secteurs alluviaux <u>influencés</u>	Secteurs alluviaux <u>non influencés</u>
<b>E1 – formations fluvio-glaciaires</b>	E1c – formations fluvio-glaciaires connectées	E1p – formations fluvio-glaciaires perchées
<b>E2 – formations carbonatées</b>	E2g – formations carbonatées de grande dimension	E2p – formations carbonatées de petite dimension
<b>E3 – formations molassiques</b>	E3g – bassins molassiques connectés	E3p – formations molassiques sans contact direct avec la nappe alluviale
<b>E4 – nappes alluviales des affluents</b>	E4g – nappes alluviales des affluents de grande ampleur	E4p – nappes alluviales des affluents sans influence notable
<b>E5 – formations de socle</b>	-----	E5 – toutes les formations de type socle

Nous proposons une classification suivant cinq grandes familles de formations géologiques aquifères : les formations fluvio-glaciaires (E1), les ensembles carbonatés (E2), les bassins molassiques (E3), les nappes alluviales des affluents du Rhône (E4) et les formations de socle (E5) (socle gneissique et granitique le plus souvent rencontré). Ces cinq grandes familles représentent la majorité des séries en contact avec la nappe alluviale du Rhône.

Notons qu'une observation toute particulière est effectuée pour chaque cas hydrogéologique rencontré. Il s'agit de pouvoir déterminer si un réseau hydrographique est développé ou non au droit de la formation aquifère considérée. En effet, si ce réseau est quasi-inexistant ou inexistant, cela indique une infiltration directe importante sur l'étendue de l'impluvium considéré et un contact souterrain direct avec la nappe alluviale du Rhône. Cependant, si le réseau hydrographique est développé, les écoulements depuis l'aquifère encaissant jusqu'au fleuve et son système alluvial deviennent aériens et l'alimentation du système Rhône peut être considérée comme indirecte. Sont donc distinguées pour chaque configuration des influences indirectes des encaissants (secteur alluvial non influencé) et des connections piézométriques directes (secteur alluvial influencé).

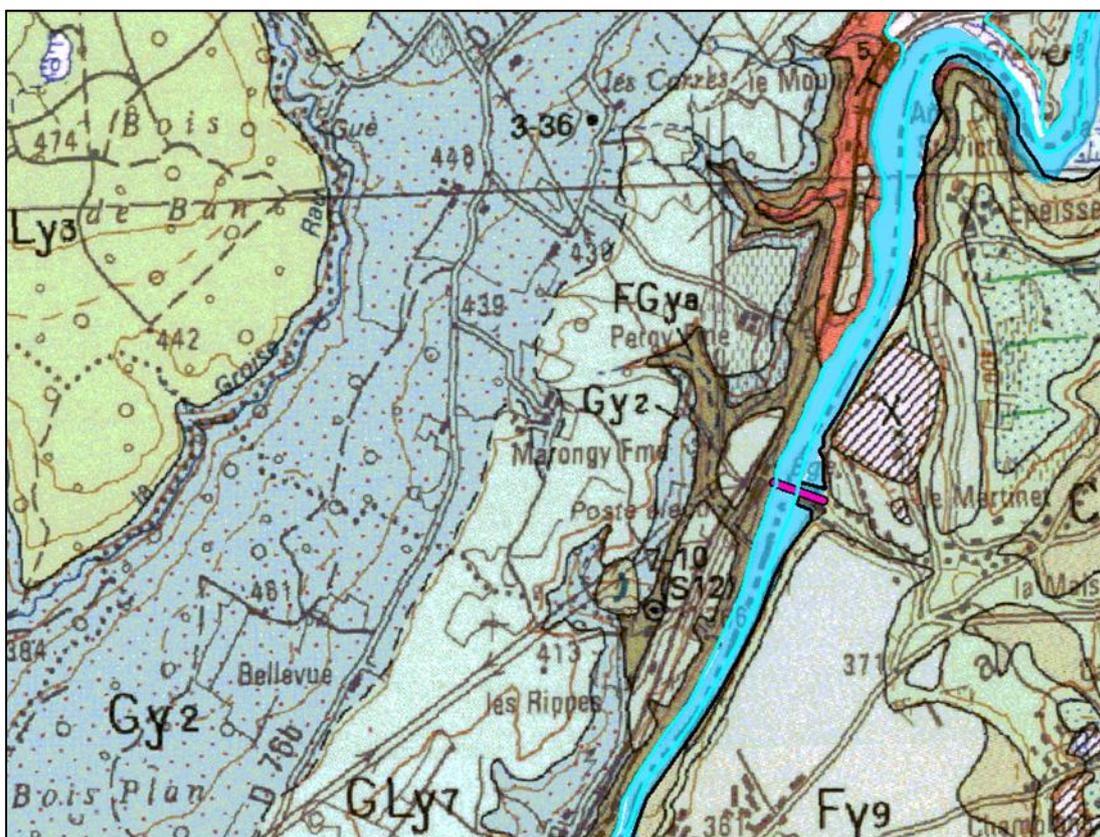
### 2.2.3.1 E1 : Formations fluvio-glaciaires

#### E1P : FORMATIONS LATERALES FLUVIO-GLACIAIRES PERCHEES

Ces formations fluvio-glaciaires perméables et perchées (composées notamment de galets, de graviers et de blocs suivant les secteurs) se retrouvent dans le Genevois et la région de Vienne. Ils forment des systèmes alimentant indirectement le Rhône via des cours d'eau et/ou des sources.

Dans cette configuration hydrogéologique, un prélèvement dans les alluvions récentes du Rhône peut potentiellement perturber le débit du fleuve mais il ne peut y avoir sollicitation vis-à-vis de ces nappes perchées.

Figure 31 : Zoom exemple de la sectorisation au niveau du barrage de Chancy, avec un extrait du secteur alluvionnaire du Rhône en rive droite (polygone bleu clair).



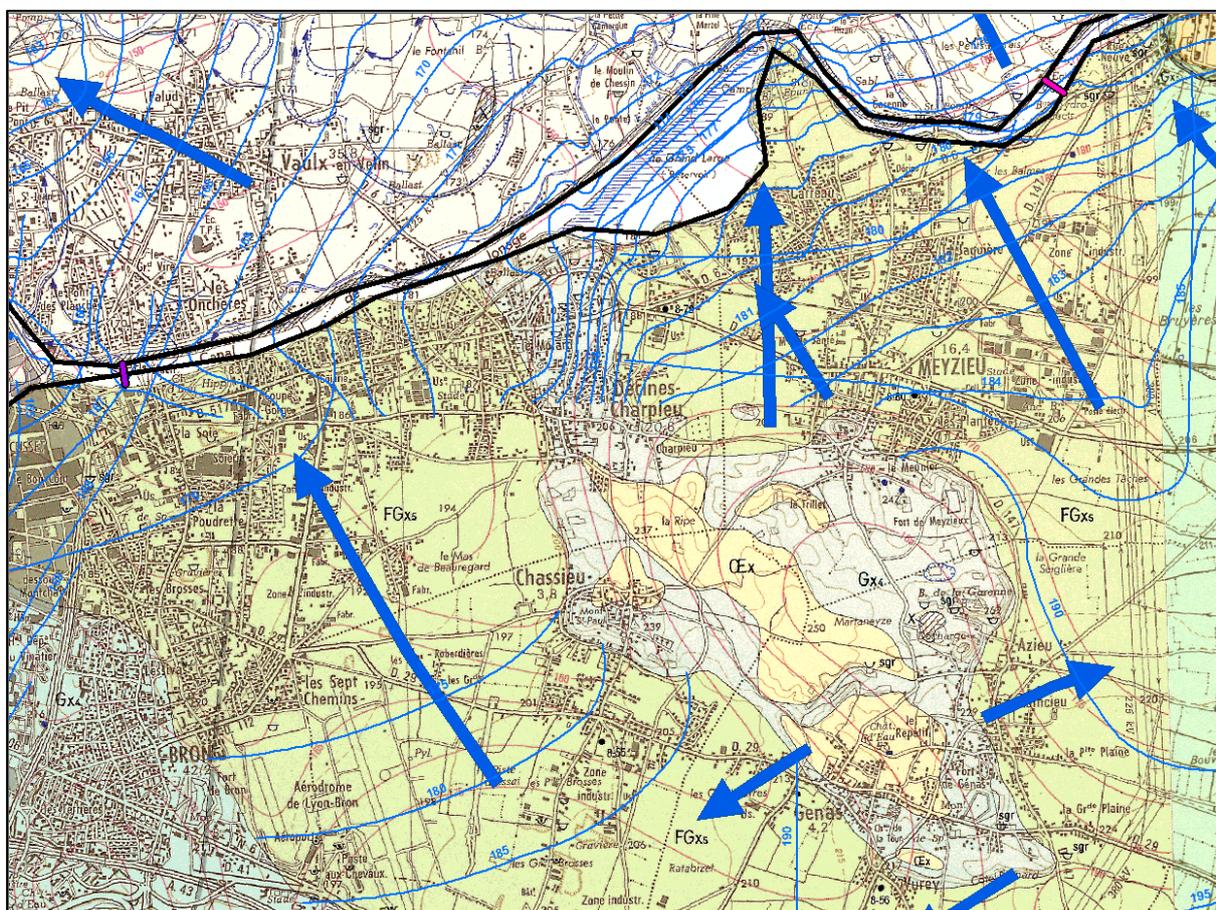
Dans l'exemple présenté ci-dessus, le secteur « rive droite » déterminé dans cette zone est surligné en bleu clair : il délimite les alluvions du Rhône (correspondant ici au lit mineur du fleuve) dont la piézométrie ne subit pas d'influence latérale. Le substratum est représenté par des dépôts sableux et marneux oligocènes (en orange) et des dépôts marneux morainiques (Gy2) sur lesquels reposent en placages les formations fluvio-glaciaires aquifères perchées (GLy).

### E1C : FORMATIONS LATÉRALES FLUVIO-GLACIAIRES CONNECTÉES

Les formations fluvio-glaciaires aquifères peuvent aussi se retrouver connectées aux alluvions et non en position perchée. C'est une connexion souterraine directe : il y a influence latérale, la piézométrie des alluvions est influencée par celle de la nappe latérale.

C'est le cas par exemple des formations de l'Est Lyonnais dont voici un extrait de la sectorisation proposée :

Figure 32 : Extrait de la sectorisation dans l'Est Lyonnais.



### 2.2.3.2 E2 : Formations carbonatées

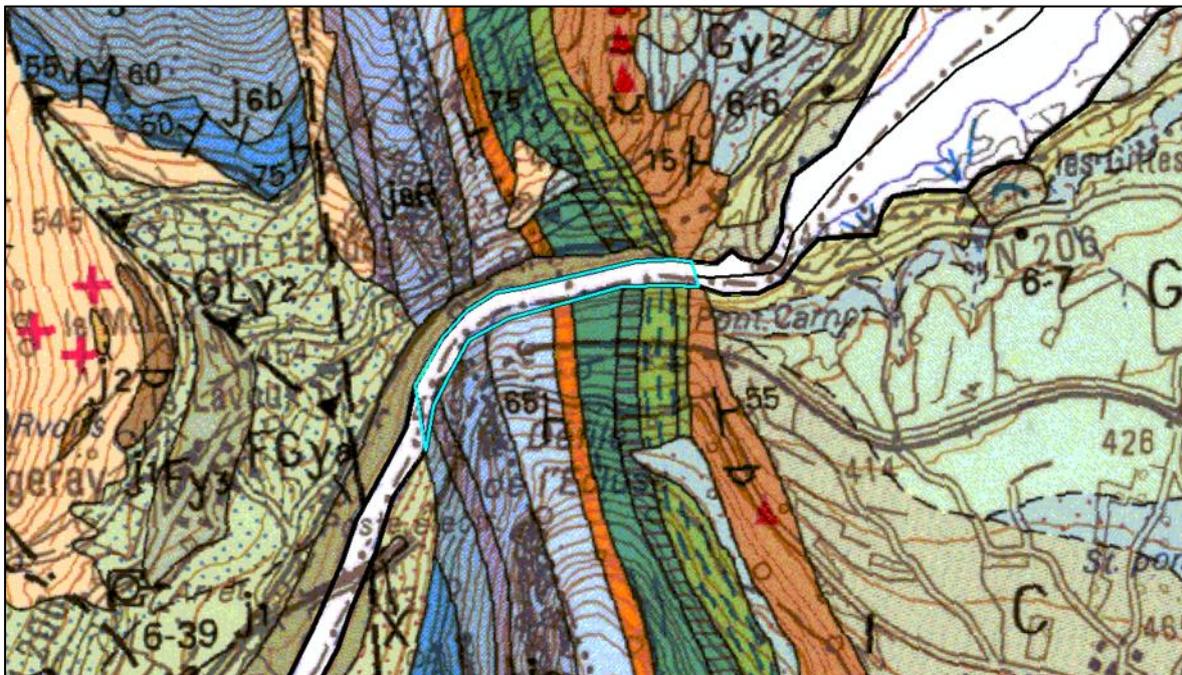
#### E2P : FORMATIONS CARBONATEES DE PETITE DIMENSION

Ces formations à lithologie essentiellement calcaire sont perméables en grand mais leur impluvium est souvent peu développé pour permettre une recharge importante de l'aquifère karstique, et donc une alimentation significative de l'aquifère alluvial.

L'influence de la piézométrie des alluvions est donc locale mais nous n'en tiendrons pas compte au vu de l'échelle de l'étude. Nous proposons donc que ces zones soient arbitrairement classées comme « non influencées latéralement » lors de la sectorisation.

Voici un exemple d'ensemble carbonaté de petite dimension rencontré dans la vallée du Rhône : le Mont Vuache, ou défilé de Fort l'Ecluse, est composé d'une succession de formations carbonatées d'âge Urgonien à Jurassique supérieur, ses dimensions ne permettent pas d'affirmer une influence latérale significative sur la piézométrie des alluvions du Rhône.

Figure 33 : Exemple de secteur en relation avec une formation carbonatée de « petite dimension ».

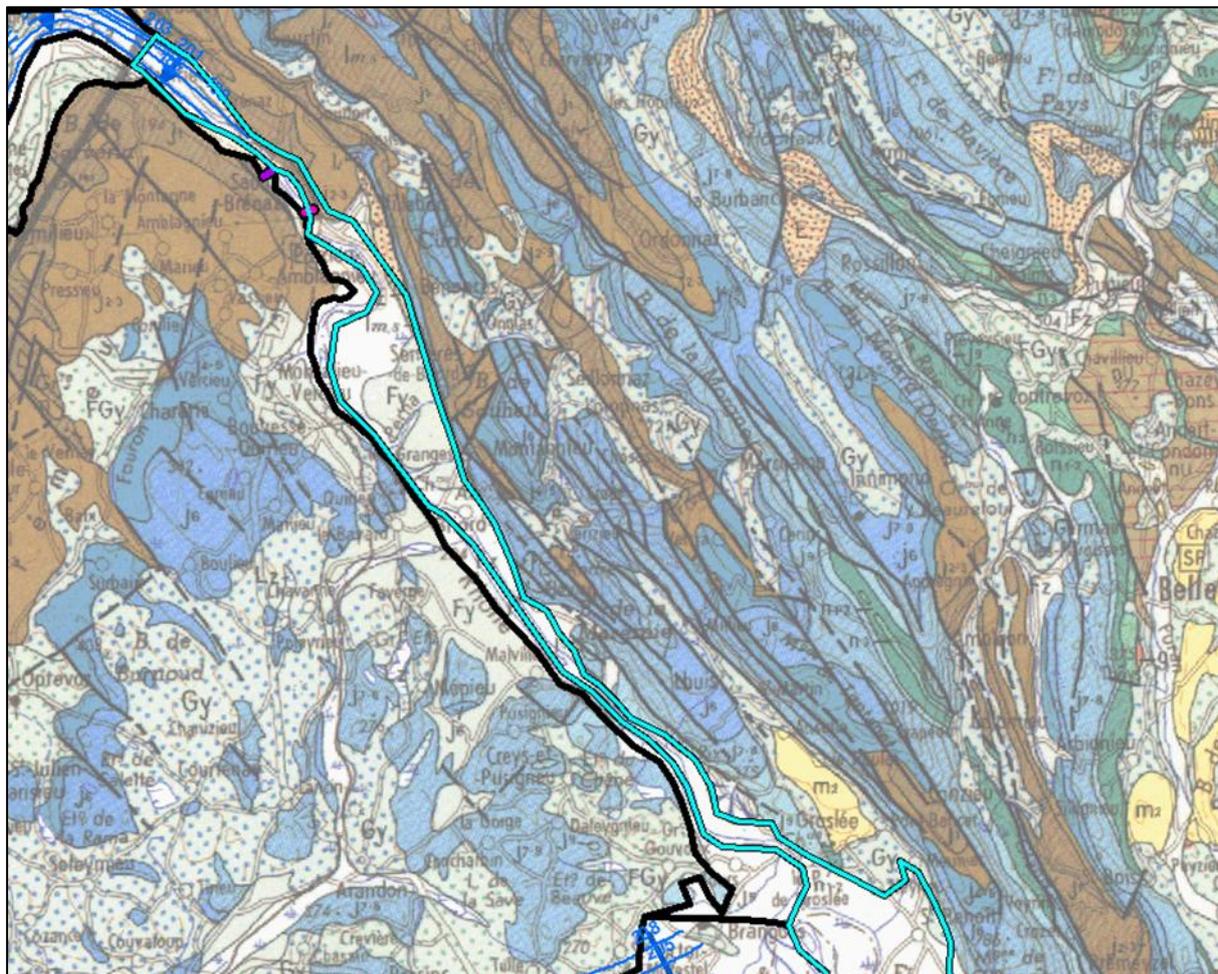


### **E2C : ENSEMBLES CARBONATES DE GRANDE DIMENSION**

Les grands ensembles carbonatés aquifères peuvent avoir un impact important sur la piézométrie des alluvions du Rhône, l'influence latérale y est donc importante et référencée dans le travail de sectorisation.

Voici un exemple de secteur classé dans cette catégorie : il s'agit de la partie du Haut-Rhône confiné entre les formations karstique de l'île Crémieu et les contreforts méridionaux du Jura. Il est évident que la nappe alluviale, de par sa position de drain vis-à-vis de ces formations aquifères, joue pour elles le rôle d'exutoire.

Figure 34 : Exemple de secteur avec une influence latérale d'un encaissant carbonaté de grande dimension.



### 2.2.3.3 E3 : Bassins molassiques du Miocène

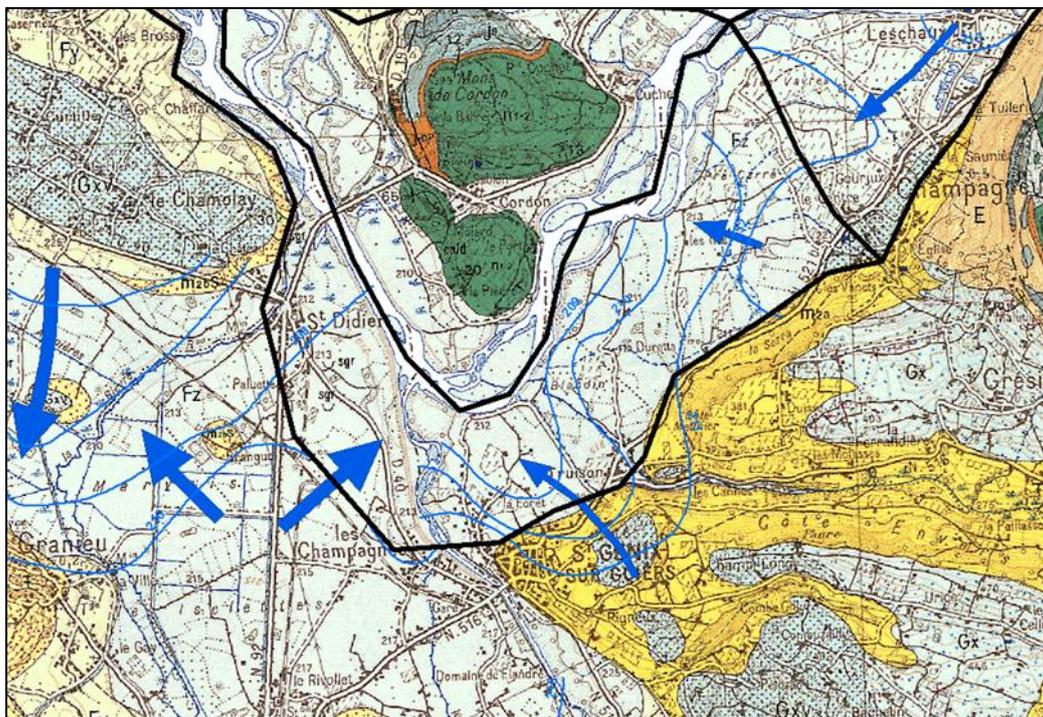
#### E3c : FORMATIONS CONNECTEES

Ces grandes structures aquifères, bien que peu perméables, peuvent influencer la piézométrie des alluvions, étant en contact direct avec ces dernières, et venir suralimenter la nappe alluviale.

Comme pour les aquifères karstiques, les petits ensembles seront considérés dans le travail de sectorisation comme non influents car ils n'ont pas d'impact ni d'alimentation propre (E3p).

Voici un exemple de secteur où l'influence latérale directe d'un bassin molassique du Miocène est importante (secteur de Brégnier-Cordon) :

Figure 35 : Zoom sur un secteur en contact entre un grand bassin molassique.



Les isopièzes et les grands sens d'écoulement y sont représentés en bleu, les terrains miocènes apparaissent en jaune.

On trouve ces configurations hydrogéologiques dans le Haut Dauphiné.

#### E3p : FORMATIONS SANS CONNEXION SOUTERRAINE

Comme pour les formations fluvi-glaciaires, ces grands bassins molassiques peuvent présenter une complexité supplémentaire lorsqu'ils ne sont pas en contact direct avec la nappe alluviale. C'est le cas de la plupart d'entre eux depuis Arles jusqu'à Lyon. Les argiles bleues du Plaisancien viennent généralement en interface et on observe alors des zones de résurgences latérales pour ces bassins molassiques. Les eaux souterraines vont ainsi alimenter le réseau superficiel qui ira in fine alimenter le système Rhône.

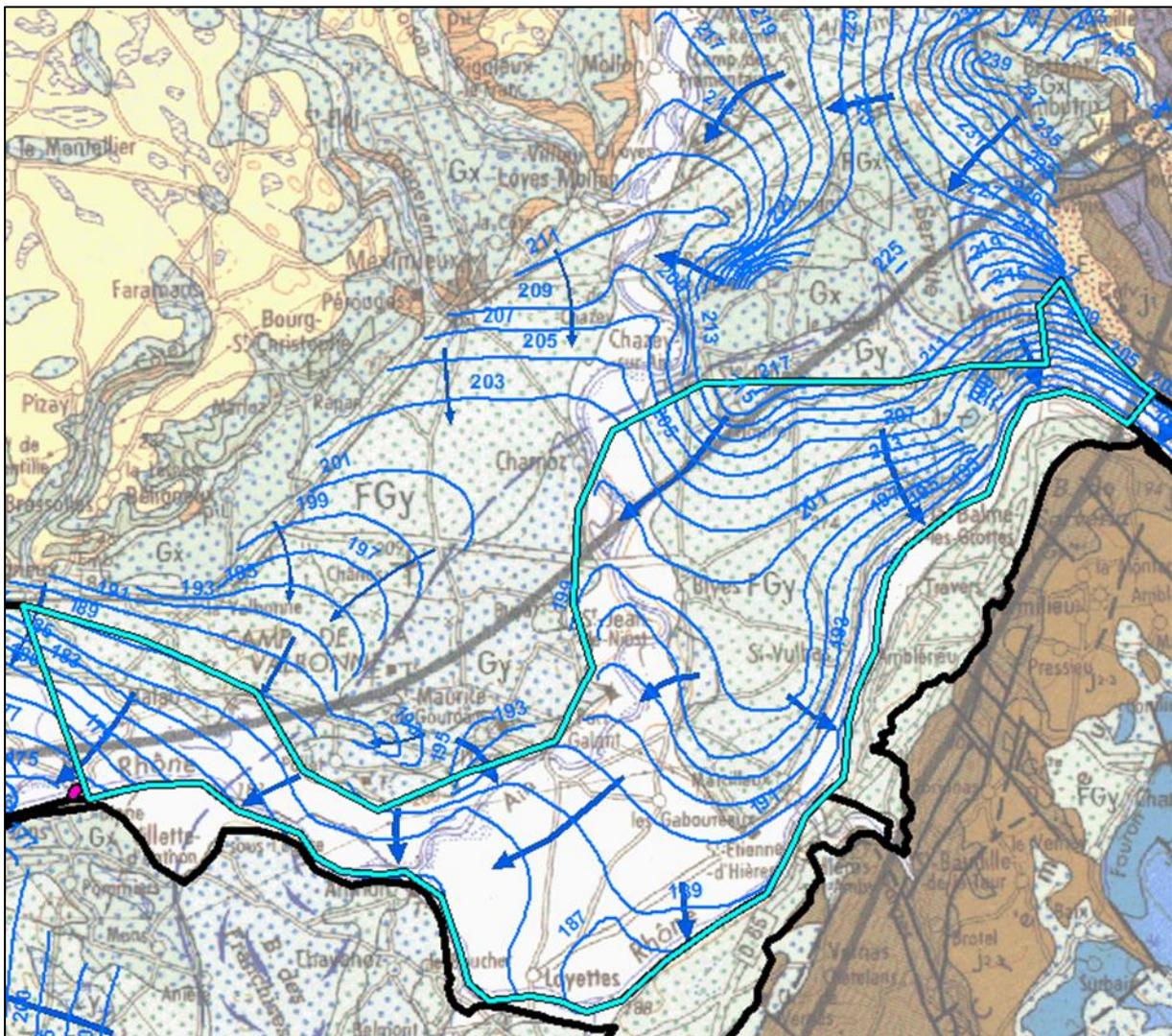
Dans cette configuration, on comprend intuitivement que les prélèvements en nappe alluviale du Rhône ne peuvent être soutenus par des flux en provenance de ces aquifères ; inversement, tout prélèvement dans ces aquifères peut représenter un manque à gagner pour le système Rhône.

### 2.2.3.4 E4 : Zones de confluences alluviales

Les grands ensembles alluvionnaires impactant de façon importante la piézométrie seront reportés ; la confluence avec l'Ain étant par exemple un secteur de confluence à impact important.

Ces domaines concernent également les confluences avec l'Isère, la Drôme et la Durance. Les petites nappes alluviales ne seront pas prises en compte au vu de l'échelle de l'étude.

Figure 36 : Exemple d'influence latérale par une nappe alluviale majeure : secteur de confluence avec l'Ain.



### 2.2.3.5 E5 : les imperméables relatifs

Comme vu précédemment, la catégorie E5 regroupe les encaissements peu perméables de type socle (granite et gneiss fissurés principalement), qui sont considérés comme n'ayant pas d'influence latérale piézométrique sur le système alluvial du Rhône.

## 2.2.4 Sectorisation liée à l'interface nappe-rivière

Une troisième sectorisation est proposée, permettant d'aboutir à un nouveau découpage de la nappe alluviale du Rhône, selon un paramètre supplémentaire : le degré de colmatage potentiel du Rhône.

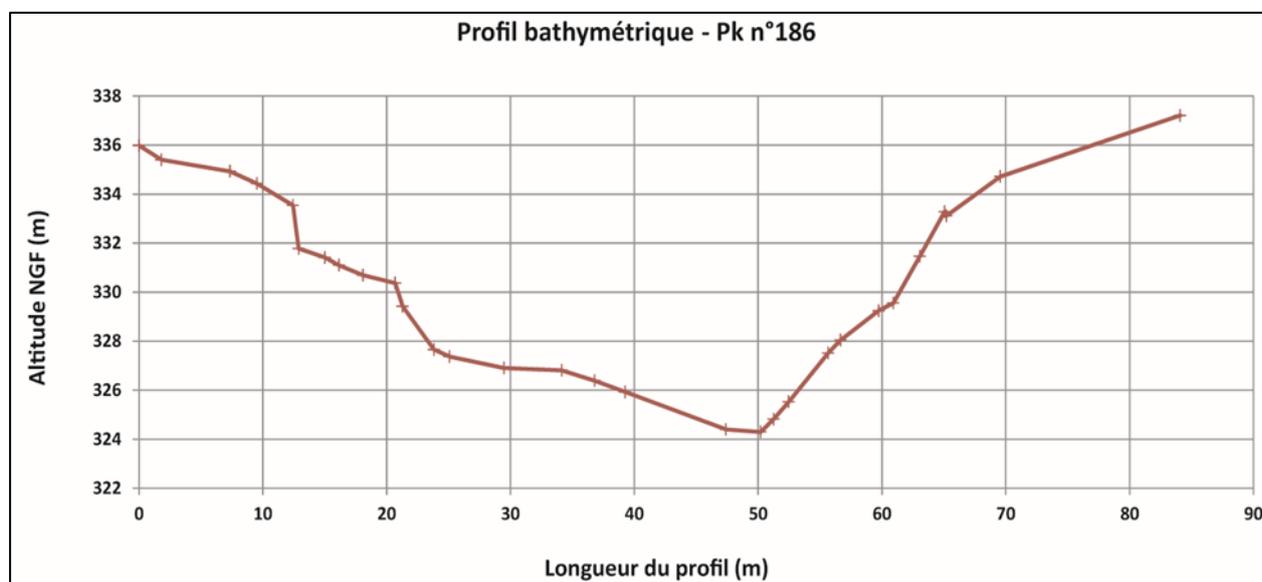
Il s'agit en effet de mettre en évidence des indices permettant de comprendre et classer en plusieurs types de configuration la géométrie du lit mineur du Rhône. Il est donc proposé de déterminer ces configurations géométriques, propices ou non propices à un tel phénomène.

### 2.2.4.1 Données utilisées

Les données bathymétriques sont utilisées pour l'estimation des indices. Les profils verticaux correspondant sont extraits du projet SIG sous ArcGIS grâce aux données de points cotés ayant une altitude Z NGF.

Ces profils sont ensuite tracés dans un tableur Excel.

Figure 37 : Exemple du profil bathymétrique du Pk n°186 (Amont de Lyon).



Pour le calcul des indices, nous utiliserons aussi les données de niveau d'eau correspondant à la simulation hydraulique GENERAL1, ainsi que les débits associés. Ils sont jugés représentatifs de crues récurrentes (fréquence quinquennale à décennale) susceptibles de remobiliser les dépôts de fond et de berges.

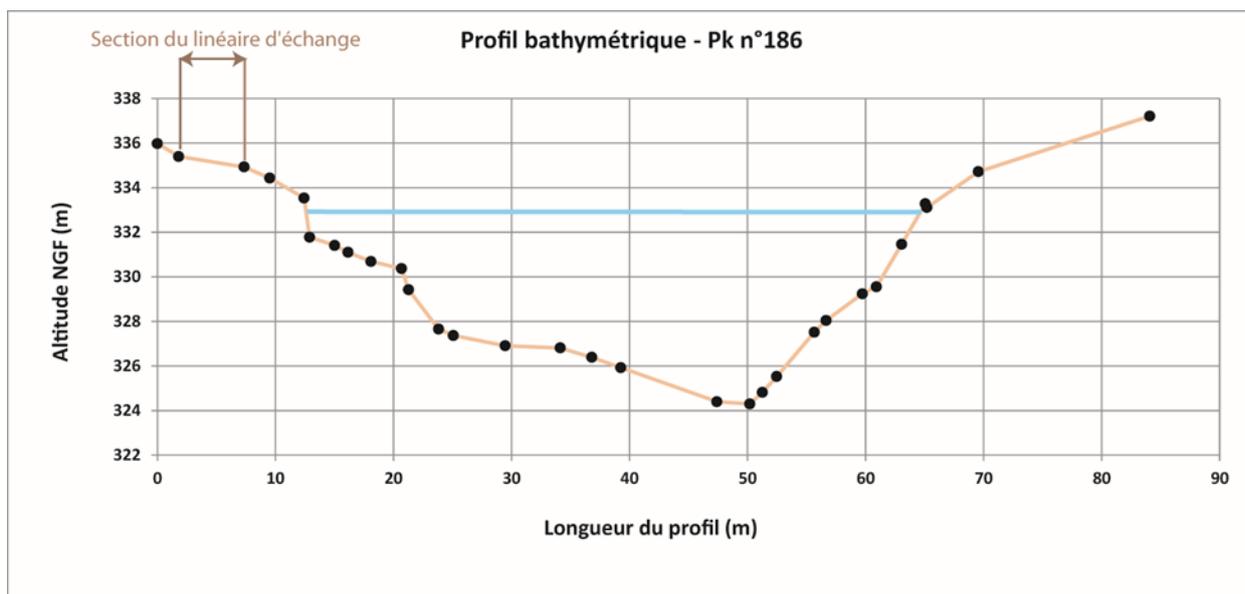
### 2.2.4.2 Calculs d'indices

Après report de ces trois types de données dans un fichier Excel de référence pour chaque Pk, nous proposons le calcul de plusieurs indices paramétriques.

#### LINEAIRE D'ÉCHANGE

Le premier, appelé « linéaire d'échange », constitue la somme des longueurs du profil bathymétrique situées au-dessous du niveau d'eau de référence connu, au Pk considéré. Nous proposons de minimiser la hauteur d'eau en lui retirant 2 m, considérés comme une épaisseur de limons non négligeable à prendre en compte.

Figure 38 : Exemple du profil au Pk n°186 avec les sections de linéaire d'échange en marron.



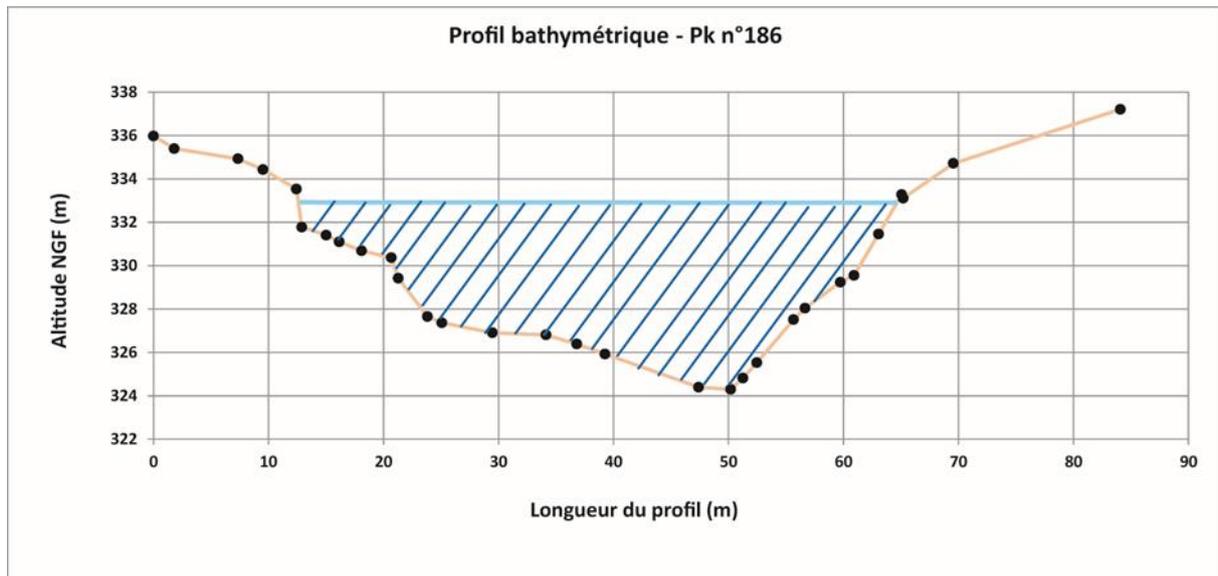
C'est un premier paramètre susceptible de nous renseigner sur la dimension de l'interface d'échange entre le fleuve et sa nappe alluviale.

#### VITESSE MOYENNE D'ÉCOULEMENT

Pour chaque profil bathymétrique, une « section mouillée » est calculée en approximant l'aire définie par le linéaire d'échange et le niveau d'eau par intégration des surfaces élémentaires pour un niveau de crue donné.

Connaissant le débit et la section mouillée, nous pouvons alors déterminer une vitesse moyenne d'écoulement correspondant à chaque profil.

Figure 39 : Exemple du profil au Pk n°186 en amont de Lyon avec la section mouillée estimée en hachuré.



#### INDICE DE SUSCEPTIBILITE MORPHOLOGIQUE AU COLMATAGE

Les données de bathymétrie permettent de déterminer pour chaque PK un indice morphologique de colmatage.

Pour ce faire, nous avons appliqué une méthode en trois temps :

- ▶ Calcul de linéaires cumulés d'interface fleuve-nappe, en trois catégories :
  - interface avec pente faible (<15°),
  - avec pente moyenne (comprise entre 15 et 40°) et,
  - pente forte (>40°).
- ▶ Application de paramètres arbitraires sur le degré de colmatage pour les trois catégories de pente. Le premier paramètre invariant correspond à la perméabilité supposée des dépôts de fond et de berge ; nous avons choisi arbitrairement une perméabilité de  $10^{-5}$  m/s, qui correspond à des dépôts limoneux relativement perméables (sables fins). En effet, au vu des vitesses moyennes du Rhône (>1 m/s), il est peu probable que les particules plus fines (limons argileux) subissent des dynamiques de dépôt.
- ▶ Définition d'un indice globale par analogie à la conductance utilisée dans les modèles maillés en hydrodynamique. Dans ce type de modèle, les échanges entre cours d'eau et nappes sont classiquement contrôlés par un paramètre appelée conductance qui est estimée par la formule suivante :

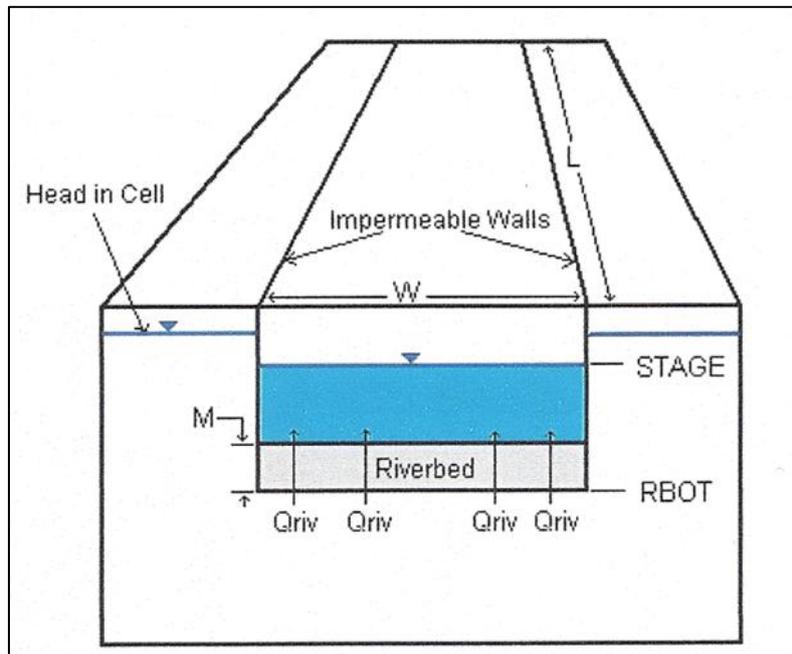
$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{E}$$

avec :

- C la conductance en  $m^2/s$  (c'est l'équivalent d'une transmissivité) ;
- K la perméabilité des dépôts de fond en m/s ;
- L la longueur de la maille modélisée ;
- W la largeur du cours d'eau ;
- E l'épaisseur des dépôts de fond.

La figure ci-dessous en illustre le principe.

Figure 40 : Schéma de principe de la représentation du colmatage dans les modèles maillés.



Par analogie, nous avons calculé une conductance 2D (en m/s) de la façon suivante :

$$C2D = K \cdot \left( \frac{W1}{E1} + \frac{W2}{E2} + \frac{W3}{E3} \right)$$

Pour ce faire, nous avons défini les paramètres suivants :

- ▶ Un invariant pour K ( $10^{-5}$  m/s) : même perméabilité des dépôts de fond sur tout le linéaire du fleuve pour les trois catégories de pente ;
- ▶ Une épaisseur de dépôt variable selon la pente, avec une épaisseur E1 forte si la pente est inférieure à  $15^\circ$ , une épaisseur E2 si la pente est comprise entre  $15$  et  $40^\circ$  et une épaisseur E3 si la pente est supérieure à  $40^\circ$ .

Cette analyse sera appliquée sur chaque profil bathymétrique qui sera décomposé en longueurs cumulées d'interface selon ces trois catégories de pentes.

L'indice C2D est ainsi calculé comme la somme des conductances de chaque linéaire cumulé d'interfaces. En effet, le comportement hydraulique globale de séries aquifères placées en parallèle par rapport à un écoulement est régi par une transmissivité globale égale à la somme des transmissivités des différentes séries.

Cette conductance 2D nous permettra ainsi :

- ▶ d'avoir des ordres de grandeur à implémenter dans les phases de modélisation hydrodynamique ;
- ▶ d'avoir un indicateur pour comparer les sections du Rhône et, éventuellement, aider à sa sectorisation.

## 2.3 STRATEGIE DE MODELISATION

### 2.3.1 Approche détaillée : la nappe alluviale du Rhône

L'impact des prélèvements dans la nappe alluviale du Rhône sur les débits estivaux du fleuve sera appréhendé par la réalisation de simulations hydrodynamiques à l'aide du logiciel VISUAL MODFLOW.

L'objectif est de proposer une démarche qui intègre toute la complexité spécifique de la nappe alluviale du Rhône, tout en permettant de traiter les informations de façon expéditive. Il ne s'agit en aucune manière de reproduire tous les secteurs du Rhône mais de catégoriser la nappe, puis, au moyen d'une analyse de sensibilité, de déterminer la part de débit prélevé directement produite par le cours d'eau.

Au vu des capacités du logiciel, il apparaît que ce dernier est adapté aux spécificités et aux objectifs de l'étude.

- ▶ Modflow est conçu pour simuler les écoulements en milieux poreux ce qui est le cas des écoulements dans les nappes alluviales (avec un comportement isotrope ou anisotrope).
- ▶ Modflow permet de représenter correctement la complexité du secteur d'étude : échanges nappe-rivière, degré de colmatage des cours d'eau, bonne représentation de la géométrie de la limite de la nappe.

Le travail de sectorisation devrait conduire à identifier 3x2 configurations hydrogéologiques de base :

- ▶ Trois possibilités en termes de relation avec les encaissants : encaissants peu ou pas perméables, encaissants moyennement perméables (molasses et aquifères karstiques), aquifères très perméables (nappes alluviales et nappes fluvio-glaciaires).
- ▶ Deux possibilités principales en termes de relation avec les aménagements : proximité d'un cours d'eau drainant peu colmaté (canal de fuite ou Vieux Rhône), proximité d'un cours d'eau drainant colmaté (contre-canal, amont d'une retenue) et d'un tronçon du Rhône colmaté. Les cas particuliers des zones de nappe comprises entre un Vieux Rhône et un dispositif de dérivation seront traités à part.

**Ainsi, six modèles de référence seront construits pour représenter les configurations piézométriques possibles (scénarios de pertes ou d'alimentation croisés avec la possibilité de suralimentation par les bordures).**

Le domaine modélisé sera de 3x3 km, avec un maillage pressenti de l'ordre de 100x100 m.

Puis, de façon systématique, nous testerons toutes les configurations possibles en termes de variabilité des paramètres :

- ▶ Perméabilité moyenne ou forte (par exemple :  $10^{-3}$  ou  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) ;
- ▶ Distance au cours d'eau faible, moyenne ou élevée (par exemple : <500 m, <1000 m, et >1000 m) ;
- ▶ Gamme de débit possible (par exemple <1000 m<sup>3</sup>/j, compris entre 1000 et 5000 m<sup>3</sup>/j et >5000 m<sup>3</sup>/j).

**Ceci implique la réalisation de 6x2 soit 12 modèles de configurations hydrodynamiques, ainsi que la réalisation de 3x3 simulations par modèle, soit un total de 108 simulations. Pour chacune de ces simulations, nous sortirons l'information utile à savoir la part de débit prélevé directement produite par le cours d'eau.**

Cette stratégie de modélisation est basée sur l'hypothèse forte obtenue suite au premier travail de regroupement d'informations sur les dynamiques de colmatage, d'une relative absence de colmatage dans les tronçons du Rhône en position d'être alimentés par la nappe alluviale ; cette hypothèse sera discutée au regard des travaux à venir de définition des indices caractéristiques de l'interface nappe-rivière.

Nous réaliserons en complément deux simulations supplémentaires pour appréhender le cas particuliers des zones de nappe comprises entre un Vieux Rhône et un dispositif de dérivation (pompages compris entre canal de dérivation et Vieux Rhône, pompage compris entre canal de fuite et Vieux Rhône).

**In fine, on définira ainsi une clé de détermination par secteurs types avec une matrice de 3x3 entrées selon la distance au cours d'eau et selon l'ordre de grandeur du débit prélevé.**

### 2.3.2 Approche systématique : les nappes alluviales des affluents.

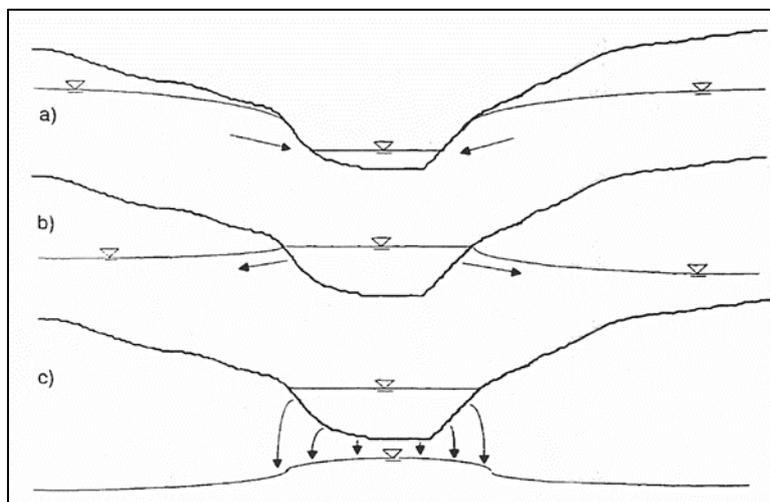
Les écoulements à surface libre et souterrain sont liés par le flux traversant le lit du cours d'eau. Pour évaluer le débit entre le cours d'eau et l'aquifère, il faut connaître les élévations respectives de la surface libre et de la nappe phréatique.

Trois situations sont possibles :

- Connexion entre les deux masses d'eau : la nappe alimente la rivière ;
- Connexion entre les deux masses d'eau : la rivière alimente la nappe ;
- Recharge de la nappe sans continuité hydraulique.

La figure ci-dessous illustre ces trois potentialités.

Figure 41 : Relations possibles entre cours d'eau et nappe.



Le flux dépend :

- ▶ Dans le cas d'une connexion hydraulique, de la perméabilité du lit de la rivière et de la différence de charge hydraulique entre les deux systèmes. Plus cette dernière est forte, plus les échanges sont importants. Dans le cas d'un lit complètement imperméable, les échanges seraient ainsi nuls.
- ▶ Dans le cas de non continuité hydraulique des deux masses d'eau, le débit traversant le lit du cours d'eau dépend uniquement de la perméabilité des matériaux les moins perméables (dépôts de fond sur le lit ou horizons sédimentaires dans la zone non saturée) et de la hauteur d'eau dans le cours d'eau.

Dans la pratique, on observe souvent que certains biefs drainent l'aquifère et que d'autres le rechargent. Par ailleurs, un bief peut recharger l'aquifère lors de crue et le drainer lors des périodes d'étiage.

La nature des échanges varie donc dans le temps et dans l'espace.

Pour estimer l'influence des prélèvements sur le débit naturel des cours d'eau, nous nous référerons à une approche de type analytique similaire à celle proposée dans l'étude CAILLE réalisée sous supervision des services compétents de l'Etat :

*CAILLE BE, 2008 - Evaluation de la distance d'incidence des prélèvements souterrains sur les cours d'eau du Département de la Côte d'or. Rapport d'étude 24 p.*

Cette étude repose sur l'exploitation d'un modèle maillé simple :

- ▶ Modèle monocouche homogène et isotrope ;
- ▶ Pas de prise en compte du colmatage potentiel des berges ;
- ▶ Nappe libre ;
- ▶ Communication directe entre nappe et rivière ;
- ▶ Débit constant pendant 90 jours ;
- ▶ Paramètres hydrodynamiques constants.

**En utilisant une approche basée sur les mêmes équations physiques (solution de Theis), on peut estimer à partir de quel temps le cône d'influence du pompage atteint le cours d'eau et en déduire en première approximation le pourcentage du débit prélevé soutiré à la rivière.**

En prenant comme hypothèse de non influence un rabattement associé inférieur à 5 cm, l'équation de Theis permet en effet d'estimer le temps nécessaire au cône de rabattement pour "atteindre le cours d'eau" ; et ce en fonction de la perméabilité du milieu, de la distance entre le point de prélèvement et le cours d'eau et du débit prélevé.

Considérant une perméabilité moyenne, nous testerons ainsi 3x3 configurations possibles :

- ▶ Distance au cours d'eau faible, moyenne ou élevée (par exemple : <500 m, <1000 m, et >1000 m) ;
- ▶ Gamme de débit possible (par exemple <1000 m<sup>3</sup>/j, compris entre 1000 et 5000 m<sup>3</sup>/j et >5000 m<sup>3</sup>/j).

**Cette approche permettra ainsi de proposer une clé de détermination pour les nappes alluviales des affluents avec une matrice de 3x3 entrées, comme pour la nappe alluviale du Rhône, selon la distance au cours d'eau et selon l'ordre de grandeur du débit prélevé.**

### 2.3.3 Approche phénoménologique : les formations annexes

Il s'agira ici de s'intéresser aux principales formations annexes faisant l'objet de prélèvements agricoles importants : les systèmes fluvio-glaciaires et les bassins molassiques.

Ces nappes présentent deux modes de connexion au système Rhône :

- ▶ Connexion souterraine par le biais d'un contact direct entre les alluvions fluviales et les formations annexes.
- ▶ Connexion indirecte via une zone de résurgences puis, généralement, infiltration dans la nappe ou rejet direct dans le Rhône.

Rappelons que les deux types de formations annexes présentent ces deux types de configurations hydrogéologiques. Leur principale différence réside dans leur perméabilité, comprise entre  $10^{-2}$  et  $10^{-3}$  m/s pour les formations fluvio-glaciaires, entre  $10^{-4}$  et  $10^{-5}$  m/s pour les mollasses.

Il sera nécessaire de tester les deux types de configuration hydrogéologique.

**L'idée directrice est de proposer une approche de modélisation simplifiée à objectif phénoménologique. Dans une telle approche, le système réel est représenté de façon simpliste à grande échelle. Il n'est en effet aucunement question de reproduire un système réel dans ses détails et sa complexité, faisant l'objet de mesures, mais de tester différentes hypothèses pour approcher en première approximation certains comportements. Insistons, c'est une démarche de modélisation exploratoire qui exclut toute intention de calage et de validation.**

Les modélisations seront réalisées sous Visual Modflow.

#### 2.3.3.1 Connexion souterraine par le biais d'un contact direct entre les alluvions fluviales et les formations annexes

La modélisation des interactions peut être approchée par le système idéalisé suivant :

- ▶ Une formation annexe de quelques kilomètres de large, délimitée par des encaissements supposés imperméables. L'épaisseur est supposée constante et la perméabilité est homogène dans le réservoir.
- ▶ Une nappe alluviale de quelques kilomètres de large, en contact direct avec la formation annexe, avec des alluvions présentant une perméabilité moyenne de l'ordre de  $10^{-3}$  m/s. L'épaisseur est supposée constante (environ 20 m).

Les paramètres hydrodynamiques vont conditionner les modalités de transfert d'une lame d'eau précipitée et infiltrée vers un exutoire, en l'occurrence les cours d'eau qui sont enfoncés dans les séries aquifères.

Les paramètres hydrodynamiques sont de deux ordres :

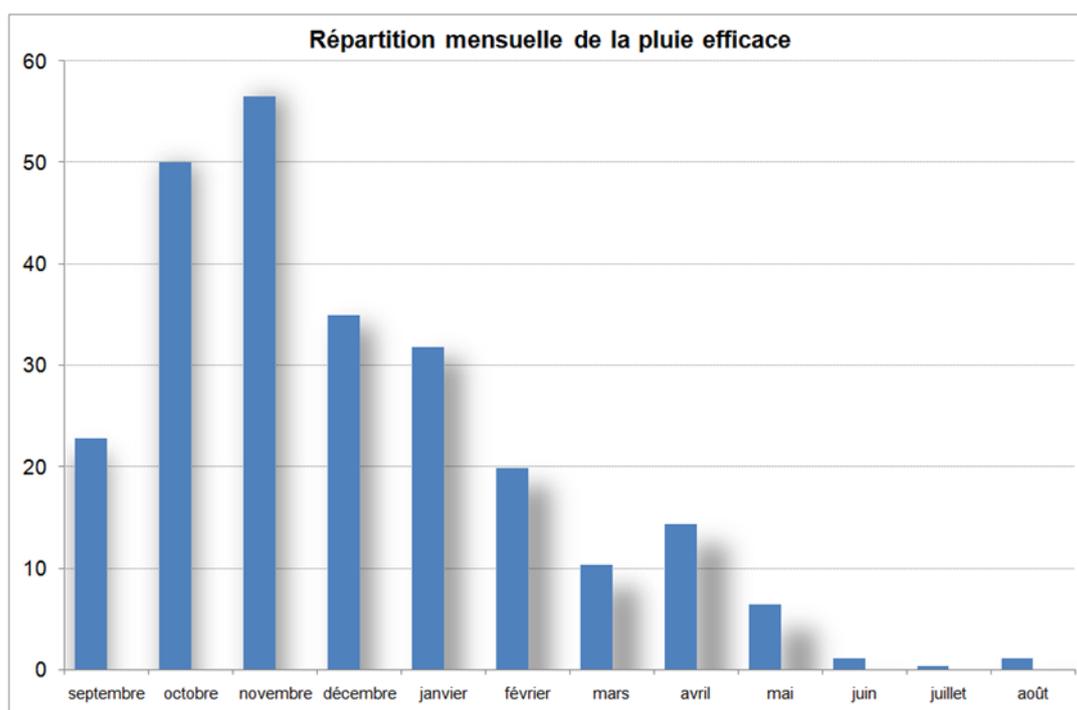
- ▶ Paramètres relatifs à la capacité du milieu à laisser s'écouler les fluides (notion de perméabilité) ;
- ▶ Paramètres relatifs à la capacité du milieu à stocker puis à libérer les fluides (porosité efficace en nappe libre ou coefficient d'emmagasinement en nappe captive).

La stratégie de modélisation s'appuie sur les phases suivantes :

- ▶ Recherche dans les données existantes des valeurs probables des paramètres hydrodynamiques des principaux milieux étudiés.
- ▶ Construction d'un modèle géométrique simplifié. Le domaine modélisé doit être conforme aux dimensions élémentaires de structures modélisées et reproduire au mieux les conditions aux limites des systèmes naturels.
- ▶ Définition d'une chronologie en termes de lame d'eau infiltrée. Le pas de temps retenu pour pouvoir étudier l'inertie des hydro systèmes souterrains est le mois.
- ▶ Approche paramétrique avec simulations de type plan d'expérience (exploration de toutes les combinaisons possibles en termes de paramètres hydrodynamiques) avec reconstitution des débits d'alimentation des cours d'eau aux limites des hydrosystèmes souterrains.

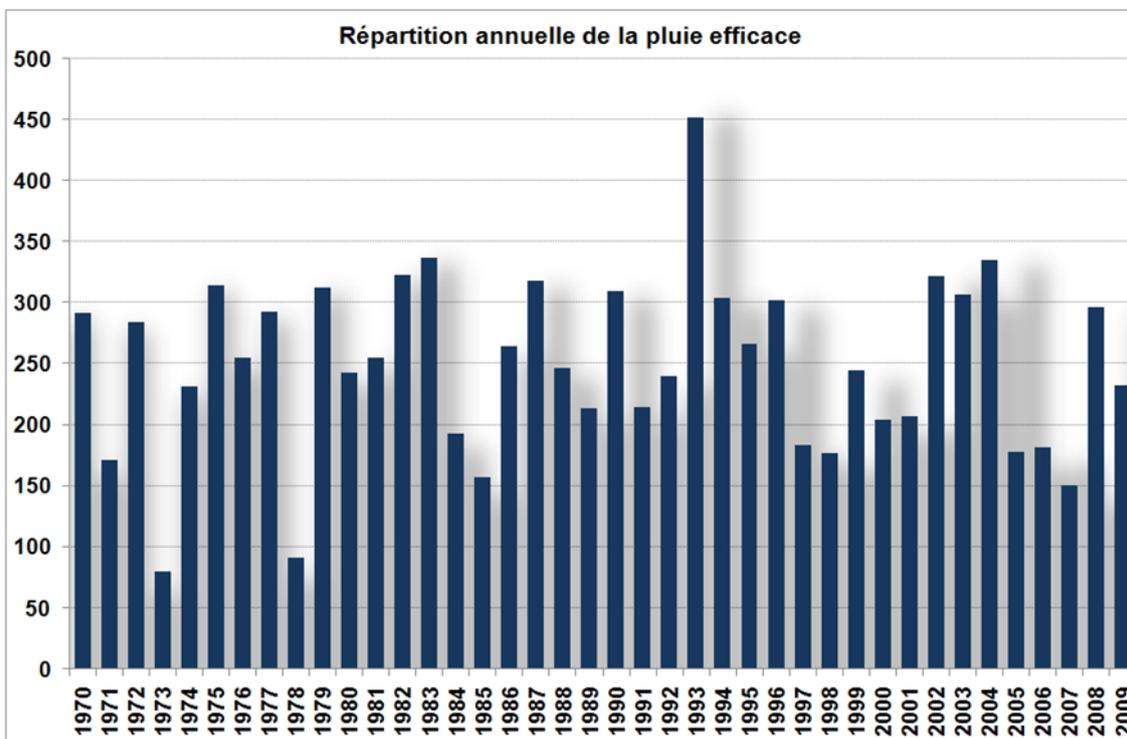
Il sera nécessaire de reconstituer une lame d'eau infiltrée. Dans un souci de simplification, la pluie efficace sera estimée comme la différence positive entre les données mensuelles de pluie (station de Brignais) et les données mensuelles d'évapotranspiration potentielle (station de Lyon-Bron), de 1970 à 2009.

Figure 42 : Moyennes mensuelles des pluies efficaces (station de Bron).



On observe ainsi une distribution des pluies efficaces concentrée de septembre à février avec un maxima statistique au mois de novembre. La moyenne interannuelle est d'environ 250 mm/an. Le graphe suivant permet d'illustrer les variations en termes de pluies efficaces d'une année sur l'autre.

Figure 43 : Distribution annuelle des pluies efficaces de 1970 à 2009 (station de Bron).



Rappelons que la pluie efficace se répartit entre infiltration et ruissellement.

La difficulté de l'exercice réside donc dans la détermination des quantités infiltrées par rapport aux quantités ruisselées. Elle passe par la définition d'un coefficient d'infiltration qui dépend principalement de la texture du sol et de la pente. Notons que ce coefficient fait l'objet de controverses dans la communauté scientifique, sa détermination étant très délicate. En effet, nombre de scientifiques ont pu observer que sa valeur varie pour un même sol en fonction de l'historique des pluies antérieures. Pour l'infiltration dans les réservoirs, on supposera un coefficient d'infiltration moyen de l'ordre de 80 % pour les alluvions fluvio-glaciaires (absence de couche supérieure limoneuse) et de 40 % pour les alluvions fluviales et les formations molassiques.

Afin de satisfaire les objectifs de l'étude, les conditions aux limites seront probablement les suivantes :

- ▶ Charge constante au niveau du Rhône qui est ainsi censé drainer de façon permanente sa nappe alluviale ;
- ▶ Charge constante en amont des formations annexes ; elle sera calculée sur la base des données piézométriques disponibles.

**Des simulations exploratoires seront réalisées pour essayer d'appréhender l'inertie de la relation entre des prélèvements dans ces formations annexes et les débits du fleuve Rhône. L'objectif est de pouvoir identifier les configurations types ou les paramètres nécessaires (couple débit-distance), pour que les prélèvements temporaires dans ces formations annexes aient un impact sur les débits estivaux du Rhône.**

Les résultats de ces simulations exploratoires seront discutés au regard des informations disponibles dans les études volumes prélevables, qui auront pu être réalisées sur ces formations annexes.

### **2.3.3.2 Connexion indirecte via une zone de résurgences**

De la même façon, nous proposerons une approche de modélisation pour les formations annexes qui sont caractérisées par des résurgences venant alimenter le réseau hydrographique, avant de rejoindre le système Rhône.

La démarche sera très similaire à celle proposée pour le cas des formations annexes en relation directe avec la nappe alluviale. La principale différence résidera dans l'absence de représentation de la nappe alluviale. Dans ces modèles, la zone d'exutoire sera simulée aux limites de la formation annexe et l'impact des prélèvements sera appréhendé sur le débit estimé à ces exutoires.

Comme précédemment, les résultats de ces simulations exploratoires seront discutés au regard des informations disponibles dans les études volumes prélevables, qui auront pu être réalisées sur ces formations annexes, mais aussi des données de débit mesurés sur leurs exutoires.



### 3. REFERENCES DOCUMENTAIRES

- Agence de l'Eau RM&C, 2009/11** - Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. SDAGE et documents d'accompagnements. Programme de mesures - rapport d'évaluation environnementale.
- Anus S., Floriat M., Lacroix J., Lauzier B., Senechal C., 2010** - Nappes alluviales du Rhône – Identification et protection des ressources en eau majeures pour l'alimentation en eau potable. Rapport ANTEA – SAFEGER – SEPIA Conseils. 93 p. +cartes et annexes.
- Aquilina L., Cubizolles J., David A., Petelet E., Schoen R., 2001** - Echanges nappe-rivière et transport de pesticides : cas des alluvions de l'Hérault, en présence et en l'absence de pompes. Site de Pézénas et Florensac. 37 p. + cartes et annexes.
- Ballais J.L., 2008** - Formation alluviales dans les paysages méditerranéens. In "Formations superficielles : genèse, typologie, classification, paysages et environnement, ressources et risques". Ouvrage collectif sous la coordination de Y. Dewolf et G. Bourrié, 799 p.
- Bambier A., Bornand M., Chenevoy M., Combiér J., Debromez J.F., Mandier P., Monjuvent G., 1979** - Notice de la carte géologique au 1 : 50 000 de Tournon. Document BRGM, 68 p.
- Bornand M., Mandier P., Montjuvent G., Chenevoy M., Horon O., Combiér J., 1977** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Valence. Document BRGM, 52 pages.
- Baran P., 2007** - Le débit, élément clé de la vie des cours d'eau. Bilan des altérations et possibilités de réparation. Edition ONEMA, FOCUS, 20 p.
- Barbut J., Garnier J.L., 1990** - Ville d'Avignon. Technopole de Montfavet. Impact des aménagements sur le champ captant de la Saïgonne. résultats de l'étude sur les modèles mathématiques. Rapport BRGM, 35 p.
- Barthelemy Y., 1978** - Champ captant de Crépieu-Charmy. Etude hydrogéologique : rapport de synthèse des résultats acquis jusqu'en octobre 1978. Rapport BRGM, 40 p.
- Barthelemy Y., 1979** - Champ captant de Crépieu-Charmy. fluctuations piézométriques d'octobre 1977 à mars 1979. Evolution du colmatage des berges du Rhône. Rapport BRGM, 28 p.
- Blanchard F., Keime M.P., Lansiard M., 1991** - Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface gravière nappe. Rapport BRGM, 79 p.
- Bossy G., 1965** – Documents sur la nappe alluviale de la Basse Durance et de la Crau. 1953-1962. Institut de Géologie CERGA, Université de Montpellier II, Faculté des Sciences, en association avec l'Université d'Aix Marseille. 53 p.
- Bravard J.P., 1983** – Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. Revue Géographie Alpine, Tome 71, n°4, p. 363-379.
- Bravard J.-P., 1987** - Le Rhône du Léman à Lyon, La Manufacture édit., Lyon, 451 p.
- Bravard J.C., Clémens A., 2008** - Le Rhône en 100 questions. Rapport de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône). Ouvrage collectif édité par le GRAIE, 300 p.
- BRGM, 1993** - Ville de Nîmes. Site de captage de Comps. Diagnostic des ouvrages de la nappe. Régénération de quatre ouvrages. modélisation hydrodynamique. Réalisation de deux ouvrages complémentaires. Rapport technique, 335 p.
- BRGM, 1995** - Méthodes d'évaluation de l'impact des prélèvements réalisés dans les nappes d'accompagnement sur les eaux superficielles associées. Rapport technique, 72 p.
- BRGM, 1996** - Impact sur le débit des cours d'eau des prélèvements d'eau souterraine des nappes connexes aux rivières. Rapport technique, 63 p. + cartes et annexes.
- Buard C., 1990** - Evaluation du degré de vieillissement du parc de forage existant. exemples tirés de la région strasbourgeoise. Document BRGM, 78 p.
- Castany G., 1982** - hydrogéologie : principes et méthodes. Edition DUNOD, 238 p.

- Catzigras, F., Colomb E., Damiani L., Durand J.P., Durozoy G., Féraud J., Gervais J., Masse J.P., Rouire J., Rousset C., Triat J.M., Truc G. 1977** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Chateaurenard. Document BRGM, 25 p.
- Chenevoy M., Elmi S., Lorenchet de Montjamont M., Combier J., Michel R., 1976** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Crest. Document BRGM, 41 pages.
- Chenevoy M., Bellesio R., David L., Mongereau N., Walter B., Bellegrade M., Amat-Chantoux R., Berntzky M., 1976** - Notice de la carte géologique au 1 : 50 000 de Serrières. Document BRGM, 68 p.
- Chenevoy M., David L., Mongereau N., Walter B., 1970** - Notice de la carte géologique au 1 : 50 000 de Vienne. Document BRGM, 16 p.
- Chenevoy M., David L., De Montjamont M., 1969** – Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Givors. Document BRGM, 15 p.
- Ciron P., 1992** - Appréciation des effets de la voie nouvelle sur le champ captant de Mornas. Document BRGM.
- Ciron P., 1992** - Appréciation des effets de la voie nouvelle sur le champ captant de Avignon – La Saignone. Document BRGM.
- CNR, 1999** - Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Modélisation hydraulique hors delta. 20 rapports dédiés aux aménagements de la CNR.
- Collin J.J., Gudefin H., Hervé J.Y., Lienhardt M.J., Rousselot D., 1973** - Système aquifère de l'Est Lyonnais. Synthèse des connaissances. Données hydrogéologiques quantifiées. Rapport BRGM 73SGN1999JAL, 66 p.
- Colomb E., Gieu G., Masse J.P., Rouire J., Roux M., Damiani L., Durozoy G., Putallaz J., 1975** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Istres. Document BRGM, 43 pages.
- Colomb E., Servais J., A l'Homer, Masse J.P., Rousset C., Roux R., Rouire J., Damiani L., Durozoy G., 1975** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Eyguières. Document BRGM, 29 pages.
- Damiani L., J.-P. Masse , J. Philip, G. Tronchetti, J.-M. Triât, G. Truc, J. Vogt, F. Bazille, 1980** - Notice explicative de la carte géologique de Pont St Esprit au 1 : 50 000. Document BRGM, 43 p.
- Darmendrail D., 1986** - Colmatage et effet filtre des berges lors de l'alimentation des nappes alluviales par les cours d'eau. synthèse bibliographique. Rapport BRGM, 75 p. + annexes.
- David L., Elmi S., Féraud J., 1966** - Notice explicative de la carte géologique de Lyon au 1 : 50 000. 39 p.
- David L., Enay R., Mangold C., 1978** - Notice explicative de la carte géologique de Montluel au 1 : 50 000. Document BRGM, 44 p.
- De Bellegarde B., Biju-Duval J., Gachet J.N., Lafosse J., Adam C., Pierlay B., 1999** - Département de l'Isère. Synthèse hydrogéologique départementale. Rapport pour le compte de la DUIREN Rhône Alpes et du Conseil Général de l'Isère, 143 p.
- De Bellegarde B., Réthore V., 1999** - Département de l'Ain. Bilan hydrogéologique départemental. Rapport pour le compte de la DIREN Rhône Alpes, 101 p.
- Debelmas J., R. Ballesio, J.-L. Brochier, C. Fourneaux, L. Moutier, J.-M. Triat, 2002** - Notice explicative de la carte géologique de Valréas au 1 : 50 000; Document BRGM, 77 p.
- Desoignies J., 1971** - Notice explicative de la carte géologique d'Orange au 1 : 50 000. Document BRGM, 13 p.
- Dellery B., Jonquet P. , 1967** - Recherches hydrogéologiques dans la zone Avignon – Sorgues. Document BRGM.
- DIREN Rhône-Alpes, 2001** - Département de la Drôme. Bilan hydrogéologique départemental. 212 p.

- Donze P., Enay R., 1972** - Notice explicative de la carte géologique de Seyssel au 1 : 50 000. Document BRGM, 13 p.
- Donzeau M., Wernli R., Charollais J., Monjuvent G., 1997** - Notice explicative de la carte géologique de Saint-Julien-En Genevois au 1 : 50 000. Document BRGM, 144 p.
- DREAL PACA, Agence de l'Eau RM&C, 2009/11** - Diagnostic de la gestion quantitative de la ressource en eau en région PACA. 142 p., 19 annexes.
- Dubar C., Leduc C., Suais M.F., Gaillard B., 1993** - Vulnérabilité des captages de l'île du Grand Gravier face à une pollution du Rhône. Etude du pouvoir filtrant des berges. Rapport technique pour le compte du Syndicat des Eaux des Monts du Lyonnais et de la Basse vallée du Gier. 142 p.
- Durozoy G., 1977** - Etude préliminaire de l'annexe sanitaire eau potable de la ville d'Orange. Document BRGM.
- Durozoy G., 1972** - Evaluation des ressources hydrauliques. carte hydrogéologique des Bouches du Rhône - échelle 1 : 200 000. Notice explicative; Rapport BRGM, 72 SGN 394 PRC, 46 p. + carte.
- EDF BRGM, 1982** - Utilisation des eaux souterraines comme source froide des pompes à chaleur. département des Bouches du Rhône et du Vaucluse. Livret guide + carte A2. 19 p.
- Garnier J.L., Henry J.L., 1977** - Préservation des ressources en eau de la basse vallée du Var. Influence de la construction de seuils sur les relations nappe-rivière. Etude du colmatage actuel sur les souilles exploitées et en amont du seuil n°8. Rapport BRGM, 17 p.
- Gayraud S., Hérouin E., Philippe M., 2002** – Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : revue bibliographique des mécanismes et des conséquences sur les habitats et les peuplements des macro invertébrés. Bull. Fr. Pêche Piscic., 355/366, p. 339-355.
- Gidon P., 1970** - Notice explicative de la carte géologique de Rumilly au 1 : 50 000; Document BRGM, 11 p.
- Gigout M., Enay R., Rampoux J.P., Pachoud A., 1976** - Notice explicative de la carte géologique de La Tour du Pin au 1 : 50 000. Document BRGM, 15 p.
- Graillot D., Paran F., Déchomets R., A. Germain, Gibert J., Ferreira D., Piscart C., Bornette G., Pujalon S., Lafont M., 2007** – Evaluation des échanges nappe/rivière et de la part des apports souterraines dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés. Influence des variations saisonnières sur les échanges. Rapport de phase 1. Rapport ZRAB, 333 pages + cartes et annexes.
- Graillot D., Paran F., Déchomets R., A. Germain, M. Dufour, Gibert J., Marmonnier P., Ferreira D., Piscart C., Bornette G., Pujalon S., Jezequel C., Lafont M., 2008** – Evaluation des échanges nappe/rivière et de la part des apports souterraines dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés. Influence des variations saisonnières sur les échanges. Rapport de phase 2. Rapport ZRAB, 124 pages + cartes et annexes.
- Graillot D., Paran F., Déchomets R., Marmonnier P., Piscart P., Simon L., Bornette G., Baillet H., Rodriguez C., Travi Y., 2010** – Evaluation des échanges nappe/rivière et de la part des apports souterraines dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et aux aquifères associés. Influence des variations saisonnières sur les échanges. Rapport de phase 3. Rapport ZRAB, 157 pages + cartes et annexes.
- Henry, Bonnier, Mathian, 1954** - Nappe de la plaine alluviale de rive gauche du Rhône entre Donzère et Mornas. Origine non connue, 15 p.
- Juncy G., Poul X., 1975** - Alimentation en eau de la zone industrielle de Beaucaire : Résultats des travaux de captage de la nappe alluviale du Rhône Document BRGM.

- Jacob C., 1955** - Site et conditions géologiques de l'aménagement de la chute de Donzère-Mondragon. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors série, pp. 21-35.
- Kerrien Y., Monjuvent G., Combiér J., Gaillard G., Gibert J., Girel J., Laurent R., Lorenchet de Montjamont M., 1990** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Belley. Document BRGM, 73 p.
- Klingeman P.C., Bravard J.P., Giuliani Y., 1994** – Les impacts morpho dynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation : le Rhône en Chautagne. Revue de Géographie de Lyon, vol.69, n°1, p. 73-87.
- Kondolf G., 1997** - Hungry waters : effects of dam and gravel mining on river channels. Environmental management, 21 (4), p. 533-551.
- Kondolf G., Engermeier P., 2008** - Projecting cumulative benefits of multiple river restoration projects : an example from the Sacramento San Joaquin river system in California. Environmental management 42 (6), p. 933-945
- Lallemand-Barrès A., 1985** - Colmatage décolmatage. Etude documentaire. Rapport BRGM, 50 p.
- Landon R., 1996** – L'évolution du profil en long des affluents du Rhône moyen : du constat aux principes de gestion. Revue de Géographie de Lyon, vol. 71, p. 363-375.
- Lavie J., Putallaz J., 1974** - Alimentation en eau de la ville d'Avignon – Etude hydrogéologique de l'île de la Barthelasse. Document BRGM.
- Lavie J.J. Putallaz J., 1974** - Champ de captage de la Saignonne. Document BRGM.
- Lelièvre R., 1969** - Etude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel. Rapport BRGM, 111 p.
- L'Homer A., Roux M., Toni C., Bazille F., Damiani L., Durozoy G. 1987** - Notice de la carte géologique au 1 : 50 000 de Arles. Document BRGM, 73 p.
- Lorenchet de Montjamont M., Bornand M., Combiér J., Mandier P., Montjuvent G., 1979** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Montélimar. Document BGRM, 35 p.
- Malavoi J.R., Souchon Y., 2002** - Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. Note technique, Bull. fr. Pêche Piscic., p. 357-372.
- Malavoi J.R., Garnier C.C, Landon, N., recking A., Baran P., 2011** - Eléments de connaissance pour la gestion des transports solides en rivière. Ouvrage ONEMA, 300 p.
- Ménillet F , Paloc H. 1973** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Nîmes. document BGRM, 42 p.
- Monjuvent G., Masse J.P., Ballessio R., Alabouvette B., Masse P.J., Blavoux B., Dupias G., Granier J., Philip J. 1991** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Avignon. Document BRGM, 90 p.
- Miche R., 1955** - Etude du canal de dérivation de Donzère-Mondragon et des ouvrages qui le bordent. La houille blanche : revue de l'ingénieur hydraulicien, Numéro hors série, pp. 81-100.
- Nicolas J., Petit V., Thierry P., Besse A., Longet A., 2004** - Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise. Rapport d'étape - Phase 1. BRGM/RP-53569-FR, 29 illustrations, 14 annexes, 67 pages.
- Parascandola M.F., Burloux F., Rousselot D., Debaisieux B., 1982** - Synthèse hydrogéologique de la région Rhône-Alpes. Document BRGM, 147 p.
- Pascal M., D. Lafarge, J. Chedhomme, C. Glintzboeckel, 1989** - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Bourg Saint Andéol ; Document BRGM, 69 p.
- Poinsart D., Bravard J.P., Caclin M.C., 1989** – Etude granulométrique de fond d'un canal de Miribel (Haut-Rhône). Revue de Géographie de Lyon, vol.64, n°4, p. 240-251.

- Poul X., 1975** - Alimentation en eau syndicat de Villeneuve-Les-Avignon Les Angles. Document BRGM.
- Rabier P., 1979** - Projet d'aménagement du bassin tampon écreteur de crues n°1 le long de la Meyne, à l'amont d'Orange – Etude de l'incidence éventuelle d'une nappe phréatique. Document BRGM.
- Rousselot D., Camus G., 1971** - Etude du colmatage du Parc de la Tête d'Or à Lyon. Rapport BRGM, 53 p.
- Salquèbre D., Gandolfi J.M., 2011** - Appui technique sur la connaissance des eaux souterraines dans le cadre du « SOURCE » - « Schéma d'Orientations pour une Utilisation Raisonnée et Solidaire de la ressource en Eau en PACA ». 23 p., 3 ill., 1 ann.
- SAFEGE CETIS, 2002** - Hydrologie des vieux Rhônes. Rapport 2ème étape. Rapport pour le compte de l'étude globale Rhône pilotée par la CNR, 22 p. + annexes.
- Savey P., 1992** – La gestion environnementale du Rhône. Revue de Géographie de Lyon, vol.67, n°4, p. 285-292.
- Schindler A., 2006** - Etude des relations nappe-rivière dans le Bassin Rhône Méditerranée. Rapport de Licence "Méthodes appliquées en Géosciences", 73 p.
- 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.
- SOGREAH, 2010** - Schéma d'orientations pour une utilisation raisonnée et solidaire de la ressource en eau. Rapport de diagnostic, version 2.1b de septembre 2010, 197 p.
- Souchon Y., Nicolas V., 2011** - Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux. Rapport final pour le partenariat ONEMA/CEMAGREF Dynamique physique, 28 p.
- SRAE et DDA de l'Ardèche, 1984** - Contribution des services extérieurs du ministère de l'Agriculture à la connaissance des ressources en eaux souterraines dans le département de l'Ardèche. 95 p.
- SRAE et DDA du Rhône, 1991** - Contribution des services extérieurs du ministère de l'Agriculture à la connaissance des ressources en eaux souterraines dans le département du Rhône. 70 p.
- Suais MF., Darmendrail D., Bourg A., 1987** - Programme de recherche sur l'effet filtre. Etude sur le site de Crépieux-Charmy. synthèse des travaux effectués depuis 1985. rapport BRGM, 108 p.
- Tirat M., Cottureau C., Mongereau N., 2006** - Vallée du Rhône. Tome 2 : Aquifères et eaux souterraines en France. Ouvrage collectif, BRGM Editions, p. 658-687.
- Tricart J., Bravard J.P., 1991** - L'aménagement des trois plus grands fleuves européens : Rhin, Rhône et Danube. Problèmes et méfaits. Annales de Géographie. 1991, t. 100, n°561-562. Numéro du Centenaire. pp. 668-713.
- Vandenbeusch M., Roche J., 1975** - Nappe alluviale de la basse plaine de la Garonne dans la région toulousaine. Influence gravières - captages. 1ere partie : étude hydrodynamique expérimentale du colmatage des berges de gravières. Rapport BRGM, 189 p.
- Vernoux J.F., Lenindre Y.M., Martin J.C., 2001** - Relations nappe-rivière et impact des prélèvements d'eau souterraine sur le débit des cours d'eau dans le bassin de la Juine et de l'Essone. Rapport BRGM, 133 p.