

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



**PHASE 2 - ETUDE DES ETIAGES HISTORIQUES, RECONSTITUTION
DES DEBITS DESINFLUENCES ET EVALUATION DE L'EMPREINTE DES
INFLUENCES ANTHROPIQUES SUR LES DEBITS DU RHONE**

*Document C - Rapport thématique Hydrogéologie :
Estimation des impacts des prélèvements en nappes sur
le débit du 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.

Synthèse de l'étude	
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
Phase 1 - Caractérisation du territoire du fleuve Rhône et Bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles	
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
Phase 2 - Etude des étiages historiques ; Reconstitution des débits désinfluencés et Evaluation de l'empreinte des influences anthropiques sur les débits du Rhône	
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
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	
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
Phase 4 - Détermination des conditions limites de débits pour les espèces	
A	Rapport principal de phase 4
B	Résumé de la phase 4
Phase 5 - Synthèse des débits limites pouvant être définis dans le Rhône et Approche des volumes prélevables	
A	Rapport principal de phase 5
B	Résumé de la phase 5
Phase 6 - Etude de la sensibilité des étiages du Rhône à des scénarios prospectifs	
A	Rapport principal de phase 6
B	Résumé de la phase 6

	BRL ingénierie 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5
Sous-traitants	HYDROFIS (aspects hydrogéologiques)

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

Titre du document	Phase 2 – Document C : Rapport thématique Hydrogéologie : Estimation des impacts des prélèvements en nappes sur le débit du Rhône
Référence du document :	800420_Ph2_C_Hydrogeologie
Indice :	VFb

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 DÉBITS DU RHÔNE EN PÉRIODE DE « BASSES EAUX »

Phase 2 – Document C : Rapport thématique Hydrogéologie : Estimation des impacts des prélèvements en nappes sur le débit du Rhône

PRÉAMBULE.....	1
RÉSUMÉ.....	3
1. MÉTHODOLOGIE	13
1.1 Considérations générales	13
1.1.1 Cadrage de la méthode	13
1.1.2 Vers une méthode expéditive d'estimation de l'impact d'un prélèvement en nappe sur le débit estival du Rhône	14
1.2 Stratégie globale	16
1.2.1 Définition et classification des unités aquifères	16
1.2.2 Détermination d'éléments de méthode	16
1.2.3 Application au système Rhône	19
2. DÉLIMITATION DES UNITÉS AQUIFÈRES.....	21
2.1 Nappe alluviale du Rhône	22
2.1.1 Périmètre	22
2.1.2 Sectorisation liée aux paramètres hydrodynamiques :	27
2.1.3 Sectorisation liée aux ouvrages	31
2.1.4 Sectorisation liée aux types d'encaissants géologiques	35
2.1.5 Sectorisation liée à l'interface nappe-rivière	41
2.2 Nappes des formations annexes	45
2.2.1 Nappes alluviales latérales	47
2.2.2 Nappes des formations annexes molassiques et fluvio-glaciaires	51
2.2.3 Les cailloutis de la Crau : une nappe à exutoire hors bassin versant	55

3. ELÉMENTS DE MÉTHODE.....	57
3.1 Approche de l'impact quantitatif des prélèvements en nappe alluviale par la solution analytique de Theis	57
3.1.1 Considérations théoriques	57
3.1.2 Hypothèses pour les nappes alluviales des affluents	59
3.1.3 Hypothèses pour les formations annexes	63
3.1.4 Résultats	64
3.2 Approche systématique des impacts quantitatifs des prélèvements en nappe alluviale par simulations numériques	66
3.2.1 Considérations théoriques	66
3.2.2 Géométrie des modèles	69
3.2.3 Tests préliminaires	76
3.2.4 Configuration du Rhône libre	86
3.2.5 Configuration d'un cours d'eau endigué	91
3.2.6 Configuration "îlot"	96
3.2.7 Matrices	99
3.3 Approche de l'impact quantitatif des prélèvements dans les formations annexes	100
3.3.1 Considérations théoriques	100
3.3.2 Cas des formations fluvio-glaciaires	101
3.3.3 Cas des formations molassiques	104
4. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE EXPÉDITIVE	107
4.1 Synthèse des éléments de méthode	107
4.1.1 Typologie des impacts	107
4.1.2 Paramètres explicatifs des impacts	109
4.2 Croisement des approches et proposition de simplification	110
4.2.1 Proposition de méthode	110
4.2.2 Analyse critique de la méthode proposée	111
4.2.3 Étendue et limites de la méthode	116
4.3 Application à la naturalisation des débits du Rhône	117
4.3.1 Définition des matrices pour le système Rhône	117
4.3.2 Sectorisation du bassin versant	120
4.3.3 Quantification des impacts	123
5. RÉFÉRENCES DOCUMENTAIRES	125

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Stratégie globale pour la définition d'une méthode expéditive.	15
Figure 2 : Relations possibles entre un cours d'eau et sa nappe alluviale.	17
Figure 3 : Relations possibles entre les formations annexes et le Rhône.	18
Figure 4 : Liste initiale des aquifères alluvionnaires liés au fleuve du Rhône (liste présentée dans le CCTP).	22
Figure 5 : Emprise de l'ensemble des entités de la nappe alluviale du Rhône.	24
Figure 6 : Liste étendue des aquifères alluvionnaires liés au fleuve du Rhône.	25
Figure 7 : Exemple de tracé du contour de la nappe alluviale.	26
Figure 8 : État des connaissances sur les perméabilités des alluvions du Rhône.	28
Figure 9 : Emplacement des zones alluviales du Rhône associé à des données du mur des alluvions.	29
Figure 10 : Tableau des différentes moyennes d'épaisseur déduites de l'altitude NGF des fonds IGN au 1 :25 000ème et de la couche des altitudes NGF du mur des alluvions du Rhône.	30
Figure 11 : Tracé sur SIG du linéaire du Rhône via la BD Carthage (IGN) en fonction des aménagements.	32
Figure 12 : Sectorisation proposée en fonction des ouvrages CNR - exemple du secteur de la plaine de Chautagne.	33
Figure 13 : Exemple de niveaux d'eau du Rhône en crue pour la détermination de l'influence amont des ouvrages de retenue.	34
Figure 14 : Grille de sectorisation en fonction de l'influence hydraulique des encaissants géologiques.	35
Figure 15 : 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).	36
Figure 16 : Exemple de secteur en relation avec une formation carbonatée de « petite dimension ».	37
Figure 17 : Exemple de secteur avec une influence latérale d'un encaissant carbonaté de grande dimension.	38
Figure 18 : Exemple de sectorisation de la nappe du Rhône en fonction de la position des ouvrages et des encaissants géologiques.	40
Figure 19 : Exemple du profil bathymétrique du Pk n°186 (Amont de Lyon).	41
Figure 20 : Exemple de linéaire d'échange au Pk n°186.	42
Figure 21 : Exemple de section mouillée au Pk n°186.	43
Figure 22 : Schéma de principe de la représentation du colmatage dans les modèles maillés.	44
Figure 23 : Liste des aquifères associés présentés dans le CCTP.	45
Figure 24 : Cartographie des unités annexes listées dans le CCTP (en bleu) et des unités alluviales liées au Rhône (en vert)	46
Figure 25 : Nouvelle liste proposée.	48
Figure 26 : Carte de l'ensemble des nappes alluviales latérales associées à leurs cours d'eau.	50
Figure 27 : liste des formations annexes dans le bassin versant.	52
Figure 28 : Cartographie des formations annexes et de leurs exutoires.	53

Figure 29 : Exemple du secteur de Vienne : présence conjointe d'une entité molassique et de formations fluvio-glaciaires à connexions superficielles avec le Rhône.....	54
Figure 30 : Cartographie des cailloutis de la Crau.	55
Figure 31 : Méthode des puits images (BRGM, 1995).	57
Figure 32 : Tableau de l'impact du pompage en fonction du temps réduit (BRGM, 1995).	58
Figure 33 : Liste des nappes alluviales latérales non renseignées par la BD LISA.	60
Figure 34 : Impact des prélèvements en fonction de la distance, pour les nappes alluviales des affluents du Rhône.....	64
Figure 35 : Distance moyenne en fonction du degré d'impact des prélèvements pour les nappes alluviales des affluents du Rhône.....	64
Figure 36 : Impact des prélèvements en fonction de la distance, pour les nappes fluvio-glaciaires.....	65
Figure 37 : Distance moyenne en fonction du degré d'impact des prélèvements pour les nappes fluvio-glaciaires du Rhône.	65
Figure 38 : Distance moyenne en fonction du degré d'impact des prélèvements pour les nappes molassiques.....	65
Figure 39 : Moyennes mensuelles des pluies efficaces (station de Bron).	68
Figure 40 : Distribution annuelle des pluies efficaces de 1970 à 2009 (station de Bron).	68
Figure 41 : Coupe schématique explicative de la configuration Rhône libre.	69
Figure 42 : Schéma explicatif du modèle Rhône libre.....	70
Figure 43 : Tableau des caractéristiques hydrodynamiques du modèle Rhône libre.	71
Figure 44 : Coupe schématique explicative de la configuration Rhône endigué.	71
Figure 45 : Schéma explicatif du modèle Rhône endigué.....	72
Figure 46 : Tableau des caractéristiques hydrodynamiques du modèle de Rhône endigué.	73
Figure 47 : Coupe schématique explicative de la configuration îlot.	74
Figure 48 : Schéma explicatif du modèle îlot.	75
Figure 49 : Tableau des caractéristiques hydrodynamiques du modèle îlot.	76
Figure 50 : Influence du débit sur les échanges nappe-rivière en moyenne annuelle.....	77
Figure 51 : Influence de la magnitude du débit d'un forage situé à 300 m d'un cours d'eau.	77
Figure 52 : Influence de la magnitude du débit d'un forage situé à 1 500 m d'un cours d'eau.	78
Figure 53 : Données mesurées et simulées de débit sur le Rhône.	79
Figure 54 : Vitesses estimées du Rhône en crue.....	79
Figure 55 : Indice de conductance associé au colmatage potentiel du fond et des berges du Rhône.	80
Figure 56 : Influence relative du colmatage sur le débit soutiré au cours d'eau (variabilité d'un facteur 2).....	81
Figure 57 : Influence relative du colmatage sur le débit soutiré au cours d'eau (variabilité d'un facteur 10).....	82
Figure 58 : Impact sur la piézométrie d'un pompage continu (Q continu sur 24 h) et alterné dans le temps (2Q sur 12 heures).....	83
Figure 59 : Impact sur les échanges nappe-rivière d'un pompage continu et alterné dans le temps.	84

Figure 60 : Impact cumulé sur les échanges nappe-rivière d'un pompage continu et alterné dans le temps.....	85
Figure 61 : Liste des simulations réalisées pour le modèle Rhône libre.....	86
Figure 62 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant fluvioglaciaire et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.....	87
Figure 63 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.....	88
Figure 64 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre sans encaissant et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.	88
Figure 65 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant fluvioglaciaire et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.....	89
Figure 66 : Influence Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.....	90
Figure 67 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre sans encaissant et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.	90
Figure 68 : Liste des simulations réalisées pour le modèle Rhône endigué.....	91
Figure 69 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant fluvioglaciaire et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.....	92
Figure 70 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.....	92
Figure 71 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué sans encaissant et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.	93
Figure 72 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant fluvioglaciaire et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.....	94
Figure 73 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.....	94
Figure 74 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.....	95
Figure 75 : Simulations et positions du point de prélèvement dans le modèle Îlot.	96
Figure 76 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un ilot (10^{-3} m/s).	97
Figure 77 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un ilot (10^{-2} m/s).	98
Figure 78 : Synthèse des matrices de simulation avec les pourcentages cumulés soutirés au fleuve pendant la période pompage.....	99
Figure 79 : Structure du modèle des formations fluvio-glaciaires avec exutoire souterrain.	102
Figure 80 : Résultats des simulations de couloirs fluvio-glaciaires avec exutoire souterrain.	103
Figure 81 : Matrice de détermination pour les nappes fluvio-glaciaires avec exutoire souterrain.	104

Figure 82 : Résultats de simulation pour la molasse avec exutoire souterrain.	105
Figure 83 : Matrice de détermination pour les nappes molassiques avec exutoire souterrain.	106
Figure 84 : Typologie des impacts des prélèvements en nappe sur les cours d'eau.....	108
Figure 85 : Typologie des impacts mensuels sur un cycle annuel, d'un prélèvement sur le débit d'un cours d'eau.....	109
Figure 86 : Temps de propagation de la station des affluents du Rhône jusqu'à la confluence avec le fleuve.....	113
Figure 87 : Réactivité de la Saône à un événement pluvieux en période hautes eaux.	114
Figure 88 : Réactivité de la Saône à un événement pluvieux en période basses eaux.....	114
Figure 89 : Répartition des besoins en eau pour l'agriculture.	117
Figure 90 : Impact annuel mois par mois d'un prélèvement sur le débit du fleuve en amont de Viviers.	118
Figure 91 : Impact annuel mois par mois d'un prélèvement sur le débit du fleuve en aval de Viviers.	119
Figure 92 : Tableau regroupant les matrices finalisées.....	120
Figure 93 : Exemple de définition des zones d'impact des prélèvements sur le débit du système Rhône.	121
Figure 94 : Ensemble des zones pouvant impacter le débit du Rhône et matrices associées (extrait du SIG)	122
Figure 95 : Prélèvements bruts dans le bassin versant du Rhône (année de référence : 2010).	123
Figure 96 : Bilan des moyennes interannuelles des prélèvements agricoles par grands types de nappe.....	124
Figure 97 : Bilan des impacts en terme de volumes perdus pour le fleuve Rhône, consécutivement aux prélèvements dans les hydro systèmes souterrains.	124

PRÉAMBULE

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, ...). **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 ;
- ▶ une 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 (AEP, agricole, 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 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 6 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.

Le présent rapport propose une méthode pour estimer l'impact des prélèvements souterrains sur le débit du Rhône, particulièrement en période estivale (phase 2). La méthode proposée doit aussi permettre de traiter tous les prélèvements en nappes dans le bassin versant du Rhône, de façon à aider à la reconstitution de l'hydrologie non influencée du Rhône au pas de temps mensuel.

Son rédacteur principal est l'expert hydrogéologue P. Fénart de la société HYDROFIS. A. Pothin a pris en charge la sectorisation sous SIG des nappes contributives du bassin versant ; A. Brandière a collaboré à la modélisation numérique sous VISUAL MODFLOW.

Nous tenons aussi à remercier M. Chauveau de BRLi, qui a élaboré les données consolidées sur les prélèvements et nous a judicieusement conseillé sur l'hydrologie des cours d'eau superficiels.

RÉSUMÉ

La problématique adressée par cette étude, est celle de l'impact des prélèvements dans les hydro systèmes souterrains, à l'échelle du bassin versant, sur les débits du fleuve Rhône, en particulier à l'étiage.

QUELLES SONT LES RELATIONS ENTRE UNE NAPPE ET UN COURS D'EAU ?

Les relations entre une nappe alluviale et un cours d'eau sont réputées complexes.

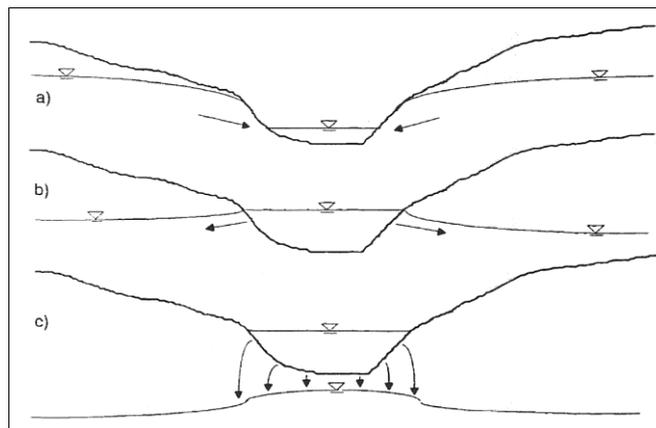
Les écoulements à surface libre et souterrain sont liés par le flux traversant le lit du cours d'eau. Pour évaluer le débit entre le cours d'eau et l'aquifère, il faut connaître les élévations respectives de la surface libre et de la nappe phréatique.

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.

Relations possibles entre un cours d'eau et sa nappe alluviale.



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. En première approximation, hormis pour certains cas très particuliers, on peut cependant supposer que les cours d'eau drainent les nappes alluviales en période d'étiage. L'inertie des hydro systèmes souterrains est en effet bien supérieure à celle des hydro systèmes superficiels

Quelle que soit cette complexité, 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 à plus ou moins long terme, les nappes qu'il traverse. Ainsi, 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 je 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 et pour l'industrie, 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,.....

QUELS SONT LES PRÉLÈVEMENTS BRUTS DANS LE BASSIN VERSANT DU RHÔNE ?

Le tableau ci-dessous présente les ordres de grandeur des prélèvements bruts dans le système Rhône (année 2010), par destinations et par origine des eaux.

Prélèvements bruts dans le bassin versant du Rhône (année de référence : 2010).

	Fleuve Rhône	Affluents	Nappe du Rhône	Autres nappes	Total général
AEP	23	494	176	415	1 109
Agriculture	704	1 666	26	100	2 496
Industrie	160	153	193	183	689

Insistons sur les points suivants :

- Les prélèvements d'eaux souterraines sont minoritaires devant celles affectant le réseau superficiel (environ 26% des prélèvements totaux).
- Les prélèvements d'eaux souterraines sont majoritairement destinés à l'AEP (environ 55%).
- Les prélèvements en eaux souterraines se font majoritairement dans les autres nappes que la nappe alluviale du Rhône.
- Les prélèvements agricoles représentent seulement 3% des prélèvements bruts et 12% des prélèvements en eaux souterraines.

QUEL IMPACT DES PRÉLÈVEMENTS PERMANENTS DANS LES HYDRO SYSTÈMES SOUTERRAINS ?

Pour les prélèvements destinés à l'AEP ou à l'industrie, la méthode proposée considère que les débits prélevés impliquent une perte équivalente au réseau hydrographique et donc au Rhône (cas des prélèvements constants).

L'application de la méthode définie permet d'estimer la part de ces prélèvements qui va être soustrait au fleuve Rhône durant les 4 mois d'étiage systématiques (juin à septembre). Elle est d'environ 200 Mm³ pour les prélèvements AEP et d'environ 120 Mm³ pour les prélèvements destinés à l'industrie (33% du volume prélevé annuel)

Soit environ 30 m³/s en débit fictif cumulé, lié aux prélèvements AEP et industriels, perdu pour le fleuve durant les mois d'été.

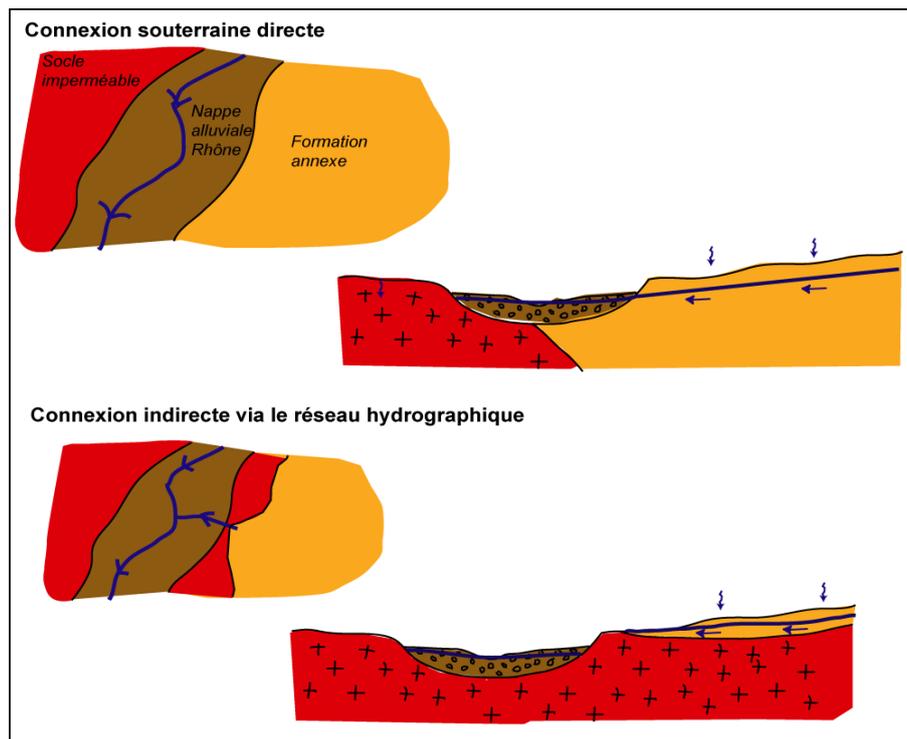
QUEL IMPACT DES PRÉLÈVEMENTS TEMPORAIRES DANS LES HYDRO SYSTÈMES SOUTERRAINS ?

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

Le travail d'analyse hydrogéologique a ainsi porté 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.

Relations possibles entre les formations annexes et le Rhône.



Les formations fluvio-glaciaires, comme les formations molassiques, peuvent être connectées au fleuve de deux façons différentes :

- Par le biais de résurgences qui viennent alimenter des cours d'eau, qui alimentent eux-mêmes le fleuve.
- Par un contact indirect entre les nappes des formations annexes et la nappe alluviale du Rhône. On parlera alors de formations annexes avec connexion souterraine directe.

Nous avons combiné trois approches différentes pour essayer de définir des éléments de méthode pour pouvoir estimer l'impact des prélèvements en nappe sur le débit du fleuve :

- Approche par le développement de la solution analytique de Theis.
- Approche par une analyse de sensibilité basée sur des simulations numériques 3D réalisées avec le logiciel VISUAL MODFLOW.
- Approche de type exploratoire pour des modèles de nappe de grande dimension à l'aide du logiciel VISUAL MODFLOW.

La synthèse des approches développées permet de proposer une typologie des impacts sur le débit des cours d'eau, causés par des prélèvements dans les hydro systèmes souterrains, résumée dans la figure ci-après. Quatre types de phénomènes sont susceptibles de se produire consécutivement à un pompage des eaux souterraines :

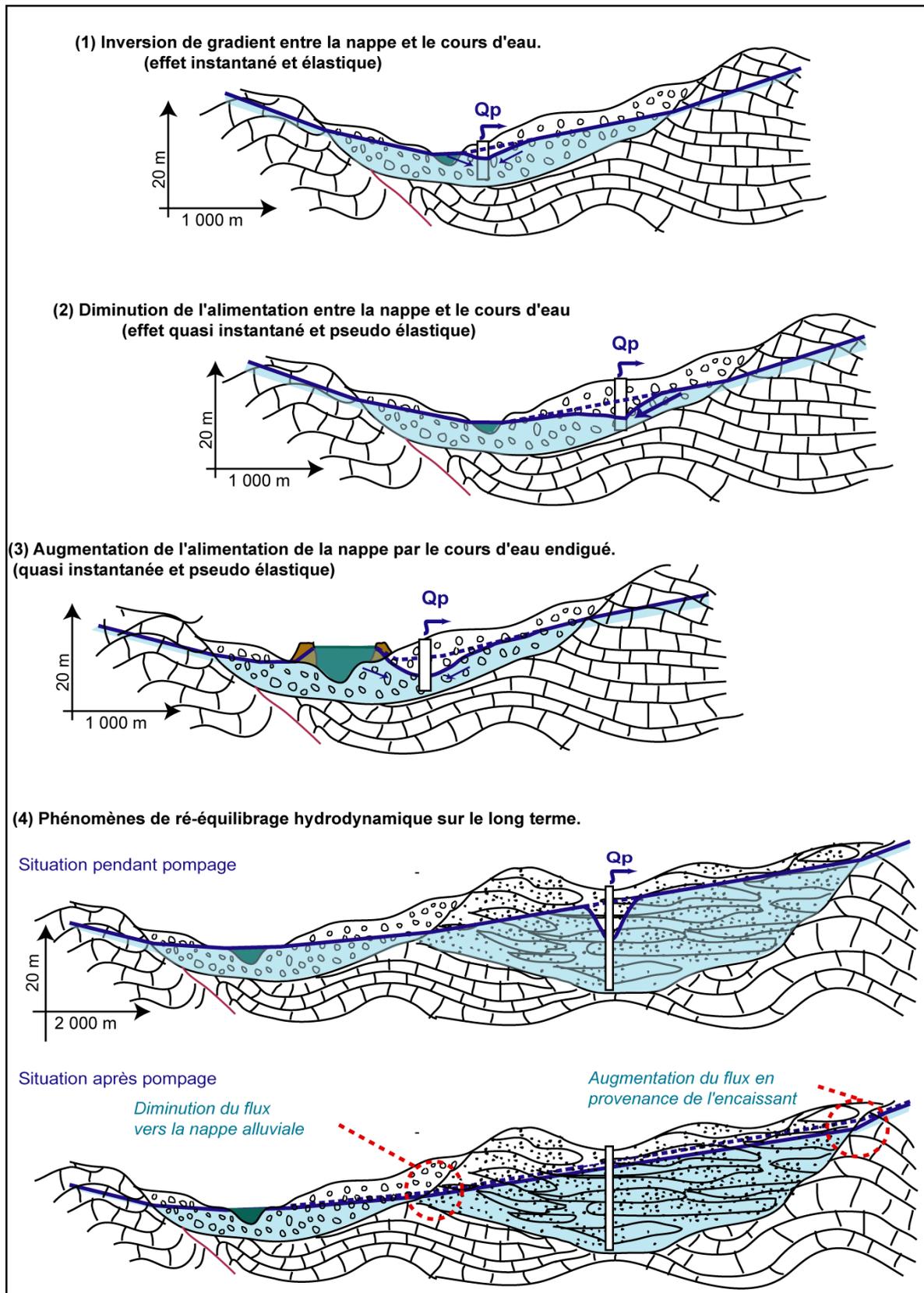
- L'inversion de gradient entre le cours d'eau et la nappe (valable pour des nappes alluviales). Il implique la proximité du point de pompage au cours d'eau et un rabattement important (paramètres hydrodynamiques défavorables).
- La diminution du gradient hydraulique entre la nappe alluviale et le cours d'eau durant la période de pompage ; en simplifiant, on observe alors une baisse du débit d'alimentation du cours d'eau par la nappe. Cet effet est plus ou moins décalé dans le temps en fonction de la distance au cours d'eau et des paramètres hydrodynamiques. Ceci étant, au vu des durées de pompage pluri-mensuelles, on peut qualifier ce phénomène de quasi-instantané et de pseudo élastique (la nappe retrouve sa configuration rapidement après l'arrêt du pompage). C'est le phénomène majoritairement observé lors des simulations numériques de nappes alluviales.
- Dans la configuration spécifique au Rhône de l'îlot, caractérisée par une alimentation partielle de la nappe par le Rhône endigué, en position haute par rapport à cette dernière, le pompage peut accentuer le débit d'alimentation de la nappe par le cours d'eau, en augmentant le gradient hydraulique entre les deux hydro systèmes.
- Phénomène de rééquilibrage hydrodynamique sur le long terme entre la nappe et ses encaissants géologiques. Si le pompage est trop éloigné pour produire un effet pseudo-élastique et quasi instantané, le volume soutiré à la nappe va induire une baisse "globale" de la nappe ; en effet dans ce cas, le volume soutiré n'a pas pu être compensé par une moindre alimentation des exutoires. On va alors observer des phénomènes complexes de rééquilibrage étalés sur plusieurs mois, voire plusieurs années (cela dépend de la géométrie des réservoirs, et des contrastes de perméabilité entre la nappe et ses encaissants), avec une modification progressive des gradients hydrauliques entre la nappe et ses encaissants, mais aussi entre la nappe et ses exutoires.

Notons que les effets de ses phénomènes peuvent se cumuler.

Les simulations numériques permettent d'obtenir les résultats suivants :

- Le phénomène prépondérant pour les prélèvements en nappes alluviales est la diminution du gradient hydraulique entre la nappe et le cours d'eau. L'inversion de gradient hydraulique n'est observée que rarement : pour les pompages situés à très courte distance des cours d'eau (moins de 200 mètres) ou pour des configurations hydrodynamiques peu fréquentes (fort méandrage).
- Dans la configuration de l'îlot (partie de nappe encadrée par deux bras de cours d'eau, endigué ou non), l'impact d'un prélèvement en nappe se traduit par une perte quasi synchrone au pas de temps mensuel, que ce soit par augmentation du débit drainé par la nappe dans les secteurs endigués ou par diminution du débit retournant au cours d'eau dans les secteurs non endigués.
- Le phénomène prépondérant lié aux prélèvements dans les formations annexes très perméables (formations fluvioglaciales ou nappes alluviales d'affluents), comme dans les formations moins perméables (molasses ou formations carbonatées), est celui du rééquilibrage hydrodynamique. Les effets sur le Rhône sont décalés et étalés dans le temps. Ils sont caractérisés par une grande complexité, car ils impliquent aussi les équilibres hydrodynamiques avec les nappes ou les cours d'eau susceptibles d'alimenter ces formations annexes.

Typologie des impacts des prélèvements en nappe sur les cours d'eau.



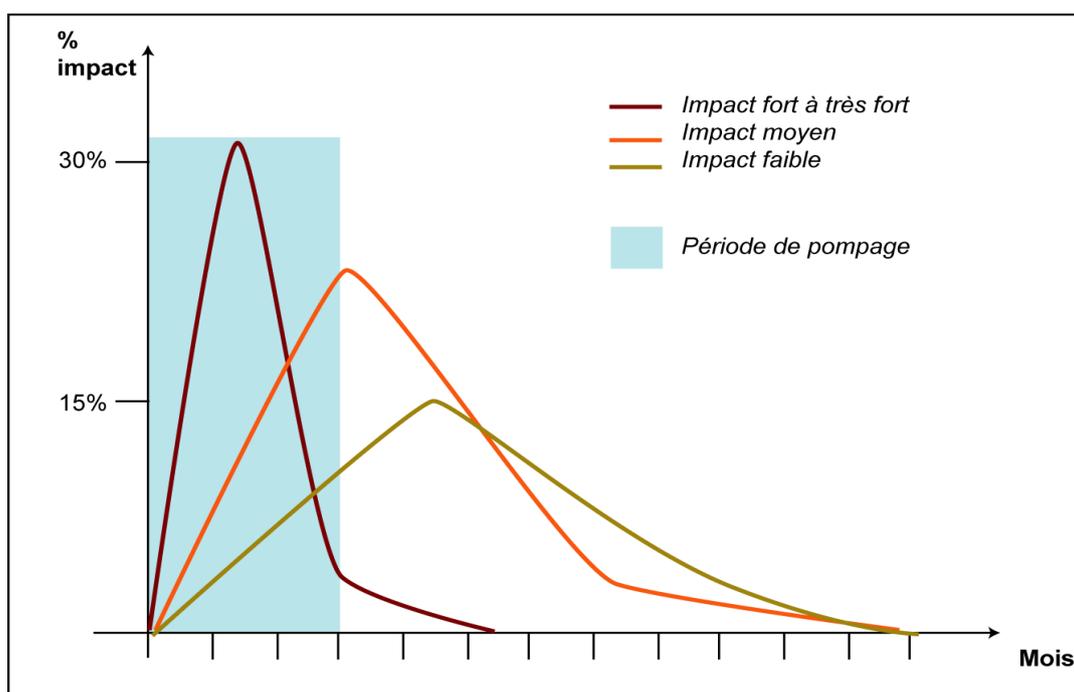
Le travail sur les éléments de méthode disponibles pour estimer les impacts quantitatifs de prélèvements en nappe sur le système Rhône peut se résumer de la façon suivante :

- L'approche à partir du développement de la solution analytique de Theis permet d'estimer le pourcentage du débit soutiré au cours d'eau dans une nappe alluviale, pendant la période de pompage. Cette approche ne donne aucune information sur la distribution mensuelle des impacts relatifs du prélèvement sur le débit du cours d'eau.
- L'approche par simulations numériques 3D en régime transitoire produit elle-aussi une estimation de cet impact durant la période de pompage, mais aussi une clé de répartition (ou matrice d'impact) sur les autres mois de l'année.

Ajoutons que l'analyse de sensibilité a montré que les paramètres explicatifs principaux pour les échanges nappe-rivière sont la transmissivité de l'aquifère, et la distance du point de prélèvement au cours d'eau.

Insistons sur une observation essentielle : l'analyse de sensibilité montre une bonne concordance entre le pourcentage d'impact cumulé pendant la période pompage et la distribution des pourcentages d'impact dans les clés de répartition annuelles. Plus l'impact est faible, plus la forme de la courbe annuelle d'impact est étalée et différée dans le temps. Et ce pour toutes les hypothèses testées (cf. figure ci-dessous).

Hiérarchisation des impacts mensuels sur un cycle annuel, d'un prélèvement sur le débit d'un cours d'eau.



Dans un premier temps, nous avons donc croisé les éléments de méthode de façon à pouvoir attribuer à chaque prélèvement une matrice d'impact sur le débit du fleuve.

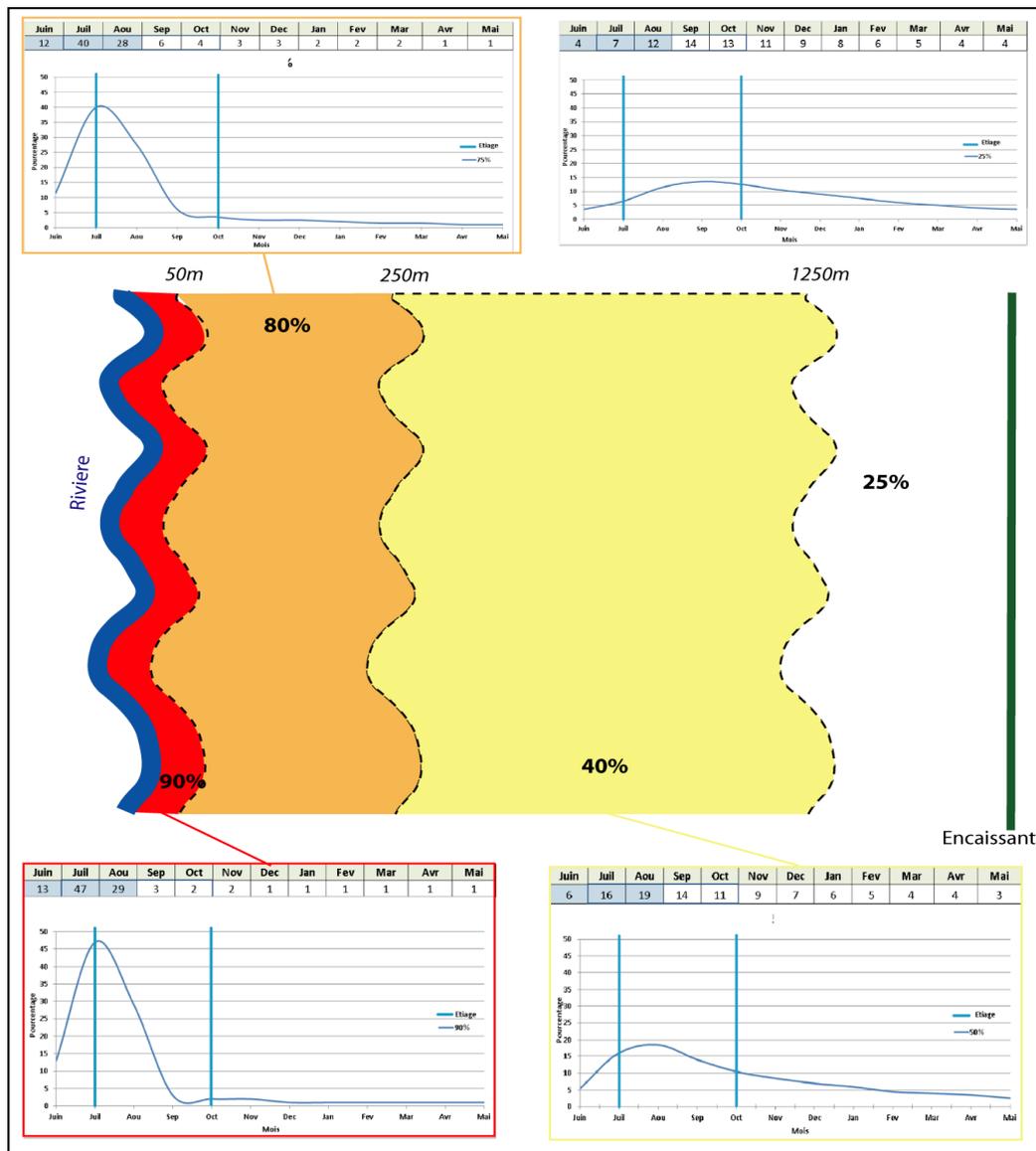
On appelle matrice d'impact une répartition par pourcentage du débit prélevé réparti mois par mois. À titre d'exemple, on peut ainsi obtenir deux comportements extrêmes :

- Un système sans inertie, avec pour un prélèvement constant réparti sur 3 mois, une matrice d'impact avec les trois mois correspondant présentant des pourcentages de 33% (et donc 0% les autres mois de l'année).
- Une système totalement inertielle, avec pour un même prélèvement constant réparti sur 3 mois, une matrice d'impact avec des pourcentages de 8,3% réparti uniformément sur l'année.

Pour les nappes connectées à des hydro systèmes superficiels (Rhône ou affluents), les matrices d'impact tiennent compte de la distance du point de pompage au réseau superficiel et des paramètres hydrodynamiques ; notons que l'on fait ainsi implicitement l'hypothèse que les diminutions de débit estimées pour ces cours d'eau sont supposées se répercuter au débit du Rhône avec un décalage temporel inférieur à un mois.

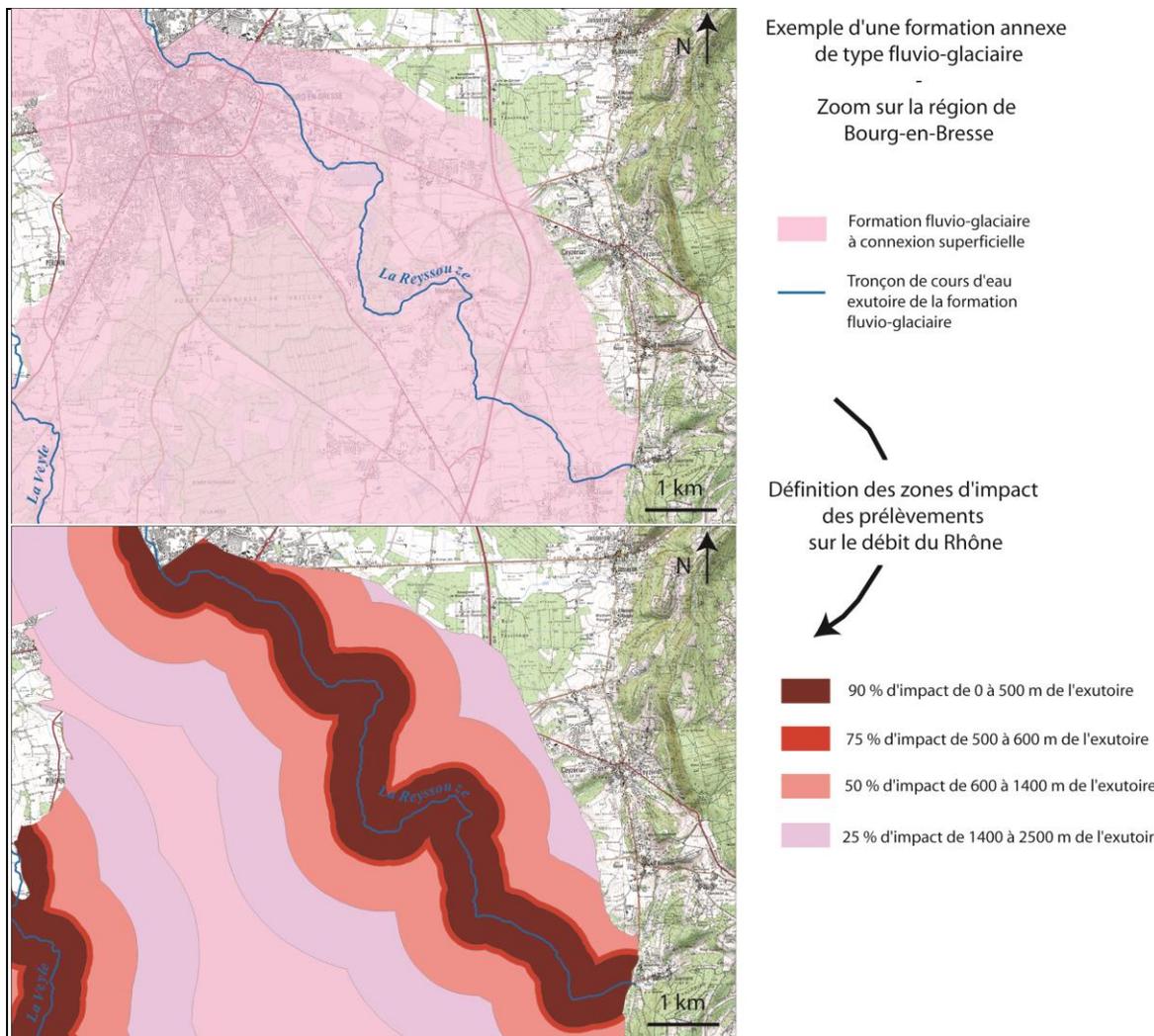
Pour les nappes sans connexion à des cours d'eau (exutoires principalement souterrains), on fait l'hypothèse simplificatrice que l'impact des prélèvements estivaux se répartit de façon homogène les 12 mois suivants. En effet, les prélèvements induisent des modifications complexes de l'équilibre hydrodynamique d'abord entre ces nappes et la nappe alluviale ; l'impact sur l'échange entre la nappe alluviale et le fleuve est ensuite modifié sur de grandes échelles de temps et selon des modalités très complexes.

Exemple de résultat : impact annuel mois par mois d'un prélèvement sur le débit du fleuve en amont de Viviers.



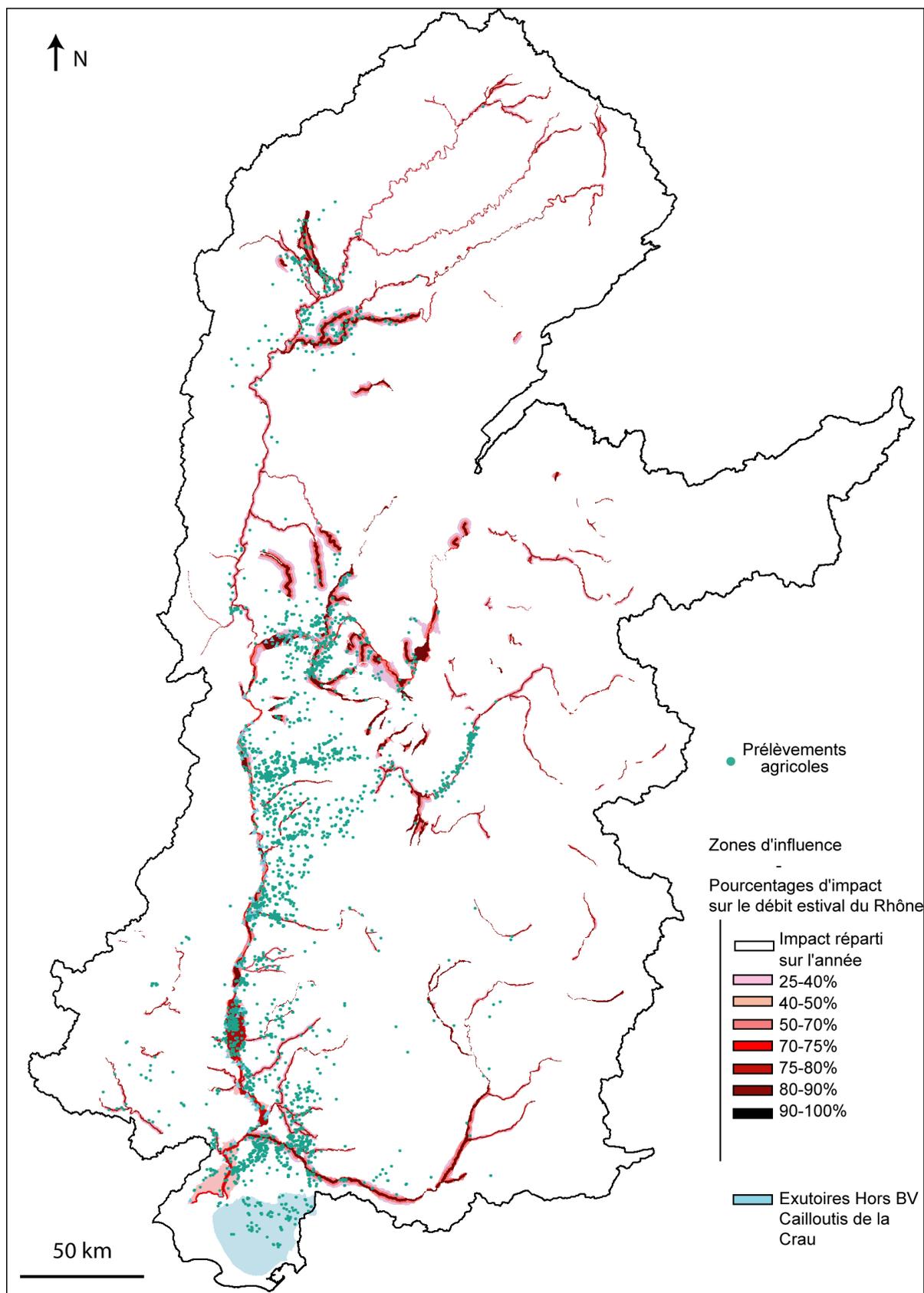
Dans un deuxième temps, nous avons sectorisé les nappes en relation forte avec les hydro systèmes superficiels, de manière à pouvoir attribuer automatiquement une matrice d'impact à tout point de prélèvement, en fonction de sa localisation dans le bassin versant. La figure ci-dessous permet d'illustrer le type de sectorisation mise en place.

Exemple de définition des zones d'impact des prélèvements sur le débit du système Rhône.



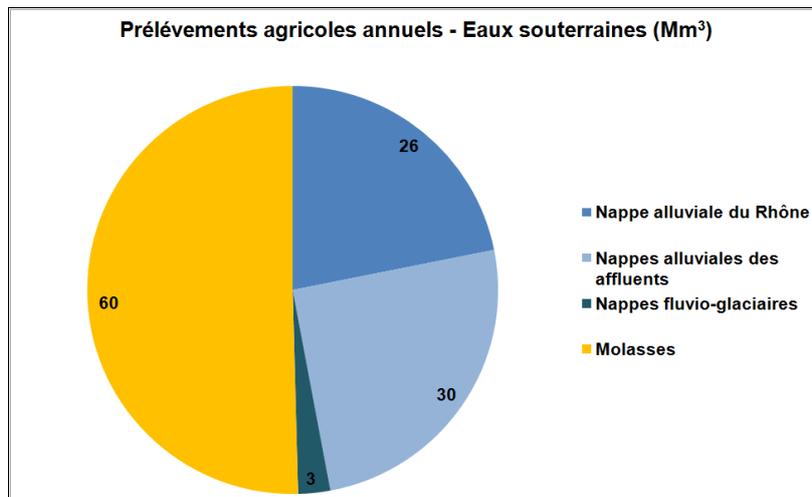
La figure suivante permet une visualisation des résultats à l'échelle du bassin versant du Rhône.

Ensemble des zones pouvant impacter le débit du Rhône et matrices associées (extrait du SIG)



Les données récoltées en phase 1 de l'étude permettent une première estimation des prélèvements agricoles annuels sur le bassin versant Rhône. Ils sont en cumulé de l'ordre de 120 Mm³.

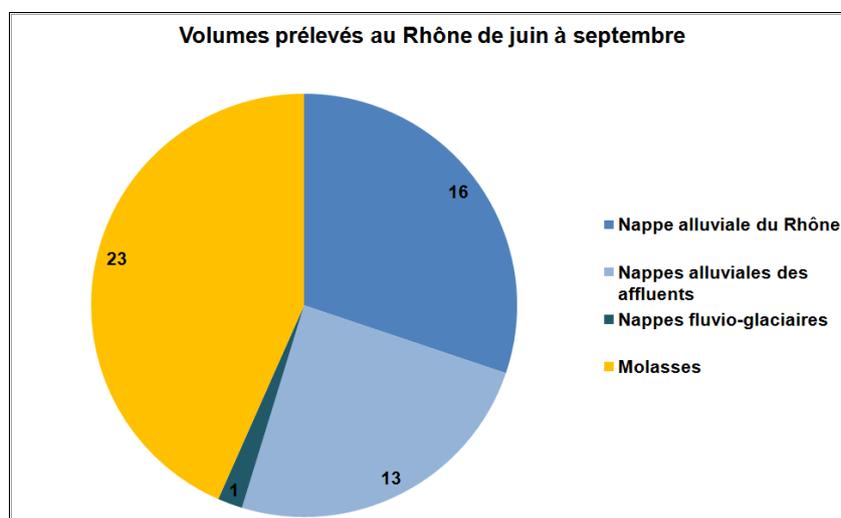
Bilan des moyennes interannuelles des prélèvements agricoles par grands types de nappe.



L'application de la méthode définie permet d'estimer la part de ces prélèvements qui va être soustrait au fleuve Rhône durant les 4 mois d'étiage systématiques (juin à septembre). Elle est de 53 Mm³ (soit 44% du volume prélevé).

Elle correspond à environ 5 m³/s en débit fictif lié aux prélèvements destinés à l'agriculture, perdu pour le fleuve durant les mois d'été.

Bilan des impacts en terme de volumes perdus pour le fleuve Rhône, consécutivement aux prélèvements dans les hydro systèmes souterrains.)



Il est cependant nécessaire d'insister sur le caractère expéditif de la méthode qui est relative à certaines échelles spatiales et temporelles.

La méthode proposée vise à estimer les impacts cumulés des milliers de prélèvements estivaux, principalement destinés à un usage agricole, à l'échelle du bassin versant du Rhône. Elle est basée sur l'agglomération d'éléments de méthode de précision variable ; les résultats associés donnent donc principalement des ordres de grandeur et seulement des ordres de grandeur.

Pour finir, les résultats sont représentatifs d'effets cumulés mensuels.

1. MÉTHODOLOGIE

1.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

1.1.1 Cadrage de la méthode

Selon les éléments proposés dans le CCTP, BR Li 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 réalisée 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 fluvioglaciales (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.

À 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 je 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,.....

1.1.2 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 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'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,....

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 :

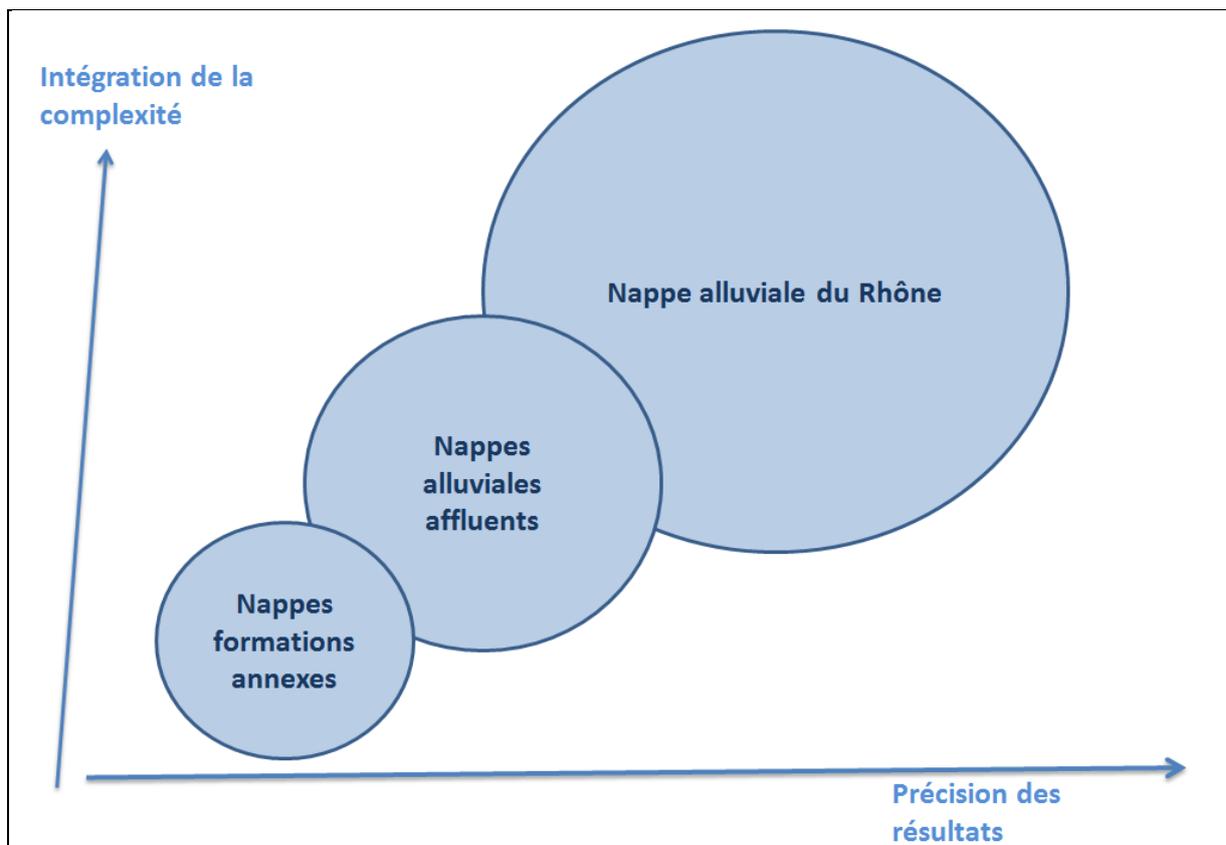
- Pour la nappe alluviale du Rhône, nous mettrons en œuvre une approche combinant une sectorisation du Rhône et une approche par modélisation hydrodynamique. Il s'agit de se doter d'une grille d'analyse pour chaque configuration hydrogéologique possible ; cette grille d'analyse résultera d'une approche 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'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,..) 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. Mais ces systèmes se caractérisent 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.

Insistons sur le caractère expéditif de la méthode. Elle vise à estimer les impacts cumulés des milliers de prélèvements estivaux, principalement destinés à un usage agricole, à l'échelle du bassin versant du Rhône. Elle est basée sur l'agglomération d'éléments de méthode de précision variable ; les résultats associés donnent donc principalement des ordres de grandeur et seulement des ordres de grandeur.

Figure 1 : Stratégie globale pour la définition d'une méthode expéditive.



1.2 STRATÉGIE GLOBALE

La méthode proposée résulte d'une approche réalisée en respectant trois phases :

- Redéfinition des limites des unités aquifères. L'objectif de cette phase était de se doter d'un référentiel géographique sous SIG pour pouvoir rattacher un prélèvement à une nappe.
- Détermination d'éléments de méthodes pour estimer les impacts quantitatifs de prélèvements dans une nappe sur le débit du Rhône.
- Synthèse et application au système Rhône.

1.2.1 Définition et classification des unités aquifères

Le premier travail a consisté à bien caractériser toutes les nappes objet de prélèvements agricoles conséquents à l'échelle du bassin versant du Rhône. On identifie ainsi la nappe alluviale du Rhône mais aussi des nappes secondaires :

- Les formations alluviales des affluents du fleuve.
- Les formations dites annexes : les grands bassins mollassiques et les nappes fluvio-glaciaires.

Ces formations annexes peuvent être connectées au fleuve de deux façons différentes :

- Par le biais de résurgences qui viennent alimenter des cours d'eau qui alimentent eux-mêmes le fleuve.
- Par un contact indirect entre nappes des formations annexes et nappe alluviale du Rhône. On parlera alors de formations annexes avec connexion souterraine directe.

L'identification des formations aquifères a été réalisée sous SIG à partir de la BD LISA. Un travail de sectorisation basé sur l'expertise hydrogéologique a été réalisé sur le bassin versant du Rhône et les différents objets qui lui sont liés : la nappe alluviale du Rhône, les nappes alluviales des affluents, les bassins mollassiques et les couloirs fluvio-glaciaires. Cela permet de catégoriser tous ces éléments en fonction de paramètres considérés comme homogènes.

Notons que ce travail de cartographie et de classification ne s'est pas limité aux nappes sujettes actuellement à des prélèvements agricoles ; c'est une approche plus systématique qui a été réalisée avec la cartographie de toutes les nappes pour lesquelles un prélèvement temporaire serait susceptible de venir impacter le débit du fleuve.

1.2.2 Détermination d'éléments de méthode

Les relations entre une nappe alluviale et un cours d'eau sont réputées complexes.

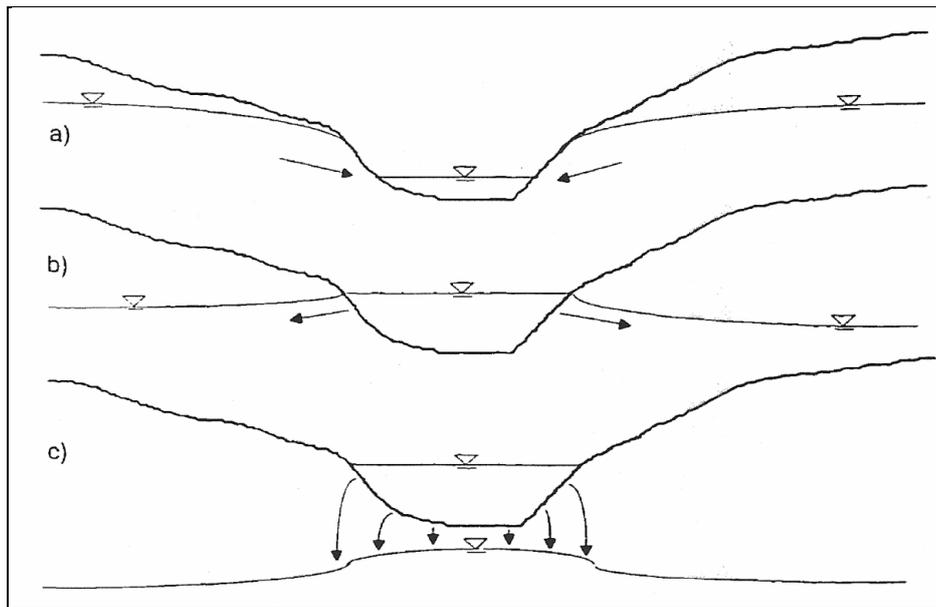
Les écoulements à surface libre et souterrain sont liés par le flux traversant le lit du cours d'eau. Pour évaluer le débit entre le cours d'eau et l'aquifère, il faut connaître les élévations respectives de la surface libre et de la nappe phréatique.

Trois situations sont possibles :

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

La figure ci-dessous illustre ces trois potentialités.

Figure 2 : Relations possibles entre un cours d'eau et sa nappe alluviale.



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.

Ajoutons que dans la problématique du système Rhône, il est aussi nécessaire de s'intéresser aux prélèvements dans les nappes alluviales des affluents et des formations annexes. La problématique hydrodynamique est encore plus complexe.

Nous avons donc combiné trois approches différentes pour essayer de définir des éléments de méthode pour pouvoir estimer l'impact des prélèvements en nappe sur le débit du fleuve :

- Approche par le développement de la solution analytique de Theis.
- Approche par une analyse de sensibilité basée sur des simulations numériques 3D réalisées avec le logiciel VISUAL MODFLOW.
- Approche de type exploratoire pour des modèles de nappe de grande dimension à l'aide du logiciel VISUAL MODFLOW.

1.2.2.1 Approche par le développement de la solution analytique de Theis

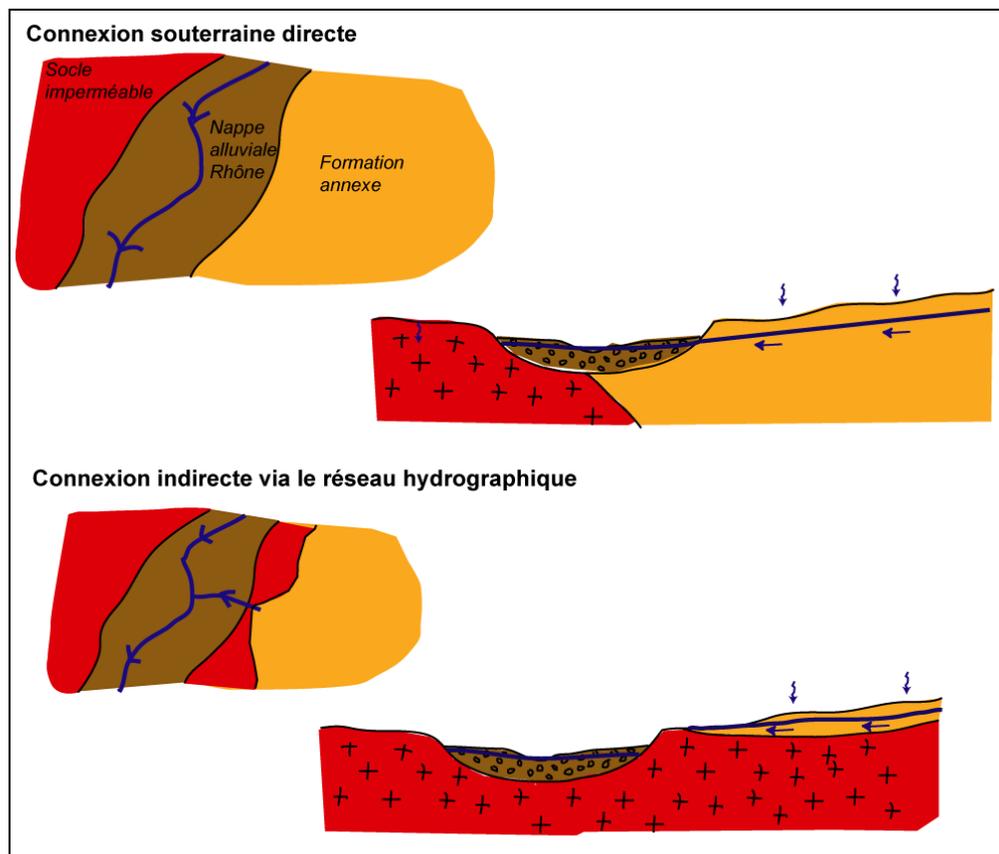
Pour le cas simple d'une nappe homogène connectée directement à un cours d'eau, en utilisant une approche basée sur les équations physiques (solution de Theis), on peut estimer à partir de quel temps le cône d'influence du pompage atteint le cours d'eau. Et en déduire en première approximation le pourcentage du débit prélevé soutiré à la rivière.

Cette solution a donc été utilisée pour les configurations hydrogéologiques jugées équivalentes : cas des nappes alluviales des affluents, mais aussi nappes fluvio-glaciaires avec exutoires superficiels et molasses drainées par des cours d'eau.

En effet, les nappes fluvio-glaciaires, comme les bassins molassiques, peuvent présenter 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.

Figure 3 : Relations possibles entre les formations annexes et 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.

La configuration hydrogéologique d'une connexion indirecte via le réseau hydrographique peut être ramenée à celle d'une nappe drainée par un cours d'eau, avec l'approximation analytique dérivée de l'équation de Theis.

1.2.2.2 Approche par analyse de sensibilité

L'impact des prélèvements dans la nappe alluviale du Rhône sur les débits estivaux du fleuve nécessite une approche spécifique, de par la complexité apportée par le fort aménagement du fleuve et la variabilité des contextes hydrogéologiques observée depuis la frontière Suisse jusqu'à l'embouchure en Méditerranée.

Cette complexité a été appréhendée par la réalisation de simulations hydrodynamiques à l'aide du logiciel VISUAL MODFLOW.

L'objectif est donc de proposer une démarche qui intègre toute la complexité spécifique de la nappe alluviale du Rhône, mais qui permet 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.

1.2.2.3 Approche phénoménologique

Il s'agira ici de s'intéresser aux principales formations annexes (systèmes fluvio-glaciaires et/ou bassins molassiques), qui présentent une connexion directe à la nappe alluviale du Rhône.

Pour tester la configuration hydrogéologique d'une connexion directe entre nappes, nous avons de nouveau utilisé le logiciel de simulation hydrodynamique Visual Modflow mais cette fois ci selon un mode opératoire exploratoire. Il s'agit principalement de déterminer le degré d'inertie des prélèvements vis-à-vis du fleuve.

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 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.

1.2.3 Application au système Rhône

Dans un troisième temps, nous avons croisé les éléments de méthode de façon à pouvoir attribuer à chaque prélèvement une matrice d'impact sur le débit du fleuve.

On appelle matrice d'impact une répartition par pourcentage du débit prélevé réparti mois par mois. À titre d'exemple, on peut ainsi obtenir deux comportements extrêmes :

- Un système sans inertie, avec pour un prélèvement constant réparti sur 3 mois, une matrice d'impact avec les trois mois correspondant présentant des pourcentages de 33% (et donc 0% les autres mois de l'année).
- Une système totalement inertiel, avec pour un même prélèvement constant réparti sur 3 mois, une matrice d'impact avec des pourcentages de 8,3% réparti uniformément sur l'année.

La définition de ces matrices et de leurs zones d'attribution a nécessité le croisement des éléments de méthode définis précédemment.

2. DÉLIMITATION DES UNITÉS AQUIFÈRES

Un travail de sectorisation basé sur l'expertise hydrogéologique a été réalisé sur l'axe Rhône et les différents objets qui lui sont liés : la nappe alluviale du Rhône, les nappes alluviales des affluents, les bassins molassiques et les couloirs fluvio-glaciaires. Cela permet de catégoriser tous ces éléments en fonction de paramètres considérés comme homogènes.

Afin de mener à bien cette mission et de mettre en avant le travail d'expertise hydrogéologique, il s'avérait nécessaire de travailler sur un Système d'Information Géographique (SIG), afin d'y centraliser et d'y traiter les données géo référencées utiles. Les résultats obtenus et présentés dans ce chapitre sont donc issus d'un travail de cartographie effectué sur le logiciel ArcGIS Basic v.10.1. Cela nous permet de visualiser l'ensemble des informations utiles.

Voici la liste d'une partie des données utiles à cette étape et mise à disposition par l'Agence de l'eau pendant l'étude (CCTP) :

- La base de données redevances « prélèvement » de l'Agence de l'eau sur les masses d'eau concernées par l'étude ainsi que le mode opératoire « liquidation de la redevance pour prélèvement d'eau sur la ressource » (cf. Annexe 11 du CCTP) ;
- La Base de Données Carthage, carte du réseau hydrographique ;
- Les fichiers SIG des masses d'eau superficielles et souterraines et des entités hydrogéologiques du bassin ; [...]

Voici l'ensemble des données géo référencées que nous avons pu finalement reporter dans un projet ArcGIS afin de travailler sur les réservoirs alluviaux et leurs aquifères adjacents :

- Un fond IGN au 1 : 25 000ème mosaïqué permettant d'avoir un repère géographique et une vision de la topographie et de l'aménagement du Rhône (transmis par BRLi en complément de la base de données Rhône « BDT Rhône ») ;
- Des fonds géologiques au 1 : 250 000ème et 1 : 50 000ème issus du serveur WMS du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/spip.php?article31>) ;
- La limite du bassin versant total du Rhône effectué par BRLi (« BV_Rhone ») ;
- Le référentiel BD LISA du BRGM, découpage en entités hydrogéologiques à précision régionale recouvrant tout le bassin Rhône-Méditerranée et Corse, c'est la base de données hydrogéologique utilisée et transmise par l'Agence de l'eau (février 2013) ; des documents livrés en format PDF sont associés à cette BD avec le plus souvent des cartes piézométriques sur fond IGN au 1/25 000ème ;
- Des données de piézométrie « Isopièzes » issues également de la BD LISA dans le dossier « DonneesHydrogeol_BOU_FRC_RHA » et permettant de visualiser pour une majorité de plaines alluviales des instantanés piézométriques ; ces informations sont associées à une couche représentant le sens d'écoulement des nappes « Sens_écoulement » ;
- Des données de piézométrie sur la région PACA (BD Lisa) 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) ;
- Deux couches de courbes de niveau du mur et du toit des alluvions du Rhône (BD Lisa) et de certaines formations adjacentes à ces alluvions ;
- Une couche répertoriant les principaux champs captant existants, information transmise par l'Agence de l'eau (« Captages_AEP ») ;
- Des données de bathymétrie suivant plusieurs profils (avec les points cotes) discrétisant tout le Rhône environ tous les 500 m (« BDT_Rhone » transmise par BRLi) ;
- Les cours d'eau de la BD Carthage (IGN) : la couche « COURS_D_EAU », conformément au CCTP ;

- Les masses d'eau superficielle (cours d'eau principaux et secondaires) de l'Agence de l'eau sur tout le bassin Rhône Méditerranée et Corse, conformément au CCTP ;
- La base de données des prélèvements agricoles transmises conformément au CCTP sous forme de fichier Excel par BRLi puis transformée dans notre SIG en fichier de points géo référencés.

Toutes ces données sont référencées en Lambert 93 (datum RGF93).

Le chapitre présente le travail de sectorisation effectué grâce à l'utilisation de ces données géographiques ; avec dans une première partie, la nappe alluviale du Rhône et dans une seconde, les formations fluvio-glaciaires et molassiques regroupées en formations dites « annexes ».

2.1 NAPPE ALLUVIALE DU RHÔNE

2.1.1 Périmètre

Concernant la nappe d'accompagnement du Rhône, le CCTP présente 25 unités alluviales à étudier :

Figure 4 : Liste initiale des aquifères alluvionnaires liés au fleuve du Rhône (liste présentée dans le CCTP).

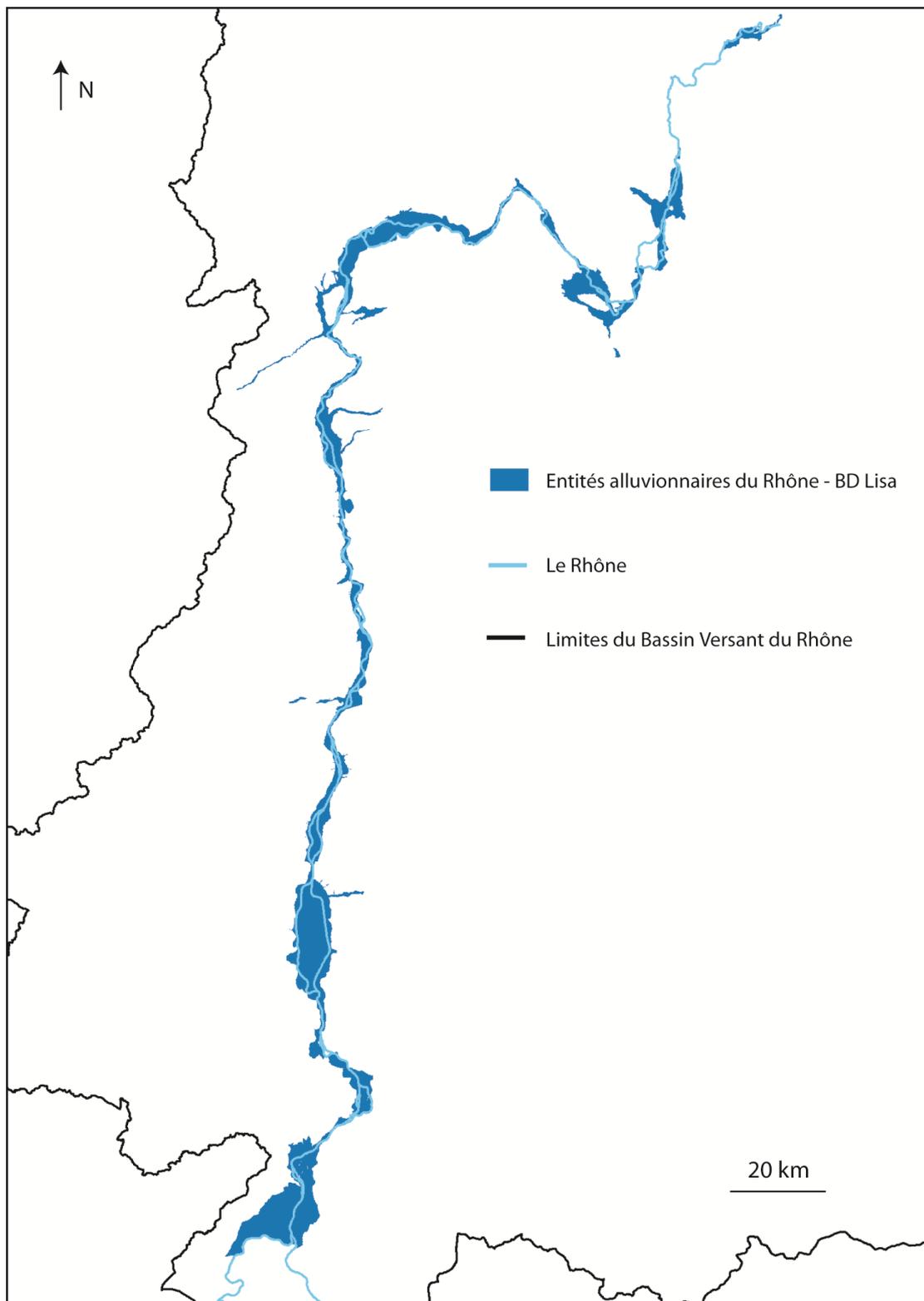
Les aquifères alluvionnaires liés au fleuve : alluvions récentes
Alluvions du Rhône - Secteur de Pougny
Alluvions du Rhône au débouché du Fier
Alluvions du Rhône dans la plaine de Lavours-Chautagne entre Seyssel et Yenne
Alluvions du Rhône dans la plaine de Morestel entre La Balme et Creys-Mepieu
Alluvions du Rhône entre Creys-Mepieu et Lagnieu
Alluvions en rive droite du Rhône entre l'île Crémieu et la confluence de l'Ain
Alluvions en rive droite du Rhône et du canal de Miribel entre la confluence de l'Ain et Miribel
Alluvions en rive gauche du Rhône entre l'île Crémieu et les canaux de Miribel-Jonage
Alluvions de l'île de Miribel-Jonage
Alluvions en rive gauche du Rhône entre la confluence des canaux de Miribel-Jonage et Solaize
Alluvions de la presqu'île de Lyon en amont de la confluence Saône-Rhône
Alluvions en rive droite du Rhône au Sud de Lyon entre La Mulatière et Irigny
Alluvions en rive gauche du Rhône de Solaize à Laveyron
Alluvions en rive droite du Rhône d'Irigny à la confluence de la Cance
Alluvions en rive gauche du Rhône de Laveyron à Tain-l'Hermitage
Alluvions en rive droite du Rhône de la confluence de la Cance à la confluence du Doux
Alluvions de la vallée du Rhône de Tain-l'Hermitage à Viviers
Alluvions de la vallée du Rhône de Viviers à Mornas
Alluvions récentes du Rhône entre Mornas et Roquemaure
Alluvions récentes du Rhône entre Roquemaure et Avignon
Alluvions quaternaires du Rhône en amont de Pont Saint Esprit
Alluvions quaternaires du Rhône entre Beaucaire et Villeneuve lès Avignon
Alluvions récentes du Rhône d'Avignon à Tarascon
Alluvions récentes du Rhône de Tarascon à Arles
Alluvions du Rhône à l'aval de Tarascon

Avec la mise à disposition du référentiel hydrogéologique du BRGM (BD Lisa) par l'Agence de l'eau en février 2013, un nouveau recensement complet des nappes alluviales du Rhône a été effectué. L'ensemble des fiches descriptives et des couches SIG de la BD Lisa constituent le référentiel jugé le plus complet. Cette base de données est utilisée par tous les partenaires de l'étude, son utilisation permet donc de travailler sur les mêmes références.

La BD Lisa s'articule en trois couches. Après observation sur SIG, il s'avère que la couche n°2 et 3 correspondent en grande partie aux systèmes alluviaux (« Entite_complementaires_niveau_2.shp » et « Entite_complementaire_niveau_3.shp »). Ce sont donc les contours de ces deux dernières sources d'information qui sont utilisées pour relever les entités de la nappe alluviale du Rhône.

La liste des entités correspondant à la nappe alluviale du Rhône est reportée ci-contre : les entités de niveau 2 incluent les sous-entités de niveau 3, découpage plus précis. Certaines entités de niveau 2 ne comprennent aucune entité de niveau 3, c'est le cas de la PAC01H (Alluvions récentes de Tarascon à Arles). De la même façon, certaines entités de niveau 3 sont indépendantes et ne sont pas incluses dans une entité de niveau 2 : c'est le cas de la PAC04G1 (Alluvions du Rhône entre Beaucaire-Tarascon au Nord et St-Gilles au Sud).

Figure 5 : Emprise de l'ensemble des entités de la nappe alluviale du Rhône.



En considérant le découpage alluvial le plus détaillé (le niveau 3), un ensemble de 28 unités est relevé.

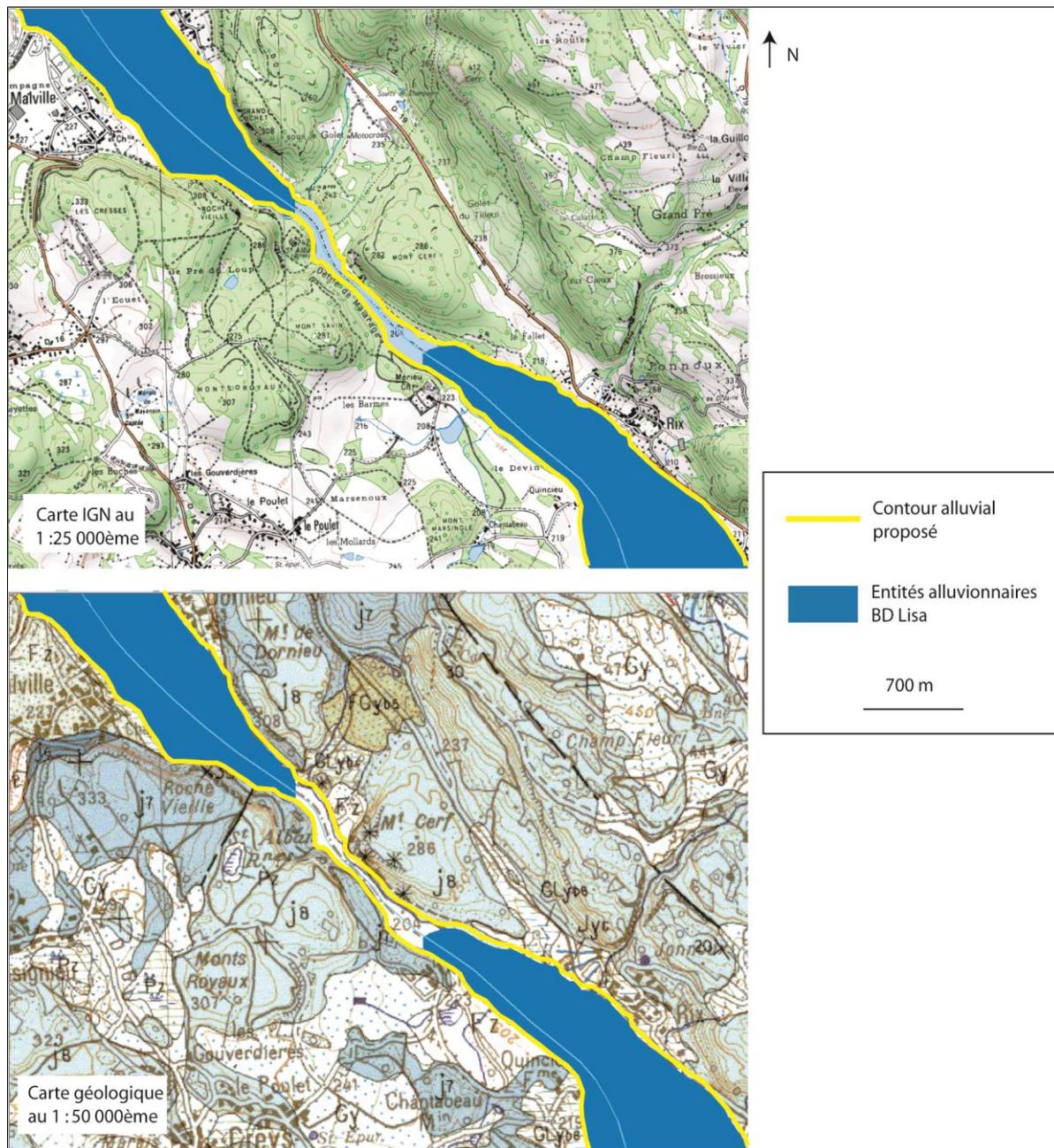
Figure 6 : Liste étendue des aquifères alluvionnaires liés au fleuve du Rhône.

Entités de niveau 2		Entités de niveau 3	
RHF_ENTITE	RHF_LIBELL	RHF_ENTITE	RHF_LIBELL
PAC01B	Alluvions récentes du Rhône de Viviers à Mornas	327E	Alluvions quaternaires du Rhône rive droite de la région de Pont St Esprit
PAC01C	Alluvions récentes du Rhône entre Roquemaure et Avignon	327F0	Alluvions quaternaires rive droite du Rhône entre Cèze et Tave
PAC01F	Alluvions récentes du Rhône d'Avignon à Tarascon	327G	Alluvions quaternaires du Rhône rive droite de l'Ardoise à Villeneuve lès Avignon
PAC01H	Alluvions récentes du Rhône de Tarascon à Arles	3288	Alluvions quaternaires du Rhône en rive gauche, boucle de Vallabrègues
RHD11	Alluvions de la vallée du Rhône entre Seyssel et Lagnieu	328C1	Alluvions quaternaires du Rhône rive droite entre Beaucaire et Villeneuve lès Avignon
RHD12	Alluvions de la vallée du Rhône entre Lagnieu et Solaize	542C1	Alluvions du Rhône dans la plaine de Lavours-Chautagne entre Seyssel et Yenne
RHD13	Alluvions de la vallée du Rhône de Solaize à Tain-l'Hermitage	94E	Alluvions du Rhône entre Creys-Mepieu et Lagnieu
RHD14	Alluvions de la vallée du Rhône de Viviers à Mornas	152L	Alluvions du Rhône dans la plaine de Morestel entre La Balme et Creys-Mepieu
RHD15	Alluvions de la vallée du Rhône de Mornas à Bollène	151G	Alluvions de la presqu'île de Lyon en amont de la confluence Saône-Rhône
		152A1	Alluvions en rive droite du Rhône entre l'île Crémieu et la confluence de l'Ain
		152A2	Alluvions en rive droite du Rhône et du canal de Miribel entre la confluence de l'Ain et Miribel
		152B1	Alluvions en rive gauche du Rhône entre l'île Crémieu et les canaux de Miribel-Jonage
		152B2	Alluvions de l'île de Miribel-Jonage
		152B3	Alluvions en rive gauche du Rhône entre la confluence des canaux de Miribel-Jonage et Solaize
		621C	Alluvions en rive droite du Rhône au Sud de Lyon entre La Mulatière et Irigny
		152J	Alluvions en rive gauche du Rhône de Solaize à Laveyron
		152J3	Alluvions des terrasses de Beausembiant
		603E	Alluvions en rive droite du Rhône d'Irigny à la confluence de la Cance
		152N	Alluvions en rive gauche du Rhône de Laveyron à Tain-l'Hermitage
		603F	Alluvions en rive droite du Rhône de la confluence de la Cance à la confluence du Doux
		154B	Alluvions en rive gauche du Rhône de Tain-l'Hermitage à Les Tourettes
		327A	Alluvions en rive gauche du Rhône des Tourettes au défilé de Donzère
		327A1	Alluvions en rive droite du Rhône de la confluence de l'Ouvèze au défilé de Donzère
		603G	Alluvions en rive droite du Rhône de la confluence du Doux à la confluence de l'Eyréux
		327B	Alluvions en rive droite du Rhône du défilé de Donzère à la confluence de l'Ardèche
		327C	Alluvions en rive gauche du Rhône en aval de Viviers
		327C1	Alluvions des terrasses entre Donzère et Bollène
		PAC04G1	Alluvions du Rhône entre Beaucaire-Tarascon au Nord et St Gilles au Sud
			Pais de mètre

Afin de quadriller l'ensemble de la vallée alluviale du Rhône, il s'est avéré nécessaire de disposer d'un contour alluvial continu, basé sur les entités de la BD Lisa précédemment retenues.

Une nouvelle couche vecteur a donc été créée sur SIG, par un tracé qui suit le contour du référentiel hydrogéologique (niveau 2 et/ou 3). Lorsqu'un secteur de la vallée n'est pas cartographié par la BD Lisa, il est choisi de suivre les contours géologiques au 1:50 000ème des alluvions récentes et lorsque ces derniers n'existent pas, les limites des berges du Rhône visibles sur fond IGN au 1:25 000ème sont suivies. En effet, dans ces secteurs non considérés comme des nappes alluviales à part entière par le BRGM, les alluvions récentes sont supposées localiser sous le lit mineur du fleuve, comme nous pouvons le voir dans le secteur Nord-Est de Creys-Meypieu (corridor alluvial). Rappelons que le but est de pouvoir associer à chaque tronçon du Rhône une zone alluviale qui lui est liée. Ainsi, certains contours sont « extrapolés » comme le cas de la plaine à l'aval de Chanaz, afin de suivre le cours du Vieux Rhône, situé initialement en dehors des entités de la BD Lisa.

Figure 7 : Exemple de tracé du contour de la nappe alluviale.



Nous obtenons ainsi un recouvrement total de la vallée alluviale du Rhône.

Une première couche vecteur est ainsi créée : « Contour_Alluvial_Rhone.shp » dans le dossier livré « Projet_SIG_Hydrogéologie_Rhone ».

2.1.2 Sectorisation liée aux paramètres hydrodynamiques :

Une première sectorisation est proposée pour distinguer les compartiments alluviaux qui correspondent à une perméabilité moyenne forte ($K=10^{-2}$ m/s) ou plus faible ($K=10^{-3}$ m/s). Les fiches descriptives de la BD Lisa ont été utilisées pour déterminer une prédominance d'une de ces valeurs.

Ce travail permet de dresser un premier aperçu quant aux moyennes de perméabilité rencontrées dans la vallée alluvionnaire du Rhône. Malheureusement, il débouche sur une incapacité à distinguer des objets alluviaux avec une perméabilité à 10^{-2} m/s. La lecture des 28 fiches des entités retenues permet en effet de conclure sur des perméabilités moyennes de 10^{-3} m/s seulement pour chacune d'entre elles.

Le tableau reporté ci-après décrit l'ensemble des informations qui sont synthétisées dans les textes descriptifs. Certains textes ne sont malheureusement pas assez précis pour pouvoir déterminer ce paramètre hydrodynamique (pas de perméabilité, ni de transmissivité ou d'épaisseur). Lorsqu'un intervalle trop important est donné : exemple de l'entité 542C1 (incluse dans la RHD11) avec des perméabilités allant de 10^{-6} à 10^{-2} m/s, la moyenne tend vers les valeurs les plus faibles : elle est donc supposée plutôt correspondre à 10^{-3} m/s qu'à 10^{-2} m/s. Cet intervalle peut se réduire à un écart de facteur 10 : $10^{-3} < K < 10^{-2}$ m/s (exemple de la 327E). Il n'est alors pas possible de déterminer une moyenne dominante. Lorsqu'aucune valeur de perméabilité n'est disponible et que des valeurs de transmissivité et d'épaisseur le sont, la perméabilité peut être estimée en calculant le rapport de transmissivité sur l'épaisseur.

Remarquons qu'une grande partie des fiches ne possède finalement aucune information sur les paramètres hydrodynamiques (« pas d'info »), par manque de précision dans la description. De plus, certaines entités de niveau 3 ne sont pas renseignées individuellement, mais la moyenne des paramètres hydrodynamiques concerne l'entité de niveau 2. Ainsi, les mêmes intervalles de valeurs sont reportés pour chaque entité de même famille (exemples des entités incluses dans la RHD13 et la RHD14).

Il faut cependant émettre une réserve quant à la signification réelle de ce type d'information : le calcul de ces paramètres s'effectue grâce à des campagnes de forage. Les ouvrages sont donc ponctuels et ne nous savons pas s'ils sont complets ou non (à quelle profondeur vont-ils ?). Remarquons qu'en règle générale, les forages n'atteignent que les parties superficielles des formations (pour atteindre la nappe d'accompagnement) et n'échantillonnent pas l'ensemble de la hauteur du compartiment alluvial. Nous faisons donc face à un problème d'échelle : il n'est pas possible de caractériser en grand des objets qui ne possèdent que des mesures non documentées et ponctuelles.

Notons qu'à terme, l'élaboration d'une carte des perméabilités à l'échelle de la vallée alluvionnaire du Rhône serait intéressante à élaborer.

Figure 8 : État des connaissances sur les perméabilités des alluvions du Rhône.

Entités de niveau 2		Entités de niveau 3		Texte descriptif - Synthèse
RHF_ENTITE	RHF_LIBELL	RHF_ENTITE	RHF_LIBELL	
PAC01B	Alluvions récentes du Rhône de Viviers à Mornas	327E	Alluvions quaternaires du Rhône rive droite de la région de Pont St Esprit	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
PAC01C	Alluvions récentes du Rhône entre Rochemaure et Avignon	327FO	Alluvions quaternaires rive droite du Rhône entre Cèze et Tave	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
PAC01F	Alluvions récentes du Rhône d'Avignon à Tarascon	327G	Alluvions quaternaires du Rhône rive droite de l'Ardoise à Villeneuve lès Avignon	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
PAC01H	Alluvions récentes du Rhône de Tarascon à Arles	328B	Alluvions quaternaires du Rhône en rive gauche, boucle de Vallabrègues	$K \cdot 10^{-7}$ m/s
RHD11	Alluvions de la vallée du Rhône entre Seyssel et Lagnieu	328C1	Alluvions quaternaires du Rhône rive droite entre Beaucaire et Villeneuve lès Avignon	pas d'info
RHD12	Alluvions de la vallée du Rhône entre Lagnieu et Solaize	542C1	Alluvions du Rhône dans la plaine de Lavours-Chautagne entre Seyssel et Yenne	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
RHD13	Alluvions de la vallée du Rhône de Solaize à Tain-l'Hermitage	94E	Alluvions du Rhône entre Creys-Mepieu et Lagnieu	pas d'info
RHD14	Alluvions de la vallée du Rhône de Tain-l'Hermitage à Viviers	152L	Alluvions du Rhône dans la plaine de Morestel entre La Balme et Creys-Mepieu	$K \cdot 10^{-4}$ m/s
RHD15	Alluvions de la vallée du Rhône de Viviers à Mornas	151G	Alluvions de la presque île de Lyon en amont de la confluence Saône-Rhône	pas d'info
		152A1	Alluvions en rive droite du Rhône entre l'île Crémieu et la confluence de l'Ain	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		152A2	Alluvions en rive droite du Rhône et du canal de Miribel entre la confluence de l'Ain et Miribel	pas d'info
		152B1	Alluvions en rive gauche du Rhône entre l'île Crémieu et les canaux de Miribel-Jonage	$K \cdot 10^{-4}$ à 10^{-2} m/s
		152B2	Alluvions de l'île de Miribel-Jonage	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		152B3	Alluvions en rive gauche du Rhône entre la confluence des canaux de Miribel-Jonage et Solaize	pas d'info
		621C	Alluvions en rive droite du Rhône au Sud de Lyon entre La Mulatière et Irigny	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		152J	Alluvions en rive gauche du Rhône de Solaize à Laveyron	pas d'info
		152J3	Alluvions des terrasses de Beausembiant	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		603E	Alluvions en rive droite du Rhône d'Irigny à la confluence de la Cance	$K \cdot 10^{-4}$ à 10^{-2} m/s
		152N	Alluvions en rive gauche du Rhône de Laveyron à Tain-l'Hermitage	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		603F	Alluvions en rive droite du Rhône de la confluence de la Cance à la confluence du Doux	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		154B	Alluvions en rive gauche du Rhône de Tain-l'Hermitage à Les Tourettes	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		327A	Alluvions en rive gauche du Rhône des Tourettes au défilé de Donzère	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		327A1	Alluvions en rive droite du Rhône de la confluence de l'Ouvèze au défilé de Donzère	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		603G	Alluvions en rive droite du Rhône de la confluence du Doux à la confluence de l'Eyrieux	$K \cdot 10^{-7}$ à 10^{-2} m/s
		327B	Alluvions en rive droite du Rhône du défilé de Donzère à la confluence de l'Ardèche	$K \cdot 10^{-7}$ m/s
		327C	Alluvions en rive gauche du Rhône en aval de Viviers	$K \cdot 10^{-7}$ m/s
		327C1	Alluvions des terrasses entre Donzère et Bollène	pas d'info
		PAC04G1	Alluvions du Rhône entre Beaucaire-Tarascon au Nord et St Gilles au Sud	pas d'info

Afin de compléter cette analyse, la couche SIG du mur des alluvions des Rhône et le fond topographique 1 : 25 000ème de l'IGN ont été utilisés pour déterminer en grands secteurs les moyennes d'épaisseur du compartiment alluvial. Un tableau de synthèse de ces moyennes d'épaisseurs est reporté ci-après.

Les isohypses des alluvions se répartissent du secteur de Chautagne à l'amont jusqu'à la plaine de Pierrelatte.

Figure 9 : Emplacement des zones alluviales du Rhône associé à des données du mur des alluvions.

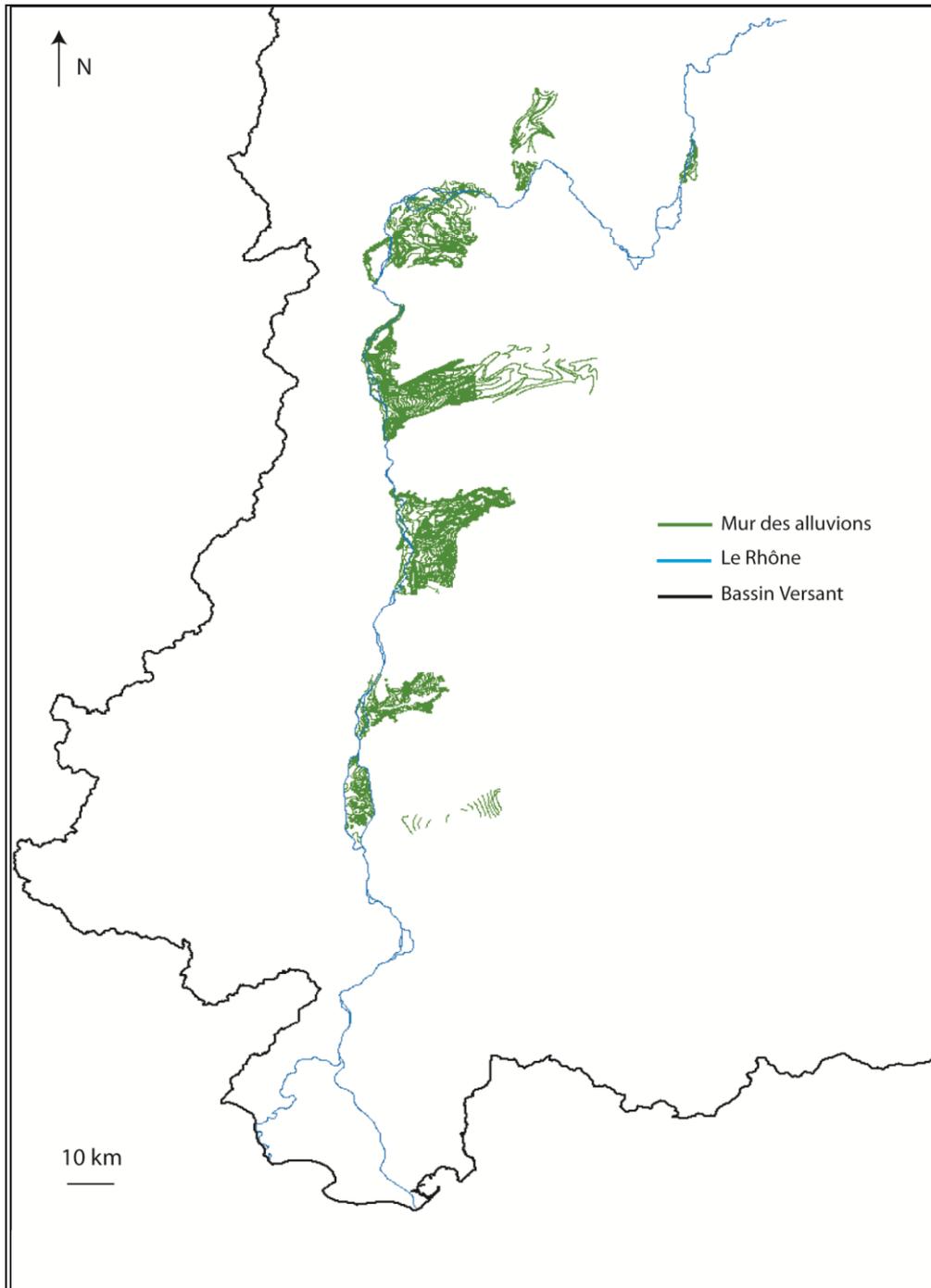


Figure 10 : Tableau des différentes moyennes d'épaisseur déduites de l'altitude NGF des fonds IGN au 1 :25 000ème et de la couche des altitudes NGF du mur des alluvions du Rhône.

Grands Secteurs d'amont en aval	Epaisseur moyenne d'alluvions
Plaine de Chautagne - Amont	80 m
Plaine de Chautagne - Aval	20 à 30 m
Confluence avec l'Ain	10 à 15 m
Dépressions de Miribel-Jonage	20 à 30 m
Secteur de Lyon	20 à 25 m
Secteur Nord de Vienne	40 m
Secteur Sud de Vienne (vallée encaissée)	30 - 35 m
Secteur d'Ampuis	40 à 50 m
Couloir Ampuis - Condrieu	30 m
Nord de Péage-Roussillon	25 - 30 m
Plaine de Péage-Roussillon	10 - 20 m
Secteur de Laveyron	20 à 30 m
Verrou de Tain L'Hermitage	30 m
Secteur de Mauves	30 m
Bourg-lès-Valence	20 à 30 m
Secteur de Porte lès Valence	15 - 20 m
Plaine de Montélimar - Roquemaure	5 m
Secteur de Donzère Mondragon	10 à 15 m
Domaine de la Barthelasse - Villeneuve lès Avignon	8 à 10 m

Trois grands types de secteurs se distinguent :

- les grandes plaines alluviales correspondant à des épaisseurs moyennes de 10 m (5 à 15 m) ;
- les corridors étroits, ou verrous, associés à un surcreusement des formations alluvionnaires et des épaisseurs d'environ 30 m (20 à 40 m) ;
- le secteur du Haut Rhône, en amont de Lyon, où les alluvions ont eu une dynamique de dépôt singulière, similaire aux formations fluvio-glaciaires grâce au retrait des glaciers au quaternaire ; les épaisseurs peuvent atteindre 80 m dans le secteur de Chautagne.

Cette seconde analyse sommaire montre que la géométrie des alluvions du Rhône varie de façon importante transversalement (épaisseurs variant du simple au double dans un même secteur) et longitudinalement (dimensions d'une plaine différentes de celles d'un corridor, ces deux configurations alternant constamment d'amont en aval).

Nous pouvons alors conclure sur l'impossibilité de sectoriser la nappe alluviale du Rhône en fonction de la perméabilité des alluvions ou de leur extension spatiale (sectorisation selon la transmissivité).

2.1.3 Sectorisation liée aux ouvrages

Afin d'étudier les différentes configurations hydrologiques et hydrogéologiques liées à la position des ouvrages de retenue du Rhône, il s'avérait nécessaire de créer une couche du linéaire du Rhône.

Pour ce faire, il est choisi d'utiliser la BD CARTHAGE de l'IGN afin d'extraire les objets vecteurs correspondant au linéaire du Rhône.

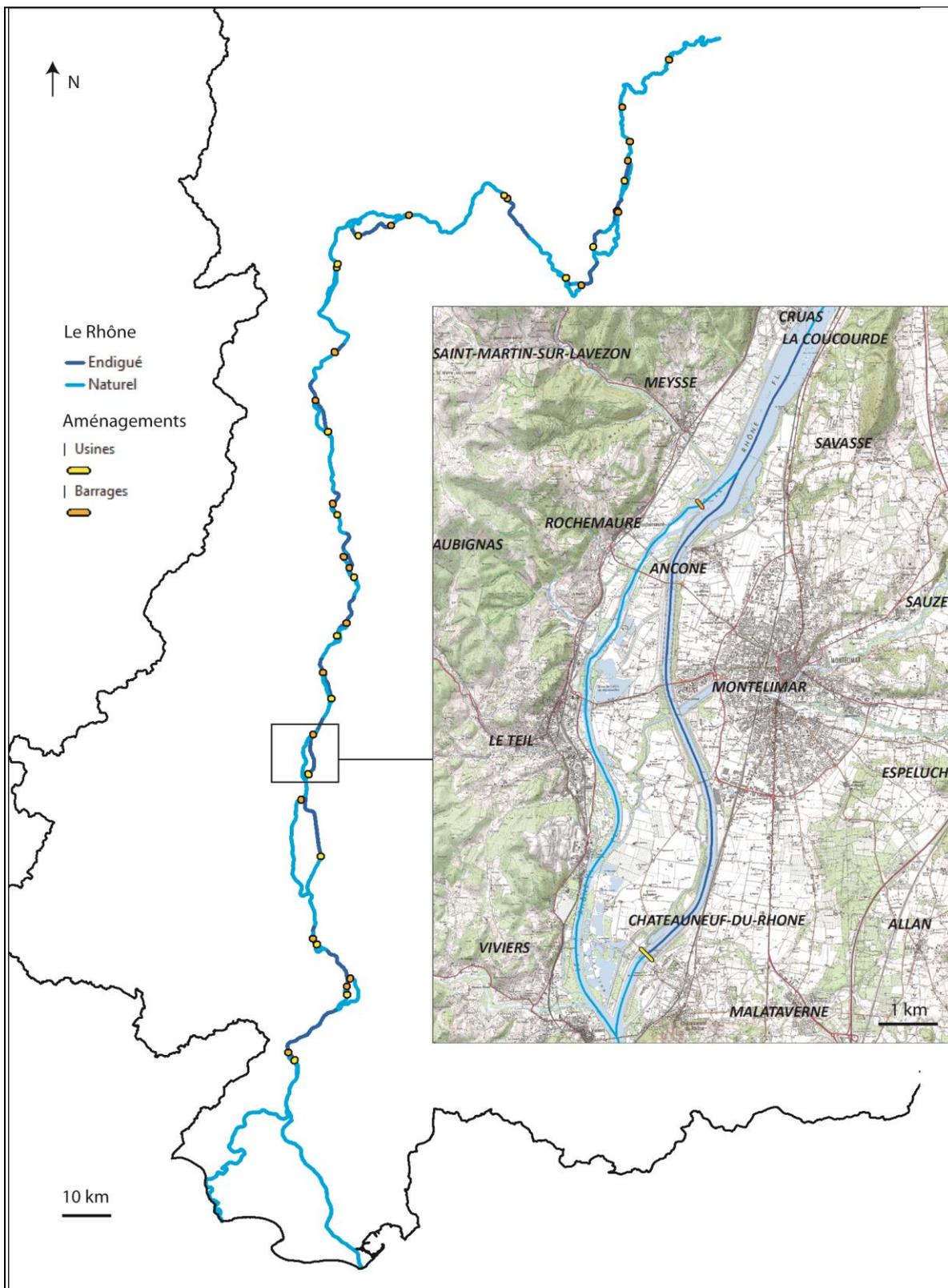
Une couche vecteur reportant les ouvrages de retenue et les usines hydro-électrique associées a également été créée sur la base de l'observation du fond IGN au 1 :25 000ème. Ces repères nous permettent de délimiter les canaux de dérivation en canaux d'amenée (à l'amont d'une usine) et canaux de fuite (à l'aval d'une usine). Le Rhône est ainsi jalonné par 24 ouvrages de retenue.

Associée à l'observation position des ouvrages, l'observation de la présence ou non de contre-canaux permet de définir des tronçons endigués (contre-canaux visibles) ou des tronçons de zone libre (pas de contre-canaux et souvent divagation du cours d'eau).

Ainsi, trois couches ont été créées sur SIG :

- « **Lineaire_Rhone.shp** »
- « **Barrages.shp** »
- « **Usines.shp** »

Figure 11 : Tracé sur SIG du linéaire du Rhône via la BD Carthage (IGN) en fonction des aménagements.

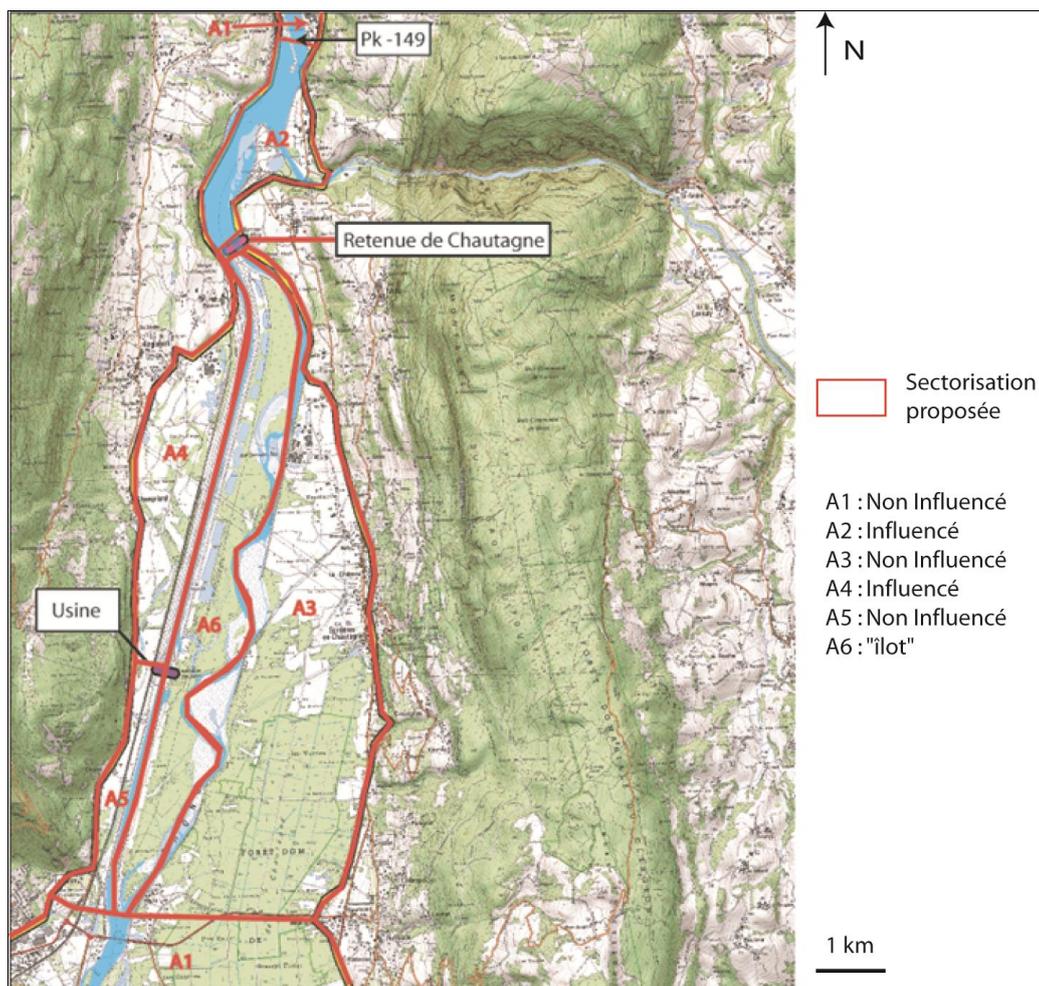


Concernant le travail effectué sur la nappe alluviale, une première sectorisation liée à la position des ouvrages de retenue du Rhône est tout d'abord proposée. Il s'agit de découper le contour alluvial en 6 types selon la typologie suivante :

- 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 12 : Sectorisation proposée en fonction des ouvrages CNR - exemple du secteur de la plaine de Chautagne.



La délimitation entre les secteurs A1 et A2 se base sur les données de niveau d'eau du Rhône, définies 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 observé (cf. tableau ci-dessous.), cette section du fleuve est alors considérée comme appartenant à la famille A2 (amont immédiat d'une retenue).

La sectorisation est ainsi réalisée ainsi sur tout le long du Rhône : les limites du contour alluvial présenté précédemment sont utilisées pour exécuter le tracé extérieur de cette nouvelle couche. Le tracé intérieur se cale évidemment sur le Rhône linéaire défini plus haut.

Figure 13 : Exemple 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 en m)
Seysse 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 typologies d'échanges nappe-rivière très différentes.

Ce travail est associé au second travail de sectorisation présenté ci-après.

2.1.4 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 (1. Données SIG et documentaires (report sur papier avec un fond topographique) de la BD LISA de campagnes piézométriques et 2. Données plus « lissées » issues des synthèses départementales) ;
- des fonds géologiques au 1/250 000ème et 1/50 000ème 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 14 : 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>
E1 – formations fluvio-glaciaires	E1c – formations fluvio-glaciaires connectées	E1p – formations fluvio-glaciaires perchées
E2 – formations carbonatées	E2g – formations carbonatées de grande dimension	E2p – formations carbonatées de petite dimension
E3 – formations molassiques	E3g – bassins molassiques connectés	E3p – formations molassiques sans contact direct avec la nappe alluviale
E4 – nappes alluviales des affluents	E4g – nappes alluviales des affluents de grande ampleur	E4p – nappes alluviales des affluents sans influence notable
E5 – formations de socle	-----	E5 – toutes les formations de type socle

Nous proposons une classification suivant 5 grandes familles de formations géologique aquifères : les formations fluvio-glaciaires, 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 5 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).

Le choix des différentes configurations se fait sur la base de l'observation des cartes géologiques au 1/50 000ème et de l'analyse sommaire des interactions entre formations géologiques.

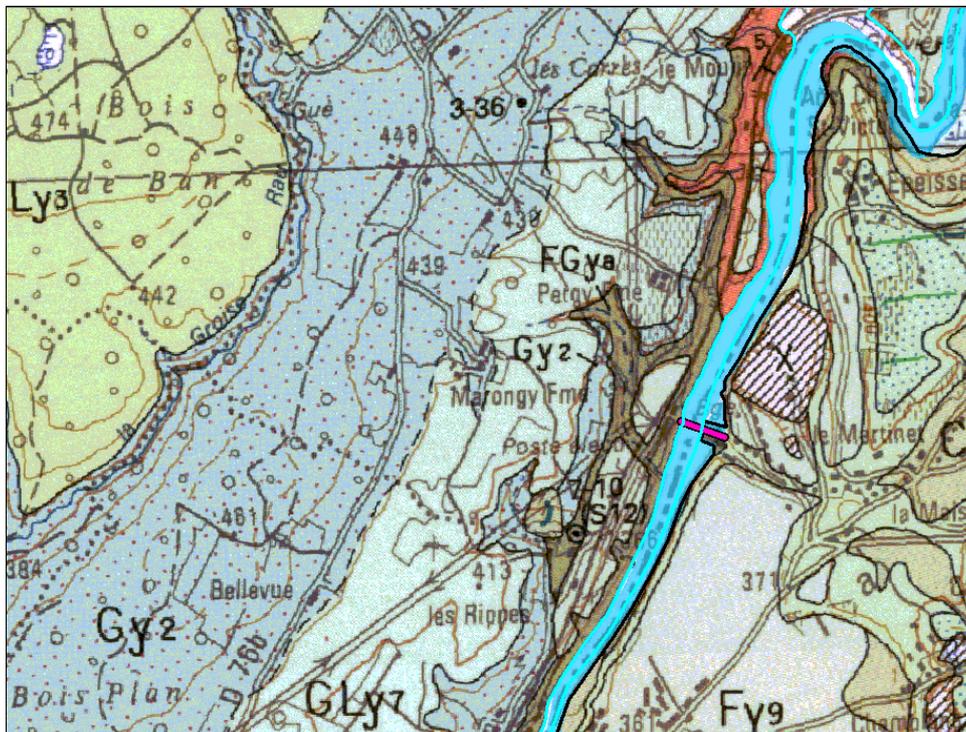
2.1.4.1 Formations fluvio-glaciaires

Formations latérales fluvio-glaciaires perchées

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 15 : 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).

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.

2.1.4.2 Formations carbonatées

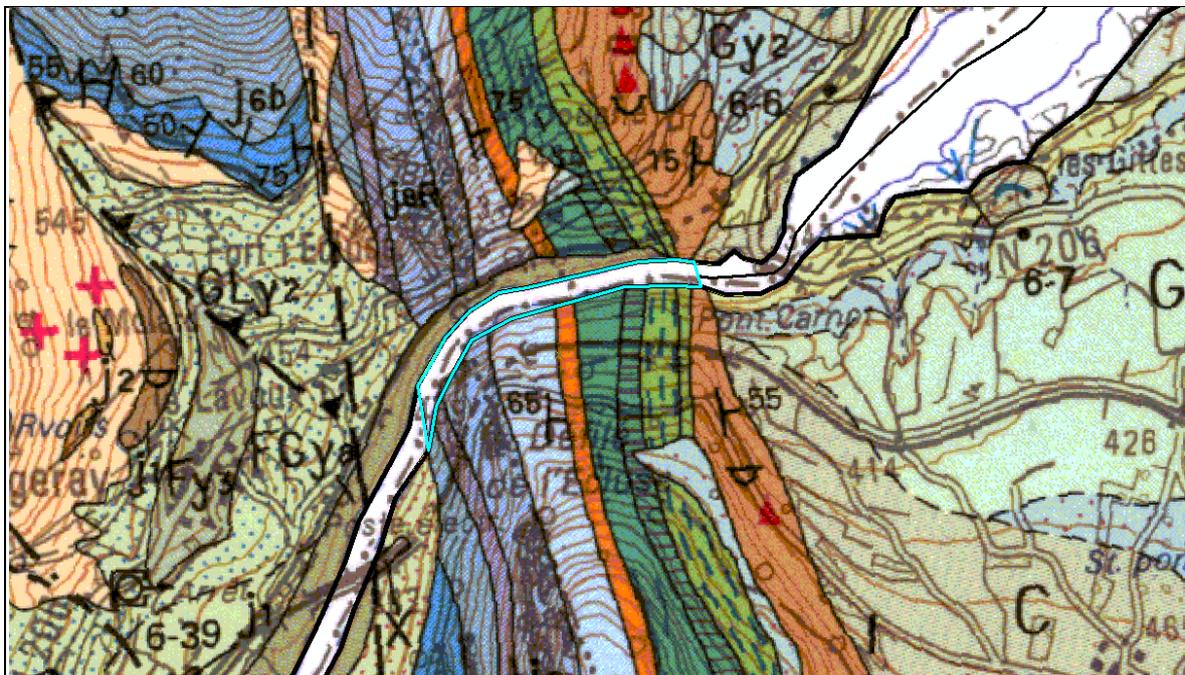
Formations carbonatées de petite dimension

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

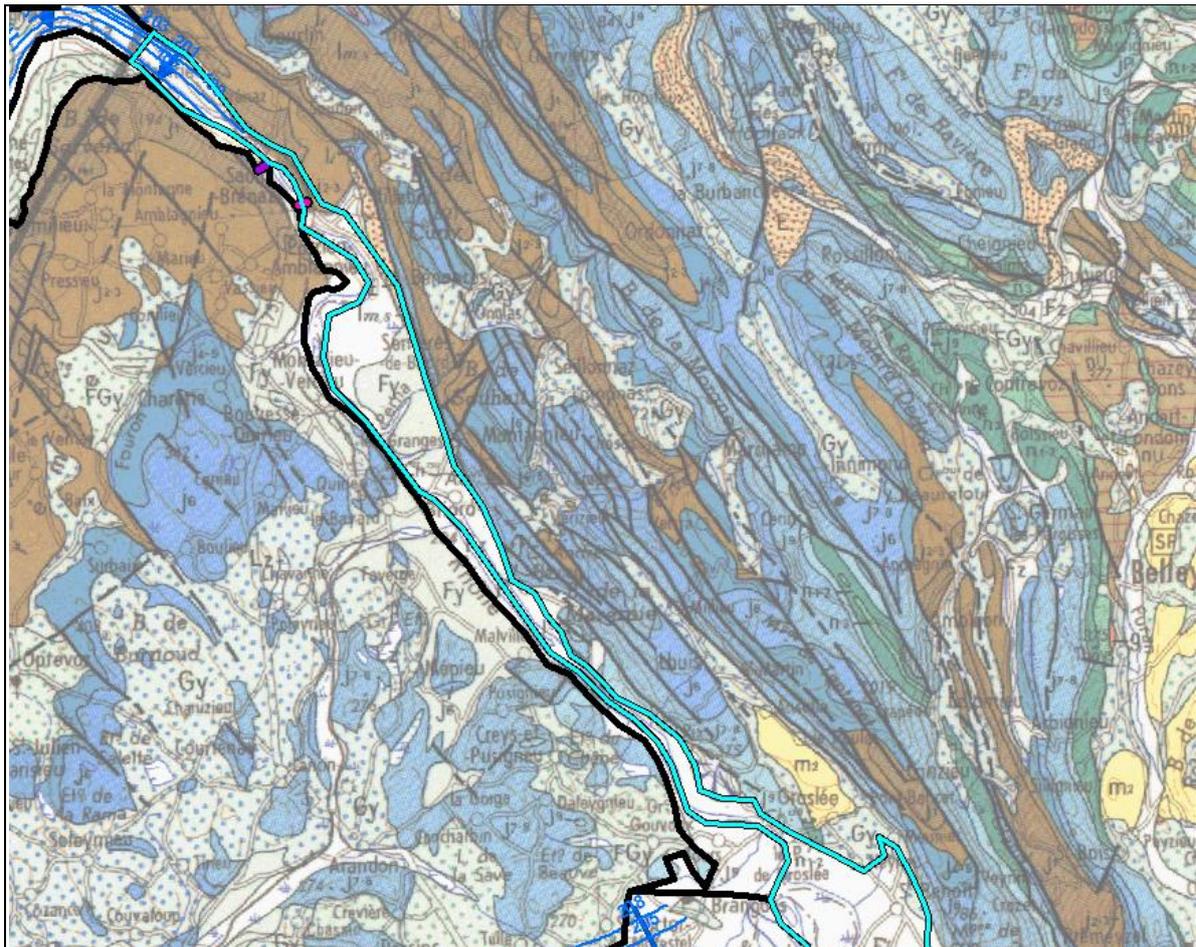


Ensembles carbonatés de grande dimension.

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 drains vis-à-vis de ces formations aquifères, jouent pour elles le rôle d'exutoire.

Figure 17 : Exemple de secteur avec une influence latérale d'un encaissant carbonaté de grande dimension.



2.1.4.3 Bassins molassiques du Miocène.

Formations connectées.

Ces grandes structures aquifères (E3g), bien que peu perméables, peuvent influencer la piézométrie des alluvions, étant en contact directe 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 influent car n'ont pas d'impact et n'ont pas d'alimentation propre (E3p).

Formations sans connexion souterraine.

Comme pour les formations fluvio-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.

2.1.4.4 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.

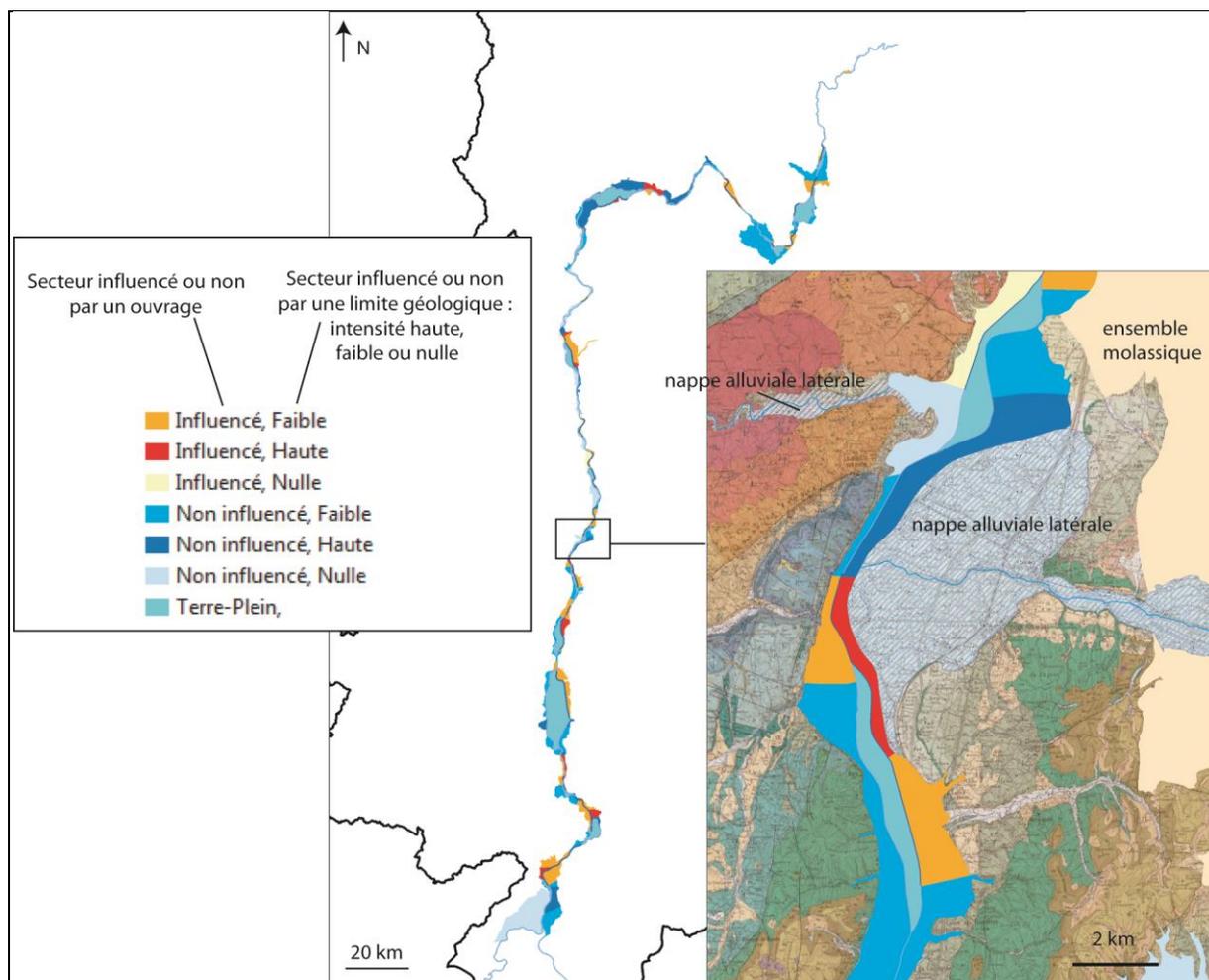
2.1.4.5 Les imperméables relatifs

Comme vu précédemment, la catégorie E5 regroupe les encaissants 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.

En combinant le premier travail de sectorisation lié à l'influence des ouvrages et le second présenté ci-dessus, une couche vecteur synthétisant les deux types d'information est créée : « Sectorisation_Nappe_Rhone.shp » dans les couches livrées.

Le premier attribut « Influ_Ouvr » indique trois possibilités de configuration : « Influencé » (correspondant aux zones A2 et A4), « Non influencé » (zones A3 et A1) et « Terre-Plein ». Le second attribut issu du travail en fonction des formations encaissantes appelé « Influ_Limi » présente trois libellés possibles : « Haute » (formations perméables telles que les nappes alluviales, les formations fluvio-glaciaires), « Faible » (ensembles molassiques et carbonatés) et « Nulle » (roches de socle ou autre grand ensemble imperméable).

Figure 18 : Exemple de sectorisation de la nappe du Rhône en fonction de la position des ouvrages et des encaissements géologiques.



2.1.5 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.

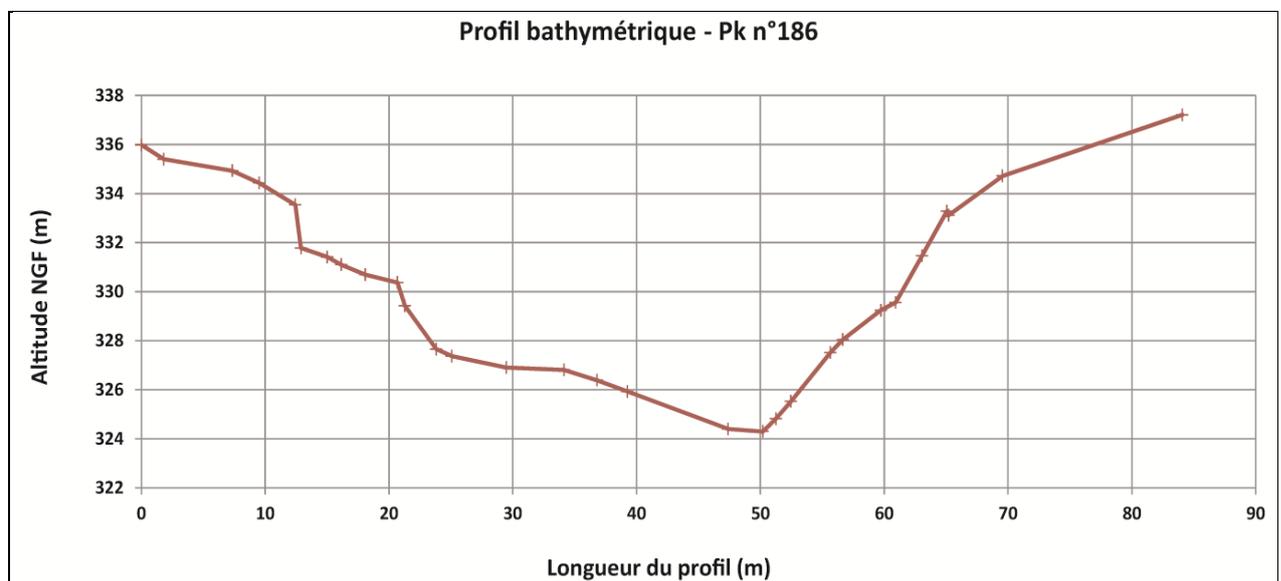
Il s'agit en effet de mettre en évidence des indices permettant de comprendre et classer en plusieurs types de configurations la géométrie du lit mineur du Rhône. Il est donc proposé dans cette partie de déterminer ces configurations géométriques, propices ou non propices à un tel phénomène. Ce travail ne fait pas l'objet d'un report SIG mais nécessite un traitement de données préliminaire.

2.1.5.1 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 19 : 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.

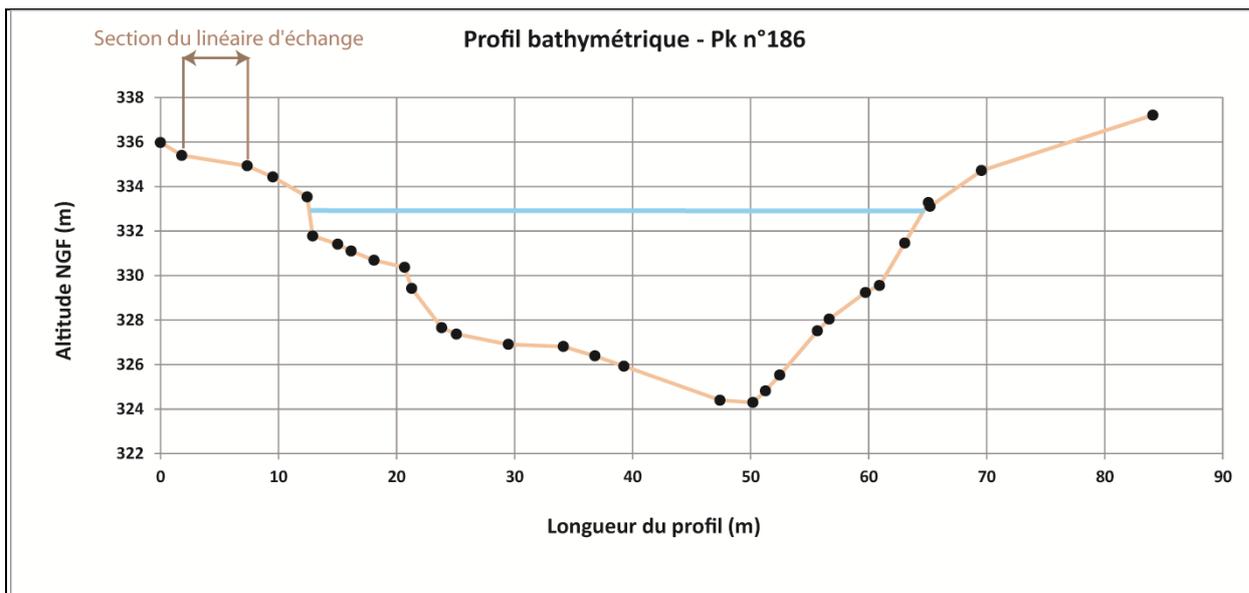
2.1.5.2 Calculs d'indices

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.

Linéaire d'échange :

Le premier, appelé « linéaire d'échange », constitue la somme des longueurs du profil bathymétrique situées au-dessous du niveau d'eau 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 20 : Exemple de linéaire d'échange au Pk n°186.



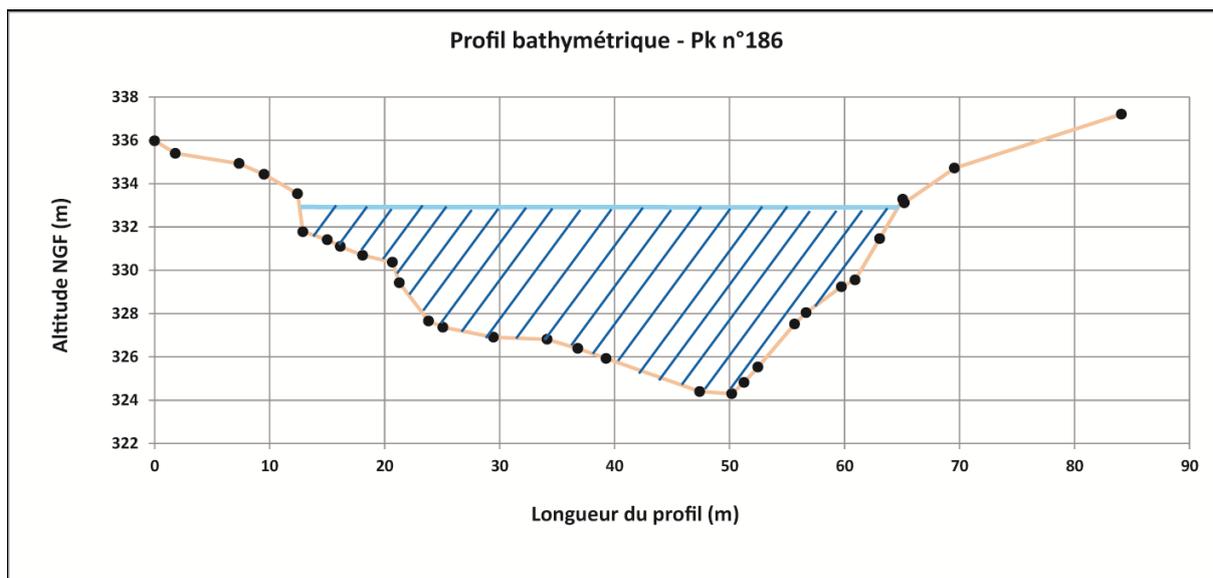
C'est un premier paramètre susceptible de nous renseigner sur la dimension de l'interface d'échange entre le fleuve et sa nappe alluviale.

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 21 : Exemple de section mouillée au Pk n°186.



Indice de susceptibilité 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 :

1. 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°).

2. 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.

3. 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 appelé conductance qui est estimée par la formule suivante :

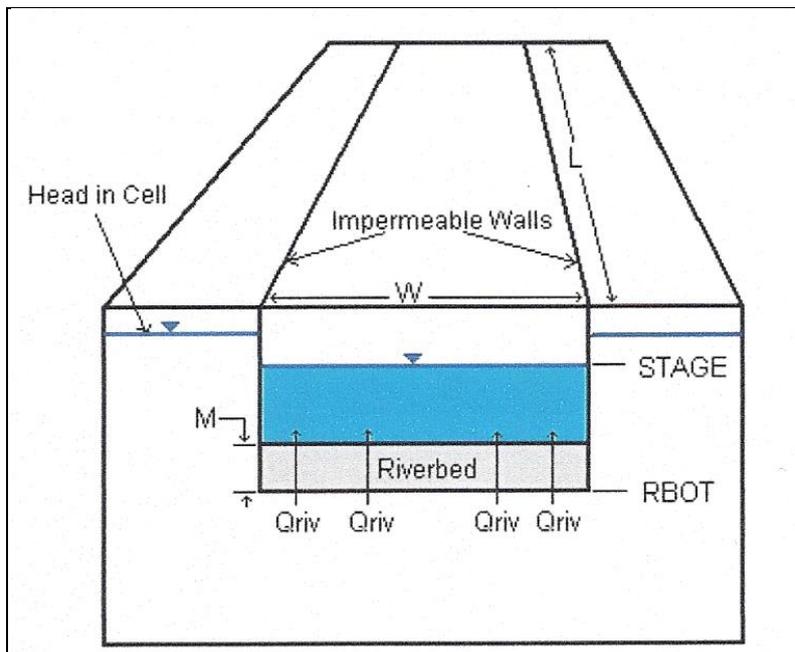
$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{E}$$

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 22 : 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° , une épaisseur E2 si la pente est comprise entre 15 et 40° et une épaisseur E3 si la pente est supérieure à 40° .

Cette analyse sera appliquée sur chaque profil bathymétrique qui sera décomposé en longueurs cumulées d'interfaces 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 global 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.

2.2 NAPPES DES FORMATIONS ANNEXES

Le CCTP stipule que nous nous intéressions 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 aquifères dits « associés ».

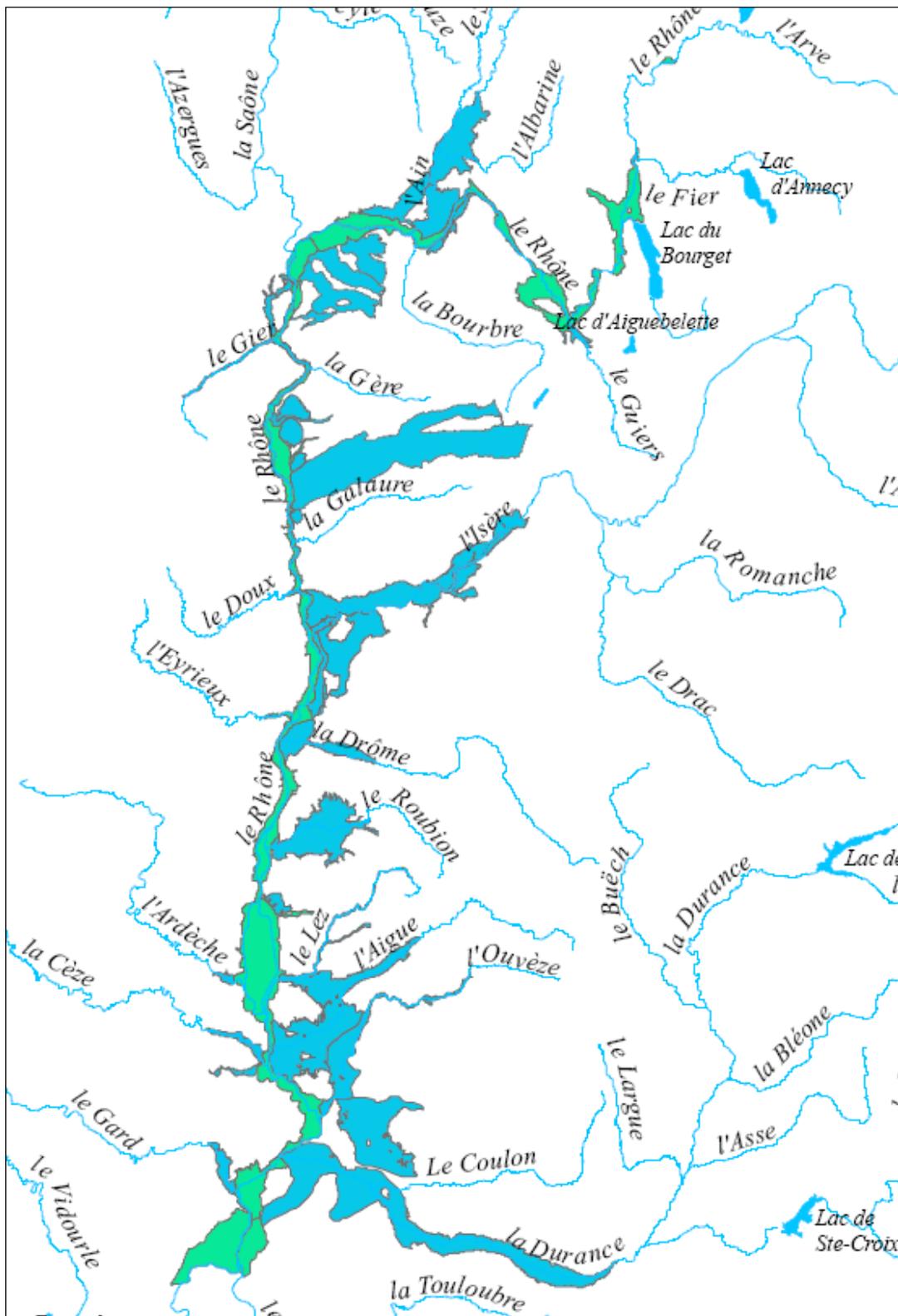
L'étude hydrogéologique doit donc prendre en compte cette dimension latérale et s'étendre à la caractérisation des nappes souterraines susceptibles de venir contribuer in fine au débit du Rhône en période estivale.

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

Figure 23 : Liste des aquifères associés présentés dans le CCTP

Aquifères associés
<i>Ont été retenus les aquifères en position latérale par rapport à la vallée contribuant de manière importante à l'alimentation du fleuve et de sa nappe alluviale.</i>
Alluvions de la Bièvre
Alluvions de la basse vallée du Guiers
Terrasses fluvio-glaciaires du Rhône entre Vertrieu et Saint Romain de Jalionas
Alluvions de la plaine de l'Ain
Formations fluvio-glaciaires de Meximieux à Montluel
Alluvions anciennes du paléo-Rhône à Saint-Genis-Laval
Alluvions de la vallée du Garon
Alluvions des terrasses de Beausemblant
Alluvions de l'Ozon
Alluvions de la Varèze
Formations glaciaires du plateau de Louze, de Saint-Prim et de Salaise-sur-Sanne
Alluvions du Doux
Alluvions du Gier
Alluvions de l'Isère en amont de la confluence avec le Rhône
Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire
Formations fluvio-glaciaires du couloir de Meyzieu
Formations fluvio-glaciaires du couloir de Décines-Chassieu
Formations fluvio-glaciaires du couloir d'Heyrieux
Alluvions de la Drôme (aval de Crest)
Alluvions anciennes de la plaine de Valence
Alluvions anciennes des basses terrasses entre la confluence de l'Isère et de la Drôme
Alluvions anciennes des terrasses de l'Isère
Alluvions de la plaine de la Valdaine
Alluvions des hautes terrasses de Donzère
Alluvions de l'Aigues et du Lez
Alluvions de l'Ouvèze
Alluvions des Sorgues et de la Nesque
Alluvions récentes de la Basse Durance
Alluvions de l'Ardèche à la confluence du Rhône
Alluvions quaternaires de la basse vallée de la Cèze
Alluvions quaternaires de la Tave
Alluvions quaternaires du Bas Gardon en aval de Remoulins

Figure 24 : Cartographie des unités annexes listées dans le CCTP (en bleu) et des unités alluviales liées au Rhône (en vert)



Cependant, l'étude concerne l'ensemble du bassin versant du Rhône. Le chemin de l'eau au sein de ce bassin se termine en effet « tôt ou tard » dans le fleuve. Il apparaît ainsi que la liste des aquifères annexes qui impactent de façon importante le système alluvial du Rhône peut être complétée.

A l'instar du travail réalisé précédemment sur la nappe alluviale du Rhône, un recensement complet de ces formations latérales a été effectué grâce aux fiches descriptives et aux couches SIG de la BD Lisa du BRGM, référentiel hydrogéologique mis à disposition par l'Agence de l'eau en février 2013 et jugé le plus complet. Rappelons que cette base de données est utilisée par tous les partenaires de l'étude, son utilisation permet donc de travailler sur les mêmes références.

Ce chapitre présente les données SIG utiles qui ont été centralisées, décrit les informations hydrogéologiques utilisées pour caractériser l'impact de ces nappes latérales sur le système alluvial du Rhône ; et justifie le choix des nouveaux objets ajoutés à la liste initiale. Une première partie décrit les nappes alluviales latérales et une seconde les formations fluvio-glaciaires et les formations molassiques.

Rappelons que cette 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.

Le résultat de ce travail décrit ci-après se visualise sur SIG : création de nouvelles couches avec attributs descriptifs.

2.2.1 Nappes alluviales latérales

Cette première partie décrit le travail bibliographique et celui effectué sur SIG concernant les nappes alluviales latérales. Nous y proposons une liste de l'ensemble des nappes alluviales jugées contributives au système hydrologique du Rhône et à la piézométrie de sa nappe alluviale en période estivale.

Malgré certaines limites jugées non cohérentes par rapport aux cartes géologiques, rappelons qu'il est choisi de relever les contours de la BD Lisa, afin que nous puissions travailler sur le même référentiel ; chaque entité correspond à un code et à un recouvrement géographique (polygone), indications élémentaires pour pouvoir étudier les mêmes objets. La BD Lisa s'articule en trois couches. Après observation sur SIG, il s'avère que la couche n°2 et 3 correspondent en grande partie aux systèmes alluviaux (« Entite_complementaires_niveau_2.shp » et « Entite_complementaire_niveau_3.shp »). Ce sont donc les contours de ces deux dernières sources d'information qui sont utilisées pour relever les nappes alluviales latérales.

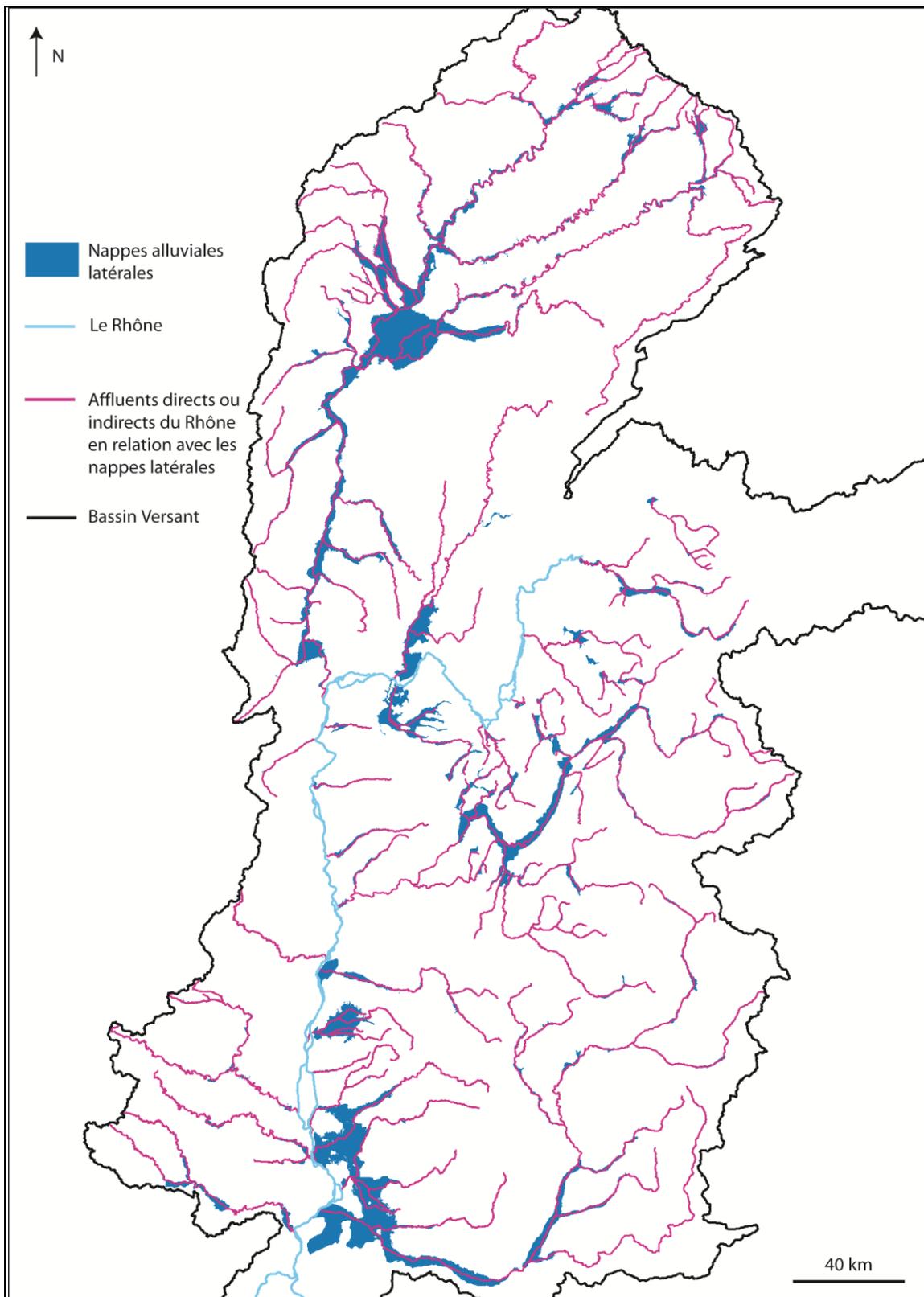
La liste proposée comporte 93 entités hydrogéologiques, ce qui correspond à un ajout de 68 objets à la liste initiale qui est composée de 25 nappes alluviales (indiquée dans CCTP).

Figure 25 : Nouvelle liste proposée.

FID	RHF_ENTITE	RHF_LIBELL
81 327F		ALLUVIONS DE LA BASSE VALLEE DE LA CEZE, DE LA CEZE DANS LE SECTEUR DE ST AMBROIX ET ALLUVIONS DE LA TAVE
39 549A2		Alluvions de la Berre
31 152X1		Alluvions de la Bièvre
38 545B2		Alluvions de la Bonne et de la Roizonne
26 621B		Alluvions de la boucle de Vaise
67 152H		Alluvions de la Bourbre et du Catelan
32 158A16		Alluvions de la Bourne et du Méaudret
4 151A3		Alluvions de la Chalaronne
18 543A1		Alluvions de la cluse d'Annecy
14 385		Alluvions de la dépression de Chambéry et du Sierroz-Tillet
47 BOU26A		Alluvions de la Dheune
68 154C		Alluvions de la Drôme
7 152X2		Alluvions de la Fure, de l'Ainan, de la Morge, de Chantabot et des Rivoires
48 BOU27A		Alluvions de la Grosne
49 BOU28A		Alluvions de la Guye
19 543A2		Alluvions de la haute vallée du Fier
64 14A		Alluvions de la Lanterne et de ses affluents
62 10A		Alluvions de la Loue en amont d'Arc-et-Senans
3 10B		Alluvions de la Loue, d'Arc-et-Senans à la confluence avec le Doubs
82 369		Alluvions de la plaine de la Valdaine
27 94B		Alluvions de la plaine de l'Ain
6 152X		Alluvions de la Reyssouze
85 BOU19D		Alluvions de la Saône du confluent du Doubs au seuil calcaire de Tournus
66 151X		Alluvions de la Saône du seuil calcaire de Tournus à Ambérieux
15 540X		Alluvions de la Saône entre Ambérieux et Caluire-et-Cuire
84 BOU19C		Alluvions de la Saône entre l'Ognon et le Doubs
71 19A		Alluvions de la Saône, de la confluence de l'Amance à la confluence avec l'Ognon
73 322A		Alluvions de la Savoureuse
86 BOU21A		Alluvions de la Tille aval
36 542X		Alluvions de la vallée de Couz
83 384		Alluvions de la vallée de l'Arc
23 5450		Alluvions de la vallée de l'Arly
77 325A		Alluvions de la vallée de l'Isère en amont de Pontcharra
54 E13X		Alluvions de la vallée du Bréda
69 17A		Alluvions de la vallée du Doubs
78 325C		Alluvions de la vallée du Drac
30 152J2		Alluvions de la Varèze
5 151A4		Alluvions de la Veyle
43 BOU20A		Alluvions de la Vingeanne
45 BOU24A		Alluvions de la Vouge
96 PAC01A1		Alluvions de l'Aigues et du Lez

41 94A1	Alluvions de l'Albarine
10 323A	Alluvions de l'Allan
24 548B	Alluvions de l'Ardèche et de ses affluents
17 540X4	Alluvions de l'Ardière
75 324A	Alluvions de l'Arve et de la Menoge
16 540X3	Alluvions de l'Azergues et de la Brévenne
80 326	Alluvions de l'Eau d'Olle et de la Romanche
57 E7Z	Alluvions de l'Eyrieux
28 152I5	Alluvions de l'Herbasse et de la Galaure
44 BOU22A	Alluvions de l'Ignon
12 325E	Alluvions de l'Isère en amont de la confluence avec le Rhône
79 325D	Alluvions de l'Isère en aval de Grenoble
11 325B	Alluvions de l'Isère entre Pontcharra et Grenoble
9 320B	Alluvions de l'Ognon, de la confluence du Rahin à la confluence avec la Saône
72 320A	Alluvions de l'Ognon, en amont du Rahin
87 BOU23B	Alluvions de l'Ouche
98 PAC01A2	Alluvions de l'Ouvèze
29 152J1	Alluvions de l'Ozon
22 543C1	Alluvions des Dranses d'Abondance et de Morzine
13 366	Alluvions des Gardons
99 PAC01A3	Alluvions des Sorgues et de la Nesque
63 10C	Alluvions Doubs aval et graviers du "Saint-Côme" de la plaine Saône-Doubs
20 543A3	Alluvions du Chéran
8 177C2	Alluvions du delta de la Dranse
0 603F1	Alluvions du Doux
40 621A8	Alluvions du Gier
74 323	Alluvions du Giffre
21 543B	Alluvions du Guiers
46 BOU25A	Alluvions du Meuzin
37 544000	Alluvions du Nizerand
2 60A	Alluvions du Rahin
1 369A	Alluvions du Roubion et du Jabron
34 322A1	Alluvions du Saint Nicolas
42 95B9	Alluvions du Suran
91 PAC02E	Alluvions récentes de la Basse Durance
94 PAC02H	Alluvions récentes de la Bléone
60 PAC02K1	Alluvions récentes de la Guisane
89 PAC02A	Alluvions récentes de la Haute-Durance et cônes de déjection d'affluents
90 PAC02C	Alluvions récentes de la Moyenne Durance
95 PAC02I	Alluvions récentes de l'Asse
58 PAC02F1	Alluvions récentes de l'Ubaye
93 PAC02G	Alluvions récentes du Buëch
59 PAC02J1	Alluvions récentes du Calavon
100 PAC14A1	Alluvions récentes du Haut Drac
33 30A1	Alluvions récentes et fluvio-glaciaires de la Bienne aval
56 E13X2	Cône de déjection de la Rochette
35 542ICL	Formations des terrasses de Kame dans le synclinal de Novalaise
55 E13X1	Ombilic d'Allevard
53 E10X4	Ombilic de la Sassièrre
51 E10X2	Ombilic de l'Ormente
52 E10X3	Ombilic de Rosuel
50 E10X1	Ombilic des Chapieux

Figure 26 : Carte de l'ensemble des nappes alluviales latérales associées à leurs cours d'eau.



Un second travail de report d'informations sur SIG a été effectué concernant les cours d'eau affluents du Rhône (directs et indirects) qui entrent en relation avec les nappes alluviales latérales.

Il n'y a pas de sectorisation des nappes alluviales latérales à proprement parlé. Seul un report de toutes les nappes alluviales et les affluents du Rhône correspondant a été fait. Car elles sont toutes considérées dans cette étude comme étant plus ou moins impactantes et donc doivent être considérées initialement dans l'étude hydrogéologique et non laissées de côté. Le travail de modélisation décrit dans les chapitres suivants permettra de discriminer l'importance de cet impact via un travail de classification basé sur les paramètres hydrodynamiques, travail de position d'hypothèses de départ pour la modélisation de ces dernières sur Modflow.

Ce travail débouche donc sur la création de deux couches directement issues d'une extraction des entités BD Lisa souhaitées et de la BD Carthage : « Nappes_Alluviales_Latérales.shp » et « Affluents_Nappes_Alluviales_Latérales.shp ».

2.2.2 Nappes des formations annexes molassiques et fluvio-glaciaires

Les nappes dites « annexes » comme indiqué dans le CCTP regroupent deux types de formations que nous étudions, le choix de ces formations étant argumenté en début de rapport :

- Les bassins molassiques
- Les formations fluvio-glaciaires-

Le référentiel de la BD Lisa est à nouveau utilisé pour pouvoir extraire les entités présentes au sein du bassin qui sont jugées venir interagir avec l'axe Rhône. La couche 1 principale « Entite_principales_niveau_2 » est utilisée et pour certains cas, les couches 2 et 3 qui regroupent en partie des formations fluvio-glaciaires.

La sectorisation des nappes annexes fluvio-glaciaires et molassiques correspond à un travail de choix des nappes jugées influentes ou non sur la nappe alluviale du Rhône. Un lien est a fortiori fait avec la sectorisation effectuée sur la nappe du Rhône. En effet, nous pouvons voir que les secteurs influencés par l'encaissant correspondent à chaque fois à une entité molassique ou fluvio-glaciaire décrite plus haut dans ce chapitre (voir le projet SIG final).

Le tableau suivant présente l'ensemble des entités qui sont finalement reportées dans le SIG.

Il est choisi de distinguer les formations fluvio-glaciaires en deux catégories :

- Les couloirs connectés à l'axe Rhône en souterrain, à l'instar de la sectorisation effectuée suivant les encaissants ;
- Les couloirs connectés à l'axe Rhône grâce au réseau superficiel.

Ce dernier cas est particulier et nécessite la création d'une couche des exutoires superficiels qui sont en relation avec la formation et qui viennent alimenter le Rhône (affluent direct ou indirect). La BD Carthage est utilisée afin d'extraire les exutoires correspondants.

Pour ce faire, une étude détaillée des descriptions et des cartes piézométriques issues de la BD Lisa (fiches disponibles et zooms sur les entités des fonds IGN renseignés par de la piézométrie) est effectuée sur ces formations annexes. En effet, l'information piézométrique donne un avis sur le sens d'écoulement préférentiel de la nappe et a permis de mettre en évidence des cours d'eau faisant office d'exutoires superficiels aux entités étudiées.

Les formations molassiques ont également fait l'objet d'une lecture approfondie des informations hydrogéologiques transmises sur les fiches de la BD Lisa et sur les cartes IGN munies de données piézométriques afin de visualiser les sens d'écoulement globaux des nappes vers la nappe alluviale du Rhône.

Notons le cas de la nappe de Bièvre Valloire qui présente un comportement mixte : alimentation directe de la nappe alluviale du Rhône et alimentation de sources qui donnent naissance à des cours d'eau alimentant le Rhône (SOGEAH et ASCONIT, 2011). Nous avons choisi d'attribuer un comportement de type « alimentation directe de nappe à nappe » pour trois raisons :

- Dans le bilan en régime permanent proposé par SOGREAH (2011), le débit d'alimentation estimé de la nappe alluviale du Rhône est le double de celui estimé pour l'alimentation des sources.
- En période d'étiage, ce rapport est encore accentué au profit de l'alimentation de la nappe alluviale du Rhône (baisse naturelle de la piézométrie en périodes de basses eaux qui implique une baisse des débits des sources de débordement).
- La plupart des sources positionnées en partie amont du bassin versant alimentent des cours d'eau qui vont rapidement se perdre dans l'aquifère plus à l'aval.

Figure 27 : liste des formations annexes dans le bassin versant.

Bassins molassiques		
OBJECTID	RHF_ENTITE	RHF_LIBELL
684	549A	Formations tertiaires du bassin de Valréas
1505	MIO2	Formations molassiques de l'Est Lyonnais
1506	MIO2	Formations molassiques de l'Est Lyonnais
1511	MIO3	Formations molassiques du Bas-Dauphiné
1512	MIO3	Formations molassiques du Bas-Dauphiné
1513	MIO3	Formations molassiques du Bas-Dauphiné
1586	PAC04A	Molasse miocène du Comtat Venaissin
1587	PAC04A	Molasse miocène du Comtat Venaissin
Formations Fluvio-Glaciaires à connexion superficielle		
OBJECTID	RHF_ENTITE	RHF_LIBELL
313	153C	Formations fluvio-glaciaires de la plaine d'Optevoz et de Charrette
310	153A1	Placages discontinus tertiaires et quaternaires de l'île Crémieu
362	177A	Formations glaciaires du pays de Gex
240	151A2	Formations plio-quaternaires de la Dombes
248	151A5	Formations fluvio-glaciaires du couloir de Certines
290	152O	Formations fluvio-glaciaires du Bas-Dauphiné - Véga et Sévenne
292	152P	Formations fluvio-glaciaires du Bas-Dauphiné - Gère et Véronne
364	177A1	Sillons fluvio-glaciaires du pays de Gex
591	542B1A	Sillons fluvio-glaciaires des vallées de la Menoge et de l'Arve
592	542B1A	Sillons fluvio-glaciaires des vallées de la Menoge et de l'Arve
597	542F	Formations glaciaires et molassiques de Belley
1276	BOU76C	Graviers affleurants plio-quaternaires de Dijon-Sud
1278	BOU76D	Graviers profonds du Pliocène de Dijon-Sud
1280	BOU76E	Graviers profonds du Pliocène de la Tille
1281	BOU76E	Graviers profonds du Pliocène de la Tille
1035	621D	Alluvions de la vallée du Garon
566	50A	Alluvions fluvio-glaciaires de l'Arlier
1061	87E	Formations alluviales et fluvio-glaciaires de la plaine de Bletterans
Formations Fluvio-Glaciaires à connexion souterraine		
OBJECTID	RHF_ENTITE	RHF_LIBELL
240	151A2	Formations plio-quaternaires de la Dombes
268	152E	Formations fluvio-glaciaires du couloir d'Heyrieux
250	151F1	Formations fluvio-glaciaires de Meximieux à Montluel
264	152C	Formations fluvio-glaciaires du couloir de Meyzieu
266	152D	Formations fluvio-glaciaires du couloir de Décines-Chassieu
284	152K	Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire
368	177B1	Sillons fluvio-glaciaires du sud genevois

Figure 28 : Cartographie des formations annexes et de leurs exutoires.

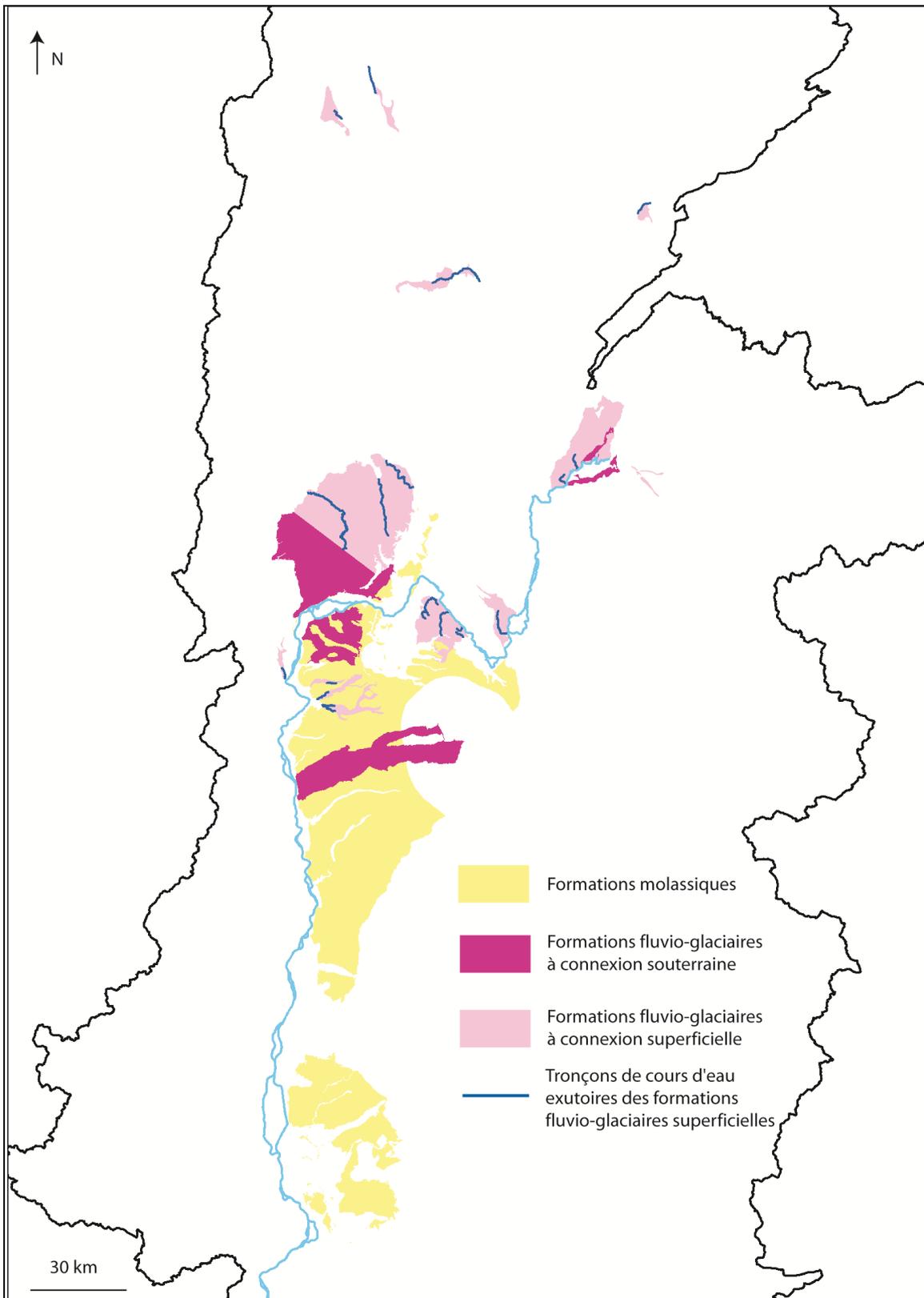
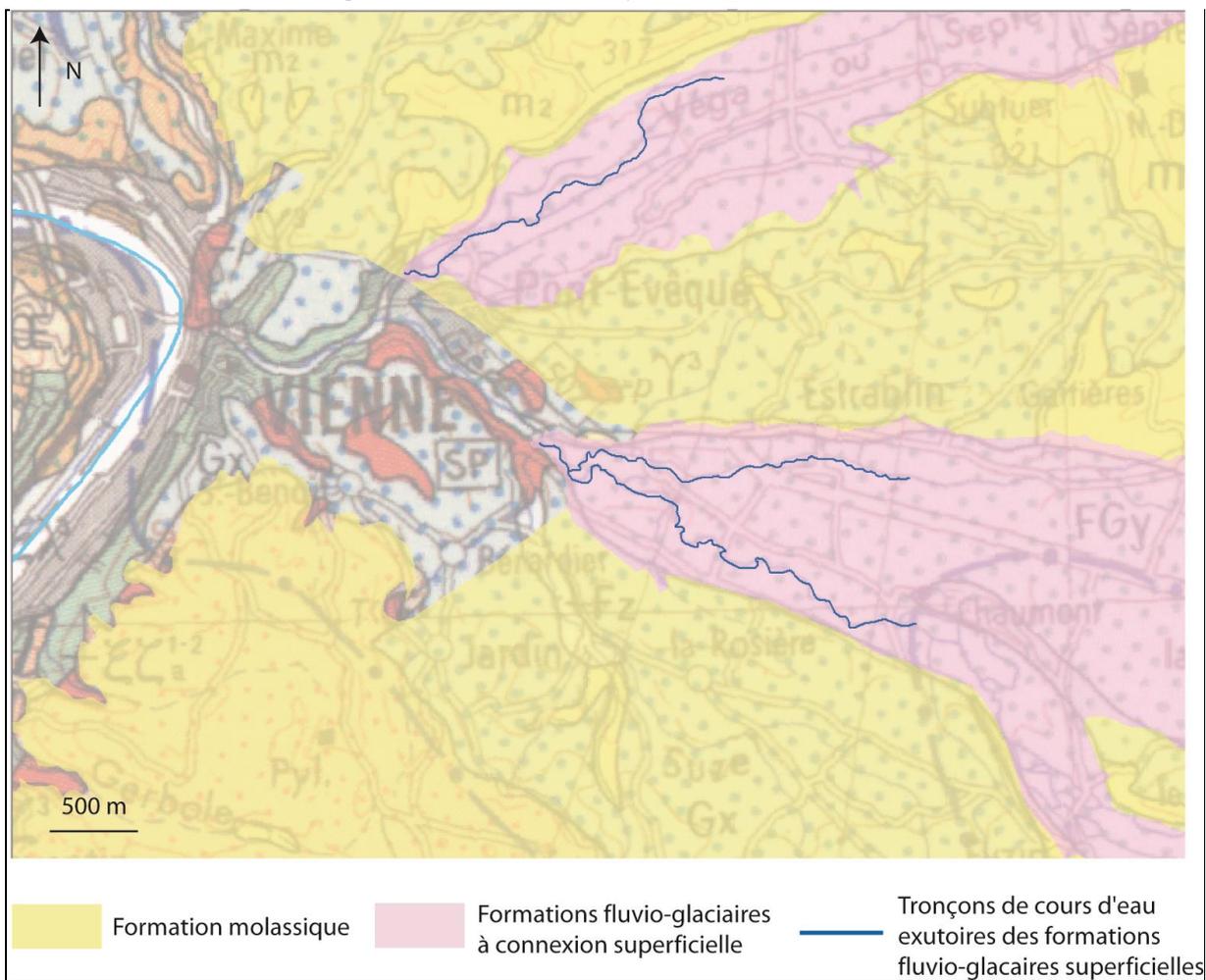


Figure 29 : Exemple du secteur de Vienne : présence conjointe d'une entité molassique et de formations fluvio-glaciaires à connexions superficielles avec le Rhône.



Quatre couches sont ainsi créées :

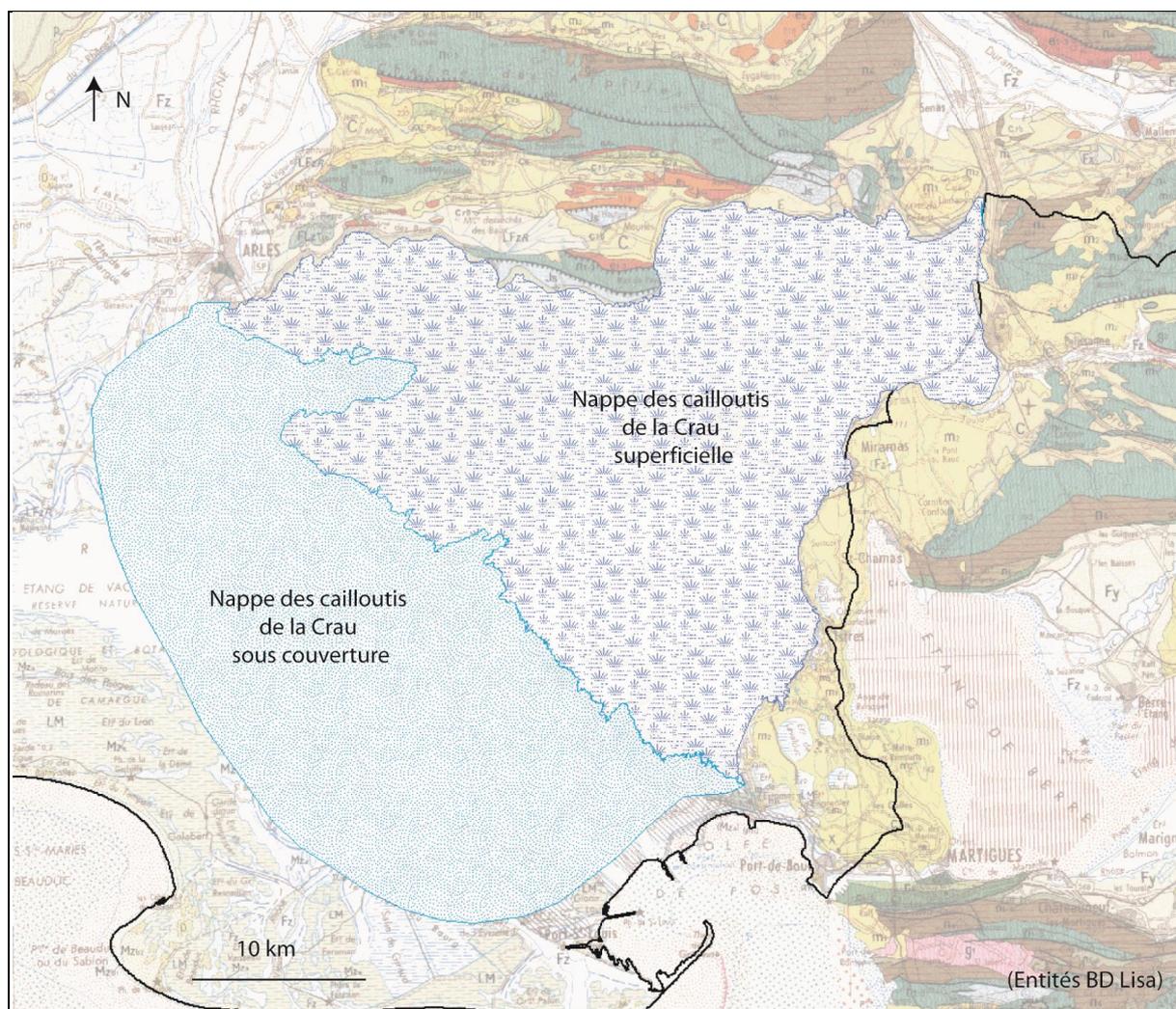
- « Formations_Molassiques.shp »
- « Formations_FG_Connex_Sout.shp »
- « Formations_FG_Connex_Sup.shp »
- « Exutoires_Formations_FG_Connex_Sup.shp ».

2.2.3 Les cailloutis de la Crau : une nappe à exutoire hors bassin versant

Le secteur correspondant de la Crau est un cas particulier : l'observation de l'hydrographie et de la géologie sur les cartes géologiques et IGN du secteur montre que l'exutoire des cailloutis est la mer Méditerranée. En effet, les différents cours d'eau et canaux sont associés à une série de lacs située à la limite Sud-Ouest de l'entité hydrogéologique (BD Lisa). Le sens des écoulements du réseau hydrographique et la position des résurgences montrent qu'il n'y a pas de relation avec le cours d'eau du Rhône mais avec la mer Méditerranée via le canal de Vigueirat.

Depuis le référentiel de la BD Lisa, l'entité des cailloutis de la Crau est extraite et associée à un impact nul sur le débit du Rhône : **la couche créée « Cailloutis_Crau » est classée dans le dossier « Nappe_Exutoires_Hors_BV » du dossier SIG.**

Figure 30 : Cartographie des cailloutis de la Crau.



3. ELÉMENTS DE MÉTHODE

3.1 APPROCHE DE L'IMPACT QUANTITATIF DES PRÉLÈVEMENTS EN NAPPE ALLUVIALE PAR LA SOLUTION ANALYTIQUE DE THEIS

Au vu du périmètre de l'étude, il n'est pas possible de proposer une approche détaillée des impacts des prélèvements temporaires dans les nappes alluviales des affluents du Rhône. Nous proposons donc une approche simplifiée basée sur l'exploitation de la formule de Theis qui permet d'estimer l'impact des prélèvements en fonction de trois critères :

- Durée du pompage.
- Distance forage-cours d'eau.
- Paramètres hydrodynamiques.

Il s'agit donc d'une approche basée sur une vision simplifiée des aquifères ; ils sont supposés homogènes et isotropes, le colmatage des berges n'est pas pris en compte et les effets de suralimentation latérale sont négligés.

Cette approche a aussi été appliquée aux formations annexes qui ne sont pas en contact hydraulique avec la nappe alluviale du Rhône mais qui participent au débit du fleuve de façon indirecte en suralimentant des cours d'eau secondaires.

3.1.1 Considérations théoriques

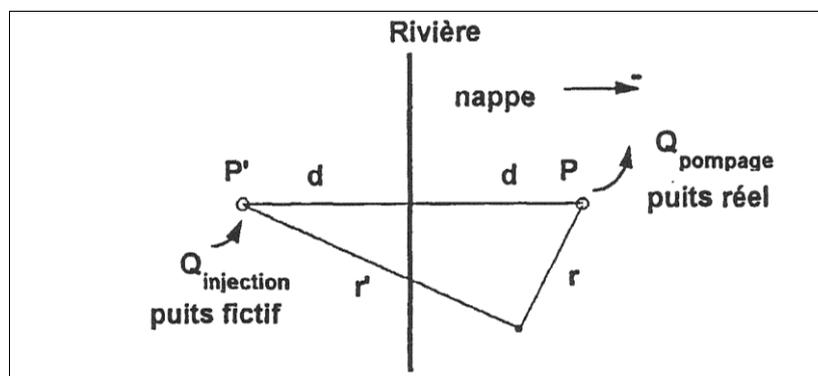
L'effet d'un pompage sur une nappe d'extension semi-infinie limitée par une rivière est donnée par De Marsily (1968). Sur la base de la formule de Theis (1935), en représentant l'effet de la rivière comme un puits fictif, les développements analytiques permettent de montrer que le rapport du débit instantané (q) provenant de la rivière à un temps t au débit pompé (Q) est égal à

$$\frac{q}{Q} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{d^2 S}{4Tt}} \right)$$

avec :

- erfc une fonction erreur complémentaire.
- d la distance entre le puits et la rivière en m.
- T la transmissivité en m^2/s .
- S le coefficient d'emmagasinement, adimensionnel (égal à la porosité efficace en nappe libre).

Figure 31 : Méthode des puits images (BRGM, 1995).



De la même façon, on peut calculer le volume cumulé (v) soustrait à la rivière entre les temps t0 et ti en intégrant l'expression précédente sur le temps. on obtient par rapport au volume pompé cumulé (V) :

$$\frac{v}{V} = (1 + 2U) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{U}) - 2 \cdot \sqrt{\frac{U}{\pi}} \cdot e^{-U}$$

Les valeurs de ces deux rapports qui croissent avec le temps peuvent être calculées en fonction de l'expression appelé temps réduit. Elles sont présentées dans le rapport collectif du BRGM (1995) sur les méthodes d'évaluation des impacts des prélèvements sur les rivières :

Figure 32 : Tableau de l'impact du pompage en fonction du temps réduit (BRGM, 1995).

Temps réduit 4Tt / Sd ²	% de débit instantané Qr / Qp	% de volume cumulé depuis début pompage	Temps réduit 4Tt / Sd ²	% de débit instantané Qr / Qp	% de volume cumulé depuis début pompage
0.1	0.0	0.0	130	90.13	81.69
0.13	0.01	0.0	170	91.36	83.83
0.17	0.06	0.01	230	92.57	85.97
0.23	0.32	0.05	300	93.49	87.62
0.30	0.98	0.18	400	94.36	89.21
0.40	2.53	0.56	550	95.19	90.73
0.55	5.65	1.51	750	95.88	92.02
0.75	10.25	3.23	1 000	96.43	93.06
1	15.73	5.68	1 300	96.87	93.89
1.3	21.48	8.68	1 700	97.26	94.64
1.7	27.81	12.46	2 300	97.65	95.38
2.3	35.11	17.47	3 000	97.94	95.95
3.0	41.42	22.36	4 000	98.22	96.48
4.0	47.95	27.99	5 500	98.48	96.99
5.5	54.65	34.41	7 500	98.70	97.42
7.5	60.56	40.65	10 000	98.87	97.76
10	65.47	46.28	13 000	99.01	98.04
13	69.49	51.20	17 000	99.13	98.28
17	73.16	55.96	23 000	99.26	98.52
23	76.81	60.96	30 000	99.35	98.70
30	79.63	65.01	40 000	99.44	98.88
40	82.31	69.02	55 000	99.52	99.04
55	84.88	73.02	75 000	99.59	99.18
75	87.03	76.49	100 000	99.64	99.29
100	88.75	79.36			

On notera les éléments suivants :

- Le débit n'est pas déterminant sur ces rapports qui dépendent principalement de la diffusivité de la nappe.
- Cette méthode permet d'estimer les débits qui quittent la rivière pendant un temps de pompage t. mais que l'eau correspondant à ces débits n'est pas forcément parvenue au puits de pompage.

3.1.2 Hypothèses pour les nappes alluviales des affluents

3.1.2.1 Hypothèses sur les paramètres hydrodynamiques

Pour les nappes alluviales des affluents, il est donc nécessaire de définir deux paramètres hydrodynamiques "moyens" :

- La transmissivité, qui correspond au rapport de la perméabilité avec l'épaisseur. c'est un paramètre qui indique la capacité du milieu à favoriser les écoulements.
- Le coefficient d'emmagasinement qui indique lui la capacité du milieu à stocker de l'eau et à la libérer en cas de pertes de charge dans le réservoir.

Dans le cadre de cette étude, nous ferons les hypothèses suivantes :

- On attribue pour chaque nappe alluviale une valeur moyenne de transmissivité et une valeur moyenne de coefficient d'emmagasinement, issues du travail de synthèse présenté dans les descriptions des entités BD LISA du BRGM. C'est une hypothèse forte qui sous-entend implicitement que la diffusivité de l'aquifère est la même en tout point de l'aquifère.
- Les valeurs de transmissivité sont systématiquement majorées, en particulier en cas de fortes variations (cas des réservoirs alluviaux en zones montagneuses, caractérisés par de fortes variations d'épaisseur), pour se mettre dans l'hypothèse la plus pessimiste.
- Les valeurs du coefficient sont arbitrairement fixées à 5%. En effet, la consultation des entités BD LISA montrent que les porosités varient entre 5 et 20%. Ceci étant, ces estimations résultent généralement de une ou deux mesures, rarement plus, et il est difficile de statuer sur leur représentativité. ajoutons que si localement la nappe est captive sous les limons, ces valeurs perdent de leur sens physique. Afin de respecter l'hypothèse la plus pessimiste, nous conservons la valeur potentielle de ce paramètre la plus faible.

3.1.2.2 Classification des nappes

Pour les nappes alluviales, un certain nombre de données sont malheureusement manquantes (33 cas sur les 100 nappes) : cela est dû à l'absence de fiche descriptive dans le dossier transmis par l'Agence de l'eau ou d'une lacune d'informations dans la description même de la fiche. Dans ces deux cas, nous ne pouvons donc pas renseigner notre base de données. Voici la liste de ces 33 nappes alluviales non renseignées.

Figure 33 : Liste des nappes alluviales latérales non renseignées par la BD LISA.

OBJECTID (BD Lisa)	RHF_ENTITE (BD Lisa)	RHF_LIBELL (BD Lisa)	Objet de la lacune d'information
1079	94A1	Alluvions de l'Albarine	Pas de fiche
440	323A	Alluvions de l'Allan	Pas de fiche
1446	E7Z	Alluvions de l'Eyrieux	Pas de fiche
1250	BOU22A	Alluvions de l'Ignon	Pas d'info
281	152J1	Alluvions de l'Ozon	Pas d'info
686	549A2	Alluvions de la Berre	Pas de fiche
302	152X1	Alluvions de la Bièvre	Pas de fiche
660	545B2	Alluvions de la Bonne et de la Roizonne	Pas d'info
339	158A16	Alluvions de la Bourne et du Méaudret	Pas d'info
244	151A3	Alluvions de la Chalaronne	Pas d'info
1260	BOU26A	Alluvions de la Dheune	Pas d'info
1262	BOU27A	Alluvions de la Grosne	Pas d'info
1264	BOU28A	Alluvions de la Guye	Pas d'info
603	542X	Alluvions de la vallée de Couz	Pas d'info
661	5450	Alluvions de la vallée de l'Arly	Pas de fiche
1354	E13X	Alluvions de la vallée du Bréda	Pas de fiche
282	152J2	Alluvions de la Varèze	Pas d'info
1246	BOU20A	Alluvions de la Vingeanne	Pas d'info
1256	BOU24A	Alluvions de la Vouge	Pas d'info
1031	621A8	Alluvions du Gier	Pas de fiche
1258	BOU25A	Alluvions du Meuzin	Pas d'info
654	544000	Alluvions du Nizerand	Pas de fiche
436	322A1	Alluvions du Saint Nicolas	Pas de fiche
1205	95B9	Alluvions du Suran	Pas d'info
1356	E13X2	Cône de déjection de la Rochette	Pas de fiche
602	542ICL	Formations des terrasses de Kame dans le synclinal de Novalaise	Pas d'info
1355	E13X1	Ombilic d'Allevard	Pas de fiche
1337	E10X2	Ombilic de l'Ormente	Pas de fiche
1339	E10X4	Ombilic de la Sassièrre	Pas de fiche
1338	E10X3	Ombilic de Rosuel	Pas de fiche
1336	E10X1	Ombilic des Chapieux	Pas de fiche

Au vu des considérations développées ci-dessus, on propose ainsi de regrouper les nappes alluviales en trois familles selon la typologie suivante :

- Nappe très productive : $T=10^{-1}$ m²/s et $S=0,05$.
- Nappe productive : $T=10^{-2}$ m²/s et $S=0,05$.
- Nappe peu productive : $T=10^{-3}$ m²/s et $S=0,05$.

Le tableau ci-dessous propose le classement des nappes alluviales selon cette typologie :

RHF_ENTITE (BD Lisa)	RHF_LIBELLÉ (BD Lisa)	Niveau de Productivité	Transmissivité T (m ² /s)
10A	Alluvions de la Loue en amont d'Arc-et-Senans	Nappe peu Productive	$3.10^{-5} < 1.10^{-3} < 5.10^{-2}$
10B	Alluvions de la Loue, d'Arc-et-Senans à la confluence avec le Doubs	Nappe très Productive	$5.10^{-3} < 1.10^{-1}$
10C	Alluvions Doubs aval et graviers du "Saint-Côme" de la plaine Saône-Doubs	Nappe très Productive	$5.10^{-3} < 1.7.10^{-1}$
14A	Alluvions de la Lanterne et de ses affluents	Nappe Productive	$2.10^{-3} < 2.5.10^{-2} < 5.5.10^{-2}$
151A3	Alluvions de la Chalaronne	pas d'info	pas d'info
151A4	Alluvions de la Veylle	Nappe Productive	$3.10^{-2} < 5.10^{-2}$
151X	Alluvions de la Saône du seuil calcaire de Tournus à Ambérieux	Nappe Productive	$4.10^{-4} < 3.10^{-2}$
152H	Alluvions de la Bourbre et du Catelan	Nappe très Productive	$1.10^{-4} < 1.10^{-2}$
152I5	Alluvions de l'Herbasse et de la Galaure	Nappe Productive	1.10^{-2}
152J1	Alluvions de l'Ozon	pas de fiche	pas de fiche
152J2	Alluvions de la Varèze	pas de fiche	pas de fiche
152X	Alluvions de la Reysouze	Nappe peu Productive	$3.10^{-3} < 25.10^{-3}$
152X1	Alluvions de la Bièvre	pas de fiche	pas de fiche
152X2	Alluvions de la Fure, de l'Ainan, de la Morge, de Chantabot et des Rivoires	Nappe très Productive	$1.10^{-5} < 3.10^{-3}$
154C	Alluvions de la Drôme	Nappe Productive	1.10^{-2}
158A16	Alluvions de la Bourne et du Méaudret	pas d'info	pas d'info
177C2	Alluvions du delta de la Dranse	Nappe très Productive	$10^{-3} < 2.10^{-1}$
17A	Alluvions de la vallée du Doubs	Nappe Productive	$1.10^{-2} < 5.10^{-2}$
19A	Alluvions de la Saône, de la confluence de l'Armanche à la confluence avec l'Ognon	Nappe peu Productive	$1.10^{-3} < 1.10^{-1} < 1.10^{-2}$
30A1	Alluvions récentes et fluvioglaciaires de la Biemme aval	Nappe Productive	1.10^{-2}
320A	Alluvions de l'Ognon, en amont du Rahin	Nappe peu Productive	$1.2.10^{-5} < 2.10^{-3} < 2.10^{-2}$
320B	Alluvions de l'Ognon, de la confluence du Rahin à la confluence avec la Saône	Nappe peu Productive	1.10^{-3}
322A	Alluvions de la Savoureuse	Nappe Productive	$10^{-2} < 3.10^{-2} < 10^{-1}$
322A1	Alluvions du Saint-Nicolas	pas de fiche	pas de fiche
323	Alluvions du Giffre	Nappe Productive	$1 < 5.10^{-2}$
323A	Alluvions de l'Allan	pas de fiche	pas de fiche
324A	Alluvions de l'Arve et de la Menoge	Nappe Productive	$1 < 5.10^{-2}$
325A	Alluvions de la vallée de l'isère en amont de Pontcharra	Nappe Productive	$7.5.10^{-3} < 10^{-2}/10^{-3} < 2.5.10^{-1}$
325B	Alluvions de l'isère entre Pontcharra et Grenoble	Nappe peu Productive	1.10^{-1}
325C	Alluvions de la vallée du Drac	Nappe très Productive	$2.10^{-4} < 3.10^{-2}$
325D	Alluvions de l'isère en aval de Grenoble	Nappe Productive	1.10^{-2}
325E	Alluvions de l'isère en amont de la confluence avec le Rhône	Nappe Productive	1.10^{-2}
326	Alluvions de l'Eau d'Olle et de la Romanche	Nappe Productive	7.10^{-3}
327F	ALLUVIONS DE LA BASSE VALLEE DE LA CEZE, DE LA CEZE DANS LE SECTEUR DE ST AMBROIX ET ALLUVIONS DE LA TAVE	Nappe Productive	$10^{-3} < 2.10^{-3}$
366	Alluvions des Gardons	Nappe peu Productive	$10^{-3} < 10^{-2}$
369	Alluvions de la plaine de la Valdaine	Nappe peu Productive	1.10^{-3}
369A	Alluvions du Roubion et du Jabron	Nappe peu Productive	1.10^{-3}
384	Alluvions de la vallée de l'Arc	Nappe Productive	1.10^{-2}
385	Alluvions de la dépression de Chambéry et du Stieroz-Tillet	Nappe Productive	1.10^{-2}

540X	Alluvions de la Saône entre Ambérieux et Caluire-et-Cuire	Nappe Productive	$1.10^{-4} < 5.10^{-3} < 5.10^{-2}$
540X3	Alluvions de l'Azergues et de la Brévenne	Nappe peu Productive	1.10^{-3}
540X4	Alluvions de l'Ardière	Nappe peu Productive	3.10^{-3}
542/ICL	Formations des terrasses de Kame dans le synclinal de Novalaise	pas d'info	pas d'info
542X	Alluvions de la vallée de Couz	pas d'info	pas d'info
543A1	Alluvions de la cluse d'Annecy	Nappe Productive	2.10^{-2}
543A2	Alluvions de la haute vallée du Fier	Nappe peu Productive	4.10^{-3}
543A3	Alluvions du Chéran	Nappe très Productive	3.10^{-3}
543B	Alluvions du Guiers	Nappe très Productive	10^{-2} à 10^{-1}
543C1	Alluvions des Dranses d'Abondance et de Morzine	Nappe Productive	2.10^{-2}
544E03	Alluvions du Nizerand	pas de fiche	pas de fiche
545B2	Alluvions de la Bonne et de la Roizonne	pas d'info	pas d'info
545E01	Alluvions de la vallée de l'Arly	pas de fiche	pas de fiche
548B	Alluvions de l'Ardèche et de ses affluents	Nappe Productive	5.10^{-2}
548B	Alluvions de l'Ardèche et de ses affluents	Nappe Productive	5.10^{-2}
549A2	Alluvions de la Berre	pas de fiche	pas de fiche
60A	Alluvions du Rahin	Nappe Productive	$1.7.10^{-4} < 2.5.10^{-2}$
621A8	Alluvions du Gier	pas de fiche	pas de fiche
621B	Alluvions de la boucle de Vaise	Nappe Productive	5.10^{-2}
94A1	Alluvions de l'Albarime	pas de fiche	pas de fiche
94B	Alluvions de la plaine de l'Ain	Nappe très Productive	5.10^{-3} à 8.10^{-4}
95B9	Alluvions du Suran	pas d'info	pas d'info
BOU19C	Alluvions de la Saône entre l'Ognon et le Doubs	Nappe Productive	$6.5.10^{-3}$
BOU19D	Alluvions de la Saône du confluent du Doubs au seuil calcaire de Tournus	Nappe Productive	$6.5.10^{-3}$
BOU20A	Alluvions de la Vingeanne	pas d'info	pas d'info
BOU21A	Alluvions de la Tille aval	Nappe très Productive	$1.10^{-2} < 1.10^{-1}$
BOU22A	Alluvions de l'ignon	pas d'info	pas d'info
BOU23B	Alluvions de l'Ouche	Nappe Productive	1.10^{-2}
BOU24A	Alluvions de la Vouge	pas d'info	pas d'info
BOU25A	Alluvions du Meuzin	pas d'info	pas d'info
BOU26A	Alluvions de la Dheune	pas d'info	pas d'info
BOU27A	Alluvions de la Grosne	pas d'info	pas d'info
BOU28A	Alluvions de la Guye	pas d'info	pas d'info
E10X1	Ombilic des Chapieux	pas de fiche	pas de fiche
E10X2	Ombilic de l'Ormente	pas de fiche	pas de fiche
E10X3	Ombilic de Rosuel	pas de fiche	pas de fiche
E10X4	Ombilic de la Sassièrre	pas de fiche	pas de fiche
E13X	Alluvions de la vallée du Brédia	pas de fiche	pas de fiche
E13X1	Ombilic d'Alleverd	pas de fiche	pas de fiche
E13X2	Cône de déjection de la Rochette	pas de fiche	pas de fiche
E7Z	Alluvions de l'Eyréieux	pas de fiche	pas de fiche
PAC01A1	Alluvions de l'Aigues et du Lez	Nappe Productive	$1.10^{-3} < 1.10^{-2} < 1.10^{-1}$
PAC01A2	Alluvions de l'Ouvéze	Nappe Productive	$2.10^{-3} < 2.10^{-2} < 2.10^{-1}$
PAC01A3	Alluvions des Sorgues et de la Nesque	Nappe Productive	$1.10^{-3} < 1.10^{-1}$
PAC02A	Alluvions récentes de la Haute-Durance et cônes de déjection d'affluents	Nappe Productive	$2.10^{-2} < 5.10^{-1}$
PAC02C	Alluvions récentes de la Moyenne Durance	Nappe très Productive	$8.10^{-2} < 1.10^{-1}$
PAC02E	Alluvions récentes de la Basse Durance	Nappe très Productive	$2.10^{-2} < 5.10^{-1}$
PAC02F1	Alluvions récentes de l'Ubaye	Nappe très Productive	1.10^{-1}
PAC02G	Alluvions récentes du Buëch	Nappe très Productive	$2.10^{-2} < 2.5.10^{-1}$
PAC02H	Alluvions récentes de la Bléone	Nappe Productive	1.10^{-2}
PAC02I	Alluvions récentes de l'Asse	Nappe Productive	1.10^{-2}
PAC02J1	Alluvions récentes du Callavon	Nappe Productive	$10^{-3} < 10^{-2} < 10^{-1}$
PAC02K1	Alluvions récentes de la Guisane	Nappe Productive	2.10^{-2}
PAC14A1	Alluvions récentes du Haut Drac	Nappe Productive	$1.5.10^{-3}$
603F1	Alluvions du Doux	Nappe très Productive	1.10^{-2} à 1.10^{-1}
603F1	Alluvions du Doux	Nappe très Productive	$1.10^{-2} > 1.10^{-1}$

3.1.3 Hypothèses pour les formations annexes

3.1.3.1 Formations molassiques

Les formations molassiques présentent de nombreuses configurations hydrogéologiques plus ou moins complexes. Il n'est pas possible dans le cadre de cette étude de s'intéresser à toute cette complexité. Nous avons donc considéré le cas le plus défavorable :

- Connexion directe à un cours d'eau, sans prise en compte d'un éventuel colmatage des berges et du fond.
- La formation est supposée homogène et aquifère sur toute sa profondeur, ce qui est rarement le cas ; en effet, ces formations résultent de phénomènes sédimentaires spécifiques qui ont conduit à des structures lenticulaires avec l'alternance sur une même verticale de lentilles sableuses avec des lentilles argileuses.

On est donc dans le cas le plus défavorable en terme d'impact sur le débit aux exutoires.

La formule de Theis est appliquée avec les hypothèses suivantes :

- K moyen de 10⁻⁵ m/s.
- Épaisseur d'écoulement actif de l'ordre de 100 m.
- S de l'ordre de 10%.

3.1.3.2 Formations fluvio-glaciaires

Les renseignements sur les formations fluvio-glaciaires sont issus des fiches descriptives de la BD LISA. De manière générale, les formations sont caractérisées par des épaisseurs variables, mais toujours supérieures à 10 m, et par des perméabilités élevées (10⁻² m/s) à très élevées (>10⁻² m/s).

La formule de Theis donc est appliquée avec les hypothèses suivantes :

- T moyen de 10⁻¹ m²/s.
- S de l'ordre de 15%.

3.1.4 Résultats

Les clés de détermination ont été calculées en considérant des durées de pompages estivaux de 100 jours.

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous ; les pourcentages indiquent la part du débit pompé correspondant au volume cumulé soustrait à la rivière.

3.1.4.1 Nappes alluviales

Le tableau ci-dessous présente le pourcentage de débit "perdu" pendant la durée du pompage en fonction de la distance entre le point de prélèvement et le cours d'eau.

Figure 34 : Impact des prélèvements en fonction de la distance, pour les nappes alluviales des affluents du Rhône.

		Distance puits-Rivière (m)								
	T	1-250	250-500	500-750	750-1000	1000-1500	1500-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000
Nappe TP	1.E-01	100%	100%	100%	75%	70%	60%	50%	35%	25%
Nappe P	1.E-02	100%	70%	55%	45%	30%	20%	10%	0%	0%
Nappe PP	1.E-03	70%	35%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Par exemple, pour une nappe productive, un forage agricole situé à environ 400 m d'une rivière soutirera à la rivière un volume de l'ordre de 70% du débit prélevé à la fin des 100 jours de pompage. Ainsi, si ce débit est d'environ 100 m³/jour, le volume total perdu pour la rivière est de l'ordre de 0.7*100*100 soit 7 000 m³. Si on fait l'hypothèse d'un impact pseudo constant dans le temps, le débit fictif retiré à la rivière sera de l'ordre de 0,8 l/s.

Il nous a semblé utile de déterminer les distances par catégorie d'impact : impact très fort (D pour I>90% de P), impact fort (D pour I>75% de P), impact moyen (D pour I>50% de P) et impact faible (D pour I>25% de P).

Figure 35 : Distance moyenne en fonction du degré d'impact des prélèvements pour les nappes alluviales des affluents du Rhône.

			% impact			
	T	S	90%	75%	50%	25%
Nappe TP	1.E-01	15%	500	600	1 400	2 500
Nappe P	1.E-02	10%	160	220	500	1 000
Nappe PP	1.E-03	5%	70	100	250	450

3.1.4.2 Nappes fluvio-glaciaires

Le tableau ci-dessous présente le pourcentage de débit "perdu" pendant la durée du pompage en fonction de la distance entre le point de prélèvement et le cours d'eau.

Figure 36 : Impact des prélèvements en fonction de la distance, pour les nappes fluvio-glaciaires.

			Distance puits-Rivière (m)								
	T	S	1-250	250-500	500-750	750-1000	1000-1500	1500-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000
Nappe FG	1.E-01	15%	100%	100%	75%	65%	55%	40%	50%	25%	10%

Le tableau ci-dessous présente les distances moyennes par catégories d'impact : impact très fort (D pour $I > 90\%$ de P), impact fort (D pour $I > 75\%$ de P), impact moyen (D pour $I > 50\%$ de P) et impact faible (D pour $I > 25\%$ de P).

Figure 37 : Distance moyenne en fonction du degré d'impact des prélèvements pour les nappes fluvio-glaciaires du Rhône.

			% impact			
	T	S	90%	75%	50%	25%
Nappe FG	1.E-01	15%	500	600	1 400	2 500

3.1.4.3 Mollasses

L'application de la formule analytique montre que l'influence par prélèvement instantané lié à une modification locale du gradient hydraulique est restreinte à une bande de 300 m de part et d'autre des cours d'eau qui drainent la molasse.

Figure 38 : Distance moyenne en fonction du degré d'impact des prélèvements pour les nappes molassiques.

			% impact			
	T	S	90%	75%	50%	25%
Nappe mollasses	1.E-03	10%	50	75	170	300

Cela signifie qu'au-delà de cette bande, les prélèvements affectent la dynamique d'évolution du niveau piézométrique sur le long terme.

Au vu des dimensions de ces aquifères molassiques (de plusieurs centaines à plusieurs milliers de km²), on peut supposer ces phénomènes de soutirage instantané aux cours d'eau qui les drainent, comme négligeables. On pourra donc faire l'hypothèse que les prélèvements temporaires dans ces aquifères se traduisent sur des phénomènes de long terme (vidange de l'unité aquifère).

3.2 APPROCHE SYSTÉMATIQUE DES IMPACTS QUANTITATIFS DES PRÉLÈVEMENTS EN NAPPE ALLUVIALE PAR SIMULATIONS NUMÉRIQUES

3.2.1 Considérations théoriques

3.2.1.1 Phasage

L'objectif est de proposer une démarche qui intègre toute la complexité spécifique de la nappe alluviale du Rhône, mais qui permet 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.

Les paramètres susceptibles d'expliquer l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe alluviale sur le débit du fleuve sont nombreux :

- Configuration hydrogéologique en fonction des aménagements hydro-électriques.
- Colmatage des berges et du fond.
- Politique de prélèvement.
- Présence d'un encaissant plus ou moins perméable en position de suralimenter la nappe alluviale.
- Paramètres hydrodynamiques des alluvions.
-

Ce travail a été réalisé en deux temps :

- Nous avons d'abord réalisé des tests préliminaires pour valider certaines hypothèses et pour approcher l'impact de paramètres jugés a priori peu impactant.
- Puis, nous avons réalisé une analyse de sensibilité en croisant systématiquement les paramètres explicatifs restant.

Les tests préliminaires ont permis de démontrer, toutes choses étant égales par ailleurs et dans la limite des gammes testées, que le colmatage et la temporalité des prélèvements, avaient peu d'influence sur l'impact d'un prélèvement sur les débits du fleuve. De plus, ces tests confirment que la part relative d'un prélèvement soustraire au débit du fleuve est indépendante de la magnitude du débit.

3.2.1.2 Configurations hydrogéologiques testées

Ainsi pour l'analyse de sensibilité, trois modèles de référence ont été construits selon les grands types de situation hydrogéologique induite par les aménagements, observés et présentés dans la partie relative à la sectorisation de la nappe alluviale du Rhône :

- Modèle de l'îlot : section de plaine alluviale encadrée par un Rhône endigué et un Rhône dit libre.
- Modèle de Rhône endigué.
- Modèle de Rhône libre.

Elles ont été croisées avec trois types de situation quant aux encaissants géologiques : encaissant très perméable ($K=10^{-3}$ m/s), nappes alluviales latérales ou nappes fluvio-glaciaires, encaissant peu perméable ($K=10^{-5}$ m/s), molasses ou aquifères carbonatés, et encaissant imperméable (pour le socle principalement).

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

- Perméabilité moyenne ou forte (par exemple : 10^{-3} ou 10^{-2} m²/s).
- Distance au cours d'eau faible, moyenne ou élevée (par exemple : <500 m, <1000 m, et >1000 m).

Comme la part relative d'un prélèvement soustraire au débit du fleuve est indépendante de la magnitude du débit, toutes les simulations ont été réalisées avec un prélèvement unique de type forage, pour un prélèvement journalier unitaire de 3000 m³/jour (soit un volume prélevé cumulé de 270 000m³ sur 3 mois).

Les résultats montrent l'influence relative d'un pompage sur le débit du cours d'eau, dont on fait varier la distance au cours d'eau. Grâce aux simulations effectuées, nous avons pu sortir les valeurs de flux entrant et sortant du cours d'eau pour ainsi déterminer les pourcentages relatifs soutirés au cours d'eau mois par mois.

À l'aide de ces valeurs, nous avons construit des graphiques pour chaque configuration/simulation. Il est important de préciser que nous nous sommes intéressés principalement au débit soutiré au cours d'eau et non aux autres caractéristiques hydrogéologiques telles que la piézométrie ou autres.

3.2.1.3 Hypothèses communes aux modèles

3.2.1.3.1 Structure temporelle des simulations

Les simulations sont réalisées avec un pas de temps mensuel.

Elles sont produites sur une période 40 ans, soit 480 pas de temps. Ce choix nous permet de simuler une lame d'eau infiltrée variable en fonction des saisons et ainsi d'appréhender un éventuel impact de la variation climatique à grande échelle sur les échanges nappe-rivière.

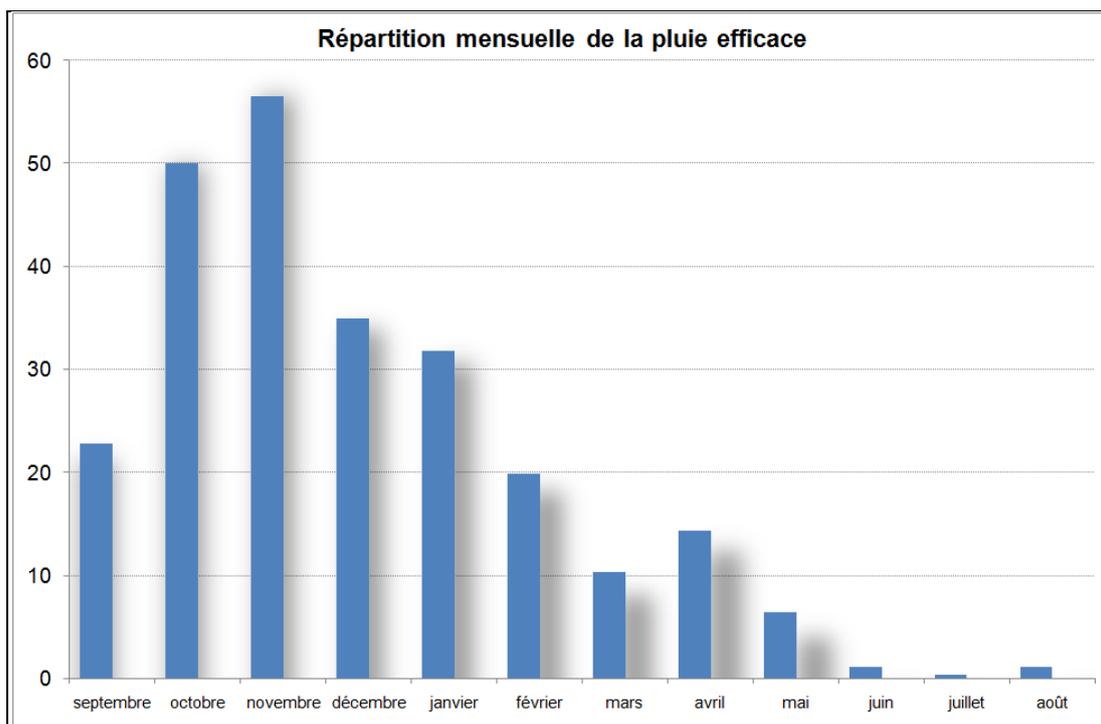
Ce choix stratégique induit que les impacts des prélèvements sur le débit du fleuve, calculés mensuellement en termes de pourcentage du débit prélevé, sont des moyennes mensuelles interannuelles.

3.2.1.3.2 Lame d'eau infiltrée

Pour toutes les simulations, il nous a paru nécessaire de reconstituer une lame d'eau infiltrée ; car elle est susceptible d'influer sur les phénomènes de recharge de la nappe et par là même, de venir potentiellement compenser les impacts quantitatifs sur le débit du fleuve.

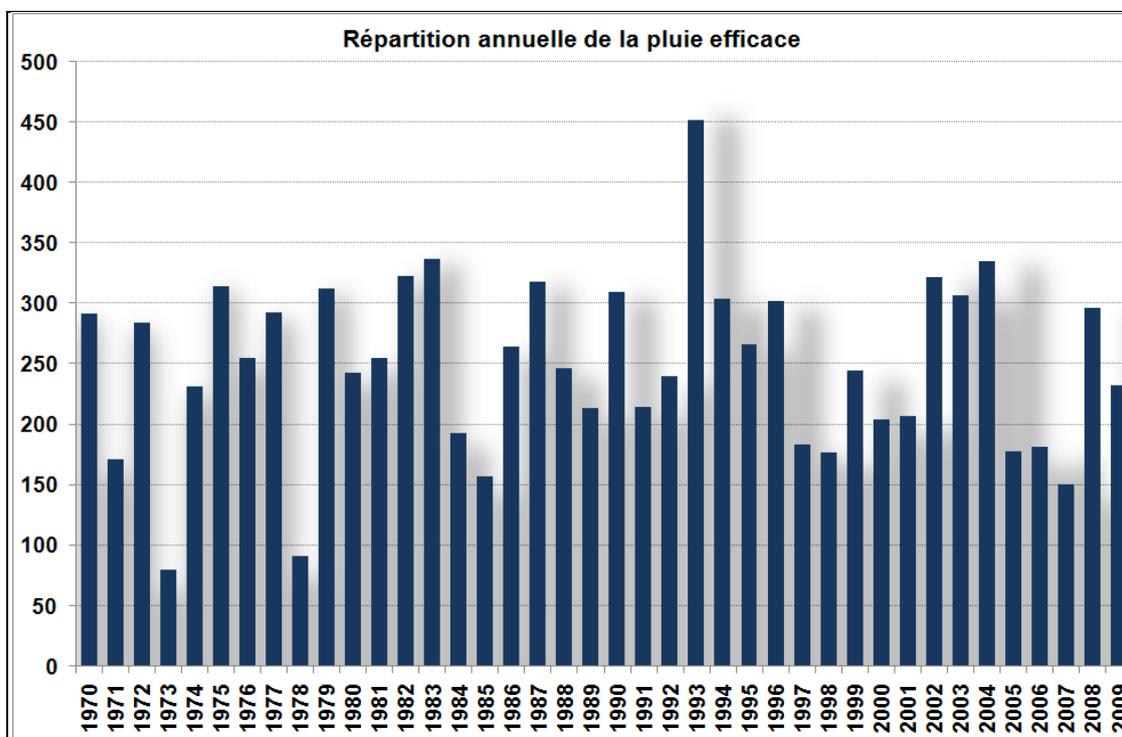
Dans un souci de simplification, la pluie efficace a été estimée comme la différence positive entre les données mensuelles de pluie (station de Brignais) et les données mensuelles d'ETP (station de Lyon-Bron), de 1970 à 2009.

Figure 39 : Moyennes mensuelles des pluies efficaces (station de Bron).



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

Figure 40 : Distribution annuelle des pluies efficaces de 1970 à 2009 (station de Bron).



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

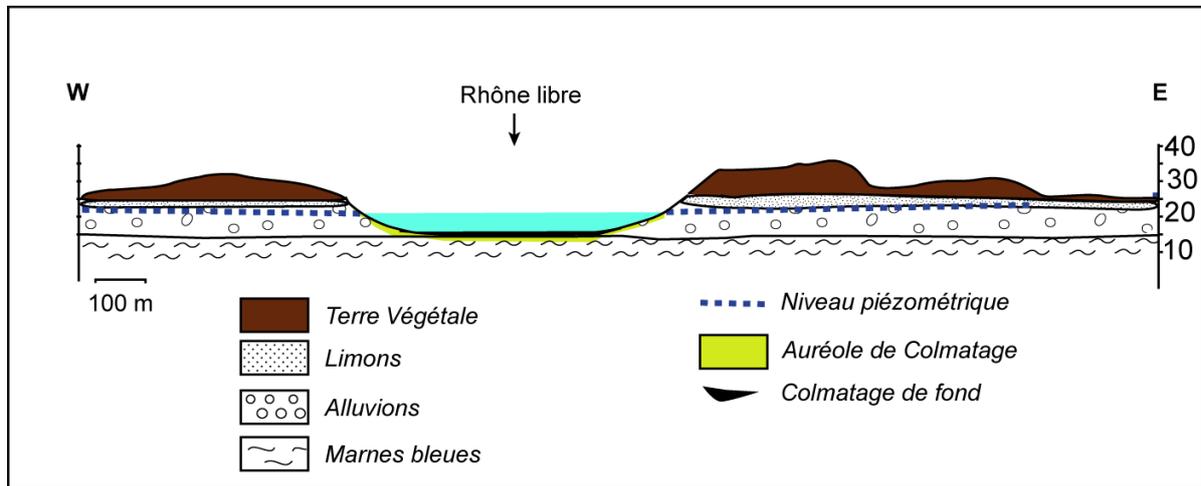
La difficulté de l'exercice réside donc dans la détermination des quantités infiltrées versus les quantités ruisselées. Elle passe par la définition d'un coefficient d'infiltration qui dépend principalement de la texture du sol, et de la pente. Notons que ce coefficient fait l'objet de controverses dans la communauté scientifique, sa détermination étant très délicate. En effet, nombres 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.

3.2.2 Géométrie des modèles

3.2.2.1 Modèle du Rhône libre

Le modèle dit du Rhône libre est censé représenter les sections du fleuve pour lesquelles le fleuve n'est pas endigué. Il est alors situé sous la plaine alluviale, en pleine communication avec la nappe ; les phénomènes de colmatage sont marginaux et restreints à certaines portions du cours d'eau. La figure ci-dessous illustre cette situation:

Figure 41 : Coupe schématique explicative de la configuration Rhône libre.

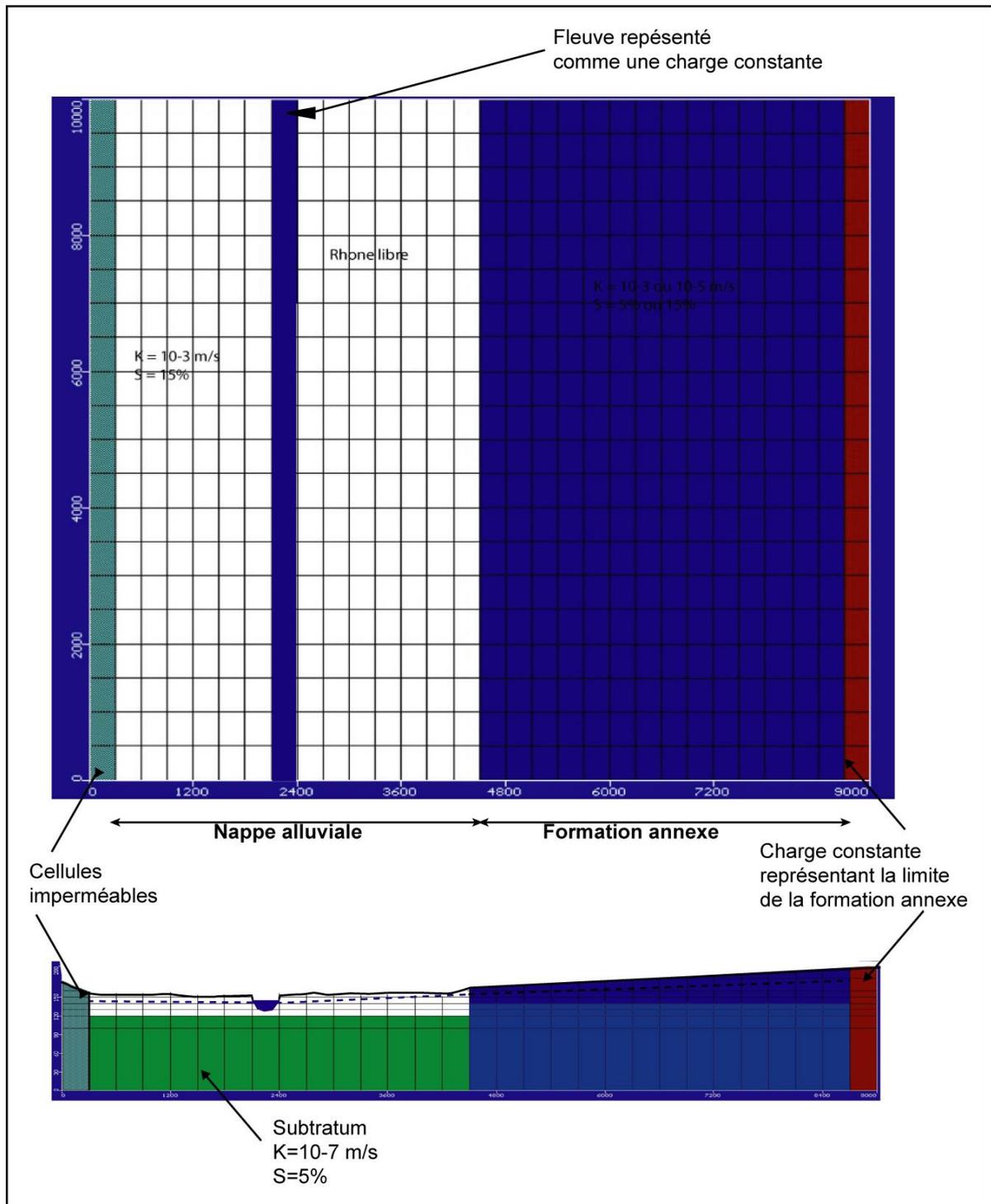


D'un point de vue numérique, cette situation a été approchée par le modèle géométrique suivant :

- Nappe alluviale bordée en rive gauche par un encaissant de perméabilité variable. Les flux dans cette formation sont générés par l'imposition aux limites d'une charge constante.
- Nappe alluviale bordée en rive droite par un encaissant imperméable.
- La nappe alluviale présente une vingtaine de mètres d'épaisseur et repose sur une formation très peu perméable (marnes bleues du Plaisancien).
- Le cours d'eau est représenté par une condition de type rivière. Cela correspond à une limite à charge constante à laquelle on surimpose une transmissivité liée au colmatage qui va contrôler les échanges nappe-rivière.

Dans cette géométrie de modèle, la nappe alluviale du fleuve draine la formation latérale, et la nappe alluviale est elle-même drainée par le fleuve.

Figure 42 : Schéma explicatif du modèle Rhône libre.



Le tableau ci-dessous détaille les dimensions et les paramètres de base de ce type de modèle.

Figure 43 : Tableau des caractéristiques hydrodynamiques du modèle Rhône libre.

Perméabilité	<i>alluvions (m/s)</i>	<i>Encaissant (m/s)</i>	<i>Limons (m/s)</i>
	1.10-3 à 1.10-2	1.10-3 à 1.10-5	1.10-5 à 5.10-5
	<i>Coefficient d'emmagasinement</i>		
	5% à 15%		
Pluie efficace	<i>Plaine alluviale</i>	<i>Encaissant</i>	
	Stat. Bron / Ci de 40 %	Stat. Bron Ci de 80 %	
Dimension du modèle	<i>Longueur Modèle (m)</i>	<i>Largeur Modèle (m)</i>	<i>Longueur Maille (m)</i>
	10000	9000	500
	<i>Epaisseur modèle (m)</i>	<i>Largeur Maille (m)</i>	<i>Plage de temps (jours)</i>
	200	300	14592
Dimension du Rhône	<i>Longueur Rhône (m)</i>	<i>Largeur Rhône (m)</i>	
	10000	300	
Dimension nappe alluviale	<i>Largeur Plaine alluviale (m)</i>	<i>Epaisseur Alluvions (m)</i>	
	4500	20	
Epaisseur colmatage	<i>Epaisseur Colmatage (m)</i>		
	0.3		
Conductance	<i>Rhone libre (m²/jour)</i>		
	432 000		

3.2.2.2 Modèle du Rhône endigué

Le modèle dit du Rhône endigué est censé représenter les sections aménagées du fleuve. La géométrie du système hydraulique est plus complexe. On a d'une part le fleuve endigué qui se présente à une altitude bien supérieure à celle de la plaine alluviale ; il est position d'alimentation mais les échanges sont fortement réduits par la présence de digues latérales et un fort colmatage des berges et du fond, lié au gradient hydraulique qui assure une pénétration des fines dans le réservoir. D'autre part, on a les contre-canaux, situés de part et d'autre du fleuve, qui assurent le drainage et des pieds de digues, et des plaines alluviales. Rappelons que ces contre-canaux "suivent les sections endiguées du Rhône avant un rejet plus à l'aval dans le cours d'eau, généralement directement après les ouvrages de retenue.

La figure ci-dessous illustre cette complexité:

Figure 44 : Coupe schématique explicative de la configuration Rhône endigué.

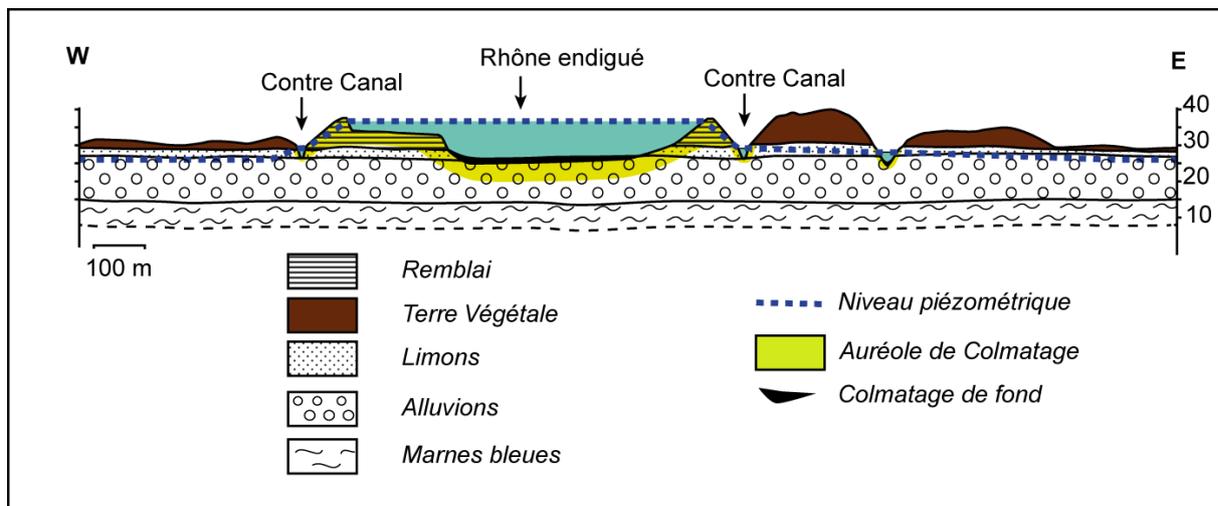
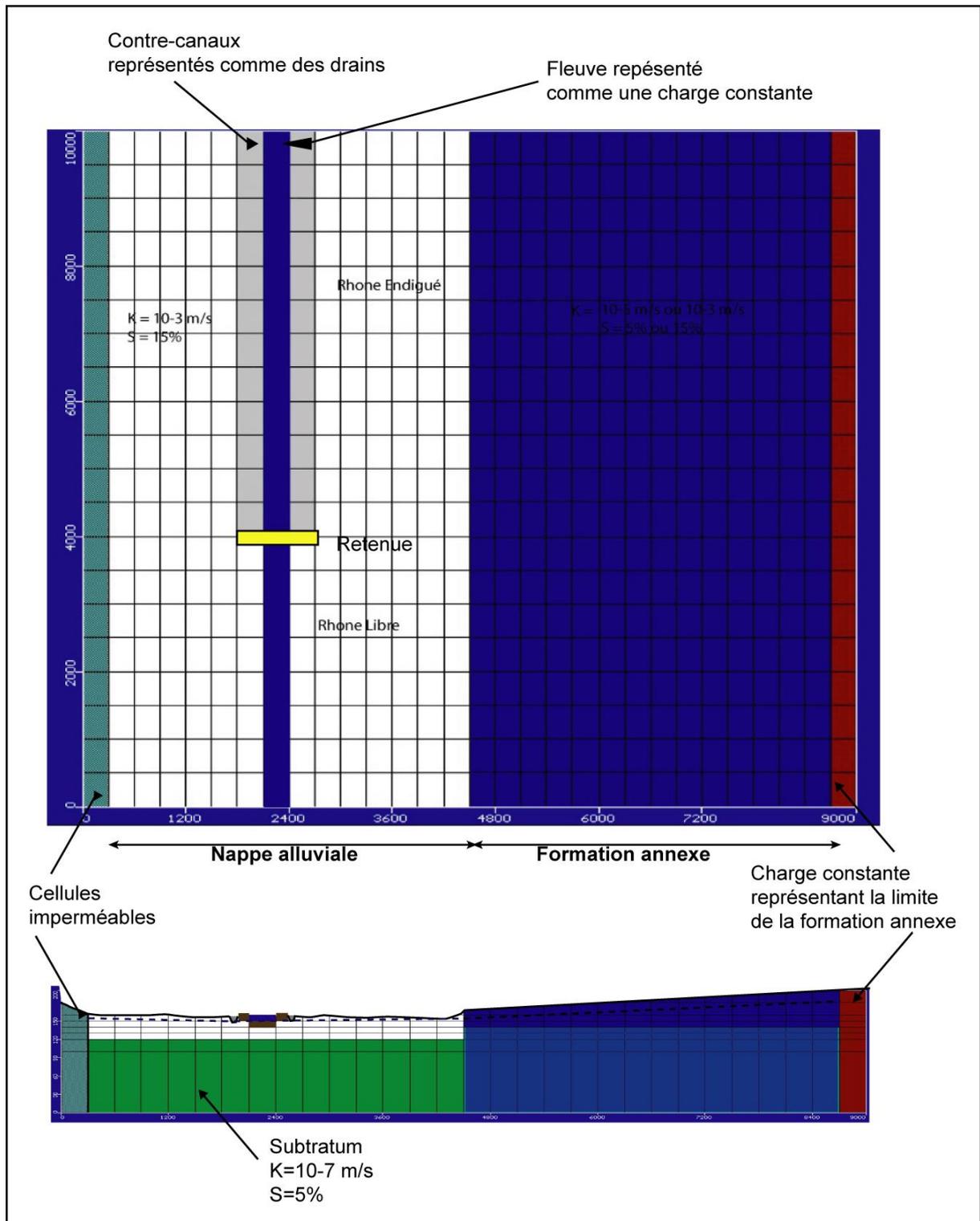


Figure 45 : Schéma explicatif du modèle Rhône endigué.



On retrouve des hypothèses de construction identiques à celles du modèle du Rhône libre :

- Nappe alluviale bordée en rive gauche par un encaissant de perméabilité variable. Les flux dans cette formation sont générés par l'imposition aux limites d'une charge constante.
- Nappe alluviale bordée en rive droite par un encaissant imperméable.
- La nappe alluviale présente une vingtaine de mètres d'épaisseur et repose sur une formation très peu perméable (marnes bleues du Plaisancien).
- Le cours d'eau est représenté par une condition aux limites de type rivière, mais en deux sections de propriétés différentes. Une section amont avec un Rhône caractérisé par une charge haute par rapport à la plaine et un très fort coefficient de colmatage. Et une section aval avec un Rhône de plus faibles charges et un colmatage de fond plus réduit.

Dans cette géométrie de modèle, le comportement hydrogéologique est plus complexe :

- On observe un Rhône alimentant la nappe alluviale par les berges et le fond dans sa partie endiguée.
- Dans sa partie libre, le fleuve est en position de drainer la nappe alluviale.
- Les contre-canaux drainent comme prévu et le cours d'eau, et la nappe alluviale.

Le tableau ci-dessous détaille les dimensions et les paramètres de base de ce type de modèle.

Figure 46 : Tableau des caractéristiques hydrodynamiques du modèle de Rhône endigué.

Perméabilité	<i>alluvions (m/s)</i> 1.10-3 à 1.10-2	<i>Encaissant (m/s)</i> 1.10-3 à 1.10-5	<i>Limons (m/s)</i> 1.10-5 à 5.10-5
	Coefficient d'emmagasinement 5% à 15%		
Pluie efficace	<i>Plaine alluviale</i> Stat. Bron / Ci de 40 %	<i>Encaissant</i> Stat. Bron Ci de 80 %	
Dimension du modèle	<i>Longueur Modèle (m)</i> 10000	<i>Largeur Modèle (m)</i> 9000	<i>Longueur Maille (m)</i> 500
	<i>Epaisseur modèle (m)</i> 200	<i>Largeur Maille (m)</i> 300	<i>Plage de temps (jours)</i> 14592
Dimension du Rhône	<i>Longueur Rhône (m)</i> 10000	<i>Largeur Rhône (m)</i> 150	
Dimension nappe alluviale	<i>Largeur Plaine alluviale (m)</i> 4500	<i>Epaisseur Alluvions (m)</i> 20	
Epaisseur colmatage	<i>Epaisseur Colmatage (m)</i> 0.3 à 20		
Conductance	<i>Drain (m²/jour)</i> 5 400	<i>Rhone libre (m²/jour)</i> 216 000	<i>Rhone endigué (m²/jour)</i> 16 200

Précisons que la conductance attribuée au Rhône endiguée a été calée de façon à obtenir un débit de fuite de 800 l/s par km de digue (soit environ 400 l/s par chaque contre-canal).

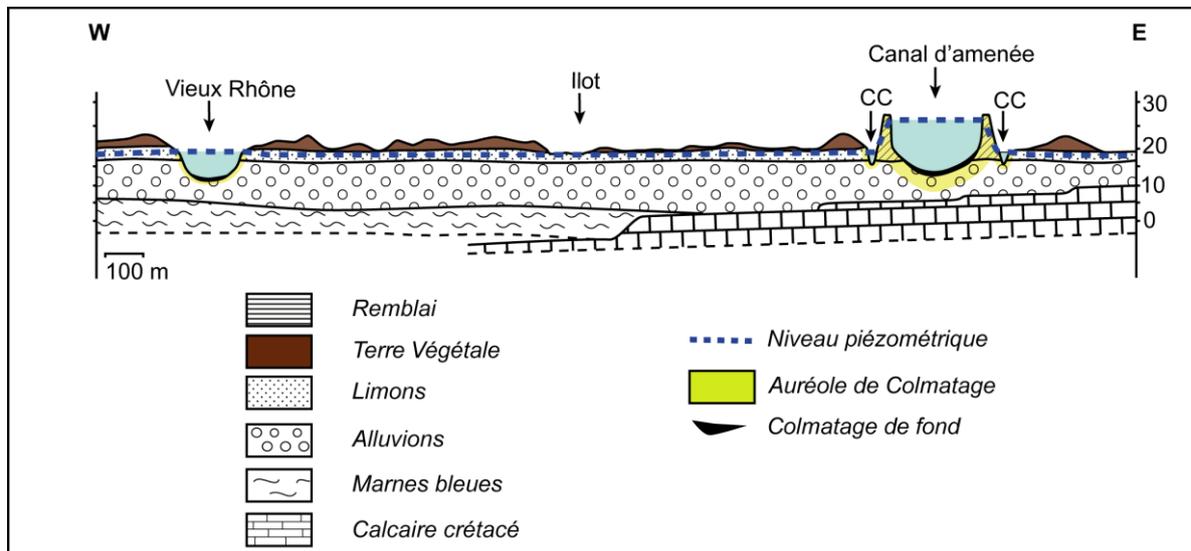
- En effet, la synthèse hydrogéologique proposée dans le cadre du ZABR donne quelques ordres de grandeur très utiles sur le fonctionnement hydrogéologique des couples digues-contre canaux :
- En général, 90% de l'eau recueillie dans un contre-canal provient à 90% du fleuve.
- Les contre-canaux ont été conçus pour drainer environ 1 000 l/s par km de berge. Les valeurs mesurées après quelques années de service varient de 200 à 800 l/s, avec une moyenne autour de 400 l/s par km de berge.

3.2.2.3 Modèle de l'îlot

Dans une première approche, nous nous sommes intéressés à la particularité des îlots, c'est-à-dire avec une partie endiguée et une autre avec le Rhône libre.

Cette configuration propose une synthèse des modèles dits Rhône libre et Rhône endigué. La figure ci-dessous en présente la configuration hydrogéologique standard ::

Figure 47 : Coupe schématique explicative de la configuration îlot.



Logiquement, cette géométrie de modèle est une synthèse des deux modèles précédents :

- Nappe alluviale bordée en rive droite et en rive gauche par un encaissant imperméable.
- La nappe alluviale présente une vingtaine de mètres d'épaisseur et repose sur une formation très peu perméable (marnes bleues du Plaisancien).

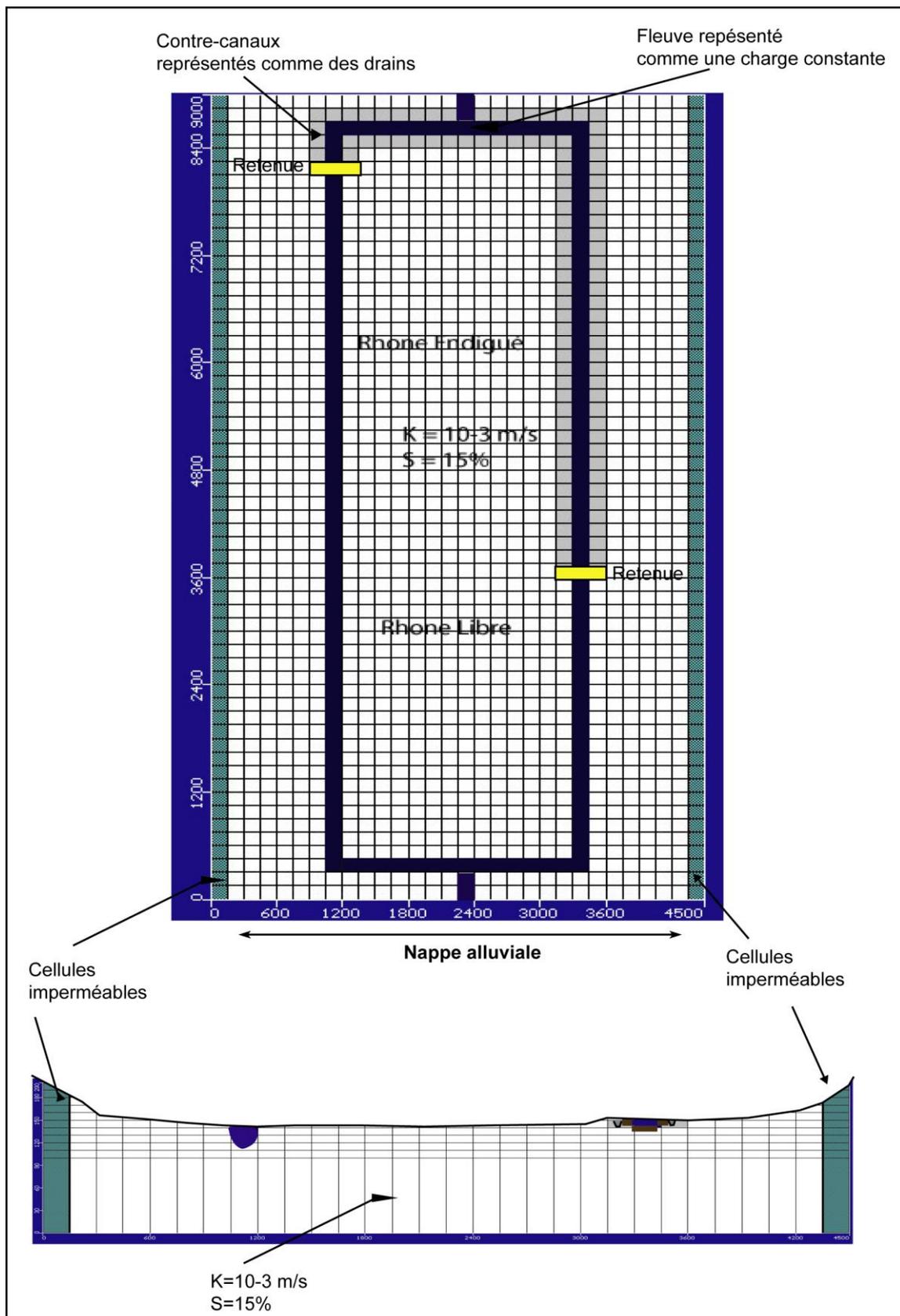
Le cours d'eau est représenté par des conditions aux limites de type rivière, mais de façon complexe :

- En amont des ouvrages de retenue, le fleuve est caractérisé par une charge haute par rapport à la plaine et un très fort coefficient de colmatage.
- En aval de ces ouvrages, le cours d'eau présente de plus faibles charges et un colmatage de fond plus réduit.

Dans cette géométrie de modèle, le comportement hydrogéologique est plus complexe :

- On observe un Rhône alimentant la nappe alluviale par les berges et le fond dans ses parties endiguées.
- Dans ses parties libres, le fleuve est en position de drainer la nappe alluviale.
- Les contre-canaux drainent comme prévu, et le cours d'eau, et la nappe alluviale.

Figure 48 : Schéma explicatif du modèle îlot.



Le tableau ci-dessous détaille les dimensions et les paramètres de base de ce type de modèle.

Figure 49 : Tableau des caractéristiques hydrodynamiques du modèle îlot.

Perméabilité	<i>alluvions (m/s)</i>	<i>Encaissant (m/s)</i>	<i>Limons (m/s)</i>
	1.10-3 à 1.10-2	1.10-3 à 1.10-5	1.10-5 à 5.10-5
	<i>Coefficient d'emmagasinement</i>		
	15%		
Pluie efficace	<i>Plaine alluviale</i>		
	Stat. Bron / Ci de 40 %		
Dimension du modèle	<i>Longueur Modèle (m)</i>	<i>Largeur Modèle (m)</i>	<i>Longueur Maille (m)</i>
	9000	4500	150
	<i>Epaisseur modèle (m)</i>	<i>Largeur Maille (m)</i>	<i>Plage de temps (jours)</i>
	200	150	14592
Dimension du Rhône	<i>Longueur Rhône (m)</i>	<i>Largeur Rhône (m)</i>	
	8500	150	
Dimension nappe alluviale	<i>Largeur Plaine alluviale (m)</i>	<i>Epaisseur Alluvions (m)</i>	
	4500	20	
Epaisseur colmatage	<i>Epaisseur Colmatage (m)</i>		
	0.3 à 20		
Conductance	<i>Rhone libre (m²/jour)</i>	<i>Rhone endigué (m²/jour)</i>	<i>Drain (m²/jour)</i>
	64 800	4800	1620

3.2.3 Tests préliminaires

3.2.3.1 Influence du débit

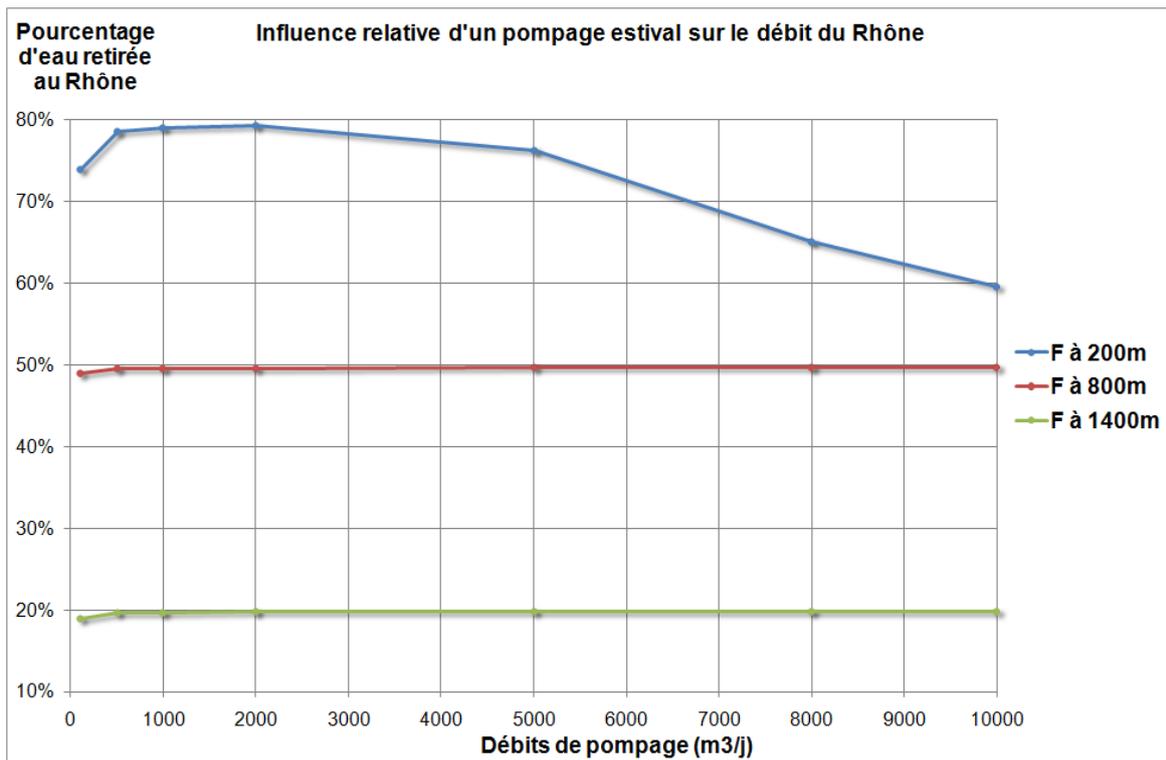
L'effet d'un pompage sur une nappe d'extension semi-infinie limitée par une rivière est donné par de Marsily (1968). Sur la base de la formule de Theis (1935), en représentant l'effet de la rivière comme un puits fictif, les développements analytiques permettent de montrer que le rapport du débit instantané (q) provenant de la rivière à un temps t au débit pompé (Q) est une fonction de la distance au cours d'eau et des paramètres hydrodynamiques.

C'est une démonstration clé : elle indique que le pourcentage du débit pompé effectivement soustrait au débit de la rivière est indépendant de la magnitude du débit. Il nous a paru essentiel de valider ce comportement, déduit d'un modèle analytique simplifié, par des simulations numériques 3D.

Afin de valider ce comportement hydrodynamique, nous avons ainsi réalisé trois approches de modélisation complémentaires. Elles sont basées sur la même configuration hydrogéologique : perméabilité des alluvions du Rhône égale à 10^{-3} m/s, formation annexe en gauche de type mollassique.

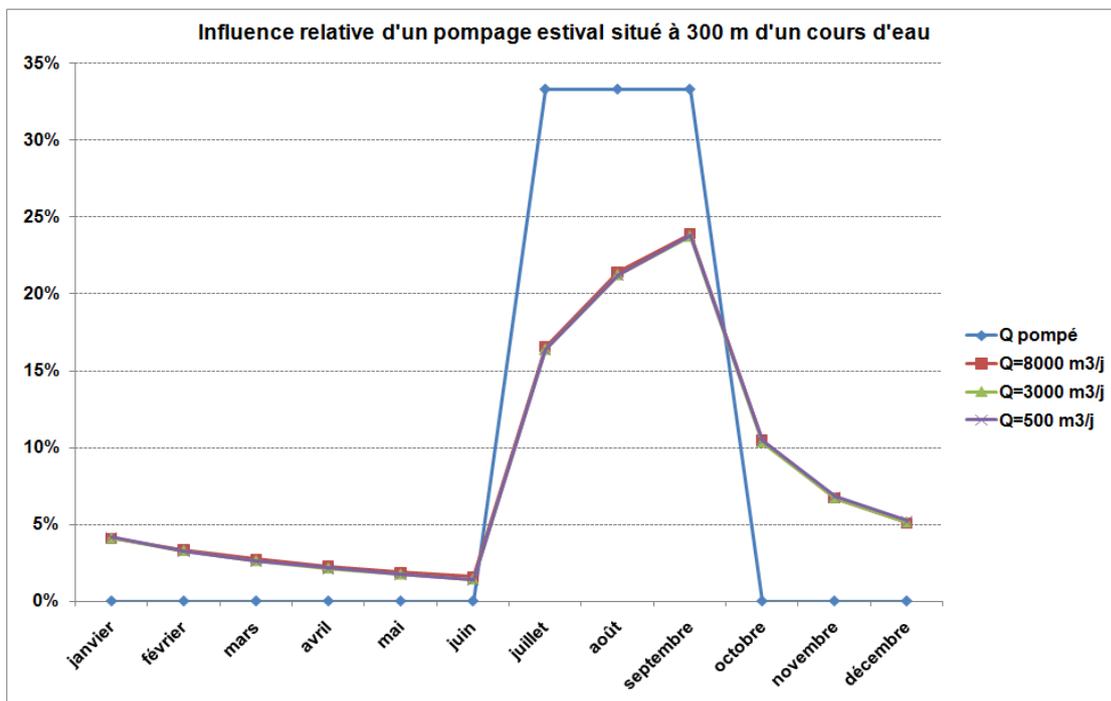
Dans la première approche, on teste 7 débits de pompage pour un forage situé d'abord à 200 m du cours d'eau ; puis à 800 et enfin à 1400 m. La variable de sortie étudiée est le pourcentage d'eau prélevée effectivement retirée au Rhône en moyenne annuelle. Excepté pour un forage très proche du cours d'eau, on observe que le débit de pompage n'influence pas cette part relative ; ce comportement plus complexe résulte d'une surimposition de deux effets : un appel d'eau directement de la rivière (inversion du gradient entre la nappe et le cours d'eau) et la modification du gradient hydraulique dans la zone d'appel.

Figure 50 : Influence du débit sur les échanges nappe-rivière en moyenne annuelle.



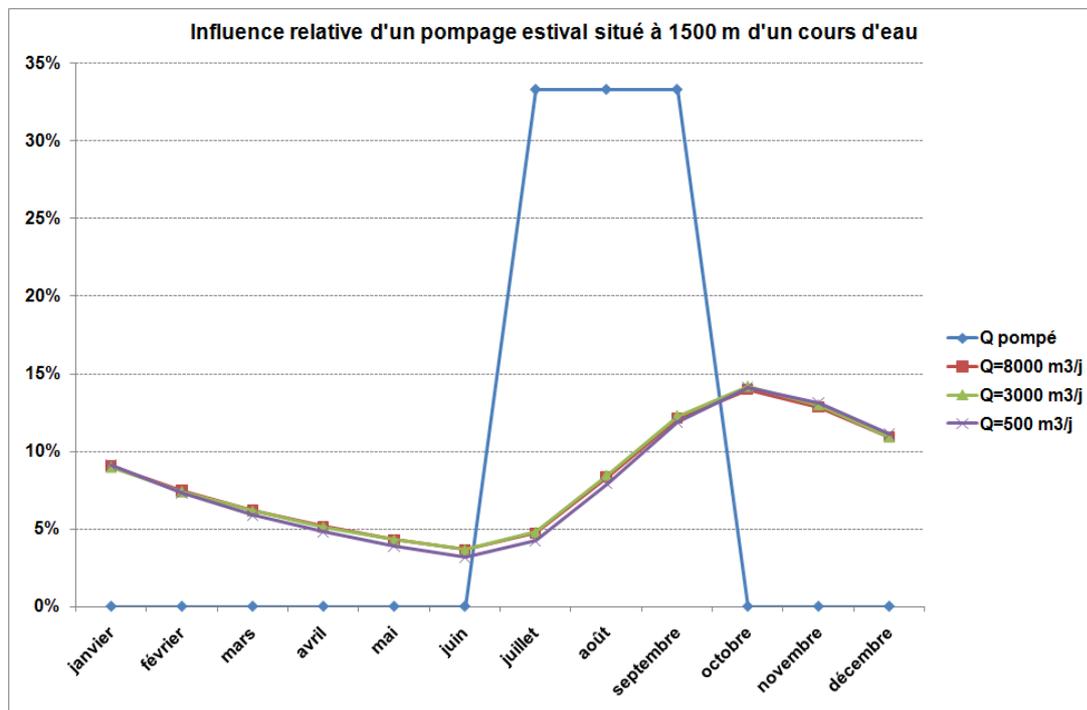
Nous nous sommes donc interrogés sur un potentiel effet inertiel lié à la magnitude du pompage sur la part effectivement soutirée au cours d'eau. Nous avons donc réalisé une seconde approche avec une série de 3 simulations à pompage variable pour un forage situé à 300 m d'un cours d'eau.

Figure 51 : Influence de la magnitude du débit d'un forage situé à 300 m d'un cours d'eau.



Puis nous avons répété ce protocole pour un forage plus lointain, situé à 1500 m du cours d'eau.

Figure 52 : Influence de la magnitude du débit d'un forage situé à 1 500 m d'un cours d'eau.



Ces simulations confirment que le pourcentage du débit prélevé effectivement soutiré au cours d'eau est indépendant du débit lui-même. C'est bien la diffusivité du milieu qui contrôle ce pourcentage et ce même dans une géométrie complexe.

Notons aussi l'effet d'éloignement du forage (ou son rapprochement d'une limite en position d'alimenter la nappe) qui se traduit par une inertie quant à l'effet sur le débit du cours d'eau. La part prélevée présente des magnitudes plus faibles et plus étalée dans le temps.

3.2.3.2 Influence du colmatage

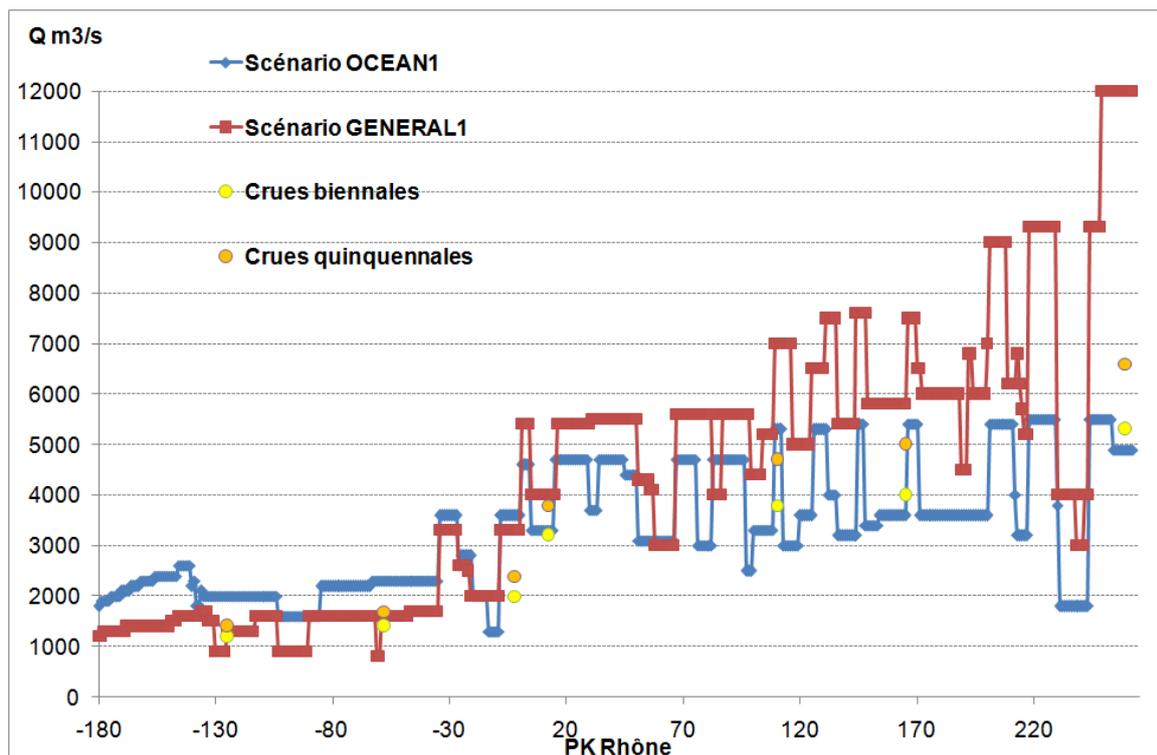
Afin de proposer une sectorisation par susceptibilité de colmatage du fleuve, il a été nécessaire de collecter les données sur les débits du Rhône et sur les niveaux d'eau dans le fleuve en relation avec ces débits.

Les données de débit mesurées sont rares et correspondent aux 6 stations hydrométriques dont les données sont bancarisées sur le site HYDRO FRANCE. Il en est de même pour les données de niveau qui sont en plus dépendantes de la politique de gestion des ouvrages de retenue.

Les données les plus complètes sont celles présentées dans l'étude globale (SOGREAH, 2003). Six scénarios de crue ont été modélisés avec pour chaque scénario la présentation des débits simulés et des niveaux d'eau associés à chaque PK.

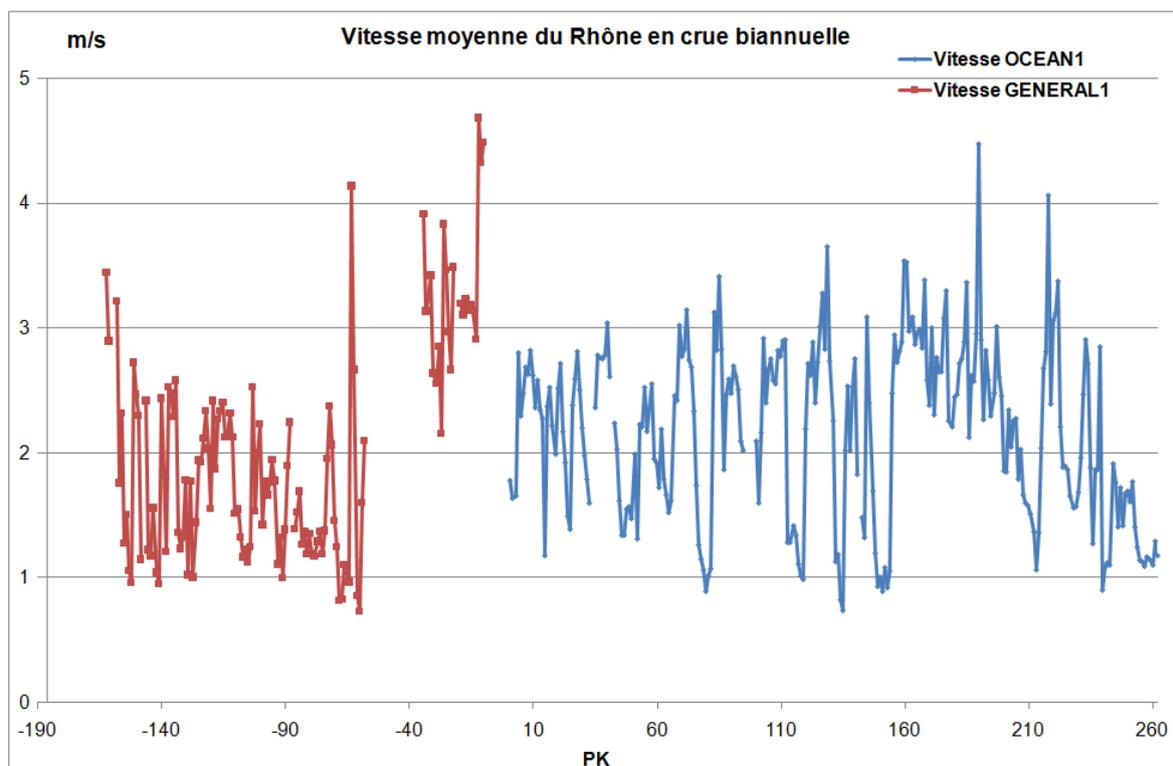
Une analyse sommaire montre que lorsque l'on s'intéresse à des crues de fréquence biennale à quinquennale, le scénario GENERAL1 donne une gamme de débit acceptable en amont de Lyon mais qu'à l'aval de Lyon, c'est le scénario OCEAN1 qui doit être retenu.

Figure 53 : Données mesurées et simulées de débit sur le Rhône.



Ainsi, à partir de ces données de débit et de hauteur d'eau, nous avons été capable d'estimer la vitesse du cours d'eau sur toute sa longueur, PK par PK. On constate des vitesses élevées toujours supérieures à 1 m/s qui témoignent d'une forte capacité à remobiliser les sédiments fins, susceptibles de former un colmatage de fond ou de berge par simple dépôt.

Figure 54 : Vitesses estimées du Rhône en crue.



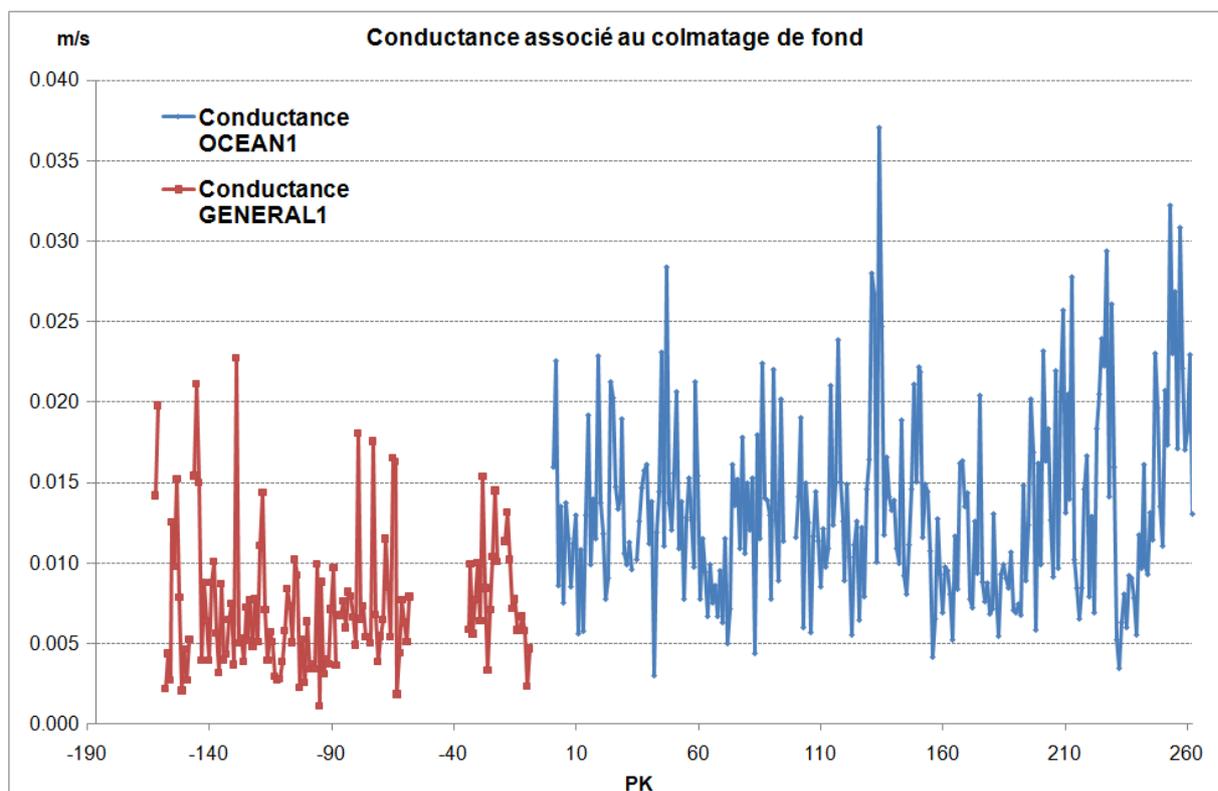
Rappelons que la distribution parabolique des vitesses dans un cours implique un rapport de l'ordre de 3 maximum, entre la vitesse sur les bords et celle au centre du cours d'eau. On a donc lors de ces crues une vitesse au bord qui est bien supérieure à 30 cm/s, avec une remobilisation et une mise en suspension de sables fins jusqu'à plusieurs mm de diamètre. On peut donc en déduire que le colmatage sur le Rhône se limite à quelques sections très étendues, à l'amont immédiat des ouvrages et aux bras morts.

De la même manière, en fonction de la section du cours d'eau, de la forme de ses pentes, notre approche analogique permet d'estimer une conductance moyenne, PK par PK. On observe deux résultats importants :

Les variations locales de cet indice sont globalement plus fortes que les variations "sectorielles". Cela témoigne de la prédominance d'effets locaux sur les dynamiques de colmatage (géométrie fine du cours d'eau lié à la forme des méandres) par rapport aux effets régionaux.

On observe une tendance à une conductance plus forte en aval de Lyon qu'à l'amont (facteur 2 sur les valeurs moyennes). On constate en effet que la surface du fleuve en aval de Lyon est généralement plus étendue et que les fonds sont généralement plus plats à l'amont.

Figure 55 : Indice de conductance associé au colmatage potentiel du fond et des berges du Rhône.



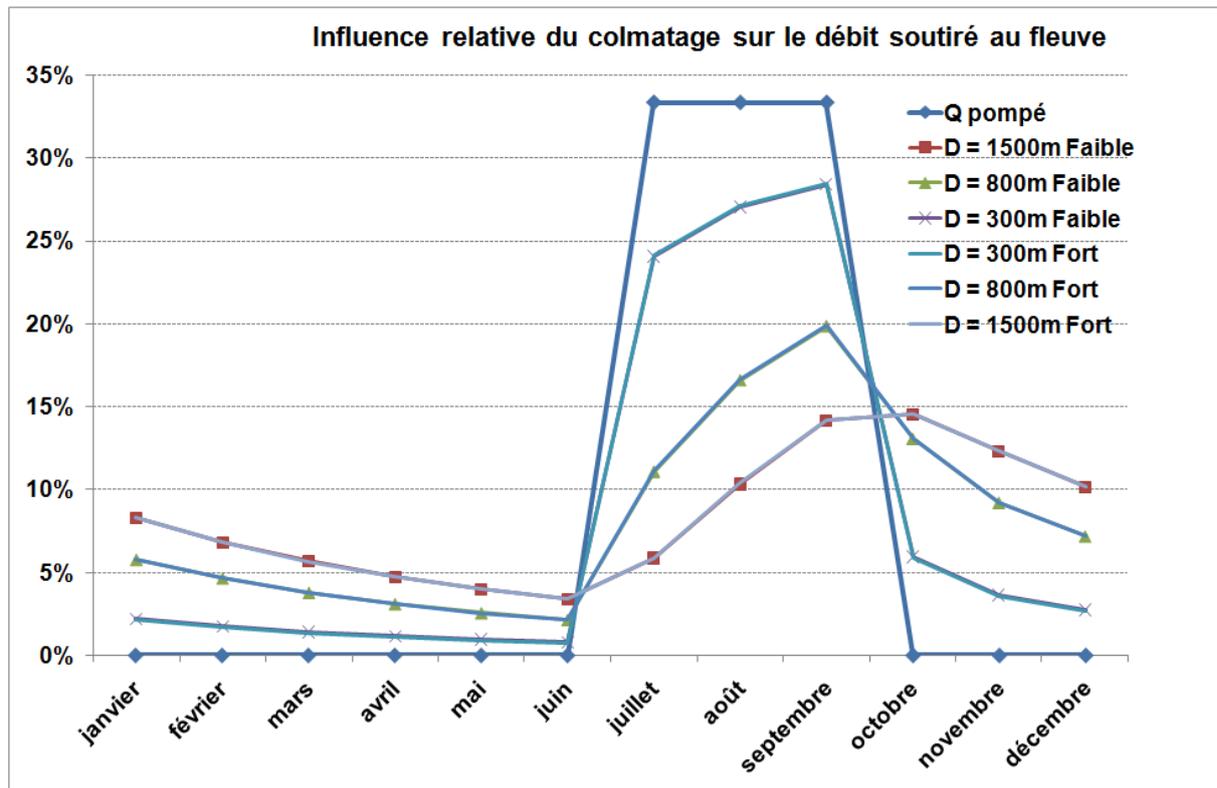
Il nous a semblé intéressant de tester l'hypothèse d'une sectorisation amont aval de Lyon avec une variation d'un facteur 2 sur la conductance associée au colmatage de fond.

Nous avons donc réalisé une série de simulation avec un pompage éloigné d'une distance D (à un cours d'eau dans une nappe alluviale de perméabilité moyenne de 10^{-3} m/s pour une conductance donnée ($C=320\ 000$ m²/j)). Puis, nous avons rejoué ces simulations en augmentant dans le modèle la conductance d'un facteur 2 ($C=640\ 000$ m²/j).

Chaque simulation a été analysée de façon à définir le pourcentage du débit prélevé par forage soustrait au fleuve, mois par mois. La figure ci-dessous permet de constater que, toutes choses étant égales par ailleurs, cet ordre de grandeur de variation est sans effet significatif sur l'impact du prélèvement sur le cours d'eau.

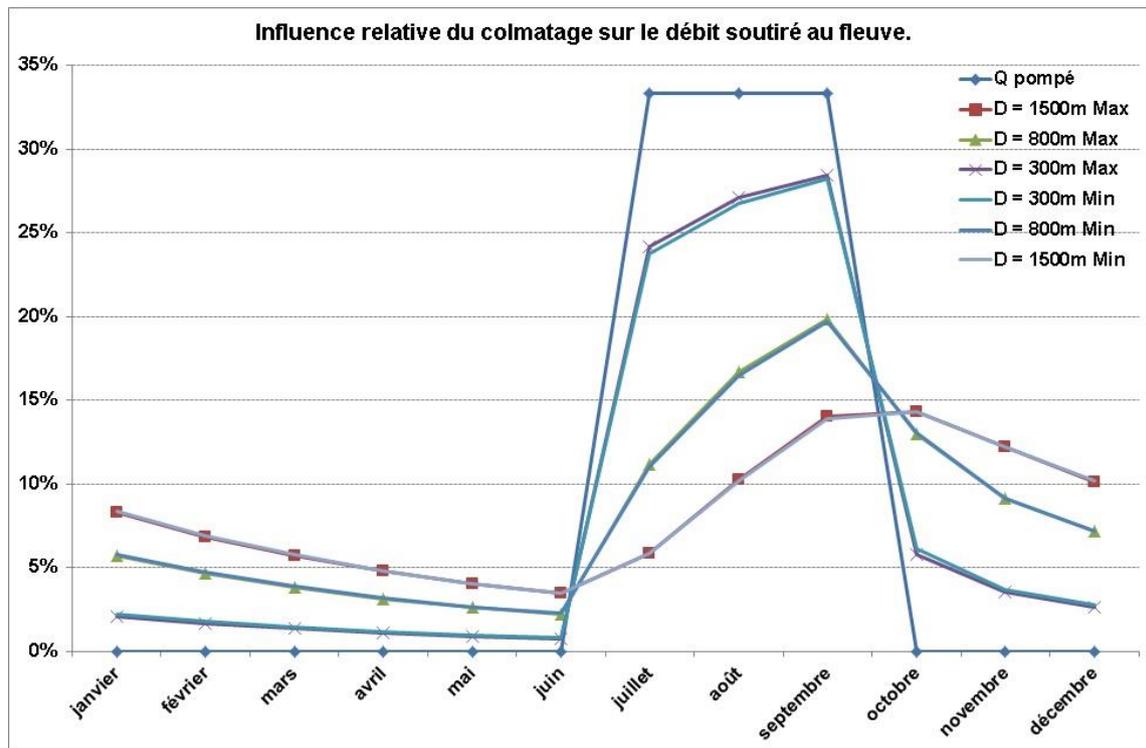
Une analyse rétroactive détaillée de ces simulations montre que l'augmentation du colmatage se traduit principalement par une augmentation du gradient d'échanges entre le cours d'eau et sa nappe d'accompagnement ; l'impact sur les flux d'échange est négligeable.

Figure 56 : Influence relative du colmatage sur le débit soutiré au cours d'eau (variabilité d'un facteur 2).



Suite à ces résultats qui montrent bien la similarité des courbes pour un colmatage fort et un colmatage faible, nous avons mené une nouvelle série de modélisations pour montrer véritablement l'effet mineur du colmatage. Pour cela, nous avons utilisé le même modèle que précédemment mais en utilisant soit une conductance minimale de 126 900 m²/jour pour le Rhône, soit une conductance maximale de 1 269 000 m²/jour. Nous obtenons ainsi les courbes suivantes qui s'assimilent relativement bien à celles obtenues précédemment. Cela confirme bien l'effet mineur du colmatage sur le débit soutiré au Rhône.

Figure 57 : Influence relative du colmatage sur le débit soutiré au cours d'eau (variabilité d'un facteur 10).



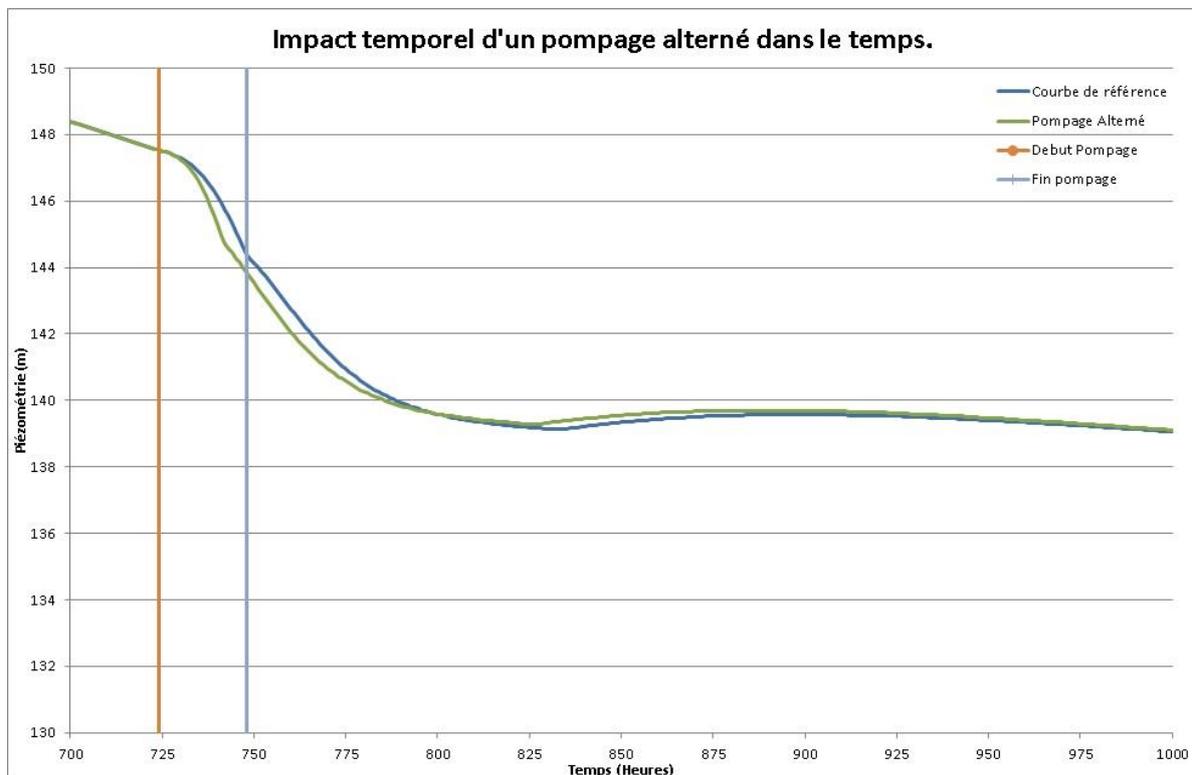
De nouveau, la superposition des courbes obtenues montre que l'augmentation du colmatage se traduit principalement par une augmentation du gradient d'échanges entre le cours d'eau et sa nappe d'accompagnement ; l'impact sur les flux d'échange est négligeable.

3.2.3.3 Influence de la temporalité des prélèvements

Les modalités de pompage des puits de production agricole peuvent être très variables. Les durées de pompage quotidiennes peuvent varier ; or, il est d'usage, pour des raisons de simplification numérique, de représenter les pompages agricoles dans les démarches de modélisation comme des prélèvements continus à l'échelle de la journée, voire de la période de pompage.

Afin d'étudier une potentielle influence de la temporalité des prélèvements sur les relations quantitatives avec un cours d'eau voisin, c'est-à-dire montrer l'importance ou non d'un pompage continu ou alterné, nous avons réalisé une série de simulations exploratoires. Elle est basée sur la même configuration hydrogéologique : perméabilité des alluvions du Rhône égale à 10^{-3} m/s, formation annexe de type mollassique.

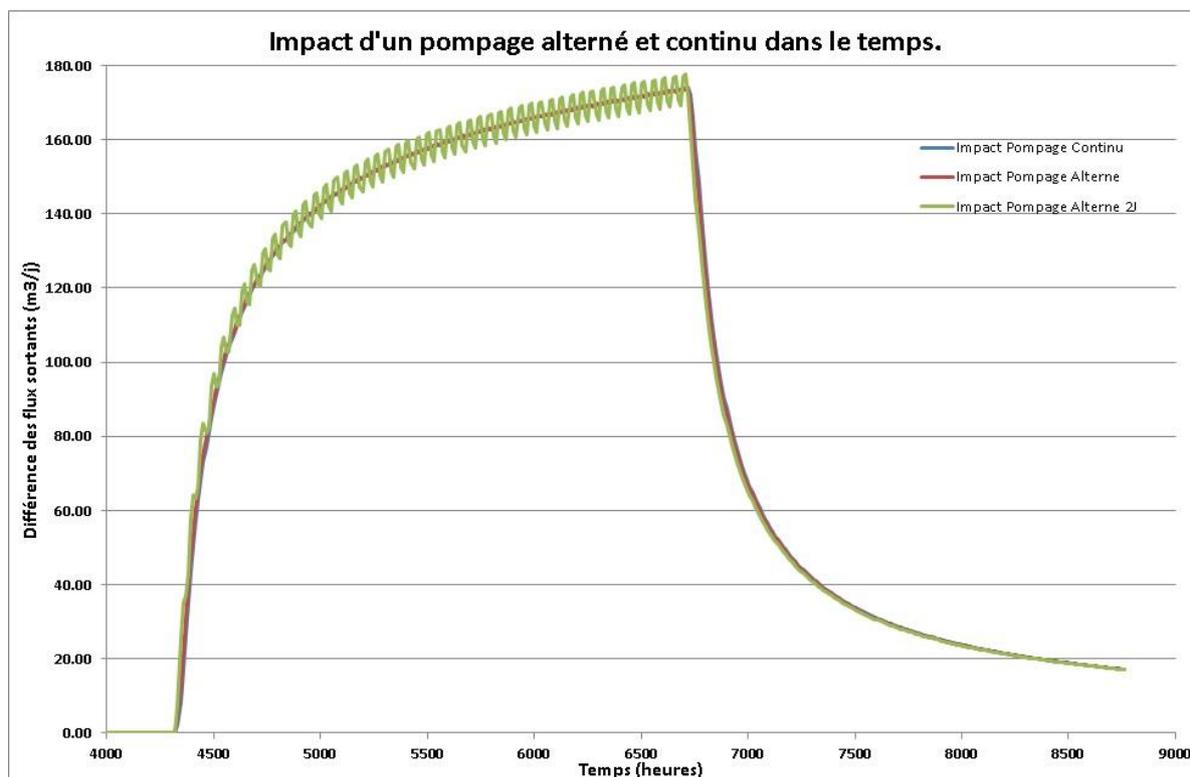
Figure 58 : Impact sur la piézométrie d'un pompage continu (Q continu sur 24 h) et alterné dans le temps (2Q sur 12 heures).



La courbe ci-dessus montre l'impact temporel d'un pompage alterné dans le temps sur la piézométrie. En effet, nous pouvons observer que même après l'arrêt du pompage la piézométrie continue de diminuer pour remonter par la suite après plus d'une centaine d'heures avant de revenir à son état initial. Il y a donc un effet rebond du pompage alterné sur la piézométrie. Les effets du pompage ont donc un effet plusieurs jours après le pompage.

Suite à cette modélisation, nous avons donc décidé de continuer en effectuant cette fois ci un pompage continu sur une période de temps donnée, un pompage alterné toutes les 12 heures et un pompage alterné tous les 2 jours.

Figure 59 : Impact sur les échanges nappe-rivière d'un pompage continu et alterné dans le temps.

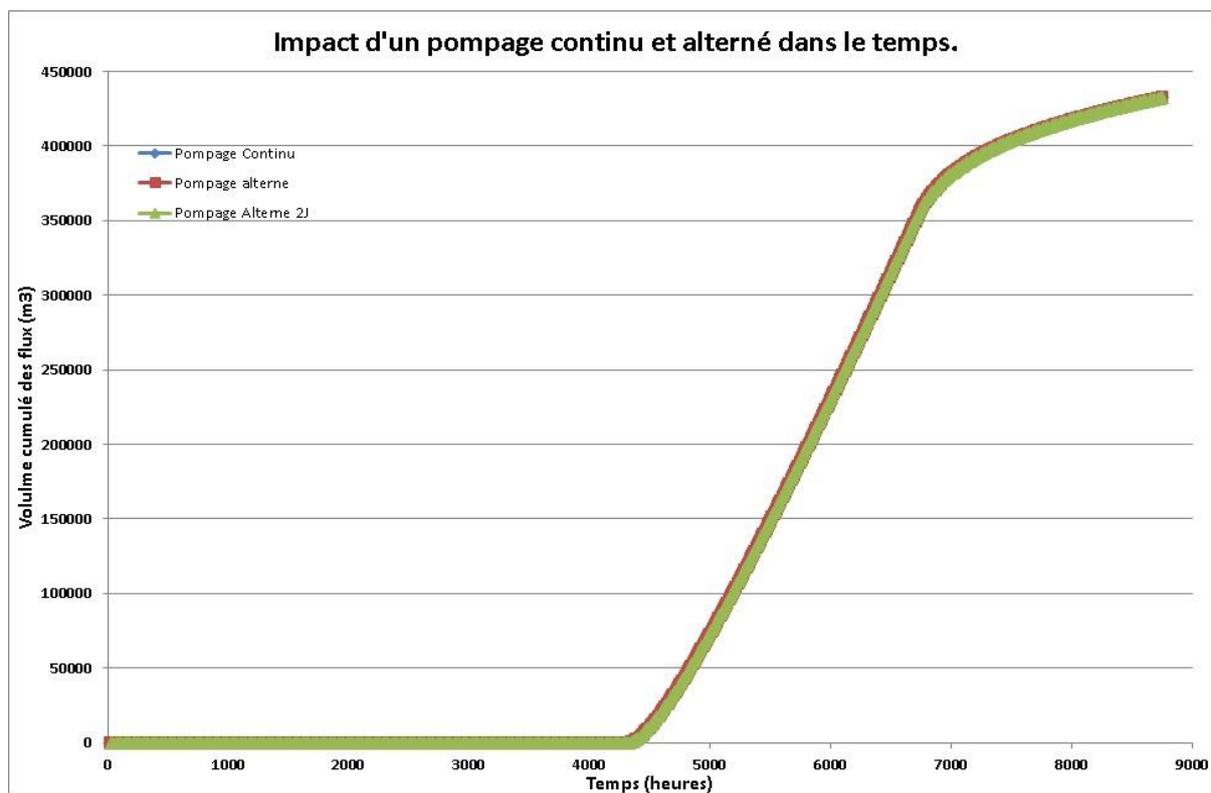


Les résultats montrent les courbes ci-dessus. Nous pouvons remarquer la même allure pour les 3 cas de pompages. À partir du moment du pompage, on observe une forte augmentation des trois courbes en ce qui concerne la différence des flux sortants. Ces dernières diminuent radicalement lors l'arrêt du pompage.

Nous avons également construit le graphique des volumes cumulés des flux et on remarque également la même tendance pour les 3 cas. Il y a une augmentation bien marquée au début du pompage et constante jusqu'à la fin du pompage puis qui s'adoucit par la suite.

Nous pouvons donc conclure sur le fait que le rythme de pompage, c'est-à-dire qu'il soit alterné ou continu n'influe en rien sur le comportement des flux sortant du fleuve vers la nappe. Il y a un effet bien marqué pour les deux cas. Nous pouvons donc utiliser un pompage continu par la suite pour entreprendre nos modélisations.

Figure 60 : Impact cumulé sur les échanges nappe-rivière d'un pompage continu et alterné dans le temps.



3.2.4 Configuration du Rhône libre

3.2.4.1 Plan de simulation

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des 24 simulations réalisées.

Figure 61 : Liste des simulations réalisées pour le modèle Rhône libre.

K alluvions	Encaissant	Distance	N° Sim
$k=10^{-3}$ m/s	Imperméable	250	1
		750	2
		1250	3
		1750	4
	Peu perméable	250	5
		750	6
		1250	7
		1750	8
	Perméable	250	9
		750	10
		1250	11
		1750	12
$k=10^{-2}$ m/s	Imperméable	250	13
		750	14
		1250	15
		1750	16
	Peu perméable	250	17
		750	18
		1250	19
		1750	20
	Perméable	250	21
		750	22
		1250	23
		1750	24

3.2.4.2 Résultats

L'analyse des simulations réalisées pour une même perméabilité de 10^{-3} m/s permet les observations suivantes :

- Le premier facteur explicatif de l'impact sur le débit du fleuve est la distance au cours d'eau. Plus on s'éloigne de ce cours d'eau, plus l'impact est dilué et décalé dans le temps.
- L'influence de la nature de l'encaissant géologique est mineure et dépend de la distance du point de pompage au fleuve. Pour les pompages proches du fleuve, on n'observe peu d'influence de cet encaissant. Mais pour les pompages proches de cet encaissant, les différences deviennent significatives : déphasage de quelques semaines pour quelques pourcents mais surtout on peut avoir jusqu'à 15% du débit prélevé qui proviendra de l'encaissant (cas des formations très perméables) et non du Rhône.

Figure 62 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant fluvioglacière et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.

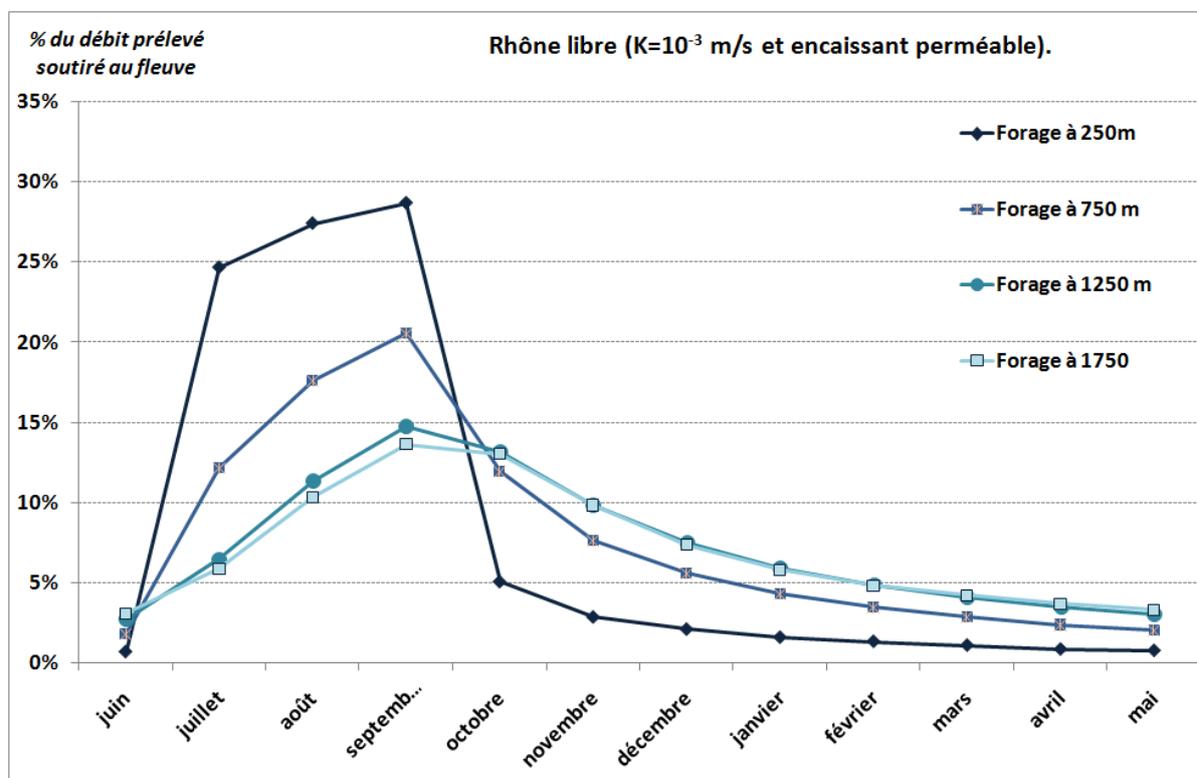


Figure 63 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.

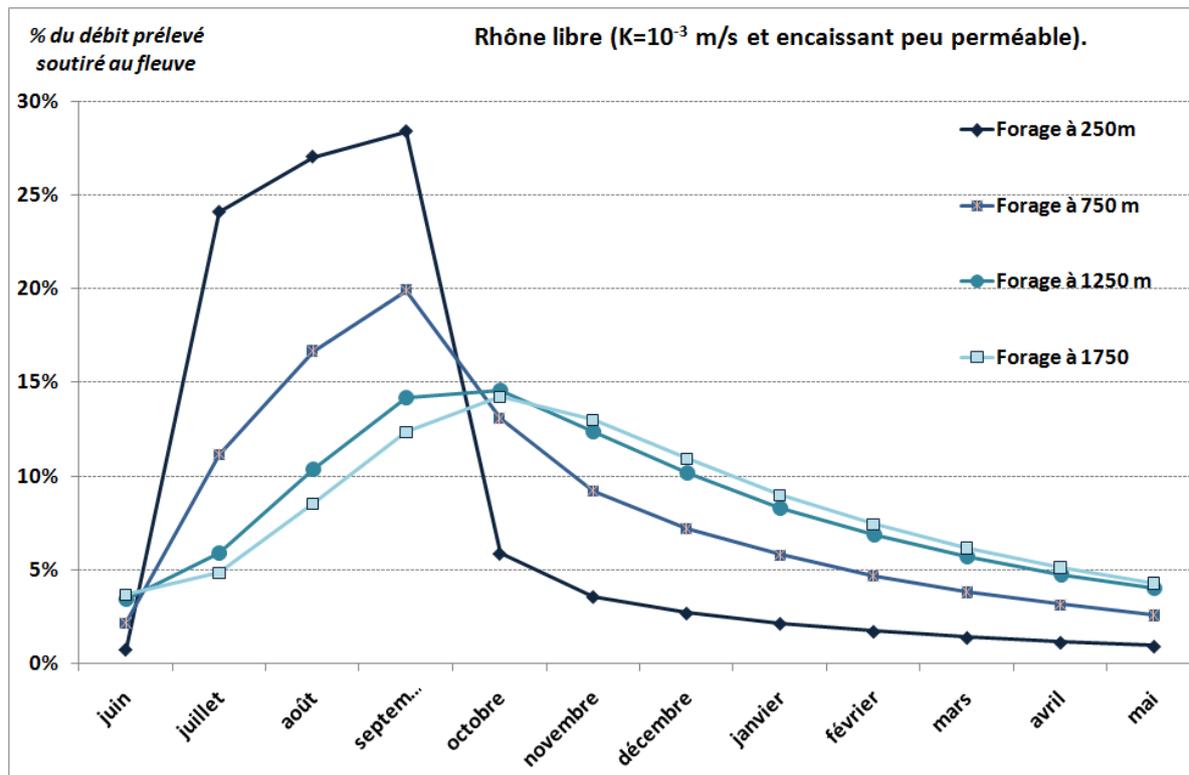
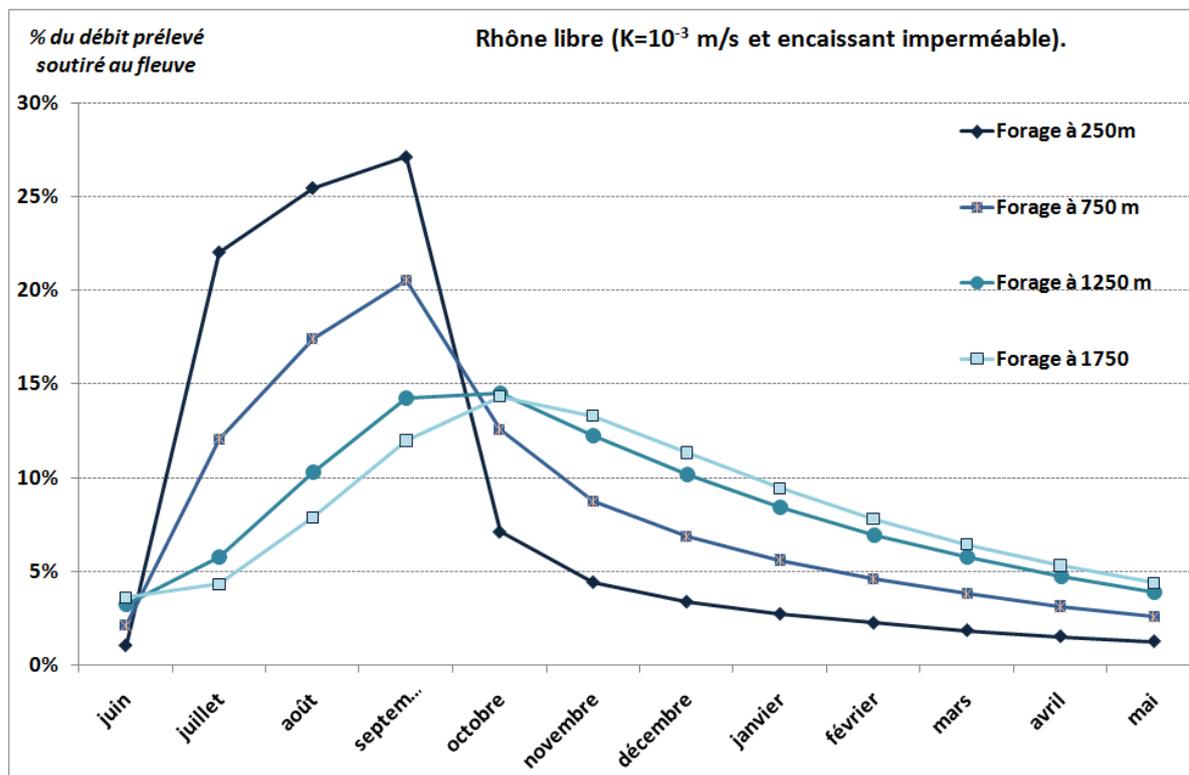


Figure 64 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre sans encaissant et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.



Pour la même configuration, mais cette fois ci avec une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s, nous obtenons des courbes plus similaires les unes par rapport aux autres contrairement aux courbes précédentes.

L'influence évidente observée de la distance au cours d'eau et celle plus subtile de la nature de l'encaissant géologique devient négligeable pour de telles perméabilités.

Effectivement, l'augmentation de la perméabilité des alluvions provoque une plus forte venue de l'eau provenant du fleuve et donc efface les effets contributifs des limites.

Nous obtenons donc des pourcentages compris entre 25% et 30% en période estivale et un déphasage maximal de 3 mois.

Figure 65 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant fluvioglaciaire et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.

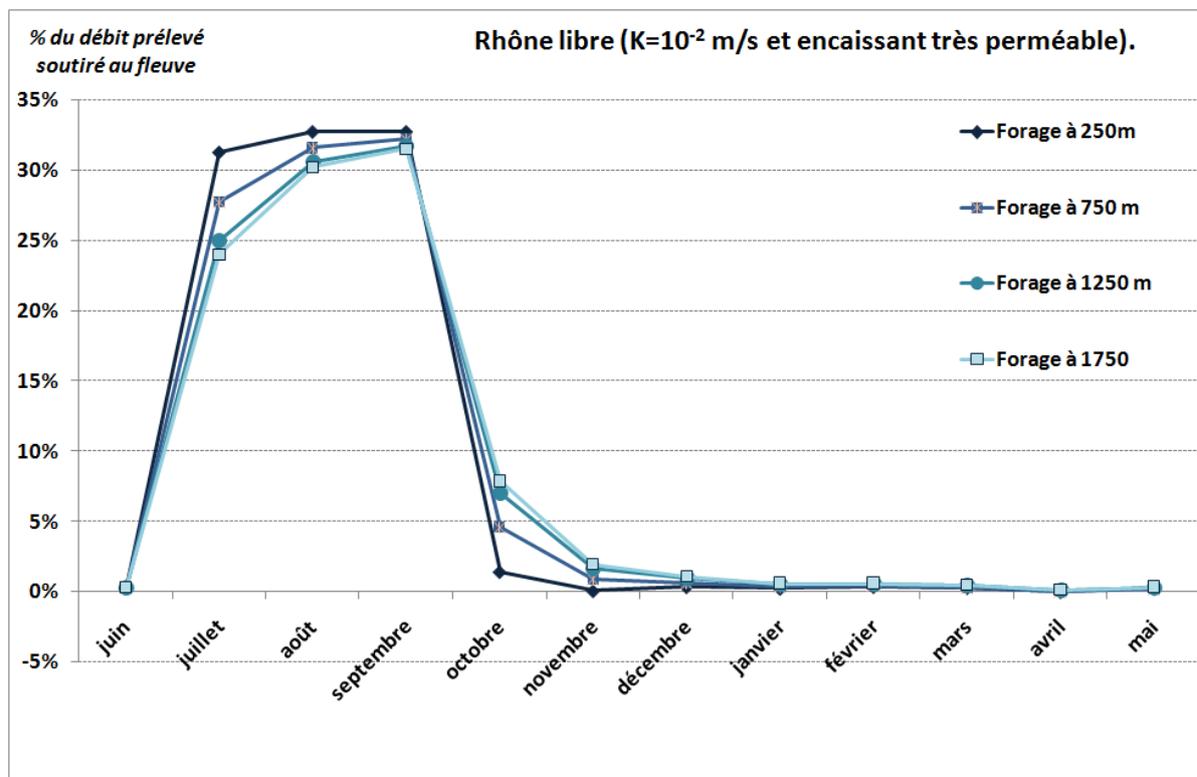


Figure 66 : Influence Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.

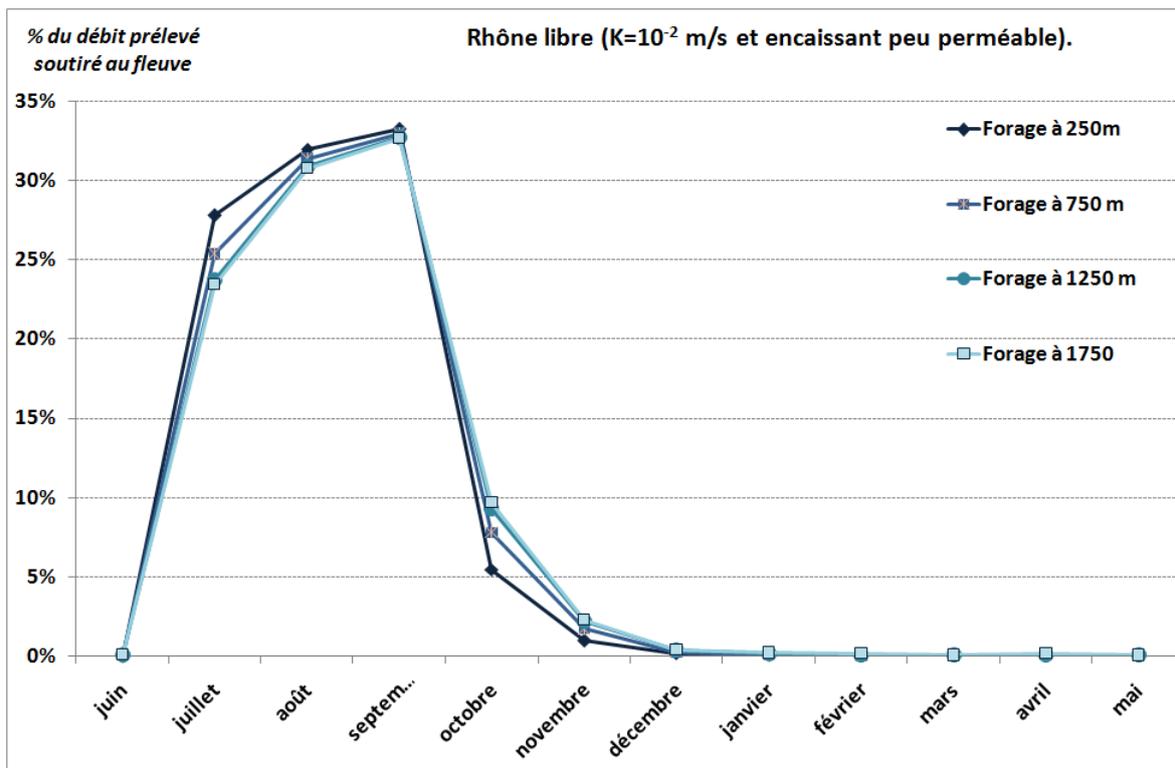
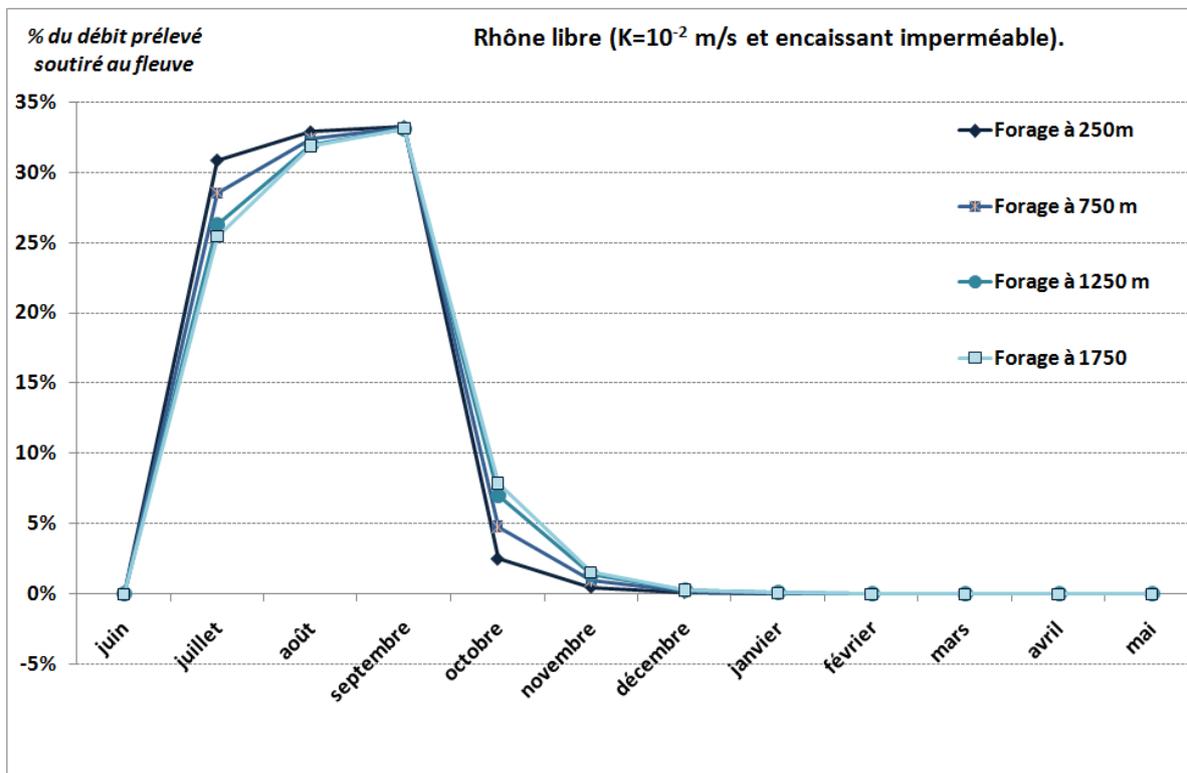


Figure 67 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve libre sans encaissant et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.



3.2.5 Configuration d'un cours d'eau endigué

3.2.5.1 Plan de simulation

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des simulations réalisées.

Figure 68 : Liste des simulations réalisées pour le modèle Rhône endigué.

K alluvions	Encaissant	Distance	N° Sim
$k=10^{-3}$ m/s	Imperméable	250	1
		750	2
		1250	3
		1750	4
	Peu perméable	250	5
		750	6
		1250	7
		1750	8
	Perméable	250	9
		750	10
		1250	11
		1750	12
$k=10^{-2}$ m/s	Imperméable	250	13
		750	14
		1250	15
		1750	16
	Peu perméable	250	17
		750	18
		1250	19
		1750	20
	Perméable	250	21
		750	22
		1250	23
		1750	24

Il s'agit du même plan d'expérience pour le modèle du Rhône libre (24 simulations).

3.2.5.2 Résultats

Rappelons que le cours d'eau est ici représenté par une charge hydraulique supérieure à celle de la nappe, avec un très fort colmatage de fond (pénétration des fines dans le lit et digues latérales) ; il est encadré par deux contre-canaux qui sont représentés comme des drains.

Pour cette configuration, c'est-à-dire le cas d'un cours d'eau avec la présence d'un drain de part et d'autre du fleuve et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s, nous obtenons les courbes suivantes en fonction des différents types d'encaissants et sans.

Figure 69 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant fluvioglacière et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.

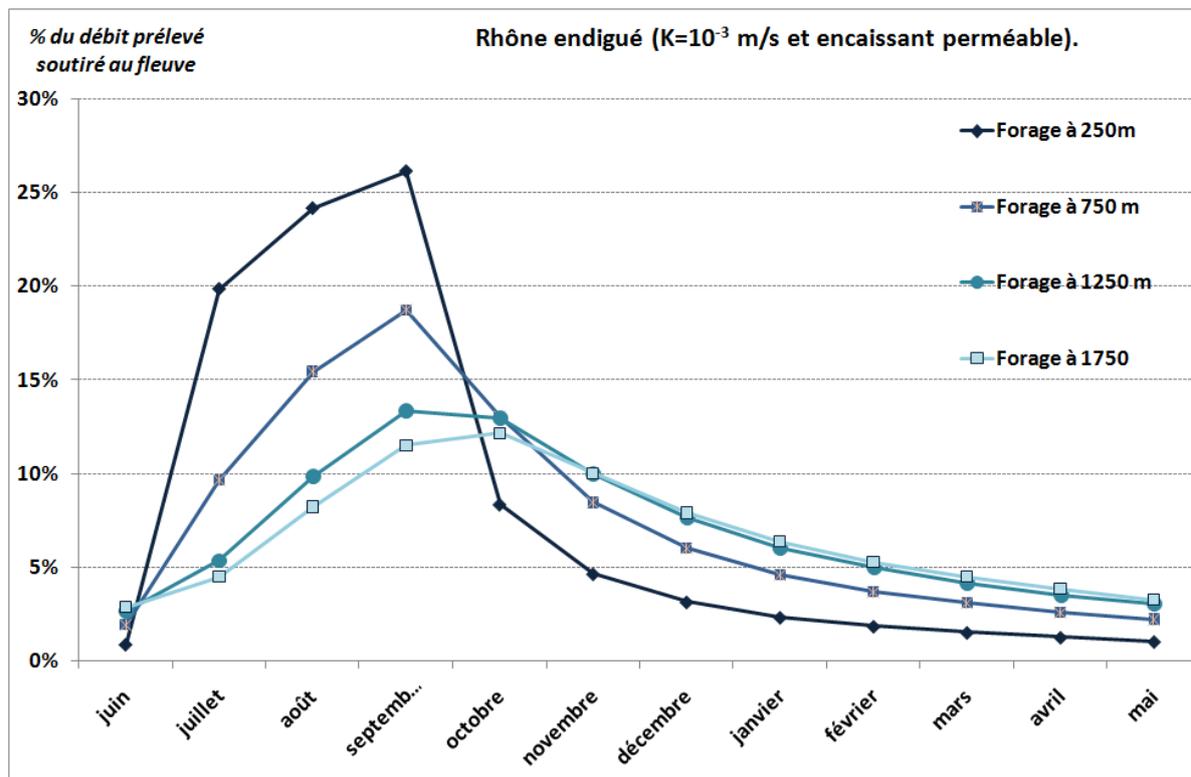


Figure 70 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.

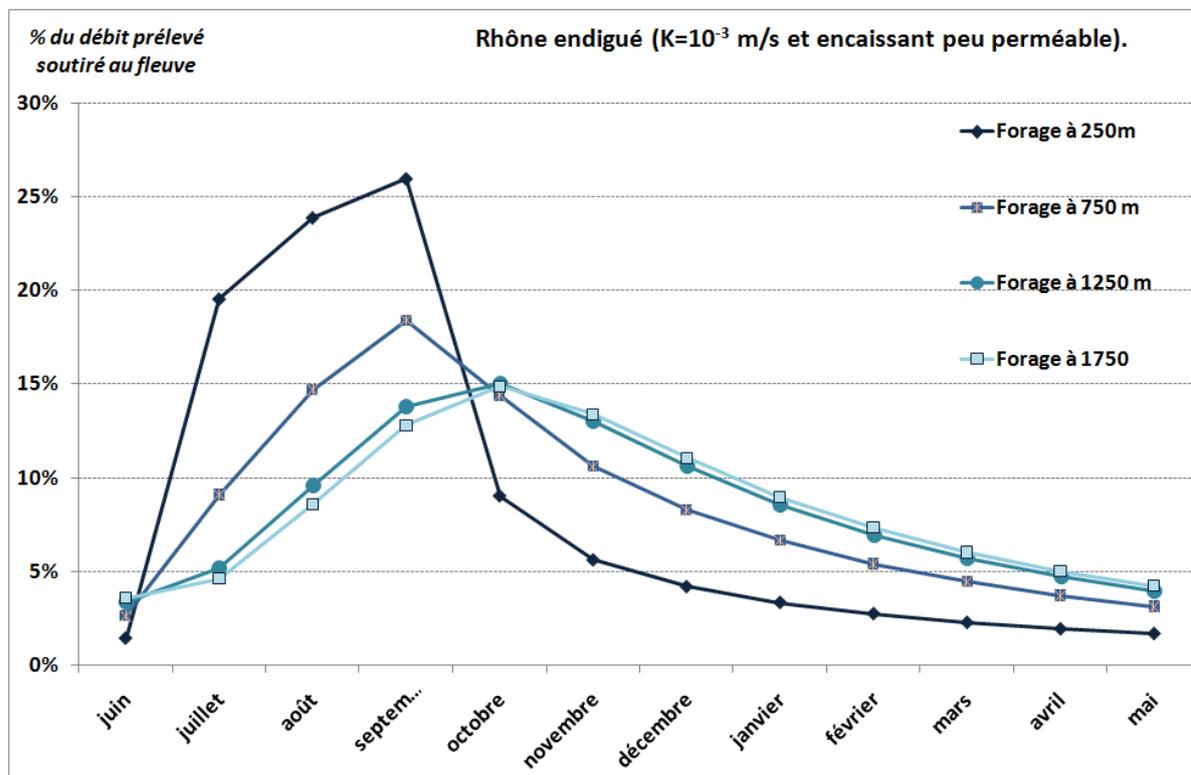
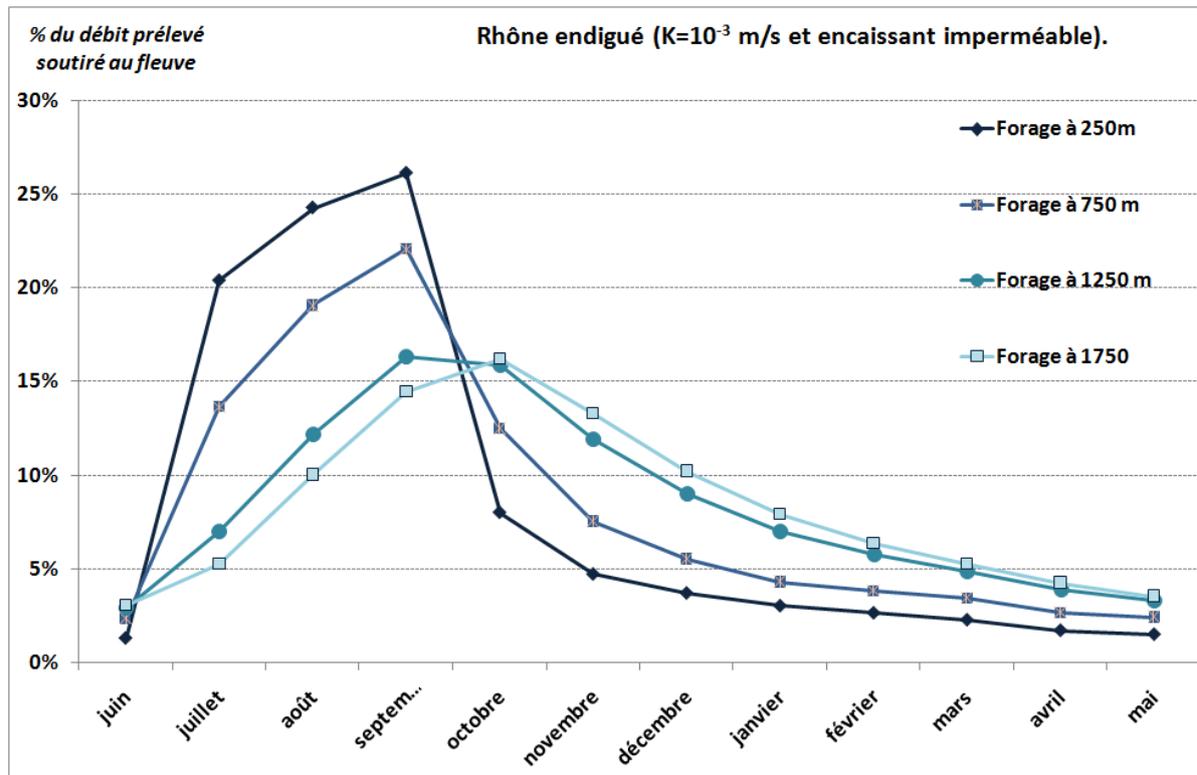


Figure 71 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué sans encaissant et une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s.



Nous remarquons ici encore l'importance de la distance du pompage par rapport au cours d'eau. Effectivement, plus nous nous éloignons du cours d'eau et moins nous soutirons d'eau au fleuve pour aller en chercher aux limites de l'encaissant. Nous observons donc des pourcentages de 20% à 25% pour un pompage à 250m à des pourcentages de 5% à 10% pour un pompage à 1750m.

De la même manière, l'influence de l'encaissant dépend de la distance du point de pompage à cet encaissant. Comme pour le Rhône libre, on observe dans le cas d'un encaissant à forte perméabilité que jusqu'à 20% du volume prélevé peut provenir de cette formation aquifère et ne sera pas ainsi retiré au débit du fleuve.

Pour la même configuration, mais cette fois ci avec une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s, nous obtenons des courbes plus similaires les unes par rapport aux autres contrairement aux courbes précédentes. Effectivement, l'augmentation de la perméabilité des alluvions provoque une plus forte venue de l'eau provenant du fleuve et donc moins des limites.

Nous obtenons donc des pourcentages compris entre 20% et 30% en période estivale et un déphasage de 3 mois seulement.

Figure 72 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant fluvioglacière et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.

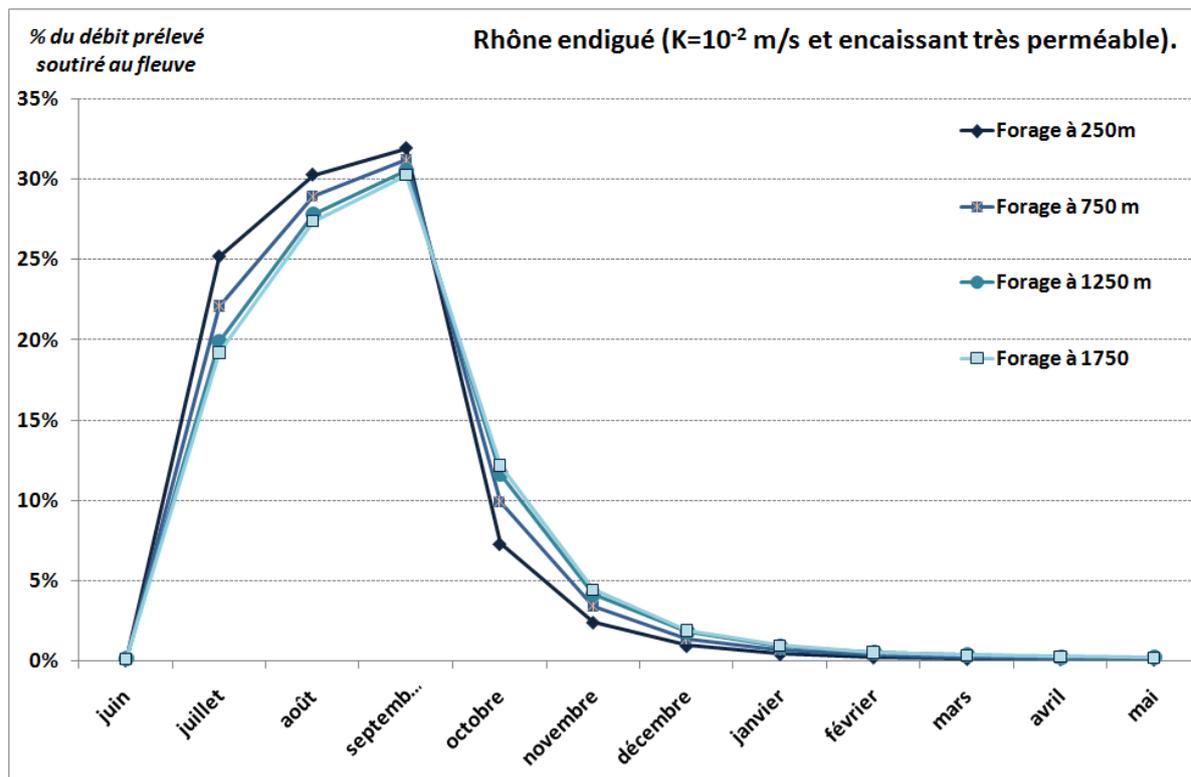


Figure 73 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.

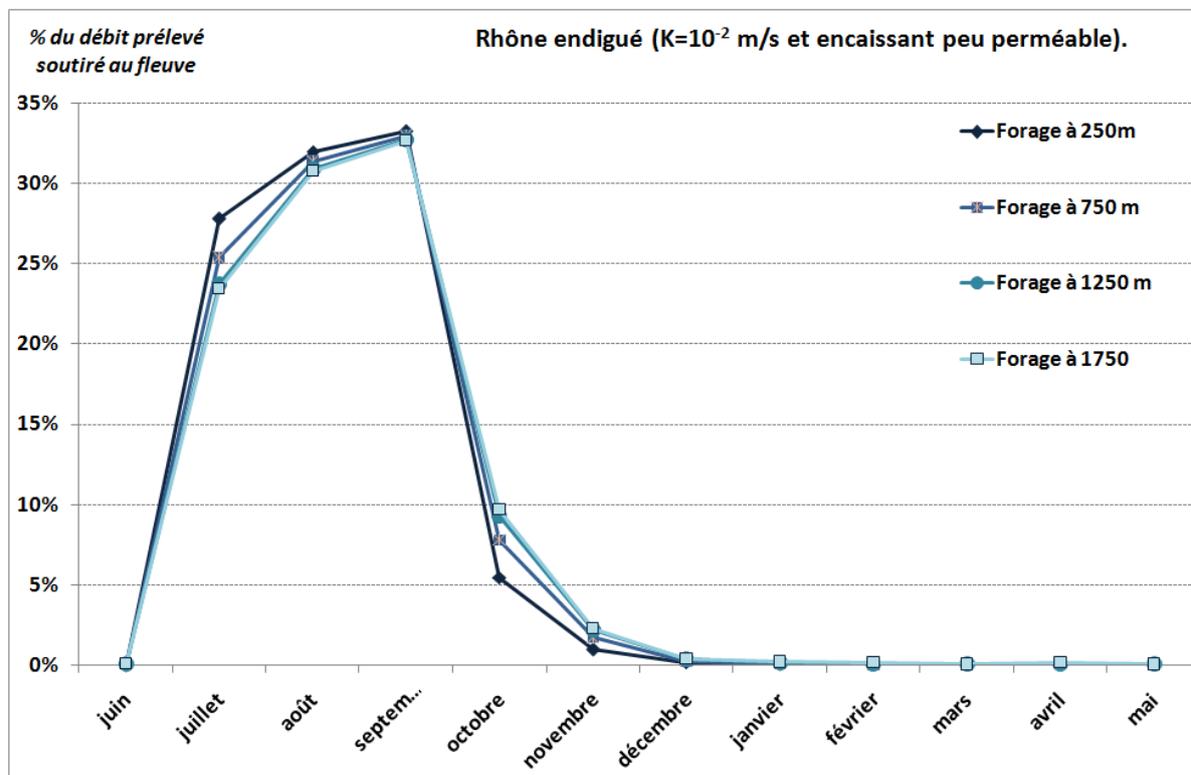
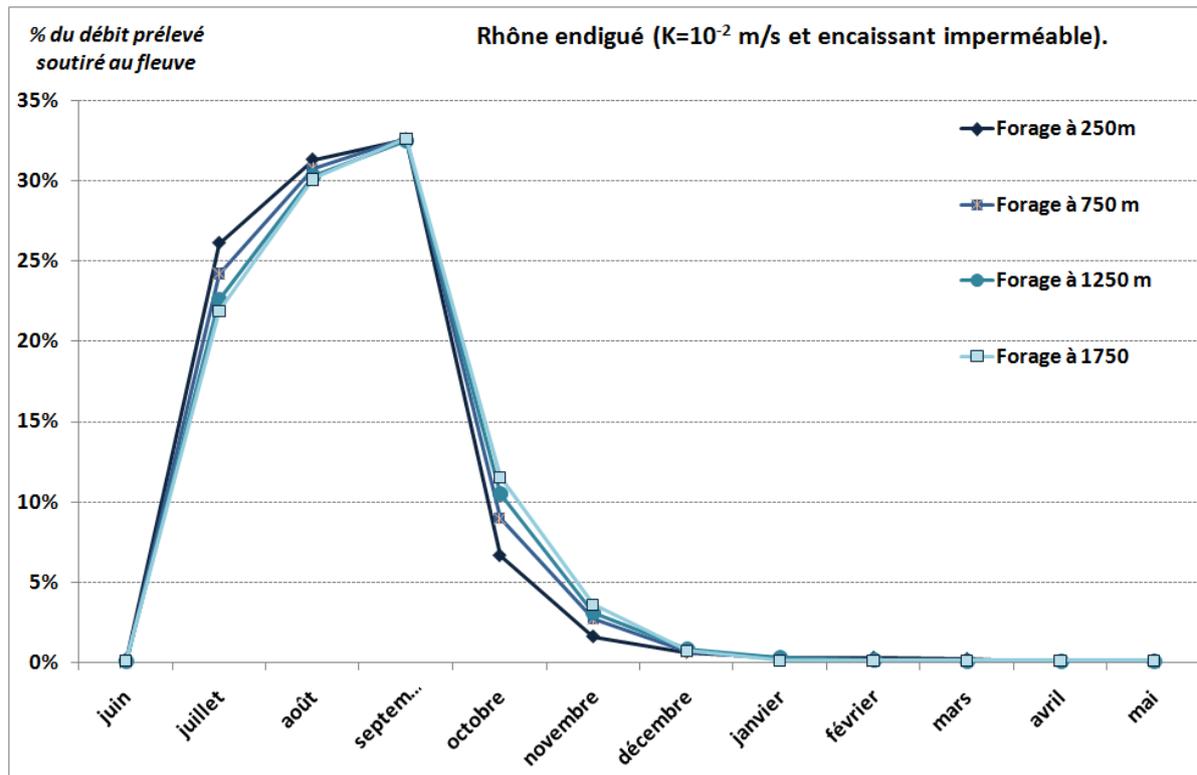


Figure 74 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un fleuve endigué avec un encaissant molassique et une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s.



On retiendra donc que globalement, l'impact quantitatif d'un prélèvement temporaire sur la nappe alluviale est quasi similaire, que le fleuve soit libre ou endigué.

Notons que les dynamiques d'impact sont sensiblement différentes :

- Dans le cas d'un Rhône libre, l'impact résulte d'une modification du gradient hydraulique : le pompage induit une baisse localisée de la piézométrie autour de l'ouvrage de prélèvement, ce qui aura pour conséquence de diminuer le gradient hydraulique entre le fleuve et sa nappe.
- Dans le cas d'un Rhône endigué, ce n'est pas le fleuve qui perd en débit : de par sa position haute, il est systématiquement en situation d'alimenter la nappe ; mais c'est le débit des contre-canaux, dont le rejet se fait systématiquement dans le fleuve plus à l'aval, qui va diminuer suite aux prélèvements.

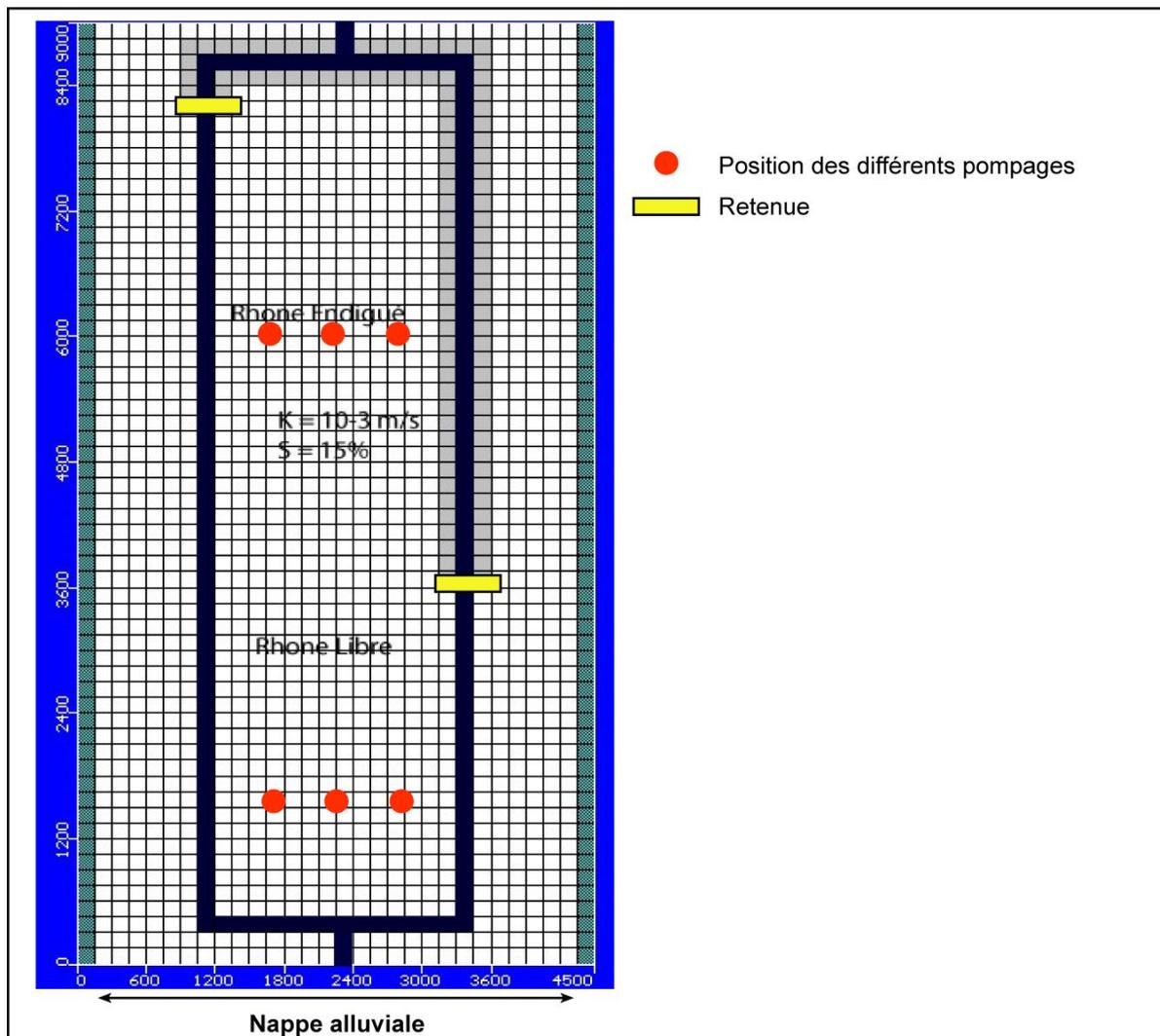
3.2.6 Configuration "îlot"

3.2.6.1 Plan de simulations

Pour le modèle de type îlot, nous avons réalisé des simulations en « déplaçant » le point de prélèvement en différents points de la plaine alluviale. L'idée directrice était de tester les influences relatives du Rhône endigué et du Rhône libre.

La figure ci-dessous montre les situations de pompage simulées.

Figure 75 : Simulations et positions du point de prélèvement dans le modèle Îlot.



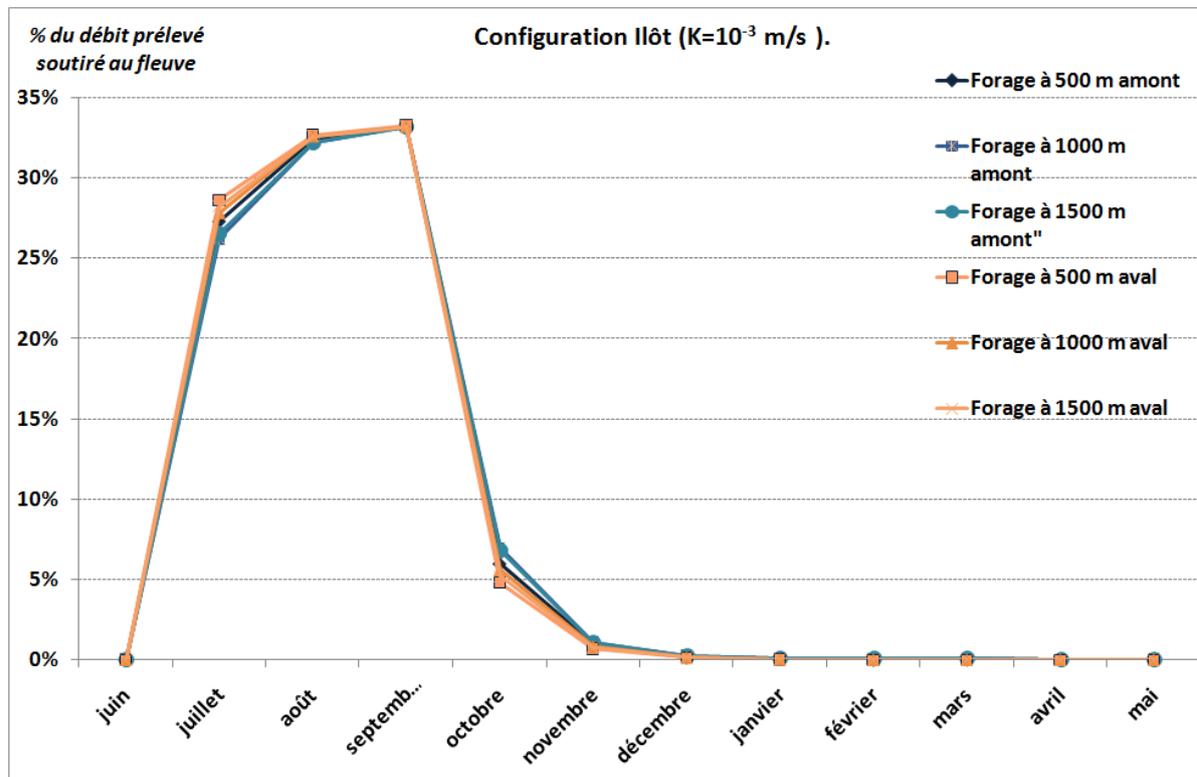
Ces simulations ont été réalisées pour deux perméabilités des alluvions modernes du fleuve : 10^{-2} et 10^{-3} m/s.

On notera que nous n'avons pas fait varier le type de formations encaissantes aux limites du modèle. Il est évident que ce paramètre n'a aucun impact sur le comportement hydrogéologique de la portion de nappe comprise entre un Rhône libre et un Rhône endigué.

3.2.6.2 Résultats

Pour la première configuration avec une perméabilité d'alluvions de 10^{-3} m/s, nous obtenons les graphes suivants.

Figure 76 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un îlot (10^{-3} m/s).

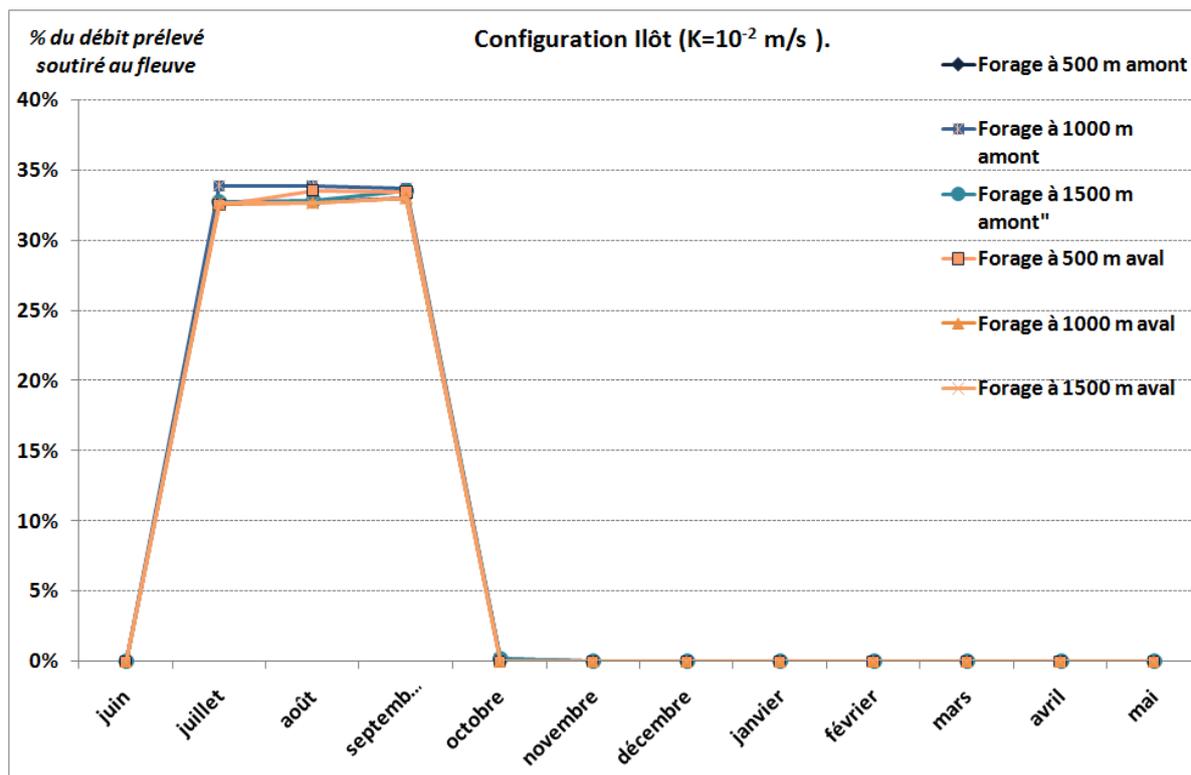


Nous pouvons remarquer la similarité de l'allure des six courbes. Cela signifie que la distance aux cours d'eau n'est pas significative et donc que peu importe l'endroit du pompage au sein de la plaine alluviale, cela soutirera le même pourcentage au cours d'eau pendant la période estivale, c'est-à-dire entre 28% et 35%.

On remarque également une inertie dans le temps de deux mois, avec un faible impact (<5%) observé deux mois après l'arrêt du pompage.

Pour la même configuration, mais cette fois ci avec une perméabilité d'alluvions de 10^{-2} m/s, nous retrouvons une quasi similarité des courbes qui montrent l'absence d'impact quantitatif sur le cours d'eau vis-à-vis de la position de prélèvement.

De plus, nous obtenons un pourcentage constant sur la période estivale, de 33,3% d'eau soutirée au cours d'eau. Ce qui implique que toute l'eau pompée est soutirée au fleuve durant la période de pompage (système très réactif).

Figure 77 : Impact d'un pompage estival sur le débit soutiré au cours d'eau dans le cas d'un îlot (10^{-2} m/s).

Ces simulations montrent que, toutes choses étant égales par ailleurs, tout prélèvement en nappe alluviale dans des bras de nappe délimités selon la géométrie de type îlot, se traduit par une perte quasi-simultanée à l'échelle mensuelle pour le débit du fleuve. Rappelons que la largeur de la plaine alluviale modélisée est de 2 500 m.

3.2.7 Matrices

Grâce à toutes les simulations réalisées, nous avons réalisé une matrice regroupant toutes les moyennes d'eau soutirée au fleuve classées par distance et simulation. Ces simulations ont également permis de mettre en avant les paramètres de premier et second ordre que sont la distance et la perméabilité pour les paramètres importants et l'encaissant en second lieu. Enfin, nous avons pu en déduire les paramètres négligeables que sont la pluie efficace, le colmatage, le pompage continu ou alterné, et enfin le fait que le fleuve soit influence ou non. Il est également important de préciser que nous nous intéressé principalement aux volumes échangés entre la nappe et le fleuve. Nous avons regardé les données de débits et n'avons pas traités de la piézométrie ou autres caractéristiques.

Le tableau ci-dessous regroupe toutes les simulations réalisées, notamment la perméabilité utilisée, l'encaissant, l'influence ou non, et les distances au cours d'eau.

Figure 78 : Synthèse des matrices de simulation avec les pourcentages cumulés soutirés au fleuve pendant la période pompage.

Configuration			Distance					
K	CL	Aménagement	250	750	1250	1750		
0.001	Très perméable	Rhône libre	81%	50%	33%	30%		
0.001	Peu perméable	Rhône libre	79%	48%	30%	26%		
0.001	Imperméable	Rhône libre	75%	50%	30%	24%		
0.01	Très perméable	Rhône libre	97%	91%	87%	86%		
0.01	Peu perméable	Rhône libre	97%	93%	89%	88%		
0.01	Imperméable	Rhône libre	97%	94%	91%	90%		
0.001	Très perméable	Rhône endigué	70%	44%	29%	24%		
0.001	Peu perméable	Rhône endigué	69%	42%	29%	26%		
0.001	Imperméable	Rhône endigué	71%	55%	35%	30%		
0.01	Très perméable	Rhône endigué	87%	82%	78%	77%		
0.01	Peu perméable	Rhône endigué	93%	90%	87%	87%		
0.01	Imperméable	Rhône endigué	90%	88%	85%	85%		
Configuration			Distance					
K	CL	Influence	500 Amont	1000 Amont	1500 Amont	500 Aval	1000 Aval	1500 Aval
0.001	Imperméable	Ilot	92%	91%	92%	95%	94%	94%
0.01	Imperméable	Ilot	99%	99%	99%	99%	99%	99%

Toutes choses étant égales par ailleurs, et dans les strictes limites des intervalles des paramètres testés dans notre approche, l'observation de ces résultats permet de hiérarchiser les paramètres explicatifs de l'influence d'un prélèvement temporaire sur un cours d'eau.

- Les paramètres premiers sont les suivants :
 - Transmissivité de la nappe.
 - Distance forage-cours-d'eau.
- Les paramètres secondaires sont les suivants :
 - Typologie de l'encaissant de la nappe alluviale.
 - Configuration du cours d'eau (relations "libres" ou cours d'eau endigué).
- Les paramètres négligeables sont les suivants :
 - Temporalité des prélèvements.
 - Magnitude du débit.
 - Colmatage.
 - Paramètres climatiques.

3.3 APPROCHE DE L'IMPACT QUANTITATIF DES PRÉLÈVEMENTS DANS LES FORMATIONS ANNEXES

3.3.1 Considérations théoriques

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.

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 hydro systèmes souterrains.

Il a été nécessaire de reconstituer une lame d'eau infiltrée. Nous avons appliqué la même méthode, avec les mêmes hypothèses que dans les simulations systématiques du système Rhône.

Afin d'adresser de satisfaire les objectifs de l'étude, les conditions aux limites sont 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 ont été réalisées pour essayer d'en 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 ont ensuite été discutés au regard des informations disponibles dans les études volumes prélevables, qui auront pu être réalisées sur ces formations annexes.

3.3.2 Cas des formations fluvio-glaciaires

3.3.2.1 Géométrie et hypothèses du modèle :

Le domaine modélisé est de 10x12 km, pour une épaisseur de 100 m.

La rive droite du Rhône est composée d'une bande de 20 m d'épaisseur d'alluvions sur 2 000 m de large. Ces alluvions sont en contact direct avec les sédiments fluvio-glaciaires qui sont disposés dans une cunette de 11 km de long et 6 km de large. Cette formation est délimitée par de la molasse miocène.

Les caractéristiques géométriques et hydrogéologiques des formations molassiques sont issues de travaux de recherche ou d'étude récents (Roudier P., 1987 ; Bel F., 1998 ; Lalbat F., 2006 ; Salquebre D., Valencia G., Cadilhac L., 2008 ; De La Vaissière, 2006 ; Cave, 2011). Idem pour les caractéristiques géométriques et hydrogéologiques des formations fluvio-glaciaires (Burgeap ; 2009 ; BURGEAP, 2010 ; SAFEGE, 2011 ; SOGREAH et al., 201 ; HYDROFIS, 2011a ; HYDROFIS, 2011b ; SOGEAH, 2012).

Le tableau ci-dessous présente les paramètres hydrodynamiques retenus dans les simulations :

	Kx et Ky	Kz	Ne
Alluvions fluviales modernes	10 ⁻³	10 ⁻⁴	15%
Alluvions colmatées	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	1%
Alluvions fluvio-glaciaires	5.10 ⁻³	5.10 ⁻⁴	10%
Molasses	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	12%

On notera que les alluvions fluvio-glaciaires sont supposées significativement plus perméables que les alluvions modernes.

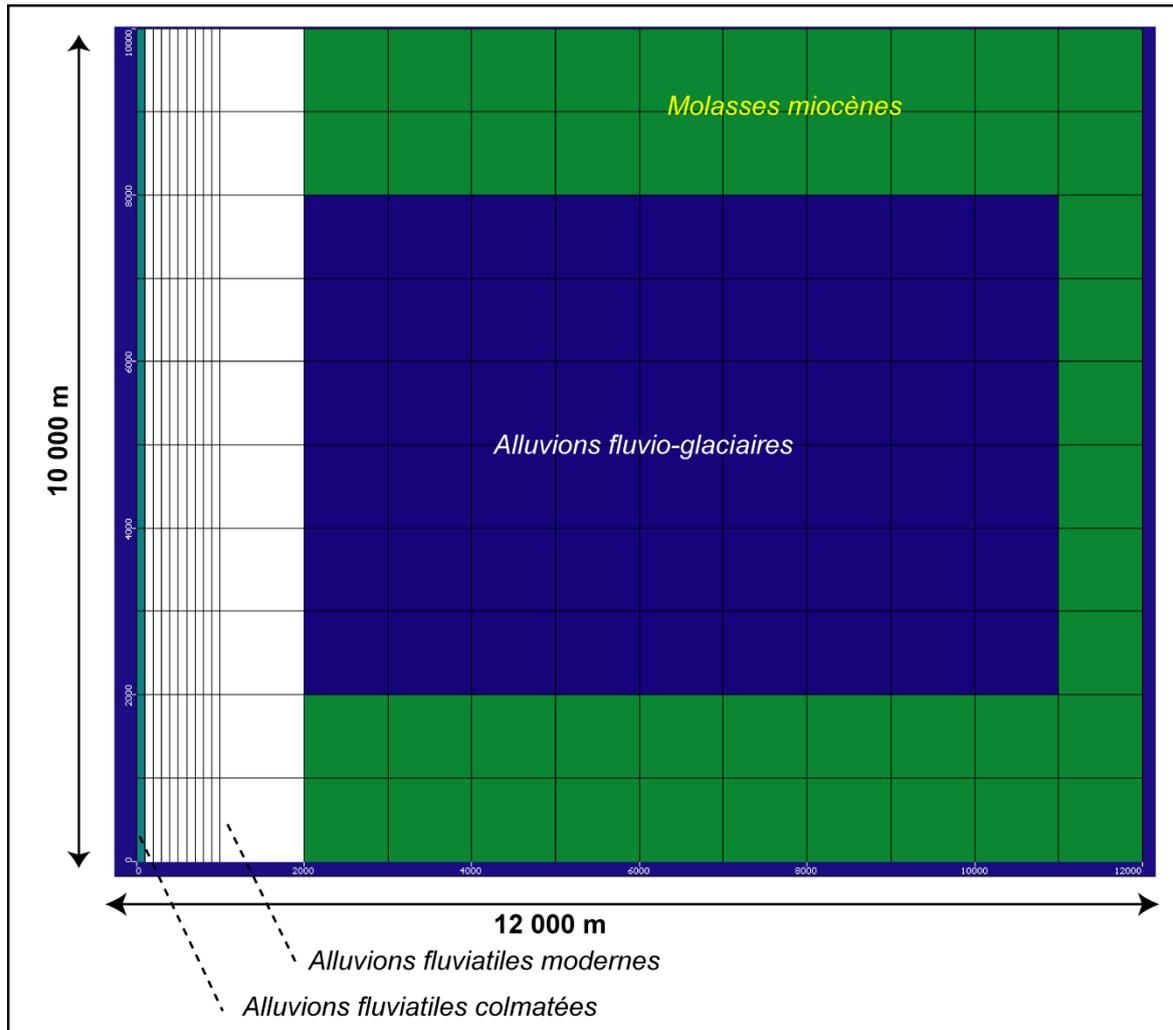
Le modèle est contraint par deux conditions aux limites à charge constante :

Charge constante sur la bordure Est pour représenter le caractère aquifère alimentant de la molasse vis à vis du couloir fluvio-glaciaire.

Charge constante sur la limite Ouest, censée représenter le caractère drainant du Rhône dans cette configuration hydrogéologique. Pour intégrer un éventuel effet du colmatage du réservoir à proximité du cours d'eau, cette CL est appliquée sur des alluvions dites colmatées.

Rappelons que les simulations sont réalisées sur une période 40 ans avec une intégration des lames d'eau efficaces enregistrées à Bron, ce qui permet d'appréhender la variabilité climatique sur les phénomènes modélisés.

Figure 79 : Structure du modèle des formations fluvio-glaciaires avec exutoire souterrain.



3.3.2.2 Simulations

Afin d'essayer de comprendre le comportement hydrodynamique de ce système, plusieurs simulations ont été réalisées :

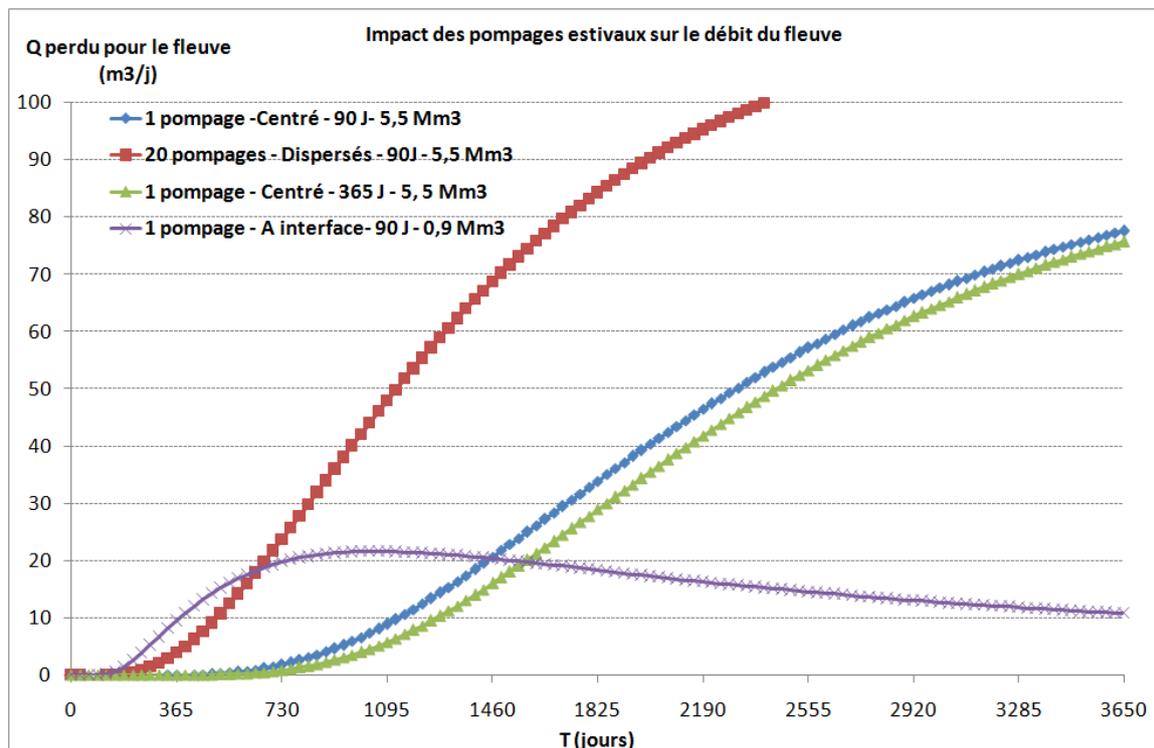
- Prélèvement sur un seul forage situé au centre du couloir fluvio-glaciaire, avec un volume prélevé cumulé de 5,5 Mm³ sur 3 mois (soit un prélèvement journalier unitaire de 61 000 m³/jour).
- Prélèvement sur 20 forages espacés régulièrement et répartis de façon homogène dans le couloir fluvio-glaciaire, avec un volume prélevé cumulé de 5,5 Mm³ sur 3 mois (soit un prélèvement journalier unitaire d'environ 3 000 m³/jour).
- Prélèvement sur un seul forage situé au centre du couloir fluvio-glaciaire, avec un volume prélevé cumulé de 5,5 Mm³ sur 12 mois (soit un prélèvement journalier unitaire d'environ 15 000 m³/jour).
- Prélèvement sur un seul forage situé à 500 m de la limite entre les alluvions fluvio-glaciaires et les alluvions modernes, avec un volume prélevé cumulé de 0,9 Mm³ sur 3 mois (soit un prélèvement journalier unitaire de 10 000 m³/jour).

Les ordres de grandeur de ces prélèvements ont été extraits de la BD agence sur les prélèvements agricoles : entre 5 à 6 Mm³/an maximum sur ce type de nappe avec des préleveurs susceptibles de produire des débits de l'ordre de 10 000 m³/j au maximum (soit environ 100 l/s en débit fictif continu).

3.3.2.3 Résultats

Les résultats montrent un impact différé et amorti dans le temps pour toutes les simulations. Il faut attendre plus de 180 jours après le début des prélèvements pour enregistrer une baisse de débit consécutive dans le Rhône ; et l'impact sera amorti sur plusieurs années après la période de prélèvement.

Figure 80 : Résultats des simulations de couloirs fluvio-glaciaires avec exutoire souterrain.



Ce résultat traduit un comportement hydrogéologique complexe. L'analyse des variations piézométriques associées aux simulations montre que durant la période pompage, dans le réservoir, le transfert de pression est quasi automatique et intéresse de grandes superficies ; c'est un effet de la très forte perméabilité des alluvions fluvio-glaciaires. Cette baisse piézométrique va être compensée via deux flux :

- Une augmentation des flux en provenance des molasses encaissantes par réajustement du gradient hydraulique.
- Une diminution des flux vers la nappe d'accompagnement du Rhône par baisse du gradient piézométrique.

Ces deux phénomènes se font sur des temps longs. Car les perméabilités des formations encaissantes, en particulier la molasse, sont bien plus faibles que celle des alluvions fluvio-glaciaires.

Toutes choses étant égales par ailleurs, il en résulte l'absence de relations directes et instantanées entre les prélèvements temporaires dans le corridor fluvio-glaciaire et le débit estival du Rhône dans cette configuration hydrogéologique.

L'effet étant étalé sur plusieurs années, si l'on fait l'hypothèse raisonnable que les prélèvements se répètent d'année en année, on peut alors proposer la matrice annuelle suivante :

Figure 81 : Matrice de détermination pour les nappes fluvio-glaciaires avec exutoire souterrain.

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
% du Vp soutiré à la nappe	33%	33%	33%									
% du Vp soutiré au fleuve	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%

3.3.3 Cas des formations molassiques

Les résultats obtenus dans les formations fluvio glaciaires montrent que les phénomènes inertiels de long terme, qui impliquent des recalages de charge entre les différentes formations aquifères, sont prépondérants sur les phénomènes instantanés. Et ce pour des formations de forte perméabilité.

Pour les mollasses, caractérisées par des perméabilités bien moindre, il est alors logique de supposer que l'on va observer le même type de comportement. Afin de valider cette hypothèse nous avons procédé à une approche par l'expression analytiques de Theis.

3.3.3.1 Approche retenue

Avec les hypothèses suivantes :

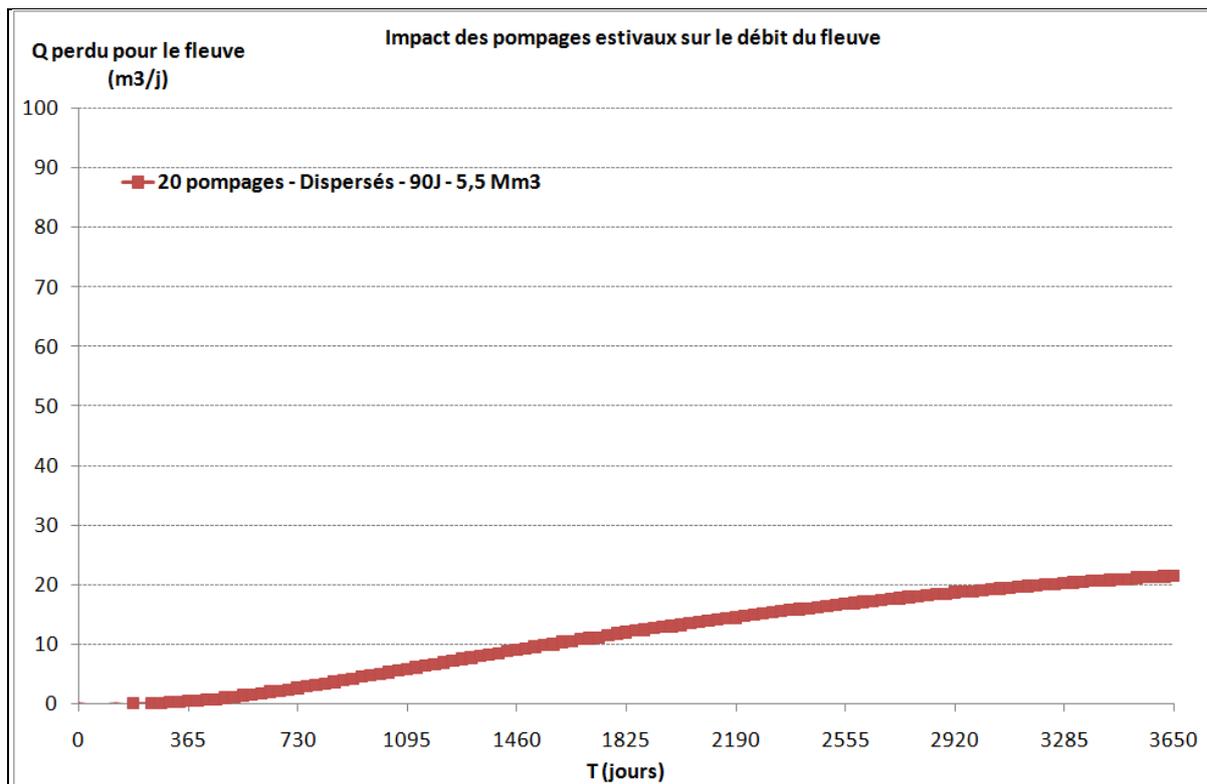
- K=10-5 m/s.
- e=12%.
- Nappes libres.
- Epaisseur moyenne (utile aux écoulements) d'un ouvrage 100 m.

On peut à l'aide de l'expression de Jacob déterminer le rayon d'influence dans le cas d'un pompage à débit constant à l'aide de la relation suivante :

$$Ri = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{T \cdot t}{S}}$$

Soit, pour une durée de 24 heures, le rayon d'influence devrait être d'environ 40 m. La baisse de piézométrie est donc très localisée. Un tel ordre de grandeur confirme a priori l'impossibilité pour des forages dans la molasse de venir perturber de façon synchrone les débits aux exutoires.

Figure 82 : Résultats de simulation pour la molasse avec exutoire souterrain.



Ceci étant, nous avons réalisé une simulation de contrôle sous MODFLOW avec un bassin mollassique de 100 km², impacté par des prélèvements estivaux cumulés sur 20 forages dispersés, de l'ordre de 5,5 Mm³.

L'impact sur le débit du fleuve est différé et étalé sur plusieurs années cf. figure ci-dessus). Ce sont bien les phénomènes de rééquilibrage de charges entre les unités aquifères qui dominent. Ce résultat est en accord avec les recherches les plus récentes réalisées sur ces aquifères (Lalbat F., 2006 ; Salquebre D., Valencia G., Cadilhac L., 2008 ; De La Vaissière, 2006 ; Cave, 2011). Citons (Salquebre et al., 2008) : "... le niveau piézométrique de la nappe miocène varie peu au cours de l'année (<5 m) et l'essentiel des variations saisonnières est liée à l'activité des pompages dans l'aquifère. Cette évolution est particulièrement marquée au centre du bassin, dans les secteurs de forte exploitation. Les niveaux en périphérie sont plus stables. Il s'ensuit que les niveaux piézométriques ne sont jamais des niveaux stabilisés : la nappe est en régime transitoire à cause des pompages."

3.3.3.2 Résultats

Toutes choses étant égales par ailleurs, il en résulte l'absence de relations directes et instantanées entre les prélèvements temporaires dans les formations molassiques et le débit estival du Rhône dans cette configuration hydrogéologique.

L'effet étant étalé sur plusieurs années, si l'on fait l'hypothèse raisonnable que les prélèvements se répètent d'année en année, on peut alors proposer la matrice annuelle suivante :

Figure 83 : Matrice de détermination pour les nappes molassiques avec exutoire souterrain.

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
% du Vp soutiré à la nappe	33%	33%	33%									
% du Vp soutiré au fleuve	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%

4. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE EXPÉDITIVE

4.1 SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS DE MÉTHODE

4.1.1 Typologie des impacts

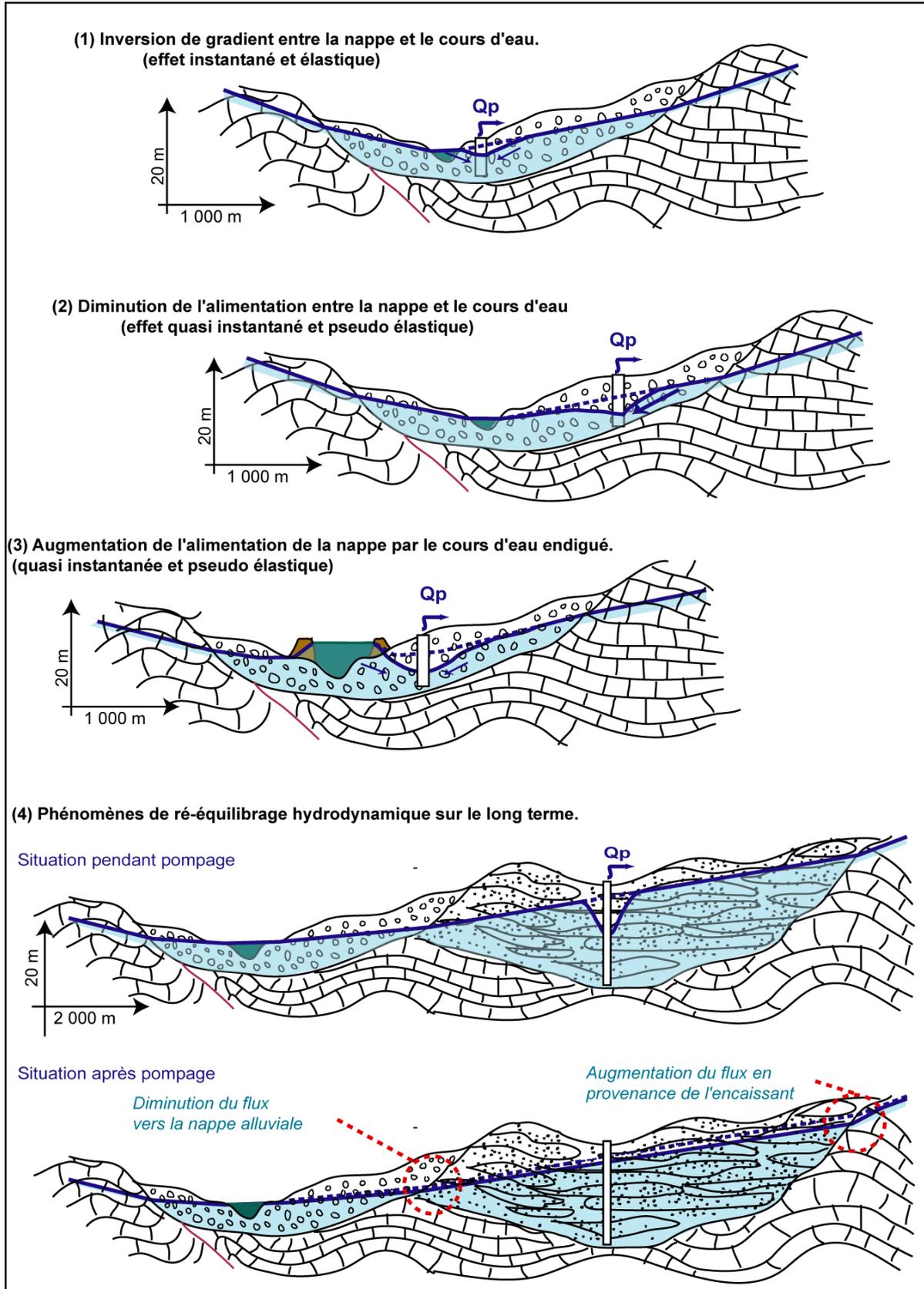
La synthèse des approches développées permet de proposer une typologie des impacts sur le débit des cours d'eau, causés par des prélèvements en nappe alluviale aménagée. Quatre types de phénomènes sont susceptibles de se produire consécutivement à un pompage des eaux souterraines :

- L'inversion de gradient entre le cours d'eau et la nappe. Il implique la proximité du point de pompage au cours d'eau et un rabattement important (paramètres hydrodynamiques défavorables).
- La diminution du gradient hydraulique entre la nappe et le cours d'eau durant la période de pompage ; en simplifiant, on observe alors une baisse du débit d'alimentation du cours d'eau par la nappe. Cet effet est plus ou moins décalé dans le temps en fonction de la distance au cours d'eau et des paramètres hydrodynamiques. Ceci étant, au vu des durées de pompage pluri-mensuelles, on peut qualifier ce phénomène de pseudo élastique (la nappe retrouve sa configuration rapidement après l'arrêt du pompage) et de quasi-instantanée. C'est le phénomène majoritairement observé lors des simulations numériques de nappes alluviales.
- Dans la configuration Ilot, caractérisée par une alimentation partielle de la nappe par le Rhône endigué, en position haute par rapport à cette dernière, le pompage peut accentuer le débit d'alimentation de la nappe par le cours d'eau, en augmentant le gradient hydraulique entre les deux hydro systèmes.
- Phénomène de rééquilibrage hydrodynamique sur le long terme entre la nappe et ses encaissants géologiques. Si le pompage est trop éloigné pour produire un effet pseudo-élastique et quasi instantané, le volume soutiré à la nappe va induire une baisse "globale" de la nappe ; en effet dans ce cas, le volume soutiré n'a pas pu être compensé par une moindre alimentation des exutoires. On va alors observer des phénomènes complexes de rééquilibrage étalés sur plusieurs mois, voire plusieurs années (cela dépend de la géométrie des réservoirs, et des contrastes de perméabilité entre la nappe et ses encaissants), avec une modification progressive des gradients hydrauliques entre la nappe et ses encaissants, mais aussi entre la nappe et ses exutoires.

Les différentes approches développées permettent d'obtenir les résultats suivants :

- Le phénomène prépondérant pour les prélèvements en nappes alluviales est la diminution du gradient hydraulique entre la nappe et le cours d'eau. L'inversion de gradient hydraulique n'est observée que rarement : pour les pompages situés à très courte distance des cours d'eau (moins de 200 mètres) ou pour des configurations hydrodynamiques peu fréquentes (fort méandrage).
- Dans la configuration de l'îlot (partie de nappe encadrée par deux bras de cours d'eau, endigué ou non), l'impact d'un prélèvement en nappe se traduit par une perte quasi synchrone au pas de temps mensuel, que ce soit par augmentation du débit drainé par la nappe dans les secteurs endigués ou par diminution du débit retournant au cours d'eau dans les secteurs non endigués.
- Le phénomène prépondérant lié aux prélèvements dans les formations annexes très perméables (formations fluvioglaciales ou nappes alluviales d'affluents), comme dans les formations moins perméables (molasses ou formations carbonatées), est celui du rééquilibrage hydrodynamique. Les effets sur le Rhône sont décalés et étalés dans le temps. Ils sont caractérisés par une grande complexité, car ils impliquent aussi les équilibres hydrodynamiques avec les nappes ou les cours d'eau susceptibles d'alimenter ces formations annexes.

Figure 84 : Typologie des impacts des prélèvements en nappe sur les cours d'eau.



4.1.2 Paramètres explicatifs des impacts

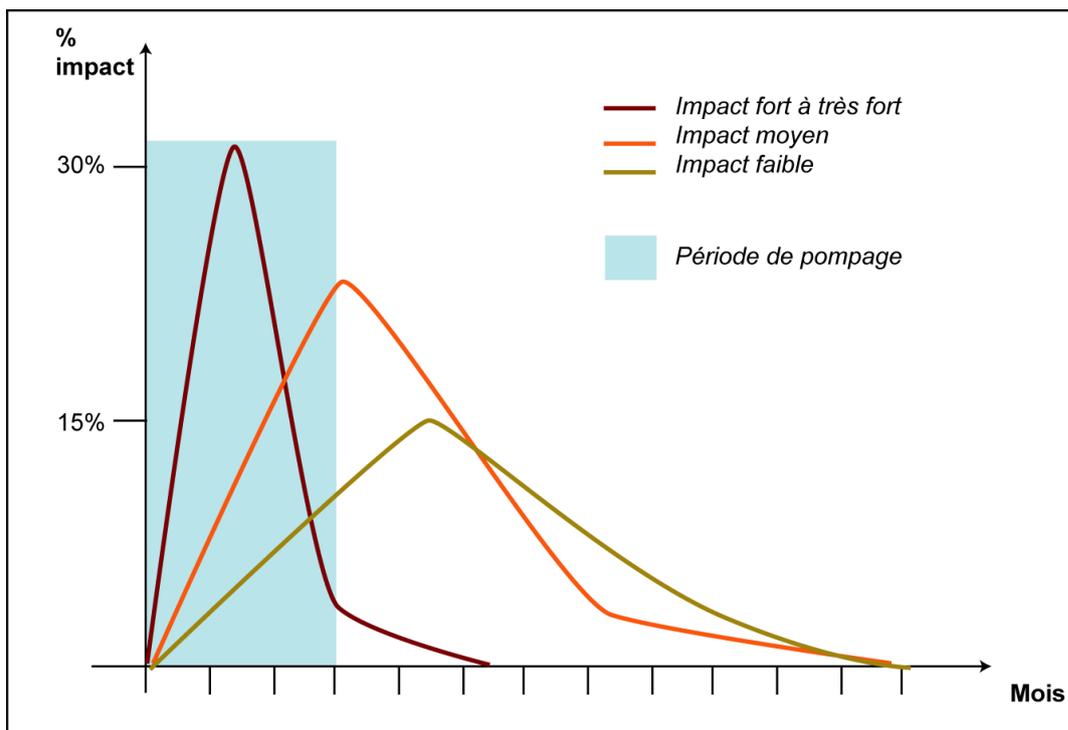
Le travail sur les éléments de méthode disponibles pour estimer les impacts quantitatifs de prélèvements en nappe sur le système Rhône, peut se résumer de la façon suivante :

- L'approche à partir du développement de la solution analytique de Theis permet d'estimer le pourcentage du débit soutiré au cours d'eau dans une nappe alluviale, pendant la période de pompage. Cette approche ne donne aucune information sur la distribution mensuelle des impacts relatifs du prélèvement sur le débit du cours d'eau.
- L'approche par simulations numériques 3D en régime transitoire produit elle-aussi une estimation de cet impact durant la période de pompage, mais aussi une clé de répartition sur les autres mois de l'année.

Ajoutons que l'analyse de sensibilité a montré que les paramètres explicatifs principaux pour les échanges nappe-rivière sont la transmissivité de l'aquifère, et la distance du point de prélèvement au cours d'eau.

Insistons sur une observation essentielle : l'analyse de sensibilité montre une bonne concordance entre le pourcentage d'impact cumulé pendant la période pompage et la distribution des pourcentages d'impact dans les clés de répartition annuelles. Plus l'impact est faible, plus la forme de la courbe annuelle d'impact est étalée et différée dans le temps. Et ce pour toutes les hypothèses testées (cf. figure ci-dessous).

Figure 85 : Typologie des impacts mensuels sur un cycle annuel, d'un prélèvement sur le débit d'un cours d'eau.



4.2 CROISEMENT DES APPROCHES ET PROPOSITION DE SIMPLIFICATION

4.2.1 Proposition de méthode

La synthèse que nous proposons repose sur le croisement des deux approches, et ce pour toutes les nappes sujettes à des prélèvements estivaux importants.

Au vu des biais et incertitudes intrinsèques aux éléments de méthode étudiés (cf, ci-dessous), il est justifié et nécessaire de "dégrader" les résultats de manière à ne pas donner l'illusion d'une fausse précision.

4.2.1.1 Impact des prélèvements en nappe alluviale du Rhône

Pour la nappe alluviale du Rhône, on essaie d'intégrer le maximum de complexité pour avoir la meilleure précision possible ; rappelant les éléments suivants :

- La perméabilité et la distance au cours d'eau sont les deux principaux paramètres explicatifs.
- Les données disponibles montrent un réservoir assez homogène, avec une perméabilité de l'ordre de 10^{-3} m/s.

À l'aide de simulations numériques, on va ainsi chercher à déterminer des distances moyennes d'impact et pour chaque catégorie d'impact, on définit par analyse statistique une matrice d'impacts mois par mois :

- Impact très fort qui correspond à 90% du débit pompé soutiré au fleuve pendant la période de pompage.
- Impact fort : 75 à 80% du débit pompé soutiré au fleuve pendant la période de pompage.
- Impact moyen : plus de 50% du débit pompé soutiré au fleuve pendant la période de pompage.
- Impact faible : entre 25 et 50% du débit pompé soutiré au fleuve pendant la période de pompage.

On appelle matrice d'impact une répartition par pourcentage du débit prélevé réparti mois par mois. À titre d'exemple, on peut ainsi obtenir deux comportements extrêmes :

- Un système sans inertie, avec pour un prélèvement constant réparti sur 3 mois, une matrice d'impact avec les trois mois correspondant présentant des pourcentages de 33% (et donc 0% les autres mois de l'année).
- Un système totalement inertiel, avec pour un même prélèvement constant réparti sur trois mois, une matrice d'impact avec des pourcentages de 8,33% réparti uniformément sur l'année.

Ainsi, un impact inférieur à 25% sur 3 mois, équivaut à une absence d'impact lié à un soutirage synchrone de l'eau au fleuve par modification du gradient hydraulique entre le point de prélèvement et le fleuve. On est alors dans le cas d'un effet inertiel plus complexe qui sera traduit par une matrice homogène avec un impact de 8,33% réparti sur 12 mois.

On a ainsi une méthode qui va pouvoir attribuer une matrice d'impact à tout prélèvement en nappe alluviale du Rhône, en fonction de la distance au fleuve.

Notons que l'on raisonne ainsi volontairement par catégories d'impact de manière à ne pas donner l'illusion d'une précision qui n'existe pas.

4.2.1.2 Impacts des prélèvements dans les nappes connectées à des cours d'eau

Pour les nappes alluviales des affluents et pour les nappes fluvio-glaciaires avec exutoires superficiels, on applique le développement de la solution analytique de Theis pour déterminer les distances moyennes d'impact ; puis on leur attribue des clés de répartition mois par mois, issues d'une moyenne des clés déterminées lors de l'analyse de sensibilité au moyen des simulations numériques.

Notons que l'on fait alors implicitement l'hypothèse que les diminutions de débit estimés pour ces cours d'eau sont supposées se répercuter au débit du Rhône avec un décalage temporel inférieur à un mois.

On a de nouveau une méthode qui va pouvoir attribuer une matrice d'impact à tout prélèvement en nappe, en fonction de la distance à des cours d'eau qui alimentent in fine le Rhône.

4.2.1.3 Impacts des prélèvements dans les nappes sans exutoire superficiel

Pour les nappes fluvio-glaciaires sans exutoire superficiel, comme pour les nappes des grands bassins molassiques, l'approche exploratoire réalisée à l'aide du modèle numérique montre que les prélèvements temporaires dans ces formations ne peuvent pas avoir d'impact sur la dynamique d'échanges à court terme entre le fleuve et sa nappe alluviale. Ils induisent des modifications complexes de l'équilibre hydrodynamique d'abord entre ces nappes et la nappe alluviale ; l'impact sur l'échange entre la nappe alluviale et le fleuve est ensuite modifié sur de grandes échelles de temps et selon des modalités très complexes.

Pour ces prélèvements, on fait alors l'hypothèse simplificatrice que l'impact des prélèvements estivaux se répartit de façon homogène les 12 mois suivants.

Insistons : pour ces prélèvements, la localisation n'influe pas sur les impacts en termes de diminution des débits dans les cours d'eau.

4.2.2 Analyse critique de la méthode proposée

4.2.2.1 Biais et incertitudes liées aux éléments de méthode

Il est important de rappeler les limites des éléments de méthode étudiés.

1. Ils sont basés sur des solutions mathématiques qui reposent toutes sur les mêmes postulats :
 - 1.a - Homogénéité des formations alluviales. Il n'y a pas de prise en compte d'éventuelles hétérogénéités locales susceptibles d'aggraver ou de diminuer l'impact sur le débit du fleuve. À ce sujet, rappelons que la majorité des champs captant AEP sont localisés préférentiellement sur des surcreusements alluvionnaires ou sur d'anciens bras morts, réputés dans les deux cas pour une meilleure transmissivité.
 - 1.b - La géométrie du cours d'eau est rectiligne, ce qui nécessairement simplifie la géométrie des échanges nappe-rivière. En effet, pour des géométries plus complexes, avec notamment des méandres, on peut localement avoir des effets sur le sens des échanges qui varient à cause des conditions locales. Ainsi, la géométrie rectiligne induit nécessairement un drainage généralisé de la nappe par le fleuve alors que localement, on pourrait avoir suralimentation de la nappe par le fleuve.
 - 1.c - On suppose pour le fleuve une charge constante durant toute l'année ; or, il est évident que le niveau d'eau dans le fleuve varie en fonction du débit. Ces simulations peuvent

donc mal ou pas représenter les inversions de gradient liées aux phénomènes de crue du cours d'eau.

2. Ni l'approche par analyse de sensibilité, ni le développement de la solution analytique de Theis ne prennent en compte les effets cumulés des pompages. On fait donc implicitement l'hypothèse que deux forages voisins ont le même effet sur le débit du fleuve que deux forages situés hors de leur aire d'influence respective.
3. L'approche par la solution analytique de Theis est très rudimentaire. Elle suppose une constance de la valeur du débit sur toute la période estivale, ce qui est rarement observé.

Modulons ces biais :

1. Aux échelles de l'étude, les hétérogénéités locales influent de façon secondaire sur l'inertie globale du système : modulation de quelques jours à quelques semaines des transferts de pression, pour des bilans déterminés à l'échelle mensuelle. De la même façon, les effets locaux liés à la géométrie du cours d'eau sont lissés à plus grande échelle. Quant au problème de la constance de la hauteur d'eau dans le fleuve, il est secondaire dans le cas de la problématique traitée : les prélèvements se font en période estivale, lors des étiages du fleuve.
2. Au vu de la forte perméabilité du réservoir, la non-prise en compte des effets cumulés des forages produit des effets négligeables sur la dynamique d'échange entre la nappe et le fleuve.
3. L'aspect simplificateur du développement de la solution analytique de Theis conduit à une erreur sur la distribution des impacts relatifs lors des mois de prélèvement. En effet, par exemple, si pour une période de prélèvement de trois mois, le second mois est celui qui cumule près de 60% des débits soutirés à la nappe, l'approche par cette formule donnera un % d'impact quasi identique sur les trois mois. La magnitude globale de l'impact, ainsi que les effets d'inertie à moyen terme, restent valables.

4.2.2.2 Biais lié à l'inertie des écoulements superficiels des cours d'eau

Une des hypothèses fortes de la méthode proposée repose sur la non-prise en compte du décalage temporel entre l'impact sur un affluent du Rhône et le fleuve lui-même.

On trouve plus de données sur les vitesses et les temps de concentration en période crue qu'en période d'étiage. Une synthèse en est présenté par EGIS EAU (2011). L'analyse sur les crues historiques du Rhône montre que le décalage temporel est très variable selon les affluents, pouvant aller de quelques heures à plus de 24 heures, et pouvant pour un même affluent, comme dans le cas de la Durance, conduire à une avance ou à un retard par rapport au Rhône. Une étude détaillée du décalage temporel à partir des crues historiques du Rhône avec les crues de chaque affluent a donc été effectuée afin de définir ces décalages ; ils sont présentés dans le tableau ci-dessus.

On a donc des vitesses de propagation qui varient en crue de 4 à 12 km/h, selon la morphologie des bassins versants.

Rappelons les caractéristiques géomorphologiques des affluents les plus importants du Rhône :

- Saône : 480 km ; $i = 0,05\%$. Soit un temps de concentration maximal de l'ordre 5 jours (avec une vitesse d'écoulement de l'ordre de 4 km/h).
- Ain : 189 km ; $i = 0,2\%$. Soit un temps de concentration maximal de l'ordre de 2 jours (avec une vitesse d'écoulement de l'ordre de 4 km/h).
- Isère : 286 km : gradient hydraulique fort en montagne, plus faible en plaine. Soit un temps de concentration maximal de l'ordre de 3 jours (avec une vitesse d'écoulement de l'ordre de 4 km/h).

- Durance : 324 km ; gradient hydraulique fort en montagne, plus faible en plaine. Soit un temps de concentration maximal de l'ordre de 3 jours (avec une vitesse d'écoulement de l'ordre de 4 km/h).

Cette approche simpliste donne en période de crue des temps de concentration moyen, associés à des vitesses d'écoulement faibles, inférieurs à la semaine.

Figure 86 : Temps de propagation de la station des affluents du Rhône jusqu'à la confluence avec le fleuve.

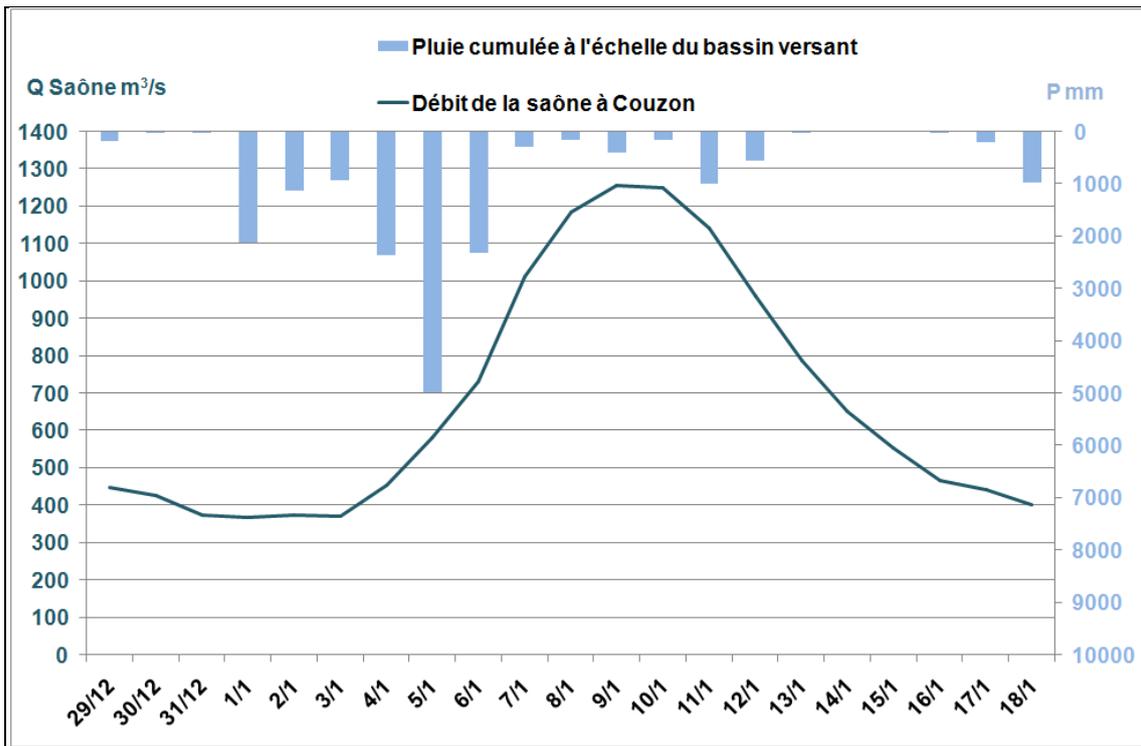
Affluent	Station	distance confluence (km)	propagation station-confluence (heure)
Arve	Arthaz	31,2	3
Valserine	Lancrans	2,6	0
Fier	Motz	2,2	0
Guiers	Belmont	7,4	1
Bourbre	Jamezieu	1,5	0
Ain	Chazey	17,2	2
Saone	Couzon	17,0	4
Gier	Givors	0,8	0
Cance	Sarras	0,7	0
Doux	Colombier	12,6	2
Isère	Beaumont	6,6	1
Eyrieux	Les Ollières	17,9	2
Drome	Loriol	4,2	1
Roubion	Montélimar	6,0	1
Ardèche	Sauze	5,5	1
Lez	Bollène	11,0	1
Ceze	Bagnols	9,2	1
Aygues	orange	11,0	1
Ouvèze	Vaison la Romaine	39,5	3
Durance	Bonpas	10,2	2
Gard	Remoulins	14,4	2

La problématique non résolue est celle du passage de temps de concentration en période crue à des temps de concentration en période d'étiage. Rappelons cependant que l'hypothèse proposée est celle d'un temps de concentration inférieur au mois. Cette hypothèse peut être jugée raisonnable. Pour être abusive, il faudrait observer des vitesses en période de basses eaux, plus de 4 fois moins fortes que les vitesses observées en hautes eaux. Or, les baisses de débit en période de basses eaux se traduisent plus par une diminution de la section d'écoulement que par une perte de vitesse.

Les données de bibliographie sur les vitesses des cours d'eau à l'étiage sont rares. Citons l'étude de Mallard (2004) qui permet une estimation des vitesses d'écoulement de la Saône à l'étiage de l'ordre de 3 km/h. C'est un ordre de grandeur que l'on peut extrapoler comme une hypothèse pessimiste à l'ensemble des affluents : en effet, la Saône est l'affluent du Rhône le plus long et le moins penté.

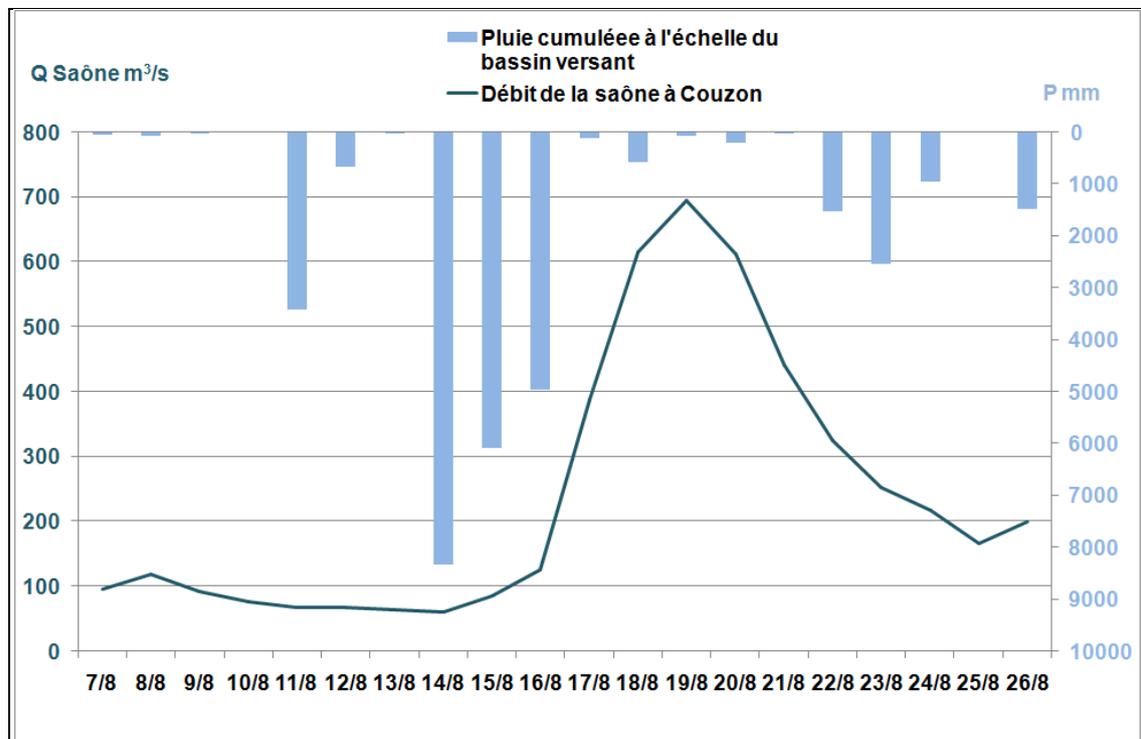
Une vérification complémentaire a été mise en œuvre sur le bassin versant de la Saône qui est le plus long et le moins penté des affluents du Rhône. Elle a consisté à comparer les débits journaliers mesurés à la station hydrométrique de Couzon vis-à-vis d'une pluie journalière cumulée et normalisée à l'échelle du bassin versant à partir des données SAFRAN de Météo France.

Figure 87 : Réactivité de la Saône à un événement pluvieux en période hautes eaux.



On constate que le décalage entre les maxima des précipitations et pic de crues enregistrés en période de hautes comme de basses eaux, est bien inférieur à la semaine.

Figure 88 : Réactivité de la Saône à un événement pluvieux en période basses eaux.



En rappelant que l'échelle temporelle caractéristique de la méthode proposée est le mois, on peut supposer que le biais lié à l'inertie consécutive aux vitesses d'écoulement des affluents du Rhône, est négligeable.

4.2.2.3 État des connaissances sur la problématique

Au niveau régional, une seule étude a eu pour ambition de décrire les relations entre nappes et cours d'eau à cette échelle (Schindler, 2006). Il s'agit d'un travail de synthèse qui permet de proposer une sectorisation d'un certain nombre de cours d'eau principaux dans le bassin versant du Rhône et en région PACA. Ce travail de qualité ne propose cependant pas de réflexions ou d'analyses sur les impacts des prélèvements en nappe sur le débit des cours d'eau.

De la même façon, les études les plus détaillées sur les relations nappe-rivière proposent des cadres d'étude en régime influencée et ne permettent donc pas de qualifier ou quantifier ces impacts.

Citons :

- Nappe alluviale du Var (Guglielmi, 1993).
- Nappe de la Môle (HYDROGEOMIDI, 1991).
- Nappe du Muschelkalk de Flassans (Cova et Tapoul, 1990).
- Nappes alluviales de l'Arc et de l'Huveaune (BRGM, 1968).
- L'Artuby (EMA, 2010).
- La Cagne (Fiquet et Derochet, 2011).

Ceci étant, plus récemment, la demande d'une meilleure gestion des hydro systèmes soumis à des déséquilibres quantitatifs a conduit les pouvoirs publics à réaliser de nombreuses études de détermination des volumes prélevables ; or, ces études présentent généralement des approches assez complexes (souvent basées sur de la modélisation numérique) qui permettent une première analyse des impacts des prélèvements en nappe sur les débits des cours d'eau.

Ainsi, une analyse critique des études volumes prélevables sur certaines formations fluvio glaciaires ou alluviales, confirme les résultats de l'approche par modélisation (SAFEGE, 2011 ; SOGREAH et al., 201 ; HYDROFIS, 2011 ; HYDROFIS, 2012 ; SOGEAH, 2012) :

- Pour des prélèvements agricoles cumulés de 50 à 100 l/s à 2 000 l/s (cas de l'appareil alluvial l'Ain), en débit fictif continu sur la période estivale, les rabattements associés sont de l'ordre de quelques centimètres à un mètre ; dans tous les cas de figure, on observe rarement une inversion du gradient de la rivière vers la nappe. Les phénomènes de baisse du débit lié à la diminution du gradient hydraulique entre nappe et cours d'eau sont prépondérants. On peut cependant localement avoir une surimposition de l'équilibre hydrodynamique global des nappes et de leurs encaissements (une fraction des prélèvements ne se répercute pas comme "pertes" aux hydro systèmes superficiels mais peut se traduire par une variation des échanges entre hydro systèmes souterrains).
- Dans ce type de réservoirs à forte transmissivité, les pompages proches des rivières se traduisent par un impact fort sur les débits des cours d'eau et synchrone aux prélèvements (cas des réservoirs étroits comme les nappes de l'Ouche et de Dijon Sud) ; mais dans le détail, au-delà d'une certaine distance, les effets sont généralement différés et étalés dans le temps (phénomène de réajustement piézométrique) ; c'est ce que l'on observe sur les nappes de grande extension latérale comme la nappe de la basse vallée de l'Ain.

Globalement, ces études montrent une bonne adéquation des comportements hydrogéologiques observés ou modélisés à grande échelle, avec la méthode proposée. Dans le détail, elles illustrent aussi parfois la complexité des phénomènes et peuvent ponctuellement, localement montrer le caractère simpliste de la méthode proposée.

4.2.3 Étendue et limites de la méthode

Ceci étant, pour toutes les raisons détaillées dans l'analyse critique de la méthode, il est nécessaire d'insister sur le caractère expéditif de la méthode qui est relative à certaines échelles spatiales et temporelles.

Elle vise à estimer les impacts cumulés des milliers de prélèvements estivaux, principalement destinés à un usage agricole, à l'échelle du bassin versant du Rhône. Elle est basée sur l'agglomération d'éléments de méthode de précision variable ; les résultats associés donnent donc principalement des ordres de grandeur et seulement des ordres de grandeur.

De plus, nous recommandons de restreindre l'usage des résultats proposés dans cette étude, en termes de cartographie et de matrices d'impact sur le débit du fleuve, à une analyse sommaire de territoires d'échelle au moins départementale. Ces résultats ne peuvent prétendre concurrencer une étude locale sur une portion de nappes alluviales, de type BAC ou de détermination des périmètres de protection d'un captage AEP, par exemple.

Pour finir, les résultats sont représentatifs d'effets cumulés mensuels.

4.3 APPLICATION À LA NATURALISATION DES DÉBITS DU RHÔNE

4.3.1 Définition des matrices pour le système Rhône

4.3.1.1 Adaptation supplémentaire pour la nappe alluviale du Rhône

4.3.1.1.1 Hypothèses spécifiques aux prélèvements agricoles dans le bassin versant du Rhône

Les données de prélèvement récoltées par BRLi mettent en évidence deux secteurs en terme de temporalité des prélèvements. En amont de Viviers, ceux-ci sont généralement répartis sur 3 mois (avec une concentration des prélèvements au mois de juillet), alors qu'à l'aval, les prélèvements sont effectués sur environ 5 mois.

Figure 89 : Répartition des besoins en eau pour l'agriculture.

	Répartition du besoin théorique des plantes au cours de l'année												
	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Annuel
De l'amont du bassin à Viviers	0%	0%	0%	0%	0%	15%	55%	30%	0%	0%	0%	0%	100%
De Viviers à la Méditerranée	0%	0%	0%	0%	10%	25%	35%	20%	10%	0%	0%	0%	100%

Afin d'intégrer ces temporalités, très différentes de celles utilisées dans l'analyse de sensibilité (prélèvement constant sur 3 mois), nous avons dû réaliser des simulations supplémentaires.

4.3.1.1.2 Simulations supplémentaires

Au vu des résultats de l'analyse de sensibilité, ces simulations supplémentaires ont été réalisées dans le modèle nappe libre avec un encaissant peu perméable (influence secondaire négligée des aménagements et de l'encaissant).

Dans le travail relatif à la sectorisation de la nappe alluviale, nous avons constaté que la perméabilité égale à 10^{-2} m/s est relativement rare ; nous avons donc choisi de nous baser sur une perméabilité égale à 10^{-3} m/s pour réaliser ces simulations supplémentaires.

Pour les simulations supplémentaires, nous avons donc réparti de la même façon les prélèvements avec une base de 3000 m³/jour sur un seul ouvrage de prélèvement ; en rappelant que le débit du pompage n'influe pas sur la part relative de l'eau soutirée au fleuve.

Enfin, nous avons réalisé les modélisations et testé plusieurs distances pour trouver les pourcentages demandés ci-dessus.

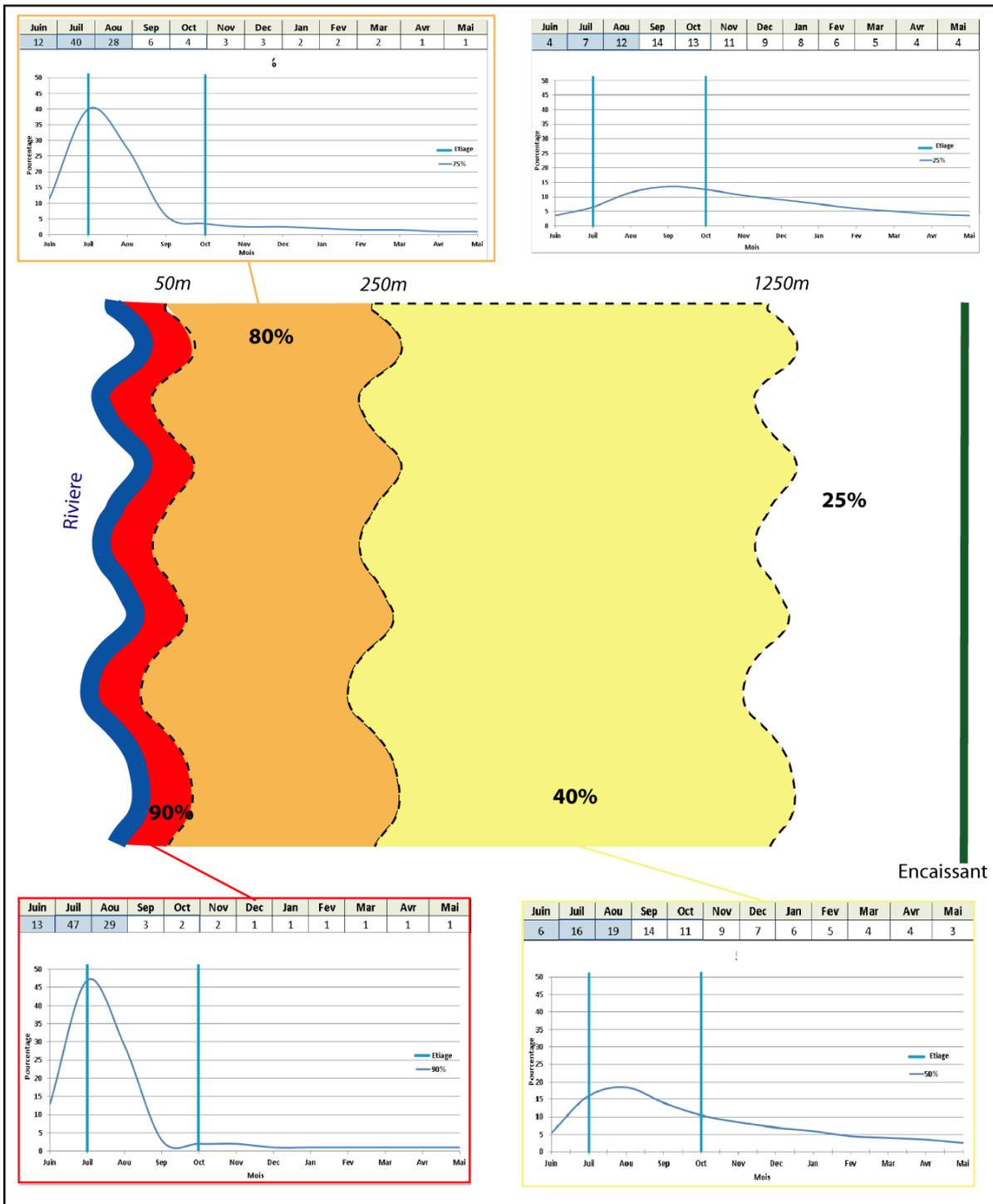
Nous avons réalisé une série de simulations supplémentaires avec la configuration mentionnée précédemment. Notre but est de rechercher pour quelle distance nous obtenons des pourcentages cumulés sur la période de pompage de 90%, 75%, 50% et 25%, en tenant compte de la répartition temporelle des prélèvements en eau pour l'agriculture en amont et aval de Viviers.

4.3.1.1.3 Résultats

En tenant compte des paramètres énoncés précédemment et suite à toutes les modélisations réalisées, nous avons construit un tableau regroupant toutes les valeurs de pourcentage obtenues pour toutes les configurations et différentes distances.

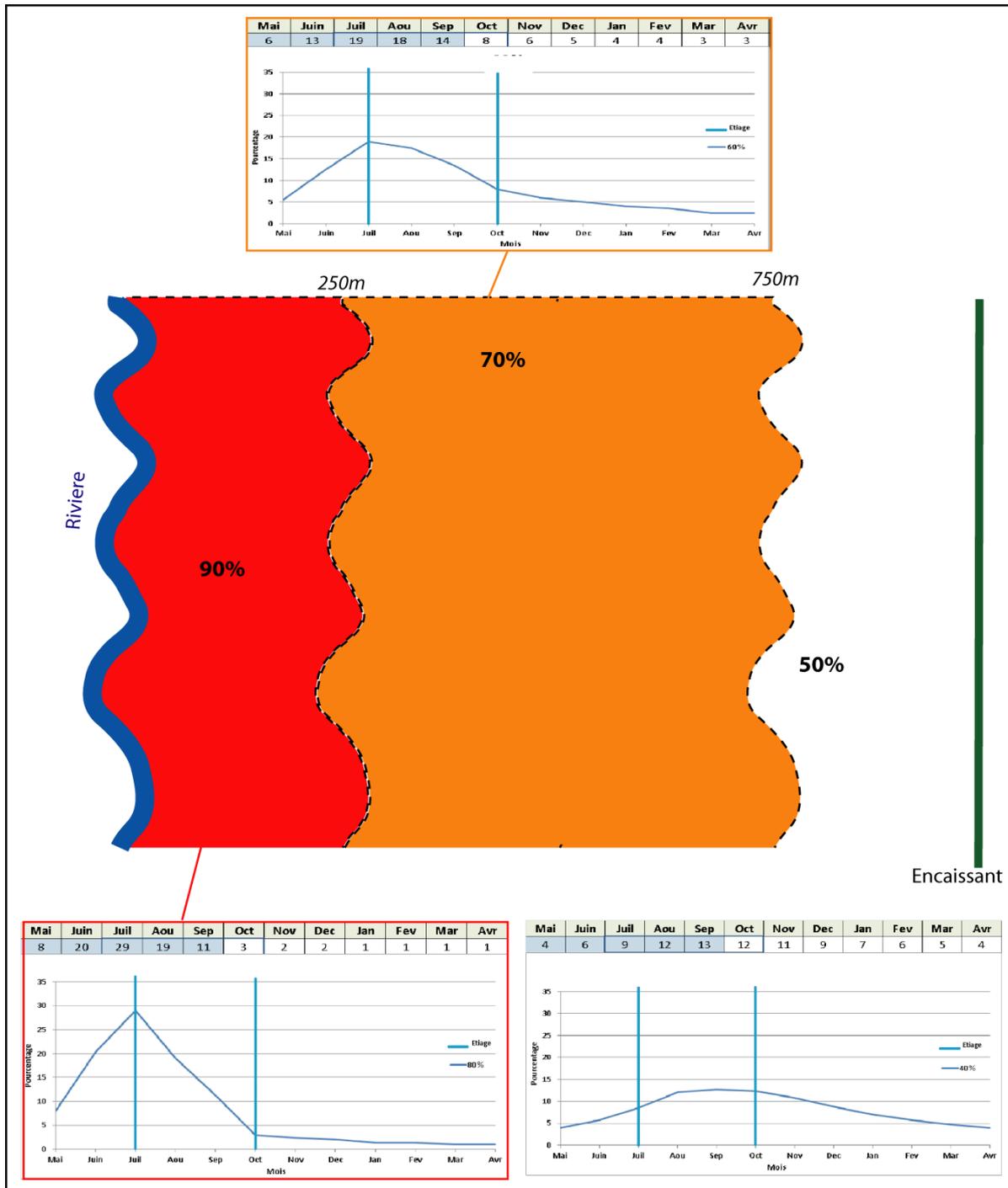
Tout d'abord, nous proposons les résultats suivants pour l'amont de Viviers :

Figure 90 : Impact annuel mois par mois d'un prélèvement sur le débit du fleuve en amont de Viviers.



Puis, les résultats suivants pour l'aval de Viviers :

Figure 91 : Impact annuel mois par mois d'un prélèvement sur le débit du fleuve en aval de Viviers.

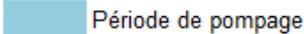


Notons que pour les prélèvements en aval de Viviers, la longueur de la période de prélèvement induit une difficulté à déterminer des portions de nappe non influencées pendant cette période de pompage.

4.3.1.2 Définition des matrices

Enfin, grâce à toutes les modélisations réalisées, nous pouvons proposer le tableau suivant comprenant les 12 matrices finales, c'est-à-dire 4 pour l'amont de Viviers, 3 pour l'aval de Viviers, 4 pour les affluents et celle correspondant à l'absence de relations "instantanées" entre prélèvements et débit du fleuve.

Figure 92 : Tableau regroupant les matrices finalisées.

ID	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr
Rhone 90 Amont	1	13	46	28	3	2	2	1	1	1	1	1
Rhone 80 Amont	1	12	40	28	5	4	3	3	2	2	2	1
Rhone 40 Amont	3	6	15	19	14	11	9	7	6	5	4	4
Rhone 25 Amont	7	6	7	12	14	13	11	9	8	6	5	4
Rhone 80 Aval	8	20	29	19	11	3	2	2	1	1	1	1
Rhone 70 Aval	6	13	19	18	14	8	6	5	4	4	3	3
Rhone 40 Aval	6	7	9	12	13	12	11	9	7	6	5	4
Affluents 90	0	27	32	33	6	2	0	0	0	0	0	0
Affluents 75	1	22	25	27	7	5	3	3	2	2	2	1
Affluents 50	2	12	16	20	14	10	7	5	4	4	3	3
Affluents 25	5	5	10	13	14	12	10	8	6	6	6	5
NonInfluencé (NI)	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%
												

Ces matrices sont relatives à une bande de distances aux cours d'eau. Elles permettent ainsi de déterminer les impacts d'un prélèvement, mois par mois, sur un cycle annuel, sur le débit du fleuve, pour tout point de prélèvement géo localisé.

4.3.2 Sectorisation du bassin versant

4.3.2.1 Principes

Rappelons qu'afin de mener à bien cette mission et de mettre en avant le travail d'expertise hydrogéologique, il s'avérait nécessaire de travailler sur SIG, afin d'y centraliser et d'y traiter les données géo référencées utiles. Les résultats obtenus et présentés dans ce chapitre sont donc issus du travail de cartographie effectué sur le logiciel ArcGIS Basic v.10.1 afin de sectoriser la nappe alluviale du Rhône et récolter les extensions géographiques des formations latérales.

Il est finalement proposé un ensemble de couches présentées dans un projet v.10.1 et v.10. Un fichier de métadonnées livré avec les couches présente plus en détails les attributs.

La finalité est de pouvoir faire correspondre à chaque prélèvement géo référencé une zone spécifique sectorisée sur SIG. Les prélèvements agricoles sont issus du tableau initialement transmis par l'Agence, et peuvent être transformés en points géo référencés sur SIG.

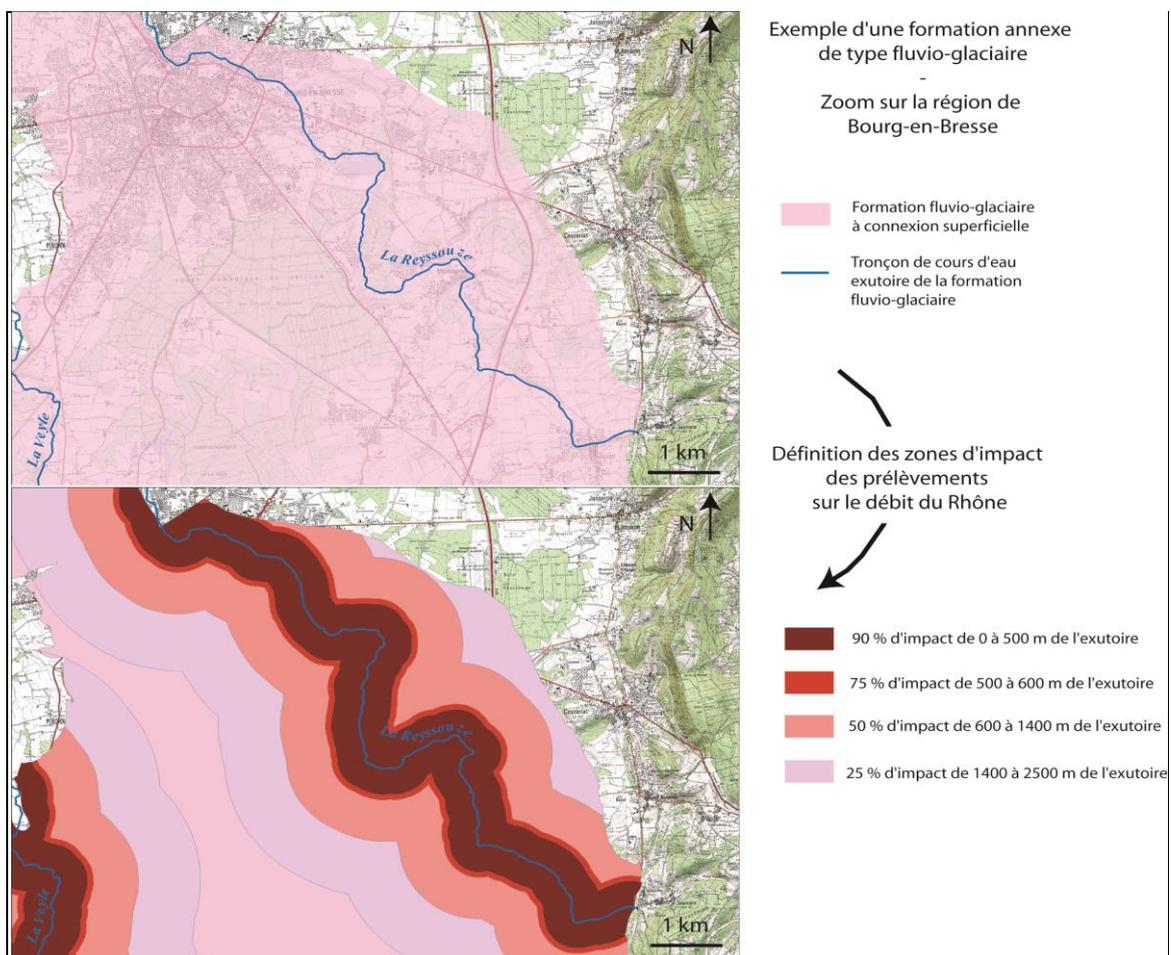
4.3.2.2 Application

L'outil de création de « zones tampon » est utilisé durant cette étape de travail afin de représenter les domaines d'influence encadrant le fleuve du Rhône, les affluents des nappes alluviales latérales et les exutoires des formations fluvioglacières dites « superficielles ». Cet outil « Zone Tampon » d'ArcGIS crée automatiquement des polygones dont le tracé est effectué à une même distance donnée autour de l'objet en entrée. Ces zones sont ensuite « redécoupées » en fonction de la formation géologique correspondante (nappe alluviale ou nappe fluvioglacière superficielle).

C'est le cas par exemple de cet affluent indirect du Rhône, la Reyssouze, à partir duquel des zones de différents pourcentages d'influence ont été tracées.

Notons que dans les zones de confluence des affluents, c'est la cartographie associée à la nappe alluviale du Rhône qui a primé sur celle déduite autour des affluents.

Figure 93 : Exemple de définition des zones d'impact des prélèvements sur le débit du système Rhône.

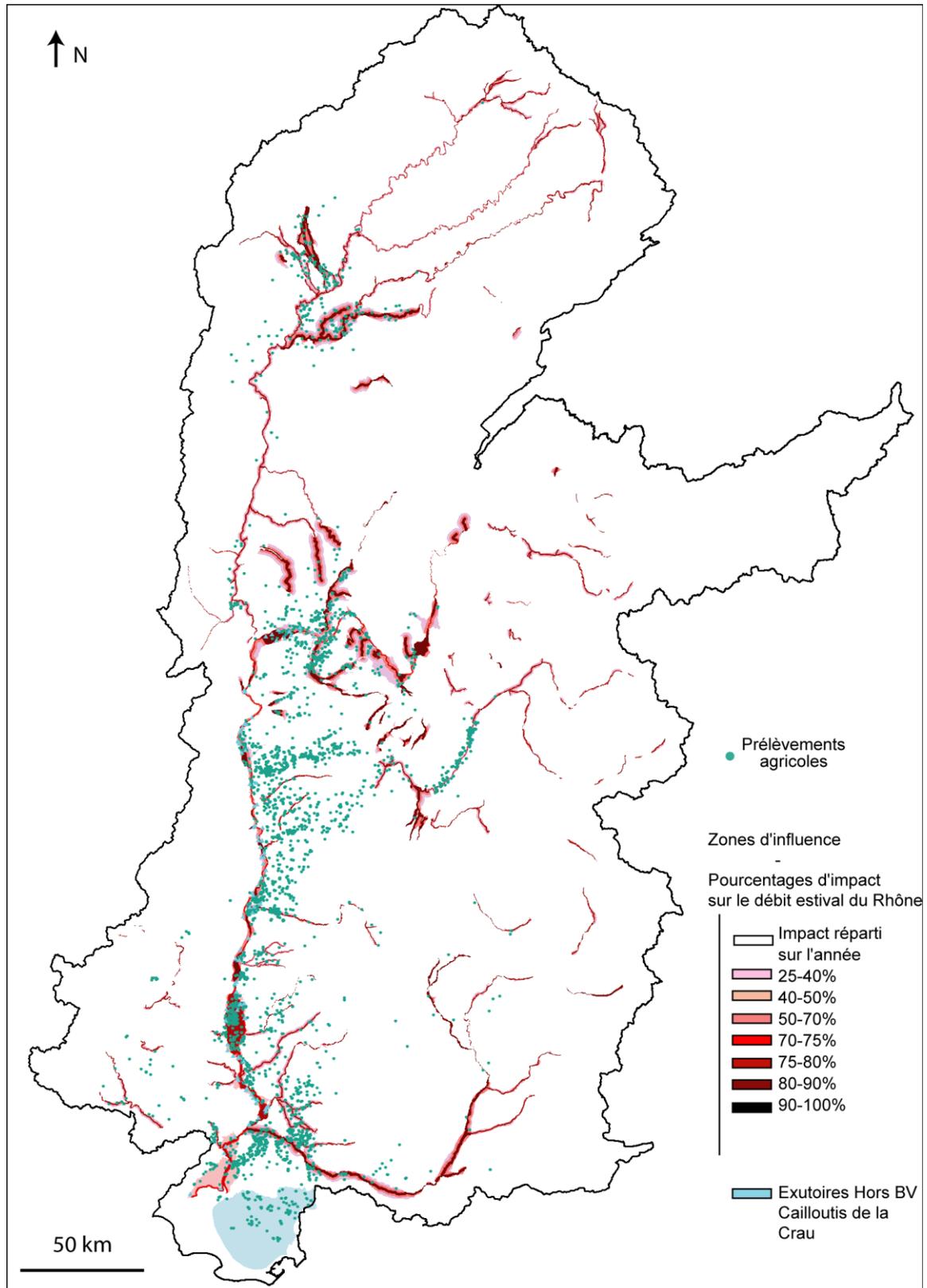


Trois couches ont été créées pour ce travail :

- « Zones_Influence_Nappe_Rhone.shp » pour la nappe alluviale du Rhône ;
- « Zones_Influence_Nappes_All_Laté » pour les nappes alluviales latérales ;
- « Zones_Influence_Nappes_FG.Shp » pour les nappes fluvioglacières à connexions superficielles.

On peut dès lors attribuer une matrice d'impact mensuel sur un cycle annuel, sur le débit du fleuve, pour tout point de prélèvement géo localisé.

Figure 94 : Ensemble des zones pouvant impacter le débit du Rhône et matrices associées (extrait du SIG)



4.3.3 Quantification des impacts

4.3.3.1 Les prélèvements bruts dans le bassin versant du Rhône

Le tableau ci-dessous présente les ordres de grandeur des prélèvements bruts dans le système Rhône (année 2010), par destinations et par origine des eaux.

Figure 95 : Prélèvements bruts dans le bassin versant du Rhône (année de référence : 2010).

	Fleuve Rhône	Affluents	Nappe du Rhône	Autres nappes	Total général
AEP	23	494	176	415	1 109
Agriculture	704	1 666	26	100	2 496
Industrie	160	153	193	183	689

Rappelons les points suivants :

- Les prélèvements d'eaux souterraines sont minoritaires devant celles affectant le réseau superficiel (environ 26%).
- Les prélèvements d'eaux souterraines sont majoritairement destinés à l'AEP (environ 55%).
- Les prélèvements en eaux souterraines se font majoritairement dans les autres nappes que la nappe alluviale du Rhône.
- Les prélèvements agricoles, principal objet de la méthode proposée, représentent seulement 3% des prélèvements bruts et 12% des prélèvements en eaux souterraines.

4.3.3.2 Les impacts sur le débit du Rhône liés aux prélèvements en eaux souterraines

Pour les prélèvements destinés à l'AEP ou à l'industrie, la méthode proposée considère que les débits prélevés impliquent une perte équivalente au réseau hydrographique et donc au Rhône (cas des prélèvements constants).

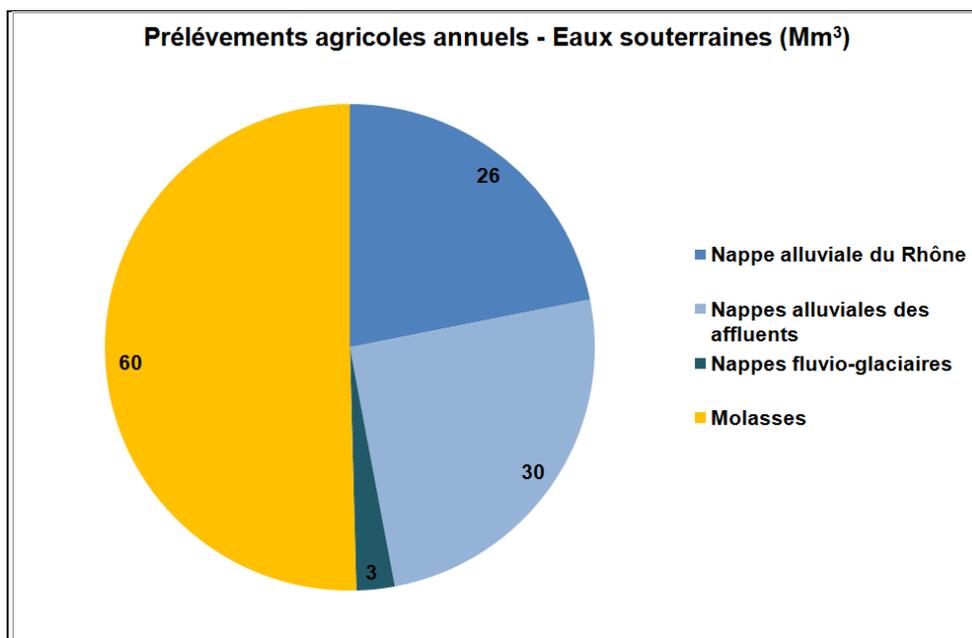
L'application de la méthode définie permet d'estimer la part de ces prélèvements qui va être soustrait au fleuve Rhône durant les 4 mois d'étiage systématiques (juin à septembre). Elle est d'environ 200 Mm³ pour les prélèvements AEP et d'environ 120 Mm³ pour les prélèvements destinés à l'industrie (33% du volume prélevé annuel)

Soit environ 30 m³/s en débit fictif lié aux prélèvements AEP et industriels, perdu pour le fleuve durant les mois d'été.

Pour les prélèvements agricoles, les données récoltées en phase 1 de l'étude permettent une première estimation des prélèvements agricoles annuels sur le bassin versant Rhône. Ils sont en cumulé de l'ordre de 120 Mm³.

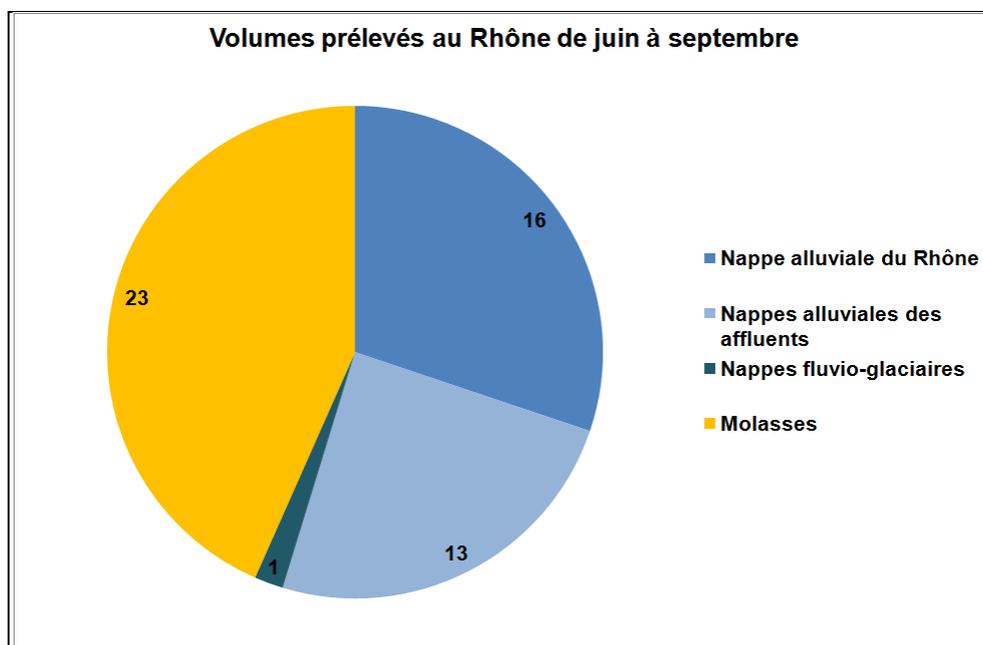
L'application de la méthode définie permet d'estimer la part de ces prélèvements qui va être soustrait au fleuve Rhône durant les 4 mois d'étiage systématiques (juin à septembre). Elle est de 53 Mm³ (soit 44% du volume prélevé).

Figure 96 : Bilan des moyennes interannuelles des prélèvements agricoles par grands types de nappe.



Elle correspond à environ 5 m³/s en débit fictif lié aux prélèvements destinés à l'agriculture, perdu pour le fleuve durant les mois d'été.

Figure 97 : Bilan des impacts en terme de volumes perdus pour le fleuve Rhône, consécutivement aux prélèvements dans les hydro systèmes souterrains.



Au global, on peut ainsi estimer que la perte de débit du fleuve Rhône en période estivale, liée aux prélèvements dans les nappes du bassin versant, tous usages confondus, est de l'ordre de 35 m³/s.

5. RÉFÉRENCES 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 – SAFEGE – SEPIA Conseils. 93 p. +cartes et annexes.
- Bel F., 1998** – Synthèse hydrogéologique de la nappe miocène du comtat Venaissin (Vaucluse). Rapport BRGM n° R 40236.
- BRGM, 1968** – Etude des ressources hydrologiques et hydrogéologiques du sud-est. Fascicule 5 : Bassins de l'Arc et de l'Huveaune. Rapport n° 68 SGN 166 PRC.
- 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.
- BURGEAP, 2009** – SAGE de l'Est Lyonnais. Étude préalable à la mise en place de plan de gestion dynamique de la nappe de l'Est Lyonnais. Rapport d'étude pour le compte du Conseil Général du Rhône. 75 p. + annexes.
- BURGEAP, 2010** – SAGE de l'Est Lyonnais. Simulations quantitatives pour la mise en place de plan de gestion dynamique de la nappe de l'Est Lyonnais. Rapport d'étude pour le compte du Grand Lyon. 99 p. + annexes.
- BURGEAP, 2011 a** - Etude des volumes prélevables dans la nappe du Garon. Actualisation et valorisation de la modélisation hydrodynamique de l'aquifère. Rapport d'étude pour le compte du SMAGA. 38 p.
- BURGEAP, 2011 b** - Nappe du Garon. Simulation et bilans complémentaires. Rapport d'étude pour le compte du SMAGA. 6 p.
- CAILLE BE, 2008** - Évaluation 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.
- Cave T., 2011** - Fonctionnement hydrodynamique du bassin tertiaire du Bas-Dauphiné entre la Drôme et la Varèze (Drôme et Isère, Sud-Est de la France). Étude géochimique et isotopique. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 270 p.
- 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., Gudéfin 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.
- Cova R., Tapoul J.F., 1990** - Régime hydrogéologique de l'Issole. Conséquences de la sécheresse 1989-1990; Rapport Cellule géologique départementale. 8 p. + annexes.
- De La Vaissière R., 2006** - Étude de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné, apports de la géochimie et des isotopes dans le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence (Drôme, Sud-est de la France). Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 339 p.
- De Marsily, 1968** - Généralisation des abaques de Collins. Tableaux des résultats. ENSMP, Centre d'Information Géologique, Laboratoire d'Hydrogéologie mathématique.
- EGIS EAU, 2011-** Concomitance et impacts des affluents sur le Rhône. Rapport d'étude pour le compte du plan Rhône. 139 p.

- Fiquet M., Derochet M., 2011** - Programme départemental d'amélioration des connaissances des ressources en eau. Expérimentation de lâchers d'eau au niveau des sources du riu a Vence en vue du soutien des débits d'étiage de la cagne. Synthèse des expérimentations réalisées en juillet 2010. Rapport d'étude, 19 p.
- Graillot D., Paron 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., Paron 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., Paron 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.
- Guglielmi Y., 1993** - Hydrogéologie des aquifères plio-quadernaires de la basse-vallée du Var (Alpes-Maritimes, France). 179 p., 108 fig., annexes. Thèse de Doctorat. Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse.
- HYDROFIS, 2011a** - Étude détermination des volumes prélevables de la nappe de Dijon Sud. Phase 3 : impact des prélèvements et quantification des ressources existantes. Rapport d'étude pour le compte du SBV. 82 p.
- HYDROFIS, 2011b** - Etude globale de la gestion quantitative de la ressource en eau sur le bassin versant du Garon. Phase 5 : Détermination des volumes prélevables et indicateurs de gestion de nappe. Rapport d'étude pour le compte du SMAGGA. 23 p.
- HYDROGEOLOGIE, 1991** - Etude des relations hydrauliques entre le barrage de la verne et la Nappe alluviale de la Môle. Rapport d'étude pour le compte du Syndicat Intercommunal de distribution d'eau de la Corniche des maures. 23 p. + annexes.
- Lalbat F., 2006** – Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras. Thèse, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Lelièvre R., 1969** - Étude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel. Rapport BRGM, 111 p.
- Luczyszyn H., 2010** - Etude d'incidence des prélèvements en eau sur les nappes et cours d'eau du bassin versant de l'Artuby et propositions de mesures de gestion; Rapport d'étude EMA Conseils pour le compte du PNR du Verdon, 112 p. + annexes.
- Mallard J.C., 2004** - Nivellement de la Grande Saône de 1835 à 1867. Section Chalon Sur Saône Tournus. Hydrodynamique et morphologie de thalweg en 1836. Presses Universitaires de Lyon,
- Roudier P., 1987** - Etude hydrogéologique et hydrochimique des nappes aquifères des bassins miocènes de Valréas, Vaison-la-Romaine et Carpentras. Thèse de 3 cycle, Université Claude Bernard - Lyon.
- SAFEGE 2011** – Étude de détermination des volumes prélevables sur le bassin versant de la Tille. Rapport de phases 1 et 2. Pour le compte de l'ETP Saône Doubs. 158 p.
- Salquebre D., Valencia G., Cadilhac L., 2008** - Aquifère miocène du Comtat Venaissin. Etat des connaissances et problématiques. Rapport BRGM n°RP-56389-FR

- SOGEAH, ASCONIT, 2011** – Étude de détermination des volumes maximum prélevables du bassin Bièvre-Liers-Valloire. Phase 2 : quantification des ressources et impacts des prélèvements. Rapport d'étude pour le compte du Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique Bièvre-Liers-Valloire. 125 p.
- SOGREAH, ANTEA GROUP, PIERRE PARIS Consultants, 2011** – Étude détermination des volumes prélevables sur le bassin versant de l'Ouche. Phase 3 : impact des prélèvements et quantification des ressources existantes. Rapport d'étude pour le compte du SMEABOA. 116 p.
- SOGREAH, 2012** – Étude détermination des volumes prélevables sur le sous-bassin de la basse vallée de l'Ain. Phase 3 : impact des prélèvements et quantification des ressources existantes. Rapport d'étude pour le compte du SBVA. 90 p.
- Theis C.V., 1935** - The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and the duration of discharge of a well using groundwater storage. Amer. Geophys. Union, Transactions, 16, p. 519-5824.

