Document public

Analyse de la faisabilité technique et économique de la recharge artificielle : illustration sur des territoires test du bassin RMC

Rapport final

BRGM/RP-68551-FR
Décembre 2019

agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
établissement public de l'État

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Analyse de la faisabilité technique et économique de la recharge artificielle : illustration sur des territoires test du bassin RMC

Rapport final

BRGM/RP-68551-FR
Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Recherche du BRGM 2019

F. Moiroux, J.-C. Maréchal, M. Bouzit, Y. Caballero, J.-F. Desprats

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : N. Dörfliger	Nom : F. Garrido
Fonction : Directrice de programme scientifique	Fonction : Directeur Adjoint
Date : 12/08/2019	Date : 07/01/2020
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
établissement public de l'État

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Remerciements : L'équipe de projet et les auteurs du présent document remercient le comité de suivi du projet, composé de : M. Assens (CD Pyrénées Orientales), L. Cadilhac (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse), C. Constantin-Bertn (SAGE Bièvre-Liers-Valloire), V. Dubois (Syndicat Mixte d'Etudes et de Travaux de l'Astien), A. Duzan (Suez), C. Henry de Villeneuve (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), R. Ingouff (Région Occitanie) E. Lacombe (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse), T. Marguet (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse), A. Martelat (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), C. Morand (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse), T. Pelte (AERMC), H. Politi (Office d'Equipement Hydraulique de Corse), A. Perrissin-Fabert (Grand Lyon), S. Ressouche (Syndicat Mixte des Nappes Vistrenque et Costières), H. Tachrift (Syndicat Mixte des Nappes du Roussillon),

Mots-clés : Recharge artificielle, Infiltration, Coût économique, Bassin RMC, Bassin, Hydrogéologie, Eau souterraine, Évaluation économique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Moiroux F., Maréchal J.-C., Bouzit M., Caballero Y., Desprats J.-F. (2019) – Analyse de la faisabilité technique et économique de la recharge artificielle : illustration sur des territoires test du bassin RMC. Rapport final. BRGM/RP-68551-FR, 360 p., 180 ill., 21 ann., 1 CD.

© BRGM, **2019**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les eaux souterraines représentent une ressource essentielle pour l'économie de nombreux territoires en France. Toutefois du fait des besoins importants à satisfaire pour les différentes catégories d'usage (en particulier l'alimentation en eau potable et l'irrigation agricole en période estivale), certaines masses d'eau se trouvent en situation de déséquilibre structurel. La réponse classique des gestionnaires consiste à définir un volume prélevable, puis à plafonner les prélèvements et rechercher des ressources de substitution (retenues collinaires, transferts interbassin). Une solution complémentaire, encore peu explorée en France, consiste à augmenter artificiellement la recharge de ces masses d'eau. Largement mise en œuvre dans d'autres pays notamment en Australie, Israël, Espagne, la recharge artificielle (RA) présente des avantages techniques (flexibilité), économiques (coût d'investissement inférieur) et environnementaux (moindre consommation d'énergie) qui invitent à en évaluer le potentiel dans le bassin Rhône Méditerranée et Corse.

Le Programme de Mesures du SDAGE Rhône – Méditerranée 2016-2021 prévoit, parmi les mesures territorialisées en lien avec son orientation fondamentale n° 7 et visant à « atteindre l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir » (Code RES0501), la possibilité de mettre en place des dispositifs de réalimentation artificielle des eaux souterraines.

C'est dans ce cadre que le BRGM et l'Agence de l'Eau RMC ont lancé le projet de recherche Étude de la Faisabilité de la Recharge Artificielle sur le bassin Rhône Méditerranée et Corse dans le cadre de la convention R&D 2016-2019 entre les deux établissements. L'ambition de ce projet est de pouvoir susciter des réflexions dans les territoires en déficit quantitatif où une solution de recharge artificielle pourrait s'avérer intéressante ou complémentaire à mettre en œuvre par rapport à des solutions plus classiques. Ce projet est divisé en deux phases :

- la phase 1 consistait à mettre en évidence l'intérêt de la recharge artificielle à partir d'expériences choisies en France et à l'international et à cartographier à l'échelle du bassin RMC les zones potentiellement favorables d'un point de vue purement technique. Cette phase a fait l'objet d'un rapport intermédiaire (Caballero et al. 2018 ; rapport BRGM/RP-67534-FR) ;
- la phase 2 consiste à explorer la faisabilité technique et économique d'un dispositif de recharge artificielle sur plusieurs territoires test, en travaillant à une échelle plus locale de façon à en tirer des conclusions et recommandations suffisamment généralisables. Le présent rapport décrit les résultats de cette analyse.

Lors de la phase 1, quatre cartes de faisabilité de la recharge artificielle (critères physiques et contraintes pour la recharge artificielle indirecte, critères physiques et contraintes pour la recharge artificielle directe) ont été obtenues par analyse spatiale multicritère à l'échelle du bassin. Le chapitre 2 de ce rapport décrit les modifications faites sur les cartes de faisabilité de la recharge directe et indirecte à l'échelle du bassin RMC réalisées à la suite du rapport précédent (rapport BRGM RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018). D'un point de vue de la faisabilité technique, les critères hydrogéologiques et géographiques physiques ont bénéficié de l'existence, en France, du référentiel hydrogéologique national (BDLISA - Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères). Celui-ci a ainsi permis de prendre en compte les caractéristiques des aquifères (libre/captif, type de porosité, type de fracturation et de perméabilité, lithologie, …) favorables ou non à un dispositif de recharge artificielle. Le caractère potentiellement infiltrant des formations géologiques a été approché par l'Indice de Développement et de Persistance des réseaux (IDPR). L'épaisseur de la zone non saturée a également été prise en compte de façon à intégrer la capacité des aquifères à absorber l'eau infiltrée. Ces paramètres, connus et cartographiés à l'échelle des bassins Rhône Méditerranée

et Corse, ont permis de produire des cartes de potentialité à la recharge artificielle (directe et indirecte) des aquifères à l'échelle du Bassin. Les nouvelles cartes intègrent notamment la nouvelle BDLISA (version 2018). Un bilan des sites favorables est donné pour chacune des régions. Ces cartes peuvent être consultées et téléchargées sur le lien suivant : http://carmen.carmencarto.fr/283/RA-AERMC.map.

Il convient de préciser que cette approche, a nécessité un certain nombre de simplifications et d'hypothèses pour pouvoir être menée à une échelle vaste (Bassin RMC) : l'hétérogénéité de certaines formations (notamment les entités dites « semi-perméables ») n'a pu être prise en compte, les aquifères karstiques ont été considérés a priori comme défavorables à la recharge artificielle, l'absence de données hydrodynamiques distribuées n'a pas permis d'intégrer, sur la durée, la capacité de stockage que conférait la porosité de l'aquifère… **Une analyse plus détaillée, incluant des données plus précises, de préférence distribuées dans l'espace, est nécessaire à l'échelle de chaque entité hydrogéologique pour vérifier et confirmer son aptitude potentielle à la recharge artificielle.**

Les cartes produites doivent donc être utilisées avec prudence dans le seul objectif d'identifier les secteurs potentiellement favorables à la recharge artificielle indirecte ou directe. Les contours de secteurs identifiés ne doivent pas être considérés comme ayant une précision suffisante à des échelles inférieures au 1/100 000ème, dans la mesure où ils sont fortement contraints par la précision avec laquelle les contours des entités BDLISA sont définis en surface (pour la recharge indirecte) et surtout en profondeur (pour la recharge directe).

Quatre territoires test ont été sélectionnés avec les gestionnaires locaux et l'AERMC. Ils sont considérés comme favorables à la recharge artificielle et les enjeux actuels amènent les gestionnaires des sites à s'intéresser à de nouveaux moyens de gérer la ressource en eau souterraine pour pallier les problèmes de quantité et / ou de qualité des eaux. Les quatre entités sélectionnées sont les suivantes:

- la nappe du bassin de Bièvre-Liers-Valloire (Isère – Drôme ; entité BDLISA 521AM) ;
- les nappes de la Vistrenque et des Costières (Gard ; entité BDLISA 647AA) ;
- la nappe des Sables Astiens de Valras-Agde (Hérault ; entité BDLISA 647AB) ;
- les alluvions de la Figarella (Haute Corse ; entité BDLISA 720CA21).

Un état des connaissances (chapitre 3) a été réalisé sur les différentes entités hydrogéologiques retenues pour mener une analyse à une échelle plus locale (contextes géologique, hydrogéologique, hydrologique ; usages de la ressource en eau et pressions relevées ; état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines et de surface). Cette partie permet d'inscrire l'analyse cartographique dans le cadre des problématiques propres à chacune des entités étudiées.

Au chapitre 4, les mêmes critères que ceux utilisés à l'échelle du Bassin et des Régions (voir chapitre 2), en y ajoutant une information relative à la présence de formations superficielles (potentiellement peu perméables) et en retirant le critère BDLISA (puisqu'une seule et même unité hydrogéologique est considérée), ont été appliqués à l'échelle de territoires test (aquifères ou masses d'eau souterraine) sélectionnés dans le Bassin pour cartographier la faisabilité technique de la recharge indirecte. Les contraintes liées à l'occupation du sol ont également été prises en compte en intégrant le Corine Land Cover.

Le chapitre 5 présente, pour chacun des quatre territoires test, la ressource en eau de surface disponible, ses caractéristiques en termes de quantité et qualité, sa disponibilité ainsi que l'objectif de volume annuel de recharge. Ces éléments permettront de dimensionner le dispositif de recharge artificielle.

Le chapitre 6 aborde le dimensionnement des dispositifs de recharge en termes de superficie et de transfert de l'eau en fonction du volume de recharge. Il propose notamment d'étudier la capacité de stockage de l'aquifère sur la durée, en prenant en compte sa diffusivité et la distance à de potentiels exutoires (sources et réseau hydrographique drainant la nappe). **Cet élément est particulièrement important dans la mise en place d'un dispositif de recharge artificielle car il conditionne l'efficacité du système sur le long terme.**

L'évaluation d'une fonction de coût distribuée (chapitre 7) a permis de calculer une cartographie de coût unitaire d'infiltration en chaque point des territoires test. Elle prend en compte les coûts opérationnels et d'investissement pour les différentes composantes d'un dispositif de recharge indirecte : prise d'eau, transfert, prétraitement, bassin d'infiltration et coûts annexes. La construction de cette fonction a mis en évidence le manque de données de coûts opérationnels disponibles et a en conséquence nécessité un certain nombre d'hypothèses sur les coûts.

Concernant les coûts unitaires estimés pour la recharge artificielle, il s'agit d'un coût exprimé en euros par m^3 d'eau infiltrée, sans garantie de récupération de ladite eau infiltrée. Son devenir est en effet incertain, en fonction des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de stockage, de la distance à de potentiels exutoires (sources, cours d'eau), de l'existence d'éventuels captages permettant de récupérer cette eau et plus spécifiquement du contexte local du dispositif de recharge artificielle incluant l'objectif du dispositif (lutte contre le biseau salé, soutien d'étiage d'un cours d'eau, lutte contre le déséquilibre quantitatif d'une masse d'eau souterraine…). L'unique façon de précisément estimer la part d'eau rechargée qui peut être valorisée suite à un dispositif est la modélisation numérique prenant en compte l'ensemble des paramètres jouant un rôle dans les écoulements de l'eau infiltrée. Cependant, une méthodologie permettant d'approcher les potentiels échanges entre un dispositif de recharge artificielle et les eaux de surface a été proposée. La solution analytique utilisée permet de calculer la part du volume infiltré qui rejoint un éventuel cours d'eau en relation avec l'aquifère après une certaine période d'infiltration. Il est particulièrement intéressant de noter que cette part (ratio entre le volume d'eau s'écoulant vers la surface et le volume d'eau total infiltré) est indépendante du volume infiltré et de la taille du bassin d'infiltration.

L'analyse de sensibilité effectuée sur les quatre territoires test a permis de mettre en évidence les caractéristiques majeures influant sur le coût unitaire de la recharge indirecte. Logiquement, ce sont les coûts variables (coût de prétraitement ou d'achat de l'eau) qui impactent le plus le coût final unitaire. La durée de vie du dispositif est également un élément important pour l'amortissement des coûts d'investissement.

La mise en commun des différents documents cartographiques produits a permis d'identifier des sites favorables, pour chacun des quatre territoires test, en leur associant un ordre de grandeur de coût (chapitre 8). Ce dernier reste encore incertain au vu du manque de données de référence disponibles dans la littérature. Ce manque de données économiques et financières sur les dispositifs de recharge artificielle est rencontré dans l'ensemble des pays où cette solution a été mise en œuvre. Le volet économique de la mise en place d'une solution de recharge artificielle reste un élément d'incertitude important. Sur chacun des territoires test, une étude de faisabilité est maintenant nécessaire pour affiner l'analyse effectuée présentée dans ce rapport au moyen notamment de l'acquisition de nouvelles données et en précisant les objectifs de recharge avec les gestionnaires locaux.

La méthodologie proposée dans cette étude peut être répliquée dans d'autres bassins du territoire français puisqu'elle repose sur des données cartographiques qui sont disponibles à l'échelle nationale. Dans un rapport à venir (Maréchal *et al.*, 2019), elle sera déclinée de façon simplifiée en intégrant un certain nombre de recommandations en vue de guider le maître d'ouvrage d'un nouveau projet de recharge artificielle.

Sommaire

1. Introduction 21

2. Cartographie de la faisabilité de la recharge artificielle à l'échelle du bassin RMC ..23

2.1. INTRODUCTION 23

2.2. METHODOLOGIE 23

2.3. DISPOSITIFS DE RECHARGE INDIRECTE 24
2.3.1. Les critères Physiques 24
2.3.2. Les critères de Contrainte 34

2.4. DISPOSITIFS DE RECHARGE DIRECTE 38
2.4.1. Les critères Physiques 38
2.4.2. Les critères de Contrainte 46

2.5. RESULTATS 49
2.5.1. Synthèse de la méthode 49
2.5.2. Cartes finales de faisabilité de la Recharge Artificielle sur le bassin RMC 50
2.5.3. Échelle du Bassin (Annexe 1) 55
2.5.4. Échelle régionale : Bourgogne Franche-Comté (disponible sur CD) 65
2.5.5. Échelle régionale : Auvergne-Rhône-Alpes (disponible sur CD) 66
2.5.6. Échelle régionale : Provence-Alpes-Côte d'Azur (disponible sur CD) 67
2.5.7. Échelle régionale : Occitanie (disponible sur CD) 68
2.5.8. Échelle régionale : Corse (disponible sur CD) 69

2.6. DISCUSSION DES LIMITES DE LA METHODE ET DES RESULTATS 70

3. Description des quatre territoires test 73

3.1. INTRODUCTION 73

3.2. PLAINE DE BIEVRE-LIERS-VALLOIRE (521AM) 74
3.2.1. Contexte géographique et géomorphologique 74
3.2.2. Géologie 75
3.2.3. Hydrogéologie 76
3.2.4. Eaux de surface 82
3.2.5. Usages de la ressource en eau 85
3.2.6. État des Eaux 90
3.2.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site 92

3.3. NAPPE DE LA VISTRENQUE ET DES COSTIERES (647AA) 93
3.3.1. Contexte géographique et géomorphologique 93
3.3.2. Géologie 95
3.3.3. Hydrogéologie 96
3.3.4. Eaux de surface 101

3.3.5. Usages de la ressource en eau 106
3.3.6. État des Eaux 109
3.3.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site 112

3.4. SABLES ASTIENS DE VALRAS - AGDE (647AB) 113
3.4.1. Contexte géographique et géomorphologique 113
3.4.2. Géologie 114
3.4.3. Hydrogéologie 117
3.4.4. Eaux de surface 121
3.4.5. Usages de la ressource en eau 126
3.4.6. État des Eaux 130
3.4.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site 131

3.5. ALLUVIONS DE LA FIGARELLA (720CA21) 132
3.5.1. Contexte géographique et géomorphologique 132
3.5.2. Géologie 132
3.5.3. Hydrogéologie 135
3.5.4. Eaux de surface 138
3.5.5. Usages de la ressource en eau 140
3.5.6. État des eaux 143
3.5.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site 144

4. Faisabilité technique : analyse multicritère spatiale à l'échelle des territoires test 145

4.1. INTRODUCTION 145

4.2. LES CRITERES PHYSIQUES 145
4.2.1. Propriétés des aquifères renseignées dans les bases de données BDLISA et BDRHF 145
4.2.2. La pente 148
4.2.3. L'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux) 149
4.2.4. L'épaisseur de la zone non saturée (EpZNS) 149
4.2.5. La perméabilité (K) 153
4.2.6. Le recouvrement 154
4.2.7. Carte des critères physiques 157

4.3. LES CRITERES DE CONTRAINTES 158
4.3.1. L'occupation du sol 158
4.3.2. Les zones inondables par remontée de nappe 159
4.3.3. Les zones protégées 160
4.3.4. Carte des critères de contrainte 161

4.4. SYNTHESE DE LA METHODOLOGIE 162

5. Analyse des ressources en eau de surface sur les quatre territoires tests 165

5.1. INTRODUCTION 165

5.2. VOLUME A RECHARGER ET DOME PIEZOMETRIQUE RESULTANT 165

5.2.1. Solution analytique pour le calcul du dôme piézométrique 166
5.2.2. Calcul de dômes piézométriques au droit des territoires test 167
5.2.3. Volumes à recharger retenus 169

5.3. QUANTITE D'EAU DE SURFACE DISPONIBLE 170
5.3.1. Données statistiques disponibles sur la Banque Hydro (http://hydro.eaufrance.fr/) 170
5.3.2. Données obtenues dans le cadre du SDAGE 2016-2021 170

5.4. LA QUALITE DE L'EAU DE SURFACE 171
5.4.1. La banque de données Qualité des cours d'eau des Agences de l'Eau 171
5.4.2. Les données de référence du SDAGE 2016-2021 sur l'état des milieux 172

5.5. NOMBRE DE JOURS DE RECHARGE ET DEBIT DE RECHARGE INSTANTANE 173

5.6. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE RETENUES 174

6. Dimensionnement des dispositifs de recharge indirecte 177

6.1. INTRODUCTION 177

6.2. SUPERFICIE DES BASSINS D'INFILTRATION ET DEBITS DE RECHARGE 178
6.2.1. Vitesse apparente d'infiltration (*i*) 178
6.2.2. Pertes par évaporation dans les bassins d'infiltration (α_{Evapo}) 179
6.2.3. Flux de la nappe vers les cours d'eau en fonction de la distance au cours d'eau 180
6.2.4. Estimation des superficies des bassins d'infiltration 183

6.3. TRANSFERT DE L'EAU ET DEBIT DE PRELEVEMENT 184
6.3.1. Distance entre point de pompage et bassin d'infiltration (*D*) 184
6.3.2. Hauteur manométrique (*HTM*) 185
6.3.3. Diamètre de canalisation d'adduction d'eau (di) 187
6.3.4. Fuites d'eau d'adduction 187
6.3.5. Volumes prélevés en eau de surface 187

6.5. SYNTHESE DES PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT (EXEMPLE REFERENCE) 188

7. Formulation et analyse des fonctions de coûts d'un dispositif de recharge indirecte 190

7.1. OBJECTIF ET CHOIX DES CRITERES DE COUTS 191
7.1.1. Objectif : développement d'une cartographie d'iso-coûts de la recharge artificielle indirecte 191
7.1.2. Type d'analyse économique des coûts 191
7.1.3. Choix des critères de coûts 191

7.2. COMPOSANTES DES COUTS DE DISPOSITIF RECHARGE ARTIFICIELLE INDIRECTE 193
7.2.1. Composantes des coûts d'investissement 193

7.2.2. Composantes des coûts de fonctionnement 194

7.3. FONCTIONS DES COUTS D'INVESTISSEMENT 195
7.3.1. Coût des études (*CI1*) 195
7.3.2. Coût de la prise d'eau (*CI2*) 196
7.3.3. Coût de transfert d'eau (CI_3) 197
7.3.4. Coût d'investissement de prétraitement (*CI4*) 199
7.3.5. Coût d'investissement foncier (*CI5*) 202
7.3.6. Coût de construction des bassins d'infiltration (*CI6*) 204
7.3.7. Coût d'investissement annexe (*CI7*) 205

7.4. FONCTIONS DES COUTS OPERATIONNELS 205
7.4.1. Coût d'achat d'eau et redevance de prélèvement d'eau (CO_1) 205
7.4.2. Coût opérationnel de l'ouvrage de pompage (*CO2*) 206
7.4.3. Coût énergétique de pompage (*CO3*) 206
7.4.4. Coût opérationnel de prétraitement (*CO4*) 208
7.4.5. Coût opérationnel des bassins d'infiltration (*CO5*) 208
7.4.6. Coût de surveillance (*CO6*) 210
7.4.7. Charges annuelles annexes (*CO7*) 210

7.5. ÉVALUATION DES COUTS : EXEMPLE REFERENCE 211
7.5.1. Coûts d'Investissement : exemple référence 211
7.5.2. Coûts Opérationnels : exemple référence 212
7.5.3. Coût unitaire total : exemple référence 214

7.6. ÉVALUATION ET CARTOGRAHIE DES COUTS : TERRITOIRES TEST 214
7.6.1. Plaine de Bièvre-Liers-Valloire 215
7.6.2. Nappes de la Vistrenque et des Costières 216
7.6.3. Sables Astiens d'Agde-Valras 218
7.6.4. Alluvions de la Figarella 220
7.6.5. Bilan sur l'analyse des cartes de coûts et les tableaux de coûts moyens 222

7.7. ANALYSE DE SENSIBILITE DES COUTS 223
7.7.1. Paramètres de référence des territoires test 223
7.7.2. Analyses de sensibilité des scénarios des territoires test 226

8. Secteurs retenus sur chaque territoire test 229

8.1. PARAMETRES PRIS EN COMPTE 229

8.2. PLAINE DE BIEVRE-LIERS-VALLOIRE 229
8.2.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants 229
8.2.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques 231

8.3. NAPPES DE LA VISTRENQUE ET DES COSTIERES 232
8.3.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants 232
8.3.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques 234

8.4. SABLES ASTIENS DE VALRAS-AGDE 235
8.4.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants 235
8.4.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques 237

8.5. ALLUVIONS DE LA FIGARELLA 238
8.5.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants 238
8.5.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques 240

9. Conclusion 243

Bibliographie 247

9.1. GENERAL 247

9.2. SITE DE BIEVRE-LIERS-VALLOIRE 249

9.3. SITE DES NAPPES DE LA VISTRENQUE ET DES COSTIERES 249

9.4. SITE DES SABLES ASTIENS 250

9.5. SITE DES ALLUVIONS DE LA FIGARELLA 251

Annexes 253

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schéma d'un dispositif de recharge artificielle indirecte (tiré de Miotlinski et al. 2010).. 22

Illustration 2 : Types de dispositifs de recharge artificielle indirecte (a) et directe (b) considérés dans l'analyse. 24

Illustration 3 : Propriétés des aquifères généralement retenues comme favorables aux dispositifs de recharge artificielle indirecte. 25

Illustration 4 : Présentation des codes utilisés dans la BDLISA en fonction des critères (Sandre, 2015). 27

Illustration 5 : Mise en relation des codes et valeurs décrivant des critères physiques de la BDLISA retenus, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte. La signification des codes est présentée dans l'Illustration 4 (les codes non indiqués indiquent une absence sur le territoire du bassin RMC). 29

Illustration 6 : Recharge Indirecte – Carte du critère physique BDLISA. 31

Illustration 7 : Mise en relation des valeurs moyennes de la pente obtenue pour chaque entité BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte. 32

Illustration 8 : Mise en relation des valeurs moyennes et de l'écart-type de l'IDPR obtenus pour chaque entité BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte 33

Illustration 9 : Mise en relation des valeurs moyennes de l'épaisseur de la ZNS obtenus pour chaque entité BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte 33

Illustration 10 : Regroupement et codification des types d'occupation du sol dans CORINE Land Cover sur le bassin RMC, vis-à-vis de la possibilité d'y installer un dispositif de recharge indirecte 35

Illustration 11 : Mise en relation des codes de la BD Carto avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte. 36

Illustration 12 : Classement du niveau de protection adopté pour les zones protégées sur le bassin RMC. 37

Illustration 13 : Mise en relation du regroupement des codes des zones protégées avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte. 37

Illustration 14 : Recharge Indirecte – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères de contrainte. 38

Illustration 15 : Superposition des entités BDLISA d'ordre 1,2, puis 3 le long des cours d'eau du fait des dépôts d'alluvions, pour la caractérisation des aquifères captifs en termes de recharge artificielle. 39

Illustration 16 : Mise en relation des codes et valeurs décrivant les différents critères physiques des entités BDLISA pour les 3 premiers ordres, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle directe. 40

Illustration 17 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, tous ordres d'entités BDLISA confondus. 42

Illustration 18 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, pour les entités affleurantes (ordre 1). 43

Illustration 19 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, pour les entités d'ordre 2. 44

Illustration 20 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, pour les entités d'ordre 3. 45

Illustration 21 : Regroupement et codification des types d'occupation du sol dans CORINE Land Cover sur le bassin RMC, vis-à-vis de la possibilité d'y installer un dispositif de recharge directe. 46

Illustration 22 : Mise en relation des codes des zones de protection environnementales et de la BD Carto caractérisant les critères de contrainte avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle directe. 47

Illustration 23 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères de contraintes. 47

Illustration 24 : Schéma méthodologique de construction des cartes de faisabilité de mise en œuvre de la recharge artificielle en fonction des critères physiques et de contrainte. 49

Illustration 25 : Cartes finales de favorabilité pour la mise en œuvre de la recharge artificielle **indirecte** vis-à-vis des critères physiques (gauche) et des contraintes (droite). 51

Illustration 26 : Cartes de favorabilité pour la mise en œuvre de la recharge artificielle **directe** vis-à-vis des critères physiques (gauche) et des contraintes (droite). 52

Illustration 27 : Cartes de favorabilité pour la mise en œuvre de la recharge artificielle **directe** vis-à-vis des critères physiques en fonction de la position verticale des entités (affleurante ou sous-couverture) dans la pile hydrogéologique. 53

Illustration 28 : Caractérisation de la faisabilité de la recharge artificielle indirecte des entités BDLISA contenues dans les masses d'eau souterraine affleurantes dont l'état quantitatif doit être préservé ou amélioré d'après le SDAGE RMC 2016-2021. 58

Illustration 29 : Portion des entités BDLISA présentant des caractéristiques relativement favorables à favorables à la recharge artificielle indirecte des entités BDLISA contenues dans les masses d'eau superficielles dont l'état quantitatif doit être préservé ou amélioré d'après le SDAGE RMC 2016-2021. 60

Illustration 30 : Tableau des masses d'eau superficielles à préserver ou en déséquilibre qui contiennent des portions d'aquifère superficiels à nappe libre, présentant des caractéristiques relativement favorables à favorables à la recahrge artificielle indirecte dans l'emprise de leur bassin versant. 62

Illustration 31 : Caractérisation de la faisabilité de la recharge artificielle directe des entités BDLISA contenues dans les masses d'eau souterraine profondes dont l'état quantitatif doit être préservé ou amélioré d'après le SDAGE RMC 2016-2021. 64

Illustration 32 : localisation des quatre territoires test sur la carte de potentialité de la recharge indirecte (BLV : Bièvre-Liers-Valloire, VC : Vistrenque-Costières, Ast : Astien à Agde-Valras, Fig : Figarella). 73

Illustration 33 : Carte de l'altitude topographique du bassin de Bièvre-Valloire (Martin et al., 2008a). 74

Illustration 34 : Schéma géologique du bassin de Bièvre-Valloire (Dubar et al.,1994). 75

Illustration 35 : Coupe géologique des terrasses de la vallée de Valloire (Dubar et al.,1994). 76

Illustration 36 : Coupe hydrogéologique nord-sud. Schéma proposé des écoulements et des échanges entre les sables molassiques et les alluvions fluvio-glaciaires (Martin et al., 2008b). 77

Illustration 37 : Carte de la piézométrie de la nappe alluviale de Bièvre-Liers-Valloire en 1994, et profondeur de la nappe (Martin et al., 2008a). 78

Illustration 38 : Profil est-ouest du bassin de Bièvre-Valloire (Martin et al., 2008a)..... 78

Illustration 39 : Carte du substratum de la plaine de Bièvre-Valloire (Dubar et al.,1994). 80

Illustration 40 : Tableau de synthèse hydrogéologique du bassin de Bièvre-Valloire (sources principales : Dubar et al (1994) et SOGREAH (2008)). 81

Illustration 41 : Carte des principaux bassins-versants et contour de l'entité aquifère des alluvions fluvio-glaciaires de Bièvre-Liers-Valloire (Martin et al., 2008a). 83

Illustration 42 : Récapitulatif des données Quantité des eaux de surface pour le site de la Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles). 84

Illustration 43 : Carte de l'inventaire des zones humides iséroises du basin versant de Bièvre-Liers-Valloire (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2016). 85

Illustration 44 : Carte d'occupation des sols simplifiée (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011)..... 86

Illustration 45 : Volumes prélevés dans les alluvions et du nombre d'ouvrages utilisés pour les différents usages dans le bassin Bièvre-Valloire, pour l'année 2009 (AnteaGroup, 2012). 86

Illustration 46 : Répartition des usages de l'eau des alluvions en 2009 (AnteaGroup, 2012). 86

Illustration 47 : Identification des zones potentiellement déficitaires à l'horizon 2025 (AnteaGroup, 2012). 87

Illustration 48 : Répartition géographique des prélèvements souterrains en 2007 (SOGREAH, 2011). 88

Illustration 49 : Répartition géographique des rejets souterrains en 2007 (SOGREAH, 2011). 89

Illustration 50 : Récapitulatif des volumes prélevables définis par le SAGE Bièvre-Liers-Valloire. 89

Illustration 51 : Carte des concentrations en nitrates dans la nappe de Bièvre-Liers-Valloire (année 2008) (CLE SAGE Bièvre Liers Valloire, 2011). 91

Illustration 52 : Carte de l'état physico-chimique des cours d'eau sur le secteur de la nappe de Bièvre-Liers-Valloire (CLE SAGE Bièvre Liers Valloire, 2011). 92

Illustration 53 : Carte de l'entité 647AA et localisation des principales communes et axes routiers (source : http://vistrenque.fr/les-nappes). 93

Illustration 54 : Carte de localisation des sous-entités locales (AnteaGroup, 2015). 94

Illustration 55 : Coupe géologique schématique réalisée au travers des sous-entités 150A, 150B et 150C. ... 96
Illustration 56 : Carte piézométrique de la sous-entité 150A, pour le mois d'août 2006 (Pinzelli, 2006). ... 99
Illustration 57 : Tableau de synthèse hydrogéologique pour les sous entités de la nappe de la Vistrenque et des Costières. ... 100
Illustration 58 : Carte du réseau hydrographique à l'échelle du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières (GINGER, 2010a). ... 102
Illustration 59 : Cartes des installations BRL sur les secteurs Nîmes – Montpellier (source : BRL). ... 103
Illustration 60 : Récapitulatif des données quantité des eaux de surface pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles). ... 104
Illustration 61 : Cartes des milieux naturels remarquables à l'échelle du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières (GINGER, 2010a). ... 105
Illustration 62 : Carte de l'occupation du sol sur le secteur du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières (GINGER, 2010). ... 106
Illustration 63 : Synthèse des volumes utilisés pour l'ensemble des usages dans le périmètre du SAGE (données de 2010). ... 107
Illustration 64 : Localisation des captages AEP et stations BRL (GINGER, 2010a). ... 108
Illustration 65 : Estimations de l'augmentation des prélèvements dans la nappe de la Vistrenque et des Costières (AnteaGroup, 2015). ... 109
Illustration 66 : Teneurs en nitrates dans les nappes mesurées sur l'année hydrologique 2011-2012 (EPTB Vistre et SMEGNV, 2014). ... 111
Illustration 67 : Dépassements des normes de concentration en pesticides sur les captages AEP, pour les années 2010, 2011 et 2012 (EPTB Vistre et SMEGNV, 2014). ... 111
Illustration 68 : Délimitation de la nappe astienne et affleurements en jaune (d'après SMETA 2007). ... 114
Illustration 69 : Carte géologique du secteur, et secteurs affleurants encadrés (GINGER, 2010c). ... 116
Illustration 70 : Coupe schématique illustrant l'épaississement des formations en allant vers la mer (GINGER, 2010c). ... 116
Illustration 71 : Représentation schématique des échanges entre la nappe astienne et les eaux superficielles et souterraines (GINGER, 2012a). ... 118
Illustration 72 : Bilan hydrologique de la nappe astienne (GINGER, 2012a). ... 118
Illustration 73 : Carte piézométrique de la nappe astienne (GINGER, 2012a) ... 119
Illustration 74 : Tableau de synthèse hydrogéologique pour la nappe des sables astiens. ... 120
Illustration 75 : Carte localisant les cours d'eau et étangs ainsi que leurs bassins versants, dans le périmètre de la nappe astienne (d'après l'Atlas cartographique réalisé dans le cadre du SAGE de la nappe astienne par GINGER, 2011). ... 121
Illustration 76 : Plan schématique d'alimentation du Canal des deux Mers (dont le Canal du Midi, au Sud). ... 123
Illustration 77 : Aménagements hydrauliques BRL: représentation schématique (en pointillés rouges) du tracé du projet AquaDomitia (source : www.brl.fr). ... 124
Illustration 78 : Récapitulatif des données Quantité des eaux de surface pour le site des sables astiens d'Agde-Valras (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles). ... 124
Illustration 79 : Carte localisant les milieux naturels Inventaires et Gestion écologique dans le périmètre de la nappe astienne (d'après l'Atlas cartographique réalisé dans le cadre du SAGE de la nappe astienne par GINGER, 2011). ... 126

Illustration 80 : Carte de l'occupation des sols, dans le périmètre de la nappe astienne (d'après l'Atlas cartographique réalisé dans le cadre du SAGE de la nappe astienne par GINGER, 2011). 127

Illustration 81 : Bilan des prélèvements effectués sur la nappe astienne en 2009 (d'après les données du SMETA). 127

Illustration 82 : Carte de l'évolution des pressions sur la nappe astienne d'ici à 2030 (SMETA, 2014). 128

Illustration 83 : Volume prélevable (m^3/an) par unité de gestion et par mois défini à partir des niveaux objectifs pour la gestion locale de la nappe (SMETA, 2014). 129

Illustration 84 : Unités de gestion (en rouge, affichant des déficits mensuels les plus significatifs) et pressions exercées par les différents usages (SMETA, 2014). 129

Illustration 85 : Prélèvements récents des usagers de la nappe astienne et évolution de leurs besoinsen eau à l'échéance 2030 (SMETA, 2014.) 130

Illustration 86 : Carte de localisation de l'entité 720CA21 (point noirs: forages). 133

Illustration 87 : Contexte géologique de la nappe alluviale de la Figarella. 134

Illustration 88 : Tableau de synthèse hydrogéologique des alluvions de la Figarella. 135

Illustration 89 : Carte piézométrique du secteur aval (champ captant) de la nappe de la Figarella au 27/09/2017(données BRGM Corse). 136

Illustration 90 : Schématisation d'un épisode de rentrant salé. 137

Illustration 91 : Carte de localisation des réseaux d'eau brute et des réseaux AEP en Balagne (OEHC). En rouge, secteur de la Figarella. 139

Illustration 92 : Récapitulatif des données Quantité des eaux de surface pour le site des alluvions de la Figarella (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles). 139

Illustration 93 : Carte des zones protégées recensées au niveau de l'entité 720CA21. 140

Illustration 94: Carte de l'occupation du sol au niveau de l'entité 720CA21 (source : CORINE Land Cover 2012). 141

Illustration 95 : Répartition des sources et usages de l'eau utilisée dans la vallée de la Figarella (informations transmises par l'OEHC). 143

Illustration 96 : Présentation des codes utilisés dans la BDLISA en fonction des critères (Sandre, 2015). 146

Illustration 97 : Système de notation des critères de la BDLISA tiré de l'étude réalisée à l'échelle du bassin RMC. 147

Illustration 98 : Récapitulatif des notes BDLISA (arrondies) pour les 5 entités étudiées (*: note attribuée aux secteurs libres de la nappe des Sables Astiens). 147

Illustration 99 : Liens entre les entités BDLISA étudiées et les entités hydrogéologiques RHF de niveau 2 et 3, et propriétés associées. 148

Illustration 100 : Mise en relation des valeurs de la pente obtenues, avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte. 149

Illustration 101 : Mise en relation des valeurs de l'IDPR avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte. 149

Illustration 102 : Mise en relation des valeurs d'épaisseur de la ZNS avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte. 150

Illustration 103 : Densité des points de suivi piézométrique pour chaque entité d'intérêt. 151

Illustration 104 : Récapitulatif des cartes piézométriques existantes pour chaque site étudié afin de reconstituer une carte d'épaisseur de la ZNS locale. 152

Illustration 105 : Récapitulatif des cartes ou données de perméabilités utilisées pour chaque site étudié. 153

Illustration 106 : Mise en relation du critère Perméabilité avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte. 154

Illustration 107 : Mise en relation du critère Recouvrement avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte. 155

Illustration 108 : Récapitulatif des formations recouvrant les entités d'intérêt. 157

Illustration 109 : Mise en relation des codes de regroupement de la BD CORINE Land Cover et de la BD Carto avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte..... 159

Illustration 110 : Exemple de cartes de risque de débordement de nappe, au droit des alluvions de la Figarella. À gauche, la carte de remontée de nappe réalisée par le BRGM en 2018 (Brugeron et al., 2018) ; à droite, la carte recréée dans le cadre de la présente étude. 160

Illustration 111 : Classement du niveau de protection adopté pour les zones protégées à l'échelle des 4 territoires test. 161

Illustration 112 : Mise en relation du regroupement des codes des zones protégées avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte. 161

Illustration 113 : Tableau récapitulatif de la démarche adoptée à l'échelle des territoires test, en comparaison avec l'analyse menée à l'échelle du bassin RMC. 163

Illustration 114 : (a) Vue en plan d'un bassin d'infiltration de forme rectangulaire, (b) coupe schématique du dôme piézométrique induit par l'infiltration, d'après https://wiki.inowas.hydro.tu-dresden.de/t02-groundwater-mounding-hantush/ 166

Illustration 115 : Paramètres utilisés dans la solution analytique de Hantush pour calculer le dôme piézométrique. 168

Illustration 116 : Résultat graphique de l'estimation des dômes piézométriques : exemple du site de Bièvre-Liers-Valloire..... 168

Illustration 117 : Récapitulatif des volumes à recharger et des études associées à ces estimations. 169

Illustration 118 : Nombres de jours de remplisage de chacun des bassins et débit d'infiltration résultant. 174

Illustration 119 : Tableau récapitulatif des ressources en eau de surface conservées pour chaque site..... 175

Illustration 120 : Schéma simplifié d'un dispositif type de recharge artificielle par bassin d'infiltration. 178

Illustration 121: Relation empirique observée entre vitesse apparente d'infiltration et la perméabilité horizontale, tiré de Detay (1997) d'après Bourguet (1971)..... 179

Illustration 122 : Vitesses d'infiltration apparentes obtenues au moyen de la relation empirique de Bourguet (1971). 179

Illustration 123 : Évapotranspiations potentielles annuelles moyennes des quatre territoires test sur la période 1958-2014. 180

Illustration 124 : Schéma explicatif de l'alimentation d'un cours d'eau par une nappe (source : http://sigessn.brgm.fr). 180

Illustration 125 : Schéma d'un dispositif de recharge indirecte situé à une distance d'une rivière. 181

Illustration 126 : Ratios volumes alimentant les cours d'eau/volumes stockés en nappe par tranche de distances par rapport aux cours d'eau, pour les quatre territoires test. 182

Illustration 127 : Carte d'importance du ratio volumes alimentant les cours d'eau/volumes stockés en nappe par tranche de distances par rapport aux cours d'eau, pour les alluvions de la Figarella (gauche), et les nappes de la Vistrenque et des Costières (droite.) . 183

Illustration 128 : Estimation des superficies moyennes de bassins d'infiltration pour les quatre territoires test avec i moyen calculé à partir des cartes d'infiltration issues des cartes de perméabilité pour chaque site. 183

Illustration 129 : Définition du paramètre D. 184

Illustration 130 : Estimation des distances maximale (en m) entre le linéaire des eaux de surface et les zones potentielles de recharge artificielle. 185

Illustration 131 : Définition du paramètre de relevage H. 186

Illustration 132 : Estimation du paramètre H (en m) pour les quatre sites. 186

Illustration 133 : Volumes prélevés en eau de surface pour les quatre sites. 187

Illustration 134 : Tableau récapitulant les critères de débits/volumes de la recharge, dans le cas de l'exemple référence. 188

Illustration 135 : Tableau récapitulant les critères de dimensionnement du bassin d'infiltration, en considérant les débits décrits en Illustration 134, dans le cas de l'exemple référence. 188

Illustration 136 : Schématisation des indicateurs de coûts recharge artificielle par rapport au temps. 192

Illustration 137 : Répartition des différentes composantes de coûts d'investissement (CI) et coûts opérationels (CO) du dispositif recharge artificielle indirecte. 195

Illustration 138 : Fonction de coût unitaire d'investissement en ouvrage de pompage (SOGREAH, 2010). 196

Illustration 139 : Débit Qrm_bass en l/s des quatre territoires test. 197

Illustration 140 : Fonctions de coût unitaire d'investissement en transfert d'eau (SOGREAH, 2010). 198

Illustration 141 : Coûts indicatifs des différents procédés de traitement d'eau potable (Corisco-Perez, 2006). 200

Illustration 142 : Coûts de traitement retenus dans l'étude UFC-Choisir (2007). 201

Illustration 143 : Analyse de la variabilité des données VVT en France. 203

Illustration 144 : Hypothèses retenues pour l'ajustement des VVT en fonction de l'occupation des sols. 203

Illustration 145 : Tableau récapitulatif des VVT_aj minimales, moyennes et maximales obtenues pour les quatre territoires test. 204

Illustration 146 : Grille tarifaire de l'électricité offre Bleu d'EDF (févier 2018) 207

Illustration 147 : Photos du raclage d'un bassin de Crépieux-Charmy (Lyon): pendant l'opération (A), le substrat raclé (B), et un bassin avant (c) et après (D) raclage (Gette-Bouvarot, 2014). 210

Illustration 148 : Tableau récapitulant les critères et résultats de coûts d'investissement, en considérant le dimensionnement décrit en § 6.4, dans le cas de l'exemple référence. 211

Illustration 149 : Graphique illustrant la part de chaque poste de coût d'investissement sur le CI_{total}, dans le cas de l'exemple référence. 212

Illustration 150 : Tableau récapitulant les critères et résultats de coûts opérationnels, en considérant le dimensionnement décrit en § 6.4, dans le cas de l'exemple référence. 213

Illustration 151: Graphique illustrant la part de chaque poste de coût opérationnel sur le CO_{total}, dans le cas de l'exemple référence. 213

Illustration 152 : Tableau récapitulant les critères et résultats des coûts totaux, dans le cas de l'exemple référence. 214

Illustration 153 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire. 215

Illustration 154 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée, pour le site de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire. 216

Illustration 155 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières. 217

Illustration 156 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée, pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières. 218

Illustration 157 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site des sables astiens d'Agde-Valras (affleurements). 219

Illustration 158 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée, pour le site des sables astiens d'Agde-Valras (affleurements). 220

Illustration 159 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site des alluvions de la Figarella. 221

Illustration 160 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée (ici, réseau d'eau brute de l'OEHC), pour le site des alluvions de la Figarella. 222

Illustration 161 : Scénario de référence pour le site de Bièvre-Liers-Valloire (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité. 224

Illustration 162 : Scénario de référence pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité. ... 224

Illustration 163 : Scénario de référence pour le site des affleurements de sables astiens (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité. 225

Illustration 164 : Scénario de référence pour le site des alluvions de la Figarella (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité. 225

Illustration 165 : Évolution de la sensibilité du coût de la recharge en fonction de la durée de vie du dispositif de recharge, du coût unitaire de traitement de l'eau, du volume annuel de rechage et de la distance entre le point de prélèvement et le bassin d'infiltration. Cas de Bièvres-Liers-Valloire. 226

Illustration 166 : Tableau récapitulatif des observations résultant des analyses de sensibilité sur chacun des territoires test. 227

Illustration 167 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le territoire de Bièvre-Liers-Valloire. Les secteurs intéressants sont entourés en rouge. 230

Illustration 168 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire. 231

Illustration 169 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire de Bièvre-Liers-Valloire ; * (E.T. écart type). 232

Illustration 170 : Tableau récapitulant les contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire de Bièvre-Liers-Valloire. 232

Illustration 171 : Tableau récapitulant les coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire de Bièvre-Liers-Valloire (*E.T. écart type). 232

Illustration 172 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières. Les secteurs intéressants sont entourés en rouge. 233

Illustration 173 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières. 234

Illustration 174 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières (* E.T. écart type). 235

Illustration 175 : Tableau récapitulatif des contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières. 235

Illustration 176 : Tableau récapitulatif des coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières. 235

Illustration 177 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le territoire des sables astiens (affleurements). Le secteur intéressant est entouré en rouge. 236

Illustration 178 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire des sables astiens (affleurements). 237

Illustration 179 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire des sables astiens (affleurements). 238

Illustration 180 : Tableau récapitulatif des contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire des sables astiens (affleurements). 238

Illustration 181 : Tableau récapitulatif des coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire des sables astiens (affleurements). 238

Illustration 182 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le site des alluvions de la Figarella. Les secteurs intéressants sont entourés en rouge. 239

Illustration 183 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire des alluvions de la Figarella. 240

Illustration 184 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire des alluvions de la Figarella. 241

Illustration 185 : Tableau récapitulatif des contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire des alluvions de la Figarella. 241

Illustration 186 : Tableau récapitulafif des coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire des alluvions de la Figarella. 241

Liste des annexes

Annexe 1 Cartes de la faisabilité (sur base de critères physiques et de contraintes) de la recharge artificielle indirecte et directe à l'échelle du bassin RMC 255

Annexe 2 Cartes du critère « Pente » à l'échelle des quatre territoires test 263

Annexe 3 Cartes du critère « IDPR » à l'échelle des 4 territoires test 269

Annexe 4 Cartes du critère « EpZNS » à l'échelle des 4 territoires test 275

Annexe 5 Cartes du critère « Perméabilité » à l'échelle des 4 territoires test 281

Annexe 6 Cartes de présence de recouvrement à l'échelle des sites de Bièvre-Liers-Valloire, Vistrenque et Costières 287

Annexe 7 Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques, à l'échelle des 4 territoires test 291

Annexe 8 Cartes du critère « Occupation du sol » à l'échelle des 4 territoires test 297

Annexe 9 Cartes du critère « Débordement de nappe » à l'échelle des 4 territoires test 303

Annexe 10 Cartes du critère « Zones protégées » à l'échelle des 4 territoires test 309

Annexe 11 Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères de contraintes, à l'échelle des 4 territoires test 315

Annexe 12 Résultats de l'analyse quantitative sur les masses d'eau de surface des différents territoires test 321

Annexe 13 Résultats de l'analyse qualitative sur les masses d'eau de surface des différents territoires test 333

Annexe 14 Fiche tarifaire 2018 BRL : Eau brute à usage agricole 337

Annexe 15 Analyses de sensibilité : graphiques de sensibilité du coût unitaire de recharge CRA à l'évolution de 14 critères de la fonction de coût, pour les 4 territoires test 341

Annexe 16 Analyses de sensibilité : tableau synthétisant les résultats des analyses sur les 14 critères testés, pour les 4 territoires test 357

1. Introduction

Les eaux souterraines représentent une ressource essentielle pour l'économie de nombreux territoires en France. Toutefois du fait des besoins importants à satisfaire pour les différentes catégories d'usage (en particulier l'alimentation en eau potable et l'irrigation agricole en période estivale), certaines masses d'eau se trouvent en situation de déséquilibre structurel. La réponse classique des gestionnaires consiste à définir un volume prélevable, puis à plafonner les prélèvements et rechercher des ressources de substitution (retenues collinaires, transferts interbassin). Une solution complémentaire, encore peu explorée en France, consiste à augmenter artificiellement la recharge de ces masses d'eau. Largement mise en œuvre dans d'autres pays notamment en Australie, Israël, Espagne, la recharge artificielle (RA) présente des avantages techniques (flexibilité), économiques (coût d'investissement inférieur) et environnementaux (moindre consommation d'énergie) qui invitent à en évaluer le potentiel dans le bassin Rhône Méditerranée et Corse.

Le Programme de Mesures du SDAGE Rhône – Méditerranée 2016-2021 prévoit, parmi les mesures territorialisées en lien avec son orientation fondamentale n° 7 et visant à « atteindre l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir » (Code RES0501), la possibilité de mettre en place des dispositifs de réalimentation artificielle des eaux souterraines.

C'est dans ce cadre que le BRGM et l'Agence de l'Eau RMC ont lancé le projet de recherche Étude de la Faisabilité de la Recharge Artificielle sur le bassin Rhône Méditerranée et Corse dans le cadre de la convention R&D 2016-2019 entre les deux établissements. L'ambition de ce projet est de pouvoir susciter des réflexions dans les territoires en déficit quantitatif où une solution de recharge artificielle pourrait s'avérer intéressante ou complémentaire à mettre en œuvre par rapport à des solutions plus classiques. Ce projet est divisé en deux phases :

- la phase 1 consistait à mettre en évidence l'intérêt de la recharge artificielle à partir d'expériences choisies en France et à l'international et à cartographier à l'échelle du bassin RMC les zones potentiellement favorables d'un point de vue purement technique. Cette phase a fait l'objet d'un rapport intermédiaire (Caballero et al. 2018 ; rapport BRGM/RP-67534-FR) ;
- la phase 2 consiste à explorer la faisabilité technique et économique d'un dispositif de recharge artificielle sur plusieurs territoires test, en travaillant à une échelle plus locale de façon à en tirer des conclusions et recommandations suffisamment généralisables. Le présent rapport décrit les résultats de cette analyse.

Lors de la phase 1, quatre cartes de faisabilité de la recharge artificielle (critères physiques et contraintes pour la recharge artificielle indirecte, critères physiques et contraintes pour la recharge artificielle directe) ont été obtenues par analyse spatiale multicritère à l'échelle du bassin. Le chapitre 2 de ce rapport décrit les modifications faites sur les cartes de faisabilité de la recharge directe et indirecte à l'échelle du bassin RMC réalisées à la suite du rapport précédent (rapport BRGM RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018). Elles intègrent notamment la nouvelle BDLISA (version 2018).

Quatre territoires test ont été sélectionnés avec les gestionnaires locaux et l'AERMC. Ils sont considérés comme favorables à la recharge artificielle et les enjeux actuels amènent les gestionnaires des sites à s'intéresser à de nouveaux moyens de gérer la ressource en eau souterraine pour pallier les problèmes de quantité et / ou de qualité des eaux. Les quatre entités sélectionnées sont les suivantes. Les quatre entités sélectionnées sont les suivantes :

1. la nappe du bassin de Bièvre-Liers-Valloire (Isère – Drôme ; entité BDLISA[1] 521AM) ;
2. les nappes de la Vistrenque et des Costières (Gard ; entité BDLISA 647AA) ;
3. la nappe des Sables Astiens de Valras-Agde (Hérault ; entité BDLISA 647AB) ;
4. les alluvions de la Figarella (Haute Corse ; entité BDLISA 720CA21).

Un état des connaissances (chapitre 3) est réalisé sur les différentes entités hydrogéologiques retenues pour mener une analyse à une échelle plus locale (contextes géologique, hydrogéologique, hydrologique ; usages de la ressource en eau et pressions relevées ; état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines et de surface). Cette partie permet d'inscrire l'analyse cartographique dans le cadre des problématiques propres à chacune des entités étudiées.

Une analyse spatiale multicritère a été réalisée pour étudier la faisabilité de la **recharge artificielle indirecte** (Illustration 1) sur chacun de ces sites, en utilisant les informations prises en compte dans la cartographie à l'échelle du bassin RMC (voir chapitre 2), en y intégrant les données disponibles spécifiques à chacun des sites (piézométrie, paramètres hydrodynamiques, recouvrement des formations aquifères, occupation du sol, etc.). Cette analyse fait l'objet du chapitre 4.

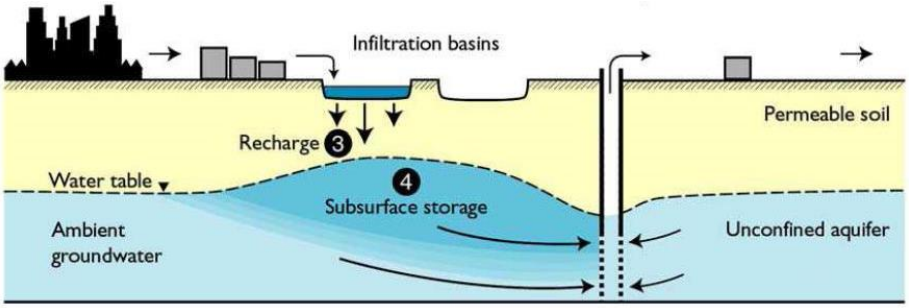


Illustration 1 : Schéma d'un dispositif de recharge artificielle indirecte (tiré de Miotlinski et al. 2010).

Le chapitre 5 présente, pour chacun des quatre territoires test, la ressource en eau de surface disponible, ses caractéristiques en termes de quantité et qualité, sa disponibilité ainsi que l'objectif de volume annuel de recharge.

Le chapitre 6 aborde le dimensionnement des dispositifs de recharge en termes de superficie et de transfert de l'eau en fonction du volume de recharge.

Le chapitre 7 décrit une fonction de coût destinée à cartographier le coût unitaire (exprimé en €/m3) de la recharge artificielle indirecte en fonction des caractéristiques hydrogéologiques des sols, de la distance à la ressource en eau de surface et de sa qualité. Une analyse de la sensibilité du coût à plusieurs aux paramètres principaux est réalisée. Le chapitre 8 décrit les caractéristiques du site idéal retenu pour chacun des territoires test. Les conclusions et recommandations résultant de ce travail sont décrites au chapitre 9.

[1] BDLISA : Base de Données des LImites des Systèmes Aquifères.

2. Cartographie de la faisabilité de la recharge artificielle à l'échelle du bassin RMC

2.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de développer et de tester une méthode de cartographie de la faisabilité/potentialité de la recharge artificielle adaptée à un grand territoire tel que le Bassin RMC.

De nombreux facteurs doivent être pris en compte durant la procédure de sélection d'un site pour de la recharge artificielle. Outre la disponibilité en eau, la capacité de l'aquifère à stocker l'eau et celle du sol à laisser l'eau s'infiltrer, il y a des critères économiques, environnementaux et institutionnels à prendre en compte. Ce qui rend le processus de choix relativement complexe. L'analyse cartographique multicritères intégrée dans un système d'information géographique permet d'identifier les priorités pour un projet recharge artificielle donné (Gomes et Lins 2002).

Ces méthodes doivent s'adapter aux types de données qui sont produites et disponibles dans la région d'étude, à savoir en France pour notre étude ; ainsi qu'aux données qui sont disponibles sur toute la superficie de la zone d'étude, à savoir le Bassin. La méthode développée dans cette étude repose sur l'existence, à l'échelle de la France, de deux données particulièrement importantes : (i) la BDLISA pour obtenir une information la plus précise possible sur la capacité de l'aquifère à stocker de l'eau et (ii) l'Indice de Persistance des Réseaux (IDPR) qui permet d'obtenir une information qualitative sur le comportement ruisselant/infiltrant du sol et du sous-sol.

La méthodologie développée est décrite dans le paragraphe suivant ; elle est adaptée pour chacun des types de recharge artificielle: la recharge directe par injection en forage et la recharge indirecte par bassin d'infiltration. Elle exploite des données disponibles à l'échelle de la France et pourra ainsi être appliquée dans d'autres bassins en France.

La méthode a d'abord été décrite dans le rapport intermédiaire de cette étude (BRGM RP-67534-FR ; Caballero *et al*., 2018). Un certain nombre de modifications et améliorations ont été opérées depuis lors. Les paragraphes suivants décrivent la méthodologie dans son ensemble et la mise à jour des cartes produites.

Lors des échanges avec les hydrogéologues des délégations régionales BRGM du bassin RMC, il apparaît que la codification de plusieurs entités BDLISA ait évolué entre la version 2015 utilisée dans le cadre de la phase 1 (BRGM RP-67534-FR) et la dernière version de 2018. Afin d'être en cohérence avec l'état actuel de la connaissance, les cartes de faisabilité de la recharge artificielle ont été reconstruites à partir de la version 2018 de BDLISA.

2.2. MÉTHODOLOGIE

Pour conduire une analyse sur la possibilité de mettre en œuvre des dispositifs de recharge artificielle sur le territoire du bassin RMC, deux catégories de critères ont été identifiées: (i) les critères dits *physiques* (relatifs aux caractéristiques physiques du territoire) et (ii) les critères dits de *contrainte* (relatifs à la disponibilité et l'occupation du sol sur le territoire). Les critères à décrire dans chaque catégorie dépendent du type de dispositif de recharge artificielle que nous allons considérer, suivant qu'il appartient aux techniques de recharge indirecte ou directe (Illustration 2).

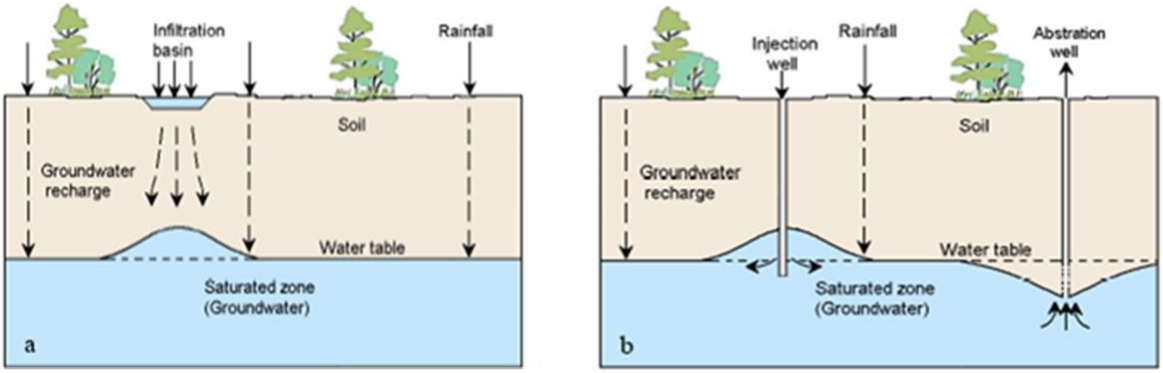


Illustration 2 : Types de dispositifs de recharge artificielle indirecte (a) et directe (b) considérés dans l'analyse.

Pour chacun des critères des deux catégories, une plage de valeurs est considérée qu'il s'agira de codifier en termes de *faisabilité* de la recharge par rapport à ce critère, selon le type de technique de recharge artificielle considérée (indirecte ou directe). **Il convient de remarquer ici que le terme de faisabilité, tel qu'utilisé dans ce rapport, n'inclut pas les notions de dimensionnement technique et de viabilité économique classiquement considérées dans une étude de faisabilité. Il ne prend non plus pas en compte la source, qualité, volume d'eau utilisée pour la recharge**. Une fois la valorisation réalisée, les critères considérés doivent être combinés, en appliquant une pondération représentative de leur importance relative, pour obtenir une note globale pour les critères physiques et de contraintes.

Ce chapitre présente pour chaque type de dispositif, les critères considérés, les éléments issus de la bibliographie permettant de définir leur caractère favorable/défavorable pour la mise en œuvre d'un dispositif de recharge artificielle, la donnée utilisée pour les décrire à l'échelle du bassin dans le cadre de cet exercice et la codification adoptée.

Les hypothèses, données et résultats issus de ce travail ont été présentés et discutés dans le cadre d'un « atelier de cartographie » le 27 mars 2017. Les discussions qui s'y sont tenues ont donné lieu à des modifications qui sont aussi documentées et intégrées aux cartes finales de façon à illustrer la sensibilité de l'analyse.

En fin de chapitre, les cartes de favorabilité des entités hydrogéologiques du bassin RMC vis-à-vis de l'implantation de dispositifs de recharge indirecte et directe sont commentées. Pour chaque région du bassin, les entités hydrogéologiques présentant un caractère favorable sont identifiées.

2.3. DISPOSITIFS DE RECHARGE INDIRECTE

2.3.1. Les critères Physiques

Les critères physiques à considérer pour ce type de dispositif concernent essentiellement les propriétés des aquifères que l'on cherche à recharger, la pente topographique, la capacité des formations à infiltrer de l'eau et l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

a) *Propriétés des aquifères*

Pour ce qui concerne les aquifères, les propriétés qu'il convient de caractériser pour discuter de leur intérêt vis-à-vis de la recharge artificielle indirecte sont synthétisées sur l'Illustration 3.

Propriétés	Perméabilité	Coefficient d'emmagasinement	Diffusivité	Profondeur
	Pour une porosité continue: $3{,}9\ 10^{-4} < K < 10^{-2}$ m/s (Casanova et al. 2012, Wuilleumier et Seguin 2008)	Pour une porosité continue : 3 à 8 % (Casanova et al. 2012, Wuilleumier et Seguin (2008)	10^{-8} à $6{,}4.10^{-1}$ m²/s (Casanova et al. 2012, Wuilleumier et Seguin 2008) ou temps de résidence de 6 mois (Rahman et al. 2011)	Entre 5 (Rahman et al. 2011) et 40 m (Wuilleumier et Seguin 2008)

Illustration 3 : Propriétés des aquifères généralement retenues comme favorables aux dispositifs de recharge artificielle indirecte.

En résumé, les techniques de recharge indirecte (infiltration d'eau depuis la surface) concernent par définition les aquifères libres, alors que la recharge directe (injection via un forage) concerne plutôt les aquifères captifs (même si on peut l'envisager sur des aquifères libres en profondeur). D'une manière générale, l'analyse de la littérature montre que les aquifères les plus intéressants pour la recharge artificielle sont ceux à porosité d'interstice ou à double porosité tels que les alluvions, les cônes de déjection, les formations sableuses, gréseuses etc. Les aquifères karstiques peuvent être considérés dans le cas d'une « gestion active » de la ressource consistant à récupérer l'eau au moyen de pompages en forages au niveau de l'exutoire principal de l'aquifère en rabattant le niveau d'eau en-dessous du niveau de l'exutoire (voir à ce sujet les travaux de Daher *et al*., 2010). En-dehors de ces configurations particulières, le milieu karstique est généralement considéré comme défavorable à la recharge artificielle en raison de vitesses d'écoulement élevées – notamment au sein des conduits karstiques qui sont potentiellement en relation avec les zones de recharge – défavorables à un temps de stockage suffisant de l'eau souterraine. Il s 'agit dès lors d'une problématique similaire à celle des milieux sédimentaires très diffusifs, peu enclins à stocker l'eau infiltrée : les aquifères karstiques seront en conséquence considérés dans la suite comme étant défavorables. Les aquifères de socle sont très peu utilisés en général, excepté dans les grandes zones de socle comme en Inde où leur objectif est double : outre la recharge indirecte, ils contribuent à retenir l'eau lors de la mousson pour un usage ultérieur d'irrigation directement à partir du bassin. Dans le cas du Bassin RMC, en présence d'autres solutions alternatives de réservoirs, nous les considérerons comme défavorables.

L'aquifère doit permettre l'écoulement de l'eau, donc sa perméabilité doit être suffisante pour cela[2]. Cependant, dans la mesure où l'objectif de la recharge est le stockage d'eau, le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère doit être suffisant et sa diffusivité (rapport de la transmissivité à l'emmagasinement) doit être faible pour permettre que l'eau soit stockée. Ainsi, nous pouvons considérer que la capacité des aquifères à être rechargés artificiellement peut être décrite par l'intermédiaire de trois propriétés physiques: la *perméabilité*, le *coefficient d'emmagasinement* et la *diffusivité*. Il n'existe pas de cartographie à l'échelle du bassin RMC permettant de décrire ces propriétés. Il a donc été décidé d'interpréter les attributs de la BDLISA (Brugeron *et al*., 2018), pour définir le caractère favorable des entités aquifères que cette base de données décrit à l'échelle du bassin, pour chacun des critères.

[2] On notera que le taux d'infiltration du sous-sol est dépendant de la température de l'eau prélevée et peut donc varier de l'ordre de 30 à 35 % entre l'été (taux d'infiltration plus élevé) et l'hiver (taux d'infiltration moins élevé) selon les écarts de températures.

Cette façon de procéder permet de dresser une cartographie à l'échelle du Bassin RMC. **Cependant, en l'absence de données précises sur la diffusivité de l'aquifère, elle ne permet pas d'évaluer de façon précise la capacité de stockage de l'entité considérée. Cette évaluation nécessite d'estimer le devenir de l'eau souterraine stockée en fonction de la diffusivité de l'aquifère et de la proximité des exutoires : cet élément essentiel est abordé au cours de l'analyse réalisée à l'échelle de territoires test (voir à ce sujet le § 6.2.3).**

2.3.1.a.1 La BDLisa

La Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères (BDLISA) est un référentiel hydrogéologique construit par le BRGM sur le territoire français. Elle décrit l'ensemble des entités hydrogéologiques du territoire national et leur fixe des caractéristiques à l'aide d'attributs, conformément à la nomenclature établie par le Sandre (2015).

Trois niveaux d'identification des entités hydrogéologiques sont retenus dans la BDLISA:

- le niveau national (Niveau 1) fournit une représentation nationale des grands ensembles hydrogéologiques dont il montre la distribution spatiale et l'importance en tant que ressource quantitative. La gamme d'échelle d'utilisation cartographique est comprise entre le 1/500 000 et le 1/1 000 000 ;
- le niveau régional (Niveau 2) fournit une représentation régionale ou par bassin des entités hydrogéologiques (échelle de visualisation de l'ordre du 1/250 000) ;
- le niveau local (Niveau 3) correspond à la représentation la plus détaillée du référentiel, à une échelle de l'ordre du 1/50 000.

L'analyse proposée se place à l'échelle du Niveau 3, puisqu'il est censé être le plus précis d'un point de vue géographique (même s'il n'est pas forcément décrit sur tout le bassin).

La notion d' « Ordre » correspond à la succession des entités hydrogéologiques sur une coupe verticale. Les entités superficielles sont classées en Ordre 1. Ce sont donc les entités appartenant à cet ordre que nous utiliserons pour construire la carte de faisabilité de la recharge indirecte (infiltration depuis la surface).

La BDLISA délimite toutes les entités hydrogéologiques présentes sur toute la France, au format vecteur. Pour chaque entité, une table attributaire renseigne plusieurs champs, dont les champs « Nature », « État », « Thème » et « Milieu ». Ces derniers peuvent être utilisés pour caractériser les critères physiques que nous cherchons à renseigner. Cependant, ces champs ne contiennent pas de valeurs numériques de perméabilité, diffusivité ou de coefficient d'emmagasinement, mais des codes (Illustration 4) qui font référence à des descriptifs plus ou moins précis, à partir desquels il est possible de déduire des ordres de grandeur pour ces critères.

« Nature »	« État »	« Thème »	« Milieu »
X : NoData	X : NoData	X : NoData	X : NoData
0 : Inconnu (absent sur bassin RMC)	0 : Inconnu	0 : Inconnu	0 : Inconnu
1 : Grand système aquifère (absent sur bassin RMC)	1 : Nappe captive	1 : Alluvial	1 : Poreux
	2 : Nappe libre	2 : Sédimentaire	2 : Fissuré
2 : Grand domaine hydrogéologique (absent sur bassin RMC)	3 : Libres et captives	3 : Socle	3 : Karstique
3 : Système Aquifère	4 : Alternativement libre puis captive	4 : Intensément plissés de montagne	4 : Matricielle / fissures
	5 : Semi-captive		5 : Karstique / fissures
4 : Domaine hydrogéologique	-	5 : Volcanisme	6 : Fractures et/ou fissures
5 : Unité aquifère	-	-	7 : Matricielle / fractures
	-	-	8 : Matricielle / karstique
6 : Unité semi-perméable	-	-	9 : Matrice/fracture/ karst
7 : Unité imperméable	-	-	-

Illustration 4 : Présentation des codes utilisés dans la BDLISA en fonction des critères (Sandre, 2015).

Les descriptifs des codes sont présentés dans l'extrait du rapport de Seguin & Mardhel (2013), que nous avons repris dans ce qui suit.

2.3.1.a.1.1 Le critère « Nature » des entités hydrogéologiques

Le Grand Système Aquifère : le grand système aquifère est un système physique composé d'une ou plusieurs unités aquifères, globalement en liaison hydraulique et qui est circonscrit par des limites litho-stratigraphiques et/ou structurales. Le grand système aquifère est une entité de premier niveau (NV1).

Le Grand Domaine Hydrogéologique : le grand domaine hydrogéologique est un système physique peu ou pas aquifère. Il peut contenir des unités aquifères mais sans grande extension latérale et isolées dans le massif imperméable. Le grand domaine hydrogéologique est une entité de premier niveau (NV1).

Le Système Aquifère : le Système Aquifère est une entité hydrogéologique aquifère issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand système aquifère ou d'un grand domaine hydrogéologique. La subdivision s'effectue sur, au moins l'un des critères suivants: lithologie, structure, stratigraphie, piézométrie, géochimie, hydraulique. La constitution des systèmes est issue de la connaissance à instant donné du milieu souterrain. Le système aquifère est une entité de niveau régional NV2.

Le Domaine Hydrogéologique : un domaine hydrogéologique est une entité hydrogéologique peu aquifère issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand domaine hydrogéologique ou d'un grand système. La subdivision s'effectue sur, au moins, l'un critères suivants : lithologie, structure, stratigraphie, piézométrie, géochimie, hydraulique. Le domaine hydrogéologique est une entité de niveau régional NV2.

L'unité aquifère : l'unité aquifère est un système physique élémentaire présentant des conditions hydrodynamiques homogènes, suffisamment conductrice pour permettre la circulation de l'eau souterraine. Une unité aquifère est une entité hydrogéologique de niveau local présentant une perméabilité moyenne supérieure (ou supposée supérieure) à 10^{-6} m/s présentant des ressources en eau suffisante pour être exploitée. L'unité aquifère est le résultat du découpage d'un système aquifère ou d'un domaine hydrogéologique (éventuellement directement d'un grand domaine ou d'un grand système aquifère).

L'unité semi-perméable : une unité semi-perméable est une entité hydrogéologique de niveau local avec une perméabilité moyenne comprise entre 10^{-9} m/s et 10^{-6} m/s. Cette unité peut contenir des ressources en eau mais sa productivité est insuffisante pour que ces ressources puisent être exploitées. L'unité semi-perméable est le résultat du découpage d'un domaine hydrogéologique ou d'un système aquifère (éventuellement directement d'un grand domaine ou d'un grand système aquifère).

L'unité imperméable : l'unité imperméable est un système physique élémentaire présentant des faibles circulations d'eau. Sa perméabilité moyenne est inférieure à 10^{-9} m/s. La définition du dictionnaire hydrogéologique français est la suivante : qualifie un milieu théoriquement impénétrable et non traversable par un fluide et en pratique ne laissant passer aucun flux significatif sous un gradient de potentiel hydraulique donné.

2.3.1.a.1.2 Le critère « État » des entités hydrogéologiques

L'État du référentiel précise le statut de la nappe contenue dans les entités aquifères :

- la nappe est captive lorsqu'elle est confinée entre deux terrains peu ou pas perméables ;
- la nappe est libre lorsqu'elle n'est pas limitée vers le haut par des terrains imperméables ;
- la nappe est libre et captive lorsqu'elle est globalement libre ou captive mais comporte respectivement des parties captives ou libres à un ou plusieurs endroits de sa superficie ;
- la nappe est alternativement libre puis captive lorsqu'elle présente des évolutions « libre / captive » au cours du temps ;
- la nappe est semi-captive lorsqu'elle est caractérisée par un régime hydrodynamique intermédiaire entre les régimes captif et libre. Il s'agit généralement d'une entité sous couverture où le toit de l'entité présente des zones de perméabilité (semi-perméable) permettant des transferts des eaux.

2.3.1.a.1.3 Le critère « Thème » des entités hydrogéologiques

Le référentiel hydrogéologique est construit sur la base d'une subdivision du territoire en entités hydrogéologiques rattachées à cinq thèmes principaux :

- le thème Alluvial : ensemble des dépôts de plaine alluviale accompagnés des terrasses connectées hydrauliquement avec les cours d'eau ;
- le thème Sédimentaire : ensemble des formations peu ou pas déformées, non métamorphisées des bassins sédimentaires ;
- le thème Socle : formations magmatiques et métamorphiques ;
- le thème Intensément plissé de montagne : ensemble de formations géologiques récemment plissées appartenant aux massifs montagneux alpins, pyrénéens, languedociens et jurassiens ;
- le thème Volcanisme : volcanisme tertiaire et quaternaire ayant conservé une géométrie, une morphologie et/ou une structure volcanique identifiable.

2.3.1.a.1.4 Le critère « Milieu » des entités hydrogéologiques

Le Milieu décrit le type de porosité caractérisant majoritairement l'entité. Les différents types retenus sont définis dans l'Illustration 4.

Les codes 1 à 3 correspondent à des types de porosité bien définis (1 : poreux ; 2 : fissuré et 3 : karstique).

La double porosité de code 4 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par une matrice poreuse et par un réseau de fissures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important (cas des aquifères de la craie par exemple).

La double porosité de code 5 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par un réseau karstique et par un réseau de fissures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important (cas des « chaînons » calcaires pyrénéens).

La double porosité de code 6 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par des fractures et des fissures (cas de certaines entités volcaniques en Martinique).

La double porosité de code 7 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par une matrice poreuse et par un réseau de fractures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important.

La double porosité de code 8 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par une matrice poreuse et par un réseau karstique ayant tous deux un rôle hydrodynamique important.

La triple porosité de code 9 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par une matrice poreuse, par un réseau de fissures et par un réseau karstique, tous trois ayant un rôle hydrodynamique important.

2.3.1.a.1.5 Notes attribuées aux critères

Sur la base des définitions des critères décrits dans ce qui précède, nous avons attribué des notes aux codes et valeurs qui y sont décrits, présentées sur l'Illustration 5.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable 0	Très peu favorable 1	Peu favorable 2	Moyennement favorable 3	Favorable 4
BDLISA: « Nature »	7-4	X-NoData	6	3	5
BDLISA: « État »	1	0-X-5-NoData	3-4	-	2
BDLISA: « Thème »	3-4	X-NoData	5-2	-	1
BDLISA: « Milieu »	2-6	X-0-NoData	3-5-9	4-7-8	1

Illustration 5 : Mise en relation des codes et valeurs décrivant des critères physiques de la BDLISA retenus, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte. La signification des codes est présentée dans l'Illustration 4 (les codes non indiqués indiquent une absence sur le territoire du bassin RMC).

Ainsi, le critère « Nature » permet de caractériser la perméabilité de l'aquifère. Le code 5 traduit par exemple qu'il s'agit d'une « unité aquifère dont la perméabilité est supérieure à 10^{-6} m/s » (Seguin & Mardhel., 2013). Ces unités étant les plus intéressantes en termes de recharge artificielle, la note 4 (favorable) leur est attribuée. *A contrario*, les « unités imperméables », codées par un 7 pour ce critère sont bien sûr totalement défavorables à la recharge artificielle, raison pour laquelle on leur attribue la note 0. Les autres types d'aquifère décrits par ce critère ont des notes comprises entre ces deux valeurs.

Le critère « État » évalue le caractère libre ou captif de la nappe. Le code 2 décrit les nappes libres, considérées comme favorable à la mise en place d'un dispositif de recharge indirecte. On leur attribue donc la note de 4. En revanche, les nappes captives (codées en 1) ne sont pas intéressantes puisqu'elles sont sous couverture. On leur attribue donc la note 0. Les autres types de nappes décrites par ce critère ont des notes comprises entre ces deux valeurs.

Les critères « Thème » et « Milieu » sont utilisés pour décrire de manière qualitative la capacité de stockage des aquifères. Parmi les valeurs du premier critère, nous pouvons considérer que les « alluvions » (code 1) et les « roches sédimentaires » (code 2) ont une plus grande capacité à stocker de l'eau que les formations de « socle » (code 3) ou « intensément plissées de montagne » (code 4). D'après la littérature, ce sont les alluvions qui sont les plus favorables pour la recharge artificielle. La note de 4 leur est donc attribuée. Le critère « Thème » n'est cependant pas suffisant pour décrire toutes les situations puisqu'il ne fait pas la distinction, pour les roches sédimentaires par exemple, entre les domaines karstiques et le reste. Or les karsts sont connus pour infiltrer très rapidement l'eau et ils peuvent en faire de même pour l'évacuer. Cependant, ils peuvent aussi présenter un intérêt certain pour la recharge artificielle dans des conditions de gestion active (par exemple en pompant dans un forage implanté sur l'exutoire principal en période de besoin, en acceptant que le rabattement de la nappe fasse passer le niveau dynamique sous le niveau de l'exutoire). Le critère « Milieu » peut être utilisé pour caractériser de manière qualitative la diffusivité des formations considérées. Ainsi, les milieux poreux (code 1) sont considérés comme les plus favorables par rapport à ce critère et sont donc notés avec un 4. Les milieux à double porosité, avec une dominante matricielle poreuse (codes 4,7 et 8) sont considérés moins favorables et donc notés avec un 3. Les milieux de type « Karstique » (code 3) et les autres milieux à double porosité (codes 3, 5 et 9) sont notés à 2. Pour ces derniers, ce choix se justifie par le fait que bien que leur porosité soit multiple, elle n'inclut pas de matrice poreuse, ce qui les rendrait à priori moins intéressants que ceux dont les codes sont 4,7 et 8. Le milieu caractérisé comme principalement « fissuré » ou « fracturé » (code 2 et 6) étant, sauf exception et impossibilité de trouver un autre réservoir, considéré comme défavorable dans la littérature (notamment du fait du caractère hétérogène de ses propriétés aquifères), il est noté à 0. La possibilité que des aquifères intéressants puissent se trouver notamment dans des formations de socle où un profil d'altération est présent n'est pas considérée dans ce travail, dans la mesure où cette caractéristique n'est pas décrite en BDLISA à ce jour. Pour tous les critères, lorsque l'on n'a pas de données (NoData), on considère que le contexte est très peu favorable (note 1), mais non disqualifiant.

De plus, pour éviter d'attribuer une note favorable à une entité imperméable (Nature = 7) ou captive (État = 1) grâce à des codes favorables pour les autres champs (par exemple Thème = 2 et Milieu = 1), ou les autres critères (IDPR, Pente, ZNS), on force le calcul à attribuer une note physique égale à 0 (défavorable) à l'entité, lorsque les champs Nature = 7 ou Etat = 1.

2.3.1.a.2 Le critère physique BDLISA obtenu

Les quatre critères issus de la BDLISA sont combinés pour obtenir une note globale pour le critère physique BDLISA. Nous rappelons que, suivant la stratégie de construction de la BDLISA, ces critères sont décrits de manière indépendante. La combinaison des critères est faite en pondérant, sur la base de l'expertise collective et du dire d'experts du bassin, les critères les uns par rapport aux autres, de manière à traduire leur importance relative :

$$BDLISA = \frac{(2\times Nature + 1\times Etat + 0.2\times Milieu + 2\times Thème)}{\sum poids} \quad \textit{(Eq. 1)}$$

Dans cette équation, par rapport au rapport précédent (Caballero et al. 2018), les poids des critères « Milieu » et « Thème » de la BDLISA ont été modifiés pour réduire l'importance du

premier (en particulier du code qualifiant une entité de « poreuse », qui s'applique de manière trop large) et augmenter celle du second (pour introduire plus de variabilité en fonction du type d'entité – alluviale, sédimentaire, socle, etc.). Ceci montre que les choix de pondération sont relativement arbitraires et sont essentiellement expliqués par la représentativité du résultat cartographique obtenu, au regard de l'expertise collective que les hydrogéologues du bassin ont du comportement des entités aquifères cartographiées (l'objectif étant essentiellement de ne pas obtenir de résultat contre-intuitif). Pour cette raison, nous n'avons pas procédé à une analyse de sensibilité du résultat cartographique à la pondération utilisée, mais il est évident qu'elle est importante. L'importance relative des poids attribués aux critères Nature et Thème montre tout de même qu'ils portent une partie importante du signal recherché. À l'inverse, le critère Milieu apparaît pondéré pour peser le moins possible dans l'analyse, ce qui s'explique probablement par la difficulté de décrire le type de porosité d'une formation de manière qualitative en BDLISA, ce qui peut provoquer des incohérences de classification entre deux entités aquifères de même « Nature » ou de même « Thème » et mener à un résultat cartographique gênant. Enfin, il est évident que dans la mesure où l'attribution des codes pour les quatre champs dépend fortement des experts régionaux qui ont participé à la constitution de la BDLISA, il peut y avoir des incohérences entre deux entités de même type, par exemple si elles sont situées dans des contextes géographiques différents ou si elles ont été étudiés de manière plus ou moins détaillée.

La carte résultante est présentée sur l'Illustration 6.

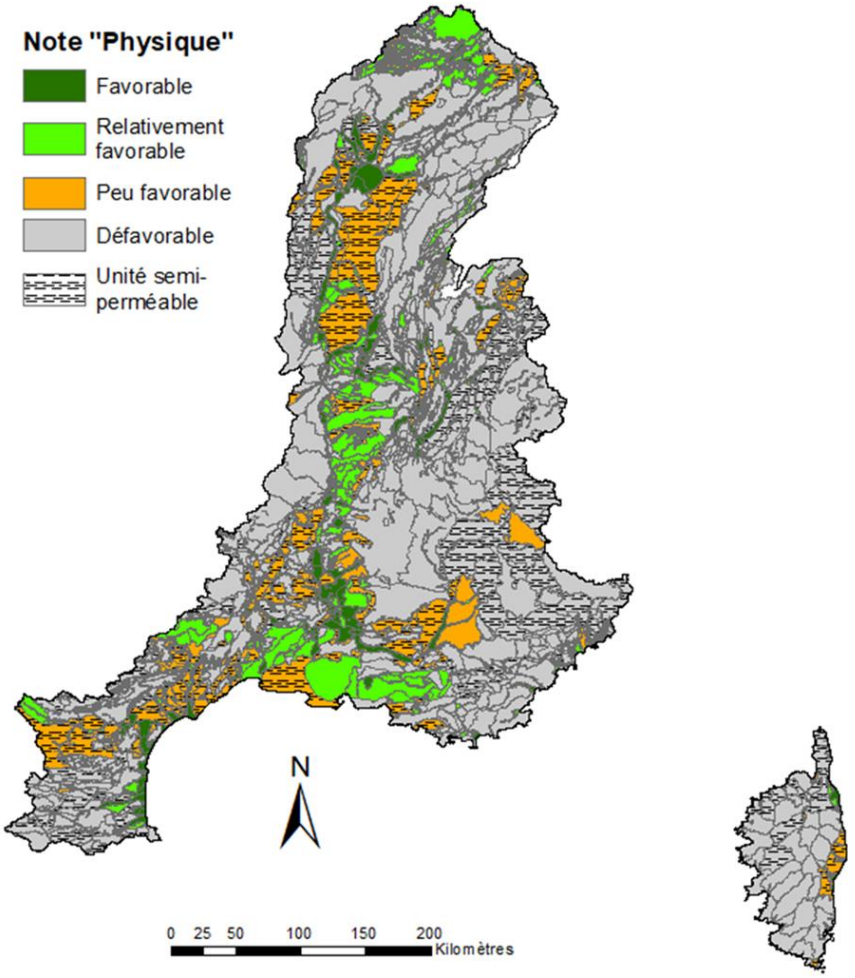


Illustration 6 : Recharge Indirecte – Carte du critère physique BDLISA.

b) *La pente*

La pente du terrain et la surface disponible pour installer les équipements nécessaires à la mise en œuvre de la recharge artificielle peuvent influencer la possibilité de mettre en place un dispositif de recharge artificielle indirecte. En effet, d'après la littérature, les méthodes indirectes sont applicables uniquement sur des terrains relativement plats : entre 0 et 5 % (Saint-Pé 1971, Rahman *et al.* 2012). Les bassins d'infiltration ne peuvent théoriquement être mis en place que sur des pentes inférieures à 2 % (Saint-Pé 1971), même si l'on peut envisager que des travaux de terrassement puissent être réalisés pour y pallier.

À l'échelle du bassin, on peut calculer la pente à partir du Modèle Numérique de Terrain de la BD ALTI® au 50 m (IGN, 2017). Les valeurs moyennes sont calculées à l'échelle des entités BDLISA, pour leur attribuer un critère Pente représentatif et les notes correspondantes aux valeurs obtenues sont présentées en Illustration 7.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable 0	Très peu favorable 1	Peu favorable 2	Moyennement favorable 3	Favorable 4
Pente	-	> 30 %	8 - 30 %	3 - 8 % (moy)	0 - 3 % (moy)

Illustration 7 : Mise en relation des valeurs moyennes de la pente obtenue pour chaque entité BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte.

Ainsi, la situation est considérée comme favorable (note 4) pour une valeur moyenne inférieure à 3 % (2 % selon Saint-Pé, 1971, mais comme il s'agit d'une valeur moyenne sur une entité BDLISA, le seuil est augmenté à 3 % pour prendre en compte la variabilité de l'écart-type). Pour des pentes comprises entre 3 et 8 %, il apparaît difficile d'implanter des bassins d'infiltration mais on peut imaginer d'utiliser d'autres dispositifs comme des tranchées drainantes par exemple. De ce fait, la note attribuée est 3. Pour les deux dernières notes (2 et 1), le seuil de séparation (30 %) est choisi arbitrairement, en fonction de la répartition des moyennes de pente sur les entités BDLISA.

c) *L'IDPR: capacité d'infiltration des formations*

L'Indice de Développement et Persistance des Réseaux (IDPR), développé au BRGM (Mardhel *et al*., 2004), propose une description de la capacité des formations à infiltrer ou à faire ruisseler l'eau. Il est basé sur une approche géomorphologique comparant le réseau hydrographique pérenne et intermittent au réseau hydrographique théorique extrait de la topographie. La théorie, selon un modèle parfait, est que les cours d'eau se dessinent en suivant les dépressions et la pente. Ainsi, un réseau théorique est créé et comparé avec le tracé naturel des cours d'eau. Ce dernier est beaucoup plus complexe que le précédent puisqu'il dépend en grande partie de la géologie. Si les deux réseaux ne se superposent pas alors l'hypothèse d'une infiltration dominante prime (IDPR < 1000). Dans le cas contraire, lorsqu'ils coïncident c'est le ruissèlement qui est considéré comme dominant (l'IDPR tend vers 2000). L'IDPR est une donnée raster avec une maille de 50 m par 50 m. La version publiée en 2007 est utilisée pour le bassin Rhône Méditerranée et Corse. Comme pour la Pente, les valeurs moyennes sont calculées pour les entités BDLISA, mais aussi les écarts-types, pour prendre en compte la dispersion des valeurs au sein d'une entité. Les notes correspondant aux valeurs obtenues sont présentées à l'Illustration 8.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable 0	Très peu favorable 1	Peu favorable 2	Moyennement favorable 3	Favorable 4
IDPR	-	moy > 1400	std > 400	std < 400	moy < 600

Illustration 8 : Mise en relation des valeurs moyennes et de l'écart-type de l'IDPR obtenus pour chaque entité BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte.

La pleine échelle des valeurs de l'indice IDPR [0 – 2000] couvre la totalité des possibilités, allant du « totalement infiltrant » jusqu'au « totalement ruisselant ». Par conséquent, nous considérons que pour la plage de valeurs [0-600], on se situe sur des formations infiltrantes, auxquelles nous attribuons la note 4. À l'inverse, au-dessus de 1 400, on peut considérer la formation comme ruisselante et la note attribuée est 1. Entre ces deux bornes, la différence entre les notes 2 et 3 est réalisée sur base de l'écart-type. Plus il est faible, plus la probabilité d'avoir des valeurs proches de la valeur moyenne est grande. Par conséquent, nous considérons qu'une entité BDLISA sur laquelle l'écart-type des valeurs de l'IDPR est supérieur à 400 doit être considérée comme moins favorable à l'infiltration (note 2) qu'une autre présentant un écart-type plus petit que 400 (note 2).

d) *L'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)*

Dans le cadre de l'évaluation préliminaire du risque d'inondation par remontée de nappe, une méthode de cartographie de l'épaisseur de la ZNS a été développée pour la France par le BRGM (Allier *et al*., 2018). Cette donnée est disponible au format raster et à une échelle de 1/100 000. Suivant cette méthode, l'épaisseur de la ZNS a été estimée à partir notamment des niveaux piézométriques observés au sein des forages disposant d'une observation au moment de leur réalisation et à partir des valeurs moyennes pour les piézomètres. Les niveaux de hautes eaux et basses eaux n'ont donc pas été pris en compte. Ce critère est à manipuler avec précaution puisqu'il présente de grandes incertitudes. Les valeurs moyennes d'épaisseur de la ZNS sont calculées à l'échelle des entités BDLISA, pour leur attribuer un critère épaisseur ZNS représentatif. Les notes correspondant aux valeurs obtenues sont présentées sur l'Illustration 9.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable 0	Très peu favorable 1	Peu favorable 2	Moyennement favorable 3	Favorable 4
Epaisseur de la ZNS	< 1m	1 - 5 m	71 -100	41 - 70	5 à 40 m

Illustration 9 : Mise en relation des valeurs moyennes de l'épaisseur de la ZNS obtenus pour chaque entité BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte.

L'analyse de la littérature indique que des dispositifs de recharge artificielle indirecte peuvent être mis en place pour des épaisseurs de ZNS allant de 5 m (Rahman et al. 2011) à 40 m (Wuilleumier et Seguin, 2008). Ces derniers notent cependant qu'on peut trouver des sites avec des épaisseurs de ZNS supérieures. Ainsi, nous considérons que c'est entre 5 et 40 m que l'épaisseur de la ZNS est la plus favorable (note 4). Au-delà de 40 m et jusqu'à 100 m, la profondeur est de moins en moins favorable (note 3 puis 2 pour des épaisseurs > 70 m – valeur arbitraire). En effet, l'eau pourrait prendre trop de temps pour atteindre la nappe voire être interceptée ou reprise, ce qui rendrait le projet moins efficace.

Nous ne considérons pas des épaisseurs supérieures à 100 m dans la mesure où c'est la valeur maximale cartographiée sur le bassin (liée à la méthode de calcul). Quand l'épaisseur de la ZNS

est inférieure à 5 m, le battement de la nappe lié à la recharge apparaît trop limité, raison pour laquelle la situation est considérée comme la moins favorable (note 1). Enfin, pour des épaisseurs < à 1 m, on considère que la nappe est trop proche pour que la recharge artificielle ait un sens ou que les installations soient susceptibles d'être inondées par les remontées de nappe en période de crue (note 0).

e) *Carte des critères physiques*

La combinaison linéaire pondérée des critères BDLISA, pente, IDPR et épaisseur de ZNS permet de produire la carte de potentialité à la recharge indirecte, du point de vue des critères physiques. Le choix des poids attribués à chaque critère a été fait au travers d'un Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP en anglais) (Saaty, 2008), puis adaptée à dire d'expert. Ainsi, la pondération adoptée dans Caballero et al. (2018) pour calculer la note du critère physique suivant l'équation ci-dessous a été modifiée suite à un nouvel exercice AHP de type Saaty, réalisé avec les agents BRGM, puis révisé par l'Agence de l'eau RMC. Cette dernière révision a été effectuée pour limiter l'influence du critère « épaisseur de la ZNS » sur le résultat cartographique final. En effet, un poids trop important a été affecté suite à l'analyse AHP pour cette variable. De ce fait, lorsqu'elle apparaît comme favorable (entre 5 et 40 m d'épaisseur), cela peut conduire à cartographier comme trop favorables, certaines entités dont les caractéristiques hydrogéologiques (telles que décrites en BDLISA) ne le sont pas.

$$Critères\ Physiques = \frac{(0.49 \times BDLISA + 0.057 \times Pente + 0.2 \times IDPR + 0.12 \times ZNS)}{\sum poids} \quad (Eq.\ 2)$$

La carte produite à l'aide de cette relation a en outre été modifiée pour tenir compte du fait que la pondération des critères BDLISA adoptée (cf. Eq. 2) ne permettait pas de mettre suffisamment en avant le caractère peu favorable des formations karstiques pour la recharge artificielle. Elle intègre donc un déclassement systématique de la note finale (attribution d'une note 0 à une entité karstique, quelle que soit la note finale obtenue) pour les critères physiques, pour toutes les entités contenues dans la Surcouche Karst de la BDLISA.

2.3.2. Les critères de Contrainte

Les critères de Contrainte concernent les conditions qui régissent la possibilité de pouvoir construire un dispositif de recharge artificielle sur un site donné. Dans notre analyse, nous avons choisi d'aborder cet aspect en considérant trois critères à décrire à l'échelle du bassin : l'occupation du sol de Corine Land Cover, la BD Carto et les zones protégées.

Un autre aspect qui pourrait être pris en compte au titre des contraintes, concerne la disponibilité et la qualité de l'eau utilisée pour alimenter les dispositifs de recharge artificielle. Il existe plusieurs sources possibles : eaux de surface (cours d'eau, lac), eaux pluviales, eaux souterraines provenant d'un aquifère voisin, eaux usées issues de station d'épuration. La distance entre la source de l'eau que l'on veut utiliser pour la recharge et le point d'injection, ainsi que les aspects réglementaires au niveau du prélèvement doivent aussi être pris en compte. Cependant, s'il est indiscutable que ces critères sont incontournables à l'échelle d'un site, ils apparaissent difficiles à décrire à l'échelle du bassin. Ils ne seront donc pas intégrés à ce stade de l'analyse.

a) *L'occupation du sol d'après la BD CORINE Land Cover*

La COoRdination de l'INformation sur l'Environnement (CORINE) Land Cover (désignée par CLC dans ce qui suit), dont les auteurs sont le SOeS et l'Agence Européenne de l'Environnement, propose une description cartographique de l'occupation des sols en 2012 (CGDD, 2015). Cette

donnée présente sur toute la France est au format vecteur avec une échelle de 1 / 100 000. Sur le bassin RMC, il y a une grande diversité de types d'occupation des sols. Les notes de 0 à 4 attribuées à chaque type d'occupation du sol décrite dans la BD CLC sont présentées sur l'Illustration 10. Les types de zones notées comme favorables (note 4) sont les pelouses, les pâturages, les landes, les prairies, les zones à végétation sclérophylle (garrigues, maquis, ...) et végétation clairsemée, les zones à roches nues et les rizières.

Code	Note	Libellé	Code	Note	Libellé
1. Territoires artificialisés			**2. Territoires agricoles**		
111	0	Tissu urbain continu	211	2	Terres arables hors périmètres d'irrigation
112	0	Tissu urbain discontinu	212	1	Périmètres irrigués en permanence
121	0	Zones industrielles et commerciales	213	4	Rizières
122	0	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	221	2	Vignobles
123	0	Zones portuaires	222	2	Vergers et petits fruits
124	0	Aéroports	223	2	Oliveraies
131	3	Extraction de matériaux	231	4	Prairies
132	0	Décharges	241	2	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
133	0	Chantiers	242	2	Systèmes culturaux et parcellaires complexes
141	2	Espaces verts urbains	243	2	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
142	1	Equipements sportifs et de loisirs	244	3	Territoire agro-forrestiers
3. Forêts et milieux semi-naturels			**4. Zones humides**		
311	3	Forêts de feuillus	411	0	Marais intérieurs
312	3	Forêts de conifères	412	1	Tourbières
313	3	Forêts mélangées	421	0	Marais maritimes
321	4	Pelouses et pâturages naturels	422	0	Marais Salants
322	4	Landes et broussailles	423	0	Zones intertidales
323	4	Végétation sclérophylle	**5. Surfaces en eau**		
324	4	Forêt et végétation arbustive en mutation	511	0	Cours et voies d'eau
331	3	Plages, dunes	512	0	Plans d'eau
332	4	Roches nues	521	0	Lagunes littorales
333	4	Végétation clairsemée	522	0	Estuaire
334	3	Zones incendiées	523	0	Mers et océans
335	0	Glaciers et neiges éternelles			

Illustration 10 : Regroupement et codification des types d'occupation du sol dans CORINE Land Cover sur le bassin RMC, vis-à-vis de la possibilité d'y installer un dispositif de recharge indirecte

b) *La BDcarto*

La BDCarto / BD Topo (IGN) est une base de données répertoriant le réseau routier et ferré, les unités administratives, le réseau hydrographique, la toponymie et les équipements divers. Cette carte permet de compléter la base CORINE Land Cover en apportant des précisions uniquement sur le réseau hydrographique : l'emplacement des eaux libres (code 1), des zones d'inondation (code 2), des glaciers (code 3) et des marais salants (code 4). Cette donnée est disponible au format vecteur. Pour ce critère, tous les objets ayant un code compris entre 1 et 4 sont considérés comme défavorables à l'implantation d'un dispositif de recharge artificielle indirecte (Illustration 11).

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Très peu favorable	Peu favorable	Moyennement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
BDCarto	1 à 4	-	-	-	0

Illustration 11 : Mise en relation des codes de la BD Carto avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte.

c) *Zones inondables par remontée de nappe*

Pour compléter la description des surfaces soumises au risque inondation proposée par la BDCarto (qui ne représente généralement qu'une très faible superficie située de part et d'autre des cours d'eau), la cartographie de l'épaisseur de la ZNS qui a été utilisée précédemment pour décrire l'épaisseur de la ZNS été réutilisée. Ainsi, le code 1 (très peu favorable) a été attribué aux surfaces cartographiées en risque de remontée de nappe.

d) *Les zones protégées*

Le territoire français est couvert par une grande variété de zonages visant à protéger des paysages et/ou des écosystèmes par l'intermédiaire d'une réglementation environnementale ou paysagère, à l'échelle nationale ou régionale. Ces zones bénéficient d'une protection plus ou moins forte vis-à-vis des activités anthropiques. Elles doivent être prises en compte dans l'analyse cartographique que nous devons mener puisqu'il est possible qu'elles représentent une limite à l'implantation d'un site de recharge artificielle. Les données de l'Inventaire National du Patrimoine Naturelle (INPN, 2016) et des sites de la DREAL (2016) ont été recueillies, synthétisées et regroupées pour en déduire leur extension sur le bassin RMC.

Seuls les types de protection couvrant l'ensemble du bassin RMC ont été pris en compte (un type de zones protégées qui seraient renseignées sur une seule région n'est donc pas retenu).

Les zones protégées bénéficient d'une protection plus ou moins forte vis-à-vis des activités anthropiques. L'implantation d'un bassin d'infiltration nécessite de la place et peut altérer le paysage environnant. Par conséquent, nous avons considéré que plus ces zones sont protégées moins elles sont favorables à la mise en place d'un dispositif. Or, si l'on applique ce principe, il est probable qu'une bonne partie du bassin RMC serait inutilisable. Il a donc été choisi de regrouper les zones protégées selon un niveau de protection, d'exigence variable suivant le type de zone considérée (Illustration 12). Ce regroupement a été construit en se basant sur les descriptions des zones protégées qui sont proposées sur les sites de la DREAL. Enfin, les notes de faisabilité de recharge artificielle indirecte présentées sur l'Illustration 13, ont été attribuées en respectant le postulat suivant : plus la protection est forte, plus la note attribuée est faible. Malgré les limitations que ce type de zonage implique pour l'implantation d'un dispositif, aucune zone protégée n'a été considérée défavorable pour les dispositifs de recharge artificielle indirecte (code 0).

	Protection		
	Très forte	Forte	Moyenne
APPB (Arrêtés préfectoraux de protection de biotope)	3		
Zones humides RAMSAR	3		
Paysage - Sites classés	3		
Cœurs de Parcs Nationaux	3		
Opérations Grands Sites (OGS)	3		
Réserves de Biosphère (cœur)	3		
Conservatoires d'espaces naturels (CEN)	3		
Littoral	3		
Réserves naturelles régionales		2	
Réserves naturelles nationales		2	

	Protection		
	Très forte	Forte	Moyenne
Réserve nationale de chasse et de faune		2	
Natura 2000 ZSC-pSIC -SIC		2	
Paysage – Sites inscrits		2	
Réserves biologiques		2	
ZNIEFF type 1		2	
ZICO			1
Parc national			1
Parcs Naturels Régionaux			1
Natura 2000 ZPS			1
Réserves de Biosphère (reste)			1
ZNIEFF type 2			1

Illustration 12 : Classement du niveau de protection adopté pour les zones protégées sur le bassin RMC.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Très peu favorable	Peu favorable	Moyennement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
Zones protégées	-	3	2	1	0

Illustration 13 : Mise en relation du regroupement des codes des zones protégées avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle indirecte.

e) *Carte des critères de contrainte*

Les 4 critères présentés sont combinés pour obtenir la carte de la faisabilité de l'implantation des dispositifs de recharge artificielle indirecte, du point de vue des critères de contrainte (Illustration 14). Les critères sont combinés par calcul de la moyenne arithmétique sans pondération, suivant l'équation suivante :

$$Contraintes = (1 \times CLC + 1 \times BDCarto + 1 \times Rem.Nappe + 1 \times Protection)/4$$

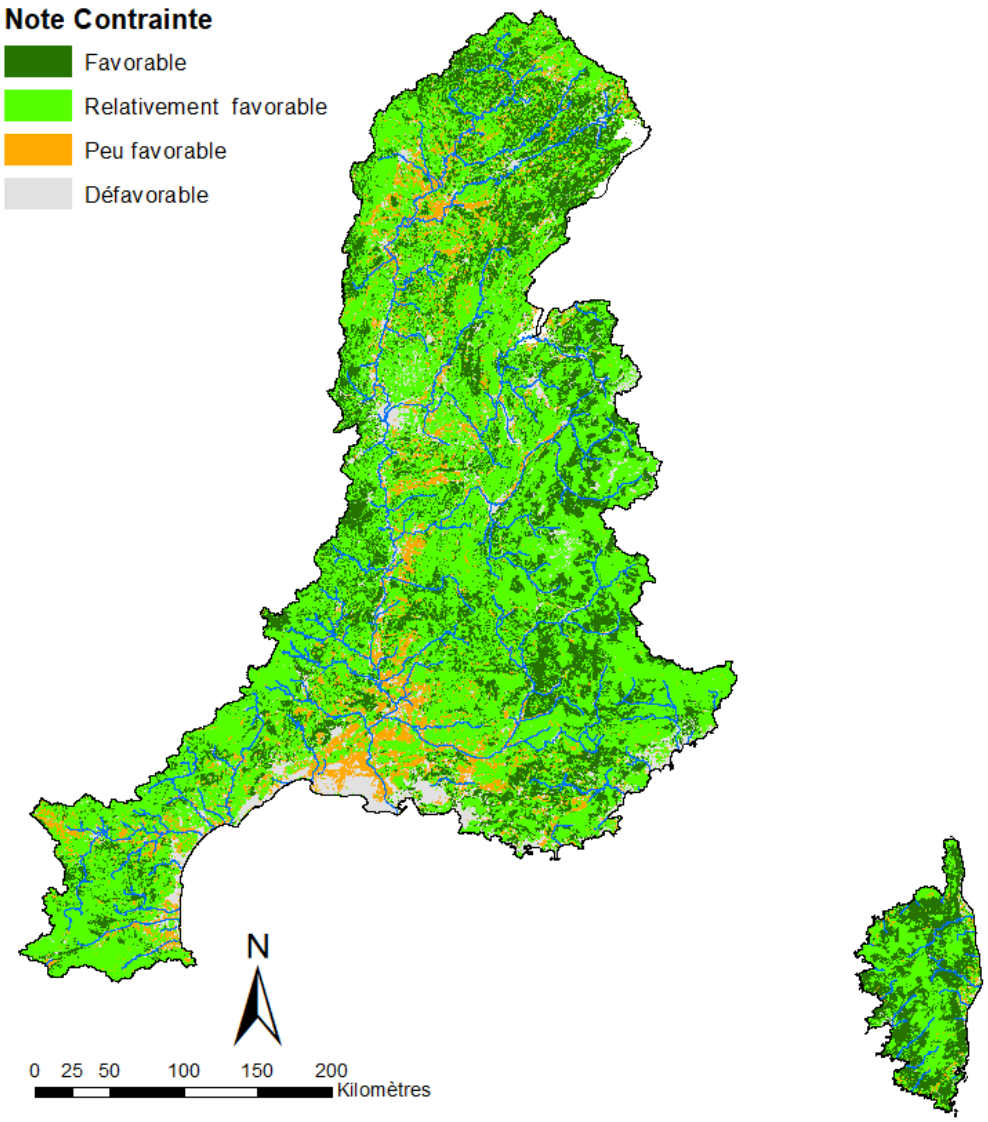


Illustration 14 : Recharge Indirecte – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères de contrainte.

2.4. DISPOSITIFS DE RECHARGE DIRECTE

2.4.1. Les critères Physiques

a) *Propriétés des aquifères*

2.4.1.a.1 Critère physique BDLISA

La recharge artificielle par des méthodes d'injection directe dans les aquifères concerne généralement les aquifères captifs. Les entités de la BDLISA concernées sont donc théoriquement les entités d'ordre 2 (sous couverture des entités d'ordre 1). Cependant pour prendre en compte ce qui se passe le long des cours d'eau, où il arrive souvent que les alluvions se surimposent aux formations qui rendent les aquifères profonds captifs, il apparaît aussi nécessaire de prendre en compte les entités d'ordre 3 (Illustration 15).

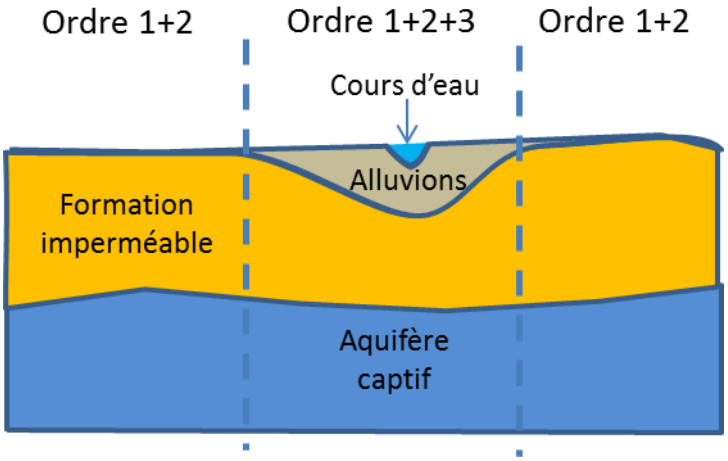


Illustration 15 : Superposition des entités BDLISA d'ordre 1,2, puis 3 le long des cours d'eau du fait des dépôts d'alluvions, pour la caractérisation des aquifères captifs en termes de recharge artificielle.

Ainsi, pour identifier le caractère favorable des formations à la recharge directe en tout point du bassin, nous devons prendre en compte les entités BDLISA d'ordre 1, 2 et 3. Cependant, cette caractérisation ne se limite pas à la prise en compte des aquifères profonds uniquement. En effet, nous considérons que des dispositifs de recharge directe peuvent aussi être mis en œuvre dans des aquifères superficiels, à partir du moment où la zone saturée est suffisamment profonde pour que la recharge indirecte par infiltration soit moins intéressante (le seuil de 40 m a été proposé selon Wuilleumier et Seguin (2008)). Ainsi, en tout point du bassin, la note de faisabilité de la recharge artificielle qui sera attribuée doit prendre en compte les caractéristiques des entités pour les trois ordres.

Les couches des entités BDLISA des 3 ordres ont donc été fusionnées afin de produire une seule couche contenant les informations des critères BDLISA pour les trois ordres. Des notes sont ensuite établies pour chaque critère, comme présenté sur l'Illustration 16.

Pour chaque critère, une note est attribuée en suivant une logique similaire à celle adoptée pour les dispositifs de recharge indirecte (§ 2.3.1), sauf pour le critère État. Pour ce critère, qui précise l'état de la nappe contenue dans les aquifères (captive, libre, etc.., cf.§ 2.3.1.a)), les entités captives (code 1) sont notées comme les plus favorables (note 4) et on considère qu'aucune situation n'est défavorable pour ce critère. La notation est ensuite abaissée pour les nappes qui sont captives uniquement pendant certaines périodes (code 4, note 3) ou sur certains secteurs (code 3, note 2). Les nappes libres (code 2) mais qui présentent une ZNS de plus de 40 m d'épaisseur, sont considérées comme plus favorables (note 3) que celles affichant une ZNS moins épaisse (code 1).

Pour chaque entité de la couche résultante de l'union des trois ordres sur le bassin, une note est calculée pour chaque ordre, en utilisant la même règle de pondération que celle utilisée pour les dispositifs de recharge indirecte. La meilleure note des trois est ensuite attribuée au critère physique BDLISA pour l'entité considérée.

Les autres critères physiques considérés pour la recharge artificielle indirecte (Pente, IDPR et épaisseur ZNS) ont été écartés de l'analyse, dans la mesure où la recharge directe permet l'injection directement dans l'aquifère, indépendamment des conditions de surface. Concernant la pente, nous considérons qu'au vu de la résolution du MNT et de l'emprise limitée d'un chantier de forage, la pente ne représente pas un facteur limitant à l'échelle du bassin. Concernant l'épaisseur de la ZNS, la donnée n'est utilisée que comme un test pour la notation du critère Etat de la BDLISA.

Note attribuée / Type de critère		Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
		0	1	2	3	4
Ordre 1	BDLISA: « Nature »	7-4	X - NoData	6	3	5
	BDLISA: « État »		0-X- NoData et 2 avec zns < 40 m		3-4-5 et 2 avec zns > 40 m	1
	BDLISA: « Thème »	3-4	X- NoData	5	2	1
	BDLISA: « Milieu »	2	X-0- NoData	3-5-6-8	4-7-9	1
Ordre 2	BDLISA: « Nature »	7-4	X- NoData	6	1-3	5
	BDLISA: « État »		0-X- NoData et 2 avec zns < 40 m		3-4-5 et 2 avec zns > 40 m	1
	BDLISA: « Thème »	3-4	X- NoData	5	2	1
	BDLISA: « Milieu »	2	X-0- NoData	3-5-6-8	4-7-9	1
Ordre 3	BDLISA: « Nature »	7-4	X- NoData	6	1-3	5
	BDLISA: « État »		0-X- NoData et 2 avec zns < 40 m		3-4-5 et 2 avec zns > 40 m	1
	BDLISA: « Thème »	3-4	X- NoData	5	2	1
	BDLISA: « Milieu »	2	X-0- NoData	3-5-6-8	4-7-9	1

Illustration 16 : Mise en relation des codes et valeurs décrivant les différents critères physiques des entités BDLISA pour les 3 premiers ordres, avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle directe.

Par ailleurs, des tests supplémentaires ont été introduits pour traiter des situations particulières, comme :

- pour chacune des entités des trois ordres considérés, si un des critères est considéré défavorable, la note de faisabilité de la recharge artificielle directe pour l'entité est défavorable. Ceci permet d'éviter de retenir des entités dont le caractère non aquifère ou encore à porosité ou perméabilité hétérogène (formations de socle, fissurées et intensément plissées), rend la recharge par forage impossible ;
- si la nappe est libre et que l'épaisseur de la ZNS y est inférieure à 40 m, un dispositif de recharge indirecte sera préférentiellement installé. Par conséquent, peu importe les notes obtenues pour les autres critères de la BDLISA, la note est fixée à 1 ;
- si l'épaisseur de la ZNS est supérieure 40 m, la note est déclassée en considérant que la mise en place du dispositif peut présenter un cout supérieur lié à la profondeur du forage ;
- comme pour la recharge indirecte (Caballero et al., 2018), le fait qu'une entité soit karstique (au sens de la surcouche karst de la BDLISA) est considéré comme limitant pour ce qui concerne sa capacité de stockage. La note finale attribuée à l'entité à la fin du traitement est donc systématiquement défavorable.

b) *Carte des critères physiques*

La combinaison des critères BDLISA pour la recharge directe est présenté sur l'Illustration 17.

On constate qu'une superficie non négligeable du bassin (inférieure à 20 % pour une superficie totale du bassin de 130 000 km²) présente des entités notées comme relativement favorables à favorables, du point de vue des critères physiques. Un nombre réduit d'entités apparaissent

comme étant favorables, mais elles couvrent des superficies importantes (Formations molassiques de la Dombes et de l'Est-Lyonnais à cheval sur Bourgogne et Rhône Alpes ~ 5 400 km², Sables Astiens d'Agde-Valras en Occitanie ~ 450 km², Molasse Miocène des bassins d'Apt et de l'Encrême ~ 150 km²). Les entités apparaissant comme relativement favorables couvrent de l'ordre de 10 % de la superficie du bassin.

Le fait que certaines entités apparaissent comme favorables ou relativement favorables alors qu'elles sont situées dans des secteurs considérés comme karstiques, est lié à l'ordre de l'entité concernée qui est différent de celui de l'entité karstique. Par exemple, les formations situées dans le secteur du Val de Saône (entités favorables situées les plus au nord sur l'Illustration 17) sont à l'ordre 1 ou 2, alors que la surcouche karst décrit dans ce secteur des formations karstiques profondes (probablement contenues dans les marnes et calcaires lacustres de l'Oligocène et de l'Éocène du fossé bressan, d'ordre 3, voire 4). Il en est de même pour les molasses du Miocène des bassins d'Apt et de l'Encrême (entité située au sud de celle de la Fontaine de Vaucluse) qui sont à l'ordre 1 alors que la surcouche karst décrit ici les contours des calcaires du Crétacé inférieur des Monts de Vaucluse et de la montagne du Lubéron, d'ordre 2. Ceci rappelle la nécessité de considérer qu'en un même endroit du bassin, plusieurs entités superposées peuvent être étudiées du point de vue de leur intérêt pour la recharge directe (Illustration 15). Pour cette raison, les Illustration 18, Illustration 19 et Illustration 20 présentent les résultats obtenus en fonction de l'ordre des entités (affleurantes ou d'ordre 1, d'ordre 2 et d'ordre 3 respectivement). Cette présentation n'empêche pas d'observer des entités relativement favorables ou favorables qui coïncident avec des secteurs karstiques sous-couverture, dans la mesure où la surcouche karst ne distingue pas les ordres sous-couverture dans sa version actuelle.

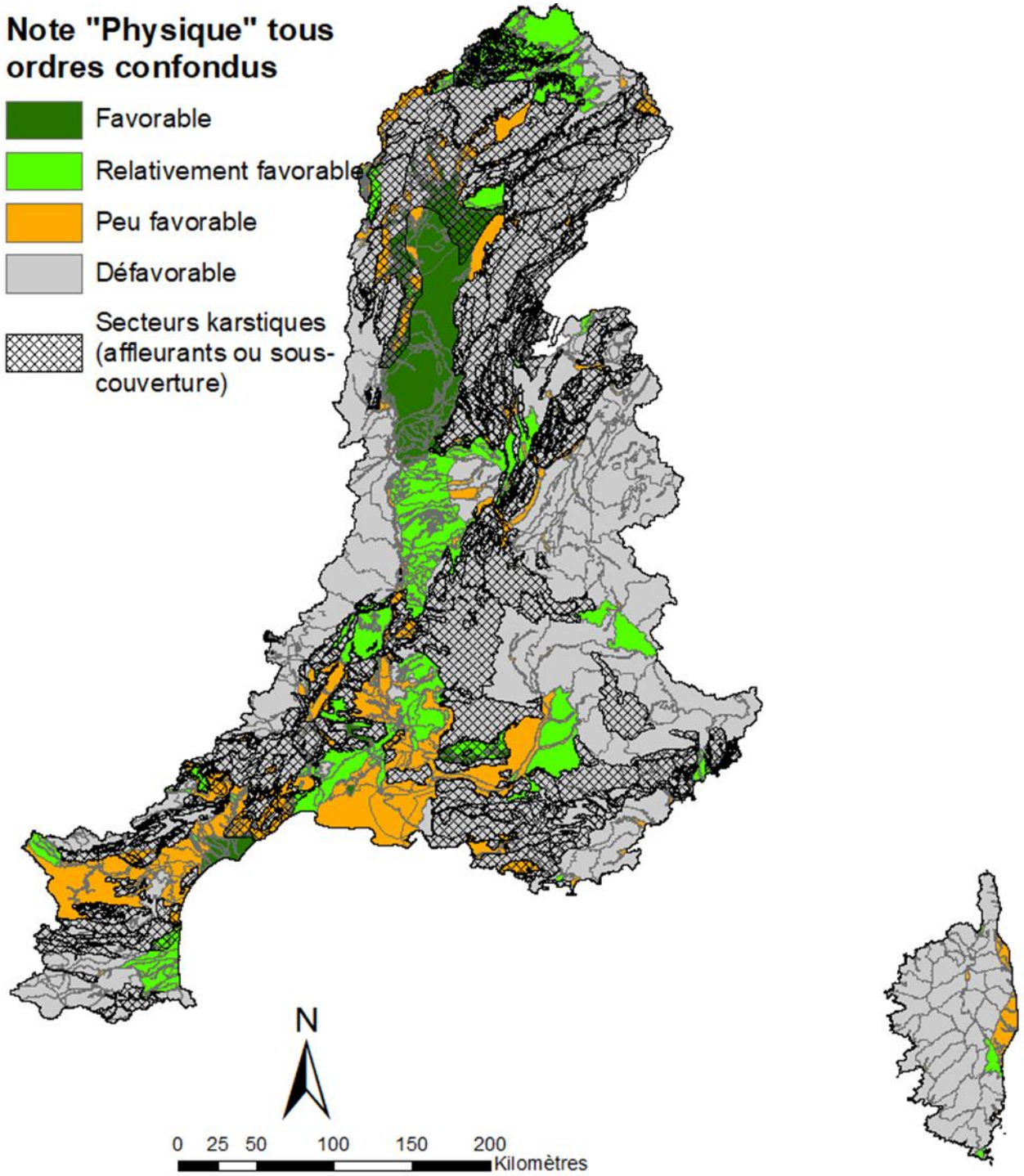


Illustration 17 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, tous ordres d'entités BDLISA confondus.

Remarque : la notation utilisée ne prend pas en considération le phénomène d'artésianisme, existant pour certaines nappes captives (Sables Astiens, par exemple), ce critère n'étant pas décrit en BDLISA.

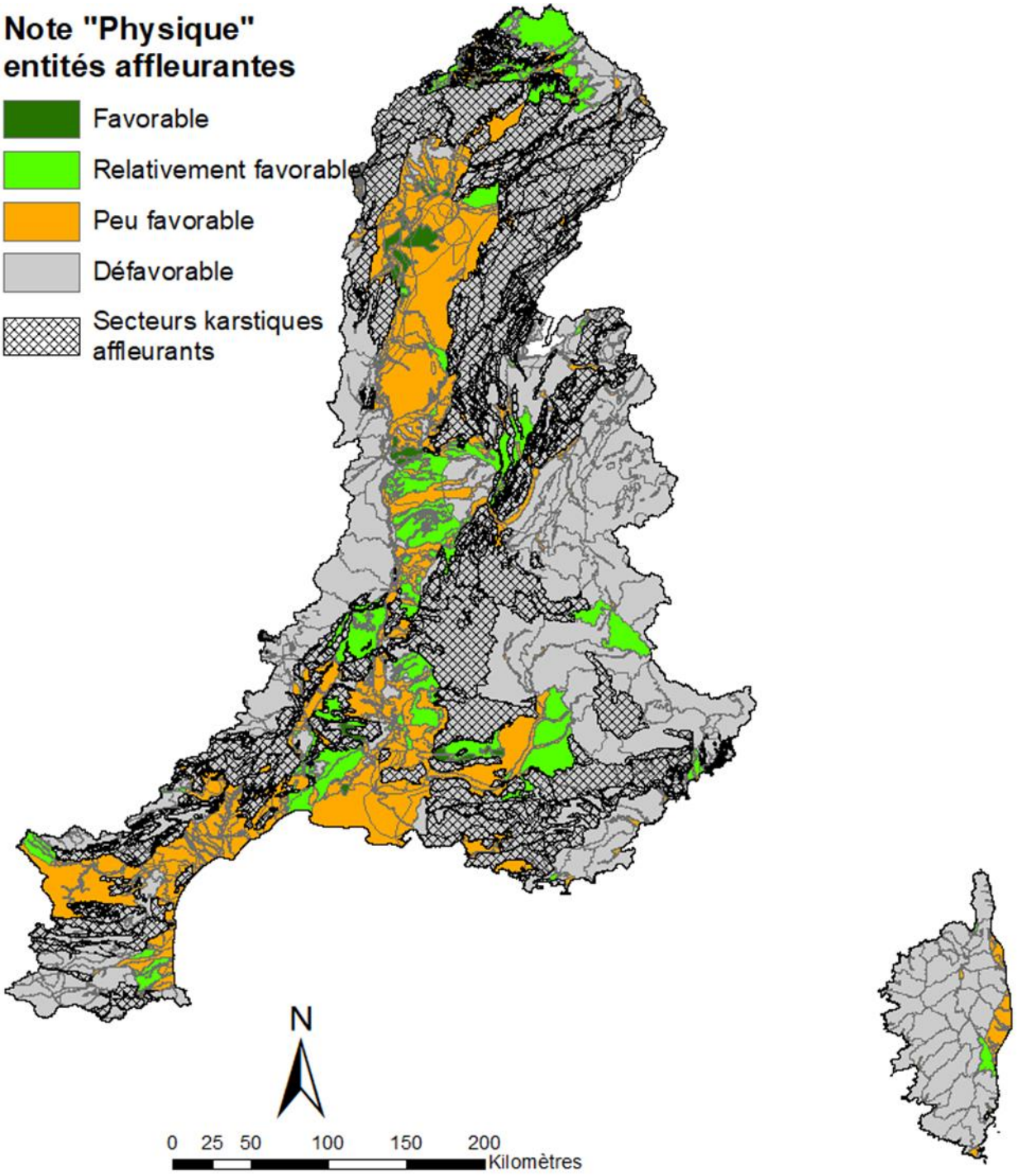


Illustration 18 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, pour les entités affleurantes (ordre 1).

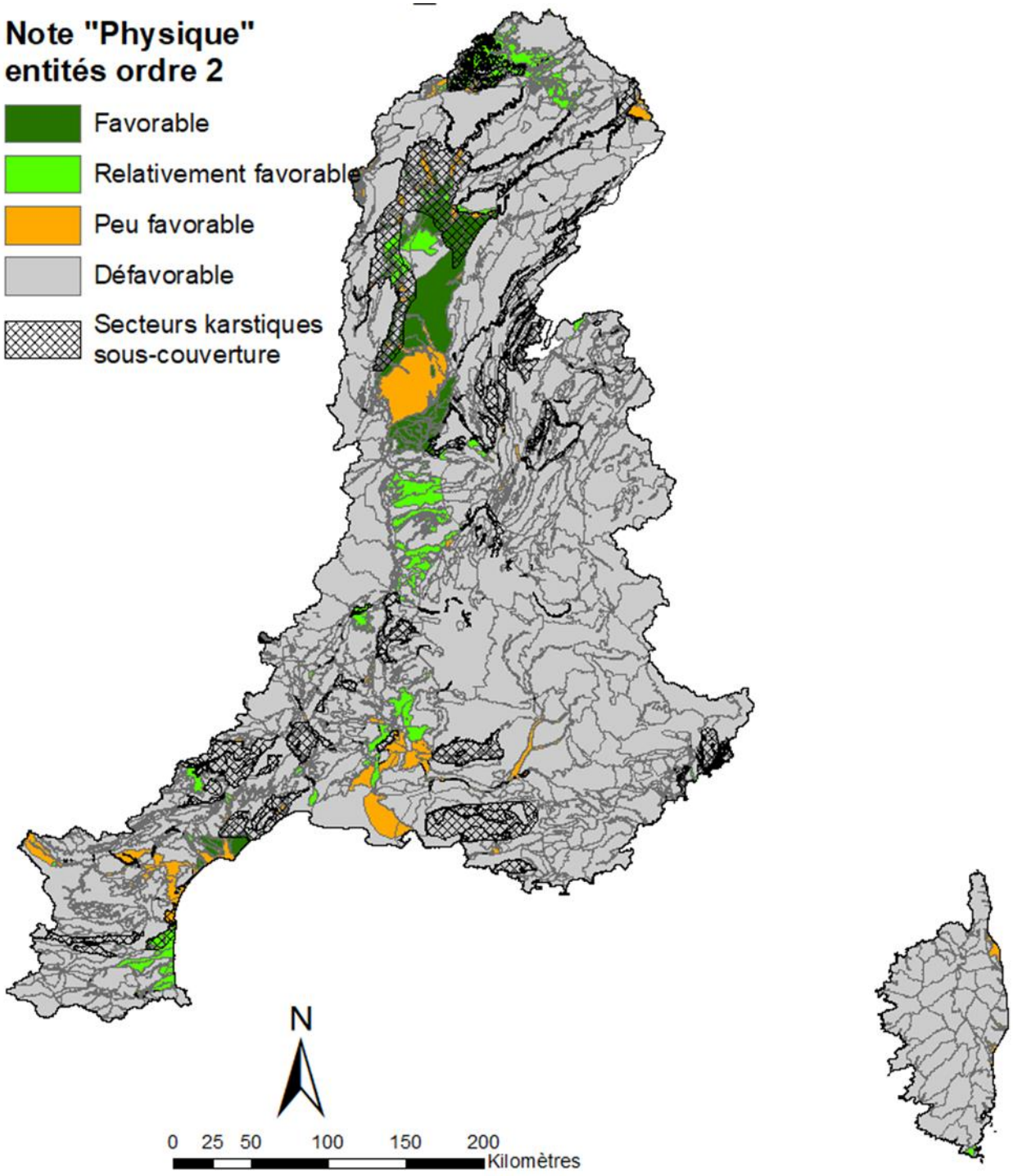


Illustration 19 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, pour les entités d'ordre 2.

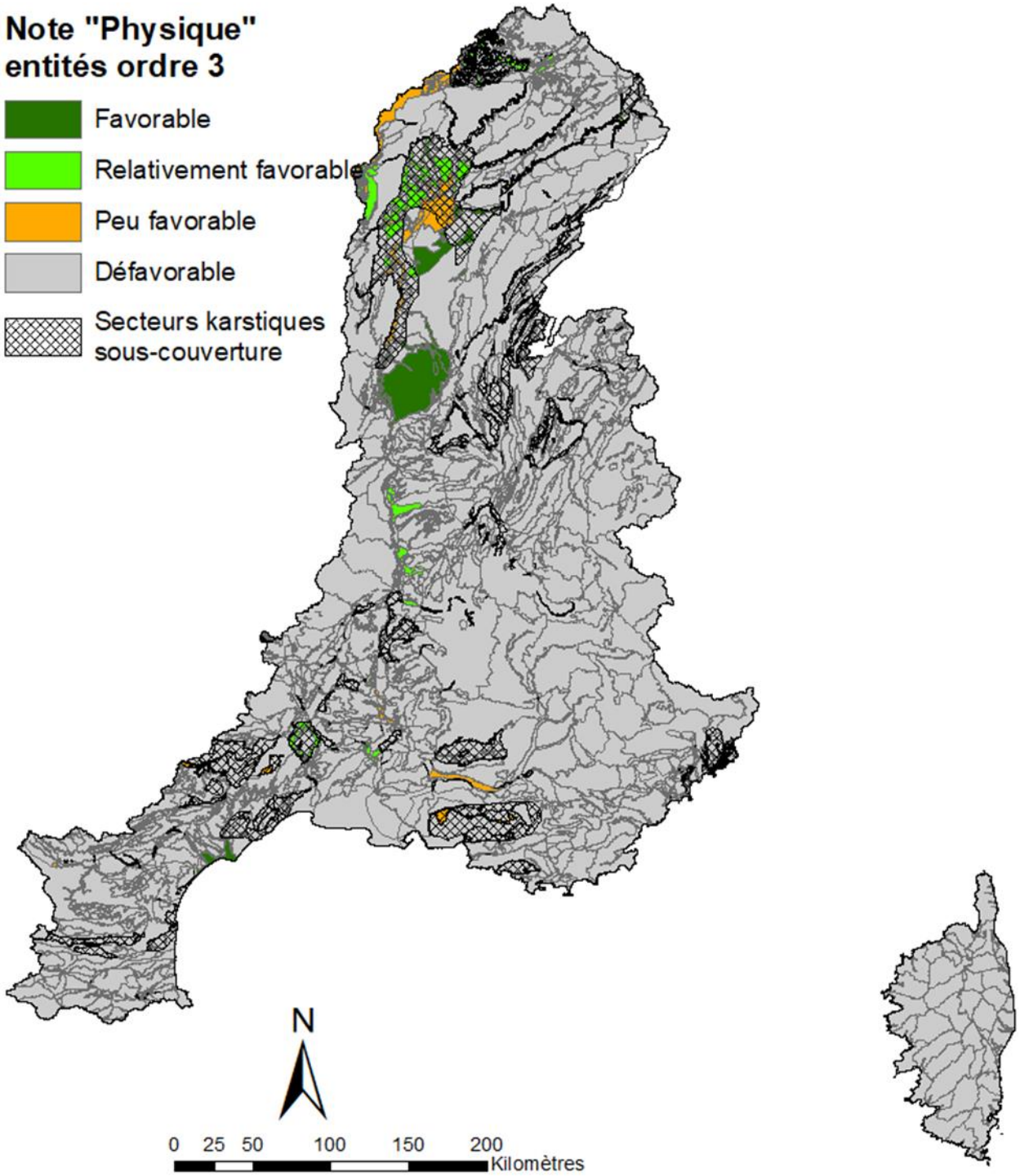


Illustration 20 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères physiques, pour les entités d'ordre 3.

2.4.2. Les critères de Contrainte

Pour les critères de contrainte, la démarche de notation est la même que celle adoptée pour la recharge indirecte. Cependant, les regroupements et la codification de l'occupation du sol dans la base CORINE Land Cover sont différents du fait de l'emprise au sol moindre que représente un dispositif d'injection d'eau directement dans la nappe. L'Illustration 21 présente les notes affectées aux différents types d'occupation du sol. Les notes affectées respectent les mêmes règles que pour la recharge indirecte, de même que pour les critères de la BD Carto et des zones de protection environnementales (Illustration 22).

Code	Note	Libellé	Code	Note	Libellé
1. Territoires artificialisés			**2. Territoires agricoles**		
111	0	Tissu urbain continu	211	2	Terres arables hors périmètres d'irrigation
112	0	Tissu urbain discontinu	212	1	Périmètres irrigués en permanence
121	0	Zones industrielles et commerciales	213	1	Rizières
122	0	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	221	2	Vignobles
123	0	Zones portuaires	222	2	Vergers et petits fruits
124	0	Aéroports	223	2	Oliveraies
131	3	Extraction de matériaux	231	4	Prairies
132	0	Décharges	241	1	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
133	0	Chantiers	242	2	Systèmes culturaux et parcellaires complexes
141	2	Espaces verts urbains	243	2	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
142	1	Equipements sportifs et de loisirs	244	2	Territoire agro-forrestiers
3. Forêts et milieux semi-naturels			**4. Zones humides**		
311	3	Forêts de feuillus	411	0	Marais intérieurs
312	3	Forêts de conifères	412	1	Tourbières
313	3	Forêts mélangées	421	0	Marais maritimes
321	4	Pelouses et pâturages naturels	422	0	Marais Salants
322	4	Landes et broussailles	423	0	Zones intertidales
323	4	Végétation sclérophylle	**5. Surfaces en eau**		
324	4	Forêt et végétation arbustive en mutation	511	0	Cours et voies d'eau
331	3	Plages, dunes	512	0	Plans d'eau
332	4	Roches nues	521	0	Lagunes littorales
333	4	Végétation clairsemée	522	0	Estuaire
334	3	Zones incendiées	523	0	Mers et océans
335	0	Glaciers et neiges éternelles			

Illustration 21 : Regroupement et codification des types d'occupation du sol dans CORINE Land Cover sur le bassin RMC, vis-à-vis de la possibilité d'y installer un dispositif de recharge directe.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Très peu favorable	Peu favorable	Moyennement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
Zones protégées	-	3	2	1	0
BDCarto	1 à 4	-	-	-	0

Illustration 22 : Mise en relation des codes des zones de protection environnementales et de la BD Carto caractérisant les critères de contrainte avec la notation de faisabilité de la recharge artificielle directe.

Le résultat de la combinaison des critères de contrainte pour la mise en œuvre de dispositifs de recharge directe, obtenu par calcul de la moyenne arithmétique sans pondération, est présenté sur l'Illustration 23.

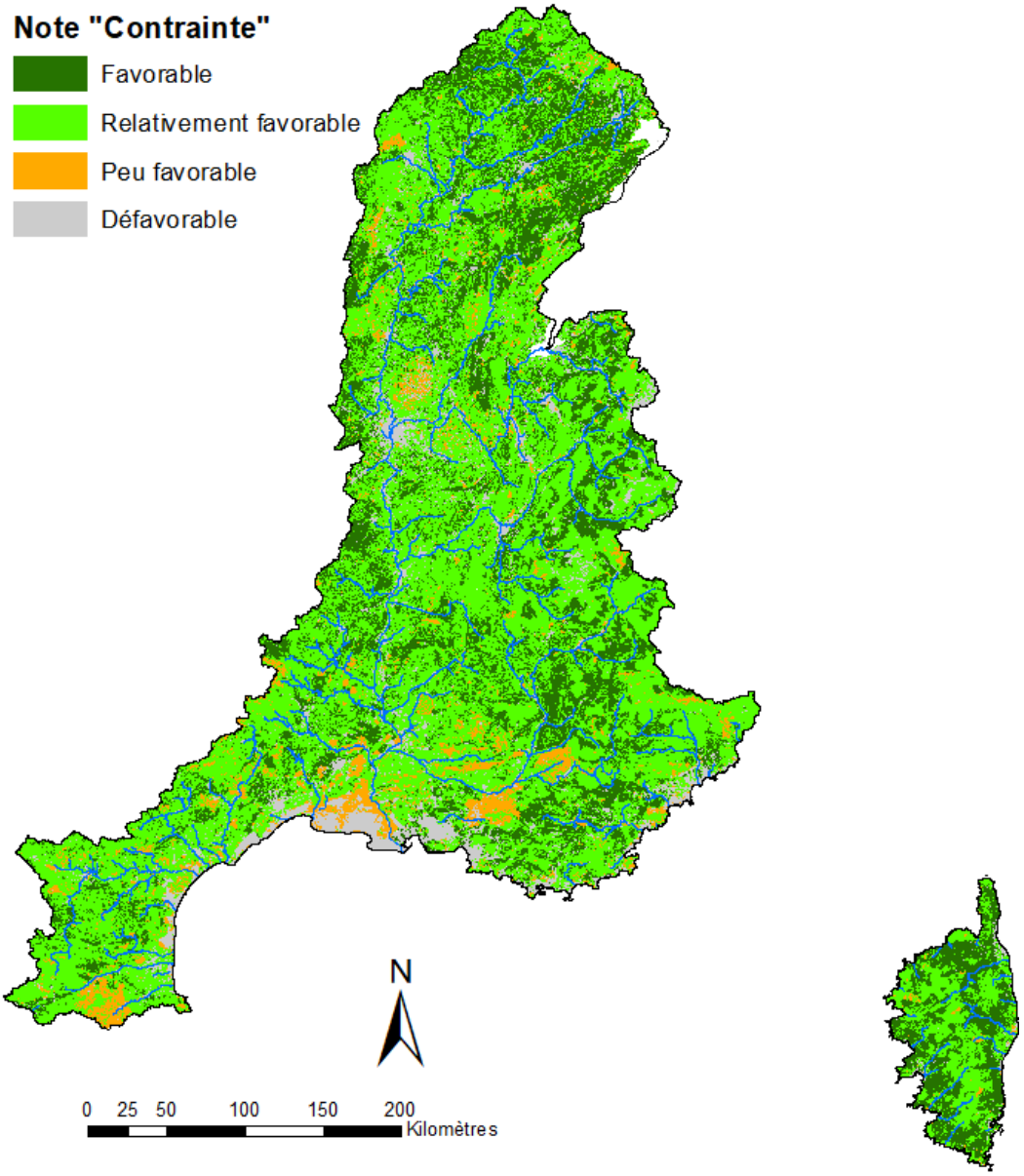


Illustration 23 : Recharge Directe – Carte de faisabilité de la recharge artificielle vis-à-vis des critères de contraintes.

2.5. RÉSULTATS

2.5.1. Synthèse de la méthode

Cette section synthétise la méthode utilisée pour cartographier le caractère favorable d'un secteur donné à la mise en place d'un dispositif de recharge artificielle, en fonction de sa valeur en chaque point du bassin, ainsi que la stratégie de combinaison de tous les critères entre eux pour obtenir les cartes finales et en présente les résultats. Comme nous l'avons vu précédemment, les critères ont été regroupés en deux types: Physiques et Contraintes. Le résultat de la combinaison des critères conduit à attribuer une notation variant selon le caractère favorable à l'implantation d'un site de recharge artificielle. Une carte a ainsi été produite pour chaque type de dispositif (recharge indirecte et directe).

L'ensemble de la démarche de combinaison est synthétisée sur l'Illustration 24. Les informations de départ sont contenues dans les tables attributaires des différentes bases de données listées en haut du graphique (Bases). Pour les deux types de critères (physiques et contraintes) des cartes présentant le résultat de la combinaison des notes de chaque critère (moyenne des valeurs de chaque critère) sont produites à l'échelle du bassin (format vecteur). Pour les critères physiques, l'information vectorielle de base est constituée des contours des entités de niveau 3 de la BDLISA. Pour les critères de contrainte, l'information vectorielle de base est constituée des contours des zones protégées.

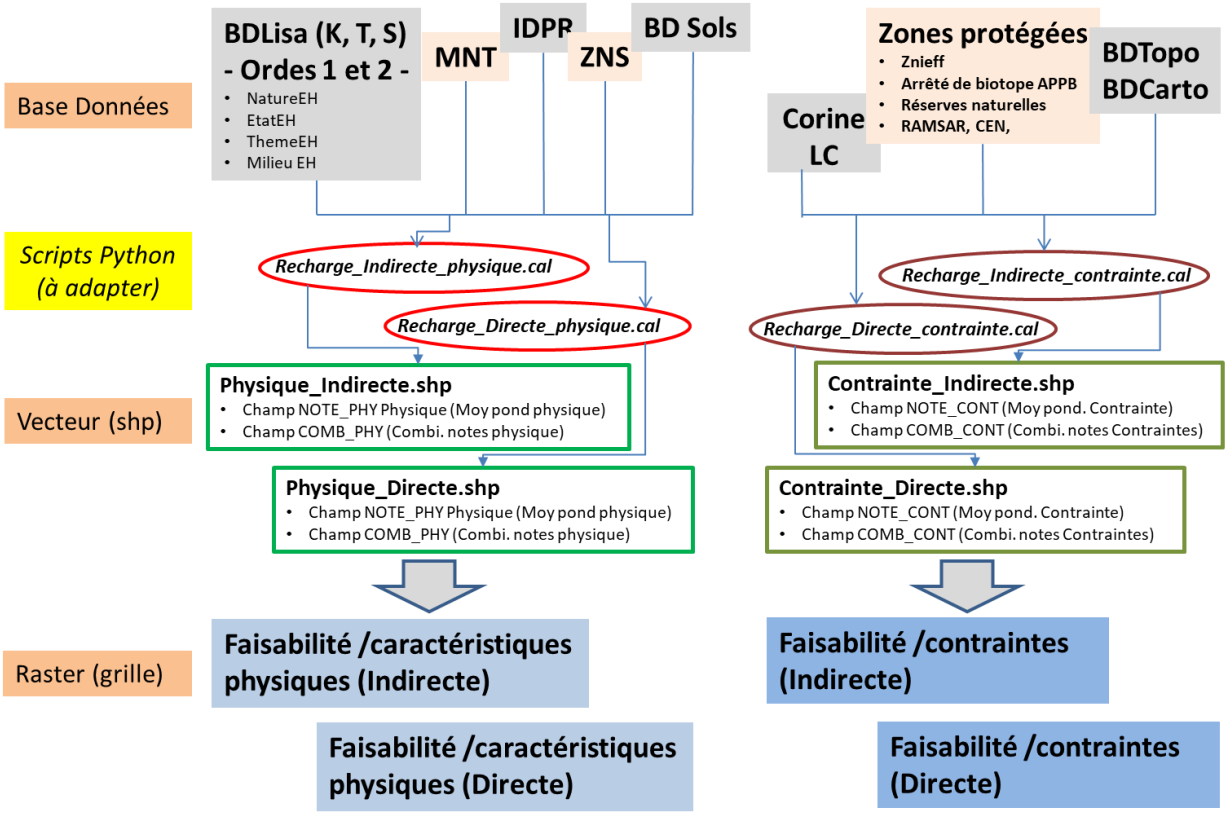


Illustration 24 : Schéma méthodologique de construction des cartes de faisabilité de mise en œuvre de la recharge artificielle en fonction des critères physiques et de contrainte.

Un script développé sous le langage Python permet de définir les valeurs attribuées à chaque critère et de conserver une trace de la stratégie de combinaison des critères qui a été utilisée pour obtenir la notation finale (moyenne pondérée ou autre méthode). Ces scripts permettent aussi d'afficher les valeurs attribuées à chaque critère sur la carte finale par une notation adaptée (champ Comb_Phy). Cette approche est intéressante dans la mesure où elle permet de tester différentes valeurs attribuées aux critères, ainsi que différentes approches de combinaison des critères entre eux et de garder la mémoire des valeurs correspondantes au résultat cartographique obtenu. Elle permet, par exemple, de réaliser une analyse de sensibilité pour visualiser l'impact de l'attribution d'une valeur donnée à tel ou tel critère. De plus, elle présente l'avantage de permettre une interactivité lors de discussions qui peuvent être organisées avec des experts dans le cadre d'un atelier pour la définition des coefficients de pondération. En effet, l'attribution d'un caractère de faisabilité de la recharge artificielle aux sources de données utilisées reste assujettie à l'avis d'expert, qui peut bien entendu être débattu. La possibilité de tester différentes approches et d'en déduire l'impact sur les cartes finales permet d'envisager la production d'une carte plus robuste.

Les types de contour sur lesquels les critères physiques et contraintes sont définis étant différents (Contours BDLISA vs contours zones protégées), il est nécessaire de les transformer en format de grille (raster) pour pouvoir combiner les notes obtenues sur des entités homogènes, au cas où l'on désire regrouper l'ensemble de l'information sur une seule et même carte. Cependant, pour des questions de lisibilité, nous présentons dans ce qui suit les cartes pour les critères physiques et contraintes séparément.

2.5.2. Cartes finales de faisabilité de la Recharge Artificielle sur le bassin RMC

Les Illustration 25, 26 et 27 présentent les résultats de l'analyse cartographique pour les deux types de dispositif de recharge (indirecte et directe), en affichant de manière séparée les critères physiques et les contraintes. Pour la recharge directe, l'Illustration 27 permet de différencier le caractère favorable des entités en fonction de leur position verticale (affleurante, sous-couverture d'ordre 1 ou d'ordre 2). Sur chacune des cartes, les entités hydrogéologiques semi-perméables, dont l'hétérogénéité peu souvent mettre en difficulté l'analyse menée à cette échelle de travail, sont mises en évidence de façon à alerter le lecteur sur l'incertitude potentiellement associée à ce type d'entité.

Pour ces figures, les fichiers numériques permettant de zoomer à une résolution suffisante pour se repérer en termes géographiques et par rapport aux masses d'eau souterraines du bassin, sont inclus dans le CD joint au rapport. Ces cartes sont disponibles au format numérique aux échelles du bassin mais aussi de chacune des grandes régions qui le composent, soit Grand-Est / Bourgogne-Franche-Comté ; Auvergne Rhône-Alpes ; Provence-Alpes-Côte d'Azur ; Occitanie ; Corse.

Les cartes, révisées par le comité de suivi du projet, de la faisabilité (sur base de critères physiques et de contraintes) de la recharge artificielle indirecte à l'échelle du bassin RMC sont présentées en Annexe 1.

Toutes les cartes sont mise à disposition du public et sont également téléchargeables sur le lien suivant : http://carmen.carmencarto.fr/283/RA-AERMC.map.

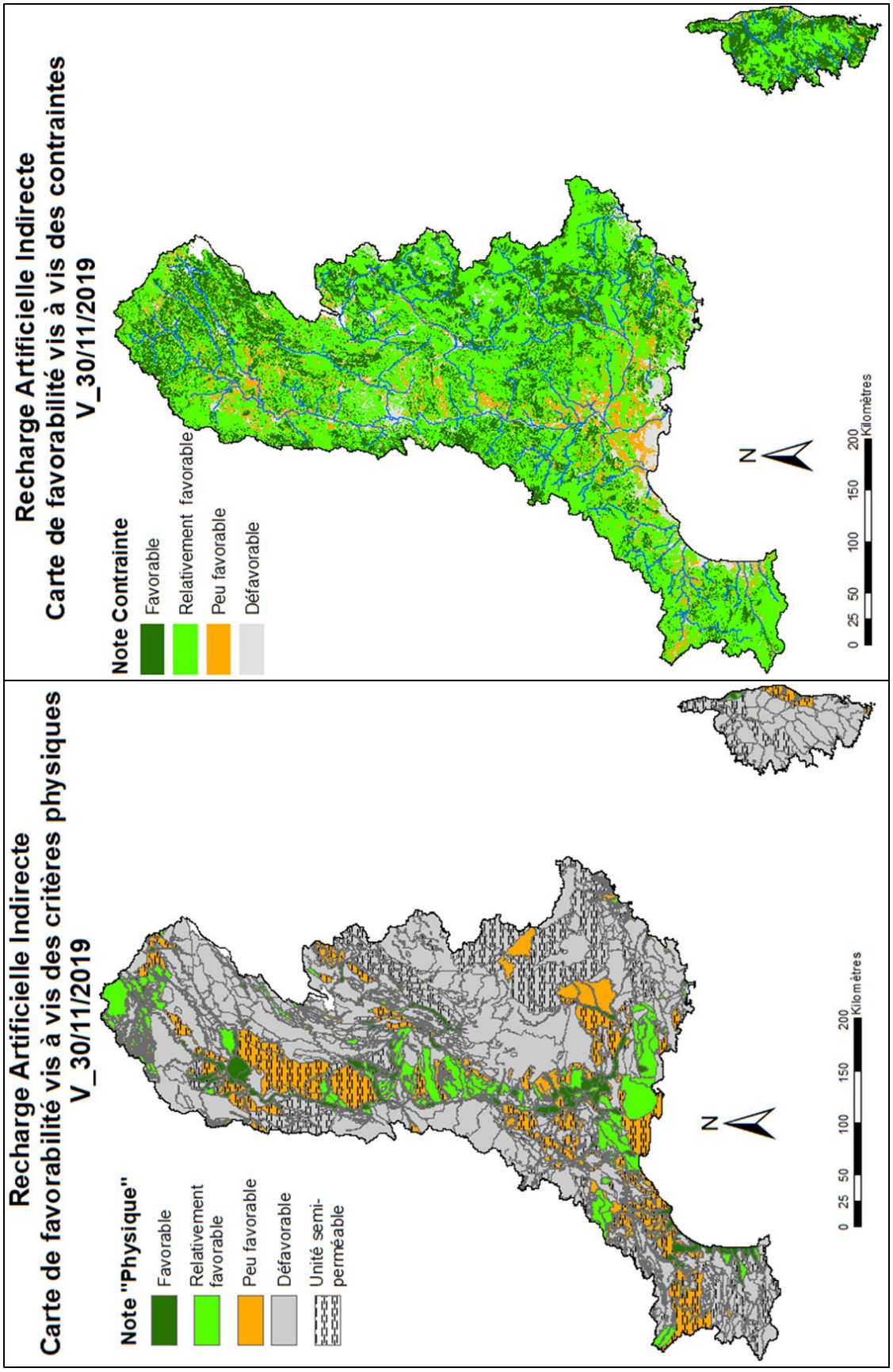


Illustration 25 : Cartes finales de favorabilité pour la mise en œuvre de la recharge artificielle ***indirecte*** *vis-à-vis des critères physiques (gauche) et des contraintes (droite).*

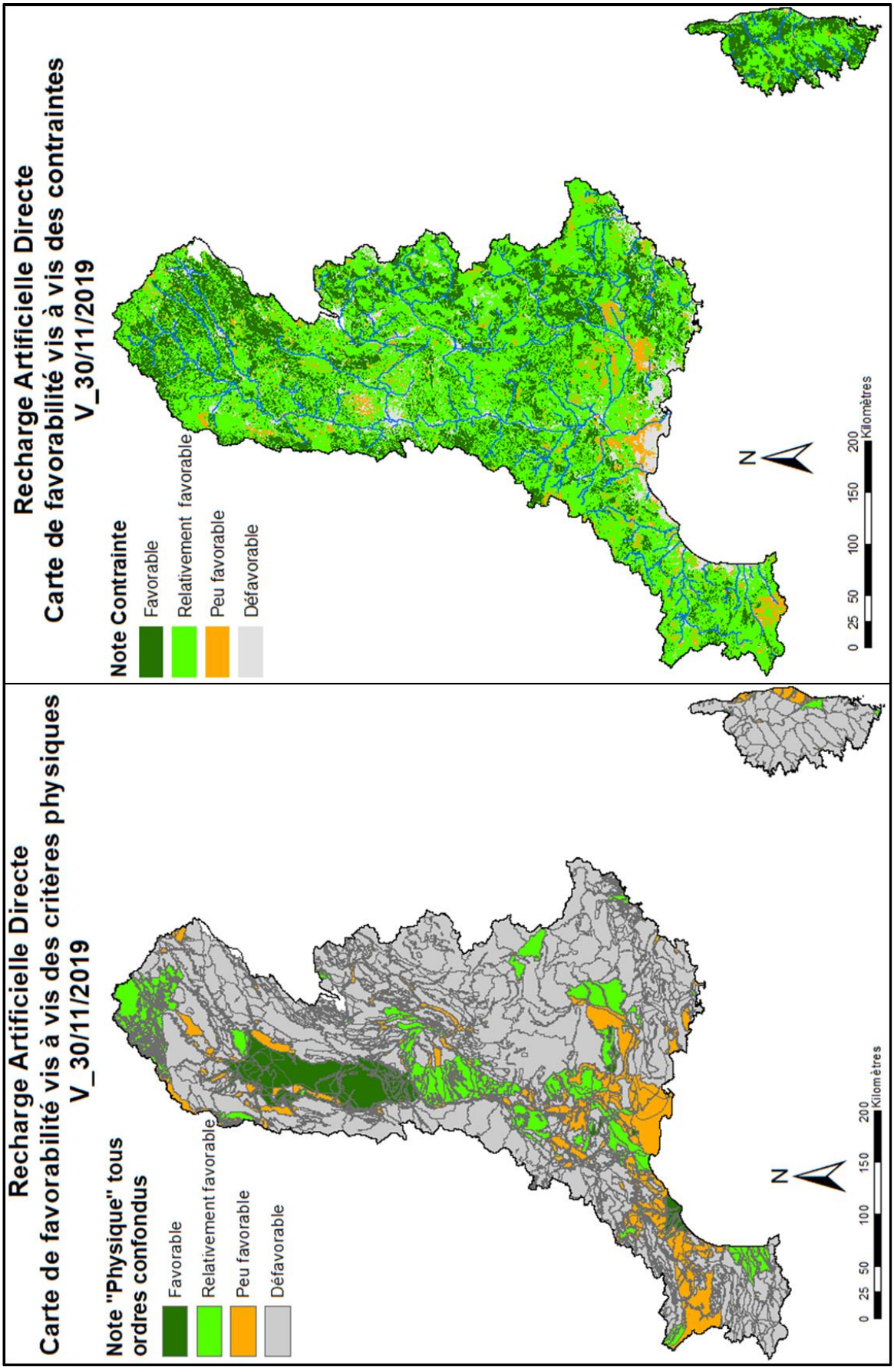


*Illustration 26 : Cartes de favorabilité pour la mise en œuvre de la recharge artificielle **directe** vis-à-vis des critères physiques (gauche) et des contraintes (droite).*

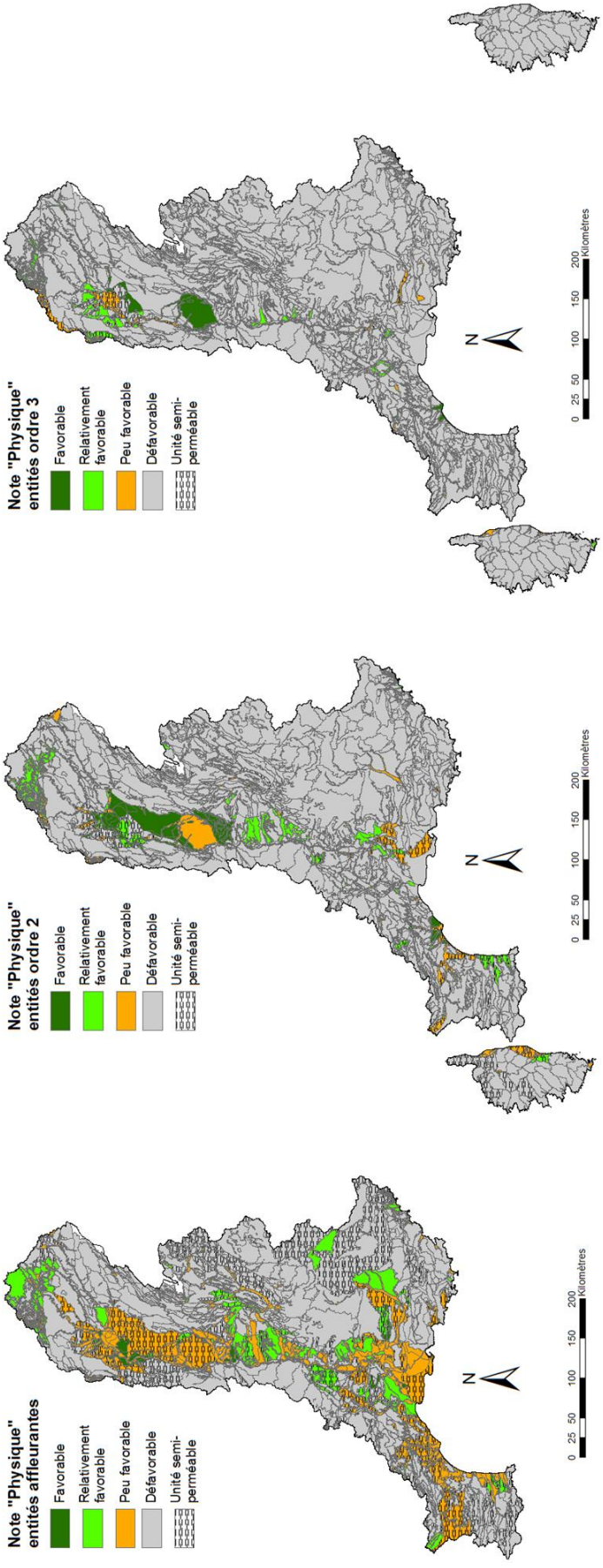


*Illustration 27 : Cartes de favorabilité pour la mise en œuvre de la recharge artificielle **directe** vis-à-vis des critères physiques en fonction de la position verticale des entités (affleurante ou sous-couverture) dans la pile hydrogéologique.*

2.5.3. Échelle du Bassin (Annexe 1)

D'une manière générale, le résultat du traitement cartographique à l'échelle du bassin montre, qu'en termes de superficie, une part relativement faible du bassin (de l'ordre de 5 %) présenterait (au regard de l'analyse menée) des conditions pleinement favorables à la recharge artificielle, qu'elle soit directe ou indirecte. Ainsi, les superficies couvertes par des entités apparaissant comme favorables à la recharge indirecte et directe (tous ordres confondus) sont de l'ordre de 7 150 km² et 7 880 km² respectivement, pour une superficie totale du bassin de l'ordre de 130 000 km². Si les superficies considérées comme favorables sont proches pour les deux types de méthodes de recharge, il convient de garder à l'esprit qu'elles sont probablement plus réalistes pour la recharge indirecte que la directe, du fait de l'approche très simplifiée adoptée pour travailler sur cette dernière d'une part et de la moins bonne connaissance des caractéristiques des entités sous-couverture en BDLISA d'autre part.

Pour la recharge indirecte, les secteurs favorables concernent uniquement des entités alluviales, ce qui constitue un résultat intuitif et logique, bien que l'approche de classification et de combinaison n'ait pas été orientée pour sélectionner uniquement ce type de formations. Un grand nombre d'entités alluviales apparaissent d'ailleurs relativement favorables seulement, déclassées par l'un ou l'autre des paramètres intervenant dans l'analyse multicritère. On constate également que la quasi-totalité des entités classées comme étant relativement favorables à favorables à la recharge indirecte correspondent à des unités aquifères du point de la BDLISA (champ NatureEH = 5).

Pour la recharge directe, différents types d'entités apparaissent en situation favorable, que ce soit des entités alluviales, de sables et graviers ou fluvio-glaciaires (dans lesquelles les nappes seraient profondes), ou des formations sédimentaires (marnes, molasses, grés, calcaires, ...). La position relative de ces entités sur le plan vertical (affleurante ou d'ordre 1, d'ordre 2 ou d'ordre 3) est cependant variable et nécessite d'être prise en compte pour pousser plus loin l'analyse. En effet, en l'absence de données sur les épaisseurs des formations concernées, il apparaît difficile de comparer le caractère favorable d'une entité suivant si elle est affleurante ou d'ordre 2 ou 3. Il est de plus probable que l'incertitude associée aux résultats obtenus augmente avec l'ordre des entités, dans la mesure où elles sont moins accessibles depuis la surface et donc moins bien connues. Contrairement à ce qui a été obtenu pour la recharge indirecte, on constate que plusieurs entités caractérisées comme semi-perméables en BDLISA (champ NatureEH = 6), peuvent apparaître relativement favorables à la recharge directe et ce quel que soit leur ordre. Ceci s'explique justement par le fait que l'on considère que la recharge directe peut se faire via un ouvrage souterrain, censé permettre d'injecter l'eau de recharge dans les niveaux aquifères potentiellement présents au sein d'une formation semi-perméable. Il est néanmoins proposé que les entités caractérisées comme étant relativement favorables ou favorables, mais constituant des entités semi-perméables d'après la BDLISA soient considérées avec prudence.

En ce qui concerne les cartes de contrainte, les secteurs apparaissant comme favorables couvrent des superficies nettement plus étendues que pour les critères physiques, de l'ordre de 33 000 km² pour la recharge indirecte et de 35 500 km² pour la directe. Malgré cela, il n'est bien sûr pas garanti que les secteurs favorables du point de vue des critères physiques le soient également du point de vue des contraintes. Cela est particulièrement vrai pour les fonds de vallée alluviales (généralement favorables pour la recharge indirecte), généralement urbanisés et donc soumis à beaucoup de contraintes. Pour cette raison, les résultats à l'échelle régionale sont uniquement commentés vis-à-vis des critères physiques dans ce qui suit. Nous suggérons que le lecteur vérifie au cas par cas, la situation du secteur qui l'intéresse en termes de contraintes, sur les cartes jointes au format numérique sur le support CD de ce rapport.

a) *Résultats à l'échelle des masses d'eau souterraines affleurantes en déséquilibre ou devant être préservées*

L'Illustration 28 montre l'intérêt de la mise en œuvre de la recharge artificielle indirecte telle que décrite dans ce travail, uniquement vis-à-vis des masses d'eau souterraine affleurantes dont l'état quantitatif nécessite d'être amélioré ou préservé d'après l'état des lieux du SDAGE RMC 2016-2021. Sur cette figure, sont représentées les entités BDLISA contenues ou concernées par l'emprise des masses d'eau souterraines affleurantes et leur degré de faisabilité de la recharge artificielle indirecte. Elle permet de constater qu'une part non négligeable des masses d'eau affleurantes en situation de tension sur la ressource ou qui doivent être préservées concernent des entités hydrogéologiques relativement favorables à favorables à la mise en œuvre de la recharge directe. C'est en particulier le cas des masses d'eau souterraine suivantes (liste produite sur la base des masses d'eau listées dans le SDAGE RMC 2016-2021) :

- alluvions de la Savoureuse (FRDG362) ;
- alluvions plaine de la Tille (superficielle et profonde) (FRDG387) ;
- alluvions nappe de Dijon sud (superficielle et profonde) (FRDG171) ;
- alluvions de l'Arve (FRDG364) ;
- alluvions de la Plaine de Chambéry (FRDG304) ;
- calcaires et marnes du massif des Bauges (sur de petits secteurs seulement) (FRDG144) ;
- alluvions Rhône marais de Chautagne et de Lavours (FRDG330) ;
- molasses miocènes du Bas Dauphiné entre les vallées de l'Ozon et de la Drôme (FRDG248) ;
- alluvions des vallées de Vienne (Véga, Gère, Vesonne, Sévenne) (FRDG319) ;
- alluvions plaine de l'Ain Nord & Sud (FRDG389 & 390) ;
- couloirs de l'Est lyonnais (Meyzieu, Décines, Mions) et alluvions de l'Ozon (sur certains secteurs seulement) (FRDG334) ;
- alluvions du Rhône de la plaine de Péage-du-Roussillon et île de la Platière (FRDG424) ;
- alluvions du Garon (FRDG385) ;
- alluvions de la Plaine de Bièvre-Valloire (FRDG303) ;
- alluvions anciennes de la Plaine de Valence (FRDG146) ;
- alluvions de la Drôme (FRDG337) ;
- alluvions du Roubion et Jabron - plaine de la Valdaine (FRDG327) ;
- molasses miocènes du Comtat (sur certains secteurs seulement) (FRDG218) ;
- alluvions des plaines du Comtat (Aigues-Lez) (FRDG352) ;
- alluvions des plaines du Comtat (Ouvèze) (FRDG353) ;
- alluvions de la Cèze (FRDG383) ;
- alluvions du Drac amont et Séveraisse (FRDG321) ;
- alluvions de la Bléone (FRDG355) ;
- alluvions de l'Asse (FRDG356) ;
- cailloutis de la Crau (FRDG104) ;

- alluvions de l'Argens (FRDG376) ;
- alluvions de la Giscle et de la Môle (FRDG375) ;
- alluvions du Gapeau (FRDG343) ;
- alluvions du moyen Gardon + Gardons d'Alès et d'Anduze (FRDG322) ;
- calcaires, marnes et molasses oligo-miocènes du bassin de Castrie-Sommières (sur certains secteurs seulement) (FRDG223) ;
- alluvions de l'Hérault (FRDG311) ;
- alluvions de l'Orb et du Libron (FRDG316) ;
- alluvions Aude médiane et affluents (Orbieu, Cesse, ,,,) (FRDG367) ;
- alluvions Aude basse vallée (FRDG368) ;
- graviers et grès éocènes - secteur de Castelnaudary (FRDG216).

Les masses d'eau souterraine pour lesquelles la recharge artificielle indirecte pourrait ne pas constituer une solution de résorption du déficit sont les calcaires et marnes jurassiques des garrigues nord-montpellieraines - système du Lez (FRDG113) ; calcaires jurassiques pli W Montpellier et formations tertiaires, unité Thau Monbazin-Gigean Gardiole (FRDG160) ; Calcaires jurassiques de la région de Villeneuve-Loubet (FRDG234) et le multicouche pliocène du Roussillon (FRDG243). Pour les masses d'eau calcaires, cette situation est due au choix de considérer comme défavorables les systèmes karstiques. Pour le multicouche du Roussillon, c'est son caractère semi-perméable qui rend cette entité défavorable à l'infiltration depuis la surface.

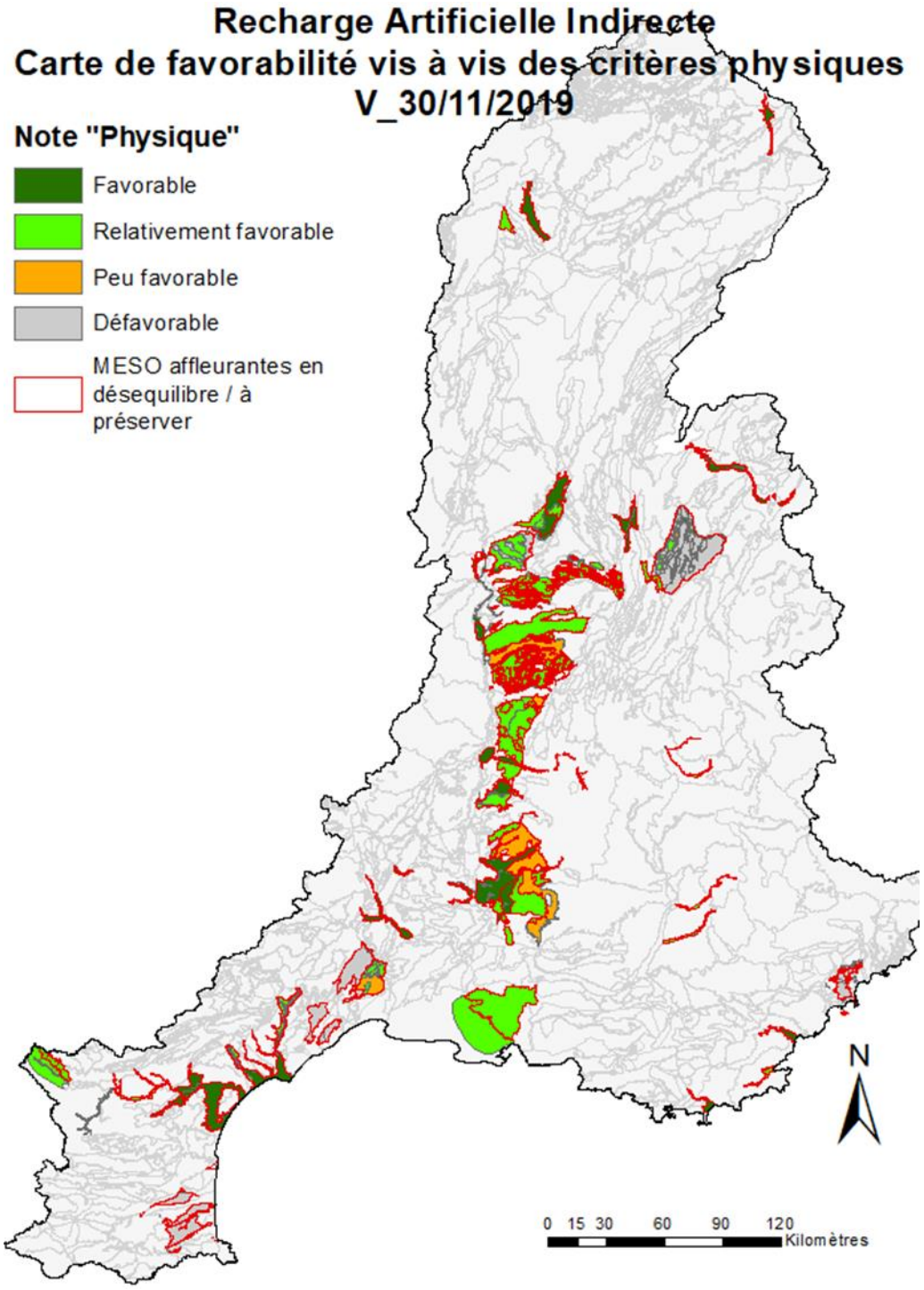


Illustration 28 : Caractérisation de la faisabilité de la recharge artificielle indirecte des entités BDLISA contenues dans les masses d'eau souterraine affleurantes dont l'état quantitatif doit être préservé ou amélioré d'après le SDAGE RMC 2016-2021.

b) *Résultats à l'échelle des masses d'eau superficielles en déséquilibre ou devant être préservées*

L'Illustration 29 montre l'intérêt de la mise en œuvre de la recharge artificielle indirecte telle que décrite dans ce travail, uniquement vis-à-vis des masses d'eau superficielles dont l'état quantitatif nécessite d'être amélioré ou préservé, d'après l'état des lieux du SDAGE RMC 2016-2021. Sur cette figure, sont représentées les portions des entités BDLISA qui sont contenues dans les bassins versants qui définissent ces masses d'eau superficielle et leur degré de faisabilité de la recharge artificielle directe. Elle permet de constater qu'un nombre non négligeable de masses d'eau superficielle contient tout ou partie d'aquifères à nappe libre présentant des caractéristiques relativement favorables à favorables pour la recharge artificielle indirecte. C'est en particulier le cas des Masses d'eau superficielle présentées dans l'Illustration 30 (liste produite sur la base des masses d'eau listées dans le SDAGE RMC 2016-2021).

Toutes les masses d'eau superficielles identifiées ne sont pas dans la même situation vis-à-vis de l'intérêt de recharger, avec des dispositifs de recharge indirecte, les nappes qu'elles contiennent. La recharge artificielle indirecte représente une mesure intéressante pour résorber le déficit ou contribuer à la préservation de la ressource uniquement pour les masses d'eau superficielle dont les cours d'eau sont en situation hydraulique leur permettant de drainer les aquifères identifiés comme étant relativement favorables à favorables à la recharge indirecte. Seule une analyse détaillée de la situation de chaque bassin identifié sur l'Illustration 29 par rapport à cette question, permettrait d'identifier les masses d'eau superficielle pour lesquelles la recharge indirecte représente une mesure de gestion de la ressource intéressante.

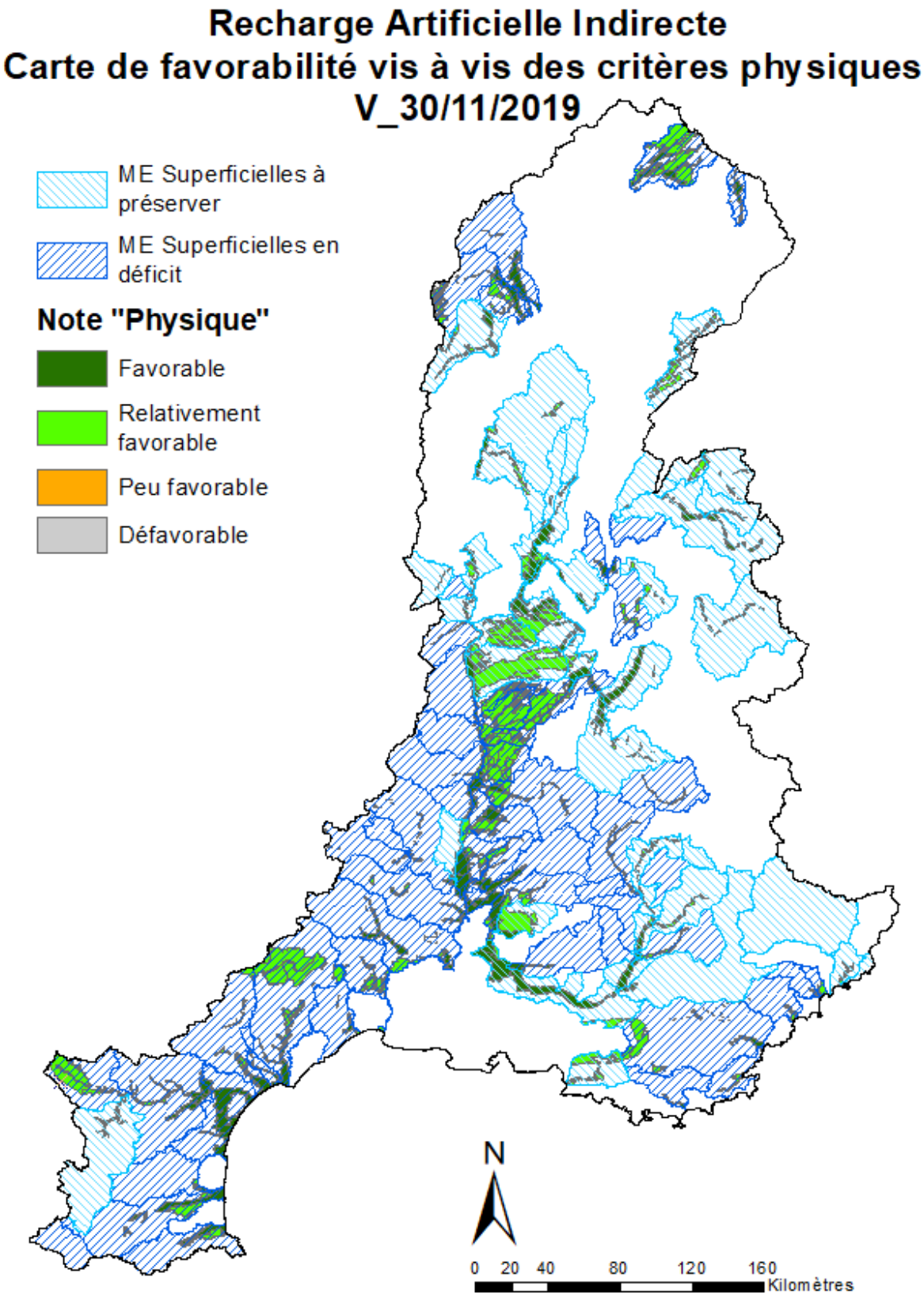


Illustration 29 : Portion des entités BDLISA présentant des caractéristiques relativement favorables à favorables à la recharge artificielle indirecte des entités BDLISA contenues dans les masses d'eau superficielles dont l'état quantitatif doit être préservé ou amélioré d'après le SDAGE RMC 2016-2021.

Code Sous-bassin	Nom ME Superficielle	État
AG_14_06	Affluents rive droite du Rhône entre Lavezon et Ardèche	préservation
CO_17_03	Aude amont	préservation
DO_02_12	Haut Doubs	préservation
DU_11_09	Rivières Sud-Ouest Mont Ventoux	préservation
DU_13_04	Basse Durance	préservation
DU_13_05	Bléone	préservation
DU_13_12	Moyenne Durance amont	préservation
DU_13_13	Moyenne Durance aval	préservation
HR_05_02	Basse vallée de l'Ain	préservation
HR_05_04	Affluents rive droite du Rhône entre Séran et Ain	préservation
HR_06_01	Arve	préservation
HR_06_03	Chéran	préservation
HR_06_04	Dranses	préservation
HR_06_06	Giffre	préservation
HR_06_11	Pays de Gex, Léman	préservation
ID_09_03	Drac aval	préservation
ID_09_04	Grésivaudan	préservation
ID_09_06	Isère en Tarentaise	préservation
ID_10_04	Paladru - Fure	préservation
LP_15_07	Littoral Alpes - Maritimes - Frontière italienne	préservation
LP_15_11	Paillons et Côtiers Est	préservation
LP_16_05	Huveaune	préservation
RM_08_01	4 vallées Bas Dauphiné	préservation
RM_08_03	Bièvre Liers Valloire	préservation
RM_08_04	Bourbre	préservation
RM_08_05	Brévenne	préservation
RM_08_07	Garon	préservation
RM_08_10	Morbier - Formans	préservation
SA_03_07	Dheune	préservation
SA_04_04	Reyssouze et petits affluents de la Saône	préservation
AG_14_01	Ardèche	déséquilibre
AG_14_03	Cèze	déséquilibre
AG_14_08	Gardons	déséquilibre
CO_17_01	Affluents Aude médiane	déséquilibre
CO_17_02	Agly	déséquilibre
CO_17_04	Aude aval	déséquilibre
CO_17_07	Fresquel	déséquilibre
CO_17_08	Hérault	déséquilibre
CO_17_09	Lez Mosson Etangs Palavasiens	déséquilibre
CO_17_10	Libron	déséquilibre
CO_17_12	Orb	déséquilibre
CO_17_17	Tech et affluents Côte Vermeille	déséquilibre
CO_17_18	Têt	déséquilibre

Code Sous-bassin	Nom ME Superficielle	État
CO_17_20	Vidourle	déséquilibre
DO_02_16	Savoureuse	déséquilibre
DU_11_02	Eygues	déséquilibre
DU_11_04	Lez	déséquilibre
DU_11_08	Ouvèze vauclusienne	déséquilibre
DU_13_03	Asse	déséquilibre
DU_13_07	Calavon	déséquilibre
HR_05_08	Séran	déséquilibre
HR_06_08	Lac du Bourget	déséquilibre
ID_09_05	Haut Drac	déséquilibre
ID_10_01	Drôme	déséquilibre
ID_10_02	Drôme des collines	déséquilibre
ID_10_03	Isère aval et Bas Grésivaudan	déséquilibre
ID_10_05	Roubion - Jabron	déséquilibre
ID_10_06	Véore Barberolle	déséquilibre
ID_10_08	Berre	déséquilibre
LP_15_01	Argens	déséquilibre
LP_15_02	Cagne	déséquilibre
LP_15_04	Giscle et Côtiers Golfe St Tropez	déséquilibre
LP_15_10	Loup	déséquilibre
LP_15_13	Siagne et affluents	déséquilibre
LP_16_04	Gapeau	déséquilibre
RM_08_06	Galaure	déséquilibre
RM_08_08	Gier	déséquilibre
SA_01_07	Lanterne	déséquilibre
SA_01_10	Ouche	déséquilibre
SA_01_13	Tille	déséquilibre
SA_03_11	Vouge	déséquilibre

Illustration 30 : Tableau des masses d'eau superficielles à préserver ou en déséquilibre qui contiennent des portions d'aquifère superficiels à nappe libre, présentant des caractéristiques relativement favorables à favorables à la recahrge artificielle indirecte dans l'emprise de leur bassin versant.

c) *Résultats à l'échelle des masses d'eau souterraines profondes en déséquilibre ou devant être préservées*

L'Illustration 31 montre l'intérêt de la mise en œuvre de la recharge artificielle directe telle que décrite dans ce travail, uniquement vis-à-vis des masses d'eau souterraine profondes dont l'état quantitatif nécessite d'être amélioré ou préservé d'après l'état des lieux du SDAGE RMC 2016-2021. Sur cette figure, sont représentées les entités BDLISA contenues dans l'emprise des masses d'eau souterraines profondes et leur degré de faisabilité de la recharge artificielle directe. Elle permet de constater que la majeure partie des masses d'eau profondes en situation de tension sur la ressource ou qui doivent être préservées concernent des entités hydrogéologiques relativement favorables à favorables à la mise en œuvre de la recharge directe. C'est en particulier le cas des masses d'eau souterraine suivantes (liste produite sur la base des masses d'eau listées dans le SDAGE RMC 2016-2021) :

- alluvions profondes de la nappe de Dijon-sud (FRDG171) ;
- alluvions profondes de la plaine de la Tille (FRDG387) ;
- formations fluvio-glaciaires nappe profonde du Genevois (FRDG235) ;
- graviers et grés Éocènes – Castelnaudary (FRDG216) ;
- molasses miocènes du Bas Dauphiné entre les vallées de l'Ozon et de la Drôme (FRDG248) ;
- molasses miocènes du Comtat (FRDG218, – sauf sur un secteur situé au nord du fait de l'absence de ces formations en BDLISA) ;
- sables Astiens de Valras-Agde (FRDG224) ;
- graviers et grès Éocènes - secteur de Castelnaudary (FRDG216) ;
- multi-couche Pliocène du Roussillon (FRDG243).

Les masses d'eau souterraine pour lesquelles la recharge artificielle directe pourrait ne pas constituer une solution de résorption du déficit sont les Calcaires jurassiques de la région de Villeneuve-Loubet (FRDG234), les Calcaires jurassiques pli W Montpellier et formations tertiaires, unité Thau Monbazin-Gigean Gardiole (FRDG160), les Sillons fluvio-glaciaires du Pays de Gex (FRDG231). Les principales raisons qui expliquent cette situation sont, par ordre d'importance : 1) la faible épaisseur de la zone non-saturée qui, selon la méthode de travail adoptée, fait que l'on a choisi de déclasser les dispositifs de recharge directe et de privilégier ceux de recharge indirecte ; 2) le type de porosité (fracturé/fissuré/karstifié) défini en BDLISA. Ainsi, la recharge directe n'apparaît pas comme une solution pour les cailloutis de la Crau (FRDG104), du fait de la faible épaisseur de la zone non-saturée, qui fait qu'on privilégie les dispositifs de recharge indirecte (actuellement déjà pratiquée d'une certaine manière sur cette masse d'eau, du fait de la présence de canaux d'irrigation).

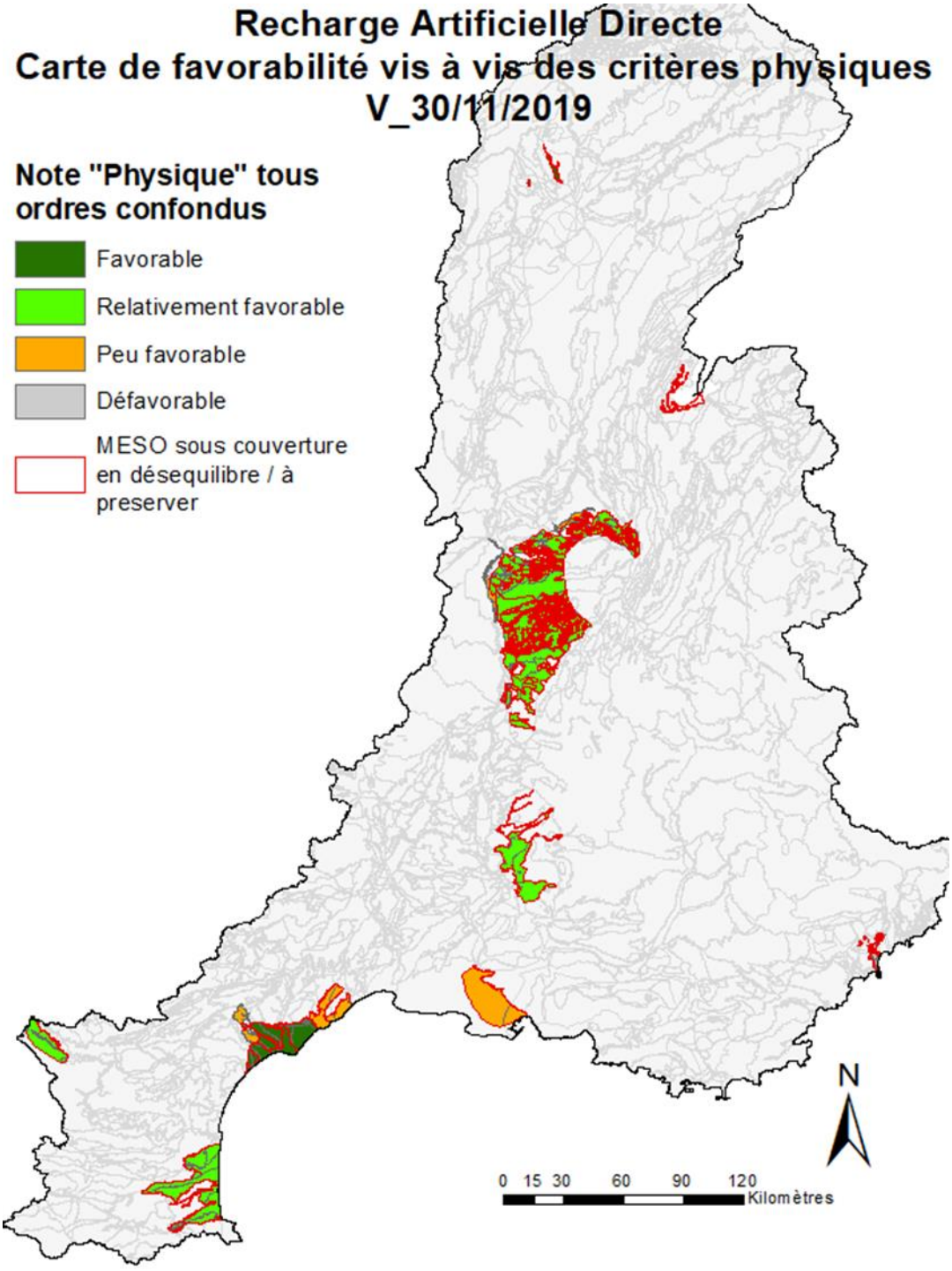


Illustration 31 : Caractérisation de la faisabilité de la recharge artificielle directe des entités BDLISA contenues dans les masses d'eau souterraine profondes dont l'état quantitatif doit être préservé ou amélioré d'après le SDAGE RMC 2016-2021.

Le résultat du travail réalisé est, dans ce qui suit, commenté à l'échelle de chaque région du bassin RMC sur la base des cartes qui sont annexées au rapport sur support numérique (CD). Les cartes présentées constituent une analyse préliminaire à une échelle qui ne permet pas de prendre en compte finement tous les éléments nécessaires à l'implantation d'un dispositif de recharge artificielle. **Elles doivent être utilisées avec prudence dans le seul objectif d'identifier les entités potentiellement favorables à la recharge artificielle indirecte ou directe. Les contours des entités identifiées ne doivent pas être considérés comme ayant une précision suffisante à des échelles inférieures au 1/100 000, dans la mesure où ils sont fortement contraints par la précision avec laquelle les contours des entités BDLISA sont définis en surface (pour la recharge indirecte) et surtout en profondeur (pour la recharge directe). La décision d'implanter ou non un dispositif de recharge artificielle doit donc impérativement faire l'objet d'études plus détaillées à l'échelle locale**.

2.5.4. Échelle régionale : Bourgogne Franche-Comté (disponible sur CD)

a) *Recharge indirecte*

Les entités hydrogéologiques (au sens de la BDLISA) de type alluvial présentent logiquement les conditions les plus favorables, en particulier dans le secteur de la confluence du Doubs et de la Saône, avec du nord-est au sud-ouest : les alluvions récentes de l'Ognon, de la Vingeanne, de la Tille, de l'Ouche, de la Saône et du Doubs à leur confluence et du Meuzin, de la Grosne en aval de la confluence. Dans le même secteur, les alluvions récentes de Dijon-sud, de la Vouge, de la Dheune et, plus au sud, de la Guye, seraient moins favorables, pour des questions de perméabilité (Dijon-sud, caractérisés en BDLISA par un ThèmeEH sédimentaire et non alluvial) ou de profondeur de la ZNS (Vouge, Dheune et Guye). Plus en amont et à l'est, les alluvions récentes de la Savoureuse et de l'Allan présentent des conditions favorables, alors que celles de la vallée du Doubs le seraient moins, essentiellement du fait de la valeur du critère IDPR sur ce secteur. Plus à l'ouest, les alluvions récentes de Breuchin-Lanterne ainsi que ceux de la Saône en amont de Dampierre-sur-Salon présentent aussi des conditions favorables à la recharge artificielle indirecte.

En dehors des alluvions, les formations relativement favorables à la recharge indirecte seraient, du nord au sud, les grés du Trias inférieur nord Franche-Comté (résultat probablement incertain à l'échelle de l'entité, au regard de sa forte hétérogénéité verticale qui rend probablement difficile l'infiltration depuis la surface en tout point du bassin), les cailloutis pliocènes de la Forêt de Chaux en rive gauche du Doubs (la présence d'une matrice argileuse dans ces cailloutis pouvant cependant limiter leur intérêt pour la recharge artificielle), les calcaires, grés et argiles de l'Hettangien-Sinémurien, du Pliensbachien et du Lias inférieur et, tout à l'ouest, les grés et calcaires du Domérien et du Pliensbachien. Ces dernières formations du Lias ne sont cependant que peu ou pas exploitées et ne représentent donc qu'un enjeu très limité vis-à-vis de la question de la recharge artificielle.

b) *Recharge directe*

La région Bourgogne Franche-Comté présente une superficie non négligeable de secteurs qui apparaissent en situation relativement favorable à favorable vis-à-vis de la recharge artificielle directe. Les secteurs favorables situés au sud de la région sont par exemple constitués des formations de graviers sous-couverture argileuse du « Saint-Côme » du Val de Saône, des formations molassiques de la Dombes et de la Bresse, des Cailloutis Pliocènes de la forêt de Chaux, des alluvions du Doubs et de la Saône au niveau de leur confluence et des graviers profonds de Dijon-sud et de la Tille, généralement en situation semi-captive ou captive.

À l'ouest de la Saône, les formations argilo-marneuses du Plio-pléistocène du fossé bressan et du Val de Saône, ainsi que les grès et calcaire gréseux et marnes du Pliensbachien ressortent en situation relativement favorable. Au nord, les dolomies et marnes du Keuper et les grès du Trias inférieur nord Franche-Comté apparaissent également en situation relativement favorable.

2.5.5. Échelle régionale : Auvergne-Rhône-Alpes (disponible sur CD)

a) *Recharge indirecte*

Comme précédemment, ce sont les secteurs alluvionnaires qui présentent les conditions les plus favorables avec, pour les plus importants, les alluvions récentes du Rhône, de la plaine de l'Ain, de la Saône, de l'Arve, de l'Isère et du Drac. Des systèmes moins importants, dont l'intérêt en termes de ressource en eau peut être discuté, apparaissent néanmoins en situation favorable : les alluvions des Dranses et de la Cluse d'Annecy, de l'Arc, de l'Arly, de la Bonne, de la Roizonne, de la Bourbre et du Catelan, de la Fure, de l'Ainan, de la Morge, de Chantabot, des Rivoires, de la Veyle, de la Chalaronne et tout au sud de la région, celles du Roubion et de Jabron.

Parmi les entités alluviales classées comme relativement favorables, on trouve les alluvions du Giffre (déclassées par des critères IDPR et épaisseur de ZNS peu favorables), de la Romanche (peu favorable d'après le critère IDPR), de la rive droite du Rhône, entre la confluence de la Saône et celle de la Drôme, ainsi que celles de la Varèze, de la Galaure et de l'Herbasse, en aval de cette dernière, celles de la Drôme et de la Berre (toute considérées peu favorables du point de vue de l'IDPR et de la pente). Les alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire et les alluvions anciennes de la Plaine de l'Isère et de Valence apparaissent moins favorables en termes de perméabilité (ThèmeEH sédimentaire en BDLISA) et d'IDPR. Un certain nombre de systèmes alluvionnaires de moindre importance sont aussi en situation relativement favorable: les alluvions de la Reyssouze (peu favorables pour le critère épaisseur de la ZNS), de l'Azergues et de la Brevenne (peu favorables du fait de la pente).

En dehors des alluvions, les autres types de formations relativement favorables à la recharge indirecte seraient, du nord au sud, les formations glaciaires et fluvio-glaciaires du Bas-Chablais (peu favorable du point de vue de l'IDPR et présentant une épaisseur de ZNS importante), le Plio-Quaternaire de la Dombes (probablement seulement localement), les formations crétacées et miocènes des synclinaux du Haut-Jura et du Haut-Doubs, les calcaires jurassiques et triasiques du Mont d'Or (essentiellement parce qu'ils sont définis comme aquifères en BDLISA, ce qui est discutable au vu de leur contexte perché), les formations morainiques de la basse vallée de l'Ain (probablement très discutable au vu de la faible perméabilité associée aux moraines) et fluvio-glaciaires du couloir de Meyzieu, les formations molassiques du Bas-Dauphiné (probablement seulement localement), les anciennes terrasses de l'Isère (probablement fortement drainées par les cours d'eau), les cailloutis calcaires quaternaires d'Alixan et le secteur nord de la molasse Miocène du Comtat Venaissin (probablement fortement drainé par les cours d'eau également).

b) *Recharge directe*

À l'instar de la région BFC, la région Auvergne Rhône-Alpes présente une superficie non négligeable de secteurs relativement favorables à favorables à la recharge directe. Au nord, on trouve les formations molassiques de la Dombes, de la Bresse et de l'Est lyonnais, ainsi que les sables pliocènes du Val de Saône en situation favorable. Au centre, on trouve les formations molassiques du Bas Dauphiné, moins favorables que les molasses situées au nord parce qu'elles ne sont pas systématiquement captives d'après la BDLISA. Les marnes et marno-calcaires crétacés et oligocènes de la bordure des Cévennes et du Bas-Vivarais, situées au sud-ouest des molasses du Bas-Dauphiné apparaissent également en situation relativement favorable (résultat probablement discutable du fait de leur caractère semi-perméable). La partie la plus

septentrionale de ces formations (à cheval sur la région Provence Alpes Côtes d'Azur (PACA)) est considérée comme peu favorable du fait de la plus grande variabilité de la profondeur des nappes sur ce secteur (d'après la carte de l'épaisseur de la zone non-saturée). À l'est des formations du Bas-Dauphiné, les formations molassiques et variées de l'avant pays savoyard apparaissent comme étant relativement favorables du fait de l'importante épaisseur estimée de la zone non saturée (résultat probablement discutable du fait de leur caractère semi-perméable d'après la BDLISA). De manière plus anecdotique, les dépôts glacio-lacustres de Bellegarde-sur-Valserine, les sillons fluvio-glaciaires des vallées de la Menoge et de l'Arve et formations glaciaires et fluvio-glaciaires du Bas-Chablais – hautes et basses terrasses de Thonon-les-Bains, au nord et au nord-est de la région, apparaissent aussi relativement favorables à la recharge directe, soit du fait de leur caractère captif ou semi-captif, soit du fait de l'importance de l'épaisseur estimée de leur zone non saturée (probablement très discutable en zone de montagne). Les alluvions anciennes des terrasses de l'Isère, les formations glaciaires du plateau de Louze, de Saint-Prim et de Salaise-sur-Sanne (toutes deux présentant des épaisseurs de ZNS importante d'après la carte) et les formations volcaniques des Coirons (du fait de leur caractère libre et captif), apparaissent en situation relativement favorable. Les formations du Pliocène supérieur des plateaux de Bonnevaux et Chambaran, les formations fluvio-glaciaires du couloir de Certines, les formations variées du Trias supérieur au Jurassique moyen de la bordure sous-cévenole ressortent également en situation relativement favorable, malgré leur caractère semi-perméable d'après la BDLISA. Enfin, tout au sud et à cheval sur la région Provence Alpes Côte d'Azur, les molasses du Comtat Venaissin apparaissent aussi relativement favorables du fait de leur caractère alternativement libre et captif.

2.5.6. Échelle régionale : Provence-Alpes-Côte d'Azur (disponible sur CD)

a) *Recharge indirecte*

En PACA, les entités hydrogéologiques les plus favorables sont situées dans la partie ouest du territoire et sont relativement peu nombreuses, le secteur alpin étant essentiellement défavorable ou peu favorable à la recharge artificielle indirecte (sauf pour les alluvions récentes de la Guisane, ainsi que celles de la Haute-Durance et de l'Ubaye et les alluvions du Haut Drac, en situation relativement favorable seulement). À nouveau, les secteurs alluvionnaires apparaissent les plus favorables, que ce soit le long du Rhône, avec, du nord au sud, les alluvions récentes de l'Aigues et du Lez, de l'Ouvèze, des Sorgues et de la Nesque (celles de Graveson-Maillane apparaissant déclassées à cause de la trop faible épaisseur de la ZNS d'après la carte, ce qui est probablement discutable), de la moyenne et de la basse Durance (sauf dans la partie amont où les alluvions récentes du Buëch, de la Bléone et de l'Asse apparaissent déclassées à cause de la pente principalement) et du Rhône de Tarascon à Arles ; ou du littoral méditerranéen avec, d'ouest en est, les alluvions récentes de l'Arc, du Gapeau et de l'Argens (celles de l'Huveaune, de la plaine de l'Eygoutier, de la Giscle et de la Môle, de la Siagne et de la basse vallée du Var et des Paillons apparaissant déclassées par rapport aux autres pour des questions d'IDPR défavorable et/ou de profondeur trop faible de la ZNS).

En dehors des alluvions, les formations relativement favorables à la recharge indirecte seraient, du nord-ouest au sud-ouest, les molasses miocènes du Comtat Venaissin, les sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron et les cailloutis plio-quaternaires de la plaine de Crau.

b) *Recharge directe*

La région PACA présente moins de secteurs intéressants du point de vue de la recharge directe que les régions précédemment évoquées. Ainsi, seules les molasses Miocène des bassins d'Apt et de l'Encrême situées dans la moitié ouest de la région auraient des caractéristiques favorables

à la recharge directe, du fait de leur caractère captif (ce qui présente un intérêt limité au vu de son extension réduite et de son exploitation actuellement très limitée). À cheval sur la région Auvergne Rhône-Alpes, les molasses du Comtat Venaissin, ainsi que les sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron apparaissent relativement favorables, du fait de leur caractère alternativement libre et captif. Au nord, les flyschs à Helminthoïdes et schistes noirs de la nappe de l'Embrunais-Ubaye (dont la nature définie comme aquifère en BDLISA est certainement très discutable) apparaissent relativement favorables du fait de l'importante épaisseur estimée de la zone non-saturée (probablement très discutable pour ces formations très compartimentées et situées en zone de montagne). Au centre, les formations détritiques Mio-Pliocènes du bassin de Digne – Valensole (épaisseur ZNS importante) apparaissent relativement favorables. Il en est de même pour la partie la plus orientale des formations variées à dominante tertiaire de la basse et moyenne vallée de la Durance (ce qui est probablement discutable du fait de leur caractère semi-perméable d'après la BDLISA). Les formations crétacées et tertiaires du bassin du Calavon apparaissent également en situation favorable du fait de l'importante épaisseur de la ZNS d'après la carte (ce qui est à considérer avec prudence du fait de leur probablement faible capacité de stockage). Vers le sud, les alluvions de la plaine de l'Eygoutier, ou la nappe est semi-captive d'après la BDLISA, apparaissent en situation relativement favorable. À l'est de la région, les poudingues Pliocènes de la basse vallée du Var apparaissent relativement favorables du fait de leur caractère alternativement libre et captif.

2.5.7. Échelle régionale : Occitanie (disponible sur CD)

a) *Recharge indirecte*

En Occitanie, relativement peu de formations apparaissent favorables à la recharge artificielle indirecte et elles se situent essentiellement le long du littoral méditerranéen. Les secteurs alluvionnaires apparaissent toujours les plus favorables avec, du nord-est au sud-ouest, les alluvions récentes de la basse vallée de la Cèze et de la Tave, du bas Gardon en aval de Remoulins et du Rhône rive droite entre Beaucaire et Villeneuve lès Avignon, du Gardon d'Alès et d'Anduze et du moyen Gardon situées en aval, du Vidourle, du Lez, de l'Hérault et de la Thongue, du Libron, de l'Orb entre Reals et la mer, de la Cesse, de l'Orbieu et de l'Aude en aval d'Olonzac (de l'Aude en amont d'Olonzac) et de l'Agly, Têt, Réart, Tech et Conflent en Catalogne (les alluvions anciennes de l'Agly, la Têt et du Tech apparaissant moins favorables).

En dehors des alluvions, les seules formations relativement favorables sont les graviers et grès du Paléocène et de l'Éocène inférieur et moyen au Sud de la montagne Noire (secteur de Castelnaudary).

b) *Recharge directe*

Plusieurs secteurs apparaissent favorables pour la recharge directe en Occitanie. À l'est, les molasses du bassin d'Uzés et, un peu plus au sud, les alluvions quaternaires et villafranchiennes à l'Ouest de Saint Gilles et les sables et argiles de l'Astien des Costières apparaissent favorables du fait de leur caractère captif. Au centre de la région, les sables astiens d'Agde-Valras apparaissent eux aussi en situation favorable pour les mêmes raisons. Concernant les secteurs en situation relativement favorable, nous pouvons identifier, du nord-est au sud-est, les calcaires et marno-calcaires de l'Hauterivien de l'anticlinal de Lussan, du fait de l'importante épaisseur de la zone non-saturée estimée sur ce secteur ; les grès, calcaires et marnes du crétacé moyen et supérieur du bassin d'Uzès, les formations urgoniennes ou tertiaires du bassin de Pujaut à Fournès et les alluvions quaternaires et villafranchiennes de la Vistrenque et du Vidourle du fait de leur caractère semi-captif ; les calcaires du Crétacé inférieur des Garrigues nîmoises ; les molasses miocènes du bassin de Sommières et de Castries ; les calcaires de Pondres (Oligocène

inférieur) du bassin de Salinelles. Au centre de la région, une partie conséquente des marnes, argilites et grès du Trias dans les Grands Causses apparaissent en situation relativement favorable du fait de leur caractère semi-captif (ce qui n'est probablement vrai que localement et discutable au vu de leur nature semi-perméable d'après la BDLISA). Une petite partie du secteur nord des marnes et calcaires du Crétacé au Pliocène du Bas Languedoc dans le bassin versant de l'Hérault apparaît aussi en situation relativement favorable, de même que le Bassin houiller de Graissessac dans le bassin versant de l'Orb (ce qui est discutable au vu de la nature semi-perméable d'après la BDLISA de ces deux formations). A l'ouest des sables Astiens, deux petits secteurs des molasses, calcaires, grès et marnes tertiaires du bassin versant de l'Orb et, plus à l'ouest, des formations Oligo-Mio-Pliocènes du bassin versant de l'Aude apparaissent en situation relativement favorable du fait de la stabilité spatiale de l'épaisseur de la zone non saturée. Au nord-ouest, les graviers et grès du Paléocène et de l'Éocène inférieur et moyen au Sud de la montagne Noire (secteur de Castelnaudary) apparaissent en situation relativement favorable du fait de leur caractère semi-captif. Enfin, au sud-ouest, l'ensemble des sables et argiles Pliocènes du Roussillon ressortent en situation relativement favorable du fait de leur caractère semi-captif (malgré leur nature semi-perméable définie en BDLISA).

2.5.8. Échelle régionale : Corse (disponible sur CD)

a) *Recharge indirecte*

La Corse est le territoire du bassin RMC qui présente la plus faible part de sa superficie susceptible de permettre la recharge artificielle des aquifères (ce qui est logique au vu du caractère très montagneux et majoritairement cristallin de son soubassement). Les formations potentiellement favorables se trouvent pratiquement toutes en domaine alluvionnaire littoral, les plus favorables étant les alluvions récentes avec, du nord au sud, celles de Pietracorbara et du Sisco (celles du Tollare, de Meria et du Luri situées plus au nord étant déclassées pour des questions de pente essentiellement), du Bevinco et du Golo (les alluvions anciennes de la plaine alluviale de la Marana-Casinca, du Fium'Albinu, de la Strutta, de l'Aliso et du Poggio, de l'Ostriconi et du Regino étant déclassées pour des questions de perméabilité (Marana) et de pente (Aliso et Poggio, Fium'Albinu et Strutta, Ostriconi et Regino)), du Petrignagni (celles du Buccatoggio étant déclassées pour des questions d'épaisseur de la ZNS), du Fiume Secco et de la Figarella (celles du Fango étant déclassées pour des questions de pente), de l'Alesani, de la Bravona, du Tavignano, du Fium'Orbo et de l'Abatesco, du Travo, de la Gravone et du Prunelli (celles du Chiuni, de la Sagone, du Liamone et de la Liscia étant déclassées pour des questions de pente essentiellement), de l'Oso, de Stabiacciu-Pietroso, du Baracci et du Rizzanese (celles du Cavo, du Taravo et de la plaine de Figari étant déclassées pour des questions de pente (Cavo) et d'épaisseur de la ZNS (Taravo et Figari)).

b) *Recharge directe*

Comme pour la recharge indirecte, peu d'aquifères se prêtent à la recharge directe en Corse, en dehors des calcaires bioclastiques et molasses miocènes du bassin de Saint-Florent au nord, des flysch pélito-gréseux Éocènes de Solenzara à l'est et des grès et biocalcarénites Miocènes du bassin de Bonifacio au sud, toutes ces formations apparaissant en situation relativement favorable.

2.6. DISCUSSION DES LIMITES DE LA METHODE ET DES RESULTATS

La méthode de cartographie appliquée à l'échelle du Bassin RMC a permis d'identifier et de cartographier les principales entités hydrogéologiques susceptibles de présenter des caractéristiques favorables à la mise en œuvre de dispositifs de recharge artificielle indirecte et directe. Un certain nombre de résultats (entités hydrogéologiques) mises en avant par ce type d'approche sont bien connus et étaient attendus en sortie d'une analyse de ce type. D'autres résultats peuvent paraître plus surprenants et rendent discutable la qualité de l'analyse menée. Il convient de rappeler que la démarche proposée inclut un certain nombre d'hypothèses de travail qui ont pour conséquence l'obtention de résultats parfois contre-intuitifs.

Ainsi, les résultats obtenus à l'aide de la démarche proposée doivent être utilisés avec précaution dans la mesure où ils sont associés aux limites suivantes :

- les entités de base sur lesquelles tous les calculs et combinaisons de critères ont été faits sont issus de la BDLISA V2 (Brugeron *et al*., 2018), à l'ordre 1 pour l'analyse concernant la recharge artificielle indirecte et aux ordres 1, 2 et 3 pour l'analyse concernant la recharge directe. La présence de systèmes karstiques a été considérée via la prise en compte de la surcouche karst proposée lors de la livraison de la Version 1 de la BDLISA (Paroissien et al., 2015). La géométrie de ces entités étant issue des cartographies géologiques, la précision de leur emprise spatiale ne peut être supérieure à celle d'une description au 1/50 000. De plus, la superposition topologique des différentes couches d'information (notamment lorsque l'on combine les entités d'ordre 1, 2 et 3 pour l'analyse de la recharge directe) fait apparaître une infinité de toutes petites entités sans signification hydrogéologique (simplement du fait de minuscules différences de géométrie des entités) qui ne doivent pas être considérées comme des résultats (et qui sont d'ailleurs invisibles sauf si l'on applique un zoom extrême sur les versions numériques des cartes) ;
- les propriétés hydrodynamiques des entités de calcul sont déduites des valeurs des champs Nature, État, Milieu et Thème de la BDLISA. La notation en termes de favorabilité vis-à-vis de la recharge indirecte et directe associée à chaque entité fait appel à des règles basées sur les valeurs des champs de la BDLISA évoqués (cf. Illustration 5 et Illustration 16). Au cours de l'analyse, un certain nombre de valeurs attribués à ces champs ont pu être discutées et, parfois, modifiées. Cependant, la réalité du comportement hydrodynamique d'une entité donnée est généralement plus complexe et hétérogène que celle associée aux valeurs de ces champs en BDLISA. Ceci peut parfois conduire à des résultats qui peuvent être en contradiction avec les connaissances locales sur l'entité concernée. Ainsi, malgré les nombreux échanges organisés avec les hydrogéologues experts des différents territoires du bassin pour définir les règles de notation et combiner les notes, les résultats présentés sur les différentes cartes sont évidemment sujets à caution et doivent être utilisés en connaissance des systèmes auxquels ils s'appliquent ;
- à cette échelle de travail, l'analyse conduite ne peut traduire que les éléments qui sont pris en compte, à savoir, pour ce qui concerne les propriétés hydrodynamiques des entités, les informations contenues dans la BDLISA. Cette dernière ne contient pas de valeurs de transmissivité ou d'emmagasinement distribuées qui permettraient d'évaluer la diffusivité de l'entité considérée. De même, l'analyse étant conduite à l'échelle de l'entité, elle n'intègre pas la distance entre un potentiel point de recharge et de potentiels exutoires de l'aquifère rechargé tels que sources ou écoulements en rivière. Pour ces deux raisons, la capacité de rétention et de stockage de l'aquifère considéré ne peut être prise en compte. Cela peut conduire à des résultats contre-intuitifs, notamment pour des entités en relation avec des eaux de surface. Une analyse plus détaillée à l'échelle de l'entité (cf. § 6.2.3 ci-dessous) sera nécessaire pour estimer cette capacité de stockage et optimiser l'implantation d'un dispositif de recharge par rapport au réseau d'eaux de surface ;

- le caractère favorable d'une entité en termes de recharge artificielle indirecte ou directe ne dépend pas, dans la démarche adoptée, uniquement des caractéristiques décrites en BDLISA. Pour la recharge indirecte, sont également pris en compte l'IDPR, la pente et l'épaisseur de la ZNS, pour lesquelles les valeurs moyennes sont calculées pour chaque entité. Là encore, les règles de notation adoptées pour utiliser ces valeurs moyennes dans l'analyse de favorabilité sont sujettes à caution, dans la mesure où - même si elles ont été définies en associant un grand nombre d'experts hydrogéologues du bassin - elles ont été définies à dire d'expert. De plus, certaines, comme l'épaisseur de la ZNS sont entachées d'incertitudes parfois très importantes en fonction de la localisation géographique (la carte de l'épaisseur de la ZNS est par exemple probablement très discutable en zone de montagne, où, par construction, elle a été interpolée sur la base d'un faible nombre de points d'observation). Cette variable, qui intervient aussi dans la démarche sur la recharge directe en complément de la BDLISA, rend de ce fait plus incertains les résultats des cartes de recharge directe pour les entités d'ordre 1, en comparaison de ceux obtenus pour la recharge indirecte ;
- par sécurité, il a été décidé d'exclure les entités hydrogéologiques karstiques (surcouche Karst de la BDLISA) des entités favorables car le stockage d'eau peut s'y avérer complexe à maîtriser du fait de possibles écoulements rapides et de potentielles « fuites » d'eau vers des exutoires. Or, certaines configurations karstiques liées à la mise en place de la karstification, pourraient s'avérer potentiellement favorables à un stockage d'eau. Une analyse plus fine du fonctionnement et de la géométrie des aquifères karstiques serait dès lors nécessaire pour en évaluer plus précisément la capacité à stocker de l'eau et d'être en conséquence favorable ou non à un dispositif de recharge artificielle ;
- enfin, les différentes opérations de combinaison de notes réalisées (que ce soit pour définir la note BDLISA, cf. Illustration 5 et Illustration 16 ou pour définir les notes finales pour chaque type de dispositif de recharge, cf. eq. 2 et Illustration 16) au cours de la démarche ont nécessité d'établir des règles de pondération des paramètres. Pour obtenir les notes finales affichées sur la carte de recharge indirecte, les poids affectés à chaque note ont été attribués en adoptant le Processus d'Analyse Hiérarchique proposé par Saaty (2008). Cette approche permet de synthétiser, à l'aide d'une méthode mathématique, plusieurs avis d'expert sur la question posée (ici, sur l'influence de chaque critère considéré sur le résultat final en termes de favorabilité vis-à-vis de la recharge artificielle indirecte). Il va de soi que si l'on agrandit ou que l'on change le panel d'experts mobilisés, il est probable que le résultat de la pondération obtenu en soit affecté.

Ainsi, l'ensemble des limites énoncées invitent à considérer avec prudence les résultats obtenus, à la lumière de la qualité variable et relative des informations utilisées pour les produire. S'ils peuvent à raison apparaître discutables dans un certain nombre de cas, ils proposent cependant une première approche cartographique à l'échelle du bassin, qui permet de mettre en évidence qu'il existe un potentiel, parfois non négligeable suivant les régions, pour la mise en œuvre de projets de recharge artificielle des aquifères. Le passage à un stade plus opérationnel de ce type de cartographie ne peut être réalisé, en l'état actuel des connaissances, qu'à des échelles plus locales, susceptibles de permettre de décrire le comportement hydrodynamique des aquifères de manière plus réaliste. C'est ce qui est mis en œuvre dans la suite sur quatre territoires test (chapitres 3 à 8).

3. Description des quatre territoires test

3.1. INTRODUCTION

Dans le but de réaliser une étude similaire à celle menée à l'échelle du bassin RMC, à une échelle plus locale permettant l'intégration de critères (physiques et de contraintes) plus précis et la réalisation d'analyses économiques, quatre territoires test ont été sélectionnés. Ces quatre secteurs (4 entités BDLISA distinctes) ont été choisis parmi plusieurs sites pour lesquels la recharge artificielle permettrait de répondre à des problématiques locales concernant les eaux souterraines (quantité, qualité, intrusion saline) et où la recharge artificielle ferait partie des solutions envisagées par les gestionnaires des nappes en question. Ces sites sont les suivants : les alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire (Drôme-Isère), les nappes de la Vistrenque et des Costières (Gard), les sables astiens d'Agde-Valras (zones d'affleurements dans l'Hérault) ainsi que les alluvions de la Figarella (Haute-Corse). Ce chapitre fait un état des lieux des connaissances sur l'ensemble de ces secteurs (géologie, hydrogéologie, relations nappe - eaux de surface, utilisation de la ressource en eau, état quantitatif et qualitatif actuel des eaux souterraines et de surface), afin d'appréhender le fonctionnement des hydrosystèmes locaux et les besoins auxquels la recharge artificielle pourrait répondre.

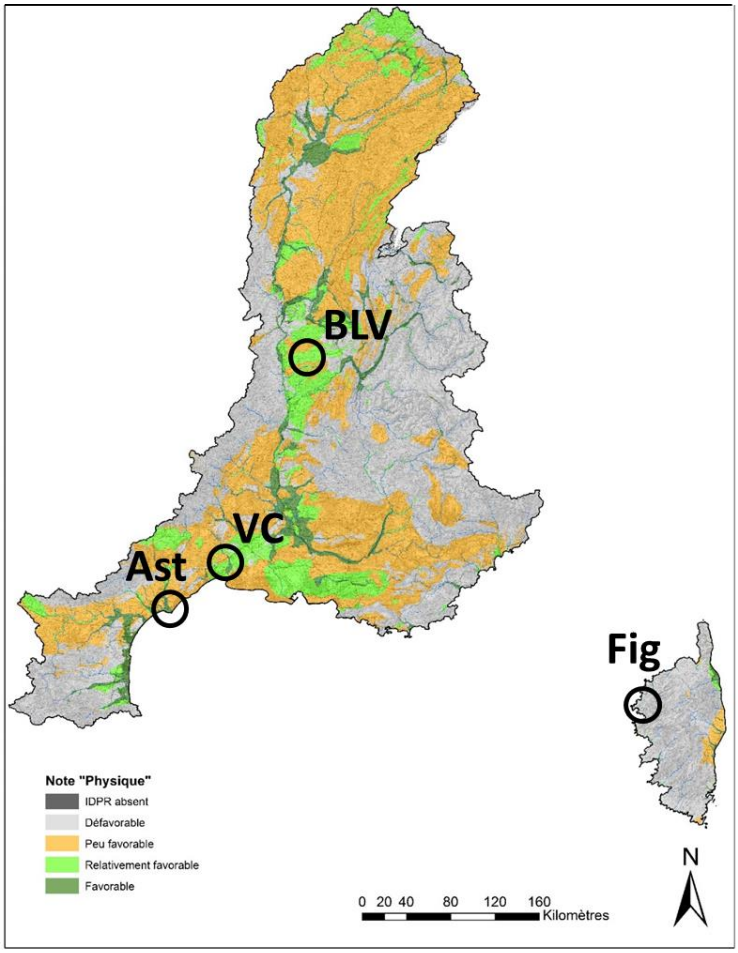


Illustration 32 : localisation des quatre territoires test sur la carte de potentialité de la recharge indirecte (BLV : Bièvre-Liers-Valloire, VC : Vistrenque-Costières, Ast : Astien à Agde-Valras, Fig : Figarella).

3.2. PLAINE DE BIEVRE-LIERS-VALLOIRE (521AM)

Les alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire correspondent à la masse d'eau FRDG303 ainsi qu'à l'entité BDLISA 521AM. L'aquifère est alluvial, monocouche, et libre, avec une superficie totale d'environ 480 km².

La description du site s'appuie en grande partie sur les fiches Masse d'eau FRDG303 et Entité 152K/521AM00 (rédigées par le BRGM et l'Agence de l'Eau RMC), ainsi que diverses études réalisées par le BRGM, ou encore dans le cadre de la mise en place du SAGE Bièvre-Liers-Valloire, lancé en 2002 et porté par le Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de Bièvre-Liers-Valloire (SOGREAH, 2008).

3.2.1. Contexte géographique et géomorphologique

Située dans le Bas-Dauphiné, entre Lyon, Grenoble et Valence, la plaine de Bièvre-Liers-Valloire constitue une vaste dépression d'orientation est-ouest, s'étendant sur deux départements (Drôme et Isère) entre l'aval de la cluse de l'Isère depuis Rives et Beaucroissant à la vallée du Rhône à hauteur de Saint-Rambert-d'Albon. Sa longueur est d'environ 50 km sur 10-15 km de large et l'altitude passe de 480 m en amont à 160 m en aval (pente moyenne de la vallée proche de 0,6 %), au niveau du Rhône. Elle est limitée au nord par le plateau de Bonnevaux, au sud par celui de Chambaran, à l'est par le seuil de Rives bordant la vallée de la Fure et à l'ouest par la vallée du Rhône constituant l'exutoire du système alluvial.

Le bassin est constitué de trois unités géographiques (Illustration 33) :

- la plaine de Bièvre, de Rives à Beaurepaire s'étend sur une trentaine de kilomètres. Sa largeur varie de 5 à 7 km et son altitude passe de 480 m à l'est à 280 m à l'ouest ;
- la plaine du Liers, au nord-est de Beaurepaire, communique en surface avec la plaine de Bièvre par la trouée latérale de Faramans. Il débouche aussi sur la Valloire par un étroit passage d'un kilomètre de large entre Pommier de Beaurepaire et le bois d'Autimont. La largeur de la plaine du Liers, relativement constante, est de l'ordre de 3 kilomètres ;
- la plaine de Valloire succède à l'ouest à la plaine du Liers et de la Bièvre. Elle s'étend sur 25 km de long de Beaurepaire à la vallée du Rhône (Dubar *et al*.,1994).

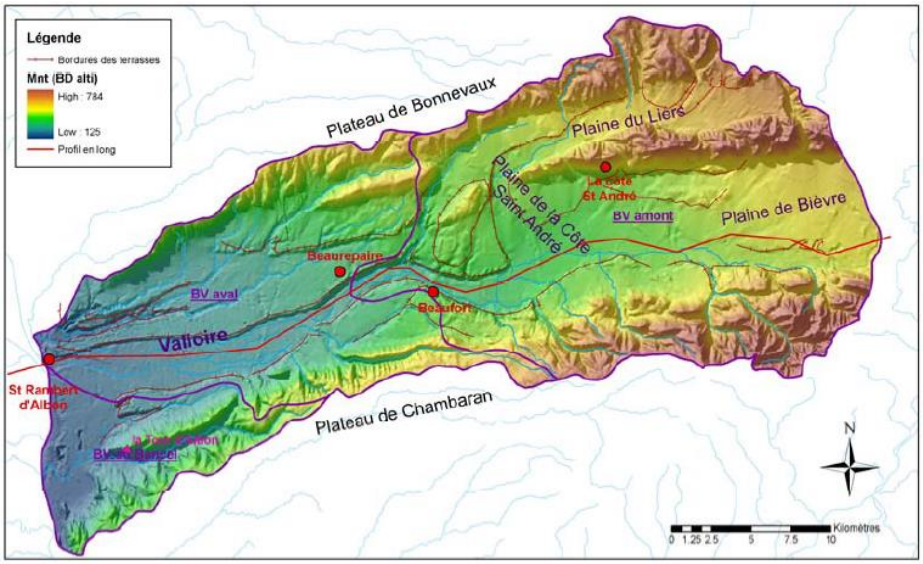


Illustration 33 : Carte de l'altitude topographique du bassin de Bièvre-Valloire (Martin et al*., 2008a).*

3.2.2. Géologie

La vallée de Bièvre-Valloire se trouve dans le bassin molassique miocène du Bas-Dauphiné. Il s'agit d'une vallée fossile d'origine glaciaire, qui se surimpose à un ancien cours de l'Isère au Tertiaire. Au Quaternaire, les diffluences du glacier isérois ont façonné la vallée telle qu'on la voit aujourd'hui (Illustration 34).

Le substratum du bassin de Bièvre-Liers-Valloire est constitué :

- de la molasse sablo-gréseuse du Miocène (épaisse d'environ 500 m) constituant la majeure partie des collines du Bas-Dauphiné. La série se poursuit par les conglomérats de Voreppe (correspondant au delta Miocène de l'Isère) très épais à l'est du bassin (200 m) ;
- des formations du Pliocène, composées d'argiles bleues ou grises pouvant atteindre 300m, développées principalement au sud-ouest de la Valloire.

Les collines de Chambaran et Bonnevaux, formées de cailloutis de nature différente englobés dans une matrice argilo-sableuse, recouvrent de part et d'autre cette plaine.

Les terrains quaternaires constituant les plaines de Bièvre-Liers-Valloire sont :

- des dépôts morainiques, argilo-sableux et caillouteux à très grands blocs, du glacier de l'Isère. On distingue l'Arc morainique « externe » de Beaufort - Bois d'Antimont – Faramans séparant la Bièvre de la Valloire, l'Arc morainique « intermédiaire » de Saint Siméon de Bressieux – La Côte Saint André – Colline de Not et l'Arc morainique « interne » de Rives ;
- surtout des alluvions fluvio-glaciaires, présentant de nombreuses variations de faciès, composées de cailloutis à galets polygéniques grossiers dans une matrice sablo-graveleuse. On peut distinguer trois principales terrasses alluvio-morainiques (Mindel, Riss, Würm) étagées, reposant directement sur le substratum : les plus anciennes sont les plus élevées et ne subsistent que sur les bordures, la plus récente en occupe le centre (Illustration 35) ;
- des alluvions fluviatiles au niveau des basses terrasses remplissent des vallées de petites rivières affluentes (Dolon, Bancel, …) ;
- des placages de limons, épais de plusieurs mètres, recouvrent les moraines et alluvions fluvio-glaciaires, ça et là, sur de vastes surfaces. Ce sont des dépôts fins argileux.

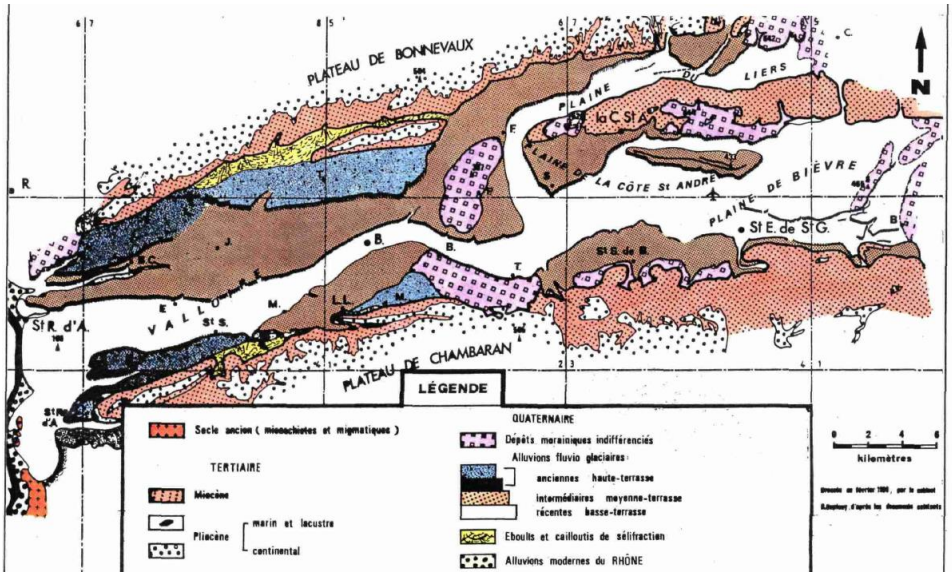


Illustration 34 : Schéma géologique du bassin de Bièvre-Valloire (Dubar et al.*,1994).*

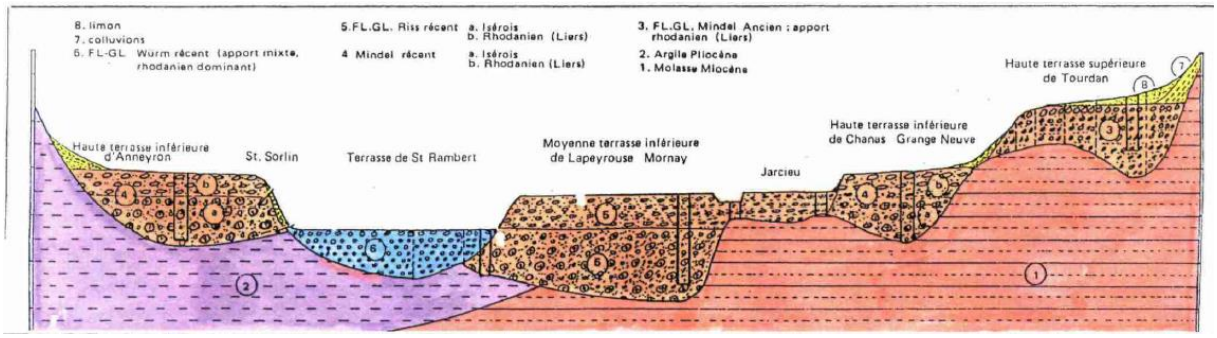


Illustration 35 : Coupe géologique des terrasses de la vallée de Valloire (Dubar et al.*,1994).*

3.2.3. Hydrogéologie

a) *Recharge et exutoire*

La plaine de Bièvre Valloire est alimentée majoritairement (2/3 de l'alimentation totale) par les **précipitations** tombant sur l'impluvium et pour une faible part à partir de l'infiltration des écoulements de surface nés sur les formations imperméables qui encadrent la plaine et qui se perdent dans les alluvions (Illustration 36). Ce sont essentiellement les précipitations efficaces d'automne et d'hiver qui rechargent la nappe. Il en découle donc une grande sensibilité aux aléas climatiques de cette ressource en eau souterraine (Dubar et al.,1994). Les précipitations moyennes varient suivant les secteurs : 950 mm en amont du bassin et 750 mm en aval de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire. Les pluies efficaces ont été calculées au niveau de la station MétéoFrance de Grenoble-Saint-Geoirs (bassin de Bièvre) sur une période allant de 1974 à 2007. Il a alors été établi que seulement 37 % des précipitations contribuent à l'alimentation de la nappe et des cours d'eau, les 63 % restant s'évaporant (Martin et al., 2008a). De plus, la variabilité inter-annuelle de ces précipitations est très marquée : +/- 25 %. Si l'alimentation de la nappe est essentiellement assurée par les pluies efficaces d'hiver, les pluies d'été contribuent à couvrir les besoins en eau des plantes et leur occurrence empêche donc l'accentuation d'une situation de sécheresse déjà engagée. Une étude des temps de réponse de la nappe à un épisode pluvieux aux droits de différent piézomètre a été réalisée par le BRGM en 2008, par modélisation TEMPO. Deux types de réponses ont été pris en compte : une réponse rapide correspondant aux écoulements rapides de la nappe (alimentation par percolation des précipitations dans le sol), et une réponse lente correspondant aux écoulements lents de la nappe (alimentation provenant de la vidange de la partie amont du bassin versant). Les temps de réponses rapides pour cette nappe sont de 60 à 90 jours, et de 400 à 640 jours pour les réponses lentes. Ils sont croissants de l'amont vers l'aval (Martin *et al*., 2008b).

La plaine peut aussi être alimentée par des **apports de la nappe des sables molassiques du Miocène** aux limites (mal connus) et certainement aussi par drainance par ascensum (1/3, soit environ 100 Mm^3/an) (Illustration 36). Dans les zones de pompages, la nappe des alluvions fluvio-glaciaire peut alimenter celle de la molasse Miocène, provoquant un mélange des eaux et le transfert de polluants de la nappe sus-jacente à la nappe sous-jacente (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011).

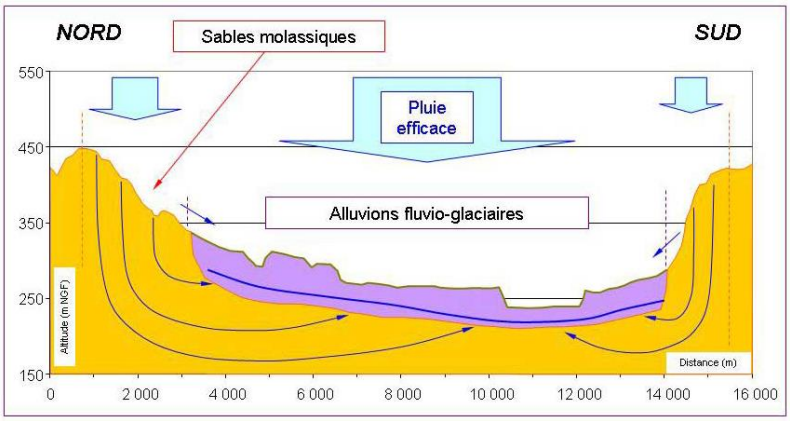


Illustration 36 : Coupe hydrogéologique nord-sud. Schéma proposé des écoulements et des échanges entre les sables molassiques et les alluvions fluvio-glaciaires (Martin et al*., 2008b).*

Le volume annuel reçu par l'aquifère quaternaire est d'environ **280 Mm³/an** sur la totalité de son impluvium, avec environ 163 Mm³/an directement sur les alluvions.

Le niveau de base de la nappe est la vallée du Rhône, constituant ainsi son exutoire.

b) *Écoulements et paramètres hydrodynamiques*

La plaine de Bièvre-Valloire correspond à une « vallée sèche », où les écoulements souterrains prédominent sur ceux de surface (§ 3.2.4).

Les formations tertiaires, particulièrement la molasse du Miocène principalement constituées de poudingues, forment le substratum et bordent le bassin de Bièvre-Valloire à l'est, au nord et au sud. Les poudingues pouvant être localement plus perméables (cimentation incomplète), ils peuvent contribuer à l'alimentation de la nappe et constituent en conséquence des limites à flux imposés. Une continuité hydraulique est possible entre les molasses miocènes et les alluvions fluvio-glaciaires.

Les dépôts morainiques constituent de médiocres aquifères et leurs perméabilités sont très variables (10^{-6} à 10^{-3}m/s). Cependant, lorsqu'ils sont sablo-graveleux, ils peuvent contenir des nappes perchées importantes dont les sources d'affleurement, au contact des deux formations, sont souvent captées (Côte Saint-André, Saint-Hilaire). Ces dépôts morainiques créent des discontinuités au sein de l'aquifère alluvial, phénomène se manifestant par la formation de dômes piézométriques (Dubar *et al*.,1994).

La piézométrie est en étroite relation avec le substratum. Il influence la nappe des formations fluvio-glaciaires tant de par sa morphologie que par les phénomènes de drainance ascendante de la nappe qu'il contient (Illustration 37). Ainsi du fait de sa géologie propre et de celle de son substratum, est dessiné un chevelu de circulations souterraines, tant à l'amont qu'à l'aval de la plaine.

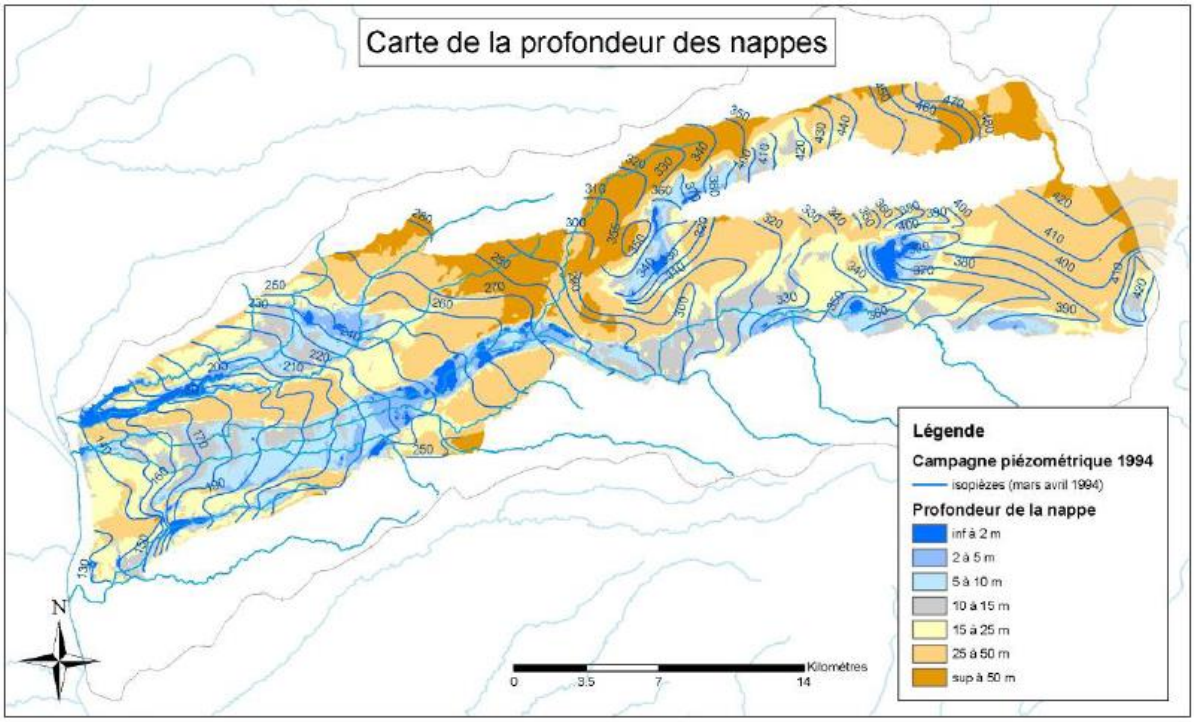


Illustration 37 : Carte de la piézométrie de la nappe alluviale de Bièvre-Liers-Valloire en 1994, et profondeur de la nappe (Martin et al.*, 2008a).*

Un profil en long permet de voir que la nappe est profonde à l'amont et à l'aval, mais avec une zone centrale où elle affleure (région de Beaurepaire) (Illustration 38). Cette remontée de la nappe permet l'émergence de 2 sources : la source de Beaufort (débit de 0 à 2 000 l/s) et la source de Manthes (débit de 0 à 1 200 l/s). La grande variation de débit observée est directement liée aux variations du niveau de la nappe (dépendant du climat et des usages).

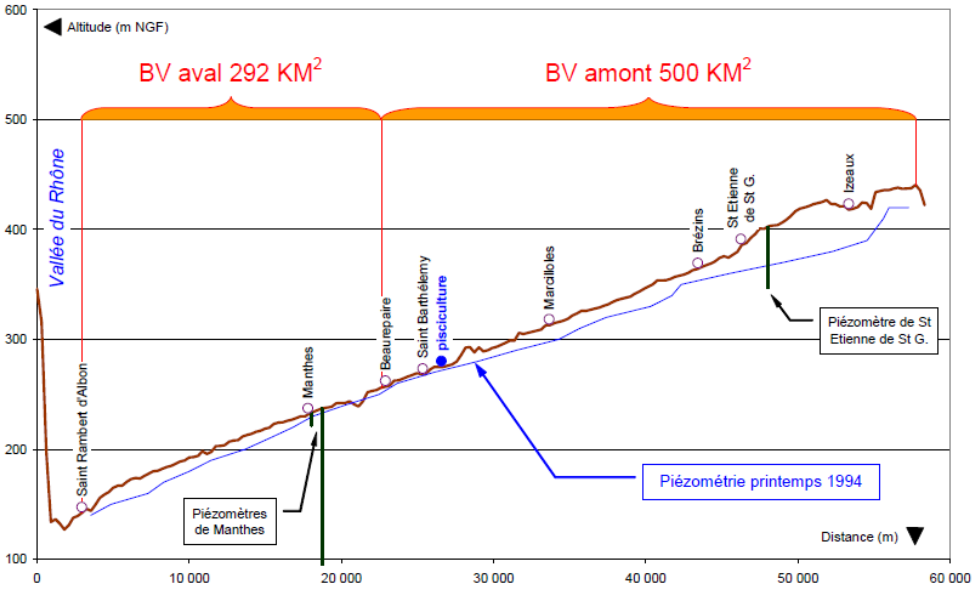


Illustration 38 : Profil est-ouest du bassin de Bièvre-Valloire (Martin et al.*, 2008a).*

La nappe s'écoule en direction de l'ouest. Le Rhône constitue le niveau de base, soit directement, soit via la nappe des alluvions modernes qui l'accompagne. La nappe se retrouve donc en équilibre avec le Rhône.

Les grandes vallées fluvio-glaciaires constituent des aquifères importants, toutefois les réserves y sont essentiellement emmagasinées dans les alluvions würmiennes, celles des terrasses (Faramans) étant très peu productives. On peut distinguer plusieurs plaines :

- **Plaine de Bièvre :** l'aquifère est constitué par les alluvions fluvio-glaciaires. Leur perméabilité est élevée. Mais des lentilles argileuses de faible perméabilité (1.10^{-6}m/s) peuvent être observées localement dans les formations alluviales. La plaine est comprise entre Rives et Beaurepaire et est parcourue par un chevelu de circulations souterraines qui se rassemblent plus à l'aval pour constituer une nappe plus importante bien individualisée. Le réservoir est constitué de deux terrasses étagées et séparées par un seuil de bed-rock. On distingue un chenal würmien (**D**, Illustration 39) au centre de la vallée actuelle sous la basse terrasse et un chenal rissien (**E**, Illustration 39) sous la haute terrasse en bordure nord de la plaine qui rejoint le précédent entre Beaufort et Saint-Barthélemy (Dubar *et al*.,1994). La nappe se situe à 7 mètres dans des graviers épais de 44 mètres reposant sur des argiles. Les cotes piézométriques de la nappe peuvent être très différentes (localement 40 à 50 mètres de différence) d'un chenal à l'autre;
- **Plaine du Liers :** elle se situe au nord et est séparée de la plaine de Bièvre par des collines molassiques, depuis Pénol à l'ouest jusqu'à Apprieu à l'est. La terrasse de cette unité est en situation perchée de 60 mètres environ par rapport à celle de la Bièvre. La jonction entre les deux nappes s'effectue au droit du cône de Sardieu. On distingue également un chenal würmien (**F**, Illustration 39) sous la basse terrasse et un chenal rissien (**G**, Illustration 39) situé en bordure nord. Ces deux terrasses semblent être totalement indépendantes (Dubar *et al*.,1994) ;
- **Plaine de Valloire :** elle est située à l'aval des 2 plaines précédentes. Deux vallées fossiles paraissent s'individualiser nettement, par leur profondeur et leur largeur : l'une située sous la terrasse rissienne (**H**, Illustration 39), épaisse d'une quinzaine de mètres, l'autre (**I**, Illustration 39) qui emprunte l'axe de la basse terrasse würmienne entre Anneyron et Saint-Barthélemy-de-Beaurepaire (Dubar *et al*.,1994).

En 2008, Martin *et al.* (rapport BRGM RP-56117-FR) estiment un débit souterrain au niveau de la partie aval de la nappe à $5m^3/s$. La même année, SOGREAH donnent un débit souterrain moyen de l'ordre de $8,9m^3/s$ (calcul basé sur le modèle hydrogéologique du secteur). En terme de vitesse d'écoulement, peu d'informations existent. Ces vitesses ont été mesurées localement, et diffèrent très nettement d'une zone à une autre, et en fonction de la terrasse étudiée. D'après SETIS (2014), la vitesse naturelle de transfert horizontal varie de 1 à 100 m/j. À proximité de l'aéroport (plaine de Bièvre), elle a été estimée à 20 m/j (Ingedia, 2012).

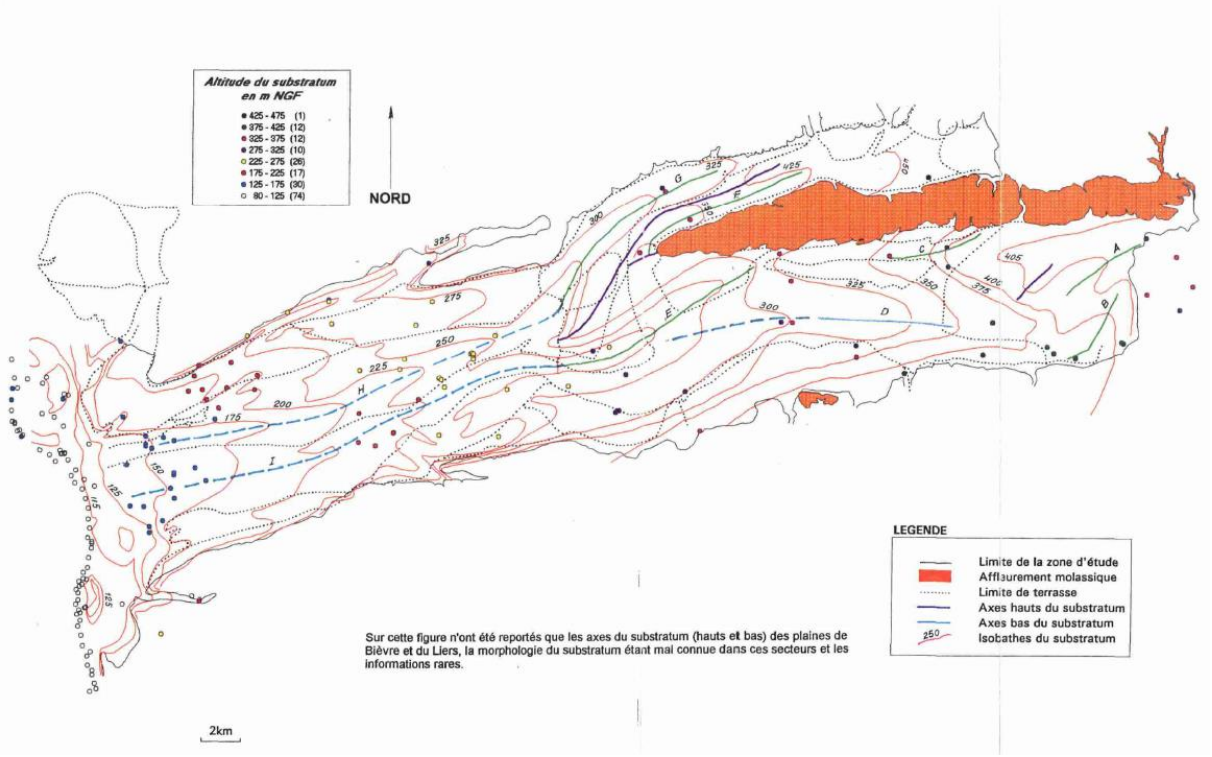


Illustration 39 : Carte du substratum de la plaine de Bièvre-Valloire (Dubar et al.*,1994).*

c) *Synthèse des données hydrogéologiques*

L'Illustration 40 récapitule les informations géologiques, structurales, et les paramètres hydrodynamiques des formations des plaines de Bièvre, Liers et Valloire.

	Plaine de Bièvre	**Plaine du Liers**	**Plaine de Valloire**
Lithologie du substratum	Molasses et conglomérats néogènes (amont) : continuité hydraulique avec l'aquifère sus-jacent possible. Argiles pliocènes (aval) : discontinuité hydraulique.		
Structure du substratum	2 paléo-vallées principales (E-W) : chenal würmien au S, chenal ancien plus profond au N + 2 chenaux secondaires en tête de Bièvre	2 chenaux (E-O) : chenal méridional würmien peu creusé, chenal septentrional ancien profond	Nombreuses vallées fossiles parallèles moins marquées (E-W) : 2 axes majeurs au centre de la vallée, axes secondaires sur bordures N et S
Lithologie de l'aquifère	Alluvions fluvio-glaciaires hétérogènes, moraines internes et externes	Alluvions fluvio-glaciaires (moraine en amont)	Alluvions fluvio-glaciaires et fluviatiles (zone de confluence avec le Rhône)
Structure de l'aquifère	2 terrasses étagées würmiennes et rissiennes **sans relation apparente**	2 terrasses étagées würmiennes et rissiennes **sans relation apparente**	3 terrasses étagées : hautes terrasses perchées, moyennes et basses terrasses **partiellement emboîtées**

Gradient (%)	Chenal Würmien : 0,47. Chenal rissien : 0,38	Chenal rissien : 0,42. Chenal würmien : 0,5 en amont, 1 au centre, 2 au niveau du raccordement avec Bièvre.	0,66 (augmente vers l'aval). Localement plus forte : 2,6 vers Manthes.
Épaisseur de l'aquifère (m)	20 (chenal würmien), 40 (chenal rissien) (jusqu'à 70-90 en partie amont)	20 (chenal würmien), 40 (chenal rissien) (plus de 100m en partie amont)	10 à 30 (moyenne terrasse), 30 à 50 (le reste)
Profondeur nappe (m)	10 à 30	10 à 30	5 à 25
Fluctuation piézométrique (m)	2 à 7	2 à 4 (jusqu'à 10 en amont)	1 à 3 (écoulement relativement continu)
Régime de fluctuation	Périodicité annuelle. Hautes eaux : décembre-janvier. Étiage : septembre-octobre. Réponse plus marquées en plaine du Liers. Plus grande inertie en Bièvre et Valloire.		
Perméabilité K (m/s)	5.10^{-2} à 10^{-3}	10^{-2} à 10^{-3}	10^{-1} à 10^{-3}
	10^{-2} à 10^{-5} d'après modèle AntéaGroup (1996)		
Transmissivité T (m²/s)	10^{-4} dans sa partie centrale et 10^{-1} en aval	5.10^{-2}	10^{-2} à 1
Coefficient d'emmagasinement moyen (sans unité)	0,04		
Porosité (%)	4 à 10		
Débit moyen (m^3/s)	5 (aval) – 8,9 (moyen)		
Vitesse d'écoulement (m/j)	20 (St Etienne de Saint-Geoirs), 1 à 100 (général)		
Ruissellements (%)	Faibles : 3 à 7 % des précipitations. Infiltration maximale.		
Volume annuel reçu par l'aquifère (Mm^3)	260-280 (~160 par précipitations sur alluvions, ~ 100 par alimentation par molasse)		

Illustration 40 : Tableau de synthèse hydrogéologique du bassin de Bièvre-Valloire (sources principales : Dubar et al (1994) et SOGREAH (2008)).

d) *Vulnérabilité de la ressource en eau souterraine*

La nappe des alluvions fluvio-glaciaires est très vulnérable. La gamme de l'épaisseur de la zone non-saturée est très grande, allant de 0 (partie centrale où la nappe affleure) à 30 m (à l'amont essentiellement). Les sols de la plaine de Bièvre reposent directement sur des alluvions fluvio-glaciaires. Des placages de lœss ou de limons, épais de plusieurs mètres sur les hautes terrasses, recouvrent les alluvions fluvio-glaciaires. Ce sont des dépôts fins argileux, sans structure. L'aquifère est mal protégé et la forte perméabilité des alluvions augmente cette sensibilité. La couverture limoneuse n'est pas répartie de manière uniforme, dans la partie aval de la plaine, le niveau piézométrique est assez proche de la surface du sol (en particulier à l'aval de la confluence des nappes de Bièvre et de Liers). Les hautes terrasses sont mieux protégées par les limons (confirmation par les teneurs en nitrates des eaux). Ces différents points peuvent poser problème d'un point de vue qualitatif. Par ailleurs, l'équilibre quantitatif de la nappe dépend fortement de la pluviométrie et des prélèvements. La nappe des alluvions est donc très vulnérable aux variations climatiques, plusieurs années sèches pouvant entraîner une baisse du niveau de la nappe. Les prélèvements réalisés par les usagers accentuent ce déséquilibre et peuvent avoir de forts impacts locaux (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2016). Ces usages sont décrits en partie 3.2.5.

3.2.4. Eaux de surface

a) *Cours d'eau*

Le réseau hydrographique de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire comprends trois unités (Illustration 41) :

- **La plaine de Bièvre** : sur son versant sud, de nombreux ruisseaux issus de la bordure du plateau de Chambaran s'écoulent (la Ravageuse, le Rival, la Baïse, le Nivollon, la Pérouse et le Fondon). Seul le Rival donne lieu à un écoulement permanent dans l'axe de la plaine. Le Rival est canalisé dans sa partie aval avant de rejoindre l'Oron (la Raille). Sur le versant nord de la plaine de Bièvre, deux brèches correspondant à l'étang de Grand-Lemps et à la vallée d'Oyeu débouchent dans la plaine (Martin *et al*., 2008a) ;
- **La plaine de Liers :** le Suzon (torrent intermittent) et le ruisseau des Eydoches s'écoulent depuis le plateau de Bonnevaux (Martin et al., 2008a). Le ruisseau des Eydoches recueille les eaux de surface de la moitié aval de la plaine du Liers. Son cours aval s'interrompt au niveau du bois des Burettes où ses eaux s'infiltrent en totalité (pertes naturelles et artificielles : bassin d'infiltration). Dans le secteur du bois des Burettes, le ruisseau est fortement perché par rapport à la nappe (Dubar *et a*l.,1994).

Les débits des cours d'eau situés en amont de Beaurepaire ne sont alimentés que par le ruissellement engendré par les pluies efficaces. Les débits de ces rivières ne sont pas représentatifs de la situation de recharge de la nappe (Martin *et al*., 2008b) :

- **La plaine de la Valloire :** elle est drainée par 5 ruisseaux : le Dolon au nord, l'Oron et les Collières au centre (alimentés respectivement par les ruisseaux du Suzon et du Rival et le ruisseau du Dolure), l'Argentelle et le Bancel au sud (Martin *et al*., 2008a). Les Collières est l'exutoire superficiel principal de la vallée de Bièvre-Valloire. Il reçoit les eaux du ruisseau de l'Oron et se jette dans le Rhône, après la traversée de la ville de Saint-Rambert-d'Albon (Martin *et al*., 2008b). L'Argentelle au sud, le Dolon au nord sont les exutoires secondaires de la vallée. L'Argentelle, le Dolon (sauf dans sa partie médiane où il connait des pertes), ainsi que l'Oron sont pérennes et indépendants de la nappe du fait du colmatage de leur berge.

Le réseau hydrographique est nettement sous-dimensionné par rapport à la superficie du bassin versant. L'importance des infiltrations et la prédominance des écoulements souterrains en sont la cause (Dubar *et al*.,1994). De nombreux canaux ont été créés, influençant les régimes des cours d'eau (alimentation artificielle des Collières par la Veuze et l'Oron, création de canaux autour de l'Oron, etc.). De manière générale, les rivières sont perchées par rapport à la nappe, sauf dans le secteur de Beaurepaire-Manthes où la nappe est affleurante, et dans ce cas drainée par les rivières (source de l'Oron à Beaufort, de la Veuze à Manthes, etc.). En dehors de ce secteur, c'est le degré de colmatage des berges qui détermine la relation nappe rivière : rivière indépendante ou s'infiltrant selon les secteurs. Les cours d'eau perchés ne participent que faiblement à l'alimentation de la nappe car ils présentent de faibles débits. Les rivières qualifiées d'indépendantes de la nappe (le Dolon, la Raille, le Rival, le Bancel, …) ou encore temporaires/pérennes perdantes (le Suzon, la Baïse, le Dolure, …) le sont sur l'essentiel de leur linéaire. Pour certaines dont l'existence résulte de l'affleurement de la nappe souterraine, et donc alimentées par des sources, il est évident que ces cours d'eau sont drainants dans leur partie amont ou médianne. Cependant, ceci n'est vrai que sur un court segment : drainant puis indépendant pour l'Argentelle, l'Oron, la Veuze ; drainant puis infiltrant pour les Collières et les Eydoches.

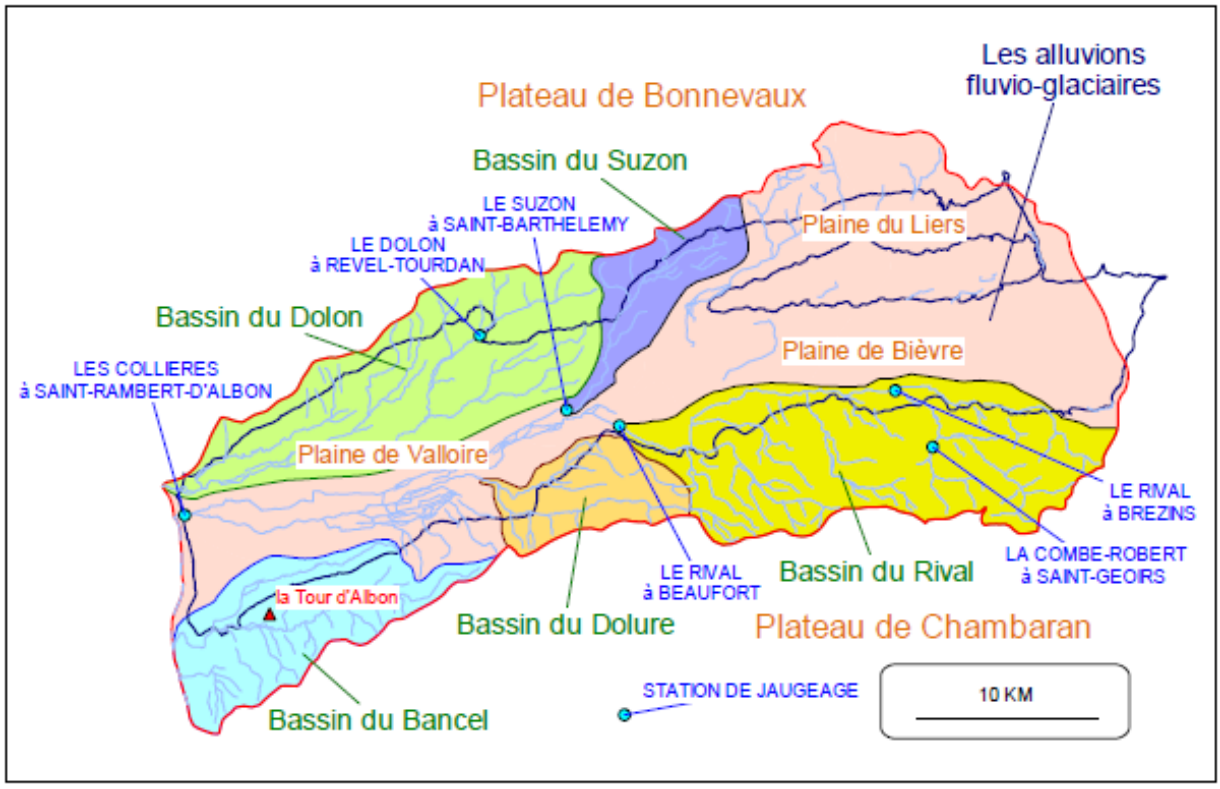


Illustration 41 : Carte des principaux bassins-versants et contour de l'entité aquifère des alluvions fluvio-glaciaires de Bièvre-Liers-Valloire (Martin et al*., 2008a).*

Dans le cadre du diagnostic du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau du bassin, BURGEAP et ASCA (2016) ont synthétisé les données de modules[3] et de débits d'étiage (QMNA5)[4] des principaux cours d'eau (Illustration 42). Les débits réservés[5] ont été calculés par nos soins en considérant 1/10ème du module. Les cours d'eau des Collières, de l'Oron et du Rival (Raille) présentent les plus forts débits. Seuls les Collières, le Rival et la Raille sont suivis en permanence par des stations de mesures de débits, dont les données sont disponibles sur la Banque Hydro.

Une étude des volumes prélevables sur les principaux cours d'eau du bassin de Bièvre-Liers-Valloire a été menée en 2011 par SOGREAH et ASCONIT, et révèle les Débits Objectifs d'Étiage[6] suivants (Illustration 42), sur la période d'étiage définie de juin à septembre. Les valeurs de DOE s'avèrent être dans la majorité des cas supérieures ou proches des QMNA5, et sont plus faibles en août et septembre.

[3] **Module** : débit moyen inter-annuel calculé sur l'année hydrologique sur l'ensemble de la période d'observation de la station. Il donne une indication sur le volume annuel écoulé et donc sur la disponibilité globale de la ressource en eau.

[4] **QMNA5 :** débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassée une année donnée, c'est donc la valeur du QMNA telle qu'elle ne se produit, en moyenne, qu'une année sur cinq ou vingt années par siècle. C'est un débit statistique qui donne une information sur la sévérité de l'étiage.

[5] **Débit réservé :** débit minimal restant dans le lit naturel de la rivière entre la prise d'eau et la restitution des eaux en aval d'un ouvrage, garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans ces eaux. La loi pêche de 1984 a ensuite fixé de façon normative le débit réservé au 1/10ème du module pour tout nouvel aménagement, 1/40ème pour les aménagements existants.

[6] **DOE** : Valeur de débit moyen mensuel (arrêté dans les SDAGE, SAGE et documents équivalents) au point nodal (point clé de gestion) au-dessus de laquelle, il est considéré qu'à l'aval du point nodal, l'ensemble des usages (activités, prélèvements, rejets, ...) est en équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique.

Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (Q en m³/s)							Etude des volumes prélevables (SOGREAH, 2011)			
Masse d'eau	Cours d'eau	Année	Module	QMNA5	Q réservé	Source	DOE Juin	DOE Juillet	DOE Août	DOE Septembre
FRDR10774	Le Régrimay		0,171	0,021	*0,0171*	BURGEAP, 2016				
FRDR466a	Le Rival à la station hydrométrique de Brézins	1976-2018	0,611	0,137	*0,0611*	Banque HYDRO	0,113	0,04	0,028	0,02
	La Raille à la station hydrométrique de Beaufort	1978-2018	0,877	0,041	*0,0877*	Banque HYDRO	0,234	0,085	0,089	0,085
FRDR466b	L'Oron en aval de la confluence avec le Fayaret		1,422	0,96	*0,1422*	BURGEAP, 2016	0,72	0,72	0,605	0,585
	L'Oron en amont de la confluence avec les Collières		1,595	0,725	*0,1595*	BURGEAP, 2016				
FRDR466c	Le Dolure en amont de la confluence avec le Régrimay		0,011	0,006	*0,0011*	BURGEAP, 2016				
	Le Dolure en amont de la confluence avec les Collières		0,024	0,012	*0,0024*	BURGEAP, 2016				
	Les Collières à la station hydrométrique de Saint-Rambert-d'Albon	1981-2018	2,59	0,48	*0,259*	Banque HYDRO	0,935	0,635	0,6	0,605

Illustration 42 : Récapitulatif des données Quantité des eaux de surface pour le site de la Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles).

b) *Plans d'eau, Zones Humides et Zones protégées*

Sur la plaine de Bièvre-Valloire se trouvent 3 étangs (du Fay, Barbarin, du Marais), classés en ZNIEFF1[7]. Mais de manière générale, les zones protégées NATURA 2000 et les ZNIEFF sont peu nombreuses sur l'étendue de la masse d'eau. Les inventaires réalisés sur le bassin dans le cadre du SAGE 2016-2021 dénombrent plus de 150 zones humides. Ces zones humides ont un rôle patrimonial, fonctionnel et paysager important pour le territoire et le fonctionnement du bassin versant (Illustration 43). Elles sont en grande majorité déconnectées de la nappe au vu du niveau piézométrique de celle-ci. Seules quelques zones humides sont globalement bien connues. Les 4 principales zones humides du bassin sont la tourbière du Grand-Lemps (nord-est, près de Châbons), les étangs, landes, vallons tourbeux humides et ruisseaux à écrevisses de Chambaran (zones humides situées à l'extrémité sud de la zone d'étude, sous Viriville), la tourbière des Rivoires (à l'est, au niveau de la commune de Sillans) et les cressonnières à Beaufort (ouest de Viriville) (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011). L'aquifère local affleurant est en communication directe avec la tourbière du Grand-Lemps (ZH FR8201728). Le cycle hydrique de la tourbière est double : lié aux précipitations et à l'aquifère.

[7] **ZNIEFF1 :** Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique de type 1, espace naturel inventorié en raison de son caractère remarquable, ne constitue pas une mesure de protection réglementaire mais un inventaire. Type 1 : de petite taille.

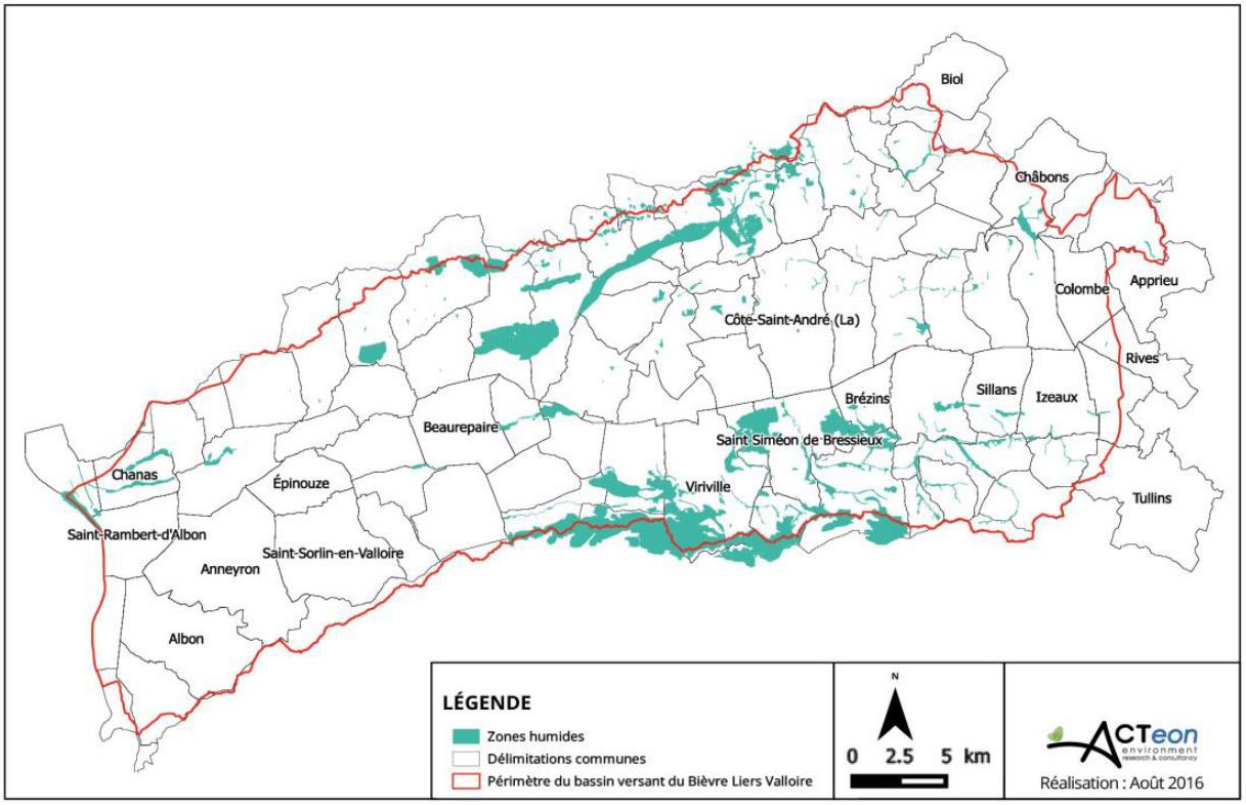


Illustration 43 : Carte de l'inventaire des zones humides iséroises du basin versant de Bièvre-Liers-Valloire (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2016).

3.2.5. Usages de la ressource en eau

a) *Occupation du sol*

Le territoire de Bièvre Liers Valloire se caractérise par son paysage à dominante rurale avec plus de 70 % du sol occupé par des surfaces agricoles et par ses vastes espaces naturels situés sur les reliefs - collines et plateaux – couvrant plus de 20 % du sol (Illustration 44). En 2000, avec presque 65 000 ha, la Surface Agricole Utile (SAU) couvre 58 % de la surface du SAGE, mais elle est en diminution forte en raison de la pression d'urbanisation et de la déprise dans les terrains les moins favorables. Le nombre d'exploitations agricoles a également fortement diminué, passant de 3 515 exploitations en 1988 à 2 228 en 2000 soit une diminution de près de 40 %. Les espaces urbains sont de taille réduite ; ils correspondent à moins de 6 % de l'occupation du sol (les plus gros bourgs ne dépassent pas 4 000 habitants). Ils sont plutôt localisés aux extrémités est et ouest du bassin et dans les plaines le long des axes routiers (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011). Les différents usages de la ressource en eau découlent directement de l'occupation du sol dans le bassin de Bièvre-Liers-Valloire.

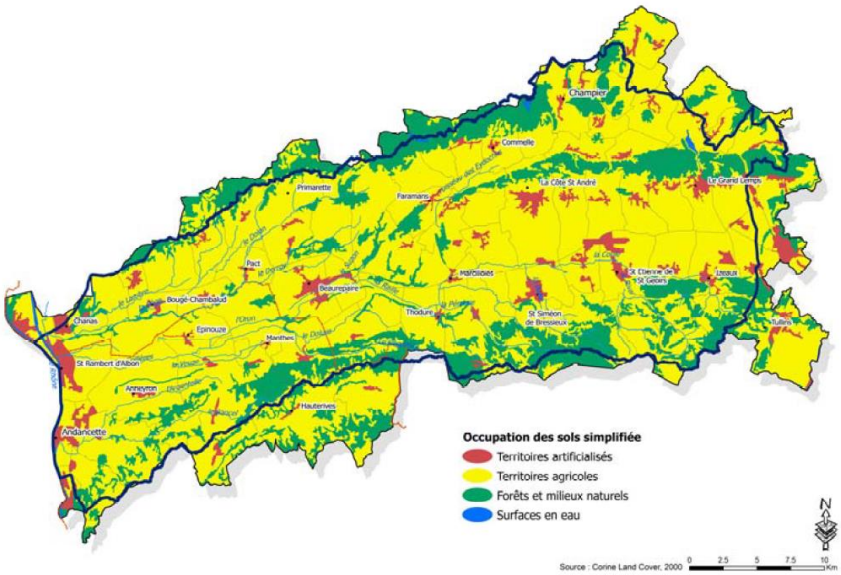


Illustration 44 : Carte d'occupation des sols simplifiée (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011).

b) *Répartition des prélèvements par usages*

En 2012, dans le cadre de l'étude des zones stratégiques pour l'alimentation en eau potable du bassin de Bièvre-Valloire, AnteaGroup ont calculé les volumes prélevés dans la nappe des alluvions exclusivement, en fonction des usages :

	Nombre d'ouvrages	Volume prélevé (milliers de m^3)	% du volume total
AEP	21	5 612	13%
Agriculture	502	17 003	40%
Autre	9	17	0%
Industrie	17	2 362	6%
Pisciculture	10	17 682	41%

Illustration 45 : Volumes prélevés dans les alluvions et du nombre d'ouvrages utilisés pour les différents usages dans le bassin Bièvre-Valloire, pour l'année 2009 (AnteaGroup, 2012).

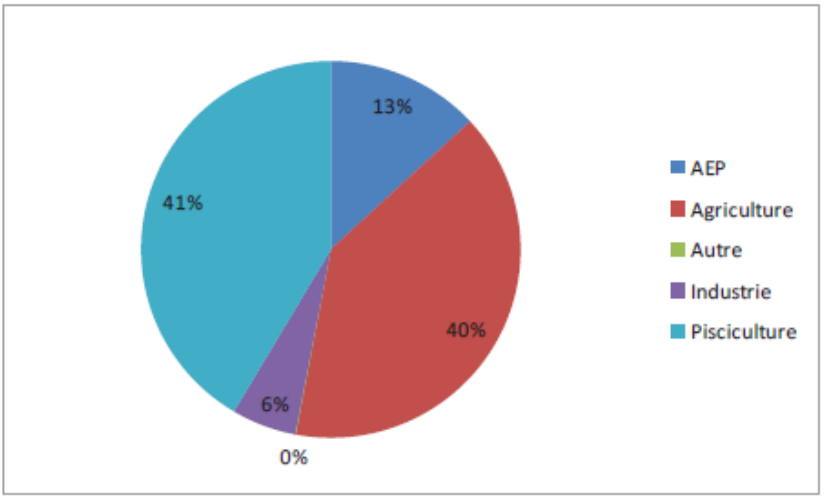


Illustration 46 : Répartition des usages de l'eau des alluvions en 2009 (AnteaGroup, 2012).

- Les prélèvements les plus importants sont ceux réalisés par les **pisciculture**s. Il existe 3 exploitations piscicoles sur le bassin : Murgat (Beaufort), Faure et Font-Rome (Manthes). Elles produisent environ 1 200 tonnes de poissons par an (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011). Cette activité est ancienne et l'implantation repose sur la présence de sources (Beaufort, Manthes) qui servent à l'alimentation des bassins à poissons. Les sources ayant tendance à se tarir, les exploitants ont recours à des prélèvements en nappe pour compenser les baisses de débits. Un débit quasi-constant est rejeté à la sortie de ces exploitations tout au long de l'année, soutenant les débits des cours d'eau concernés à l'étiage (Oron, Veuse, Collières) (Martin *et al*., 2008a).

L'**agriculture** via l'irrigation est le deuxième plus gros consommateur d'eau. Sur environ 11 000 ha de surfaces agricoles irrigables, plus de 8 000 ha sont effectivement irrigués (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011). Les prélèvements peuvent varier selon les conditions climatiques d'été entre 10 et 18 Mm^3/an (Martin *et al*., 2008b). L'exploitation de la ressource apparait plus importante à l'aval du bassin versant. La majeure partie des prélèvements agricoles sont essentiellement concentrés sur les mois de juin, juillet et août (Martin *et al*., 2008a).

- Les volumes prélevés pour l'**AEP** sont moins importants que pour les pisciculture et l'agriculture. Ils sont réalisés uniquement en nappe (Martin *et al*., 2008a). L'eau prélevée provient à 66 % de la nappe des alluvions fluvio-glaciaires, à 8 % de la nappe de la molasse et à 26 % de sources situées sur les coteaux (Chambaran, Bonnevaux, Banchet). Pour le scénario tendanciel du SAGE, a été prise en compte une évolution à la baisse de la consommation d'eau potable par habitant de 0,88 % par an jusqu'en 2027, soit 10,7 % de baisse sur la période 2010-2027, ce permettrait de réduire les sollicitations de la nappe des alluvions. Le tendanciel du SAGE BLV table sur une hausse des rendements de 25 %, soit un rendement de 75 % en 2027. Une carte des zones potentiellement en déficit à l'horizon 2025 (Illustration 47) a été établie principalement sur la base des conclusions du SCoT (Schéma de Cohérence Territoriale). Parmi les 6 zones identifiées, 3 sont partiellement ou totalement alimentées par l'eau provenant de la nappe des alluvions (AnteaGroup, 2012): Beaurepaire / Saint-Barthélémy ; CC de Bièvre-Liers ; Thodure / Marcilloles.

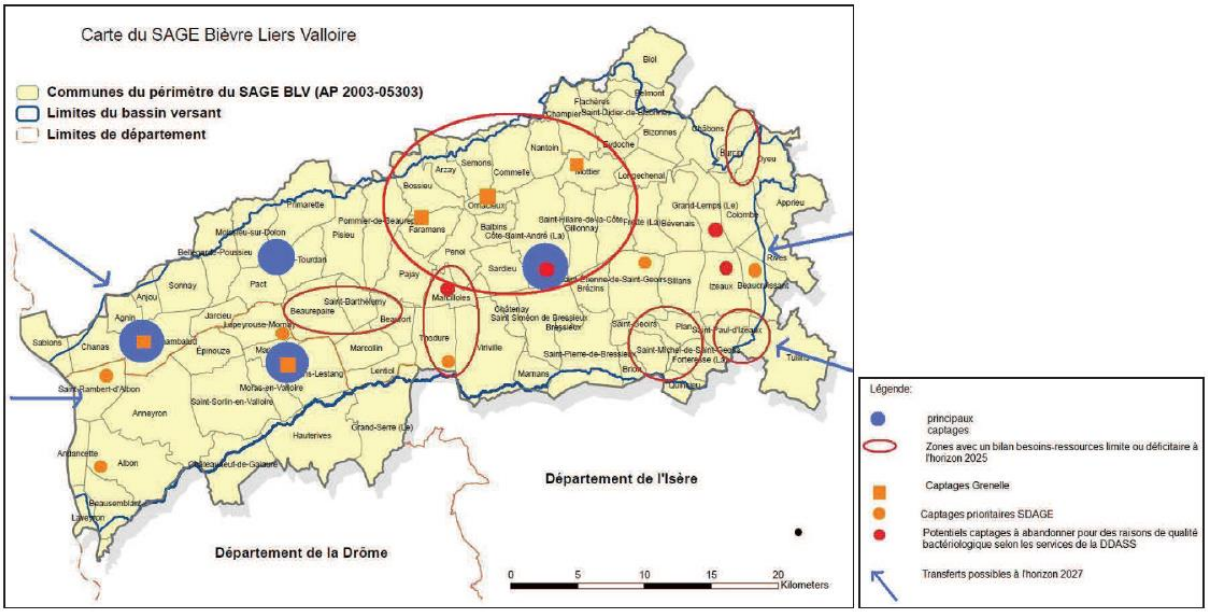


Illustration 47 : Identification des zones potentiellement déficitaires à l'horizon 2025 (AnteaGroup, 2012).

- Les prélèvements réalisés par les **industries** sont nettement plus faibles que pour les autres usages. En effet, l'activité industrielle est relativement peu développée sur le bassin. Elle est plus particulièrement localisée dans les plaines, donc au-dessus de la nappe, aux extrémités est et ouest du territoire et le long de l'axe de Bièvre. Les volumes prélevés dans la nappe de Bièvre-Liers-Valloire représentent plus de 90 % du volume total prélevé pour l'industrie. L'évolution des prélèvements industriels présente une tendance à la baisse des prélèvements, en particulier pour les prélèvements qui sont effectués dans les cours d'eau. 118 établissements industriels relèvent du régime réglementaire des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Les secteurs d'activités des ICPE les plus représentés dans le périmètre du SAGE sont les carrières (14 % de l'ensemble des ICPE) et le travail des métaux (11 %) (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011).

En terme de **rejets**, la totalité de l'eau prélevée par les pisciculture est rejetée au réseau de surface (Martin *et al*., 2008a). Pour les prélèvements industriels, une part importante de l'eau entrant dans les processus de production (ou procédés industriels) est restituée avec ou sans traitement aux cours d'eau ou à la nappe. Le reste est renvoyé au réseau d'assainissement public. 49 ouvrages d'épuration collectifs existent sur les 87 communes du périmètre du SAGE et ont une capacité totale de traitement d'environ 107 000 équivalents habitants (EH). Seuls 35 ouvrages, représentant une capacité de traitement de 46 650 EH, rejettent effectivement dans le bassin versant Bièvre-Liers-Valloire (cours d'eau et infiltration). Les Services Publics d'Assainissement Non Collectif (SPANC) ne sont mis en place que sur 74 % des communes du périmètre du SAGE (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011). Si les rejets des pisciculture et des STEP permettent un soutien d'étiage des cours d'eau en été, sur la partie aval du bassin versant, la qualité de ces eaux n'est pas de même nature que celles des eaux souterraines (Martin *et al*., 2008b). De manière générale, les rejets se font essentiellement en eau de surface. Une grande partie de l'eau prélevée en nappe ne retourne donc pas dans son milieu d'origine (comparaison de l'Illustration 48 et l'Illustration 49). Les eaux rejetées retournant à la nappe le font par le biais de bassins d'infiltrations (notamment au niveau de plusieurs STEP), ou localement par transferts des cours d'eau à la nappe.

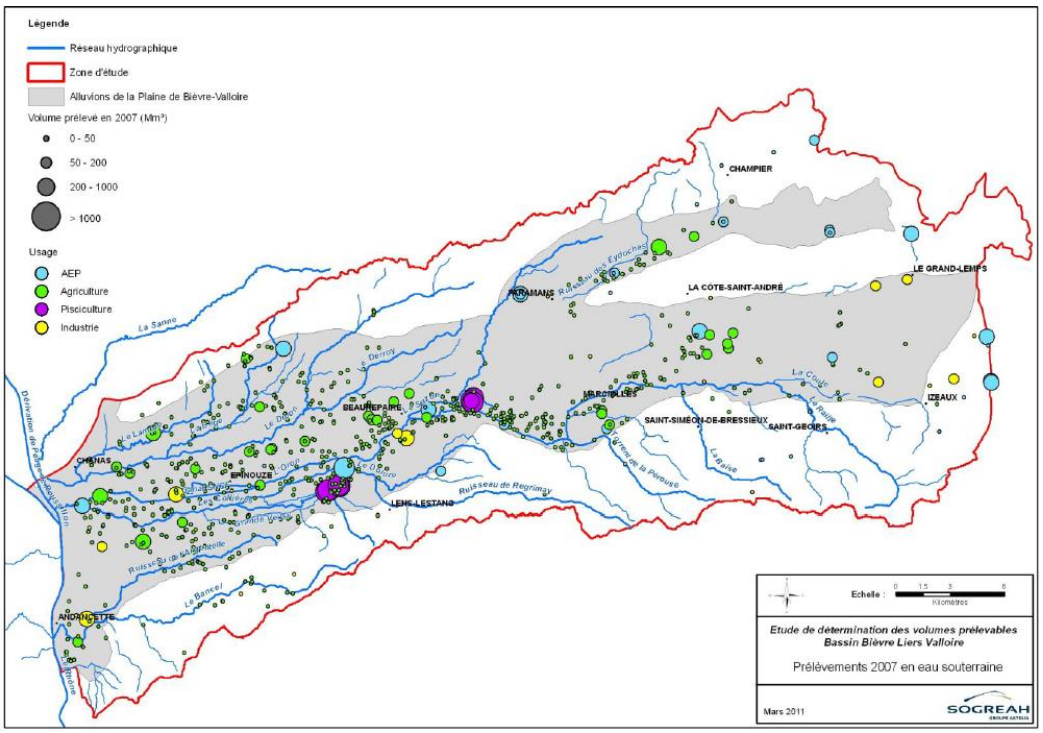


Illustration 48 : Répartition géographique des prélèvements souterrains en 2007 (SOGREAH, 2011).

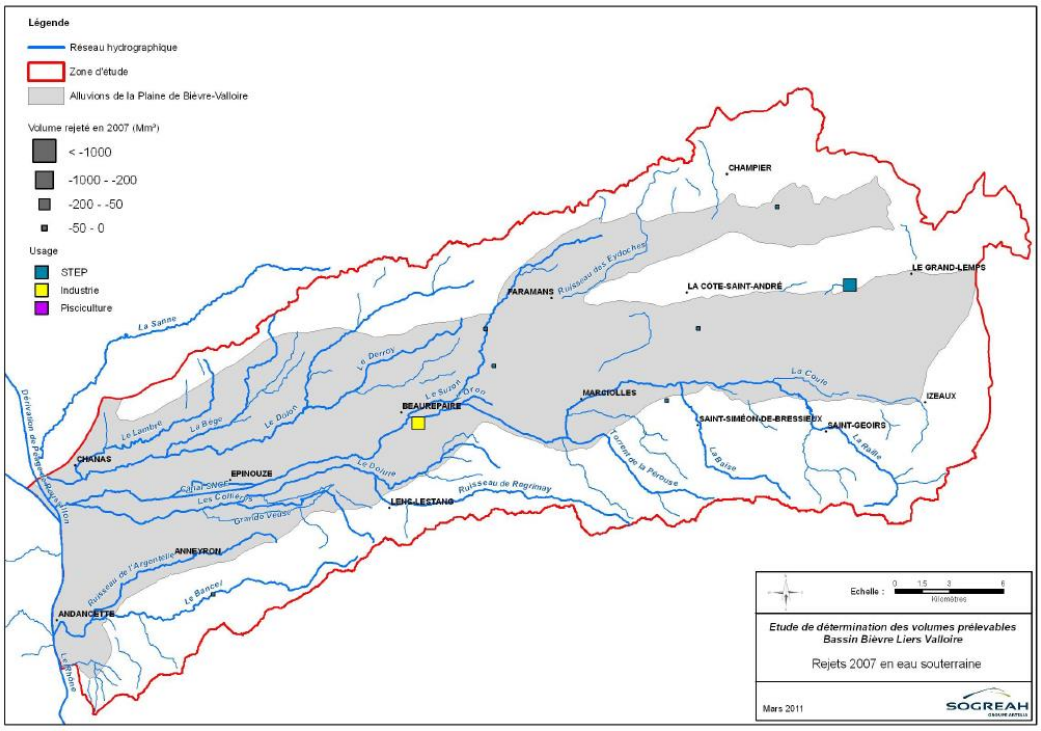


Illustration 49 : Répartition géographique des rejets souterrains en 2007 (SOGREAH, 2011).

c) *Résultats des études des volumes prélevables*

De manière à garantir le maintien de l'équilibre piézométrique de la nappe et le bon fonctionnement des milieux aquatiques, le SAGE a défini les volumes moyens et maximums disponibles pour l'ensemble des usages, pour des prélèvements en eau de surface et en eau souterraine. Les volumes définis sont regroupés dans l'Illustration 50.

		Volumes en m³				
		Tous usages	Production d'eau potable	Usages industriels	Usages agricoles	Usages des pisciculture s
Eaux souterraines	Volume moyen disponible	55 563 000	6 718 000	2 274 000	15 795 000	30 776 000
	Volume maximum disponible	*non défini*	7 030 000	2 274 000*	27 000 000	38 137 000
Eaux superficielles	Volume maximum disponible	5 086 000	4 057 000	364 000	665 000	0

** Pour les usages industriels : volume maximum disponible = volume moyen disponible*

Illustration 50 : Récapitulatif des volumes prélevables définis par le SAGE Bièvre-Liers-Valloire.

Ces volumes sont similaires aux volumes prélevés au cours de ces dernières années, et ne mettent pas en lumière l'existence d'un déficit quantitatif des eaux souterraines à combler. Cependant, des évolutions des volumes disponibles pourraient être envisagés pour les usages industriels et agricoles :

- pour les industries, un volume maximum de 3 500 000 m³ pourrait être demandé, soit une augmentation de 862 000 m³ par rapport au volume de base (eau souterraine + eau de surface) ;

- pour l'agriculture, les représentants des irrigants souhaiteraient pouvoir bénéficier à terme d'un volume maximum de 30 000 000 m^3, soit une augmentation de 2 335 000 m^3 par rapport au volume de base (eau souterraine + eau de surface).

Au total, ce serait un supplément d'environ **3,2 Mm^3** sur les volumes maximums prélevables. Ces demandes pourront être examinées par la CLE dès lors que des actions d'économie d'eau auront permis de dégager des volumes supplémentaires.

3.2.6. État des Eaux

a) *État quantitatif des eaux superficielles et souterraines*

Le bilan moyen annuel de la nappe des alluvions fluvio-glaciaires, c'est-à-dire la différence entre les apports par les pluies et les exports par les prélèvements, est globalement en équilibre. Cependant, en période estivale, les milieux aquatiques connaissent régulièrement des débits ou des niveaux piézométriques faibles. Ces désordres quantitatifs sont causés par une recharge insuffisante de la nappe par les pluies automnales et hivernales et sont accentués par les prélèvements plus ou moins importants selon les conditions climatiques de l'été. Ils se traduisent par une baisse des niveaux de nappe qui peuvent aller jusqu'au tarissement des sources et à l'assèchement complet des cours d'eau qui en dépendent. Le curage des cours d'eau, les digues, les travaux de protection contre les inondations contribuent encore aujourd'hui au manque de recharge de la nappe. La ressource en eau présente donc localement et temporairement des risques de baisse. La ressource en eau est fortement dépendante du développement des prélèvements et de l'aménagement du territoire en général sur certains secteurs (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011). SOGREAH (2008) citent, malgré tout, la présence de plusieurs sites d'alimentation artificielle de la nappe par bassin d'infiltration des eaux superficielles, dans les secteurs de Commelle, du Bois des Burettes et du ruisseau du Barbaillon, et précisent qu'il reste un potentiel significatif de recharge artificielle à partir des eaux de surface sur le bassin notamment à partir des eaux du Rival.

b) *État qualitatif des eaux souterraines*

D'après la fiche Masse d'eau FRDG303, la qualité des eaux souterraines de la nappe des alluvions fluvio-glaciaires, évaluée sur une période de 2006 à 2011, est médiocre. Dans l'ensemble du bassin Bièvre-Liers-Valloire, la qualité de la nappe des alluvions fluvio-glaciaires est dégradée par les nitrates et la présence généralisée de pesticides, en particulier l'atrazine et ses dérivés (l'atrazine est interdite à la vente depuis 2003) (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2011).

- Sur 160 points avec des données nitrates répartis sur l'ensemble de la superficie de la masse d'eau, 10 sont en état médiocre (soit moins de 10 %) et sont principalement localisés sur la plaine de Bièvre. Toutefois, 125 points présentent par ailleurs des indices de dégradation par les nitrates (teneurs moyennes > 25 mg/l sur l'ensemble de la masse d'eau voire même des teneurs > 40 mg/l sur les plaines de Bièvre et de Liers) soit près de 80 % des points. Globalement les teneurs en nitrates augmentent des terrasses situées en bordure du bassin (de 5 à 25 mg/l) vers la basse terrasse, en cohérence avec les sens d'écoulement de la nappe (Illustration 51). La plupart des captages ayant des teneurs élevées présentent également une forte variabilité intra-annuelle avec des pics situés plutôt en hiver et des minimas plutôt en été, en cohérence avec les périodes à risques de lessivage de nitrates (fin automne, hiver) (AnteaGroup, 2012).

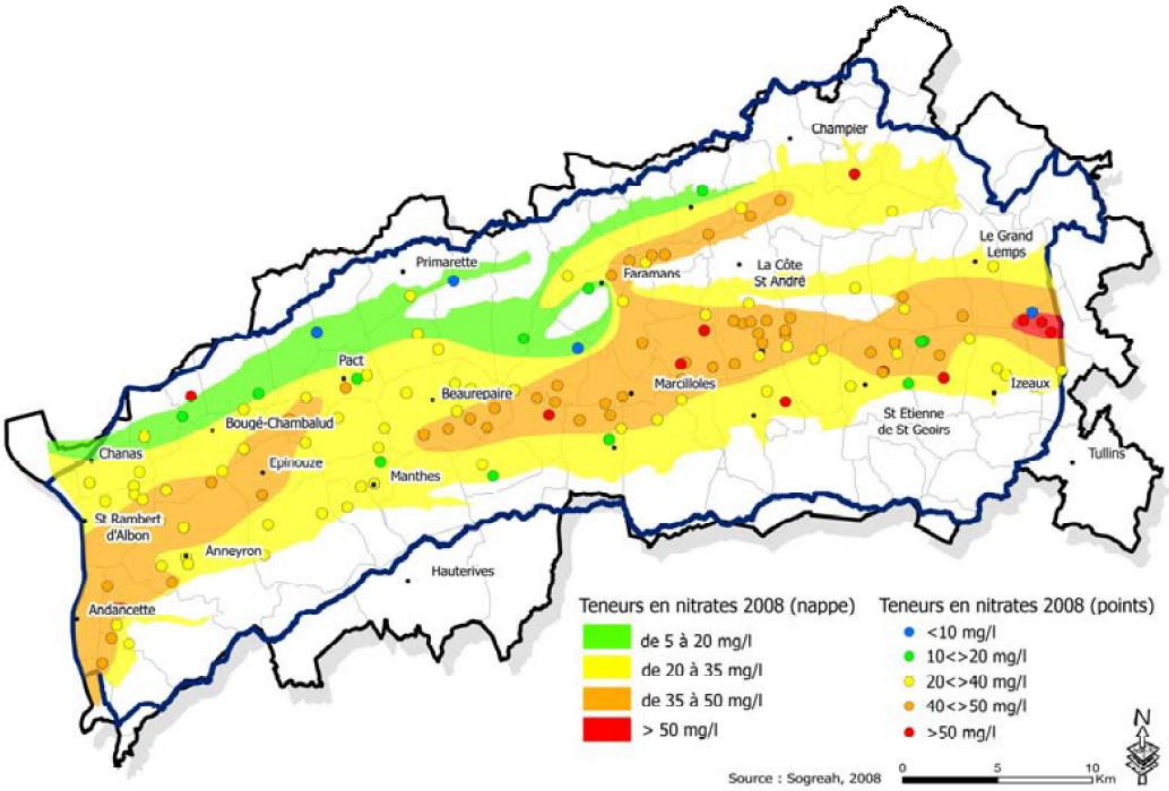


Illustration 51 : Carte des concentrations en nitrates dans la nappe de Bièvre-Liers-Valloire (année 2008) (CLE SAGE Bièvre Liers Valloire, 2011).

- Sur 52 points avec des données pesticides, 6 sont en état médiocre (paramètre déclassant : atrazine déséthyl) soit 11 % des points avec des données. L'atrazine déséthyl a par ailleurs été quantifiée sur plus de la moitié des points. Parmi ces 52 points, 12 ont fait l'objet d'une recherche de DEDIA (Deséthyl-desisopropyl-atrazine) : 5 sont en état médiocre du fait de la présence de cette substance (plus de 40 % des points ayant fait l'objet d'une recherche), et il existe un fort risque de la présence de DEDIA sur les autres points où est quantifié l'atrazine déséthyl. On retrouve principalement ces produits de dégradation de l'atrazine sur la plaine du Liers et sur la plaine de la Valloire.

Parmi les points en état médiocre, 4 étaient des captages prioritaires SDAGE 2009. **Des efforts importants ont déjà été réalisés afin de limiter l'impact des pressions anthropiques** (rénovations de station d'épuration, pratiques agricoles visant à limiter les pollutions diffuses, …) (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2016).

c) *État qualitatif des eaux de surface*

La quasi-totalité des cours d'eau du bassin sont affectés (d'après les données de la CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire de 2011) :

- par une pollution généralisée et chronique par les nitrates (20 – 30 mg/l) indiquant l'impact des activités agricoles, des rejets domestiques et industriels (contamination de 30mg/l sur le Rival, de 40mg/l sur les Collières, mais faible -10mg/l- sur les affluents latéraux) ;
- par une pollution organique essentiellement azotée et phosphorée liée à l'insuffisance des capacités d'assainissement des rejets domestiques et industriels ;

- par la dégradation de la qualité hydrobiologique (analyse des invertébrés qui vivent sur le fond des cours d'eau) liée aux pollutions citées précédemment et au mauvais état physique des cours d'eau.

Des pollutions « toxiques » par les pesticides et les métaux (Cr, Hg) ont été mises en évidence sur les cours d'eau de l'aval du bassin.

Les faibles débits des cours d'eau accentuent l'impact des différents rejets, particulièrement dans la partie amont du bassin versant (Illustration 52).

Les travaux déjà réalisés, et ceux à venir sur les stations d'épuration (sous-dimensionnement actuel par rapport aux volumes d'effluents) **et leurs réseaux** (réhabilitation, séparation des eaux usées et pluviales), **et certaines innovations dans les pisciculture devraient améliorer les paramètres physico-chimiques et l'hydrobiologie** (CLE SAGE Bièvre-Liers-Valloire, 2016).

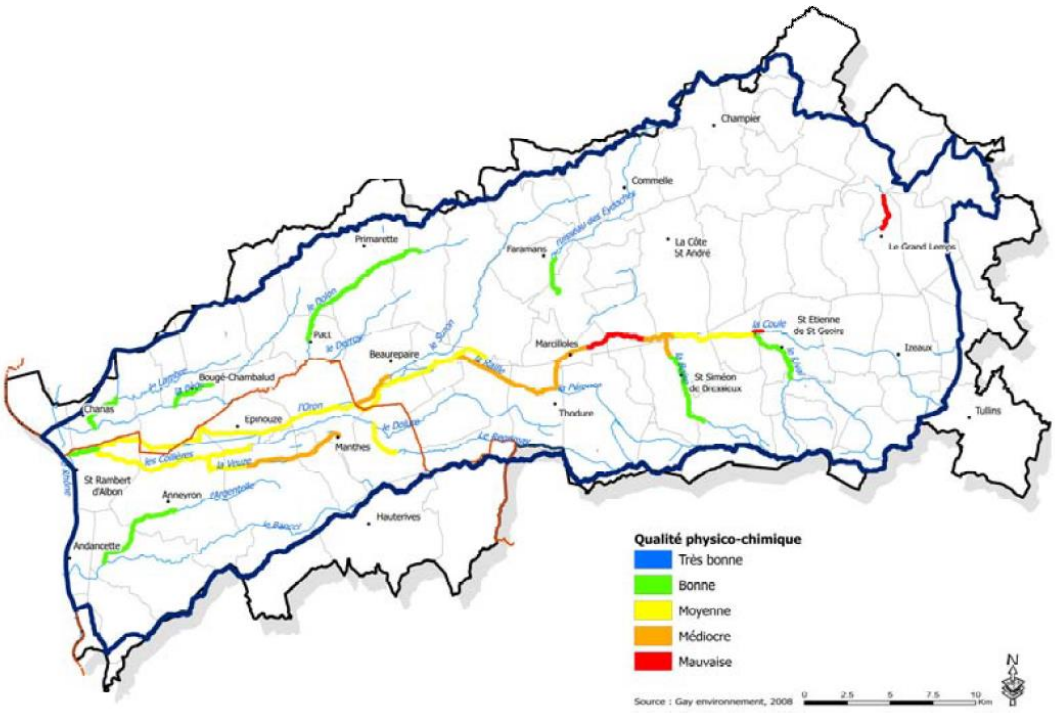


Illustration 52 : Carte de l'état physico-chimique des cours d'eau sur le secteur de la nappe de Bièvre-Liers-Valloire (CLE SAGE Bièvre Liers Valloire, 2011).

3.2.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site

La recharge artificielle sur ce secteur pourrait répondre à plusieurs problématiques :

- dans le cadre du SAGE, il est demandé à ce que les prélèvements n'augmentent plus (cependant il n'y a pas de demande de diminution). La recharge artificielle pourrait permettre un état d'équilibre entre la recharge et les prélèvements ;
- remonter le niveau de la nappe pourrait permettre une meilleure alimentation des sources utilisées par les pisciculture et donc faire diminuer leurs prélèvements en nappe ;
- alimenter la nappe avec une eau de meilleure qualité que celle de la nappe pourrait améliorer la qualité des eaux contenues dans les alluvions (phénomène de dilution).

3.3. NAPPE DE LA VISTRENQUE ET DES COSTIERES (647AA)

La nappe de la Vistrenque et des Costières constituent l'un des 4 territoires test retenus dans le cadre du projet d'étude de la faisabilité de la recharge artificielle sur le bassin Rhône Méditerranée et Corse (BRGM – Agence de l'eau RMC). Ces formations correspondent à la masse d'eau FRDG101 ainsi qu'à l'entité BD Lisa 647AA. L'aquifère est sédimentaire et monocouche. La nappe est libre sur 541km² et captive sur 107 km² (secteur sud-est).

La description du site suivante s'appuie en grande partie sur les fiches Masse d'eau FRDG101 et Entité 150/647AA (rédigée par le BRGM et l'Agence de l'Eau RMC), ainsi que diverses études réalisées par le BRGM, ou encore dans le cadre de la mise en place du SAGE Vistre et nappes Vistrenque et Costières, lancé en 2003 et porté par les Syndicats Mixtes du bassin versant du Vistre, et des nappes Vistrenque et Costières (SMBVV et SMNVC).

3.3.1. Contexte géographique et géomorphologique

Le site étudié se localise dans la partie méridionale du département du Gard, au sud de la ville de Nîmes, entre le Gardon à l'est et le Vidourle à l'ouest. Elle constitue un quadrilatère orienté nord-est à sud-ouest et compris entre Remoulins au nord-est, Beaucaire au sud-est, Saint-Gilles au sud, Saint-Laurent d'Aigouze au sud-ouest et Gallargues au nord-ouest (Illustration 53). Cette entité se localise au sud des garrigues nîmoises, le territoire de la ville de Nîmes étant partiellement inclus.

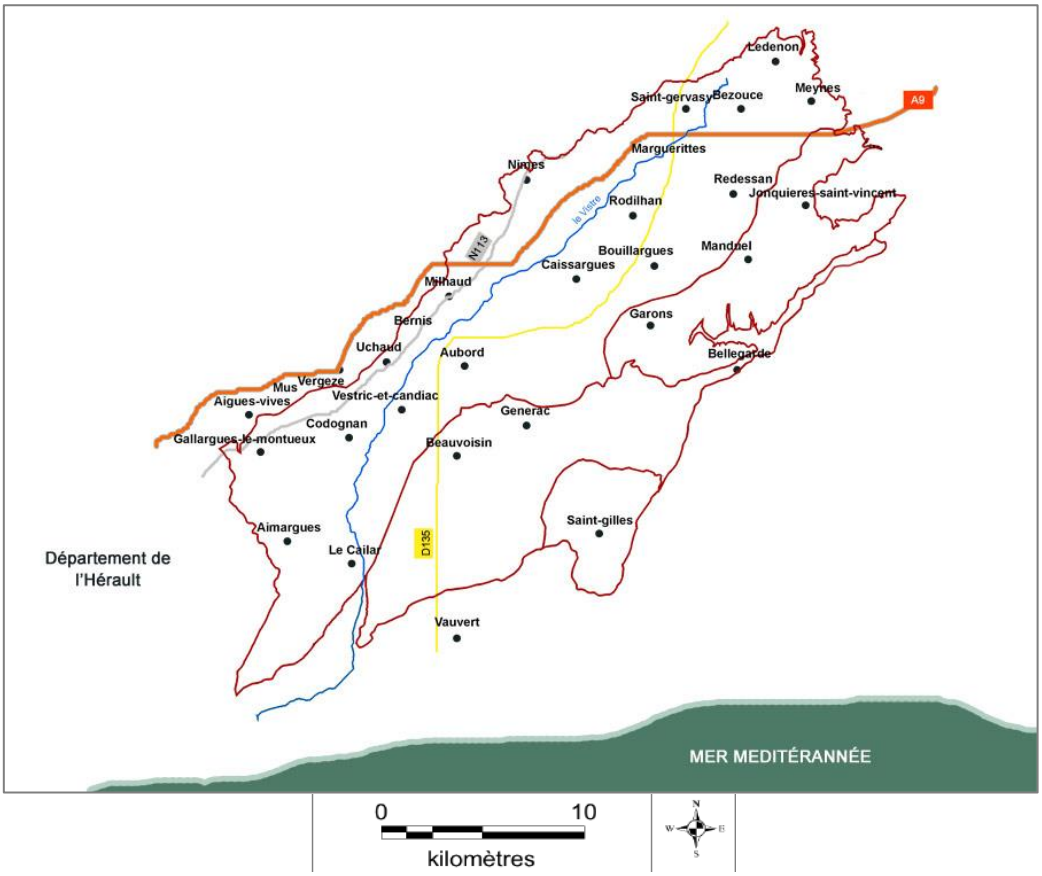


Illustration 53 : Carte de l'entité 647AA et localisation des principales communes et axes routiers (source : http://vistrenque.fr/les-nappes).

Cette entité 647AA (n° 150 d'après la BDRHF, § 4.2.1) regroupe 5 sous-entités que sont les alluvions quaternaires et villafranchiennes de la Vistrenque (150A), les alluvions quaternaires et villafranchiennes des Costières (150B), les formations villafranchiennes des Costières entre Vauvert et Saint-Gilles (150C), les alluvions quaternaires et villafranchiennes à l'ouest de Saint-Gilles (150D) et les argiles et sables astiens des Costières (150E) (numéros renseignés dans la BDRHF, Illustration 54).

Il s'agit d'un secteur de plaine (Vistrenque) et de plateau à très faible altitude (Costières) encadré au nord par les garrigues nîmoises et au sud par la plaine du Rhône et la Petite-Camargue. Sur cette entité, l'altitude varie entre 0 au niveau de la terminaison sud occidentale de la Vistrenque, entre Saint-Laurent-d'Aigouze et Aigues-Mortes et 146 m au Puech-de-Dardaillon sur la commune de Générac. L'altitude dépasse 100 m uniquement et localement sur les plateaux des Costières.

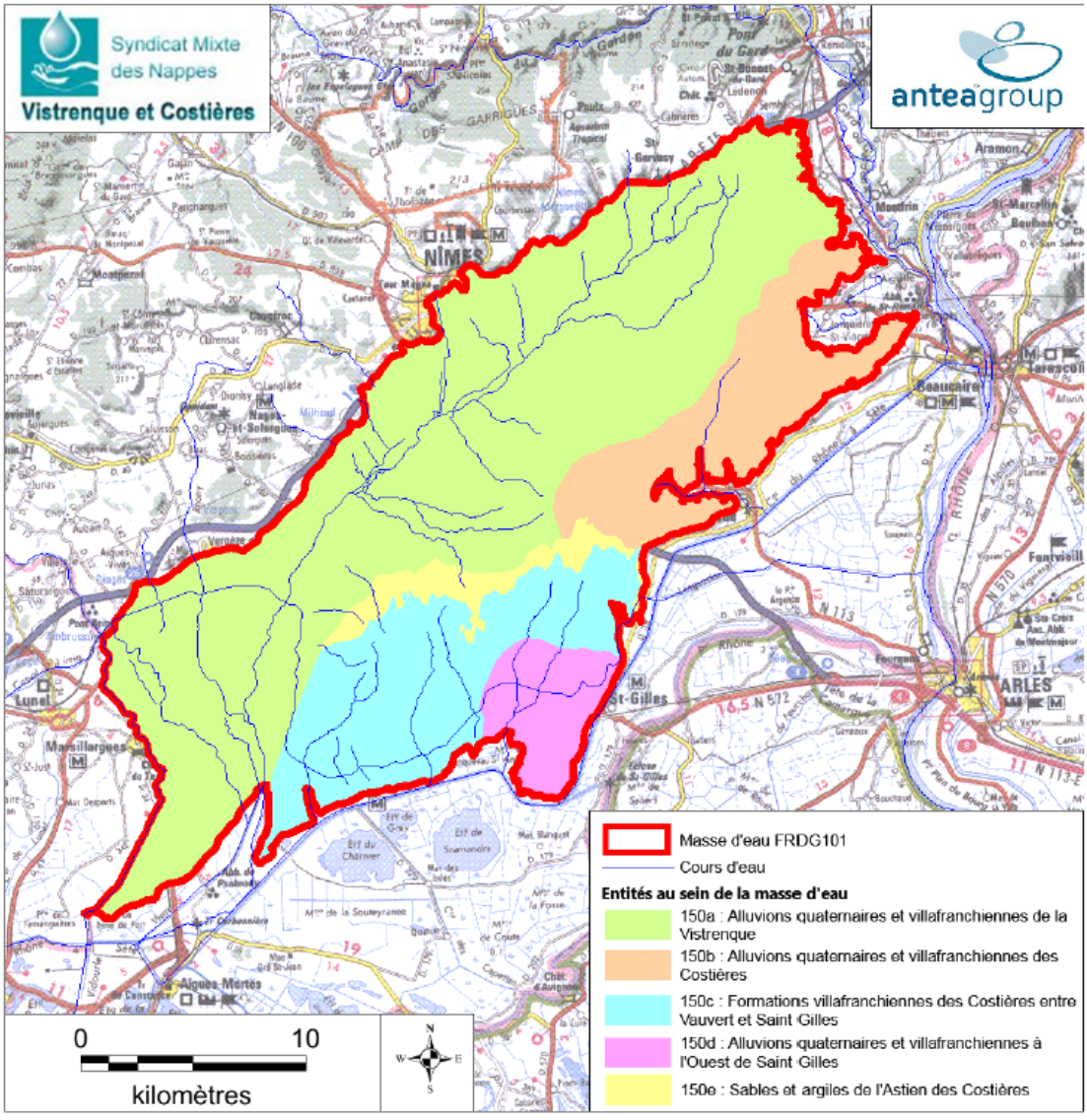


Illustration 54 : Carte de localisation des sous-entités locales (AnteaGroup, 2015).

3.3.2. Géologie

Cette entité 647AA est bordée au nord par des formations calcaires et marno-calcaires du Crétacé inférieur, qui en constituent l'ossature et correspondent à des dépôts marins de plate-forme de bordure de la fosse vocontienne. L'orogenèse pyrénéenne leur donne une structure ondulée selon des plis d'axe nord-est/sud-ouest à nord-ouest/sud-est.

À l'Oligocène, survient une phase de distension qui entraîne l'effondrement de la partie centrale de la chaîne pyrénéo-provençale et qui se traduit au niveau des Garrigues par la faille de Nîmes, qui vient effondrer la partie méridionale. C'est dans les parties basses de cette structure que vont se déposer les séries évaporitiques du Stampien. Plus près des paléo-reliefs, l'Oligocène correspond à des conglomérats ou à des brèches. La mer miocène envahit cet ensemble et déborde même sur les Garrigues. Près de celles-ci, la sédimentation résultante est de type récifale, mais elle peut aussi se traduire par la formation de molasses (Burdigalien). Le Pliocène se caractérise par une nouvelle phase de transgression jusqu'au pied des Garrigues, déposant d'importantes séries de marnes puis de sables argileux.

Les marnes du Plaisancien qui constituent la base des formations pliocènes affleurent dans le secteur de Beauvoisin – Générac au cœur de l'anticlinal de Vauvert. Ces marnes ont une épaisseur variable pouvant dépasser 500 m, voire 1 000 m. Sur ces marnes se sont déposés des sables marins astiens dont la puissance est variable (entre 20 et 60 m en général). Ces formations peuvent aussi être absentes, soit par lacune de sédimentation, soit en raison de leur érosion au Villafranchien. Ces sables astiens sont à l'affleurement dans l'entité 150E.

Le régime continental s'établit à nouveau au Pliocène supérieur. Des cailloutis se déposent alors en s'étalant en terrasse au Villafranchien. Ces formations sont à l'affleurement dans les entités 150A, 150B et 150C. Cette nappe de cailloutis, dont l'épaisseur résiduelle atteint 15 à 20 m, voire localement 25 m, ravine plus ou moins les formations sous-jacentes. Ces cailloutis villafranchiens sont représentés par des galets plus ou moins profondément rubéfiés et des graviers emballés dans une matrice sablo-limoneuse. L'épaisseur de ces « paléosols rouges » est importante, mais variable (plus de 7 m à Caissargues). On rencontre aussi des niveaux consolidés par un ciment calcaire appelés le « taparas » et des cailloutis libres en surface appelés le « gress » et enfin des cailloutis et des sables correspondant à la formation originelle et qui représentent les matériaux aquifères.

Par la suite, des phénomènes de distension effondrent la Vistrenque (150A) et permettent la mise en relief des Costières (150B et 150C) par le jeu de la flexure de Vauvert.

Les dépôts holocènes qui forment le delta du Rhône sont présents à l'Est de l'agglomération de St Gilles et notamment à l'Est du Canal du Rhône à Sète qui constitue la limite de cette entité (150D). Au Quaternaire récent, au cours des cycles de glaciations, se déposent des formations de piémont, recouvrant les cailloutis rhodaniens en bordure des Garrigues ou des limons loessiques. Les limons présents dans la plaine de la Vistrenque correspondent à des dépôts actuels liés, soit au Vistre, soit à la présence d'anciennes zones marécageuses. L'origine peut aussi être éolienne. L'épaisseur des formations de couverture peut dépasser 5 m.

La coupe représentée en Illustration 55 permet de visualiser la superposition de ces formations, ainsi que la faille de Nîmes (au nord-ouest) et de Vauvert (plus au sud-est).

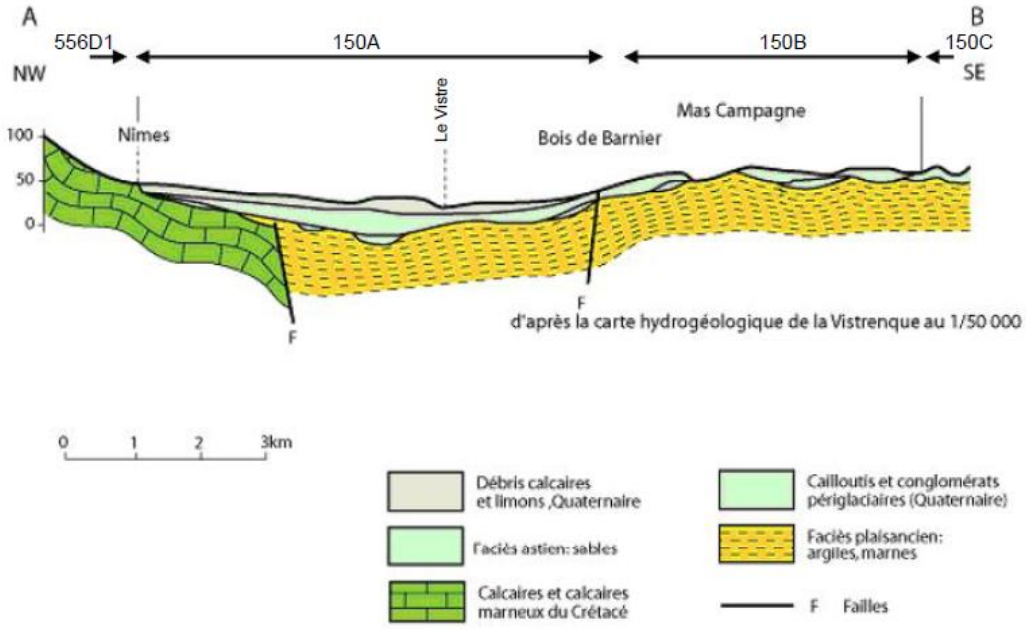


Illustration 55 : Coupe géologique schématique réalisée au travers des sous-entités 150A, 150B et 150C.

3.3.3. Hydrogéologie

a) *Structure générale de l'aquifère*

L'aquifère très chenalisé présente une épaisseur moyenne de 4 à 20 mètres, avec une grande hétérogénéité verticale et latérale. Sur la plaine de la Vistrenque, l'existence d'une couverture limono-argileuse peu perméable de plusieurs mètres d'épaisseur peut rendre la nappe semi-captive à captive.

Les lithologies et les structures varient sensiblement d'une sous-entité à l'autre :

- **150A :** l'épaisseur des alluvions augmente du nord-est au sud-ouest de 0 à 30m. C'est une nappe continue avec une grande variation latérale de faciès (passées argileuses et conglomératiques) et présence de chenaux. Dans toute la partie septentrionale, en bordure de la faille de Nîmes, des dépôts de piedmont semi-perméables mettent en charge l'aquifère sous-jacent contenu dans les cailloutis villafranchiens ;
- **150B :** cette entité est située en position plus élevée que les entités voisines et constitue une nappe perchée reposant sur les formations imperméables des sables de l'Astien et des marnes du Plaisancien. Elle a une épaisseur noyée réduite (1 à 5 m) et, est moins perméable et moins productive ;
- **150C :** ces formations font 5 à 10m d'épaisseur. Au nord, cette entité est perchée et présente des ressources en eau souterraine très limitées, spécialement là où affleurent les sables argileux de l'Astien. Au sud, les sables s'épaississent et deviennent plus perméables, les débits des forages pouvant atteindre 50m^3/h ;
- **150D :** ces alluvions sont constituées de graviers, de galets et de sable (Pléistocène) et sont donc très productifs ;

- **150E :** les argiles et sables Astiens des Costières affleurent au milieu de l'anticlinal de Vauvert. Ils disparaissent au nord et au sud sous les formations plus récentes du quaternaire et du Villafranchien. C'est une entité à faible productivité et dont l'épaisseur saturée est réduite là où affleurent les sables. Cependant dans les zones sous couverture, l'épaisseur saturée peut dépasser 70 m et présenter ainsi une meilleure productivité.

b) *Recharge et exutoire*

À l'échelle de l'entité 647AA, la recharge s'effectue essentiellement par la **pluviométrie** et par l'aquifère des **calcaires crétacés** le long de la bordure nord. Sur les Costières, 25 à 45 % des pluies participent à la recharge. La faille de Nîmes joue aussi un rôle notable dans le processus d'alimentation de l'aquifère (localement il peut y avoir des anomalies positives de température). De manière générale, la recharge naturelle annuelle d'eau contenue dans l'aquifère est de l'ordre de **50 à 100 Mm^3**. Dans ce volume, la recharge saisonnière renouvelable varie de 0 à environ 40 Mm^3, avec une moyenne de l'ordre de 8 à 10 Mm^3. Elle constitue la partie exploitable de la ressource. Elle est toutefois variable suivant les secteurs géographiques des nappes (SMEGNV / SMBVV, 2005).

Les **canaux d'irrigation** peuvent également jouer un rôle d'alimentation de la nappe (via les fuites des réseaux et les excédents d'irrigation). Ponctuellement, des **injections d'eau depuis le canal BRL** ont été pratiquées au niveau de deux captages : Vauvert à Candiac (réduction de l'étiage – volume injecté moyen de 48 000 m^3/an entre 2001 et 2008, et pouvant varier de 20 à 90 000 m^3 selon les années) et Manduel (dilution des polluants – débit de réinjection réduit à 7 828 m^3 en 2008 et abandonné en 2009) (AnteaGroup, 2015). Cette réinjection était peu suivie, et a été **abandonnée** à la demande de l'ARS (possible source de pollution). Ces forages ont été rebouchés, les conduites existent toujours.

En terme d'exutoires peuvent être considérés :

- les écoulements de la nappe au sud et sud-est vers la frange littorale et les alluvions du Rhône par débordement temporaire ;
- Le Vidourle, agissant comme un drain, et la masse d'eau FRDG102 (Alluvions anciennes entre Vidourle et Lez et littoral entre Montpellier et Sète) à l'ouest ;
- une limite d'émergence discontinue et temporaire à l'est ;
- Le Vistre, traversant l'entité 150A.

c) *Écoulements et paramètres hydrodynamiques*

De manière générale, la nappe se situe entre 5 et 30 mètres de profondeur. Les fluctuations annuelles et inter-annuelles sont fortes par rapport à l'épaisseur de l'aquifère (de 1 à 4m). La zone noyée varie de 5 à 20m dans les formations villafranchiennes, et peut atteindre 80m au sein de l'entité 150E. Au sein de l'entité 647AA, le type d'écoulement est poreux. Les gradients et directions d'écoulement varient d'un secteur à l'autre. L'écoulement de la nappe se fait :

- du nord-est vers le sud-ouest pour la Vistrenque (gradient de 1 à 3 % en fonction du secteur) ;
- vers le nord-est pour le secteur de Bellegarde ;
- vers le sud pour le secteur de Saint-Gilles.

Des interactions entre les différentes sous-entités ont été mises en évidence :

- 150A : la profondeur de l'eau par rapport au sol est comprise entre 1 et 5 m et les fluctuations saisonnières sont comprises en général entre 1 et 3 m. Elle s'écoule vers le Vidourle ;

- 150B : cette nappe s'écoule au nord vers l'entité 150A ;
- 150C : cette nappe s'écoule au sud vers les alluvions du Rhône par des sources temporaires de débordement et alimente au sud-est l'entité 150D, et en partie vers le nord pour alimenter l'entité 150A ;
- 150D : ces alluvions sont drainées par le Rhône et les écoulements se font vers le sud ;
- 150^{E} : cette nappe peut se situer à une dizaine de mètre de profondeur. Elle s'écoule au nord et à l'ouest vers l'entité 150A.

Une carte piézométrique de la sous-entité 150A a été réalisée en 2006 par S. PINZELLI et permet de mettre en évidence une partie de ces interactions (Illustration 56). Les autres sous-entités, plus complexes et parfois discontinues, n'ont pas été modélisées.

En terme de caractéristiques hydrodynamiques, la transmissivité est globalement comprise entre 10^{-2} et 10^{-4} m^2/s. Le coefficient d'emmagasinement est de 10 % en zone libre à 10^{-6} en zone captive. La vitesse d'écoulement est de l'ordre de 0,5 à 5 m/jour. De manière générale, les sous-entités 150A et 150D sont plus perméables, présentent des épaisseurs mouillées (et donc une capacité de stockage) plus importantes, et sont plus productives que les sous-entités 150B et 150C des Costières (nappes perchées dans des formations aquifères peu épaisses). La sous-entité 150E étant constituée exclusivement de sables astiens, son fonctionnement diffère des 4 autres entités (perméabilité plus faible, épaisseur mouillée importante sous couverture essentiellement, productivité faible, excepté au sud de Vauvert).

d) *Synthèse des données hydrogéologiques*

L'Illustration 57 récapitule les informations géologiques, structurales, et les paramètres hydrodynamiques des différentes sous-entités.

e) *Vulnérabilité de la ressource en eau souterraine*

Ce secteur présente un fort développement urbanistique et une forte pression agricole. La nappe étant proche de la surface du sol, elle est particulièrement vulnérable. Dans la plaine de la Vistrenque et dans le secteur de Saint Gilles, la nappe est soit captive sous des limons très peu perméables, soit localement libre avec ou sans limon de couverture. Elle est alors peu vulnérable à vulnérable. Sur le plateau des Costières, les cailloutis sont affleurants, la perméabilité est forte, l'aquifère est très vulnérable.

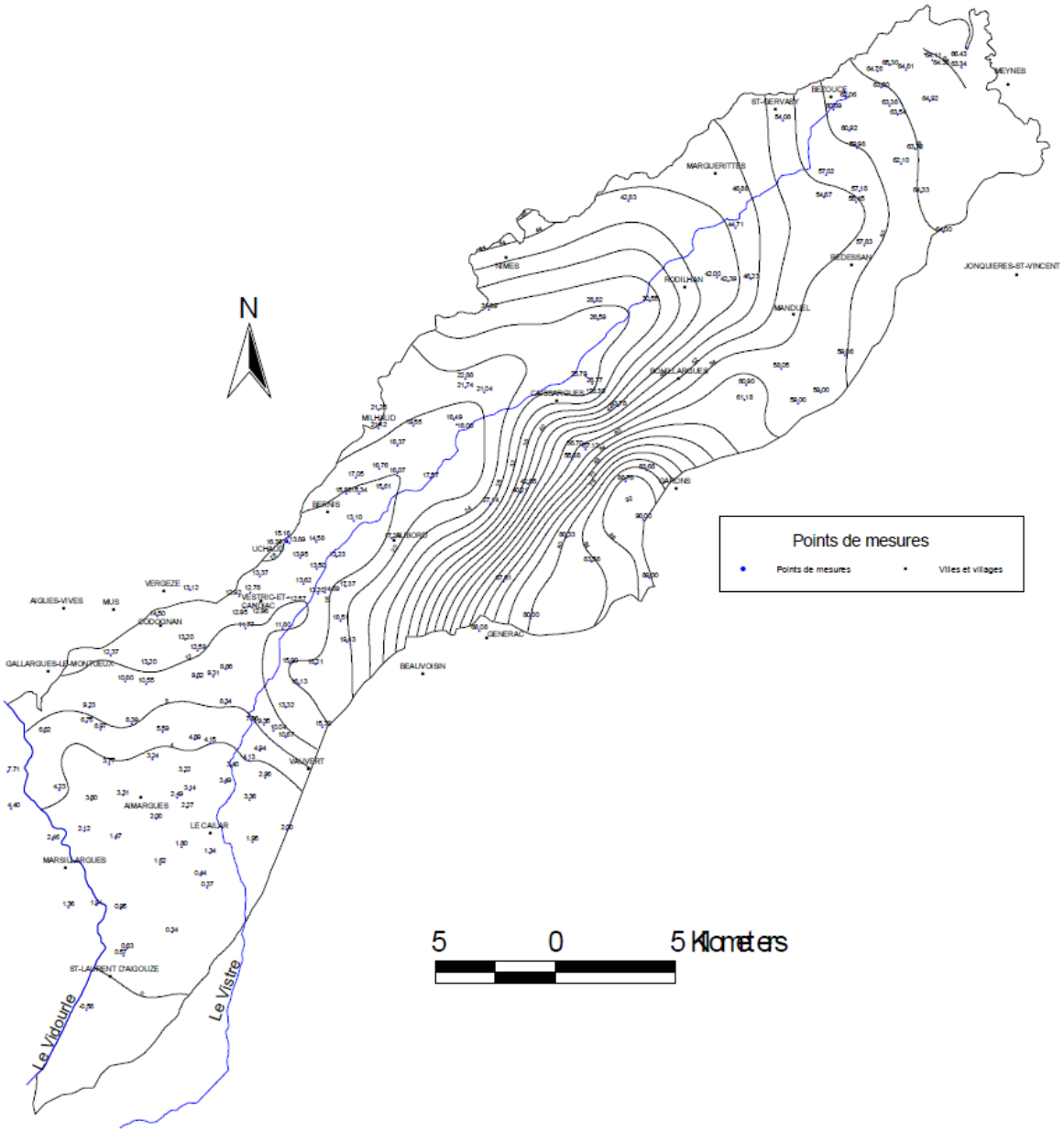


Illustration 56 : Carte piézométrique de la sous-entité 150A, pour le mois d'août 2006 (Pinzelli, 2006).

	150A	150B	150C	150D	150E
Lithologie du substratum	Marnes plaisanciennes et sables argileux astiens. L'entité 150E est constituée de sables astiens.				
Lithologie de l'aquifère	Alluvions quaternaires et villafranchiennes.	Alluvions quaternaires et villafranchiennes.	Formations villafranchiennes, et affleurements de sables astiens	Alluvions quaternaires et villafranchiennes.	Argiles et sables astiens
Structure de l'aquifère	Continue, avec grande variation latérale de faciès et présence de chenaux. En légère déclivité du NE vers le SO. Peut être recouverte par des niveaux indurés et des formations semi-perméables en surface.	Nappe perchée par mise en relief des Costières par le jeu de la flexure de Vauvert.	Nappe perchée. Epaississement des sables au Sud.		Les argiles et sables Astiens des Costières affleurent au milieu de l'anticlinal de Vauvert. Ils disparaissent au nord et au sud sous les formations plus récentes du quaternaire et du Villafranchien.
Limites du système	Nord: Calcaire et marno-calcaires crétacés (alimentent 150A). Est: affleurement substratum (émergence). Ouest: Vidourle (alimenté par 150A). Sud: entités 150B, 150C et 150E (alimentent 150A)	Nord et Ouest: entité 150A (alimenté par 150B). Sud: entité 150E (étanche). Sud-est: affleurement substratum (débordement). Est: marno-calcaires hauteriviens et formations miocènes (échanges limités)	Nord: entité 150E (étanche). Ouest: faille de Vauvert (étanche). Sud: affleurement substratum (débordement) et entité 150D (alimenté par 150C)	Nord et Ouest: entité 150C (alimente 150D). Sud et Est: formations deltaïques de Camargue (alimentées par 150D)	Toute limite: ennoyage des sables astiens sous couverture plus récente.
Gradient	1 à 3 % (du NE vers SO)	Au nord, vers 150A	Vers alluvions Rhône et 150D au Sud, vers 150A au Nord	Vers le Rhône au Sud	Vers 150A
Epaisseur de l'aquifère (m)	De 0 au NE (affleurement du substratum) à 30 au SO	Moins épaisse que 150A (15 à 20m)	Moins épaisse que 150A (10 à 15m) voire nulle quand affleurement des sables astiens. Sables peuvent atteindre 50m d'épaisseur.	15 à 25m	
	En moyenne, de 4 à 20				
Profondeur nappe (m)	1 à 5	5 à 10	5 à 10	0 à 4	0 à 10
Epaisseur mouillée (m)	5 à 20	1 à 5 (peut être nulle en période d'étiage)	1 à 5	12 à 24	Faible en zone affleurante, grande en zone sous couverture. 10 à 80
Fluctuation piézométrique (m)	1 à 4				
Perméabilité K (m/s)	1.10^{-2} à 1.10^{-5}				
Transmissivité T (m^2/s)	1.10^{-2} à 10^{-4}	1.10^{-3} à 5.10^{-3}	1.10^{-3} à 5.10^{-3}	1.10^{-2} à 5.10^{-2}	1.10^{-3} à 1.10^{-4}
Coefficient d'emmagasinement moyen (sans unité)	10^{-1} à 10^{-4} (en zone captives, càd. En bordure de la faille de Nîmes, où dépôts de piedmont mettent en charge la nappe)	0,1 (zones libres) à 10^{-6} (zones captives)			
Productivité Q (m^3/h)	5 à 200	1 à 15	1 à 5 (50 dans sables astiens au Sud)	20 à 100	1 à 100 (élevée au Sud de Vauvert)
Vitesse d'écoulement (m/j)	0,5 à 5				
Volume annuel reçu par l'aquifère (Mm^3)	50 à 100				

Illustration 57 : Tableau de synthèse hydrogéologique pour les sous entités de la nappe de la Vistrenque et des Costières.

3.3.4. Eaux de surface

a) *Cours d'eau*

Le Vistre : Ce cours d'eau traverse la sous-entité 150A dans sa longueur (Illustration 58). Globalement les échanges entre le Vistre et la nappe de la Vistrenque sont limités, par le fait que l'aquifère soit souvent protégé par une couche limono-argileuse le rendant captif. De plus, sur une grande partie de son linéaire, le Vistre est situé en dessous du niveau de la nappe. Les échanges se font donc essentiellement dans le sens nappe-rivière. On distingue 4 secteurs le long du cours du Vistre:

- amont du Vistre : au nord au niveau des affluents, il n'y a pas de limon et la nappe se trouve plus basse que le Vistre. Les échanges se font dans le sens rivière-nappe (notamment au niveau du Buffalon) ;
- zone de Milhaud : secteur où la nappe est entièrement captive. Il y a indépendance entre la nappe et le Vistre ;
- zone du Vestric : la nappe est majoritairement libre et la fonction drainante du Vistre est importante. On peut noter, un petit inversement de circulation au sud de Vestric en période d'étiage ;
- zone Vauvert et Cailar : la nappe est majoritairement captive et les relations entre les deux masses d'eaux y sont faibles. Le Vistre reçoit au Cailar le Rhony qui draine la Vaunage. Le Vistre aboutit dans les marais de Psalmody après être passé au travers des « prés » du Cailar (zone humide). Cette zone est argileuse, et le Vistre y joue le rôle de drain.

Le Vistre et l'ensemble de son bassin versant ont été fortement aménagés pour répondre aux besoins de l'agriculture et de l'urbanisation : création du canal du Vistre en partie aval (XVII^{ème} siècle), canal du Rhône à Sète (XVIII^{ème} siècle), recalibrage et rectification du Vistre sur tout son linéaire des années 1940 à 1980, travaux de drainage agricole à partir des années 1960. Ces aménagements ont profondément impacté le fonctionnement des cours d'eau : réduction de la sinuosité, augmentation du débit de plein bord, modification du régime hydrologique, suppression de la végétation de berge, colmatage du lit, diminution des capacités d'autoépuration, etc., aggravant les problématiques de crues et de qualité de l'eau sur l'ensemble du bassin versant (SMEGNV / SMBVV, 2005). Un changement radical des politiques de gestion des milieux aquatiques a ainsi eu lieu depuis le début des années 2000, orienté vers la réhabilitation du fonctionnement physique des cours d'eau (GINGER, 2010a).

Le Vidourle : ce cours d'eau est situé à l'extrémité sud-ouest de l'entité 647AA (Illustration 58). Les relations de la masse d'eau avec le Vidourle sont également assez limitées : cette rivière doit jouer en partie le rôle de drain terminal de l'écoulement nord-est / sud-ouest. Le Vidourle peut potentiellement alimenter la nappe, mais uniquement au nord du Mas Saint-Michel où le Vidourle circule sur les alluvions et où les niveaux de nappe et les fils d'eau sont confondus. Plus au sud le Vidourle circule directement sur les formations limoneuses de la couverture sans les recouper et reste nettement perché au-dessus de la nappe.

Enfin, sur le plateau de Garons il existe des petites nappes superficielles drainées par des ruisseaux au débit assez régulier. Le plus important est le ruisseau de Campagnole, affluent du Vistre.

Les données relevées à partir de la Banque HYDRO (Illustration 60) permettent de connaître le module et le débit d'étiage du Vidourle et du Vistre et d'estimer les débits réservés de ces cours d'eau. Le Vidourle présente un débit moyen annuel plus élevé que le Vistre, mais des débits d'étiage beaucoup plus faibles, dû entre autres au soutien des débits du Vistre à l'étiage par les

rejets de STEP. D'après GINGER (2010a), ces rejets pourraient contribuer à plus de 50 % des débits d'étiage du Vistre.

Une étude des volumes prélevables sur le Vidourle a été menée en 2012 par GINGER, et révèle les Débits Objectifs d'Étiage suivants (Illustration 60) pour la station de Sommières, en amont de la zone d'étude, sur la période d'étiage définie de juillet à septembre. Les valeurs de DOE sont supérieures au QMNA5, et sont plus faibles en septembre. Aucune étude similaire n'a été réalisée sur le Vistre.

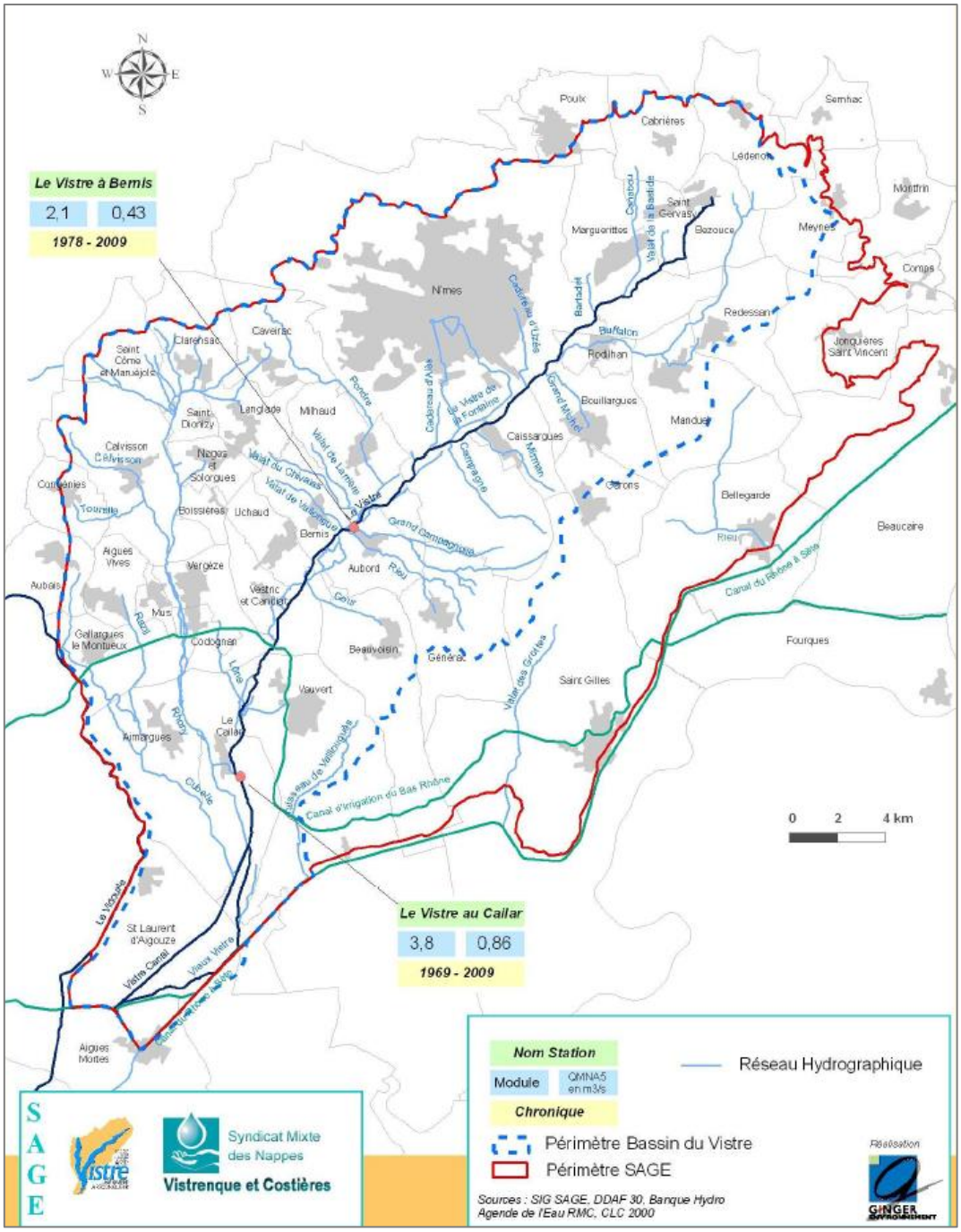


Illustration 58 : Carte du réseau hydrographique à l'échelle du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières (GINGER, 2010a).

b) *Les canaux Bas Rhône Languedoc (BRL)*

Ce réseau de canaux est alimenté par une prise d'eau d'une capacité maximale autorisée de 75 m^3/s, située dans le Rhône en aval de Beaucaire. Après 12 km, au niveau de la station « Aristide Dumont » (Bellegarde), l'eau est dirigée dans :

- le canal Philippe Lamour (+ 20 m NGF) d'une capacité de 63 m^3/s, qui alimente 8 500 ha dans le Gard (soit 24 % des 36 000 ha dominés par ce canal) ;
- le canal des Costières (+ 63 m NGF) d'une capacité de 12 m^3/s qui permet d'irriguer 30 000 ha (soit l'ensemble des surfaces dominées par ce canal).

Ces canaux sont localisés au Sud de l'entité 647AA (Illustration 59). D'après les éléments fournis par BRL, les débits effectivement transités (prélèvement en pointe de 10 à 12 m^3/s sur le Rhône) sont plus faibles que le droit d'eau (75 m^3/s au total). En 2007, plus de 80 millions de m^3 ont été prélevés pour l'irrigation (GINGER, 2010a). L'eau du Rhône arrive dans les communes, les exploitations agricoles, les entreprises ou chez les particuliers grâce à un réseau de 2 700km de conduites enterrées (concerne tout le Système Rhône, de la prise au Rhône à l'Est jusqu'à Vauguières à l'ouest). En plaine de la Vistrenque, ce réseau est sous-utilisé (en période estivale également). Sur le secteur des Costières, plus au sud, il est en revanche plus sollicité (d'après E. Belluau, BRL).

Illustration 59 : Cartes des installations BRL sur les secteurs Nîmes – Montpellier (source : BRL).

Nappes de la Vistrenque et des Costières (Q en m³/s)							Etude des volumes prélevables (GINGER, 2012b)		
Masse d'eau	Cours d'eau	Année	Module	QMNA5	Q réservé	Source	DOE Juillet	DOE Août	DOE Septembre
FRDR134b	Le Vidourle à Sommières [Mairie]	1984-2018	6,88	0,22	*0,688*	Banque HYDRO	0,22	0,2	0,17
	Le Vidourle [Vidourle aval] à Marsillargues	1969-2017	7,58	0,039	*0,758*				
FRDR133	Le Vistre à Bernis	1978-2018	2,23	0,45	*0,223*				
FRDR133	Le Vistre à Vestric-et-Candiac	2015	3,21		*0,321*				
FRDR133	Le Vistre [lit mineur] au Cailar	1969-2018	3,67	0,83	*0,367*				

Canaux BRL	Capacité	Volume idéal	Source
Prise au Rhône	Max: 75. Pointe actuel: 10 à 12	*2365 Mm3/an*	GINGER, 2010a
Philippe Lamour	63	*1987 Mm3/an*	GINGER, 2010a
Costières	12	*378 Mm3/an*	GINGER, 2010a

Illustration 60 : Récapitulatif des données quantité des eaux de surface pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles).

c) *Plans d'eau, Zones Humides et Zones protégées*

Bien que les zones naturelles soient modestes en étendue sur ce territoire, elles constituent un patrimoine biologique de grand intérêt, caractérisé par une forte diversité d'habitats (Illustration 61) : des Garrigues nîmoises au nord, qui accueillent notamment des espèces d'oiseaux protégées, aux abords de la Petite Camargue au sud, zone humide remarquable classée au titre du réseau Natura 2000, en passant dans la plaine de la Vistrenque par quelques espaces naturels qui subsistent au milieu des terres agricoles, zones humides et boisements, précieux pour de nombreuses espèces, en particulier des oiseaux migrateurs. Ces espaces naturels peuvent également présenter un fort intérêt paysager. Quatre sites sont inventoriés comme espaces naturels sensibles du département. La plaine agricole est concernée par une Zone de Protection Spéciale consacrée à l'Outarde canepetière (GINGER, 2010a).

Il n'existe pas de plan d'eau de grande importance sur ce secteur. Plusieurs petits plans d'eau locaux peuvent être notés:

- l'étang de la Bastide: zone ludique de Nîmes, étang placé près du Vistre, en relation avec la nappe plus qu'avec la rivière ;
- l'étang de Vestric : cet étang profond (ancienne extraction de déblais pour le canal BRL), placé contre le Vistre, n'est pas en relation avec la rivière ;
- les étangs du mas d'Arnaud, à Vergèze : anciennes extractions de granulat. La qualité de l'eau est supérieure à celle de la rivière. Ils sont en relation avec la nappe (fluctuations) dans une zone où la qualité est proche de celle de l'eau potable (teneur comparable à celle des puits AEP de Vestric et Uchaud soit 20 à 30 mg de nitrate/l).

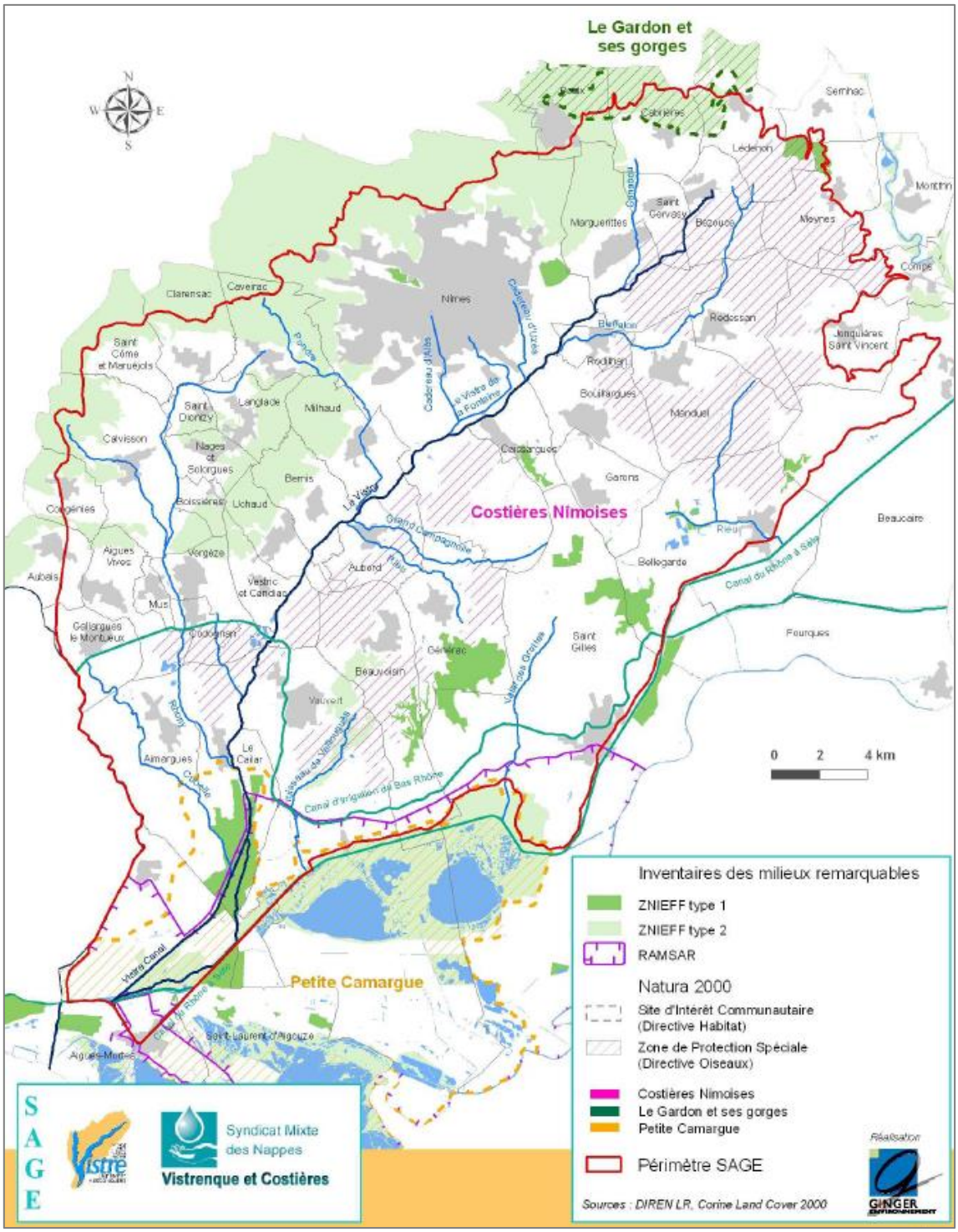


Illustration 61 : Cartes des milieux naturels remarquables à l'échelle du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières (GINGER, 2010a).

3.3.5. Usages de la ressource en eau

a) *Occupation du sol*

L'occupation du sol est constituée majoritairement de terres cultivées (84 % d'après la fiche Masse d'eau FRDG101, état des connaissances de 2014), mais celles-ci sont en régression devant l'urbanisation croissante (13 % en 2014) (Illustration 62). Par ailleurs, le territoire du SAGE, avec la présence de l'agglomération nîmoise et de la sphère d'influence du pôle Aigues-Mortes/Grau-du-Roi, accueille un important tissu d'activités industrielles, artisanales et commerciales : une quinzaine d'entreprises industrielles, spécialisées notamment dans l'agroalimentaire, plus de 6000 petites entreprises artisanales, 7 carrières en activité, 15 caves coopératives viticoles et 170 caves particulières. En revanche, le tourisme n'est pas une activité très développée sur le territoire (GINGER, 2010a).

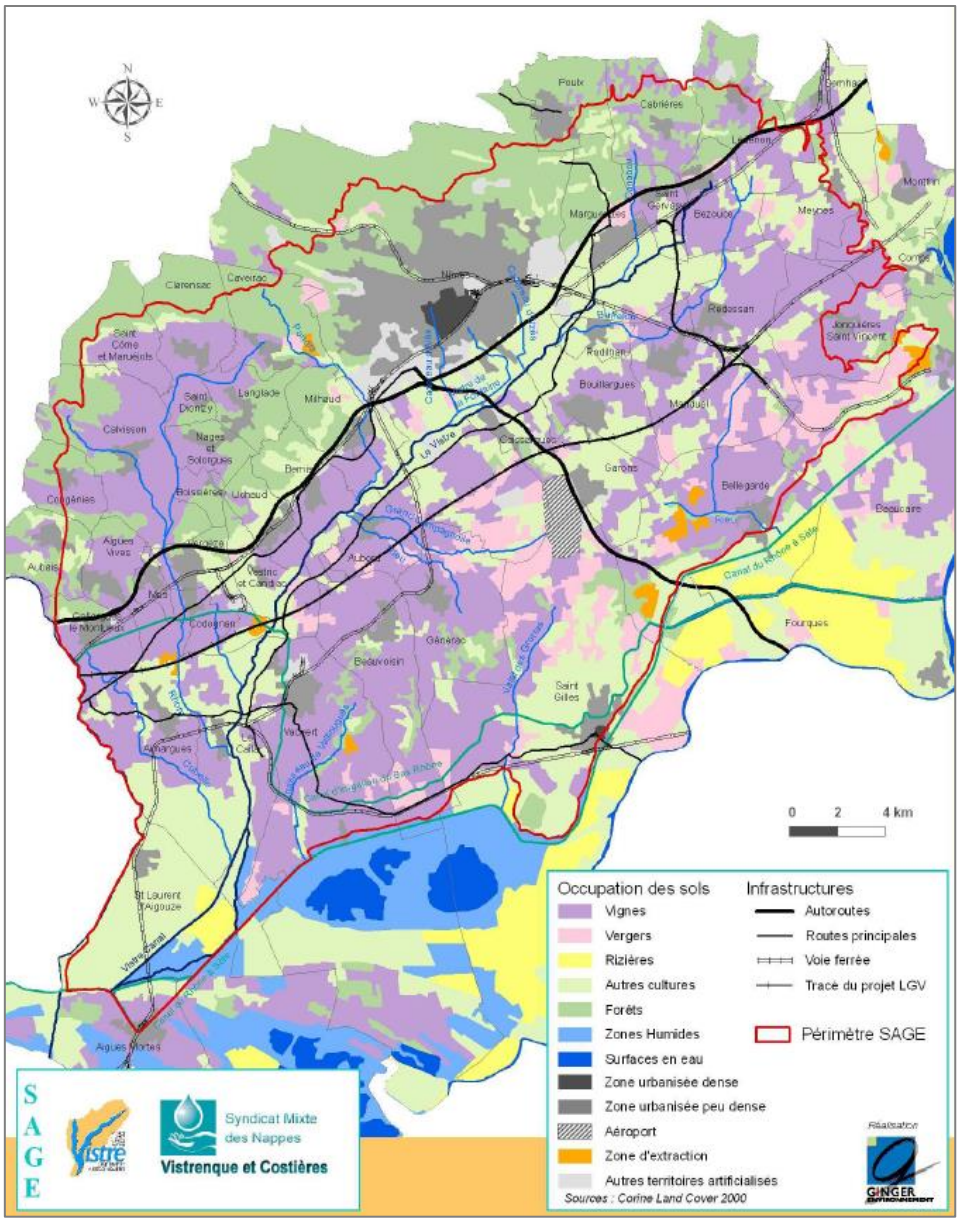


Illustration 62 : Carte de l'occupation du sol sur le secteur du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières (GINGER, 2010).

b) *Répartition des prélèvements par usages*

En ce qui concerne les eaux de surface, les prélèvements dans les rivières pour l'irrigation sont rares en raison de la présence de la nappe de la Vistrenque et du réseau d'irrigation alimenté par le canal Philippe Lamour (BRL). Il n'y a aucun prélèvement pour l'AEP, du fait de la mauvaise qualité des eaux superficielles, de leur quantité insuffisante, et de la proximité de la ressource que constituent les nappes de la Vistrenque et des Costières (SMEGNV / SMBVV, 2005).

En ce qui concerne les eaux souterraines, d'après l'état initial du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières (GINGER, 2010a), près de 100 Mm^3/an sont utilisés sur le périmètre pour satisfaire les besoins des collectivités (environ 40 %), l'irrigation agricole (environ 48 %) et les besoins industriels (environ 12 %); les nappes couvrent entre 20 et 30 % de ce besoin (entre 22 et 28 Mm^3/an), le reste provient de la ressource Rhône (canal BRL, alternative plus coûteuse) (Illustration 64, Illustration 63). L'eau des nappes étant facilement accessible, de nombreux prélèvements sont réalisés par des forages privés. Ceux-ci concernent aussi bien l'arrosage des jardins que le remplissage des piscines ou encore l'alimentation en eau potable de certains mas isolés, non raccordés au réseau public (SMEGNV / SMBVV, 2005).

Usage	Volumes utilisés en Mm^3/an	Dont volumes prélevés dans les nappes en Mm^3/an (et part correspondante)	
Systèmes AEP des collectivités	33	13	40 %
Forages privés pour usages domestiques	2 à 3	2 à 3	100%
Eaux brutes	3,3		
Irrigation	47	4 à 9	10 à 20 %
Industries	11,5	2,8	24 %
TOTAUX	97 à 98	22 à 28	23 à 29 %

Illustration 63 : Synthèse des volumes utilisés pour l'ensemble des usages dans le périmètre du SAGE (données de 2010).

Distinction par sous-entités : classée « ressource en eaux souterraines remarquable à forte valeur patrimoniale et fortement sollicitée » par le SDAGE RMC, la nappe de la Vistrenque (150A) est privilégiée pour l'alimentation en eau potable de 39 communes, à proximité de la ville de Nîmes (elle ne dessert pas Nîmes en eau potable). Cette nappe de la Vistrenque est aussi exploitée pour des usages industriels, mais aussi et surtout pour l'irrigation avec de nombreux forages privés sollicitant cet aquifère. Les nappes des Costières quant à elles (150B à 150E) alimentent 5 communes pour l'AEP. L'entité 150D est aussi largement exploitée pour l'agriculture. Par ailleurs, la nappe de l'entité 150E peut devenir saumâtre au sud de Vauvert si elle est trop exploitée. Le maintien d'une utilisation durable de cette ressource constitue de ce fait un enjeu majeur (SMEGNV / SMBVV, 2005).

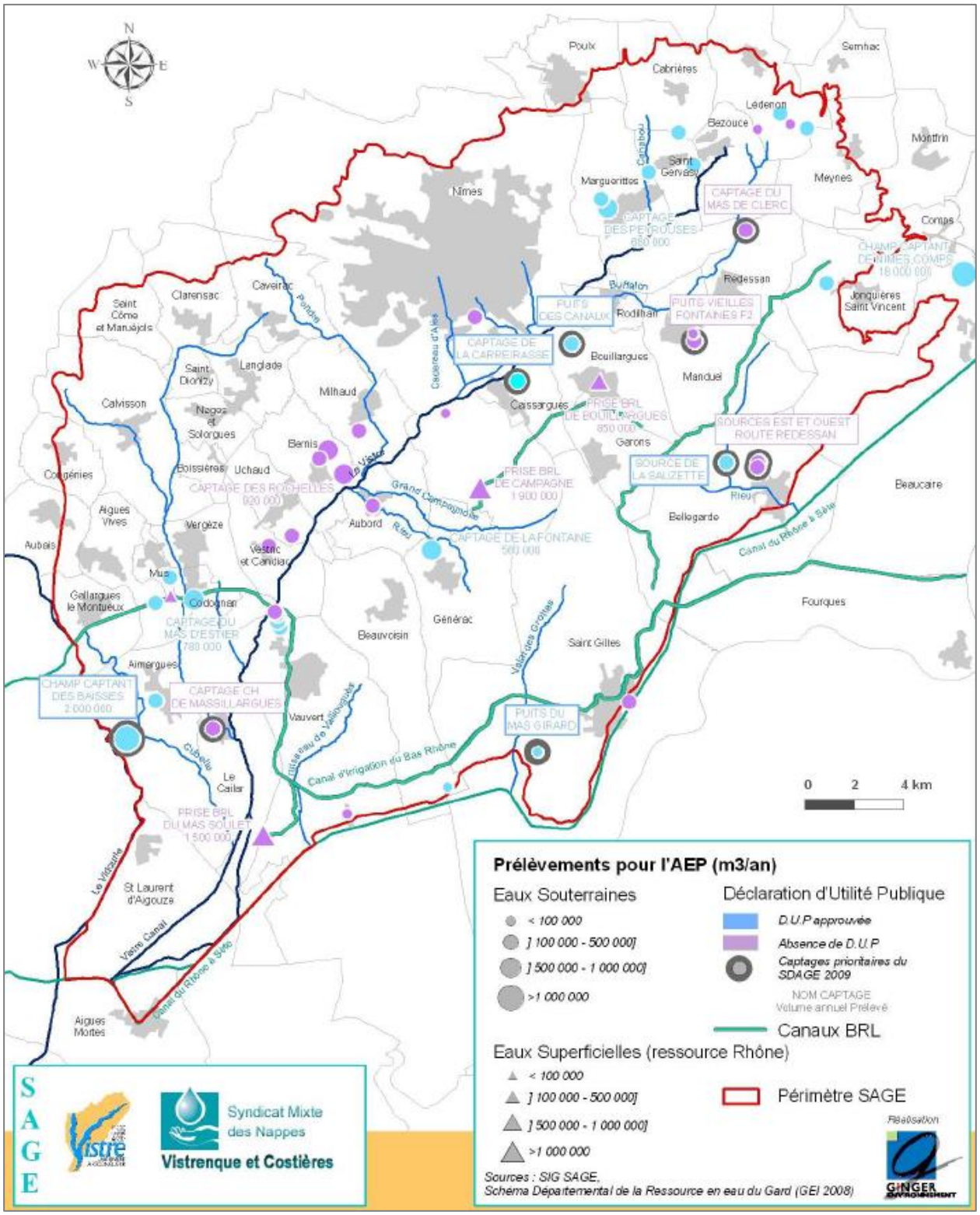


Illustration 64 : Localisation des captages AEP et stations BRL (GINGER, 2010a).

c) *Résultats d'études d'évolution des pressions quantitatives sur l'eau souterraine*

Aucune étude des volumes prélevables sur les nappes Vistrenque et Costières n'a été réalisée. En 2015, ANTEA s'appuient sur les différentes estimations d'évolution des prélèvements au sein de la nappe de la Vistrenque et des Costières, réalisées dans le diagnostic du SAGE Vistre, Vistrenque et Costières et pour le Schéma Départemental du Gard, et donnent une estimation des volumes prélevés pour l'année 2040 (Illustration 65).

Date	2012	2021	2040	2050
	Prélèvements actuels (2012)	Diagnostic du SAGE	Présente étude	Schéma départemental du Gard
Alimentation en eau potable	15.1	+3,2 Mm^3/an	+6,2 Mm^3/an	+ 2,2 Mm^3/an
Activités industrielles	0.5	Pas d'augmentation	+0,5 Mm^3/an	+ 1,6 Mm^3/an
Irrigation	*6*	Pas d'augmentation	+1,5 à 6 Mm^3/an	+0,1 à +0,2 Mm^3/an
Forages privés	*3*	+ 1 Mm^3/an	+1,5 Mm^3/an	Non estimé
TOTAL	**24.6 Mm^3/an**	**28,8 Mm^3/an**	**Entre 34.8 et 38.8 Mm^3/an**	**Entre 28,5 et 28,6 Mm^3/an**

Illustration 65 : Estimations de l'augmentation des prélèvements dans la nappe de la Vistrenque et des Costières (AnteaGroup, 2015).

Les différents scenarios et hypothèses pris dans chaque document mettent en évidence une augmentation des prélèvements au sein de la masse d'eau. Cette augmentation est moins importante dans le schéma départemental du Gard en raison d'une part de la non prise en compte des forages privés et d'autre part de la baisse des prélèvements pour l'eau potable liée à l'abandon de forages : en effet dans ce schéma il est émis l'hypothèse que les ouvrages où la qualité de l'eau est dégradée seront abandonnés et substitués à une autre ressource (nappe alluviale du Rhône et/ou eau superficielle du Bas Rhône).

Malgré ces différences d'estimations il est important de noter que les prélèvements pour l'alimentation en eau potable vont progressivement augmenter comme cela est déjà observé depuis les années 1990 (augmentation de 40 % entre 1987 et 2013). D'après le diagnostic du SAGE et l'estimation de l'étude réalisée par AnteaGroup, **les prélèvements vont augmenter de 40 % par rapport aux prélèvements de 2012** au sein de la masse d'eau (AnteaGroup, 2015).

En 2040, les volumes prélevés par an seraient de **10,2Mm^3** plus élevés qu'en 2012 (estimation basse), ou de **14,2Mm^3** plus élevés qu'en 2012 (estimation haute).

3.3.6. État des Eaux

a) *État quantitatif des eaux souterraines*

L'état quantitatif des nappes Vistrenque et Costières est qualifié de bon, d'après la fiche Masse d'eau FRDG101 (2014). En revanche, une tendance à la baisse est observée. Les variations du niveau des nappes au cours des 30 dernières années s'expliquent essentiellement par les variations pluviométriques : des niveaux assez bas ont été atteints au cours de sécheresses

importantes (moins de 7 m NGF au Mas Faget à Codognan au début des années 1980 et au début des années 1990) ; mais la recharge par les pluies est rapide, du fait de coefficients d'infiltration importants. Les tendances d'évolution du climat en zone méditerranéenne peuvent laisser craindre une baisse des recharges hivernales de la nappe dans les années à venir. Cette baisse possible, conjuguée à l'augmentation des besoins en eau liée notamment à la poursuite de la forte croissance démographique conduit à considérer qu'il peut exister un risque de nouveaux épisodes de baisse des niveaux de la nappe. Un autre facteur peut influer sur l'évolution de la recharge de la nappe par les pluies : c'est l'augmentation de l'urbanisation qui réduit la zone de recharge. Ainsi, si l'équilibre quantitatif des nappes Vistrenque et Costières n'apparaît pas menacé à court terme, la vigilance reste de mise pour son évolution sur le long terme (GINGER, 2010b).

b) *État qualitatif des eaux souterraines*

La qualité des nappes Vistrenque et Costières est qualifiée de médiocre, d'après la fiche Masse d'eau FRDG101 (2014), dû en grande partie aux pressions agricoles (et apports par collectivités et particuliers) : azote (nitrates) (Illustration 66) et pesticides (Illustration 67) pouvant dépasser les seuils de potabilité. En effet, sur la période 2006-2011 :

- sur 95 points de mesure des nitrates/conductivité, 25 % ont été classés en état médiocre. Concernant les nitrates, le secteur sud (Aimargues, Le Cailar, Vauvert) est le plus fortement contaminé, même si les teneurs se sont stabilisées dans certains cas, ces dernières années. La pollution est plus modérée sur les Costières. L'évolution des teneurs en nitrates de l'eau des forages est étroitement liée au contexte hydrogéologique local et à l'évolution de l'occupation des sols autour de chaque forage (GINGER, 2010a) ;
- sur une quarantaine de points avec des données pesticides, 10 % sont en état médiocre (paramètres déclassants : atrazine déisopropyl, norflurazon desméthyl, somme des pesticides). Concernant les pesticides, la dégradation est chronique et généralisée sur l'ensemble de la nappe mais les répercussions sur l'aptitude à la production d'eau potable s'observent surtout dans la partie nord de la nappe (Caissargues, Rodilhan, Bouillargues et Bezouce) (GINGER, 2010a) ;
- sur 12 points sur lesquels une recherche de DEDIA (Deséthyl-desisopropyl-atrazine) a été faite (presque exclusivement des points de suivi DCE), 75 % ont été déclassés.

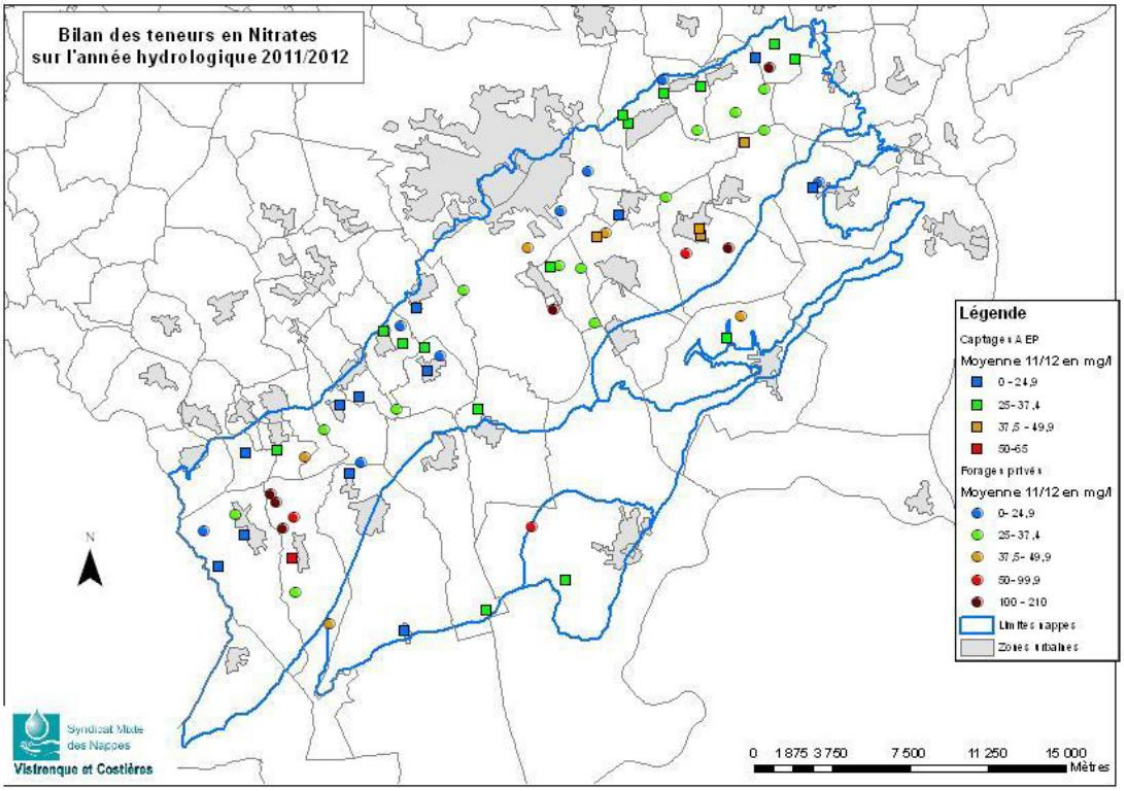


Illustration 66 : Teneurs en nitrates dans les nappes mesurées sur l'année hydrologique 2011-2012 (EPTB Vistre et SMEGNV, 2014).

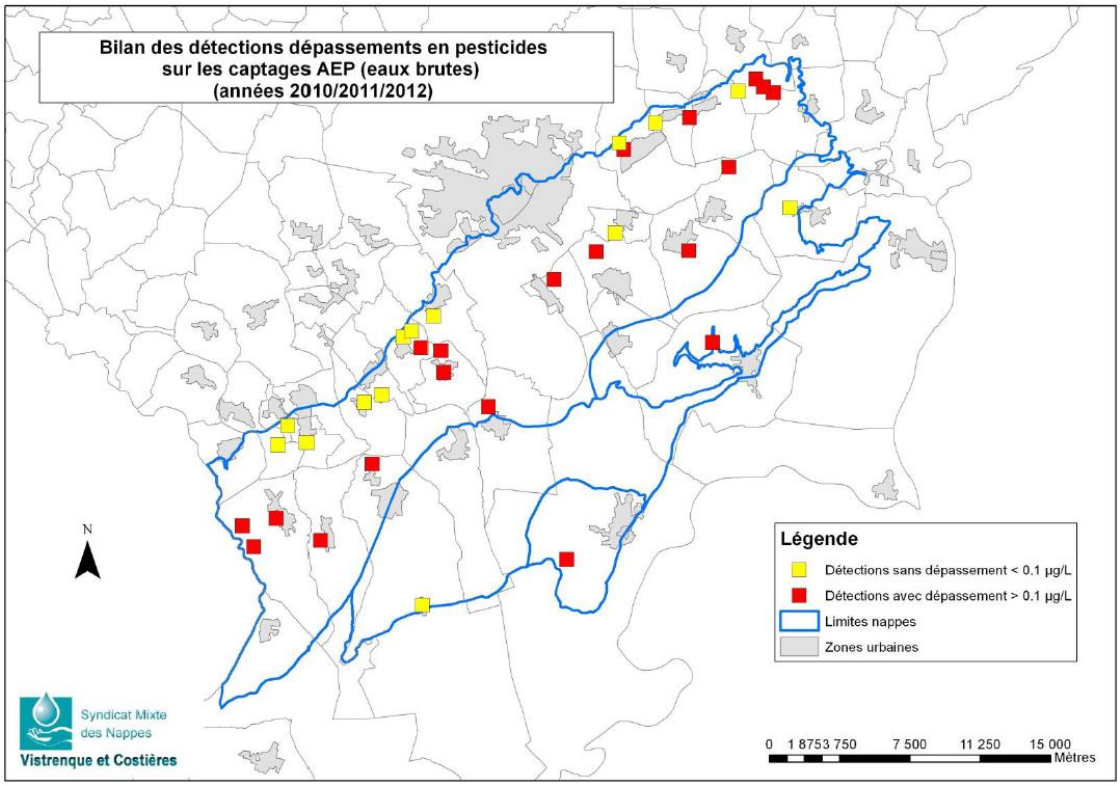


Illustration 67 : Dépassements des normes de concentration en pesticides sur les captages AEP, pour les années 2010, 2011 et 2012 (EPTB Vistre et SMEGNV, 2014).

c) *État quantitatif et qualitatif des eaux de surface*

Vistre : les apports d'eaux usées aux cours d'eau sont très nombreux : ils proviennent d'une trentaine de stations d'épuration, représentant une capacité totale d'environ 360 000 E.H., ainsi que des rejets d'installations industrielles et de caves vinicoles (HAP, métaux). Il faut y ajouter les apports en pollutions diffuses d'origine agricole (nitrates, pesticides) ou urbaine. Compte-tenu de l'importance des flux de pollution rejetés au milieu, de la faiblesse relative de ses débits, de la dégradation et de l'uniformisation du lit, la qualité de l'eau du Vistre et de ses affluents est très mauvaise sur une grande partie du linéaire. La qualité biologique est quant à elle moyenne à très mauvaise (SMEGNV / SMBVV, 2005).

Vidourle : les débits de ce cours d'eau sont impactés par les prélèvements pour l'AEP (2,2Mm^3/an) et l'irrigation (2,6Mm^3/an). Une partie de l'eau utilisée retourne au Vidourle via les stations d'épuration (2Mm^3/an) et écoulements superficiels ou souterrains des eaux d'irrigation (1,5Mm^3). Ces différents apports provoquent une augmentation des concentrations en matières phosphorées et azotées ainsi qu'en matières oxydables. Ces différents critères, couplés à une température de l'eau élevée (causée par un linéaire aval à faible pente induisant une faible vitesse d'écoulement), impliquent un déclassement de la qualité de l'eau du Vidourle, de bonne à moyenne, dans le secteur d'intérêt (GINGER, 2012b).

Canaux BRL : dans ces canaux transitent des débits de 10 à 12m^3/s au total, répartis sur les canaux Philippe Lamour et des Costières. Ces dispositifs ayant été réalisés pour conduire un débit maximal de 63 et 12 m^3/s respectivement, la marge entre les débits actuels et maximaux reste très large. Le potentiel d'exploitation de ces canaux est donc important, notamment dans le secteur de la plaine de la Vistrenque. Les débits circulant dans ces canaux restent relativement stables au cours de l'année. D'un point de vue qualitatif, l'eau transitant dans ces dispositifs est prélevée au Rhône, et n'est traitée que dans le cas d'usage AEP. D'après les analyses réalisées sur l'eau des canaux (BRL, 2017b), sa turbidité et ses caractéristiques bactériologiques correspondent à une bonne qualité. Sa minéralisation et son taux de matières organiques sont modérés. Les concentrations en nutriments (nitrates, ammoniaque) sont également faibles. Bien que présentant une certaine concentration en métaux et autre microéléments minéraux, aucune non-conformité n'a été détectée pour des eaux brutes à potabiliser. La même remarque peut être faite en terme de qualité radiologique et de pesticides.

3.3.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site

La recharge artificielle sur ce secteur pourrait répondre à plusieurs problématiques :

- palier le risque de déficit quantitatif : la nappe est actuellement en tension et présente une tendance générale à la baisse ;
- améliorer la qualité de l'eau de la nappe par dilution des substances polluantes via l'infiltration d'une eau de meilleure qualité ;
- contrer les intrusions salines existantes au niveau de la nappe de l'entité 150E, pouvant devenir saumâtre au sud de Vauvert si elle est trop exploitée.

3.4. SABLES ASTIENS DE VALRAS - AGDE (647AB)

Les sables astiens de Valras - Agde constituent l'un des 4 territoires test retenus dans le cadre du projet d'étude de la faisabilité de la recharge artificielle sur le bassin Rhône-Méditerranée et Corse (BRGM – Agence de l'eau RMC). Ces formations correspondent à la masse d'eau FRDG224 ainsi qu'à l'entité BD Lisa 647AB. L'aquifère est de type sédimentaire, monocouche, et est captif sur l'essentiel de sa superficie excepté 3 petits secteurs affleurants. Sa superficie totale est d'environ 480 km².

La description du site suivante s'appuie en grande partie sur les fiches Masse d'eau FRDG224 et Entité 226/647AB00 (rédigée par le BRGM et l'Agence de l'Eau RMC), des informations extraites du site du Syndicat Mixte d'Études et de Travaux de l'Astien (http://www.astien.com/), ainsi que diverses études réalisées par le BRGM, ou encore dans le cadre de la mise en place du SAGE de la Nappe de l'Astien, lancé en 2007 et porté par le SMETA.

3.4.1. Contexte géographique et géomorphologique

L'entité des sables astiens est localisée dans un quadrilatère compris entre Béziers, Mèze, Sète et l'embouchure de l'Aude (Illustration 68). Elle concerne 23 communes, et est presque en totalité dans le département de l'Hérault, avec une faible extension dans le département de l'Aude.

Il s'agit d'un secteur de plaine au-dessus de laquelle émergent quelques affleurements basaltiques, notamment dans le secteur d'Agde. Le territoire concerné par la nappe astienne se situe pour majeure partie à l'interface de trois unités paysagères, d'altitude décroissante :

- au nord, les collines viticoles du Biterrois et du Piscénois. Il s'agit d'une vaste entité entre les contreforts montagneux et la zone de plaine. Cette unité paysagère est interrompue à l'approche de Béziers par une densification de l'urbanisation et demeure préservée des principaux axes de circulation qui la contourne ;
- au centre, les plaines de l'Orb, du Libron et de l'Hérault occupent un espace de transition entre le littoral et les collines calcaires viticoles et les zones de garrigues. Le relief s'aplanit au niveau de cet axe de communication historique (voie Domitienne, autoroute A9) ;
- au sud, deux unités littorales composées par le littoral de Sète et du bassin de Thau (à l'est) et du Cap d'Agde à Valras-Plage (à l'ouest). La première unité est marquée par la présence du bassin de Thau, encadré par le Mont Saint-Clair à Sète et le Mont Saint- Loup à Agde, impactant fortement le paysage. La seconde unité s'élargit vers l'intérieur des terres grâce à l'étang de Vendres (GINGER, 2012a).

Illustration 68 : Délimitation de la nappe astienne et affleurements en jaune (d'après SMETA 2007).

3.4.2. Géologie

Le secteur d'intérêt a subi, à l'Éocène, l'orogénèse pyrénéo-alpine, puis une phase de distension à l'Oligocène. Au début du Néogène, l'axe pyrénéo-provençal s'effondre et la mer envahit progressivement la région. Après une régression de la mer à la fin du Miocène et un creusement des vallées, la mer envahit de nouveau les zones côtières au Pliocène et dépose en discordance les argiles gris-bleu plaisanciennes surmontées par les sables astiens. Par-dessus vont se déposer au Quaternaire différentes terrasses fluviatiles, glacis, colluvions et dépôts de pente.

Le substratum des sables astiens est donc constitué (des formations les plus profondes aux moins profondes) :

- des formations du Jurassique supérieur et moyen ;
- des dépôts lacustres, fluviatiles et lagunaires oligocènes ;
- des marnes et molasses helvétiennes (120-150m d'épaisseur) ;
- des argiles et marnes gris-bleu plaisanciennes (mur de l'aquifère).

La formation aquifère d'intérêt ici est celle des sables astiens. Ils affleurent très localement sur trois secteurs au Nord de l'entité: à Corneilhan à l'ouest, à Florensac au centre, et à Mèze à l'est (Illustration 69). La surface totale affleurante environne les 17 km². Ces sables calcaires plus ou moins grossiers sont consolidés, généralement jaunâtres, parfois très colorés, riches en foraminifères. Vers la base ils deviennent plus marneux et renferment des lits de marnes bleuâtres, sableuses et micacées (similaire au faciès plaisancien). Cette tranche sableuse paraît continue malgré les différences de faciès observées. Ils forment une couche relativement homogène de 20 m d'épaisseur en moyenne qui varie de 10 m (embouchure du Libron) à 40 m

(aplomb de la vallée de l'Orb et embouchure de la vallée de l'Hérault) et s'enfoncent progressivement vers le sud, jusqu'à une profondeur d'environ 120 à 140 m sous la bordure côtière (Illustration 70).

La formation aquifère est surmontée par (de la formation la plus profonde à la moins profonde) :

- un ensemble détritique continental formé d'argiles, de grès et de conglomérats (Pliocène moyen) ;
- une formation continentale détritique composée essentiellement de cailloutis à galets de quartz, de limons et de grès (Pliocène supérieur) ;
- les alluvions quaternaires (elles aussi aquifères) séparées des sables astiens sur le littoral, par une éponte atteignant environ 70 m d'épaisseur.

L'analyse des campagnes pétrolières montre un épaississement important des séries lithologiques, simultanément à leur enfoncement progressif. Toutefois, la définition de la géométrie de l'horizon des sables astiens en milieu marin reste très peu précise.

Deux singularités géométriques sont aussi à relever :

- un axe de surcreusement au droit de la basse vallée de l'Orb ;
- un rehaussement au droit de la basse vallée de l'Hérault.

Une faille de direction N 40° abaisse, au voisinage de l'étang de Thau, la structure dans sa partie sud.

Par ailleurs, l'Hérault a connu une période de volcanisme, depuis le milieu du Pliocène (- 3,5 millions d'années) jusqu'au début de l'ère quaternaire (- 650 000 ans). Sur l'emprise de la nappe astienne on retrouve principalement trois sites où des cônes volcaniques ont émis des laves sur des superficies variables (SMETA, 2007) :

- les trois cônes des Monts Ramus à Saint-Thibery ;
- la Roque-Haute et le Grand-Bosc à Vias et Portiragnes ;
- les différents cônes d'Agde dont le plus connu est le Mont-Saint-Loup.

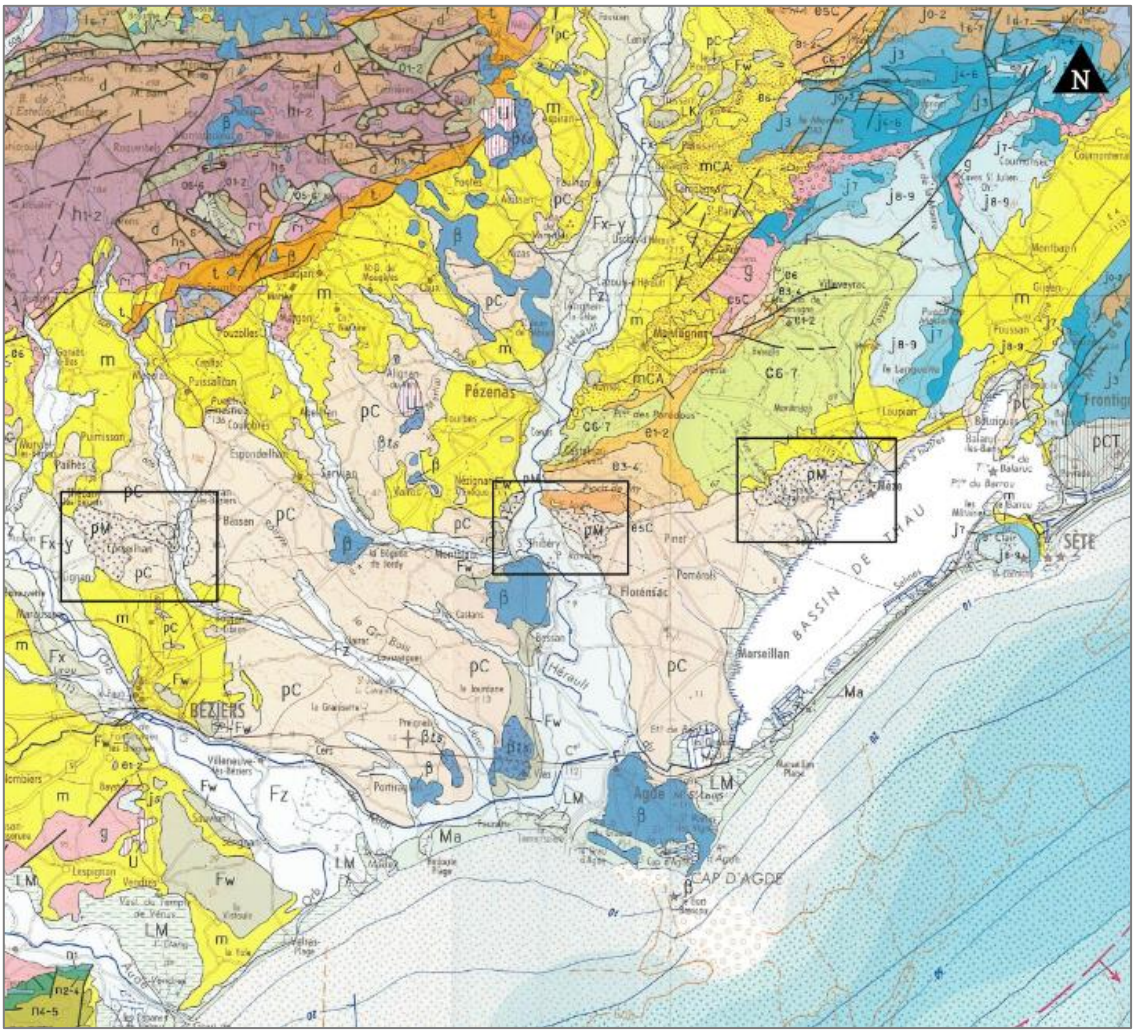


Illustration 69 : Carte géologique du secteur, et secteurs affleurants encadrés (GINGER, 2010c).

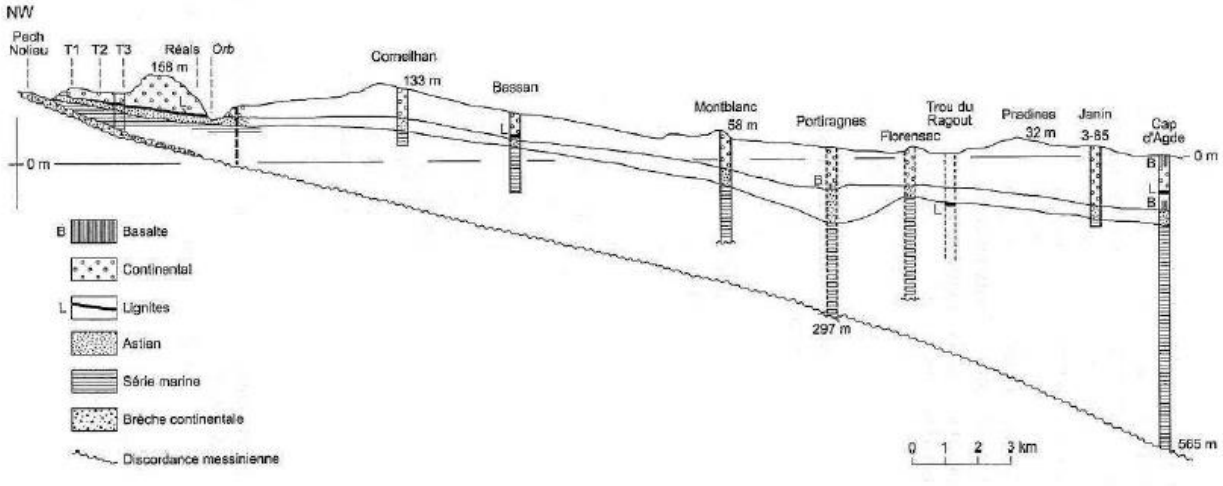


Illustration 70 : Coupe schématique illustrant l'épaississement des formations en allant vers la mer (GINGER, 2010c).

3.4.3. Hydrogéologie

a) *Recharge et exutoire*

Les sables astiens sont essentiellement rechargés par (Illustration 71) :

- les précipitations (pluviométrie annuelle de l'ordre de 600mm sur l'entité) s'infiltrant sur les zones d'affleurement au nord. Les apports sont estimés à 1,7 Mm^3 ;
- les échanges avec les formations du pourtour de l'entité, telle que la molasse sableuse du Miocène, mais la productivité s'avère faible ;
- des flux verticaux descendants provenant des nappes alluviales de l'Hérault (sur les communes de Lézignan, Saint-Thibéry et Florensac), de la Thongue et localement du Libron. Ces échanges sont impossibles en partie aval, la formation argileuse séparant les alluvions et les sables astiens étant trop épaisse (70 à 80m) ;
- dans une moindre mesure les formations du Pliocène continental, lorsqu'elles contiennent des lentilles sableuses ;
- des flux descendants issus du réservoir basaltique sus-jacent à la limite de la fracturation dans le secteur d'Agde.

La recharge par les étangs est faible car des niveaux semi-perméables et imperméables séparent les étangs de la nappe astienne.

La nappe alluviale de l'Hérault constitue une recharge privilégiée de la nappe astienne en partie amont (Lézignan, Saint-Thibéry et Florensac) : les alluvions reposent directement sur les sables astiens et les charges piézométriques sont confondues. En partie intermédiaire (aval de Bessan), des échanges par drainance se produisent avec alimentation de la nappe alluviale par l'Astien en régime naturel et inversion de gradient en période de crues et en période d'étiage. Les échanges nappe alluviale de l'Hérault / nappe astienne sont réguliers d'une année sur l'autre, conditionnés par les niveaux du fleuve (GINGER, 2012a). En partie aval (Agde), l'épaisseur de l'écran argileux exclut tout échange.

Les nappes alluviales de la Thongue et du Libron (moyenne vallée), ainsi que certains émissaires de l'étang de Thau (Pinet, Nègue Vaques, ...) constituent également des zones de recharge de la nappe de l'Astien (partie amont).

Aucun échange ne se produit entre la nappe alluviale de l'Orb et la nappe astienne (écran argileux de 40 m d'épaisseur au nord, croissante vers la zone côtière). Le même constat peut être fait pour la nappe alluviale de l'Aude.

Le volume d'eau total emmagasiné dans les sables astiens est difficile à estimer. En effet, il faut pour cela disposer d'une parfaite connaissance des terrains qui composent l'aquifère. Ce volume global est constitué pour partie d'eaux fossiles qui ne se renouvellent pas. Stratégiquement ce stock doit être préservé et l'exploitation ne doit concerner que le volume renouvelable. Celui-ci correspond au volume d'eau qui réalimente chaque année la nappe, et donc au volume exploitable. Il est estimé à environ 4,8 Mm^3/an (SMETA, 2007).

L'exutoire naturel de l'aquifère est la mer Méditerranée. Une cartographie des sables astiens au large du littoral réalisée en 2000 par le BRGM situe les points les plus bas identifiés aux alentours d'une profondeur de 250 m à une distance de 3 à 4 km par rapport au littoral. Toutefois, la définition de la géométrie de l'horizon des sables astiens en milieu marin reste peu précise et les limites de son prolongement sont méconnues (GINGER, 2012a). L'eau de la nappe alimente aussi en partie l'étang de Thau, et la nappe alluviale de l'Hérault hors période de hautes eaux.

Un bilan hydrologique de la nappe astienne avait été établi sur la base des données issues de la thèse réalisée par Anne LAURENT en 1993 (Illustration 72). Il constitue le seul bilan disponible à ce jour sur la nappe astienne mais semble présenter quelques inexactitudes ou approximations du fait de lacunes de connaissance sur les entrées et sorties au niveau de la nappe astienne (par exemple en ce qui concerne les échanges avec la nappe alluviale de l'Hérault, qui n'apparaissent pas dans les entrées) (GINGER, 2012a).

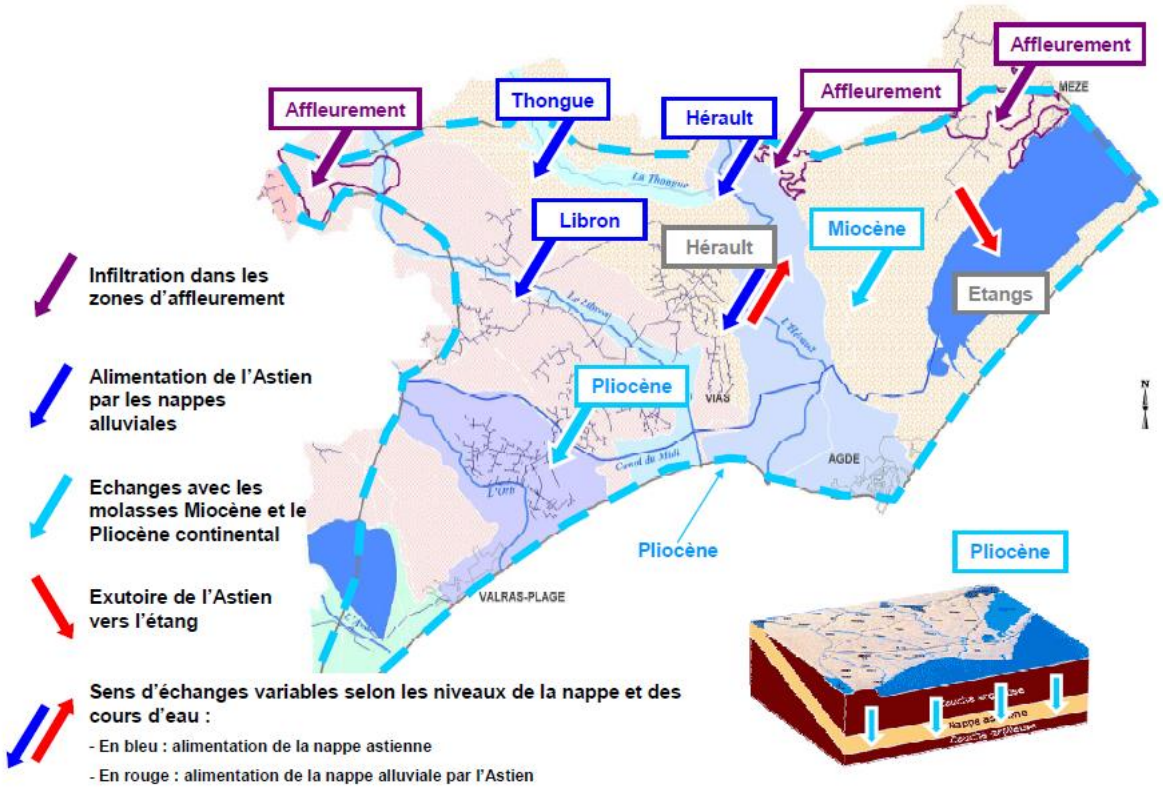


Illustration 71 : Représentation schématique des échanges entre la nappe astienne et les eaux superficielles et souterraines (GINGER, 2012a).

Entrées (en millions de m^3/an)		Sorties (en millions de m^3/an)	
Miocène / Eocène / Crétacé	0,7		
Pliocène continental	4	Nappe alluviale de l'Hérault	3,1
Libron (vallée moyenne)	1,75	Mer et Etang de Thau	1,4
Thongue	0,85	Prélèvements dans l'Astien	5
Affleurements	1,7		
Nappe alluviale de l'Hérault	?		
TOTAL	**9**	**TOTAL**	**9,5**

Illustration 72 : Bilan hydrologique de la nappe astienne (GINGER, 2012a).

b) *Écoulements et paramètres hydrodynamiques*

La nappe des sables astiens est essentiellement captive et artésienne surtout en période hivernale où les prélèvements sont moins importants. Son niveau est virtuel et dépend de la pression qu'exercent sur elle les terrains qui la surplombent. Excepté à proximité des affleurements, le niveau de la nappe dépend essentiellement des volumes prélevés. Les niveaux les plus hauts sont mesurés en mars, les plus bas en août (SMETA, 2007). L'artésianisme semble diminuer depuis 40 ans du fait de l'augmentation des prélèvements.

L'écoulement se fait de manière générale en direction de la mer Méditerrannée (du nord-ouest vers le sud-est) et est particulièrement influencé par les nombreux prélèvements réalisés au niveau des telles communes côtières que Valras-Plage, Agde, etc. (Illustration 73).

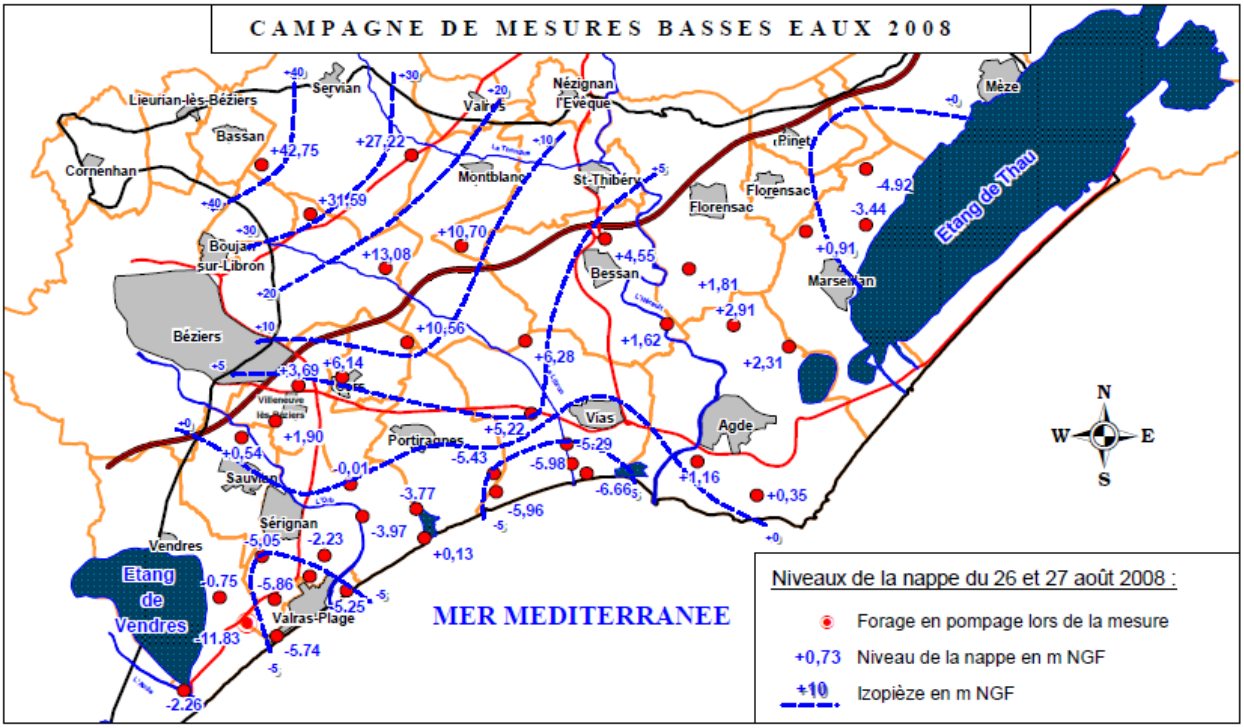


Illustration 73 : Carte piézométrique de la nappe astienne (GINGER, 2012a)

Sur le littoral, la perméabilité des sables est plus importante et certains forages montrent des débits potentiels de 80 m^3/h. De la même manière, la transmissivité varie entre 3.10^{-5} et 2.10^{-4} m^2/s dans les secteurs nord-ouest et nord-est de la nappe, et entre 10^{-3} et 6.10^{-3} m^2/s en bordure littorale. Le taux de renouvellement de l'eau de la nappe est cependant faible d'après les mesures de datation qui ont pu être effectuées.

c) *Synthèse des données hydrogéologiques*

L'Illustration 74 récapitule les informations géologiques, structurales, et les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des sables astiens.

	Sables astiens
Lithologie du substratum	Marnes et argiles bleues plaisanciennes
Structure du substratum	En discordance sur formations antérieures
Lithologie du toit	Formations détritiques Pliocènes (argiles, grès, conglomérats; cailloutis à galets, limons, grès), alluvions quaternaires
Lithologie de l'aquifère	Sables astiens: sables calcaires plus ou moins grossiers, consolidés. Base marneuse, renfermant des lits de marnes bleuâtres, sableuses et micacées
Structure de l'aquifère	Formation qui parait continue malgré les différences de faciès observées. Affleurante au Nord sur 3 secteurs, elle s'épaissit et s'enfonce vers le Sud jusqu'à une profondeur d'environ 120 à 140 m sous la bordure côtière. Axe de surcreusement en basse vallée de l'Orb, rehaussement en basse vallée de l'Hérault. Une faille de direction N 40° abaisse, au voisinage de l'étang de Thau, la structure dans sa partie Sud.
Gradient (%)	10^{-4} (en direction de la mer)
Epaisseur de l'aquifère (m)	Moyenne: 20. De 10 (embouchure du Libron) à 40 (aplomb de la vallée de l'Orb et embouchure de la vallée de l'Hérault)
Profondeur nappe (m)	0 à 15 (atteint 30m au Nord)
Epaisseur mouillée (m)	5 à 40
Fluctuation piézométrique (m)	1 (au nord), 8 (au sud)
Régime de fluctuation	Niveaux les plus hauts mesurés en mars, les plus bas en août
Perméabilité K (m/s)	10^{-5} (Nord) à 10^{-4} (Sud). Modèle 2015 sous TALISMAN (SMETA) donne 10^{-3} à 10^{-7}
Transmissivité T (m^2/s)	Varie entre 3.10^{-5} et 2.10^{-4} m^2/s dans les secteurs Nord-Ouest et Nord-Est de la nappe, et entre 10^{-3} et 6.10^{-3} m^2/s en bordure littorale
Coefficient d'emmagasinement moyen (sans unité)	1.10^{-4} à 6.10^{-4} (moyenne : 5.10^{-4})
Porosité (%)	5 à 30 (moyenne: 10)
Productivité Q (m^3/h)	10 à 60 (peut être à plus de 100 localement)
Vitesse d'écoulement (m/j)	0,5 à 1
Volume annuel reçu par l'aquifère (Mm^3)	Estimé à 9, dont 1,7 par précipitations sur affleurements. Volume renouvelable (exploitable): 4,8Mm^3/an

Illustration 74 : Tableau de synthèse hydrogéologique pour la nappe des sables astiens.

d) *Vulnérabilité de la ressource en eau souterraine*

La nappe des sables astiens est très vulnérable. Au sein de l'aquifère, la zone non saturée n'existe que sur la zone d'affleurement où elle est peu importante. Ensuite, la nappe devient captive sous une couverture de formations semi-perméables du Pliocène continental. Une pollution directe n'est de ce fait possible qu'au niveau des zones affleurantes. La vulnérabilité de la nappe ici n'est donc pas induite par son exposition, mais par le fait qu'elle soit fortement sollicitée. En effet, plus de 800 forages, réalisés en majorité avant les années 80, captent aujourd'hui l'aquifère des sables astiens. La nappe est d'avantage sollicitée en période estivale (tourisme), où le niveau de la nappe passe sous le niveau de la mer. Cette nappe présente un risque d'intrusion saline (qui n'a pas été observé). Par ailleurs, il existe un risque de dégradation de la qualité de l'eau souterraine car de nombreux forages défectueux peuvent mettre en relation la nappe des sables astiens de bonne qualité avec les nappes moins profondes et de qualité moindre. Des pollutions ou intrusions d'eau salines peuvent aussi être occasionnées par les coulées ou massifs basaltiques pouvant constituer des drains entre la nappe et d'autres aquifères de bordure (SMETA, 2007).

3.4.4. Eaux de surface

a) *Cours d'eau*

La nappe de l'Astien est localement en relation avec les nappes alluviales et donc indirectement avec les cours d'eau (Hérault principalement).

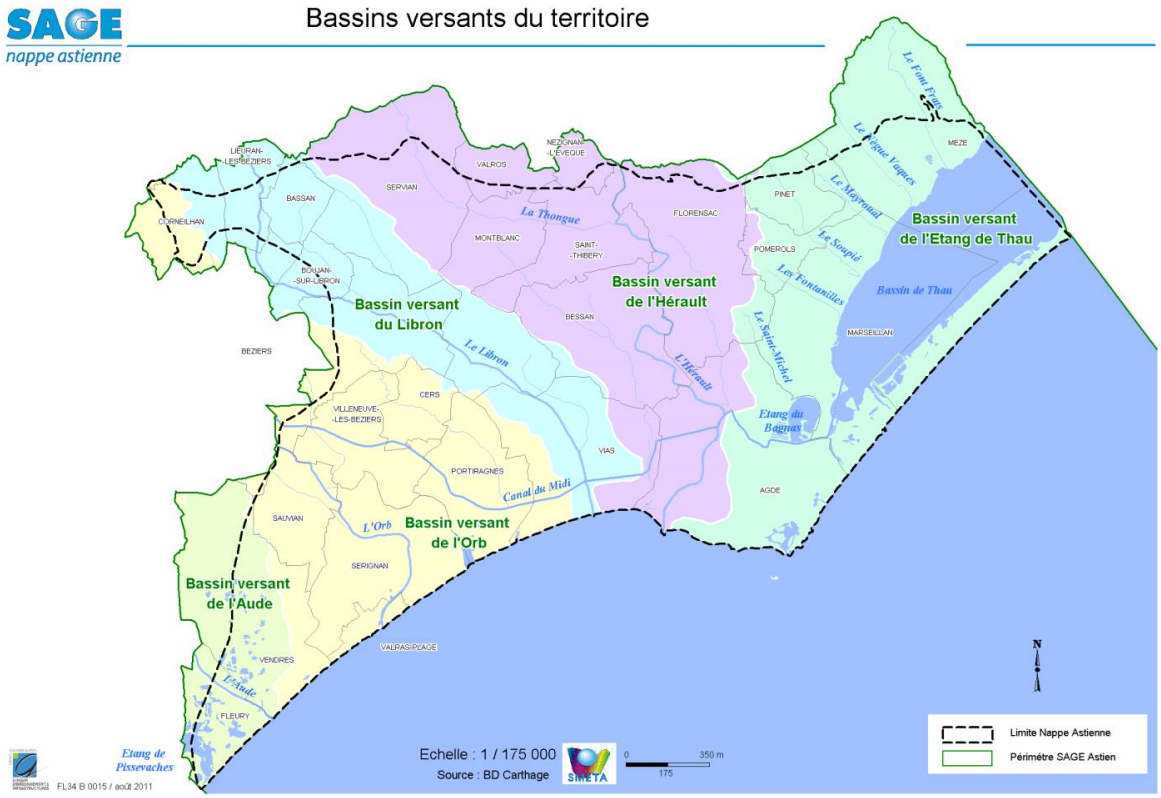


Illustration 75 : Carte localisant les cours d'eau et étangs ainsi que leurs bassins versants, dans le périmètre de la nappe astienne (d'après l'Atlas cartographique réalisé dans le cadre du SAGE de la nappe astienne par GINGER, 2011).

L'**Hérault** draine un bassin de 2 500 km², prend sa source dans les Cévennes, au pied du Mont Aigoual (1 567m) et se jette dans la Méditerranée à Agde, après un parcours de 150 km. Le linéaire de l'Hérault inclus dans le territoire de la nappe astienne est d'environ 23km. Il traverse la zone affleurante de Florensac, au nord de l'entité étudiée. Son principal affluent dans le périmètre de la zone d'étude est la **Thongue**, située sur la partie Ouest du bassin versant. Le régime de l'Hérault et de ses affluents est méditerranéen, caractérisé par des fortes crues en automne et des étiages sévères en été (CEREG Ingénierie, 2015).

Le **Libron** est un petit fleuve côtier, parcourant 40 km avant de rejoindre la Méditerranée au niveau de Vias-Plage. Son bassin versant d'une superficie de 190 km², est caractérisé par sa forme allongée et son étroitesse, entre les bassins versants de l'Orb et de l'Hérault. Le Libron a un débit moyen à faible. Il est cependant capable d'engendrer des crues violentes qui ont justifié la création d'un Syndicat Intercommunal de Gestion et d'Aménagement du Libron (SIGAL) dont le principal objet est l'aménagement et l'entretien des berges et la gestion des risques liés aux crues.

L'**Orb**, issu des contreforts du Larzac, draine un bassin versant de 1 500 km², depuis les monts de l'Espinouse jusqu'aux basses plaines de Béziers pour rejoindre la Méditerranée au niveau de Valras-Plage. Son linéaire total s'élève à 140 km et ses principaux affluents rejoignent tous le fleuve en amont du territoire de la nappe astienne. Le linéaire de l'Orb inclus dans ce territoire est de l'ordre de 12 km.

L**'Aude** ne recoupe le périmètre de la nappe que sur un faible linéaire (3 km) au niveau de la commune audoise de Fleury.

Il existe 3 stations de suivi permanent des débits de l'Aude, de l'Hérault et de l'Orb, à proximité ou sur l'entité d'intérêt. Les données concernant les modules et débits d'étiage de ces cours d'eau ont été extraites de la Banque Hydro (Illustration 78). L'Hérault présente un débit moyen nettement plus élevé que l'Aude et l'Orb dans ce secteur, mais son débit à l'étiage est inférieur à celui de l'Orb. Des études des volumes prélevables ont été réalisées sur différents tronçons des cours d'eau de l'Hérault, de l'Orb et de l'Aude. Les débits objectifs d'étiage estimés sur les tronçons traversant la zone d'étude ont été relevés (Illustration 78).

b) *Aménagements Voies Navigables de France (VNF) et Bas-Rhône-Languedoc (BRL)*

Le **canal du Midi (ouvrage VNF)** traverse d'ouest en est le territoire de la nappe astienne et rejoint l'étang de Thau au niveau de Marseillan. Cet ouvrage de 240 km, élément marquant du patrimoine régional, a été construit entre 1666 et 1681 pour joindre la Garonne à la Méditerranée (GINGER, 2012a) (Illustration 76). Sa capacité est de 90 Mm^3/an. Il n'y a aucun échange entre ce canal et la nappe.

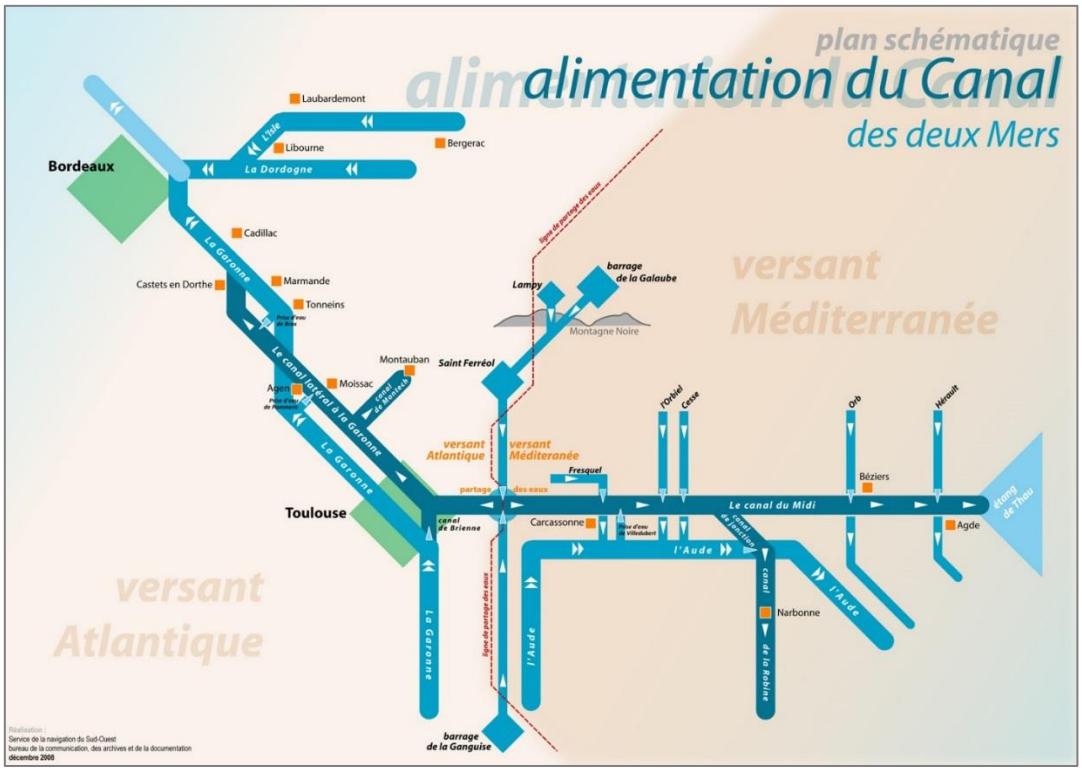


Illustration 76 : Plan schématique d'alimentation du Canal des deux Mers (dont le Canal du Midi, au Sud).

Le **réseau AquaDomitia** complète le Réseau Hydraulique Régional mis en place par **BRL** et sécurise l'alimentation d'une centaine de communes supplémentaires, grâce à un maillage des réseaux alimentés par le Rhône avec ceux alimentés par l'Orb, l'Hérault ou l'Aude (Illustration 77). Cet aménagement progressif est mis en œuvre maillon par maillon, au rythme des besoins des territoires. Le projet, débuté en 2012, devrait être achevé en 2021 voire 2022. Dans le cadre de la présente étude, le secteur d'intérêt est recoupé par le Maillon Biterrois. Celui-ci est constitué d'adducteurs pouvant permettre le transit d'un débit de 1,8m^3/s, dont 1,5m^3/s sera effectivement mobilisable. Il mobilisera l'eau de l'Orb par l'ouest (système du barrage des Monts d'Orb) et du Rhône par l'est (via le Système Rhône après sa jonction avec les maillons Nord Gardiole et Sud Montpellier). L'alimentation du réseau par les eaux de l'Orb ne dépassera pas l'intersection réseau AquaDomitia – rivière Hérault (au niveau de la commune de Saint-Thibéry). L'alimentation du réseau à l'est de cette limite sera exclusivement faite par les eaux du Rhône. À l'ouest, l'utilisation de l'une au de l'autre ressource dépendra de la disponibilité des eaux de l'Orb. La totalité des volumes fournis en période estivale (juin à septembre) est d'ores et déjà allouée à l'agriculture et notamment la viticulture (60 %), ainsi qu'à l'AEP (40 %), avec des pics d'utilisation prévus en juillet-août. En période hivernale, le réseau sera probablement sous-utilisé. En terme de qualité des eaux, celles de l'Orb, bien que présentant une forte turbidité en période de crues, semblent meilleures que celles du Rhône.

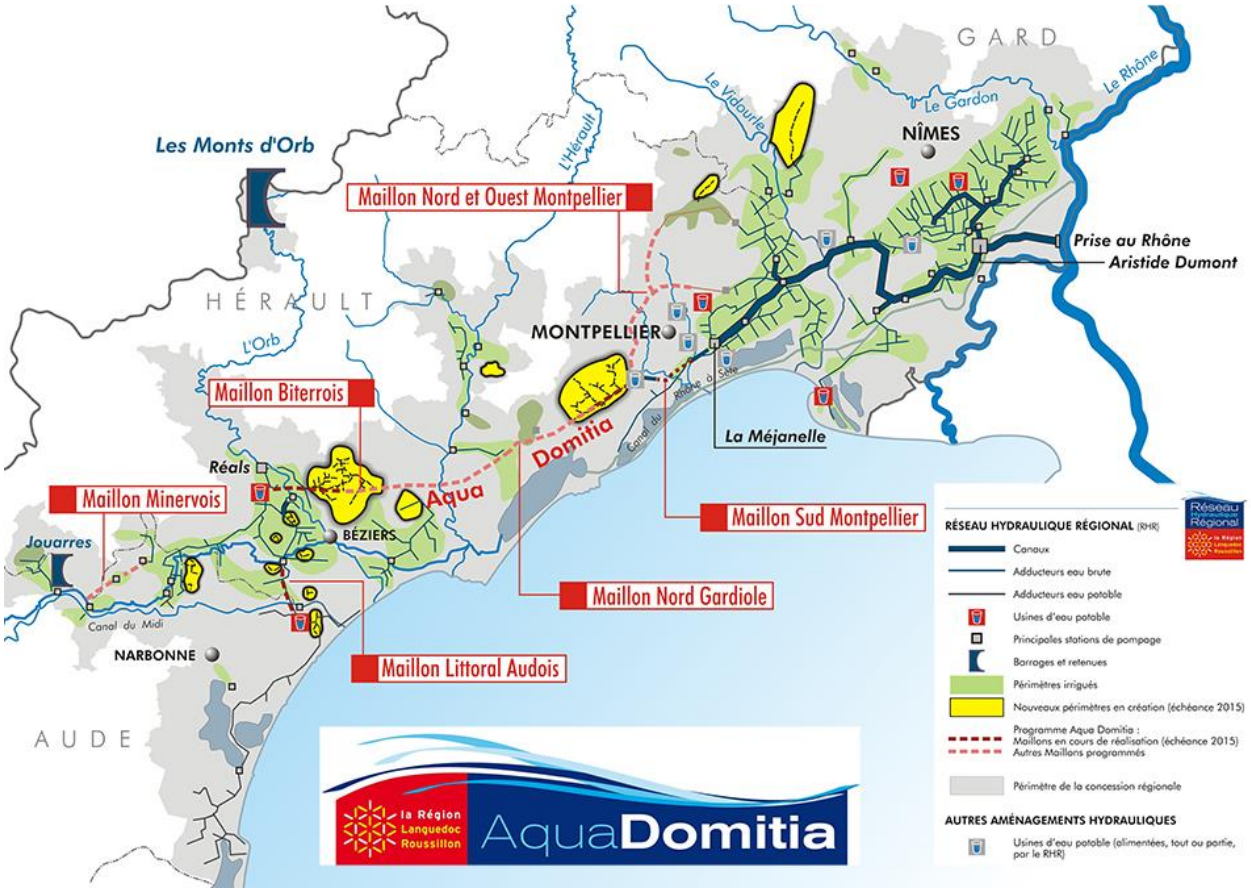


Illustration 77 : Aménagements hydrauliques BRL: représentation schématique (en pointillés rouges) du tracé du projet AquaDomitia (source : www.brl.fr).

Sables astiens d'Agde-Valras (Q en m³/s)							Etude des volumes prélevables		
Masse d'eau	Cours d'eau	Année	Module	QMNA5	Q réservé	Source	Station	DOE	Source
FRDR174	L'Aude à Coursan [Arminis]	1999-2017	28,3	1	*2,83*	Banque HYDRO	Aude aval	4	Eaucéa, 2014
FRDR161b	L'Hérault à Montagnac	1952-2018	41,7	2,6	*4,17*		Hérault - Amont Thongue	3,5	DREAL LR, 2015a
							Hérault - Exutoire mer	2,25	DREAL LR, 2015a
FRDR151b	L'Orb à Béziers [Tabarka]	1966-2017	23,4	3,5	*2,34*		Orb - Béziers amont prise VNF	2	DREAL LR, 2015b

Canaux	Capacité	Source
Canal du Midi (FRDR3109)	90Mm3/an *(soit 2,85m3/s env.)*	VNF
Réseau Aquadomitia	2,5m3/s	BRL

Illustration 78 : Récapitulatif des données Quantité des eaux de surface pour le site des sables astiens d'Agde-Valras (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles).

c) *Plans d'eau, Zones Humides et Zones protégées*

Sur le littoral, le territoire de l'Astien est parsemé d'étangs et de zones humides classés en Zones Naturelles d'Intérêt Faunistique et Floristique (ZNIEFF) (Illustration 79). À l'ouest une zone de première importance écologique, la Basse Plaine de l'Aude, avec les étangs de Pissevache dans l'Aude et de Vendres dans l'Hérault, est classée en zone Natura 2000. À l'est, l'étang du Bagnas et les lagunes de Thau et d'Ingril sont des réserves protégées. Sur Portiragnes, la réserve naturelle de Roque Haute et la Grande-Maïre, une zone de prés salés et de sansouires et l'étang du Clos à Vias sont intégrés au réseau Natura 2000. Ces différents milieux sont essentiels à la biodiversité et constituent des zones de nidification pour un grand nombre d'oiseaux migrateurs. Enfin en mer, au large d'Agde, un herbier à posidonies couvre une surface de 19 km² et est classé en Site d'intérêt Communautaire (SIC). L'ensemble de la surface classée en ZNIEFF représente environ 50 km² sur l'emprise de la nappe soit un peu plus de 10% de la surface totale de la nappe à terre. L'aquifère de l'Astien est déconnecté de ces milieux par des niveaux semi-perméables et imperméables (SMETA, 2007).

Concernant l'étang de Thau, du fait du contact direct entre les affleurements de la nappe et la lagune, des échanges permanents existent entre les deux masses d'eau. Tant que le niveau piézométrique de la nappe est au-dessus du niveau de la mer, la nappe alimente la lagune. Dès que la nappe descend sous le niveau de la mer, essentiellement l'été, l'eau de l'étang pourrait alimenter la nappe, via la zone de contact entre le Mourre-Blanc et le centre-ville de Mèze (au niveau de la zone d'affleurement) et éventuellement au travers des petits affluents qui alimentent l'étang et qui incisent la nappe (Ruisseaux des Fontanilles, du Soupié, de Mayroual, de Nègue-Vaques, de Font-Frats) (GINGER, 2012a).

À noter que les éventuels échanges entre la nappe et l'étang de Vendres demeurent méconnus.

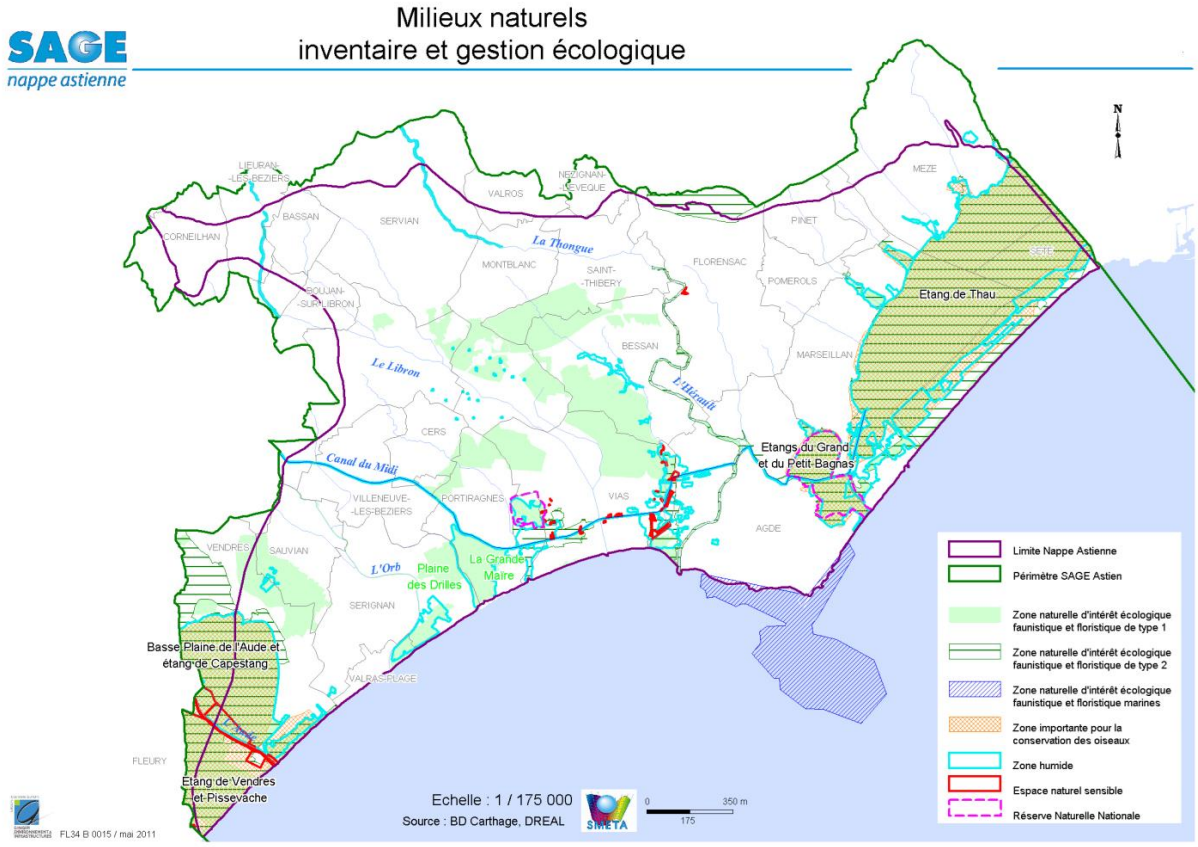


Illustration 79 : Carte localisant les milieux naturels Inventaires et Gestion écologique dans le périmètre de la nappe astienne (d'après l'Atlas cartographique réalisé dans le cadre du SAGE de la nappe astienne par GINGER, 2011).

3.4.5. Usages de la ressource en eau

a) *Occupation du sol*

Le milieu socio-économique du secteur dans lequel s'inscrit la nappe astienne est caractérisé par deux pôles urbains périphériques (Béziers et Sète), une ceinture littorale à vocation touristique, une zone médiane évoluant entre les deux pôles d'activités différenciés que sont l'agriculture séculaire et une urbanisation récente liée à la proximité de la ville de Béziers, une partie nord occupée par des communes rurales à tradition agricole. L'activité industrielle est globalement peu représentée. Les activités agricoles les plus présentes sont la viticulture (moitié de la surface du SAGE de la nappe astienne et 78 % des surfaces agricoles) et les cultures céréalières (Illustration 80). À noter que dans la zone littorale, malgré l'urbanisation, les espaces naturels sont bien présents sous la forme de zones humides (étangs littoraux et zones humides annexes), qui représentent un peu plus de 15 % de la surface totale du périmètre du SAGE. Dans l'arrière-pays, les espaces naturels restent relativement réduits et sont dominés par la garrigue qui représente 4 % de la surface totale (GINGER, 2012a).

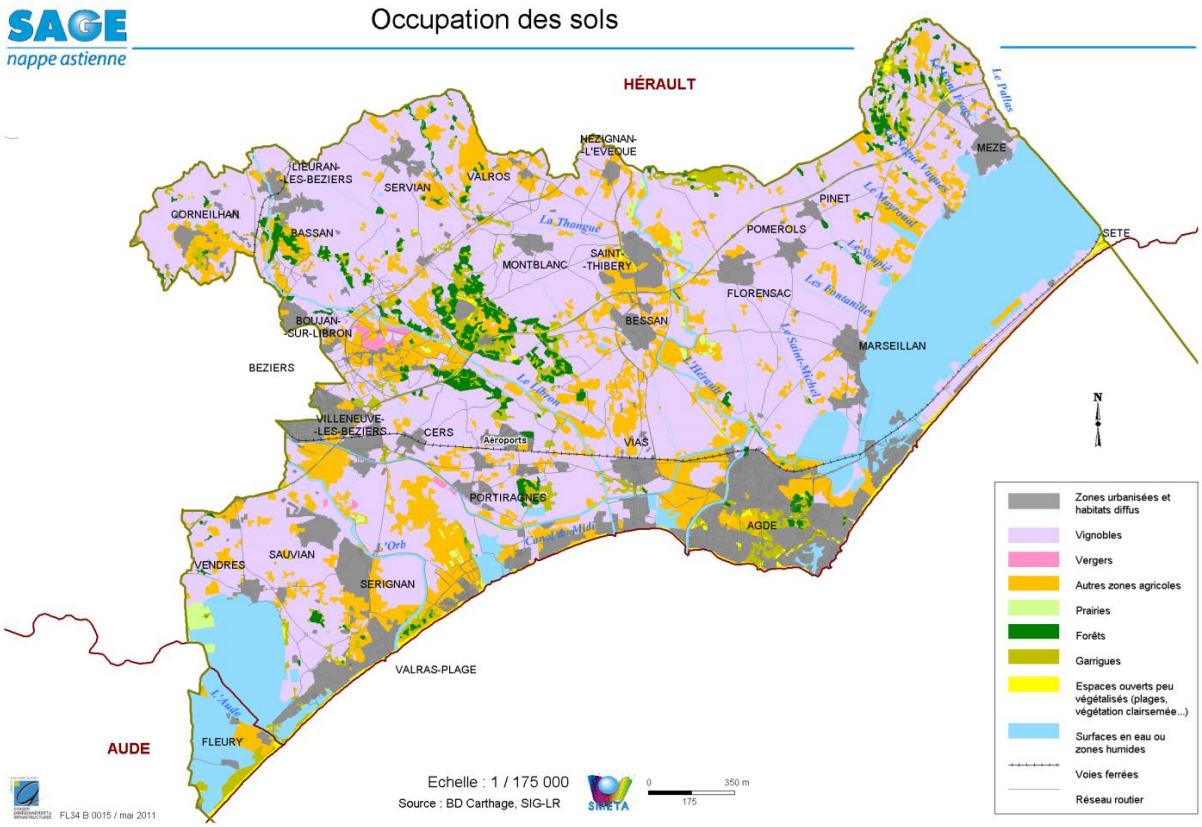


Illustration 80 : Carte de l'occupation des sols, dans le périmètre de la nappe astienne (d'après l'Atlas cartographique réalisé dans le cadre du SAGE de la nappe astienne par GINGER, 2011).

b) *Répartition des prélèvements par usages*

De manière générale, à dire d'experts, la répartition des prélèvements par usages est la suivante: 85 % AEP, 10 % AEA et 4 % AEI. Globalement, ce sont près de 5 millions de m^3 qui sont prélevés chaque année dans la nappe astienne (Illustration 81). Plus de la moitié de ces prélèvements sont effectués au cours de l'été pour satisfaire les besoins en eau générés notamment par l'activité touristique.

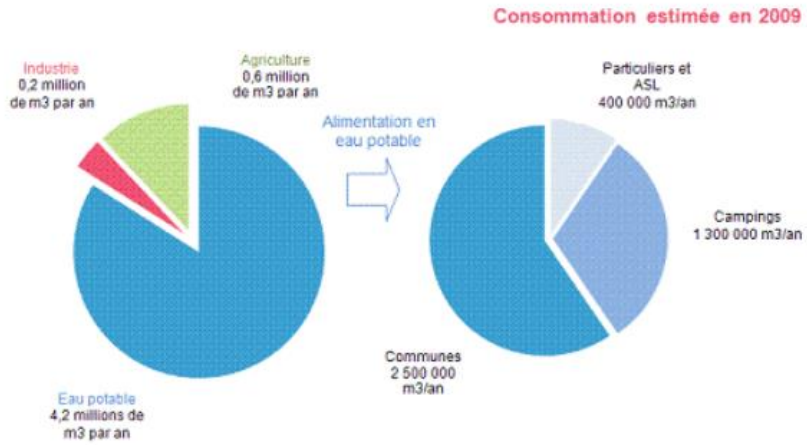


Illustration 81 : Bilan des prélèvements effectués sur la nappe astienne en 2009 (d'après les données du SMETA).

D'ici à 2030, cette consommation en eau est susceptible d'augmenter, au vu de l'évolution du contexte : une augmentation des températures moyennes, un accroissement de la démographie et de la fréquentation touristique, les vignes de plus en plus irriguées, le travail des foreurs qui reste peu encadré, un partage de la ressource entre usagers complexe à gérer, etc.. Ce scénario induit une évolution des pressions très sensible sur les ressources en eau, à travers une augmentation globale des besoins (Illustration 82). Les prélèvements (ainsi que les rejets) seront plus importants, à termes, et impacteront défavorablement les ressources du territoire, d'ores et déjà tendues (SMETA, 2014), expliquant la grande nécessité de mettre en place des restrictions d'usages (Volumes Maximums Prélevables), et de réfléchir à la faisabilité de projets de recharge artificielle de la nappe.

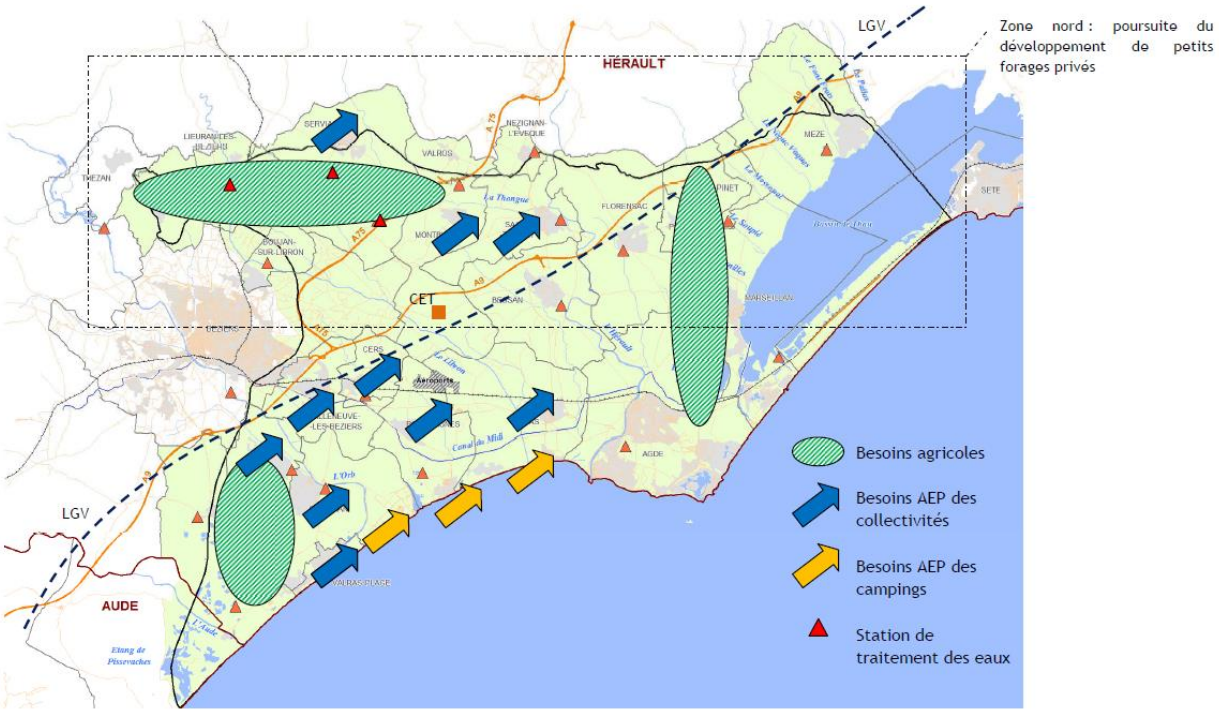


Illustration 82 : Carte de l'évolution des pressions sur la nappe astienne d'ici à 2030 (SMETA, 2014).

c) *Résultats des études des volumes prélevables*

De manière à permettre la restauration de l'équilibre piézométrique de la nappe, un volume maximum prélevable a été calculé pour chaque unité de gestion définie dans le cadre du SAGE de la Nappe Astienne (Illustration 83), afin de prendre en compte les besoins différant d'une Unité de Gestion à l'autre (Illustration 84). La finalité est de proposer un volume prélevable global et un mode de gestion locale compatibles avec les niveaux objectifs définis qui, au besoin, pourront être révisés après quelques années de mise en application s'ils nécessitent d'être ajustés (SMETA, 2014). Le volume prélevable total s'élève à **4 217 498 m^3/an**, contre 4,7 Mm^3 prélevés en 2009, année de référence de l'étude des volumes prélevables, reconnue toutefois pour avoir été sèche. Par rapport à des années plus arrosées telles que 2010 ou 2011, le volume prélevable est très proche du volume prélevé. De manière générale, le déficit annuel (volume prélevable – prélèvements réels annuels) varie de 5 à 10 % en fonction de l'unité de gestion concernée (SMETA, 2017), soit **un déficit de 0,21 à 0,42 Mm^3/an environ**.

UG	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Total
1	48068	48040	41086	50006	73446	97586	145430	200516	86585	52122	37837	26242	906 963
2	10296	8390	13041	20139	28609	39382	70192	100921	46305	16130	11191	9493	374 089
3	28341	35088	54518	77798	81192	87937	185864	262680	123120	53749	37828	49636	1 077 751
4	149	145	2915	4399	4906	8386	15898	17143	8469	3015	248	253	65 927
5	81700	72212	84749	81736	94409	96852	116907	132752	96715	76321	68627	65808	1 068 789
6	16423	14912	21308	24000	31453	59199	65976	70404	30993	25370	18871	20119	399 027
7	4408	9781	6585	6186	21353	23577	28769	21590	11359	6273	4199	2852	146 931
8	3676	3591	4307	5236	9029	20067	25690	32009	20150	6991	5172	4767	140 683
9	372	280	320	1133	1610	6586	9751	9274	5337	1591	582	505	37 339
Total	193433	192438	228828	270631	346007	439572	664476	847290	429032	241561	184554	179675	**4 217 498**

Illustration 83 : Volume prélevable (m³/an) par unité de gestion et par mois défini à partir des niveaux objectifs pour la gestion locale de la nappe (SMETA, 2014).

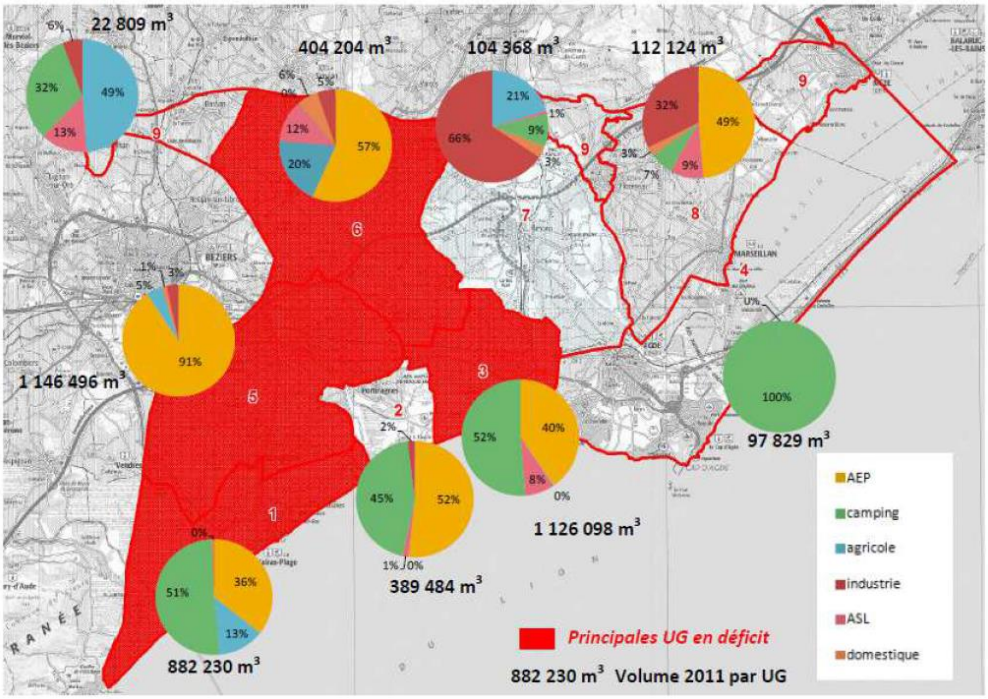


Illustration 84 : Unités de gestion (en rouge, affichant des déficits mensuels les plus significatifs) et pressions exercées par les différents usages (SMETA, 2014).

Une estimation des besoins futurs a été réalisée dans le cadre de cette même étude (Illustration 85). Force est de constater que la marge pour satisfaire les nouveaux besoins à partir de la nappe s'avère dès lors très faible, et sans commune mesure avec les volumes attendus face aux pressions à venir. En prenant en compte l'hypothèse haute des volumes prélevés attendus en 2030, la somme des différents usages donnerait un volume total de 9 652 000 m³/an, soit un écart d'environ **5,4 Mm³/an** par rapport au volume prélevable fixé dans le cadre du SAGE. En considérant l'hypothèse basse (7 452 000 m³/an), l'écart serait alors de **3,2 Mm³/an**.

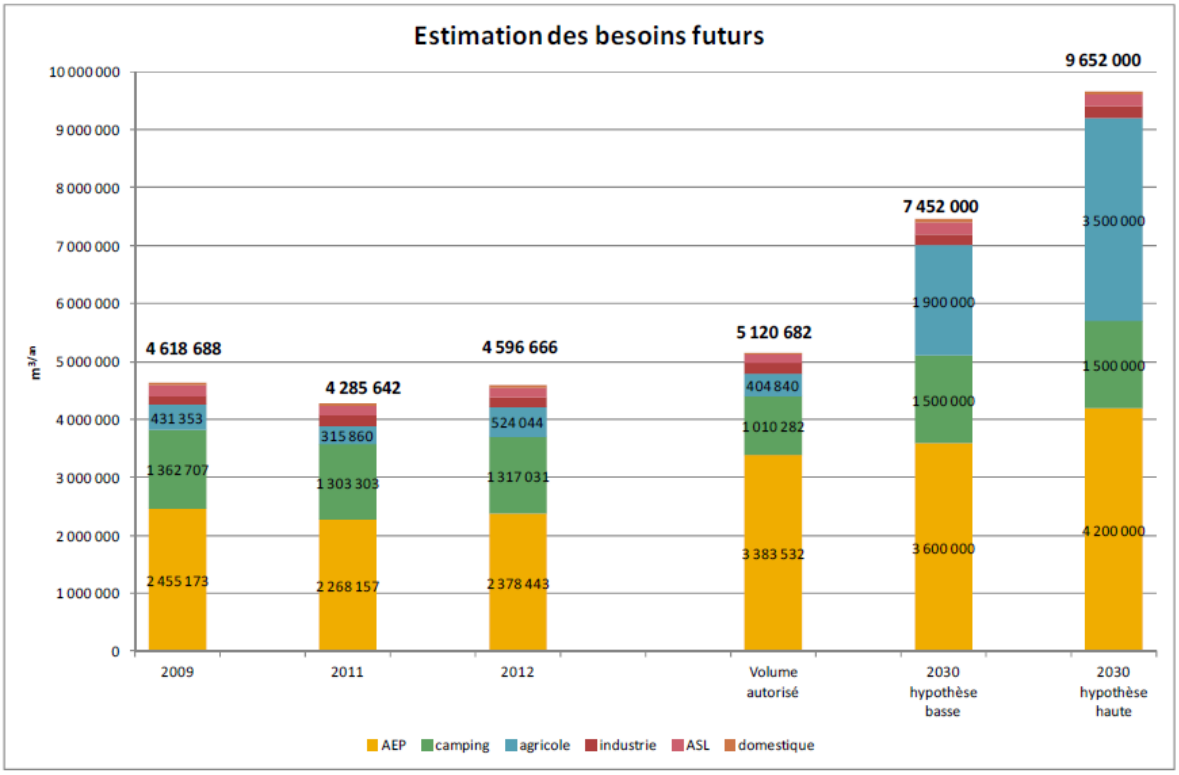


Illustration 85 : Prélèvements récents des usagers de la nappe astienne et évolution de leurs besoins en eau à l'échéance 2030 (SMETA, 2014.)

3.4.6. État des Eaux

a) *État quantitatif et qualitatif des eaux souterraines*

D'après la fiche Masse d'eau FRDG224 (données actualisées en 2013), **l'état quantitatif** de la nappe des sables astiens est médiocre. La nappe des sables astiens constitue une ressource en eau souterraine largement sollicitée en particulier pour l'alimentation en eau potable. La nappe est intensivement exploitée par les collectivités et les particuliers. Elle est en déséquilibre chronique en particulier l'été (saison touristique) sur la zone littorale. Le niveau piézométrique en bordure littorale s'est effondré dans les années 80 (- 20 m sous le 0 NGF à Valras, fort déséquilibre entraînant un risque d'invasion d'eau marine). Pour les secteurs de Valras et Agde, le déséquilibre a été diminué et stabilisé par les actions de délestage (gestion par le SMETA depuis 15 ans). Toutefois, ces dernières années l'augmentation croissante des prélèvements entraîne une diminution générale de la piézométrie l'été sur toute la nappe et des déséquilibres importants sur les secteurs du littoral non délesté (Vias). L'exploitation de la nappe n'est pas remise en cause, toutefois la gestion équilibrée et globale de cette ressource par le SMETA doit être maintenue et renforcée, et ce au regard de l'ensemble des ressources disponibles sur la zone (nappes alluviales de l'Orb et de l'Hérault, autres ressources).

D'après la fiche Masse d'eau FRDG303, **la qualité** des eaux souterraines de la nappe des sables astiens, évaluée sur une période de 2006 à 2011, est bonne. Les quelques pollutions relevées se situent essentiellement au niveau des secteurs affleurants. Sur les 37 points avec des données nitrates étudiés, tous sont en bon état, avec quelques indices de contamination très localisés. 25 points avec des données pesticides (principalement triazines) et 3 points avec existence d'une recherche plus complète (dont DEDIA) existent et sont quasiment tous en bon état, avec des contaminations localisées (paramètre déclassant : atrazine déséthyl, DEDIA, terbuthylazine

déséthyl). Certaines teneurs en chlorures, sodium, fluor sont parfois importantes dues à la présence du bord de mer (intrusion salée) ou provenant de l'horizon superficiel saumâtre (drainance verticale). La qualité de l'eau de la nappe astienne est très supérieure à celle des nappes superficielles.

b) *État quantitatif et qualitatif des eaux superficielles*

L'**Orb** est une ressource très sollicitée, ses crues sont fréquentes et il fait l'objet de nombreuses actions tant au niveau de la gestion quantitative que qualitative, menées par le Syndicat Mixte de la Vallée de l'Orb. Dans le but de délester une partie des prélèvements de l'Astien, 1Mm^3/an sont prélevés de la nappe alluviale de l'Orb pour les communes de Sérigan, Sauvian et Valras, soit un peu moins d'un quart du volume annuel prélevé sur la nappe (SMETA, 2007).

Le **Libron** a un débit moyen à faible. Du fait de la multitude de petits affluents qui drainent un territoire fortement viticole, le Libron a tendance à concentrer les éléments polluants. Comme il traverse les affleurements, la nappe peut se trouver en contact avec la nappe alluviale de ce fleuve ce qui peut engendrer ponctuellement des transferts de polluants (SMETA, 2007).

L'**Hérault** a un régime qui se caractérise par des fluctuations conséquentes, débits importants en hiver, étiage marqué l'été et des crues fréquentes. La **Thongue**, son affluent principal sur l'Astien, multiplie les problématiques qualitatives et quantitatives. La nappe astienne a des liens directs avec la nappe d'accompagnement de l'Hérault au niveau de la commune de Bessan, au sud de la zone d'affleurement de Florensac. Cette zone de la nappe est de ce fait l'une des plus sensibles à la pollution de surface (SMETA, 2007).

La gestion de **l'étang de Thau** (portée par le Syndicat Mixte du Bassin de Thau) est centrée sur une importante problématique qualitative liée à des transferts de polluants d'origine agricole et non agricole par de petits affluents qui parcourent une surface importante au nord de l'étang. Certains traversent les sables astiens qui affleurent au nord de Mèze, ce qui constitue une autre zone sensible importante de la nappe face aux pollutions de surface (SMETA, 2007).

L'eau amenée à circuler dans le **réseau AquaDomitia** au droit du maillon Biterrois proviendra d'une part du Rhône, d'autre part de l'Orb. Ce dernier sera plus ou moins sollicité en fonction de l'état quantitatif de la ressource. Comme précisé dans le cas des canaux Philippe Lamour et des Costières (§ 3.3.6), l'eau du Rhône circulant au sein du réseau présente une qualité satisfaisante (pour des eaux brutes à potabiliser ou utilisées pour l'irrigation), aussi bien en terme de caractéristiques bactériologiques, turbidité, minéralisation, taux de matières organiques, que de concentrations en nutriments, métaux, pesticides et éléments radiologiques (BRL, 2017b). L'eau de l'Orb présente une qualité similaire voire sensiblement meilleure que celle du Rhône sur l'ensemble de ces paramètres, mais les phénomènes de crues peuvent temporairement (quelques heures à quelques jours) faire augmenter la teneur en charges solides de l'eau brute (BRL, 2017a).

3.4.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site

La recharge artificielle sur ce secteur pourrait répondre à plusieurs problématiques :

- pallier le déficit de précipitations (donc de recharge naturelle) de la nappe et les déficits dans la nappe en elle-même dus à l'importance des prélèvements, notamment sur le secteur littoral ;
- retrouver un artésianisme acceptable dans le secteur Sud de la nappe, phénomène de plus en plus rare dû à la forte exploitation de la nappe dans cette zone ;
- parer à une éventuelle intrusion saline.

Sur cette zone d'étude, les enjeux sont majoritairement au sud, près du littoral : nombre de prélèvements et volumes exploités importants (surtout en été). Cependant, la nappe y est captive (impossibilité de mettre en place des dispositifs de recharge indirecte) et, bien que s'étant amoindri au cours des dernières décennies, le phénomène d'artésianisme ne permet pas de réaliser une recharge directe par forage. Au vu de ces multiples contraintes, les secteurs les plus adaptés pour la mise en place et le bon fonctionnement de dispositifs de recharge artificielle sont les zones d'affleurement de la formation aquifère, au Nord.

3.5. ALLUVIONS DE LA FIGARELLA (720CA21)

Les alluvions de la Figarella constituent l'un des 4 territoires test retenus dans le cadre du projet d'étude de la faisabilité de la recharge artificielle sur le bassin Rhône-Méditerranée et Corse (BRGM – Agence de l'eau RMC). Ces formations correspondent à la masse d'eau FREG402 ainsi qu'à l'entité BD Lisa 720CA21. L'aquifère est de type alluvial, monocouche, et est libre sur toute sa surface. Sa superficie totale est d'environ 8 km². Cette entité est de très petite taille par rapport au 4 autres entités étudiées. De plus, les alluvions du Fiume Seccu, cours d'eau à l'est de la Figarella et dont la nappe alluviale est intégrée dans l'entité 720CA21, ne seront pas prises en compte, les deux nappes alluviales (Figarella et Fiume Seccu) n'étant pas en relation.

La description du site suivante s'appuie en grande partie sur les fiches Masse d'eau FREG402 et Entité 720CA21 (rédigée par le BRGM et l'Agence de l'Eau RMC), ainsi que diverses études réalisées par le BRGM, par l'Office d'Équipement Hydraulique de Corse (OEHC), ou encore dans le cadre de la mise en place du SDAGE Corse. Peu d'informations détaillant le fonctionnement de cet aquifère sont disponibles.

3.5.1. Contexte géographique et géomorphologique

La nappe alluviale côtière du Fiume Seccu et de la Figarella est située dans le département de Haute-Corse, au nord-ouest de l'île, sur les communes de Calvi, Calenzana et Moncale (Illustration 86). La Figarella prend sa source entre la punta Ghialla (2085 m) et la punta Mezzagnu (2085 m). Ce cours d'eau est globalement orienté sud-est nord-ouest et se jette dans la mer Méditerranée au niveau du Golfe de Calvi. Le territoire de l'entité est principalement occupé par des zones de pâturage. Il est également occupé au sud par le camp militaire de Raffali et une partie de l'aéroport de Calvi.

3.5.2. Géologie

La Figarella, à l'origine des dépôts alluvionnaires, s'écoule dans un premier temps sur la série rhyolitique à faciès ignimbritique et les granites à riébeckite altérés de Bonifato, issu de l'association alcaline volcano-plutonique du Complexe du Monte Cinto. Le cours d'eau circule ensuite au contact des alluvions. Les alluvions de la basse vallée de la Figarella s'organisent en cinq terrasses emboîtées (Fw, Fx, Fy1, Fy2 et Fy3) (Illustration 87). La nappe alluviale de la Figarella est localisée dans les alluvions récentes (Fy2 et Fy3) constituées d'éléments rocheux peu ou pas altérés pris dans une matrice sableuse à sablo-argileuse. Le substratum de l'entité est constitué de diverses formations de socle granitique de l'association magnésio-potassique intrusive. Un seuil granitique naturel (seuil de San Antonio) existe à l'amont de l'aéroport de Calvi, sous la forme d'un verrou provoquant un étranglement de l'aquifère alluvial.

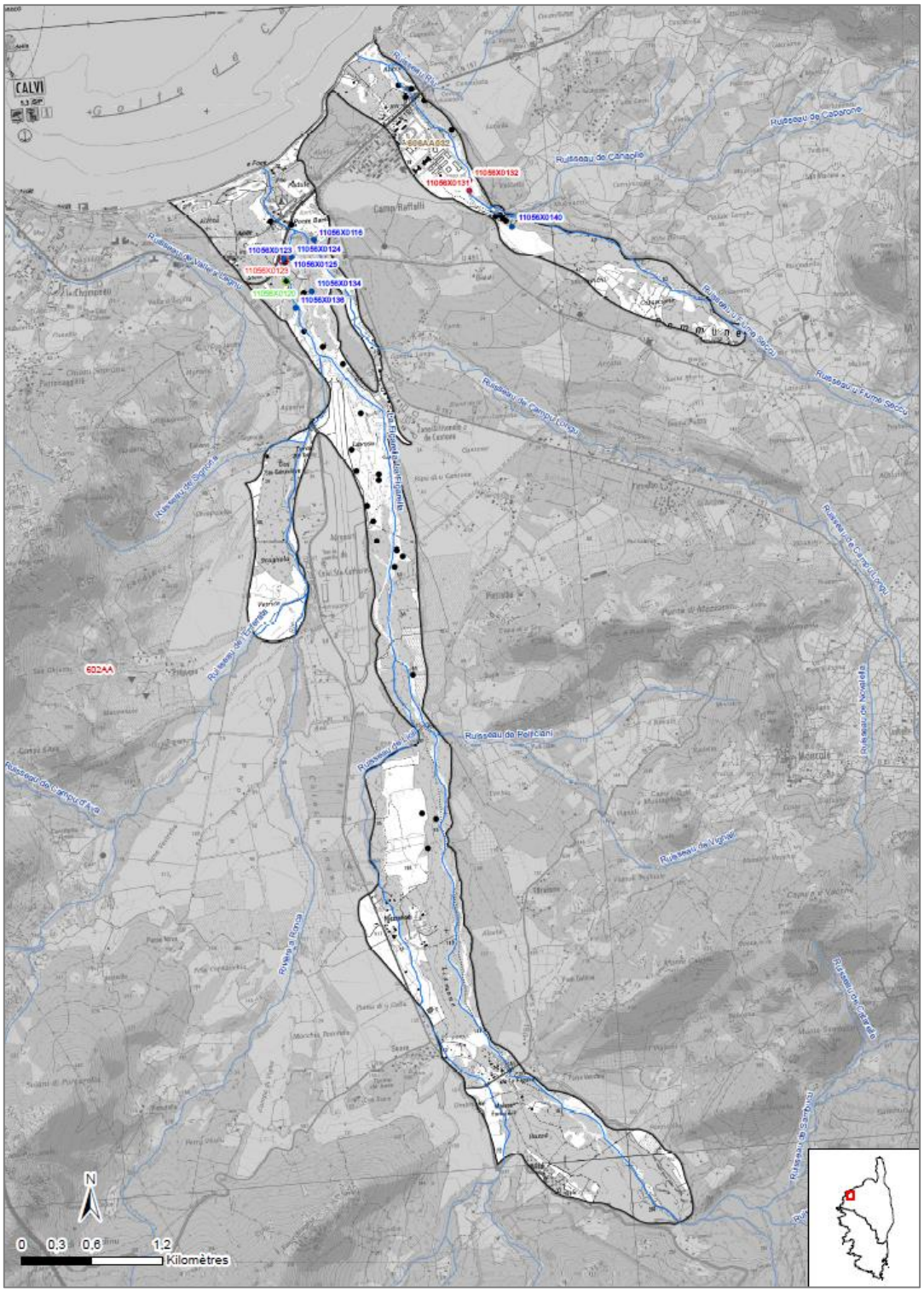


Illustration 86 : Carte de localisation de l'entité 720CA21 (point noirs: forages).

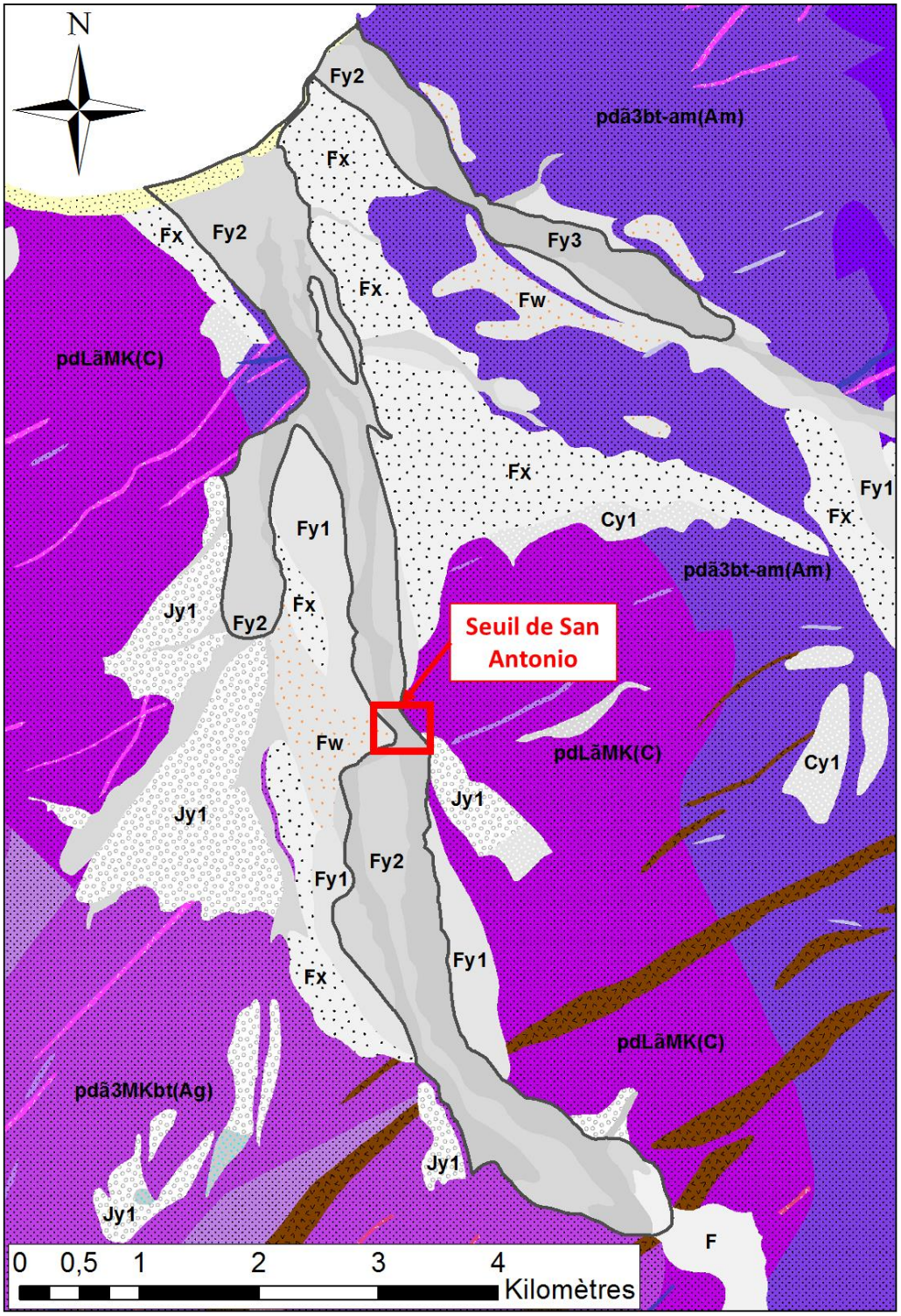


Illustration 87 : Contexte géologique de la nappe alluviale de la Figarella.

3.5.3. Hydrogéologie

a) *Caractéristiques de la nappe*

La nappe alluviale de la Figarella est localisée dans les terrasses alluvionnaires récentes (Fy2 et Fy3). Les principales caractéristiques de l'aquifère alluvial de la Figarella sont décrites dans l'Illustration 88. Ses réserves sont estimées à 11 voire 15 Mm^3 (Nguyen-Thé *et al*., 2003).

	Alluvions de la Figarella
Lithologie du substratum	Diverses formations de socle granitique de l'association magnésio-potassique intrusive
Lithologie de l'aquifère	Alluvions en terrasses emboîtées, constituées d'éléments rocheux peu ou pas altérés pris dans une matrice sableuse à sablo-argileuse
Structure de l'aquifère	Nappe alluviale dans les 2 terrasses les plus récentes (Fy2 et Fy3)
Épaisseur de l'aquifère (m)	15 à 20
Profondeur nappe (m)	3 (hautes eaux) à 8 (période estivale)
Fluctuation piézométrique (m)	5
Régime de fluctuation	Cycle annuel
Perméabilité K (m/s)	1.10^{-2} à 3.10^{-4} (surtout 10^{-3})
Transmissivité T (m^2/s)	$2,7.10^{-2}$ à $7,4.10^{-2}$
Coefficient d'emmagasinement (sans unité)	0,1 à 0,15
Porosité (%)	10
Vitesse d'écoulement (m/j)	5 à 170
Réserves (Mm^3)	11 à 15
Recharge de l'aquifère	Précipitations (2,5 Mm^3/an), cours d'eau de la plaine, apports latéraux

Illustration 88 : Tableau de synthèse hydrogéologique des alluvions de la Figarella.

La nappe libre qui s'écoule dans ces alluvions est principalement alimentée par les cours d'eau de la plaine dont une partie des eaux s'infiltre au contact des alluvions perméables, par les précipitations s'infiltrant directement (2,5 Mm^3/an) et par les apports latéraux. Dans la partie amont de la nappe, c'est essentiellement la rivière Figarella qui l'alimente (Frissant *et al*., 2015b). La mer Méditerranée constitue la limite aval de potentiel imposé de la nappe. La piézométrie enregistrée indique un cycle annuel, comme pour l'ensemble des nappes alluviales côtières de Corse. Les écoulements au sein de la nappe sont particulièrement influencés par les pompages à l'approche du champ captant, surtout en basses eaux (Illustration 89). En période d'étiage, la nappe de la Figarella serait plus ou moins compartimentée par les remontées de substratum et par les terrasses anciennes emboîtées avec les terrasses récentes.

Au droit du lit de la Figarella, le temps de réponse de l'aquifère à un écoulement est de quelques heures. Lors d'un épisode pluvieux généralisé, l'aquifère répond également très rapidement, mais il n'est pas précisé si cette réponse est liée aux précipitations sur la surface de l'aquifère, ou aux écoulements en rivière induits par ces précipitations. Le temps de réponse est court au droit du lit de la Figarella, il n'est pas certain qu'il en soit de même sur toute la surface de l'aquifère (d'après H. POLITI, OEHC).

De manière générale, la relation entre la nappe alluviale et la rivière de la Figarella présente trois configurations différentes :

- période de hautes eaux et de crues de la Figarella : la rivière joue le rôle d'alimentation vis-à-vis de la nappe et est une limite de réalimentation pour les forages du champ captant ;
- période de moyenne eaux : la Figarella draine la nappe alluviale, en particulier en partie aval de son cours d'eau. La limite de réalimentation est toujours présente à cette période ;
- période d'étiage : le lit de la Figarella est asséché sur toute la partie aval de son cours. Le débit d'étiage de la Figarella s'infiltre progressivement dans les alluvions en partie amont du système aquifère. Le champ captant aval n'est alors plus soutenu par la limite de réalimentation formée par la rivière. C'est à cette période que le problème de la remontée d'un rentrant salé se pose au droit du champ captant (OEHC, 2015) (§3.5.3.Vulnérabilité).

De fait, le niveau de la nappe est relativement stable de décembre à mai. Il décroit fortement en juin-juillet et reste bas jusqu'à septembre voire octobre dans certains cas extrêmes. Le niveau remonte en octobre et novembre pour retrouver (en fonction de l'abondance des apports en eau) un niveau similaire à celui de la période décembre-mai précédente. D'après P. Terce (1987), la vitesse d'écoulement au sein de l'aquifère serait de l'ordre de 5 à 170m/j en fonction du secteur considéré.

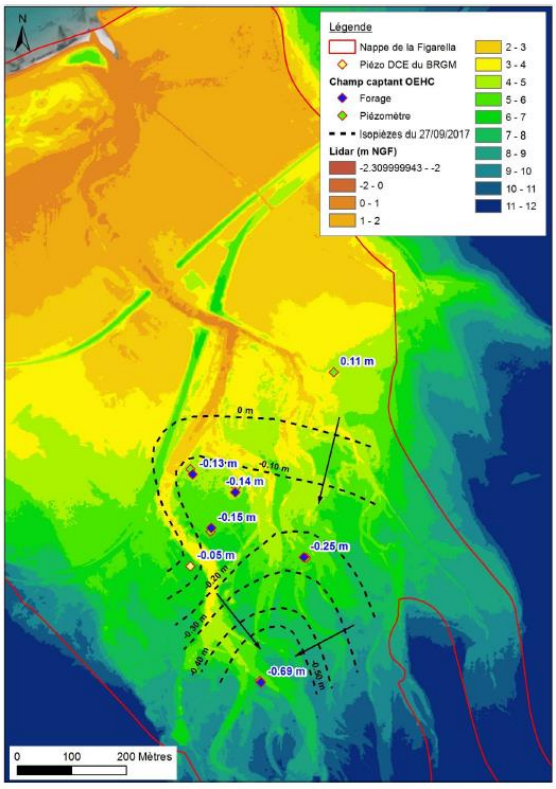


Illustration 89 : Carte piézométrique du secteur aval (champ captant) de la nappe de la Figarella au 27/09/2017(données BRGM Corse).

b) *Vulnérabilité de la ressource en eau souterraine*

Cette nappe est vulnérable du fait de sa faible étendue (réserve limitée), de la faible épaisseur de sa zone non-saturée et de l'absence ou de la faible épaisseur de la couverture superficielle. Elle est particulièrement sensible à la sécheresse, puisque fortement dépendante des apports des cours d'eau et de la pluviométrie. Par ailleurs, elle présente une sensibilité forte aux rentrants salés. Ce type d'intrusion saline se produit quand l'altitude et le débit d'eau dans la rivière au niveau de l'embouchure sont insuffisants pour s'opposer à la pénétration d'eau de mer (Illustration 90). Il diffère du biseau salé de par le fait que ce dernier se propage depuis la mer directement dans l'aquifère (phénomène contrôlé par le niveau piézométrique de la nappe, et non par l'écoulement de la rivière).

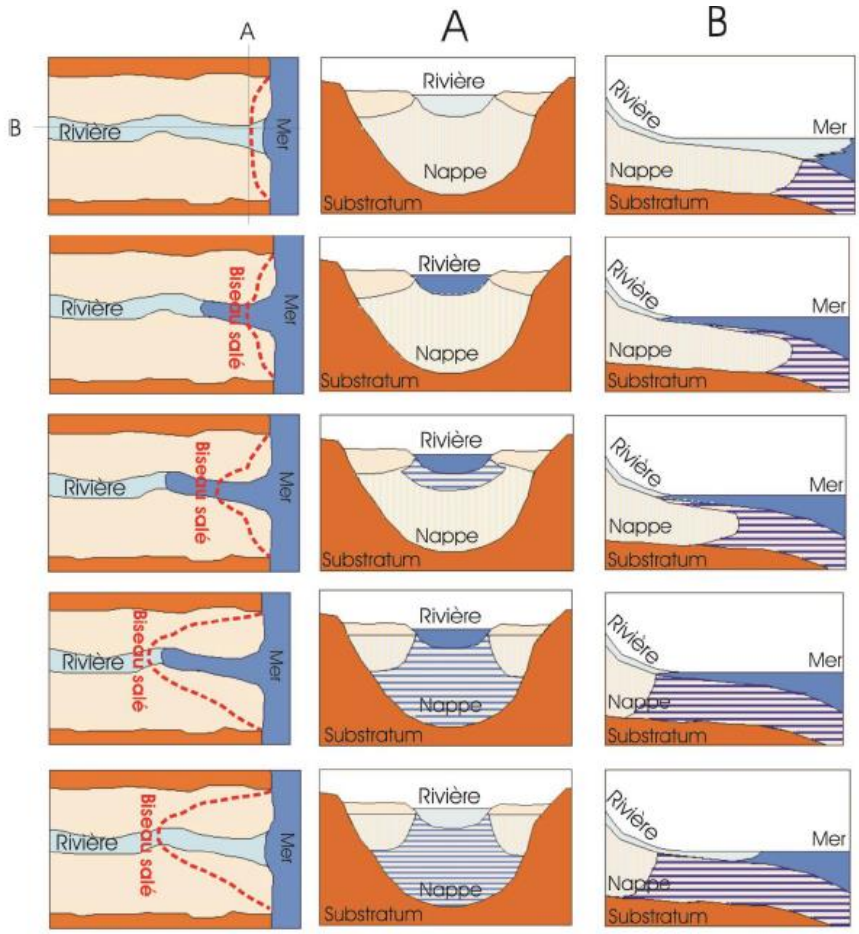


Illustration 90 : Schématisation d'un épisode de rentrant salé.

En effet, en période d'étiage, trois facteurs se conjuguent :

- la baisse naturelle de la nappe alluviale par drainage vers la mer ;
- l'augmentation des prélèvements sur le champ captant, ce qui induit des rabattements plus importants et une aspiration de la limite eau douce / eau salée vers la surface ;
- l'assèchement du lit de la Figarella impliquant d'une part l'absence d'une réalimentation mais aussi l'avancée des eaux salées dans l'embouchure du cours d'eau (OEHC, 2015).

À noter qu'un retour à des concentrations normales en chlorures est observé après l'arrêt des pompages. Depuis 2007, la conductivité est suivie au droit du champ captant pour permettre de définir les modalités d'exploitation et suivre les possibles intrusions salines.

En 2014, la survenue d'un rentrant salé en amont de la nappe a provoqué le déclanchement d'une situation de crise. Plusieurs seuils anti-sel ont alors été installés pour pallier le problème de rentrant salé (Frissant et al., 2015b). Ces seuils permettent un stock d'eau en surface, qui, en s'infiltrant dans la nappe, repousse l'eau salée. À noter que ces ouvrages réalisés en matériau alluvionnaire sont temporaires, disparaissant en période de hautes eaux. Il a également été demandé d'adapter en permanence la répartition des prélèvements à la situation, en assurant un suivi piézométrique de la nappe, ainsi que de la conductivité de l'eau souterraine et de l'eau de surface.

3.5.4. Eaux de surface

a) *La Figarella*

Il s'agit du cours d'eau principal de la zone d'étude. Il prend sa source sur les pentes nord de la Muvrella, et a pour exutoire la mer Méditerranée, sur la commune de Calvi. La Figarella a 13 affluents référencés. Aucune information sur les débits des cours d'eau du secteur de la Balagne n'est disponible sur la Banque Hydro. Des données de débits de la Figarella sont renseignées sur la période 1960 – 1976 (station Y7715010), mais ont été considérées comme douteuses ou invalides par le gestionnaire, et ne peuvent donc pas être utilisées dans le cadre de cette étude. Lors de la réalisation de la prise basse de la Figarella (prise OEHC située en amont de l'aquifère), le module au droit de l'ouvrage avait été défini à 841 l/s, et le QMNA5 à 49,3l/s (OEHC, 2015). Dans ce même rapport, l'OEHC indique un module de 1508l/s au droit du champ captant de Calvi (Illustration 92).

La Figarella est un cours d'eau particulier, où la géologie du terrain encaissant joue un rôle primordial en particulier en période estivale d'étiage. En effet, le cours d'eau est de type torrentiel et charrie en période de crue des volumes importants de sédiments, ces derniers se déposent tout au long du cours d'eau dans des zones où la pente et la largeur du lit mineur le permettent. La conséquence directe est qu'en partie aval, aux environs du pont de la Figarella (route D51), le matériau alluvionnaire est suffisamment important en terme d'épaisseur et de volume pour que les débits du cours d'eau, notamment en période d'étiage, s'infiltrent dans leur totalité. Dans cette partie du cours d'eau, le ruissellement n'est apparent qu'en période de hautes eaux. D'après la BD Carthage, 58 % du linéaire du cours d'eau principal est intermittent ou fictif (à sec en période estivale), contre 42 % permanent essentiellement situé en tête de bassin (OEHC, 2015).

b) *Le lac de Codole*

La retenue de Codole est située dans le secteur de la Balagne à une altitude de 108 m (Illustration 91). Le plan d'eau est formé par un barrage construit sur le Régino en 1985, dont la structure atteint 25 m. L'ouvrage est géré par l'OEHC pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation de cette région très sèche.

Le plan d'eau formé est de taille réduite : environ 80 ha pour un volume théorique de 7 Mm^3 en cote normale d'exploitation. La profondeur maximale mesurée en 2009 était de 23 m en plus hautes eaux. Le plan d'eau reçoit les eaux du Régino qui prend sa source au San Parteo à 1680 m d'altitude, ainsi que celles de la Figarella par le biais d'une prise d'eau hors période estivale. La cote du plan d'eau varie de façon saisonnière entre 95 et 113 m NGF en fonction des besoins en eau. La retenue est en remplissage à l'automne et au printemps (période de hautes eaux) pour atteindre sa cote maximale début juin environ. Les eaux de la retenue sont utilisées en été

pour les besoins en eau potable et en irrigation. Sur cette période estivale, les apports sont réduits et la cote du plan d'eau baisse de façon importante (marnage >10 m), et ce jusqu'en octobre à l'arrivée des crues automnales. Aucune activité n'est pratiquée sur le plan d'eau (Aquascop, 2016). Une procédure d'auto-surveillance de la qualité de l'eau du barrage est mise en œuvre.

Illustration 91 : Carte de localisation des réseaux d'eau brute et des réseaux AEP en Balagne (OEHC). En rouge, secteur de la Figarella.

Alluvions de la Figarella (Q en m³/s)						
Masse d'eau	**Cours d'eau**	**Année**	**Module**	**QMNA5**	**Q réservé**	**Source**
FRER51	La Figarella à Calenzana	1960 - 1976		0,017		Banque HYDRO
FRER51	La Figarella, prise basse OEHC	Création prise basse	0,841	0,0493	*0,0841*	OEHC, 2015
FRER51	La Figarella, champ captant Calvi	inconnu	1,508		*0,1508*	OEHC, 2015

Ouvrages OEHC	**Capacité**	**Source**
Barrage de Codole	7 Mm3 (cote normale d'exploitation)	H. Politi (OEHC)
Canalisations Eau Brute	500 m3/h (débit de transit hors période estivale), *soit 0,14m3/s env.* / 10 000 m3/j en période estivale, *soit 0,12m3/s env.*	H. Politi (OEHC)

Illustration 92 : Récapitulatif des données Quantité des eaux de surface pour le site des alluvions de la Figarella (en gris et italique : valeurs calculées à partir des données disponibles).

c) *Plans d'eau, Zones Humides et Zones protégées*

Au sein même de l'entité 720CA21, aucun plan d'eau ni zone humide n'a été recensé. Il existe en revanche plusieurs zones protégées (Illustration 93) : l'embouchure de la Figarella (ainsi que celle du Fiume Secco, secteur non pris en compte dans le cadre de l'étude) est classée en ZNIEFF1. Cette zone, à fort intérêt faunistique et floristique, est fortement sujette à la pression anthropique. En particulier, du fait de la fréquentation touristique de cette frange littorale, mais également par une fréquentation de la population locale comme sites de loisirs et de promenade. Calvi, Lumio ainsi que la plage et la pinède de Calvi sont recensés parmi les sites inscrits de France.

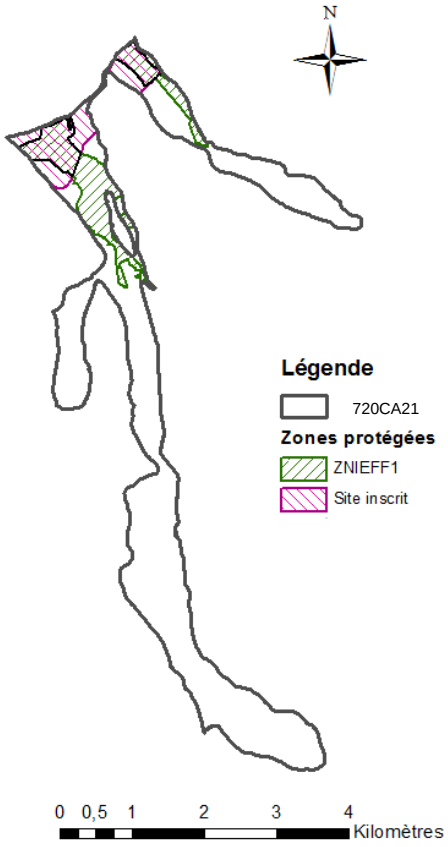


Illustration 93 : Carte des zones protégées recensées au niveau de l'entité 720CA21.

3.5.5. Usages de la ressource en eau

a) *Occupation du sol*

Le secteur que couvre la nappe des alluvions de la Figarella est essentiellement constitué de maquis, forêts de conifères ou arbustives et terrains agricoles (vignes, prairies, maïs). La pression agricole y est existante mais assez faible. On compte aussi quelques troupeaux d'ovins et bovins. Les zones urbanisées se situent majoritairement au Nord du secteur (Calvi) (Illustration 94).

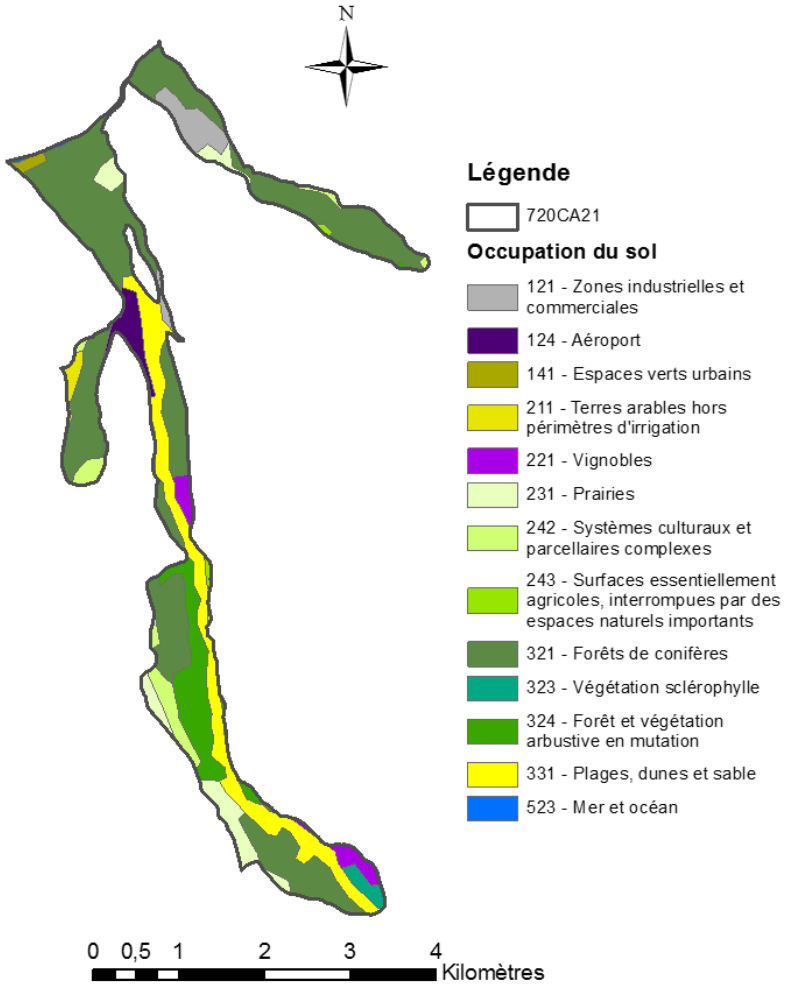


Illustration 94: Carte de l'occupation du sol au niveau de l'entité 720CA21 (source : CORINE Land Cover 2012).

b) *Répartitions des prélèvements*

L'eau souterraine est captée pour l'alimentation en eau potable de la région de Calvi par le champ captant de l'OEHC pendant toute l'année (Frissant, 2015a). Les débits exploités varient de 1 200m^3/j en hiver à 6200m^3/j en été (Farand *et al.*, 1991). Le débit maximum autorisé à être prélevé au droit du champ captant de Calvi a été fixé à 6 000m^3/j après demande de modification du précédent arrêté préfectoral, afin de répondre aux besoin estivaux (OEHC, 2015). Pour l'AEP, la rivière de la Figarella qui alimente la nappe alluviale fait également l'objet de prélèvements de surface par l'OEHC (prise haute, dite de Bonifatu, constituée d'une prise sur le ruisseau de Melaghia et d'une prise sur le ruisseau de Lamitu). Les prélèvements estivaux en rivière sont limités afin de laisser l'ensemble du débit au milieu en été. À cette période, la ressource du barrage de Codole est alors sollicitée (de juin à octobre) via une station de traitement située à l'entrée de Calvi.

Il est important de relever que les prélèvements d'eau dans la nappe alluviale de la Figarella depuis le champ captant de Calvi se font toute l'année, et sont plus élevés en période estivale, en dépit de l'importation d'eau depuis la retenue de Codole de juin à septembre. Dans des situations de crise, il arrive que les prélèvements en nappe soient réduits au cours de l'été.

En dehors de la zone de Calvi, la répartition des ressources pour l'AEP se fait de la façon suivante :

- d'octobre à fin mai, la prise haute de la Figarella dessert la quasi intégralité du réseau à l'exception d'une zone littorale comprise entre l'Ile Rousse et Palasca qui est alimentée à partir de l'aquifère du Regino. Quelques communes disposent de leurs ressources propres et ne sollicitent pas l'OEHC pendant cette période : on y trouve essentiellement les communes de Calenzana (prise d'eau et sources) et Lumio (aquifère du Fiume Seccu) ;
- en période estivale, la prise haute de la Figarella connait un étiage pouvant aller jusqu'au tarissement ; le barrage de Codole est donc sollicité, avec une station de traitement située en son pied et qui permet (après pompages) de desservir la quasi intégralité de la Balagne à l'exception de la même zone littorale décrite ci-dessus. La commune de Lumio est alors alimentée, et au-delà de ses ressources propres résiduelles, par le barrage directement mais également par les ressources issues de Calvi (mélange aquifère de la Figarella et station de traitement de Calvi).

L'eau prélevée depuis les différentes ressources citées ci-dessus transite via le réseau de canalisations AEP Codole-Figarella (en jaune sur l'Illustration 91), exceptée l'eau brute du barrage de Codole transitant jusqu'à la station de traitement de Calvi.

L'eau transitant via le circuit de canalisations représenté en vert sur l'Illustration 91 provient, d'octobre à fin mai, de la prise basse de la Figarella pour l'irrigation, et est en partie acheminée jusqu'au barrage de Codole pour assurer un remplissage complémentaire évalué à un volume annuel maximal de l'ordre de 1 hm^3 non atteint à ce jour (ce remplissage supplémentaire via la prise sur la Figarella n'a été réalisé qu'en 2018, car depuis 2010, année de construction de la prise, l'hydraulicité de la Figarella ne permettait pas ce transfert d'eau). En période estivale et alors que cette ressource de la Figarella ne peut plus être utilisée (juin à septembre compris), le barrage de Codole prend le relais avec un pompage approprié. Ce réseau de canalisation permet alors le transfert d'eau brute pour l'irrigation agricole essentiellement, et le transfert d'eau (en période estivale uniquement) vers la station de traitement d'eau potable de Calvi. Le débit de transit disponible dans ces canalisations en dehors de la période estivale est de l'ordre de 500 m^3/h, soit 12 000 m^3/j. En période estivale, il est de 10 000 m^3/j. L'intégralité du réseau d'eau brute est utilisé pendant toute l'année.

Les prises d'eau haute et basse sur la Figarella permettent, en période d'exploitation, de laisser un débit équivalent à 11,7 % du module de la rivière (supérieur au débit réservé, égal à 10 % du module). L'eau issue de la retenue de Codole est prélevée à la meilleure des profondeurs possibles à l'aide d'une prise d'eau mobile immergée.

Remarque : dans le but de moins solliciter les ressources de la retenue de Codole et d'éviter l'acheminement d'eau depuis la rivière de la Figarella jusqu'à Codole hors période estivale pour la stocker, un projet de retenue collinaire sur la Haute Figarella a été lancé par l'OEHC, et validé (Retenue du Sambuccu). Elle permettra alors un stockage *in-situ* de l'eau du ruisseau de Sambuccu, affluent de la Figarella (2Mm^2 environ). Cette retenue sera greffée sur les réseaux existants (pas de nouvelles canalisations).

	Du 1er octobre au 31 mai	Du 1er juin au 30 septembre
Aquifère des alluvions de la Figarella	Utilisé toute l'année pour **l'alimentation en eau potable** de Calvi (**réseau AEP**)	
Prise haute sur la Figarella	Utilisée pour l'**AEP** sur la quasi-totalité du réseau (**réseau AEP**)	Non utilisée
Prise basse sur la Figarella	Utilisée pour l'**irrigation** (**réseau Eau Brute**) Utilisée pour être stockée dans le **barrage de Codole** pour réserves estivales (**réseau Eau Brute**)	Non utilisée
Eau du barrage de Codole	Non utilisée (constitution du stock)	Utilisée pour l'**AEP** à Calvi (passage par **réseau Eau Brute** et **station de traitement de Calvi**) Utilisée pour l'**AEP** sur la quasi-totalité du réseau (passage par **station de traitement de Codole** puis **réseau AEP**) Utilisée pour l'**irrigation** (**réseau Eau Brute**)

Illustration 95 : Répartition des sources et usages de l'eau utilisée dans la vallée de la Figarella (informations transmises par l'OEHC).

Une étude de l'évolution des pressions quantitatives sur les eaux souterraines de Corse a été réalisée en 2010 par le BRGM, afin de dresser l'état actuel et l'évolution possible à l'horizon 2025, en se basant sur les volumes prélevés en 2007 (Graveline *et al*., 2010). En ce qui concerne l'eau prélevée dans les alluvions de la Figarella et du Fiume Secco (non séparées dans l'analyse), le volume prélevé de référence est de 1,022 Mm^3 en 2007. Le premier scénario d'évolution prévoit une augmentation des volumes de 10 % (soit 1,128Mm^3 prélevés en 2025), le second scénario (considérant les volumes prélevés maximums) prévoit une augmentation de 25 % (1,279Mm^3 prélevés en 2025), soit un écart de volume maximal de **260 000 m^3** (1,279Mm^3 – 1,022Mm^3).

3.5.6. État des eaux

a) *État quantitatif et qualitatif des eaux souterraines*

L'état quantitatif de la nappe des alluvions de la Figarella est globalement bon. Les prélèvements sont en revanche limités par les risques d'intrants salés. La nappe est également très sollicitée en période estivale (tourisme), mais se recharge bien en période de hautes eaux. Cet aquifère est intégré dans le secteur de Nebbio-Balagne, indiqué comme en vigilance en terme d'accroissement des prélèvements en eau souterraine (potentiel déficit de ressource disponible) (Graveline *et al*., 2010). L'état qualitatif de la nappe est défini de manière générale comme bon. Est relevée en revanche la présence de chlorures en relation avec les intrants salés, et parfois de nitrates.

b) *État quantitatif et qualitatif des eaux de surface*

Sur le plan quantitatif, la Figarella peut subir, en été, un assec quasi-total, d'où une utilisation de la réserve d'eau de Codole de juin à septembre. La forte réduction des débits de la Figarella au cours de cette période peut induire un phénomène d'intrant salé, impactant alors la qualité des eaux de la nappe alluviale du cours d'eau. Les données techniques de référence du SDAGE 2016-2021 définissent l'état chimique de la Figarella et ses principaux affluents (Ruisseaux de Lioli, Pinzutella, Campianellu) comme étant Bon. En terme d'état écologique (incluant des critères faunistiques, physico-chimiques, morphologiques), la Figarella est en très bon état, ses affluents sont en Bon état (excepté le ruisseau de Campianellu : état Moyen).

En ce qui concerne le lac de Codole, l'état chimique de ce plan d'eau artificiel est bon, mais l'état écologique est Moyen. En effet, la présence en quantité conséquente de cyanobactéries (notamment lors du bloom algal en été) est précisée dans les différents rapports d'étude du plan d'eau (études réalisées tous les 3 ans dans le cadre du programme de surveillance des plans d'eau du bassin RMC). Elles semblent en revanche moins importantes lors de l'étude de 2015. La présence de tels groupes algaux témoigne d'un milieu enrichi en nutriments (azote, phosphore) (STE, 2013). Aucun lien de cause à effet n'a été mis en évidence entre la quantité d'eau disponible et la quantité de cyanobactéries. En effet, il a été remarqué qu'au cours de certaines années où les apports en eau ont été faibles, le développement algal restait faible. En revanche, un lien quantité d'eau et qualité physico-chimique est plus évident. L'eau de la retenue est également riche en matières organiques et présente des concentrations en fer et manganèse assez élevées (Aquascop, 2016). Par ailleurs, d'après les informations transmises par M. GENEVIER (hydrogéologue BRGM délégation Corse) en 2017, les conduits permettant le transport d'eau de Codole à Calvi subiraient un détachement des biofilms tapissant les canalisations.

3.5.7. Intérêt de la recharge artificielle sur ce site

La recharge artificielle sur ce secteur pourrait répondre à plusieurs problématiques :

- contrer l'intrant salé au niveau de l'embouchure de la Figarella, en permettant un soutien de la nappe au cours d'eau : utilisation ponctuelle de la recharge artificielle ;
- assurer une recharge supplémentaire de la nappe pour l'alimentation en eau potable de la ville de Calvi : utilisation de la recharge artificielle sur la durée.

4. Faisabilité technique : analyse multicritère spatiale à l'échelle des territoires test

4.1. INTRODUCTION

L'analyse multicritère spatialisée de la faisabilité de la recharge artificielle (RA) à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée et Corse est réalisé à l'aide de deux familles de critères (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018) :

- **critères physiques** : propriétés des aquifères inclues dans la BDLISA (nature, état, thème, milieu), pente du terrain (à partir du MNT), Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) et épaisseur de la zone non saturée (EpZNS) ;
- **critères de contraintes** : occupation du sol (CORINE Land Cover), hydrographie renseignée dans la BDCarto, zones inondables par remontée de nappe et zones protégées.

Ces critères sont adaptés pour l'analyse à l'échelle des territoires test en rapport avec les données disponibles à l'échelle de chacune des entités hydrogéologiques étudiées. Les adaptations méthodologiques et les données exploitées sont présentées dans les sections 4.2 et 0.

4.2. LES CRITÈRES PHYSIQUES

Comme pour l'étude à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018), les critères physiques à considérer, sachant que l'intérêt est exclusivement porté sur la recharge artificielle indirecte, concernent essentiellement les propriétés des aquifères que l'on cherche à recharger (notamment ici, leur perméabilité, extraite de modèles existants à l'échelle des différents sites), la pente topographique, la capacité des formations à infiltrer de l'eau (via l'utilisation de l'IDPR) et l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

Ont aussi été utilisées les cartes géologiques départementales harmonisées afin de visualiser le recouvrement des formations aquifères, ainsi que les cartes piézométriques les plus récentes et complètes disponibles en format utilisable sous SIG (permettant la création de cartes d'épaisseur de la ZNS pouvant potentiellement remplacer celle réalisée en 2011 à l'échelle de la France). Un critère de distance aux cours d'eau a également été considéré afin de discriminer les secteurs où les pertes d'eau rechargée seraient importantes.

Le principe de notation attribuée aux critères physiques Pente, IDPR et EpZNS est identique à celui déjà décrit dans le cadre de l'étude à l'échelle du bassin RMC. Il ne sera pas re-détaillé dans le présent chapitre.

4.2.1. Propriétés des aquifères renseignées dans les bases de données BDLISA et BDRHF

a) *Informations apportées par la BDLISA*

Dans le cadre de l'étude cartographique à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018), les propriétés considérées étaient celles tirées des informations renseignées dans la BDLISA 2017 au niveau local (Niveau 3) pour les entités superficielles (Ordre 1) (Illustration 96). Or, dans le cas présent, le travail de cartographie étant réalisé à l'échelle d'entités BDLISA (2018)

de Niveau 2 ou 3 et d'Ordre 1, les informations renseignant la « Nature », l'« État », le « Thème » et le « Milieu » ne permettent pas de discriminer telle ou telle zone de chaque entité, puisqu'elles concernent l'entité dans son intégralité. Elles permettent de connaître les propriétés générales de l'entité sans les détailler spatialement. On peut par exemple savoir que l'entité 521AM (Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire) est un Système Aquifère (code Nature : 3) Sédimentaire (code Thème : 2) à type de porosité Poreux (code Milieu : 1), contenant une Nappe Libre (code État : 2). En conservant le système de notation attribué aux critères de la BDLISA lors de l'étude à l'échelle du bassin (Illustration 97), l'entité 521AM aurait une note de 4 concernant sa Nature, de 2 concernant son Thème, de 4 concernant le Milieu, et de 4 concernant son État. En appliquant l'équation ci-dessous (équation révisée), la note générale (arrondie) pour cette entité serait de 3, soit une entité Relativement favorable à la recharge artificielle indirecte.

$$BDLISA = (2 \times Nature + 1 \times Etat + 0{,}2 \times Milieu + 2 \times Thème)/6 \quad \textit{(Eq. 3)}$$

De manière générale, toutes les entités sélectionnées présentent une note BDLISA finale de 3 (relativement favorable) ou 4 (favorable) (Illustration 98). Concernant l'entité des Sables Astiens (647AB), elle est Captive (État : 1) sur une grande partie de sa superficie, mais l'étude de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur cette entité n'est réalisée que sur les zones où les sables astiens affleurent, donc où la nappe est Libre (État : 2). Sur ces secteurs, la note BDLISA finale est alors de 3.

<table>
<tr><th>« Nature »</th><th>« État »</th><th>« Thème »</th><th>« Milieu »</th></tr>
<tr><td>X : NoData</td><td>X : NoData</td><td>X : NoData</td><td>X : NoData</td></tr>
<tr><td>0 : Inconnu (absent sur bassin RMC)</td><td>0 : Inconnu</td><td>0 : Inconnu</td><td>0 : Inconnu</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1 : Grand système aquifère (absent sur bassin RMC)</td><td>1 : Nappe captive</td><td>1 : Alluvial</td><td>1 : Poreux</td></tr>
<tr><td>2 : Nappe libre</td><td>2 : Sédimentaire</td><td>2 : Fissuré</td></tr>
<tr><td>2 : Grand domaine hydrogéologique (absent sur bassin RMC)</td><td>3 : Libres et captives</td><td>3 : Socle</td><td>3 : Karstique</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3 : Système Aquifère</td><td>4 : Alternativement libre puis captive</td><td rowspan="2">4 : Intensément plissés de montagne</td><td>4 : Matricielle / fissures</td></tr>
<tr><td>5 : Semi-captive</td><td>5 : Karstique / fissures</td></tr>
<tr><td>4 : Domaine hydrogéologique</td><td rowspan="4">-</td><td>5 : Volcanisme</td><td>6 : Fractures et/ou fissures</td></tr>
<tr><td rowspan="2">5 : Unité aquifère</td><td>-</td><td>7 : Matricielle / fractures</td></tr>
<tr><td>-</td><td>8 : Matricielle / karstique</td></tr>
<tr><td>6 : Unité semi-perméable</td><td>-</td><td>9 : Matrice/fracture/ karst</td></tr>
<tr><td>7 : Unité imperméable</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
</table>

Illustration 96 : Présentation des codes utilisés dans la BDLISA en fonction des critères (Sandre, 2015).

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
BDLISA: « Nature »	4-7	X-NoData	6	-	3-5
BDLISA: « État »	1	0-X-5-NoData	3-4	-	2
BDLISA: « Milieu »	2-6	X-0-NoData	3-5-9	4-7-8	1
BDLISA: « Thème »	3-4	X-NoData	2-5	-	1

Illustration 97 : Système de notation des critères de la BDLISA tiré de l'étude réalisée à l'échelle du bassin RMC.

Site (*Entité BDLISA*)	Nature / État / Milieu / Thème	Note BDLISA	Note finale
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (*521AM*)	3 / 2 / 1 / 2	4 / 4 / 4 / 2	3
Nappes de la Vistrenque et des Costières (*647AA*)	3 / 2 / 1 / 2	4 / 4 / 4 / 2	3
Sables Astiens d'Agde-Valras (*647AB*)	3 / 1 **(2*)** / 1 / 2	4 / 0 **(4*)** / 4 / 2	0[8] **(3*)**
Alluvions de la Figarella (*720CA21*)	5 / 2 / 1 / 1	4 / 4 / 4 / 4	4

Illustration 98 : Récapitulatif des notes BDLISA (arrondies) pour les 5 entités étudiées (: note attribuée aux secteurs libres de la nappe des Sables Astiens).*

b) *Informations apportées par la base de données de la synthèse hydrogéologique du bassin*

Les différents services régionaux du BRGM ont réalisé entre 2010 et 2011, un travail de synthèse hydrogéologique à l'échelle du bassin. L'ensemble des données qui ont été compilées dans le cadre de ce travail ont été regroupées dans une base de données que l'Agence de l'Eau RMC a conservée (nous appellerons cette base de données BD_AERMC dans ce qui suit). Cette BD_AERMC contient en particulier des ordres de grandeur des valeurs des principaux paramètres hydrodynamiques (*K,T,S*) qu'il pourrait être utile d'utiliser pour caractériser le caractère favorable à la recharge artificielle d'une entité hydrogéologique. La version à jour de la BD_AERMC a été mise à disposition du BRGM par V. Rethoré (mail en date du 10 avril 2017). Comme dans le cadre de l'étude à l'échelle du bassin RMC, il a ainsi été demandé de tester l'intérêt d'utiliser cette base comme alternative ou complément à la caractérisation à l'aide de la BDLISA.

Les entités hydrogéologiques décrites dans cette base de données sont similaires aux entités BDLISA actuelles (Illustration 99). De la même manière, les informations renseignées pour ces entités concernent l'entité dans sa globalité (pas de données spatialisées). Les informations disponibles sont inégales suivant les paramètres considérés. Concernant les entités étudiées, seules la perméabilité (excepté pour l'entité 647AA), l'épaisseur mouillée (excepté pour l'entité 521AM) et la transmissivité (uniquement pour l'entité 521AM) sont renseignées. Dans le cas de

[8] La note finale BDLISA est considérée nulle à partir du moment où au moins l'un des critères (Nature, Etat, Milieu, Thème) a pour note 0

la nappe de la Vistrenque et des Costières, il apparaît possible de diviser l'entité BDLISA de niveau 5 en sous-entités BDLISA de niveau 3 auxquelles s'appliquent les propriétés des entités RHF de niveau 3 correspondantes.

Ces informations n'ont pas été utilisées dans le cadre de l'analyse cartographique mais ont été décrites en partie 3 dans le cadre de la synthèse bibliographique des 4 sites étudiés. Elles ont également été comparées aux autres données existantes (notamment aux données spatialisées issues de modèles existants).

Site	BDLisa NIV2	BDLisa NIV3	RHF NIV2	RHF NIV3	Informations propriétés hydrodynamiques RHF
Bièvre Valloire	**521AM:** Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire	**521AM00:** NV3 absent, nom de l'entité NV2 : Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire	**152K:** Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire	**152K_00:** Alluvions fluvio-glaciaires de la plaine de Bièvre-Valloire	Perméabilité moyenne minimale: 0,001 m/s. Perméabilité moyenne maximale: 0,01m/s. Transmissivité entre 10-2 et 10-4 m²/s.
Vistrenque et Costières	**647AA:** Alluvions et Villafranchien de la Vistrenque et des Costières	**647AA01:** Alluvions quaternaires et villafranchiennes de la Vistrenque	**150:** Alluvions Quaternaires et Villafranchiennes de la Vistrenque et des Costières	**150A:** Alluvions quaternaires et villafranchiennes de la Vistrenque	Epaisseur mouillée maximale: 20m.
		647AA02: Alluvions quaternaires et villafranchiennes des Costières		**150B:** Alluvions quaternaires et villafranchiennes des Costières	Epaisseur mouillée maximale: 5m.
		647AA03: Formations villafranchiennes des Costières entre Vauvert et Saint Gilles		**150C:** Formations villafranchiennes des Costières entre Vauvert et St Gilles	Epaisseur mouillée maximale: 5m.
		647AA04: Alluvions quaternaires et villafranchiennes à l'Ouest de Saint Gilles		**150D:** Alluvions quaternaires et villafranchiennes à l'Ouest de St Gilles	Epaisseur mouillée maximale: 24m.
		647AA05: Sables et argiles de l'Astien des Costières		**150E:** Argiles et sables astiens des Costières	Epaisseur mouillée maximale: 80m.
Sables astiens	**647AB:** Sables astiens d'Agde-Valras-embouchure de l'Aude	**647AB00:** NV3 absent, nom de l'entité NV2 : Sables astiens d'Agde-Valras-embouchure de l'Aude	**226:** Sables astiens d'Agde-Valras - Embouchure de l'Aude	**226_00:** Sables astiens d'Agde-Valras - Embouchure de l'Aude	Epaisseur mouillée max: 40m. Perméabilité moyenne minimale: 0,00001 m/s. Perméabilité moyenne maximale: 0,0001m/s.
Figarella	**720CA:** Alluvions récentes des fleuves côtiers du Nord-ouest de la Corse	**720AC21:** Alluvions récentes du Fiume Secco et du Figarella	?	**606AA032:** Alluvions quaternaires du Fiume Seccu et de la Figarella	Perméabilité moyenne minimale: 0,011 m/s. Perméabilité moyenne maximale: 0,025m/s.

Illustration 99 : Liens entre les entités BDLISA étudiées et les entités hydrogéologiques RHF de niveau 2 et 3, et propriétés associées.

4.2.2. La pente

La pente du terrain et la surface disponible pour installer les équipements nécessaires à la mise en œuvre de la recharge artificielle peuvent influencer la possibilité de mettre en place un dispositif de recharge artificielle indirecte. Les méthodes indirectes sont applicables uniquement sur des terrains relativement plats, même si l'on peut envisager que des travaux de terrassement puissent être réalisés pour y pallier.

La pente a été calculée dans le cadre de l'étude à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al.*, 2018), à partir du Modèle Numérique de Terrain de la BD ALTI® au 50 m

(IGN, 2017). Une note est ensuite attribuée en fonction des valeurs de pente obtenues, en suivant les catégories faites pour l'étude à l'échelle du bassin (Illustration 100). Contrairement à l'étude faite sur la totalité du bassin, les données de pente n'ont pas été moyennées à l'échelle des entités BDLISA, puisqu'elles auraient perdu toute représentativité. Il avait été proposé de les moyenner à l'échelle des bassin-versants des différents cours d'eau jalonnant les entités étudiées, mais la perte d'informations aurait été trop grande. Il a donc été choisi de travailler à l'échelle de la carte directement issue du MNT.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
Pente	-	> 30 %	8 - 30 %	3 - 8 %	0 - 3 %

Illustration 100 : Mise en relation des valeurs de la pente obtenues, avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte.

Les cartes du critère « Pente » obtenues pour les 4 territoires test figurent en Annexe 2.

4.2.3. L'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux)

L'IDPR a été développé au BRGM (Mardhel *et al*., 2004) et propose une description de la capacité des formations à infiltrer ou à faire ruisseler l'eau. Sa conception est décrite de manière plus exhaustive dans l'étude réalisée à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018). Dans un secteur où le ruissellement est dominant, la valeur de l'IDPR tend vers 2000. À l'inverse, si l'infiltration est dominante, l'IDPR tend vers 0. La version 2017 de l'IDPR est utilisée dans le cadre de l'étude à l'échelle des entités d'intérêt. Il s'agit d'une donnée raster avec une maille de 50 m par 50 m. Aucune moyenne à l'échelle de ces entités ou des bassins versants des cours d'eau les traversant n'a été réalisée, afin de conserver toute l'information fournie par ce critère. Une note est attribuée en fonction des valeurs de l'IDPR, en gardant les mêmes valeurs aux bornes que celles données pour l'étude à l'échelle du bassin RMC (Favorable quand < 600 et Peu favorable quand > 1 000), et en départageant Peu favorable de Relativement favorable en choisissant la valeur moyenne entre 600 et 1 400, soit 1 000 (Illustration 101).

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
IDPR	-	> 1 400	1 000 – 1 400	600 – 1 000	< 600

Illustration 101 : Mise en relation des valeurs de l'IDPR avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte.

Les cartes du critère « IDPR » obtenues pour les 4 territoires test figurent en Annexe 3.

4.2.4. L'épaisseur de la zone non saturée (EpZNS)

a) *À partir de la carte nationale réalisée par le BRGM*

L'épaisseur de la ZNS est déterminante uniquement dans le cas des infiltrations indirectes. Elle contrôle la percolation de l'eau vers la nappe. Dans le cadre de l'évaluation préliminaire du risque d'inondation par remontée de nappe, une méthode de cartographie de l'épaisseur de la ZNS a

été développée pour la France par le BRGM (Allier *et al*., 2018). Cette donnée est disponible au format raster et à une échelle de 1/100 000. Elle a été estimée à partir des niveaux piézométriques observés au niveau des forages disposant d'une observation au moment de leur réalisation (131 820 points à l'échelle nationale), à partir des valeurs piézométriques moyennes pour les piézomètres (2 755 ouvrages à l'échelle nationale), ainsi qu'à partir de cartes piézométriques existantes sur certains secteurs (isopièzes transformés en 50 215 points de calage à l'échelle nationale). Les niveaux de hautes eaux et basses eaux n'ont donc pas été pris en compte. Ce critère est à manipuler avec précaution puisqu'il présente de grandes incertitudes[9].

Il avait été vérifié, lors de la réalisation des cartes à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero e*t al*., 2018), que les cartes piézométriques existantes sous format numérique soient bien intégrées dans le travail de construction de la carte d'épaisseur de la ZNS, et que les mesures du réseau piézométrique national garantissent des résultats cohérents avec cette même carte.

Aucune moyenne à l'échelle des entités d'intérêt ou des bassins versants des cours d'eau les traversant n'a été réalisée, afin de conserver toute l'information fournie par ce critère. Une note est attribuée en fonction des valeurs d'épaisseur de la ZNS en suivant les catégories faites pour l'étude à l'échelle du bassin RMC (Illustration 102).

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
Épaisseur de la ZNS	< 1m	1 - 2m	70 -100m	40 – 70m	2 - 40m

Illustration 102 : Mise en relation des valeurs d'épaisseur de la ZNS avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte.

b) *À partir des données piézométriques disponibles (ADES et gestionnaires des sites)*

Il a été proposé de remplacer l'étude à partir de la carte de l'épaisseur de la ZNS établie sur toute la France par une étude réalisée à partir de données piézométriques disponibles pour chacune des entités d'intérêt.

Ces informations ont été extraites depuis ADES (http://www.ades.eaufrance.fr/, Recherche par Entité BDLISA), pour l'ensemble des piézomètres en fonctionnement pour l'année 2017 et ayant fait l'objet d'un suivi horaire au minimum ponctuellement en période de hautes eaux et de basses eaux, permettant l'obtention de données piézométriques en hautes eaux et en basses eaux récentes. Des données piézométriques supplémentaires ont été récoltées au sein des différents organismes gestionnaires des sites étudiés.

Bien qu'il soit possible de réaliser des cartes piézométriques sous ArcGIS, l'utilisation de cette fonctionnalité n'a pas été jugée pertinente. En effet, elle ne permet pas la prise en compte des différentes caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (perméabilité, transmissivité, emmagasinement, diffusivité), ses limites et zones de recharge, l'impact des pompages, etc.. Par ailleurs, le nombre de points de mesure n'est pas toujours suffisant au vu de la superficie du secteur étudié (Illustration 103). L'ensemble des sites présentent une faible densité de points de suivi, notamment la plaine de Bièvre-Liers-Valloire et les nappes de la Vistrenque et des Costières.

[9] Le BRGM précise qu'il n'est pas responsable des résultats obtenus à partir de la couche SIG d'épaisseur de la zone non-saturée.

Les données piézométriques alors récoltées ont permis une vérification des observations faites à partir de la carte d'épaisseur de la zone non saturée réalisée par le BRGM (cf. paragraphe précédent), en contrôlant qu'un ouvrage localisé dans un secteur noté 0, 1, 2, 3 ou 4 via l'analyse de la carte EpZNS BRGM conserve la même note en considérant la piézométrie moyenne relevée au cours de la même période. Pour l'ensemble des sites, ces comparaisons ont confirmé la note attribuée via l'étude de la carte EpZNS BRGM.

Site (*Entité BDLISA*)	Nombre de points de suivi	Superficie de l'entité BDLISA	Densité de points
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (*521AM*)	**9** (tous actifs en 2017)	476 km²	1 point tous les 53 km²
Nappes de la Vistrenque et des Costières (*647AA*)	**18** (tous actifs en 2017)	529 km²	1 point tous les 29 km²
Sables Astiens d'Agde-Valras (*647AB*)	**53** (43 actifs en 2017)	481 km²	1 point tous les 9 km²
Alluvions de la Figarella (*720CA21*)	**2** (1 actif en 2017)	8 km²	1 point pour 4 km²

Illustration 103 : Densité des points de suivi piézométrique pour chaque entité d'intérêt.

c) *À partir des cartes piézométriques numériques préexistantes*

Dans le cadre d'études qui ont été menées par le passé sur les différents sites étudiés, des cartes piézométriques ont pu être réalisées suite à la réalisation de campagnes de mesures spécifiques sur un nombre d'ouvrages conséquent et l'intégration de ces données dans des modèles.

Dans le cas où ces informations peuvent être extraites des modèles en question et utilisées sous Système d'Information Géographique (SIG), il est alors possible de recalculer une épaisseur de la ZNS à partir des cotes piézométriques renseignées sur ces cartes et du MNT (si les niveaux ne sont pas déjà donnés en profondeur par rapport au sol).

Les cartes piézométriques utilisées sur les différents sites sont renseignées ci-dessous (Illustration 104). Il est important de prendre en considération l'âge de la carte (nous avons jugé plus pertinent d'utiliser une carte récente), la période de l'année au cours de laquelle les mesures ont été faites (basses eaux / hautes eaux) et la densité des points de mesure (qui n'est généralement pas égale sur tout le site, d'où des secteurs avec une piézométrie bien contrainte, et d'autres avec une modélisation de la piézométrie plus incertaine).

Site (*Entité BDLISA*)	Carte piézométrique utilisée	Date des mesures	Auteur
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (*521AM*)	Carte piézométrique de la nappe des alluvions fluvio-glaciaires (1994)	Septembre-Octobre 1994 (Basses Eaux)	BRGM (C. Dubar, I. Fournier, RN-01678-FR, 1994)
	Carte piézométrique de la nappe des alluvions fluvio-glaciaires (2008)	Août 2008 (Basses Eaux)	SOGREAH (2008)
Nappes de la Vistrenque et des Costières (*647AA*)	Carte piézométrique de la nappe de la Vistrenque (2006)	Fin août 2006 (Basses Eaux)	S. Pinzelli (2006)

	Carte piézométrique de la nappe de la Vistrenque, retracée à partir de données ponctuelles (2008)	Avril 2008	J.S. Piro (2008)
Sables Astiens d'Agde-Valras (*647AB*)	Carte piézométrique des sables astiens (2000)	Fin août 2000 (Basses Eaux)	Hydroexpert (2001)
	Carte piézométrique issue du modèle développé sous TALISMAN (2015)	2015	Modèle transmis par le SMETA en 2017
Alluvions de la Figarella (*720CA21*)	Pas de carte piézométrique disponible sur le secteur complet		

Illustration 104 : Récapitulatif des cartes piézométriques existantes pour chaque site étudié afin de reconstituer une carte d'épaisseur de la ZNS locale.

Pour le site de **la plaine de Bièvre-Liers-Valloire**, la carte piézométrique de 1994 est plus précise que celle obtenue en 2008. Ces deux cartes présentent des tendances similaires. Celle de 1994 correspond à celle ayant été utilisée pour réaliser la carte d'épaisseur de la ZNS à l'échelle nationale. Pour ce site, il est donc plus pertinent d'utiliser la carte réalisée à l'échelle nationale, puisque considérant également les données disponibles en BSS et sous ADES.

Pour le site de **la Vistrenque et des Costières**, les deux cartes existantes (2006 et 2008) ne concernent que la plaine de la Vistrenque (entité BDRHF 150A). Ces deux cartes sont très similaires et sont issues de mesures faites en grande partie sur les mêmes ouvrages. En revanche, une fois soustraites au MNT (conversion en épaisseur de la zone non-saturée), elles affichent plusieurs grandes zones fortement négatives (niveaux piézométriques largement au-dessus du niveau du sol), en rive gauche du Vistre notamment, phénomène non observé dans la réalité. Le MNT utilisé étant correct et récent (2017), et le différentiel Niveau piézométrique – Niveau du sol élevé ne pouvant être expliqué par la réalisation d'aménagements (déblais, gravières, etc.) entre 2006 et 2017, il a été choisi de conserver la carte d'épaisseur de la ZNS réalisée à l'échelle nationale.

Pour le site des **Sables astiens**, la carte piézométrique de 2015 issue du modèle réalisé sous TALISMAN est peu précise (échelle 900 m*900 m) et ne présente aucune information sur le secteur affleurant de Corneilhan et une partie du secteur de Mèze. Il ne parait donc pas pertinent de l'utiliser. La carte piézométrique de 2000 correspond à celle ayant été utilisée pour réaliser la carte d'épaisseur de la ZNS à l'échelle nationale. Comme pour le site de Bièvre-Liers-Valloire, il a donc été choisi de conserver la carte réalisée à l'échelle nationale.

Pour le site des **alluvions de la Figarella**, l'absence de carte piézométrique en format exploitable sur SIG couvrant tout le secteur étudié oblige l'utilisation de la carte d'épaisseur de la ZNS réalisée à l'échelle nationale. *Remarque :* Après révision de la carte par M. Genevier (BRGM Corse), le secteur amont, renseigné dans des gammes d'EpZNS de 40-70 et 70-100m, ne serait pas cohérent avec ce qui est observé dans la réalité (d'après les données BSS disponibles, et à dire d'expert). Sur cette base, la note EpZNS donnée à ce secteur (initialement 3 et 2) a été repassée à 4 (2-40m d'EpZNS).

Les cartes du critère « EpZNS » obtenues pour les quatre territoires test figurent en Annexe 4.

4.2.5. La perméabilité (K)

Les paramètres hydrodynamiques des différents aquifères concernés par la présente étude doivent permettre un bon écoulement de l'eau, mais sans que celui-ci ne se fasse trop rapidement, dans la mesure où l'objectif de la recharge est d'obtenir une remontée satisfaisante des niveaux piézométriques et un stockage d'eau en profondeur (que ce soit pour palier un déficit quantitatif, ou créer une barrière hydraulique contre une intrusion saline ou une quelconque pollution). La perméabilité, la transmissivité (perméabilité * épaisseur de l'aquifère), le coefficient d'emmagasinement et la diffusivité (rapport de la transmissivité à l'emmagasinement) doivent donc pouvoir répondre à ces besoins.

La capacité de rétention de l'aquifère dépend de sa diffusivité, mais aussi de plusieurs autres paramètres tels que le débit d'infiltration, la durée de la recharge et la distance aux exutoires potentiels. Cette question est abordée plus bas (§ 6.2.3) pour estimer, sur chaque territoire test, le taux de pertes de l'eau rechargée vers les rivières drainant l'aquifère.

Dans le cadre de l'étude menée à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018), ces paramètres étaient considérés via la prise en compte du critère « BDLISA », notamment de ses sous-critères « Nature » et « Milieu ». Dans le cas présent, l'étude étant réalisée à l'échelle d'entités BDLISA, ces informations concernent les sites sélectionnés dans leur globalité.

Parmi l'ensemble des paramètres cités et pour l'ensemble des sites, la perméabilité (notée K) est le paramètre le plus souvent renseigné (de manière ponctuelle comme spatialisé). Il a donc été choisi de l'inclure à l'analyse multicritère, en utilisant les données issues de modèles disponibles, excepté dans le cas des alluvions de la Figarella, où les valeurs utilisées ont été définies et spatialisées à partir des indications figurant dans le rapport de P. Terce de 1987 (pas de lien apparent entre les différentes K et les différentes terrasses alluviales, d'où un découpage arbitraire amont-aval). Les sources des différentes cartes de K utilisée sont listées en Illustration 105.

Site (*Entité BDLISA*)	K utilisée	Échelle	Gamme de K
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (*521AM*)	Perméabilités reprises de la carte réalisée par ANTEA en 1996	500m * 500m	$2{,}75.10^{-2}$ à $2{,}5.10^{-5}$ m/s
Nappes de la Vistrenque et des Costières (*647AA*)	Perméabilités reprises à partir de la carte réalisée par S. Pinzelli en 2006 (que sur la Vistrenque, 647AA01) + perméabilités moyennes renseignées dans les fiches BDRHF pour les entités 647AA02 à 647AA05	300m * 300m (647AA01) Échelle des entités (647AA02 à 647AA05)	6.10^{-3} à $1{,}1.10^{-5}$ m/s
Sables Astiens d'Agde-Valras (*647AB*)	Perméabilités renseignées dans la dernière version du modèle développé sous Talisman (2015), remis par le SMETA	900 m * 900 m	Sur affleurements : de $4{,}8.10^{-4}$ à $2{,}625.10^{-6}$ m/s
Alluvions de la Figarella (*720CA21*)	Données ponctuelles relevées par P. Terce (1987), spatialisées d'amont en aval en suivant les indications du rapport (4 zones)	Entité divisée en 4 secteurs distincts, de 0,3 à 3,2 km²	$4{,}8.10^{-3}$ à 3.10^{-4} m/s

Illustration 105 : Récapitulatif des cartes ou données de perméabilités utilisées pour chaque site étudié.

Plusieurs auteurs donnent des gammes de perméabilités pour lesquelles une recharge artificielle peut être réalisée en obtenant des résultats optimaux. Casanova *et al.* (2013) ainsi que Wuilleumier et Seguin (2008) indiquent que, pour une porosité continue, un aquifère dont la perméabilité est comprise entre $3{,}9.10^{-4}$ et 10^{-2} m/s est favorable à la recharge artificielle. Hannappel *et al.* (2014) expliquent que la plupart des sites de recharge artificielle fonctionnels en Europe ont été réalisés sur des secteurs présentant des perméabilités allant de 10^{-4} à 10^{-2} m/s.

L'échelle de K des différents sites étudiés ici va d'environ 10^{-6} à 10^{-1} m/s. Un code allant de 1 à 6 est donc attribué à chaque zone de perméabilité homogène, pour l'ensemble des sites, avec 1 pour $1 < K \leq 10^{-1}$ m/s, 2 pour $10^{-1} < K \leq 10^{-2}$ m/s, jusqu'à 7 pour $K < 10^{-6}$ m/s. La notation du critère K est alors la suivante (Illustration 106) :

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
Perméabilité (K)	-	7	6 – 1	5 – 2	4 - 3

Illustration 106 : Mise en relation du critère Perméabilité avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte.

Les cartes du critère « Perméabilité » obtenues pour les 4 territoires test figurent en Annexe 5.

a) *Création de cartes de Vitesse d'infiltration i*

Une carte de vitesse d'infiltration a été créée pour chaque site à partir des cartes de perméabilité, en utilisant la formule de Bourguet (1971), citée par Detay (1997):

$$Log\ i = 0{,}746\ Log\ K - 1{,}25$$ (avec *i* et *K* en 10^{-5} m/s)

Ces cartes ne sont pas utilisées dans le cadre de l'analyse de la faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques. Elles ont été réalisées pour permettre une estimation des dimensions des bassins d'infiltration au droit de chaque territoire test (§ 6.2.1), en fonction de la perméabilité des terrains (et donc de leur capacité d'infiltration). Ce dimensionnement est utile :

- dans l'estimation du dôme piézométrique induit par la recharge en fonction du volume à recharger (§ 5.2) ;
- dans l'estimation des coûts d'investissement et opérationnels d'un bassin d'infiltration (§ 7).

4.2.6. Le recouvrement

Il a été proposé de s'intéresser aux formations recouvrant les entités d'intérêt (lorsque ces formations existent). La majeure partie du temps, ce recouvrement est partiel, et est constitué de formations superficielles de type lœss, limons, colluvions, éboulis, dépôts de versants, etc.. La présence de ce recouvrement est problématique dans le sens où il empêche l'accès direct à la formation aquifère à recharger. Les formations superficielles ont été repérées à l'aide des cartes géologiques harmonisées départementales (échelle 1/50 000). L'épaisseur de ces recouvrements est un paramètre intéressant, mais peu précis (fourchettes larges) et rarement indiqué, donc non pris en compte dans cette étude. Par ailleurs, la construction d'un bassin d'infiltration étant souvent accompagnée d'un décaissage, ce critère s'avère donc modérément important : son poids a été réduit en conséquence dans la pondération finale.

Tous les secteurs avec présence d'un recouvrement ont pour code 1. Les zones sans recouvrement ont le code 0. La notation est alors la suivante (Illustration 107) :

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
Recouvrement	-	Code 1	-	-	Code 0

Illustration 107 : Mise en relation du critère Recouvrement avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte.

Les cartes utilisées et les formations considérées comme recouvrantes pour chaque entité étudiée sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (Illustration 108). Sur les affleurements de sables astiens, les formations recouvrantes recensées ci-dessous pour l'entité 647AB sont quasi-inexistantes (quelques petits secteurs sur les contours des affleurements, difficilement repérable à l'échelle des affleurements).

Les cartes du critère « Recouvrement » obtenues pour la Plaine de Bièvre-Liers-Valloire et les nappes Vistrenque et Costières figurent en Annexe 6.

Site (*Entité BDLISA*)	Cartes géologiques départementales utilisées	Formations recouvrantes relevées
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (*521AM*)	Départements 38 et 26	**OEx** (Loess et Limons) ; **C** (Colluvions polygéniques : cailloutis, sables, argiles) ; **gls** (Glissements superficiels, glissement en masse et écroulements rocheux) ; **OE** (Limons et loess d'âge indéterminé) ; **OEy** (Loess calcaires würmien non différenciés) ; **E** (Eboulis actuels à anciens (âge non précisé), localement cônes d'avalanches et éboulis mêlés à moraines) ; **C** (Dépôts de versants composites (localement glissés) : colluvions, éboulis et moraines remaniés) ; **EJz** (Cônes mixtes d'éboulis, de déjection et/ou d'avalanches (+/- remaniement par ruissellement), récents à actuels ou d'âge indéterminé)
Nappes de la Vistrenque et des Costières (*647AA*)	Département 30	**RN** (Résidus de nappes de sable (Quaternaire)) **CF** (Colluvions et alluvions non différenciées (Quaternaire))

		C (Colluvions récentes indifférenciées (argileuses, marneuses, sablo-limoneuses, sablo-argileuses, parfois sables grossiers ou cailloutis) (Quaternaire récent)) **Cr** (Colluvions de remplissage de la dépression des Costières et de la Vistrenque : limons, limons calcaires, calcaires (Quaternaire)) **AFv** (Imbrication de limons et de cailloutis en bordure SE des Costières (Quaternaire)) **COE** (Complexes (colluviaux) polygéniques de piédmont : débris calcaires imbriqués avec limons, éboulis calcaires remaniés à matrice loessique (Quaternaire)) **OE** (Loess in situ (Quaternaire : Würm tardif p.p.)) **E** (Eboulis de pierrailles actuels à récents (Quaternaire récent)) **LFz** (Limons palustres des dépressions interfluves et des étangs éventuellement avec influence fluviatile (Quaternaire récent : Holocène)) **Fz** (Alluvions récentes à actuelles de basses à très basses terrasses et de la plaine d'inondation des rivières actuelles dans le delta du Rhône, alluvions fines mêlés de sédiments palustres (faciès mixtes) (Pléistocène sup.-Holocène))
Sables Astiens d'Agde-Valras (*647AB*)	Département 34 (zones d'affleurement)	**C** (Colluvions : blocs ou détritus avec matrice abondante à dominante limoneuse (Quaternaire)) **Fx** (Sables et galets consolidés en conglomérats (Hautes terrasses glaciaires Riss)) **Fy** (Blocs, galets et graviers de calcaires siliceux, de grès, de quartz, de lydiennes, de porphyrites et de débris basaltiques (Terrasses glaciaires Würm)) **Fya** (Graviers et galets grossiers et limons (Würm)) **Fz** (Alluvions argilo-sableuses à graviers et galets, limons des terrasses holocènes) **LMz** (Limons argilo-sableux des étangs salés (Holocène)) **p** (Cailloutis de piémonts et argiles)

		p1ct (Argiles sableuses, limons beiges et calcaires lacustres granuleux (Pliocène marin/continental)) **p1c** (Sables, grès, conglomérats à stratifications entrecroisées, limons argileux rouges (Pliocène continental)) **p1s1** (Cailloutis siliceux à matrice argileuse rouge, surface d'abandon pliocène (Pliocène continental))
Alluvions de la Figarella (*720CA21*)	Département 2B	Pas de recouvrement

Illustration 108 : Récapitulatif des formations recouvrant les entités d'intérêt.

4.2.7. Carte des critères physiques

Les critères présentés ci-dessus sont combinés pour obtenir une carte de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur les 4 sites du point de vue des critères physiques. Le critère BDLISA n'est pas pris en compte, puisque l'information qu'il fournit concerne les entités dans leur intégralité. Les autres critères sont combinés en utilisant le système de pondération obtenu par Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) (Saaty, 2008), pondération ensuite adaptée à dire d'expert. La démarche ayant été réalisée à une échelle plus fine que dans le cas de l'étude à l'échelle du bassin RMC (pas de moyenne de critères à l'échelle d'entités hydrogéologiques), il n'a pas été considéré pertinent de conserver les mêmes ordres de grandeur attribués aux différents critères (notamment, pour l'EpZNS, qui, à l'échelle des entités, donne des informations assez précises et importantes et permet de discriminer des secteurs où le niveau de la nappe est trop près du sol ou trop profonde pour qu'il y ait un intérêt à recharger sur ces zones, d'où sa pondération élevée dans le cas présent). La pente est aussi considérée comme d'importance égale aux critères EpZNS et IDPR. Ce critère étant ici à une résolution de 50m*50m, il permet une localisation précise des zones de forte pente. Il n'est en effet pas possible (et sans intérêt d'un point de vue hydrodynamique) d'installer un dispositif de recharge sur de fortes pentes. Il a été choisi de ne pas donner une pondération trop importante au critère K, celui-ci étant souvent approximatif (spatialisation de données ponctuelles disparates) et à des échelles moins précises que la plupart des autres critères (au minimum, 300 m * 300 m, sur la plaine de la Vistrenque). Les cartes de K sont relativement homogènes et n'affichent que des notes de 4 (Favorable) à 3 (Relativement favorable), elles sont donc peu discriminantes par rapport aux autres critères. Le critère recouvrement est également d'importance moindre, puisque suivant son épaisseur, il peut être déblayer afin d'accéder à l'entité aquifère. L'équation utilisée pour le calcul de la note physique dans le cadre de cette étude est alors la suivante :

$$Critères\ Physiques = (0.25 \times ZNS) + (0.25 \times IDPR) + (0.25 \times Pente) + (0.15 \times K) + (0.10 \times Recouvrement) \quad (Eq.\ 4)$$

Les cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques, obtenues pour les 4 territoires test, figurent en Annexe 7.

4.3. LES CRITÈRES DE CONTRAINTES

Les critères de contrainte concernent les conditions qui régissent la possibilité de pouvoir envisager de construire un dispositif de recharge artificielle sur un site donné. Dans l'analyse réalisé sur les sites sélectionnés, nous avons choisi d'aborder cet aspect en conservant les trois critères déjà utilisés dans l'analyse à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018), à décrire cette fois-ci à l'échelle de ces entités : l'occupation du sol Corine Land Cover complétée par les informations de la BD Carto, les zones protégées (critère déjà utilisés dans l'analyse à l'échelle du bassin RMC), ainsi que les zones inondables par remontée de nappe.

Il avait été suggéré d'intégrer à l'analyse les périmètres de protection de captages, en tant que zones moins favorables à l'installation de dispositif de RA. Cependant, en dépit de l'aspect contraignant (en terme de démarches administratives, études réglementaires, suivi du site) que pourrait représenter la réalisation de tels travaux au sein d'un PPC (notamment s'il s'agit d'un PP Rapproché ou Immédiat), un grand nombre de dispositifs de recharge artificielle existants ont été implantés à proximité immédiate de champs captants dans l'objectif de repomper directement l'eau infiltrée. En ce sens, la présence d'un PPC ne justifie donc pas le déclassement de la note de faisabilité d'un projet de recharge artificielle indirecte. À la demande de l'Agence de l'Eau RMC, ce critère n'a donc pas été considéré.

D'autres aspects pourraient être pris en compte au titre des contraintes, concernant la disponibilité et la qualité de l'eau utilisée pour alimenter les dispositifs de recharge artificielle. Les eaux de recharge d'intérêt pour cette étude sont les eaux de surface (cours d'eau, canaux, lacs). Ces critères, difficiles à considérer dans le calcul de la note contrainte, ont été utilisés indépendamment des critères de contraintes afin de sélectionner les eaux de surface à prendre en compte pour mener l'analyse économique sur les différents sites. La distance et le dénivelé entre la source de l'eau que l'on veut utiliser pour la recharge et la zone de recharge ont aussi été considérés, dans l'analyse économique.

4.3.1. L'occupation du sol

a) *D'après la BD CORINE Land Cover*

La COoRdination de l'INformation sur l'Environnement (CORINE) Land Cover (désignée par CLC dans ce qui suit), dont les auteurs sont le SOeS et l'Agence Européenne de l'Environnement, propose une description cartographique de l'occupation des sols en 2012 (CGDD, 2015). Cette donnée présente sur toute la France est au format vecteur avec une échelle de 1/100 000.

Dans le cadre de l'étude à l'échelle du bassin RMC, une grande diversité de types d'occupation des sols existant, les différentes unités avaient été regroupées afin d'identifier les secteurs où l'implantation de dispositifs de recharge artificielle serait possible. Les notes de 0 à 4 représentent la possibilité de faire de la recharge artificielle sur ces différents secteurs. Plusieurs modifications de notes ont été effectuées lors d'ateliers cartographiques, et suite à différents échanges avec l'Agence de l'Eau RMC et les différents hydrogéologues régionaux du BRGM. Ces regroupements et notations, présentés en partie 2, ont été conservés pour l'étude à l'échelle des 4 sites sélectionnés (Illustration 10).

b) *D'après la BDcarto*

La BDCarto / BD Topo (IGN) est une base de données répertoriant le réseau routier et ferré, les unités administratives, le réseau hydrographique, l'occupation des sols, la toponymie et les équipements divers. Cette carte permet de compléter la base CORINE Land Cover en apportant des précisions uniquement sur le **réseau hydrographique** : l'emplacement des eaux libres

(code 1), des zones d'inondation (code 2), des glaciers (code 3) et des marais salants (code 4). Cette donnée est disponible au format vecteur. Pour ce critère, de la même manière que pour l'étude à l'échelle du bassin RMC, tous les objets ayant un code compris entre 1 et 4 sont considérés comme défavorables à l'implantation d'un dispositif de recharge artificielle indirecte (Illustration 109).

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
CLC	0	1	2	3	4
BD Carto	1 à 4	-	-	-	0

Illustration 109 : Mise en relation des codes de regroupement de la BD CORINE Land Cover et de la BD Carto avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte.

Les cartes du critère « Occupation du sol » obtenues pour les 4 territoires test figurent en Annexe 8.

4.3.2. Les zones inondables par remontée de nappe

Pour compléter la description des surfaces soumises au risque inondation proposée par la BDCarto, la carte des zones inondables par remontée de nappe réalisée en 2011 par le BRGM a été utilisée dans le cadre de l'étude réalisée à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018). Les cartes de faisabilité de la recharge artificielle à l'échelle du bassin RMC ont ensuite été actualisées en utilisant la carte de risque de débordement de nappe réalisée en 2018 par le BRGM (Brugeron *et al*., 2018).

En travaillant à l'échelle des 4 territoires test, cette carte de risque de débordement de nappe présente des incohérences. Certains secteurs renseignés comme en risque de débordement de nappe ne le seraient pas, au regard des différentes cartes d'épaisseur de zone non-saturée disponibles (carte de 2011 réalisée par le BRGM, cartes déduites des cartes/données piézométriques disponibles) et de la connaissance du battement des nappes concernées (d'après la bibliographie et les données piézométriques disponibles sur ADES).

Exemple : d'après la carte de risque de débordement de nappe de 2018, la quasi-intégralité de l'entité BDLISA des Alluvions de la Figarella est considérée comme potentiellement sujette aux débordements de nappe. Les données piézométriques disponibles sur ADES ne font état d'aucune inondation par remontée de nappe (données disponibles depuis 1973). Ce fait a également été confirmé par Mme. GENEVIER (hydrogéologue régionale BRGM Corse) : « *Depuis l'année 2009 (début du suivi du piézomètre DCE par le BRGM), le niveau de la nappe le plus haut enregistré est de 2 m de profondeur. Il peut éventuellement y avoir inondation de la plaine par le fleuve mais pas de remontée de nappe.* » (Illustration 110)

Dans le but d'obtenir une carte de risque de débordement de nappe moins pessimiste, la démarche suivante a été suivie :

- à partir des données piézométriques disponibles sur ADES (la totalité des données validées disponibles sur l'ensemble de piézomètres actifs actuellement ou non, pour chacun des 4 territoires test), la profondeur moyenne et la profondeur minimale, ainsi que le battement positif de la nappe (profondeur moyenne – profondeur minimale) ont été calculés pour chaque ouvrage. Est alors considéré comme Battement Positif de chaque nappe la moyenne des battements positifs calculés sur l'ensemble des piézomètres existants sur chaque site étudié

(moyenne arrondie au mètre supérieur, par précaution). Ce battement est estimé à 5 m pour les alluvions fluvio-glaciaires de la Plaine de Bièvre-Liers-Valloire, 4 m pour les aquifères de la Vistrenque et de Costières ainsi que pour les sables astiens de Valras-Agde, et 3 m pour les alluvions de la Figarella ;

- ce battement positif est alors soustrait à la carte d'épaisseur de la zone non-saturée utilisée pour chaque site. Chaque secteur où la valeur alors obtenue est supérieure ou égale à zéro (càd. où le niveau piézométrique aurait déjà par le passé atteint ou dépassé la surface du sol) est supposé comme à risque potentiel d'inondation par remontée de nappe.

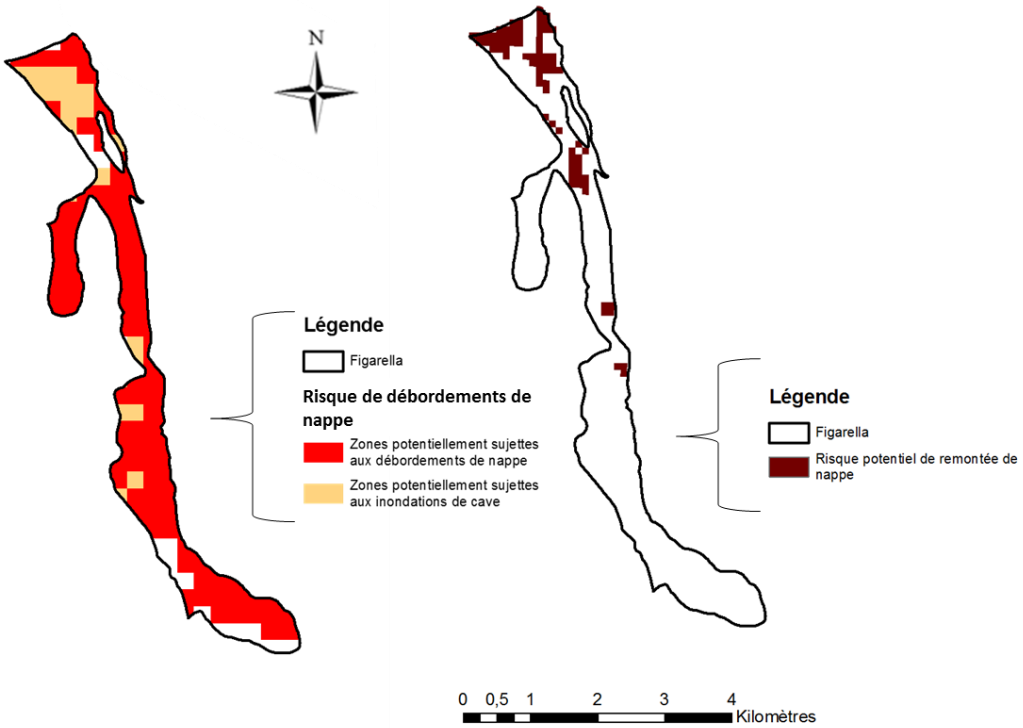


Illustration 110 : Exemple de cartes de risque de débordement de nappe, au droit des alluvions de la Figarella. À gauche, la carte de remontée de nappe réalisée par le BRGM en 2018 (Brugeron et al*., 2018) ; à droite, la carte recréée dans le cadre de la présente étude.*

Les cartes alors obtenues sont nettement moins pessimistes que les cartes de risque de débordement de nappe de 2011 et 2018 (exceptés sur quelques petits secteurs : sud de la plaine de la Vistrenque, et secteur affleurant des sables astiens à Mèze), et elles identifient des secteurs à risque qui avaient également été relevés sur ces 2 autres cartes. Elles sont en revanche à considérer avec précautions, puisqu'elles intègrent une carte d'épaisseur de la ZNS présentant d'ores et déjà des incertitudes, et un battement positif similaire sur toute la superficie des entités alors que celui-ci peut sensiblement varier d'un secteur à l'autre. La même notation que celle considérée lors de l'étude à l'échelle du bassin RMC a été conservée. Ainsi, le **code 1** (Peu favorable) a été attribué aux surfaces cartographiées en **risque de débordement de nappe**. Les cartes du critère « Débordement de nappe » obtenues pour les 4 territoires test figurent en Annexe 9.

4.3.3. Les zones protégées

Le territoire français est couvert par une grande variété de zonages visant à protéger des paysages et/ou des écosystèmes par l'intermédiaire d'une réglementation environnementale ou paysagère, à l'échelle nationale ou régionale. Ces zones bénéficient d'une protection plus ou

moins forte vis-à-vis des activités anthropiques. Elles ont été prises en compte dans l'analyse cartographique menée à l'échelle du bassin RMC (protection couvrant l'ensemble du bassin RMC,) et le sont aussi à l'échelle des 4 sites sélectionnés. Les données utilisées sont celles de l'Inventaire National du Patrimoine Naturelle et des sites de la DREAL (2016) (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018). Les zones protégées avaient été regroupées selon un niveau de protection, d'exigence variable suivant le type de zone considérée, en se basant sur les descriptions des zones protégées qui sont proposées sur les sites de la DREAL (Illustration 111). Les notes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte présentées sur l'Illustration 112 diffèrent de celles utilisées lors de l'étude à l'échelle du bassin RMC. En effet, suite à plusieurs échanges avec l'Agence de l'Eau RMC, il a été décidé d'améliorer la notation des zones protégées en faisant le postulat que l'installation de dispositifs de recharge artificielle indirecte peut être profitable à certains milieux, à certaines espèces (oiseaux notamment, via la création de « zone humide »). Les notes des zones protégées pour des objectifs de protection de faune, des zones humides (RAMSAR), et des ZNIEFF de type 1 ont été améliorées. Le tableau ci-dessous ne liste que les types de zones protégées présentes sur les 4 territoires test. Les cartes du critère « Zones protégées » obtenues pour les quatre territoires test figurent en Annexe 10.

Type de zone protégée	Code
Conservatoires d'espaces naturels (CEN)	2
Réserves de Biosphère (cœur)	2
littoral	2
Réserves naturelles nationales	2
Paysage – Sites inscrits	2
Zones humides RAMSAR	1
ZNIEFF type 1	1
ZNIEFF type 2	1
ZICO	1
Natura 2000 ZSC-pSIC -SIC	1
Natura 2000 ZPS	1
Réserves de Biosphère (reste)	1

Illustration 111 : Classement du niveau de protection adopté pour les zones protégées à l'échelle des 4 territoires test.

Note attribuée / Type de critère	Défavorable	Peu favorable		Relativement favorable	Favorable
	0	1	2	3	4
Zones protégées	-	-	2	1	0

Illustration 112 : Mise en relation du regroupement des codes des zones protégées avec la notation de favorabilité à la recharge artificielle indirecte.

4.3.4. Carte des critères de contrainte

Les critères présentés ci-dessus sont combinés pour obtenir une carte de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur les 4 sites du point de vue des critères de contrainte. Comme dans le cas de l'étude menée à l'échelle du bassin RMC (RP-67534-FR, Caballero *et al*., 2018), les critères sont combinés par calcul de la moyenne arithmétique sans pondération, suivant

l'équation suivante. L'équation utilisée pour le calcul de la note contrainte dans le cadre de cette étude est la suivante :

$$Contraintes = (1 \times Occup.Sol\ (CLC\ et\ BDCarto) + 1\ \times Rem.Nappe + 1 \times Zones\ Prot.)/3 \quad (Eq.\ 5)$$

Les cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques, obtenues pour les 4 territoires test, figurent en Annexe 11.

Ces cartes ont également permis la création de masques de zones défavorables (dont la note finale est 0) de manière à retirer ces secteurs (il s'agit dans la majeure partie des cas de zones urbanisées ou en eau) de l'analyse des coûts (puisqu'un bassin d'infiltration ne sera pas installé en cœur de ville ou de village, encore moins à l'emplacement d'un plan d'eau).

4.4. SYNTHÈSE DE LA MÉTHODOLOGIE

Le tableau suivant résume les adaptations faites de la méthodologique de cartographie décisionnelle à l'échelle des sites par rapport à l'analyse à l'échelle RMC, et rappelle de manière synthétique les différents postulats avancés pour justifier la notation de chaque critère.

Critères Physiques	
BDLISA	Critère utilisé à l'échelle du bassin RMC, non utilisé à l'échelle des territoires test.
Pente	Même notation qu'à l'échelle du bassin RMC (gammes de % de pente). Plus la pente est élevée, moins il est pertinent d'installer un dispositif de RA. Non moyenné à l'échelle de l'entité BDLISA.
IDPR	Notation proche de celle faite à l'échelle du bassin RMC (par tranche de valeur, pas considération de l'écart-type). Plus le terrain est considéré comme infiltrant (IDPR faible), plus il est intéressant de faire de la RA. Non moyenné à l'échelle de l'entité BDLISA.
Epaisseur de la ZNS	Même notation qu'à l'échelle du bassin RMC. Non moyenné à l'échelle de l'entité BDLISA. L'EpZNS ne doit pas être trop faible (<2m) ni trop élevée (>70m voire 100m) pour que la recharge artificielle soit efficace. Comparaison avec cartes créées à partir de cartes piézométriques locales, mais résultats moins cohérents ou moins précis, donc conservation de la carte réalisée par le BRGM en 2011.
Perméabilité K	Critère non utilisé à l'échelle du bassin RMC. Cartes issues de modèles existants. Échelles variables en fonction du site considéré. Notation faite par tranche d'ordre de grandeur de K (puissance de 10) en s'appuyant sur les informations fournies par la bibliographie. K ne doit pas être trop faible (< 1.10^{-4} voire 1.10^{-5} m/s) ni trop élevée (> 1.10^{-2} m/s) pour que la recharge artificielle soit efficace.
Recouvrement	Critère non utilisé à l'échelle du bassin RMC. Réduction de la note dans le cas où une formation recouvre l'aquifère à recharger. Les formations recouvrantes ont été identifiées à l'aide de carte géologique départementales harmonisées (échelle 1/50 000).
Pondération des Critères Physiques	(0,25×ZNS) + (0,25×IDPR) + (0,25×Pente) + (0,15×K) + (0.10×Recouvrement)

Critères de Contraintes	
Occupation du sol (CLC)	Même notation qu'à l'échelle du bassin RMC. Vont être favorisées les zones forestières, pelouses, prairies, par rapport aux terrains agricoles mais surtout les zones urbanisés, humides ou en eau.
Réseau hydrographique, glaciers, marais (BDCarto)	Même notation qu'à l'échelle du bassin RMC. Ces secteurs ne sont pas favorables à la RA.
Débordement de nappe	Même notation qu'à l'échelle du bassin RMC, mais utilisation d'une carte réalisée à partir de la carte d'épaisseur de la ZNS et du battement positif moyen des nappes concernées. Les zones en risque de débordement de nappe ne sont pas favorables à la RA.
Zones protégées	Notation différente : amélioration des notes en faisant le postulat que l'installation de dispositifs de recharge artificielle indirecte peut être profitable à certains milieux, à certaines espèces (demande de l'Agence de l'Eau RMC). Terrains sans zones protégées plus favorables à la RA, mais recharge artificielle possible dans des zones protégées pour des objectifs de protection de faune, des zones humides, etc…
Pondération des Critères contraintes	Même pondération qu'à l'échelle du bassin RMC : (1×Occup.Sol (CLC et BDCarto) + 1×Rem.Nappe + 1×Zones Prot.)/3

Illustration 113 : Tableau récapitulatif de la démarche adoptée à l'échelle des territoires test, en comparaison avec l'analyse menée à l'échelle du bassin RMC.

5. Analyse des ressources en eau de surface sur les quatre territoires tests

5.1. INTRODUCTION

Différents critères concernant les eaux de surface existantes sur chacun des secteurs ont été considérés dans le but de sélectionner la ressource en eau permettant une recharge artificielle satisfaisante de la nappe concernée, aussi bien en terme de quantité que de qualité. Ces informations n'étant disponibles que sur les linéaires des cours d'eau, canaux, réseau d'eau (par tronçons, ou de manière globale sur un linéaire entier), il n'était pas possible de combiner ces données aux cartes de faisabilité de la recharge artificielle précédemment créées. Elles ont donc été considérées de manière qualitative, afin de lister les sources potentielles d'eau à utiliser pour la recharge. Le tracé de ces rivières, canaux, ou réseaux d'eau sélectionnés est ensuite utilisé dans le cadre de l'analyse des coûts (chapitres 6 et 7).

La démarche de sélection des ressources en eau de surface a été menée de manière itérative, les volumes à prélever et la durée de la recharge dépendant de la quantité d'eau disponible dans la ressource à prélever en fonction des saisons, mais également de la réaction de la nappe suite à la recharge (dôme piézométrique). Ces volumes et durées de recharge artificielle ont donc été fréquemment modifiés, en essayant d'inclure les remarques faites par les gestionnaires des différents sites.

L'hypothèse retenue est celle de la mise en place d'un dispositif dans un futur proche. Les données de débit des cours d'eau considérées dans cette analyse correspondent aux moyennes actuelles. Pour des ouvrages d'une longue durée de vie, il conviendra de tenir compte des variations de débits induites par les changements climatiques à l'horizon 2050, voire au-delà.

5.2. VOLUME A RECHARGER ET DOME PIEZOMETRIQUE RESULTANT

Les volumes d'eau (souterraine et de surface) prélevés pour les divers usages (eau potable, agriculture, industries, etc.) sur chacun des sites sont étudiés, puis fixés dans le cadre des SAGE locaux suite aux Études de Détermination des Volumes Prélevables (EVP). Le volume prélevable est défini comme le volume permettant de ne pas recourir à une gestion de crise plus de 2 années sur 10. Ceci revient à définir un volume qui, une fois prélevé, permet le maintien du niveau de la nappe au-dessus des seuils d'alerte fixés. En deçà, des restrictions d'usage sont mises en place. Ces études permettent de connaître les volumes anciennement prélevés, et les obligations imposées par les SAGE en vue de retrouver ou maintenir l'équilibre piézométrique et le bon fonctionnement des milieux aquatiques, ainsi que l'évolution possible de ces obligations dans les années à venir. Elles permettent donc d'avoir une idée du déficit en eau (actuel et/ou à venir) et d'estimer un volume potentiel à recharger afin de pallier ce déficit.

Des EVP ont été réalisées pour de nombreux cours d'eau jalonnant les différents sites étudiés. En revanche, sur les quatre sites retenus, seuls les Sables Astiens disposent d'une EVP évaluant le déficit actuel de la nappe. Plusieurs scénarios d'évolution des prélèvements (pouvant provoquer d'importants déficits à l'avenir) ont été proposés pour les quatre entités sélectionnées. Or, la présente étude s'inscrit dans le cas d'un besoin de recharge artificielle pour pallier le déficit actuel d'une nappe, et suit la démarche de l'Agence de l'Eau selon laquelle la recharge artificielle ne doit pas répondre à des soucis d'augmentation de consommation en eau dans le futur. Sans respect de cette condition, le projet d'installation d'un dispositif de recharge artificielle ne disposera pas des soutiens financiers de l'Agence de l'Eau. De ce fait, il n'est donc pas pertinent

de considérer comme volume à recharger les volumes définis par ces scénarios d'évolution de prélèvements.

Les volumes à recharger ont donc été proposés au titre de simulations préliminaires, en se basant sur les connaissances acquises sur ces quatre entités hydrogéologiques en terme de réserves, de recharge naturelle, et des caractéristiques hydrodynamiques de ces aquifères. Ces volumes ont été testés et modifiés en utilisant la méthode d'Hantush (1967) permettant d'estimer la hauteur et l'étendue du dôme piézométrique créé par l'infiltration de ces volumes d'eau, en considérant la vitesse d'infiltration, la porosité, la perméabilité du terrain, les dimensions du dispositif, la durée de la recharge (§ 5.5), et l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère.

5.2.1. Solution analytique pour le calcul du dôme piézométrique

Dans le choix du volume à recharger et le dimensionnement du dispositif de RA, il est important d'anticiper l'élévation du niveau d'eau de la surface piézométrique de la nappe sous le bassin. La solution de Hantush (1967) pour le développement d'un dôme piézométrique sous un bassin d'infiltration rectangulaire a été utilisée (Illustration 114). Cette solution pose comme hypothèses un aquifère homogène et isotrope de perméabilité K et porosité de drainage Sy, d'une épaisseur saturée initiale égale à hi avec un taux de recharge égal à w. Le bassin est caractérisé par une demi-longueur l et une demi-largeur a.

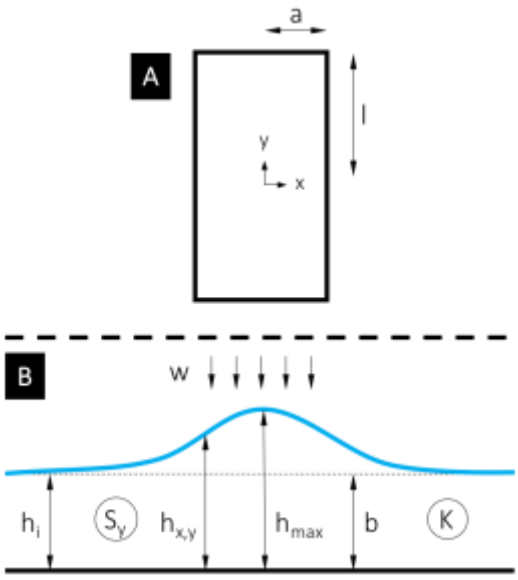


Illustration 114 : (a) Vue en plan d'un bassin d'infiltration de forme rectangulaire, (b) coupe schématique du dôme piézométrique induit par l'infiltration, d'après https://wiki.inowas.hydro.tu-dresden.de/t02-groundwater-mounding-hantush/ .

Plusieurs outils en ligne permettent de résoudre cette équation :

- la plateforme INOWAS permet de visualiser en direct sur le site web la forme du dôme en modifiant les paramètres via des onglets (https://wiki.inowas.hydro.tu-dresden.de/t02-groundwater-mounding-hantush/) ;
- la feuille Excel produite par l'US Geological Survey (Carleton 2010) montre des instabilités numériques et donne des résultats douteux – il est déconseillé de l'utiliser ;
- le « groundwater monding calculator » développé par groundwatersoftware.com (http://www.groundwatersoftware.com/calculator_9_hantush_mounding.htm).

À noter qu'il existe également une solution analytique pour un basin de forme circulaire simulant des résultats très proches pour un bassin d'infiltration de surface équivalente (Warner *et al.* 1989).

Dans le présent rapport, la solution analytique d'Hantush a été utilisée en considérant les caractéristiques moyennes propres à chaque site, dans le but de contrôler si le volume de recharge initialement considéré pour chaque territoire test était cohérent (point le plus haut du dôme restant à plus de deux mètres sous le niveau du sol).

5.2.2. Calcul de dômes piézométriques au droit des territoires test

Les dômes piézométriques générés sous les bassins d'infiltration ont été simulés pour chacun des sites en appliquant la solution analytique de Hantush. Ce calcul permet de vérifier, au vu des connaissances des épaisseurs de zones non-saturées sur l'ensemble des sites, si les dômes induits par les volumes *Vr* infiltrés sur le nombre de jours *Nj* (§ 5.5) prévu sont acceptables ou non, et, le cas échéant, d'adapter ces volumes *Vr* de manière à obtenir des hauteurs maximales des dômes qui soient inférieures aux épaisseurs de zone non-saturée des aquifères concernés.

Les volumes présentés sont ceux ayant été conservés à la suite de cette analyse. La perméabilité *K* est, pour chacun des sites, issue de la moyenne arithmétique de chaque carte de perméabilité utilisée dans la réalisation des cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur bases de critères physiques (§ 4.2.5). De K est déduit i (capacité d'infiltration du terrain) via la formule de Bourguet (1971), citée ci-dessus (§ 4.2.5).

La porosité de drainage *Sy* a été rapportée aux seules données de porosité connues pour chacun des sites (en moyenne, proche de 10 %). Pour le site de Bièvre-Liers-Valloire, pour lequel la donnée n'est pas disponible, il a été choisi de conserver le même ordre de grandeur que celui des trois autres sites, notamment des alluvions de la Figarella, dont les caractéristiques hydrodynamiques sont proches. La superficie des bassins Sb est calculée de la manière suivante :

$$Sb = \frac{Vr}{Nj \times i}$$

La hauteur initiale saturée de l'aquifère a été estimée (1) en calculant, pour chaque site, la moyenne arithmétique de la carte d'épaisseur de la ZNS, (2) en soustrayant la valeur obtenue à l'épaisseur moyenne de chaque aquifère (d'après les données bibliographiques présentées aux § 3.2.3, 3.3.3, 3.4.3 et 3.5.3).

L'ensemble de ces paramètres ont été utilisés pour simuler les dômes piézométriques pour chacun des quatre territoires test (Illustration 115). Les graphiques obtenus présentent les résultats sous forme de demi-dôme dont le sommet est situé à la verticale du point central du bassin d'infiltration (Illustration 116).

Territoire test	*Vr* (Mm³/an)	*K* (m/j)	Porosité efficace *Sy* (%)	*i* (m/j)	*Sb* (m²)	Hauteur initiale aquifère *hi* (m)	*Nj* (j)	Hauteur max. du dôme (m)	Profondeur tête du dôme (m)
Bièvre-Liers-Valloire	5	550	10	6,05	3400	25	243	1,4	18,6
Vistrenque-Costières	1	60	10	1,22	3370	5	243	5,8	4,2
Astien	0,5	8	10	0,27	8630	5	212	12,2	2,8
Figarella	0,5	150	10	2,35	3490	10	61	3,2	6,8

Illustration 115 : Paramètres utilisés dans la solution analytique de Hantush pour calculer le dôme piézométrique.

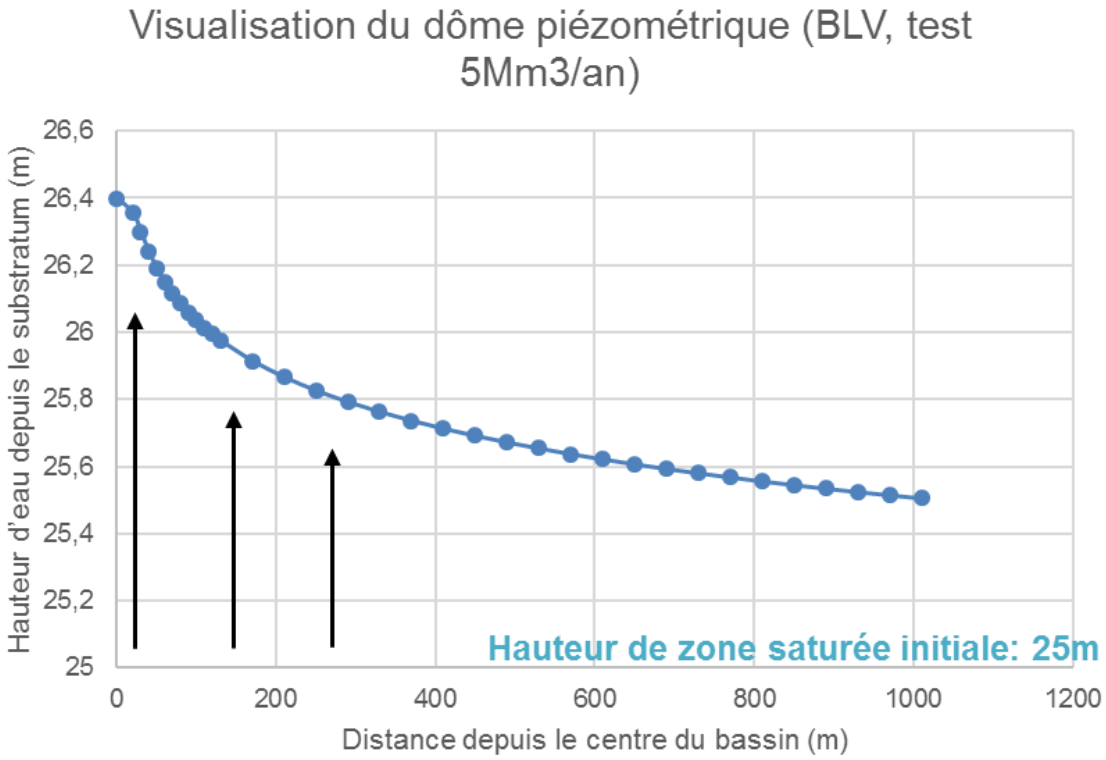


Illustration 116 : Résultat graphique de l'estimation des dômes piézométriques : exemple du site de Bièvre-Liers-Valloire.

5.2.3. Volumes à recharger retenus

Les volumes à recharger retenus pour chacun des sites sont présentées dans l'Illustration 117.

Site (*Entité BDLISA*)	Remarques	Volume à recharger
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (*521AM*)	Grand aquifère (superficie proche de 480 km²), pouvant être assez profond (proche de 100 m en partie amont). Sa recharge naturelle serait de près de 280 Mm³/an.	5 Mm³ / an
Nappes de la Vistrenque et des Costières (*647AA*)	Aquifère de grande superficie (plus de 500 km²), mais peu profond (de 4 à 20 m en moyenne). Sa recharge naturelle serait de près de 100 Mm³/an.	1 Mm³ / an
Sables Astiens d'Agde-Valras (*647AB*)	Grand aquifère (superficie proche de 480 km²), mais seule une petite partie (près de 20 km²) affleure. Épaisseur assez faible (20 m en moyenne). Ses paramètres hydrodynamiques sont moins bons que les autres (perméabilité faible). Sa recharge naturelle est estimée à 9 Mm³/an. Le PGRE (SMETA, 2017) décrit un déficit actuel de 0,2 à 0,4 Mm³/an.	0,5 Mm³ / an
Alluvions de la Figarella (*720CA21*)	Petit aquifère (superficie de moins de 10 km²), d'épaisseur de 15 à 20m. Sa recharge par les précipitations serait de 2,5 Mm³/an (ce chiffre n'intègre pas les apports des cours d'eau, et apports latéraux, non donnés dans la bibliographie). Une étude du BRGM (Farand *et al*., 1991) conseille l'infiltration d'un débit de 50 l/s pour contrer la venue d'un intrant salé.	0,5 Mm³ / an

Illustration 117 : Récapitulatif des volumes à recharger et des études associées à ces estimations.

À noter que si un objectif de recharge plus important voulait être atteint sur un des quatre sites étudiés, une alternative de dimensionnement est de multiplier les bassins de 0,5 à 1Mm3/an jusqu'à obtenir le volume objectif.

En fonction du volume à recharger peuvent alors être choisis les cours d'eau capables de répondre à la demande du point de vue quantitatif, tout en préservant leurs débits réservés ou, si ceux-ci sont indiqués via la réalisation d'Études de Détermination des Volumes Prélevables, leurs Débits Objectifs d'Étiage (DOE).

5.3. QUANTITÉ D'EAU DE SURFACE DISPONIBLE

Le critère Quantité peut être estimé à partir de différentes données :

5.3.1. Données statistiques disponibles sur la Banque Hydro (http://hydro.eaufrance.fr/)

Il s'agit de mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) en provenance d'environ 5000 stations de mesure (dont environ 3 200 sont actuellement en service) implantées sur les cours d'eau français, ainsi que les débits instantanés, journaliers, mensuels, ... calculés à partir des valeurs de hauteur d'eau et des courbes de tarage. Les stations de mesure sont installées, utilisées et maintenues en l'état par différents services et gestionnaires. Il s'agit essentiellement des services de l'État, Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), Direction Départementale des Territoires (DDT), services de prévision des crues, directions départementales de l'agriculture et de la forêt, agences de l'eau, mais aussi d'Électricité de France ou d'organismes de recherche (IRSTEA, universités,...), ainsi que des compagnies d'aménagement (la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne, la Compagnie nationale du Rhône, la Société du canal de Provence, la Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône-Languedoc...). Les données contenues dans la Banque Hydro peuvent être consultées en ligne, mais seules les données de quelques stations peuvent être extraites, dont une partie ayant été abandonnées depuis plusieurs années. Ces stations sont réparties de manière inégale (dépend de l'intérêt du cours d'eau, de ses usages), et ne se trouvent pas sur tous les cours d'eau. Il est donc nécessaire, dans la mesure du possible, de compléter ces données par les informations extraites d'études réalisées récemment sur les cours d'eau des différents sites.

5.3.2. Données obtenues dans le cadre du SDAGE 2016-2021

De nombreuses études ont été réalisées sur les quatre sites sélectionnés en réponse aux exigences des SDAGEs 2010-2015 et 2016-2021, plus précisément dans la mise en place de SAGE locaux (notamment, EVP sur certains cours d'eau). Ces rapports font une synthèse de l'ensemble des données quantité disponibles (base de données, études plus anciennes) des différents cours d'eau des bassins concernés. Des Études des Volumes Prélevables ont également été menées sur certains cours d'eau, permettant la définition de leur débits objectifs d'étiages. Les données tirées de ces rapports permettent de compléter les informations obtenues à partir des données de la Banque Hydro. L'ensemble des informations présentées dans la description des différents sites d'étude (Illustration 42, Illustration 60, Illustration 78 et Illustration 92) concernent les stations de mesures (ou points nodaux, pour les DOE) situées au plus proche ou à l'intérieur des périmètres des sites étudiés lorsque les données disponibles le permettent. Les différentes données relevées sont les suivantes :

- module : débit moyen inter-annuel calculé sur l'année hydrologique sur l'ensemble de la période d'observation de la station. Il donne une indication sur le volume annuel écoulé et donc sur la disponibilité globale de la ressource en eau ;
- QMNA5 : débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5ème de ne pas être dépassée une année donnée, c'est donc la valeur du QMNA telle qu'elle ne se produit, en moyenne, qu'une année sur cinq ou vingt années par siècle. C'est un débit statistique qui donne une information sur la sévérité de l'étiage ;
- débit réservé : débit minimal restant dans le lit naturel de la rivière entre la prise d'eau et la restitution des eaux en aval d'un ouvrage, garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans ces eaux. La loi pêche de 1984 a ensuite fixé de

façon normative le débit réservé au 1/10ème du module pour tout nouvel aménagement, 1/40ème pour les aménagements existants ;

- DOE : valeur de débit moyen mensuel (arrêté dans les SDAGE, SAGE et documents équivalents) au point nodal (point clé de gestion) au-dessus de laquelle, il est considéré qu'à l'aval du point nodal, l'ensemble des usages (activités, prélèvements, rejets, ...) est en équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique.

C'est sur l'ensemble de ces 4 critères que s'appuiera le choix du ou des **cours d'eau** capables de supporter les prélèvements destinés à la recharge artificielle des nappes. Ils devront alors respecter les règles suivantes:

Pour une recharge hors période d'étiage :

$$(Module - Qréservé) > Qrecharge$$

Pour une recharge en période d'étiage :

$$(QMNA5 - Qréservé) > Qrecharge$$

ET

$$(QMNA5 - DOE) > Qrecharge$$

Si une ressource respecte l'ensemble de ces conditions, elle peut être utilisée pour réaliser une recharge toute l'année. Si une ressource ne respecte que la première condition, elle pourra être utilisée toute l'année excepté en période d'étiage. Dans le cas où l'on ne dispose d'aucune ou de trop peu de données concernant un cours d'eau, celui-ci ne sera pas considéré.

Dans le cas des **canaux et réseau d'eau** BRL et OEHC, après discussions avec leurs gestionnaires, il a été choisi dans un premier temps de considérer une utilisation de ces ressources hors périodes d'étiage. En effet, le prélèvement d'eau sur ces ouvrages en période de forts besoins serait susceptible de créer des conflits d'usages. Ce choix a été conservé dans le cas des canaux et réseaux BRL. En revanche, dans le cas des réseaux OEHC, il a été proposé de considérer une recharge artificielle en fin de printemps - début d'été (mois de mai – juin), l'objectif premier de cette recharge étant de contrer l'arrivée d'un intrant salé, phénomène observé en période estivale.

Les ressources en eau de surface considérées et les calculs réalisés pour chaque site sont présentés en Annexe 12. Les ressources en eau de surface retenues suite aux analyses de quantité et de qualité sont présentées en partie 5.6.

5.4. LA QUALITE DE L'EAU DE SURFACE

Le critère Qualité peut être estimé à partir de différentes données :

5.4.1. La banque de données Qualité des cours d'eau des Agences de l'Eau

Pour le bassin RMC, ces données sont accessibles via le site suivant : http://sierm.eaurmc.fr/surveillance/eaux-superficielles/index.php. Les données Qualité sont relevées par le biais de 2 types de réseau :

- un réseau de contrôle de surveillance (pérenne) qui doit permettre d'évaluer l'état général des eaux à l'échelle de chaque district et son évolution à long terme ;
- un contrôle opérationnel (non pérenne) dont l'objectif est d'établir l'état des masses d'eau superficielles identifiées comme risquant de ne pas atteindre leurs objectifs environnementaux et d'évaluer les changements de l'état de ces masses d'eau suite aux actions mises en place dans le cadre du programme de mesures (surveillance des seuls paramètres à l'origine du risque de non atteinte des objectifs environnementaux).

La maîtrise d'ouvrage de ces réseaux est assurée par l'Agence de l'eau RMC, les DREAL du bassin Rhône-Méditerranée et l'Agence Française de la Biodiversité.

De la même manière que pour les données Quantité de la Banque Hydro, les données Qualité des cours d'eau sont peu exhaustives, du fait d'une répartition inégale des stations de mesures et qu'elles ne se trouvent pas sur tous les cours d'eau, mais aussi des paramètres mesurés pouvant varier d'une station à l'autre. Il est donc difficile d'utiliser ces informations pour réaliser une carte complète du critère Qualité sur l'ensemble des cours d'eau des 4 sites sélectionnés. En revanche, ces données ont été utilisées afin d'établir un état des lieux des masses d'eaux dans le cadre du SDAGE 2016-2021, permettant une généralisation des informations récoltées à l'échelle de cours d'eau, tronçons de cours d'eau, lacs, eaux de transition (étangs saumâtres méditerranéens, par exemple), et masses d'eau côtières, pour les bassins Rhône Méditerranée et Corse.

5.4.2. Les données de référence du SDAGE 2016-2021 sur l'état des milieux

Dans le cadre de la mise en place du SDAGE 2016-2021 un état des lieux de la qualité écologique et chimique des eaux de surface a été réalisé. Ces informations sont disponibles sur le site suivant pour le bassin Rhône-Méditerranée[10] et le bassin Corse[11]. Cet état des lieux permet de savoir si les masses d'eau de surface sont en état écologique Très Bon, Bon, Moyen, Médiocre ou Mauvais, et en état chimique Bon ou Mauvais. Cette caractérisation a été réalisée à partir de données allant de 2004 à 2013 (en fonction de la masse d'eau étudiée), résultant de mesures de différents paramètres. D'après le site EauFrance (www.eaufrance.fr) :

- **l'état écologique** de la masse d'eau de surface résulte de l'appréciation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés à cette masse d'eau. Il est déterminé à l'aide d'éléments de qualité : biologiques (espèces végétales et animales), hydromorphologiques et physico-chimiques (pH, turbidité, température, oxygène dissous, nutriments, etc.), appréciés par des indicateurs (par exemple les indices invertébrés ou poissons en cours d'eau) ;
- **l'état chimique** d'une masse d'eau de surface est déterminé au regard du respect des normes de qualité environnementales (NQE) par le biais de valeurs seuils. 41 substances sont contrôlées : 8 substances dites dangereuses (annexe IX de la DCE) et 33 substances prioritaires (annexe X de la DCE).

Ces informations permettent d'avoir une idée générale de l'état écologique et chimique des masses d'eau superficielles, et de sélectionner la ou les plus adaptées à la recharge artificielle en terme de qualité de l'eau sur chacun des sites étudiés.

[10] http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion/sdage2016/donnees-techniques.php

[11] http://siecorse.eaurmc.fr/gestion-eau/dce-sdage-2016-2021/documents-techniques.php

Sont alors retenues les masses d'eau de surface dont :

- **le paramètre Physico-Chimie de l'état Écologique est Très Bon, Bon, voire Moyen** (pas prise en compte des paramètres biologiques et hydromorphologiques, qui importent peu dans le choix de la source d'eau la plus apte à être rechargée) ;
- **l'état Chimique est Bon**.

L'était Physico-chimique Moyen a été conservé, dans le sens où les seuils considérés par l'Agence de l'Eau pour attribuer aux eaux de surface ces appréciations sont basés sur la vie des organismes aquatiques dans ces eaux, seuils plus stricts que ceux considérés acceptables pour une utilisation par l'homme.

Cas particuliers des canaux et réseau d'eau (BRL, OEHC) : les canaux et réseaux BRL intégrés à cette étude sont alimentés par l'eau du Rhône, ainsi que de l'Orb (pour Aquadomitia seulement). De fait, les résultats des analyses réalisées sur ces 2 ressources, publiées par BRL en 2017, ont été utilisées pour décider de la conservation de ces canaux et réseaux. Le réseau d'eau brute OEHC de la vallée de la Figarella est actuellement alimenté par la Figarella hors période estivale, et le lac de Codole en période estivale. Il convient donc de se référer aux données de référence du SDAGE pour ces 2 masses d'eau de surface. À terme, la création de la retenue de Sambuccu devrait permettre une alimentation du réseau d'eau brute par les eaux de la Figarella en période estivale également.

Les eaux de surface sans données relatives à leur qualité n'ont dans l'ensemble pas été considérées, ces dernières ne disposant pas de données quantitatives pour la plupart, où présentant des débits trop faibles pour permettre une recharge satisfaisante.

Les ressources en eau de surface considérées et la démarche menée pour chaque site sont présentés en Annexe 13. Les ressources en eau de surface retenues suite aux analyses de quantité et de qualité sont présentées au chapitre 5.6.

5.5. NOMBRE DE JOURS DE RECHARGE ET DEBIT DE RECHARGE INSTANTANE

Selon la disponibilité de la ressource d'eau de surface utilisée ou selon la variation de la qualité de cette eau, le nombre de jours durant lesquels le bassin d'infiltration sera en état de marche peut être inférieur à 365 j/an. En effet, en période de basses eaux, le débit naturel s'écoulant dans le cours d'eau concerné peut ne pas permettre de prélèvement sans outrepasser le débit minimal requis. De même, durant des périodes de crue, la qualité de l'eau (turbidité) peut temporairement se dégrader, empêchant l'utilisation de la ressource durant quelques jours. Les durées de recharge ont été fixées en prenant en considération les débits disponibles et les besoins en fonction de la période de l'année. Elles ont été discutés avec les gestionnaires des différents sites, testés et validés via la méthode d'Hantush (§ 5.2). Le nombre de jours de recharge Nj retenu pour chaque territoire test est présenté en Illustration 118.

Territoire test	Nombre de jours Nj (jours/an)	Raison	Débit instantané (l/h)
Bièvre-Liers-Valloire	243	Pas en période estivale car le volume prélevé ne permet pas de maintenir les débits objectifs d'étiage et débits réservés des cours d'eau ciblés. Concernant les canaux et réseau d'eau (BRL), la période estivale est également exclue afin d'éviter tout conflit d'usage. Pour les Sables astiens, 1 mois supplémentaire a été retiré, à la demande de l'AERMC.	857.10^3
Vistrenque-Costières	243		171.10^3
Astien	212		98.10^3
Figarella	61	Normalement, pas de recharge en été pour éviter les conflits d'usage. Mais intrusion saline en été. En compromis, recharge imaginée en mai-juin.	342.10^3

Illustration 118 : Nombres de jours de remplisage de chacun des bassins et débit d'infiltration résultant.

De manière générale, il s'avèrerait possible d'effectuer une recharge sur toute l'année, hors période estivale (de juin à septembre inclus) de manière à respecter les débits réservés ou débits objectif d'étiage fixés, ou à éviter tout conflit d'usage dans le cas où l'eau serait prélevée en canaux ou réseau d'eau (BRL). Concernant les alluvions de la Figarella, la ressource considérée est le réseau d'eau brute de l'OEHC (pas sur le réseau AEP qui ne dispose pas de marge de manœuvre quant à sa débitance). L'une des problématiques à laquelle la recharge artificielle dans ce secteur pourrait répondre serait d'aider à contrer les intrants salés. Ces phénomènes ayant lieu en période estivale, et au vu des propriétés de l'aquifère alluvial (très transmissif), cela nécessiterait de réaliser une recharge artificielle en été. Une recharge pourrait alors être envisagée en période Mai-Juin (début de période estivale), mais il conviendra de s'assurer que le débit nécessaire à la recharge artificielle permette de fournir les débits d'ores et déjà alloués aux autres usages, au cours de ces deux mois.

5.6. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE RETENUES

Le nombre de ressources considérées par site va de 1 (réseau d'eau brute de l'OEHC pour les alluvions de la Figarella) à 5 (Vidourle, 3 canaux BRL et réseau d'eau brute gardois BRL, pour les nappes de la Vistrenque et des Costières). Le tableau ci-dessous (Illustration 119) récapitule les ressources retenues et décrit les raisons de leur sélection. Il est important de noter que l'évolution de la qualité de ces eaux au cours d'une année n'a pas été prise en considération, ni la possible occurrence d'une pollution ponctuelle liée aux activités dans le bassin versant de ces ressources.

Territoire test	Volumes objectifs de RA	Ressources potentielles	Critère Quantité	Critère Qualité	
				Physico-chimique	Chimique
Bièvre-Liers-Valloire	5 Mm³/an sur 243 j	Le Rival / La Raille	Possible hors période estivale	Moyen	Mauvais (mais amélioration depuis)
		Les Collières	Possible hors période estivale	Moyen	Bon
Vistrenque et Costières	1 Mm³/an sur 243 j	Le Vidourle	Possible hors période estivale	Bon	Bon
		Canaux BRL (Lamour, Costières, Campagne) et réseaux d'eau brute gardois BRL (provenance: Rhône)	Hors période estivale (éviter les conflits d'usage : AEP, irrigation)	D'après analyses BRL (2017b): aucune non-conformité n'a été détectée pour des eaux brutes à potabiliser	
Sables astiens	0,5 Mm³/an sur 212 j	L'Hérault	Possible hors période estivale	Bon	Bon
		L'Orb	Possible hors période estivale	Bon	Bon
		Réseau Aquadomitia BRL (provenance: Rhône et Orb)	Hors période estivale (la totalité du débit en période estivale est déjà allouée à d'autres usages)	D'après analyses BRL (2017a et b): aucune non-conformité n'a été détectée pour des eaux brutes à potabiliser	
Alluvions de la Figarella	0,5 Mm³/an sur 61 j	Réseau d'eau brute OEHC (provenance: Figarella)	Hors période estivale (éviter les conflits d'usage : AEP, irrigation)	Non spécifié. Mais état écologique Très bon.	Bon
		Réseau d'eau brute OEHC (provenance: Lac de Codole)	Hors période estivale (éviter les conflits d'usage : AEP, irrigation)	Non spécifié. Mais état écologique Moyen.	Bon

Illustration 119 : Tableau récapitulatif des ressources en eau de surface conservées pour chaque site.

Remarque au sujet de l'Oron (Bièvre-Liers-Valloire) : son débit pourrait être suffisant pour le volume de recharge prévu. En revanche, sa qualité (état écologique : moyen (dont état physico-chimique moyen) ; état chimique : mauvais) l'a exclu de l'analyse. Le Rival, dont les débits sont moins intéressants que l'Oron (bien que permettant de recharger les volumes souhaités) et la qualité similaire, a été intégré suite aux remarques des gestionnaires et aux volontés des associations locales. Initialement, aucun intérêt particulier n'avait été porté sur l'Oron. La question de l'intégrer éventuellement à l'étude a été posée en fin de projet (4ème Comité de suivi du 27 novembre 2018). Par ailleurs, la plaine de Valloire (où s'écoule l'Oron) est également recoupée par les Collières (débit intéressant et bonne qualité), qui ont été conservées. De ce fait, l'Oron n'a pas été considéré dans l'analyse.

6. Dimensionnement des dispositifs de recharge indirecte

Notation des paramètres de dimensionnement :

Vr et *Qr* : Volume (Mm^3/an) ou débit (m^3/h) objectif de recharge

Vrm et *Qrm* : Volume (Mm^3/an) / débit (m^3/h) de recharge majoré en prenant en compte les pertes en bassin d'infiltration = Vr et Qr si pas de pertes considérées

Nj : Nombre de jours de remplissage du bassin d'infiltration par an (j/an), prenant en compte la disponibilité de la ressource en eau de surface

Qrm_bass : Débit (m^3/h) de remplissage des bassins durant *Nj*/an

Sb : Superficie totale du bassin d'infiltration (m^2)

Sbm : Superficie du bassin majorée (avec périmètre alentour) (m^2)

D : Distance entre le point de pompage dans la ressource et la zone d'infiltration (m)

i : Vitesse/taux d'Infiltration de l'eau dans le bassin (m/j)

Kh : Perméabilité horizontale (m/s ou m/j)

H : Hauteur de relevage (différentiel d'altitude), en m

HTM : Hauteur manométrique (m)

di : Diamètre (intérieur) de la canalisation de transfert d'eau (mm)

$\alpha_{évapo}$: Coefficient d'évaporation des bassins d'infiltration

α_{addu} : Coefficient de perte d'adduction d'eau

6.1. INTRODUCTION

La cartographie réalisée sur la base des critères physiques et de contraintes (chapitres précédents) permet une hiérarchisation des secteurs les plus favorables au sein des territoires test retenus pour cette étude. Il convient par ailleurs de dimensionner ces dispositifs en fonction d'un objectif de volume annuel de recharge, des caractéristiques de la ressource en eau de surface utilisée et des propriétés physiques du territoire. Ce dimensionnement concerne plusieurs étapes d'un processus de recharge artificielle pris dans son ensemble (Illustration 120): de la prise d'eau au bassin d'infiltration en passant par la canalisation de transfert.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une solution technique de référence pour chacun des territoires test et par la suite une solution référence afin d'alimenter l'analyse économique conduite dans le chapitre suivant. Les paramètres principaux de dimensionnement du dispositif de recharge sont décrits ci-dessous (Illustration 120) :

- le volume objectif de recharge (décrit en § 5.2), incluant la notion de dôme piézométrique induit par l'infiltration d'eau ;
- la superficie du bassin d'infiltration, établie à partir de :
  - La vitesse d'infiltration, qui est fonction des caractéristiques du sous-sol (§ 4.2.5),
  - Le nombre de jour de recharge par an (§ 5.5),
  - Les pertes par évapotranspiration (au droit du bassin) ;
- le débit de transfert et en conséquence la taille de la canalisation.

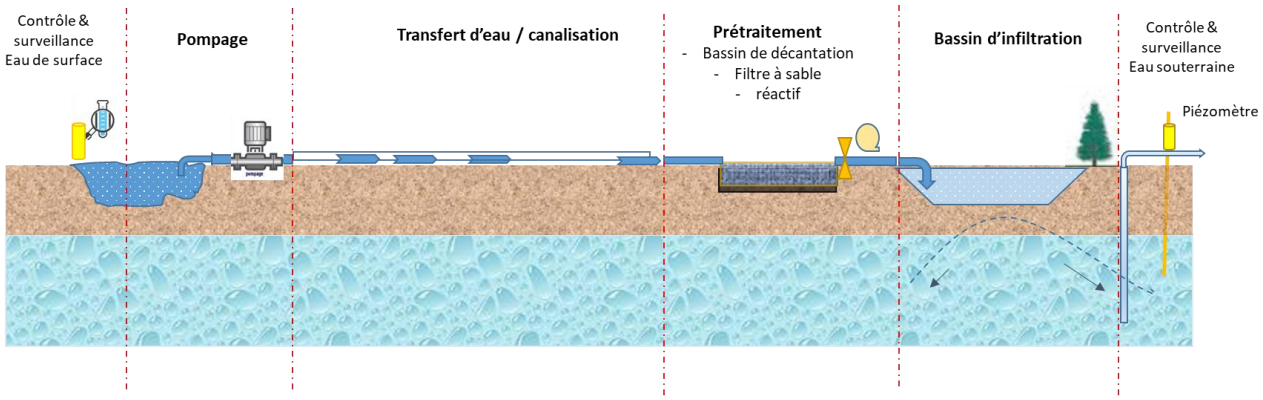


Illustration 120 : Schéma simplifié d'un dispositif type de recharge artificielle par bassin d'infiltration.

Ces paramètres de dimensionnement sont estimés pour chacun des territoires test. Afin d'extraire les données spatialisées (*i, D, H*, etc.), un maillage de 50 m * 50 m a été réalisé sur chacun des quatre territoires test afin d'estimer en chacune de ces mailles le dimensionnement du dispositif de recharge artificielle, utile à l'établissement des cartes de coûts (§ 7).

6.2. SUPERFICIE DES BASSINS D'INFILTRATION ET DEBITS DE RECHARGE

La superficie totale des bassins d'infiltration (*Sb*) est estimée en fonction du volume objectif de recharge (Vr tel que défini précédemment) et majoré (*Vrm*) par les pertes par évapotranspiration (α_{Evapo}), de la vitesse d'infiltration dans l'aquifère et du nombre de jours de remplissage du bassin :

$$Sb\ (m^2) = Vrm\ (m^3/an) / [i\ (/m/j) * Nj\ (j/an)]$$

Avec $Vrm = Vr\ (1+ \alpha_{Evapo})$

6.2.1. Vitesse apparente d'infiltration (*i*)

La capacité d'infiltration d'un bassin est le volume d'eau qui s'infiltre dans le sol par unité de surface et de temps ($m^3/j/m^2$), assimilable à une vitesse d'un point de vue dimensionnel : la vitesse apparente d'infiltration exprimée en mètres par jour.

Cette caractéristique du sol et du sous-sol est essentielle pour le dimensionnement d'un bassin d'infiltration. En effet, la surface nécessaire pour infiltrer le volume objectif annuel est inversement proportionnelle à la vitesse d'infiltration. Malheureusement, cette donnée n'est pas disponible de façon distribuée sur le territoire français. De manière à être en mesure d'approcher au mieux cette caractéristique du sous-sol (Illustration 121), il a été choisi d'utiliser la relation empirique obtenue par Bourguet (1971) entre la vitesse d'infiltration *i* et la perméabilité horizontale de l'aquifère (disponible sur les territoires test) selon la relation suivante citée par Detay (1997) :

$$Log\ i = 0{,}746\ Log\ Kh - 1{,}25$$

Avec i la vitesse apparente moyenne d'infiltration (10^{-5} m/s) et *Kh* la perméabilité horizontale de l'aquifère (10^{-5} m/s) (§ 4.2.5).

Sur l'Illustration 121, les droites supérieure et inférieure (écart-types) permettent d'encadrer 68 % de la population des sites considérés dans l'étude de Bourguet (1971). D'après les cartes de vitesse d'infiltration obtenues à partir des cartes de perméabilité *Kh* décrites en § 4.2.5, les gammes de valeurs sont très différentes en fonction du territoire test considéré. Les sables astiens (en orange) se positionnent sur une gamme de perméabilités (et vitesses d'infiltration résultantes) faibles. Les bassins nécessaires à infiltrer un volume donné seront plutôt vastes. Les sites de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire (en vert) et des nappes de la Vistrenque et des Costières (en bleu) montrent une très forte variabilité de la perméabilité induisant une très forte variabilité de la vitesse d'infiltration attendue, contrairement aux alluvions de la Figarella (en rose), où la gamme de valeurs est plus restreinte. De manière générale, et en observant les perméabilités (et donc vitesse d'infiltration) moyennes de chaque site, on a K Bièvre-Liers Valloire > K Figarella > K Vistrenque et Costières > K sables astiens.

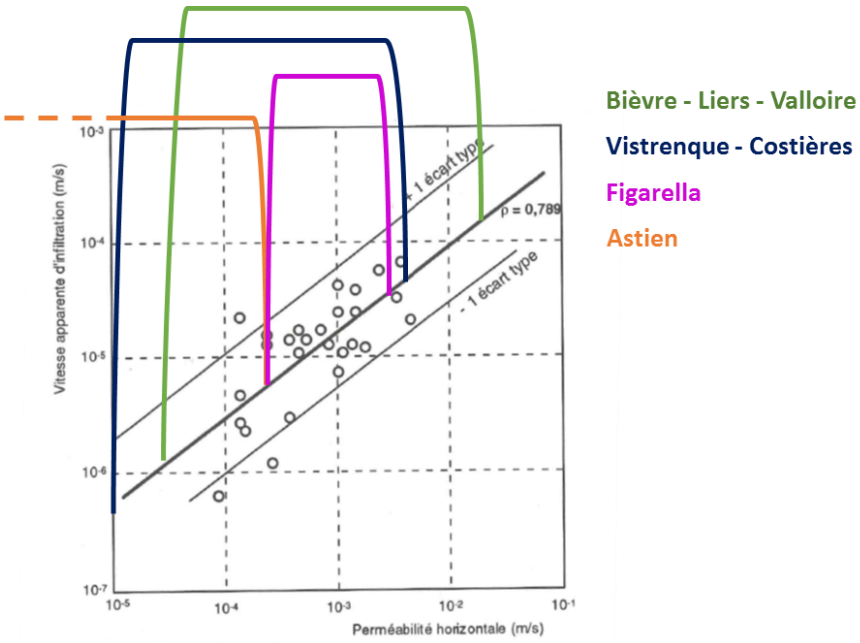


Illustration 121: Relation empirique observée entre vitesse apparente d'infiltration et la perméabilité horizontale, tiré de Detay (1997) d'après Bourguet (1971).

Les valeurs obtenues sur les différents sites en utilisant les perméabilités tirées de la littérature et de modèles existants sur chacun des sites sont résumées en Illustration 122. On notera que les valeurs estimées sur le site de Bièvre-Liers-Valloire sont particulièrement élevées. Dans tous les cas, une étude de faisabilité intégrant des essais d'infiltration est nécessaire pour préciser ces ordres de grandeur.

Sites d'étude	i_{min} (m/j)	i_{moy} (m/j)	i_{max} (m/j)
Bièvre Liers Valloire	0,096	6,05	17,88
Vistrenque-Costières	0,053	1,22	5,74
Astien (affleurements)	0,0504	0,27	0,6159
Figarella	0,61	2,35	4,86

Illustration 122 : Vitesses d'infiltration apparentes obtenues au moyen de la relation empirique de Bourguet (1971).

6.2.2. Pertes par évaporation dans les bassins d'infiltration (α_{Evapo})

Une partie de l'eau amenée dans le bassin d'infiltration est perdue par évaporation. En première approximation, il peut être considéré que l'évaporation sur la lame d'eau que constitue le bassin est égale à l'évapotranspiration potentielle de la zone considérée. Pour

chaque territoire test, les évapotranspirations potentielles moyennes interannuelles des mailles Safran recouvrant la zone d'intérêt ont été pondérées au prorata de leur superficie sur la période 1958-2014 (Illustration 123).

Territoire test	Evapotranspiration potentielle annuelle (mm/an)	Infiltration moyenne (m/j)	Rapport évaporation/infiltration (α_{Evapo})
Bievre-Liers-Valloire	678	6,05	0,03%
Vistrenque-Costières	1146	1,22	0,26%
Astien (affleurements)	1050	0,27	1,05%
Figarella	1052	2,35	0,12%

Illustration 123 : Évapotranspiations potentielles annuelles moyennes des quatre territoires test sur la période 1958-2014.

Les superficies des bassins correspondants sont indiquées à l'Illustration 128. La comparaison des volumes évaporés avec les volumes rechargés montre que les pertes par évaporation sur la surface du bassin d'infiltration sont très faibles voire négligeables, toujours égales ou inférieures à 1 %. De ce fait, elles ne sont pas prises en compte dans le dimensionnement du dispositif et l'analyse des coûts, α_{Evapo} est donc supposé égal à 0.

6.2.3. Flux de la nappe vers les cours d'eau en fonction de la distance au cours d'eau

Dans le cas où la nappe rechargée est en connexion avec les cours d'eau s'écoulant sur la formation aquifère, une partie plus ou moins importante des volumes rechargés peut s'écouler (plus ou moins rapidement) vers les cours d'eau (Illustration 124). En fonction de la problématique à laquelle la recharge artificielle répond, l'importance du ratio volumes alimentant les cours d'eau/volumes stockés en nappe (à un temps *t*, ici pris à *Nj*, durée de la recharge) peut être problématique. En effet, dans le cas où la recharge artificielle doit permettre de palier un déficit quantitatif ou une pollution en nappe, il est préférable de limiter au maximum ce ratio (cas des sites de Bièvre-Liers-Valloire, nappes de la Vistrenque et des Costières, et sables astiens de Valras-Agde). Dans le cas des alluvions de la Figarella, l'intrant salé étant en grande partie lié au tarissement du cours d'eau de la Figarella, le fait qu'une partie des volumes rechargés aille au cours d'eau contribuerait à repousser l'intrant salé.

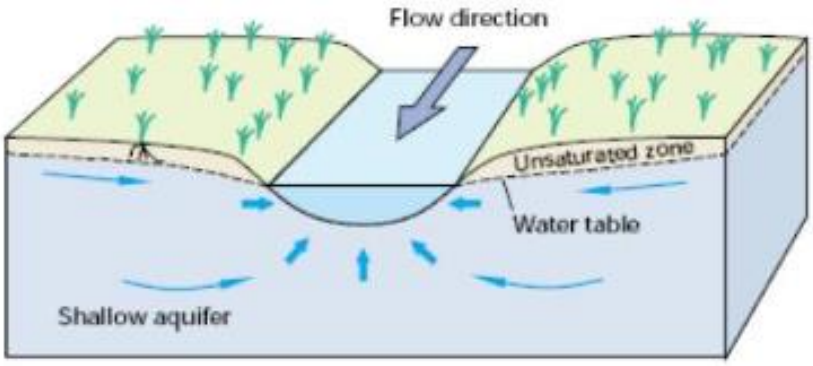


Illustration 124 : Schéma explicatif de l'alimentation d'un cours d'eau par une nappe (source : http://sigessn.brgm.fr).

L'importance de ces volumes rechargés s'écoulant vers un cours d'eau peut être estimée en s'appuyant sur la méthode de Hantush (1967), utilisée pour estimer les hauteurs de dômes piézométriques en § 5.2 en l'adaptant au cas d'une limite alimentée que constitue un cours d'eau (Illustration 125). Ce ratio s'écrit :

$$\frac{\Delta q}{Q} = erfc\left(\sqrt{\frac{S_y d^2}{4Kh_i t}}\right)$$

Où *Q* désigne le débit d'infiltration dans le bassin et Δq le débit qui s'écoule à la rivière, le reste étant stocké dans l'aquifère. Cette solution est valable quand la largeur du bassin (la largeur est perpendiculaire au tracé du cours d'eau) est petite devant la distance au cours d'eau *d*.

Le ratio est fonction de plusieurs paramètres :

- la porosité *Sy* de la formation aquifère (%) ;
- la distance *d* entre le cours d'eau et la zone de recharge (m) ;
- la perméabilité de la fonction aquifère *K* (m/j) ;
- la hauteur de la zone saturée de l'aquifère *hi* (m) ;
- la durée *t* de la recharge qui peut être approximée par *Nj* (jours).

Il est intéressant de noter que le ratio $^{\Delta q}/_{Q}$ est indépendant du débit d'infiltration dans le bassin, ainsi que des dimensions de ce bassin. Cela signifie qu'augmenter la taille du bassin d'infiltration pour réduire la hauteur du dôme piézométrique induit sous le bassin ne contribue pas à réduire les fuites d'eau vers la rivière.

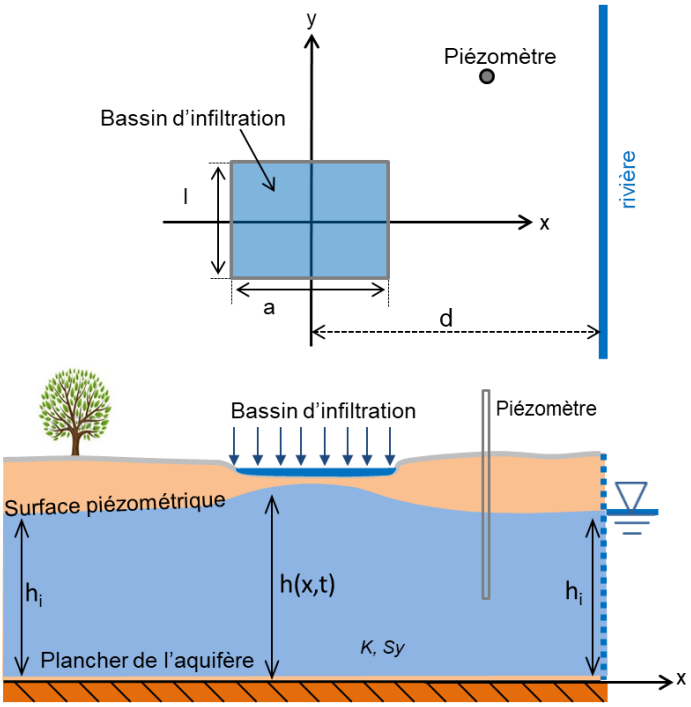


Illustration 125 : Schéma d'un dispositif de recharge indirecte situé à une distance d'une rivière.

La relation analytique utilisée ci-dessus, intégrant une recharge par bassin, est critiquable, dans le sens où :

- elle ne prend pas en considération le degré d'importance des échanges nappe-rivière (considère que les cours d'eau sont en connexion totale avec la nappe), d'autant que ces derniers ne sont pas toujours connus ;
- elle ne prend en compte l'existence que d'une seule rivière à proximité de la zone de recharge (le calcul n'est pas influencé par la présence d'autres rivières proches du même secteur) ;
- dans le cas des sables astiens, elle considère une alimentation directe des cours d'eau situés sur ou à proximité des zones affleurantes, et non l'alimentation de leur aquifère alluvial comme c'est le cas en réalité.

Dans l'hypothèse (forte) d'un aquifère homogène et isotrope, les résultats des taux de flux infiltrés qui repartent à la rivière (qui exprime l'inverse du rendement du dispositif si l'objectif est de recharger durablement l'aquifère) à la fin de la période de recharge ($t = Nj$) obtenus sont les suivants :

	Durée	Flux faibles (rendement élevé)	Flux modérés (rendement moyen)	Flux élevés (rendement faible)	Flux très élevés (rendement très faible)
Ratio	***Nj***	**0 – 10 %**	**10 - 20 %**	**20 – 50 %**	**> 50 %**
Distance (BLV)	243 j/an	> 9500 m	9500 – 6950 m	6950 – 3120 m	< 3120 m
Distance (Vistrenque)	243 j/an	> 1400 m	1400 – 1030 m	1030 – 460 m	< 460 m
Distance (Astien)	212 j/an	> 480 m	480 - 350	350 – 160 m	< 160 m
Distance (Figarella)	61 j/an	> 1570 m	1570 – 1150 m	1150 – 520 m	< 520 m

Illustration 126 : Ratios volumes alimentant les cours d'eau/volumes stockés en nappe par tranche de distances par rapport aux cours d'eau, pour les quatre territoires test.

Des cartes ont pu être créées à partir de ces résultats afin de visualiser les secteurs où il serait préférable ou non d'installer un dispositif de recharge artificielle du point de vue de ce critère (Illustration 127). Les cours d'eau considérés sont les Masses d'Eau de Surface listées dans les données de référence du SDAGE 2016-2021. Aucune carte n'a été créée pour le site de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire, du fait de la déconnexion d'un grand nombre de cours d'eau de la nappe (notamment en plaine de Valloire) ou de l'importante profondeur de la nappe, rendant les cours d'eau connectés à la nappe perdants. Aucune carte n'a également été créée pour les affleurements de sables astiens, ceux-ci n'étant pas en relation directe avec les cours d'eau, mais avec leurs aquifères alluviaux.

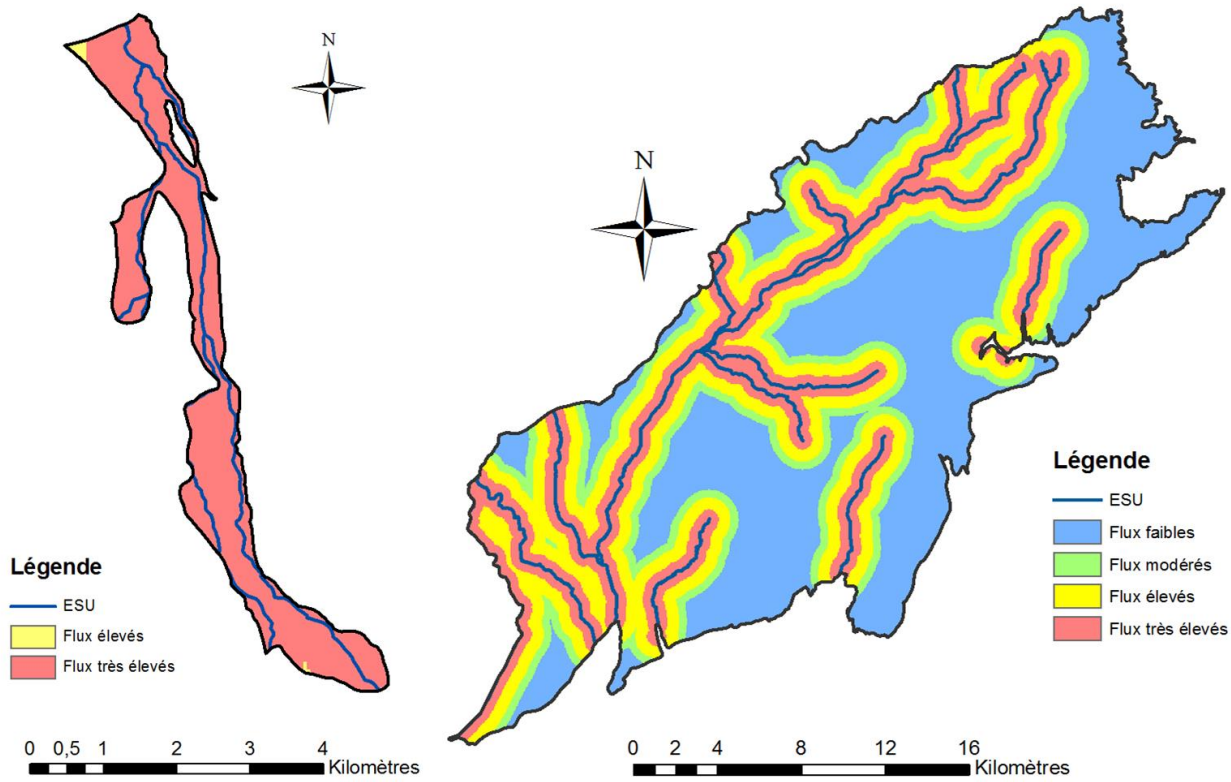


Illustration 127 : Carte d'importance du ratio volumes alimentant les cours d'eau/volumes stockés en nappe par tranche de distances par rapport aux cours d'eau, pour les alluvions de la Figarella (gauche), et les nappes de la Vistrenque et des Costières (droite.)

Ces cartes n'ont pas été prises en compte dans l'analyse cartographique de faisabilité de la RA, dans le sens où il s'agit d'une première approche de la notion de « pertes » de volumes rechargés en cours d'eau. La réalisation de modèles numériques distribués permettant une spatialisation des critères hydrodynamiques nécessaires à ce calcul ainsi qu'une meilleure connaissance de l'importance des échanges nappes/rivières sont nécessaires pour appréhender de manière plus précise ce phénomène. De ce fait, ce critère n'a pas été considéré dans le dimensionnement du dispositif et l'analyse des coûts.

6.2.4. Estimation des superficies des bassins d'infiltration

Considérant les différents paramètres ainsi estimés (moyennes), les superficies des bassins sont calculées pour chacun des territoires test :

Sites/ nappe visées par la RA	*Qrm* (Mm^3/an)	*i* moyen (m/j)	*Nj* (j/an)	*Sb* (m^2)
Plaine de BLV	5	6,05	243	3 401
Vistrenque et Costières	1	1,22	243	3 373
Sables astiens	0,5	0,27	212	8 627
Alluvions de la Figarella	0,5	2,35	61	3 488

Illustration 128 : Estimation des superficies moyennes de bassins d'infiltration pour les quatre territoires test avec i moyen calculé à partir des cartes d'infiltration issues des cartes de perméabilité pour chaque site.

Afin de prendre en considération les abords des bassins (périmètre de protection), leur superficie est majorée de 10 % (taux défini arbitrairement) :

$$Sbm = 1{,}1\ Sb$$

6.3. TRANSFERT DE L'EAU ET DEBIT DE PRELEVEMENT

Le dimensionnement de l'infrastructure de transfert et de prélèvements d'eau de recharge sera notamment fonction de la localisation des bassins d'infiltration. Les paramètres intervenant dans son dimensionnement sont explicités ci-dessous.

6.3.1. Distance entre point de pompage et bassin d'infiltration (*D*)

Ce paramètre peut être défini suivant les réseaux routiers. Par simplification, il est défini comme la distance linéaire entre (Illustration 129) :

- le point le plus proche de la ressource en eau de surface sélectionnée (point de pompage) ;
- le centre de chaque maille constituant les quatre territoires test (zone où pourrait être installé un bassin d'infiltration).

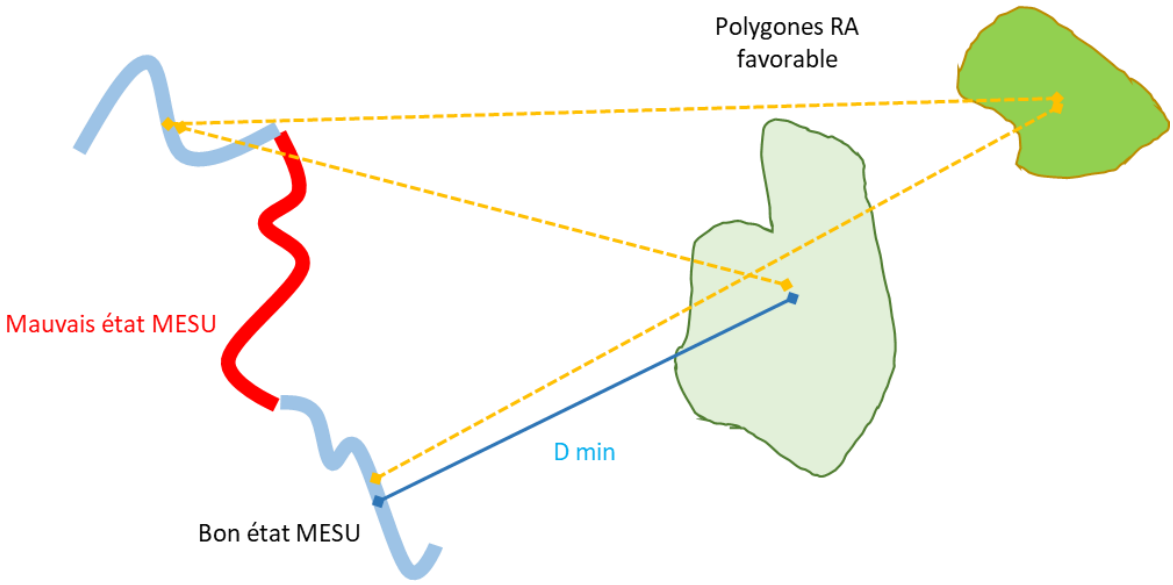


Illustration 129 : Définition du paramètre D.

Le paramètre D est ainsi estimé sous SIG pour chaque maille des zones favorables de la cartographie. Pour chacun des sites les distances min et max sont présentées dans le tableau suivant :

Sites/ nappe visées par la RA	Rivières	*Dmin*	*Dmoy*	*Dmax*
Bièvres – Liers – Valloire	Rival/Raille	2	6596	20520
	Collières	3	9821	31798
Vistrenque et Costières	Vidourle	2	18157	38549
	Canal P. Lamour BRL	1	7118	22051
	Canal des Costières BRL	1	8641	28124
	Canal de Campagne BRL	4	7863	24420
	Réseau d'eau brute gardois (>400mm) BRL	0	843	4486
Sables astiens	Hérault	365	11145	19623
	Orb	2326	17523	29483
	Réseau AquaDomitia BRL	0	1709	5325
Alluvions de la Figarella	Réseau d'eau brute OEHC	0	498	1332

Illustration 130 : Estimation des distances maximale (en m) entre le linéaire des eaux de surface et les zones potentielles de recharge artificielle.

En général, le linéaire d'adduction doit être inférieur à 10 km (seuil approximatif)[12], néanmoins par la suite de l'analyse aucune distance minimale n'a été prédéfinie (celle-ci est prise en compte implicitement dans l'analyse de coûts du chapitre suivant).

6.3.2. Hauteur manométrique (*HTM*)

Le transfert d'eau de la source potentielle jusqu'au bassin d'infiltration peut être réalisé par adduction gravitaire (sans pompes de relevage) ou sous pression (avec pompage) (Illustration 131).

Une hauteur de relevage (H) est calculée par le différentiel de l'élévation (ou altitude) entre le point de pompage de la source d'eau et le bassin d'infiltration (Illustration 132) :

H (m) = Zrivière - Zbassin

Les élévations sont estimées directement sous SIG pour :

- *Zrivière* : MNT centre de la maille (50 x 50 m) ;
- *Zbassin* : MNT point de rivière (un point tous les 100 m du tronçon de rivière).

[12] Le projet DINA-MAR (Escalante, 2010) considère une distance maximale de transfert de 5 km. Une majoration à 10 km est proposée à titre indicatif.

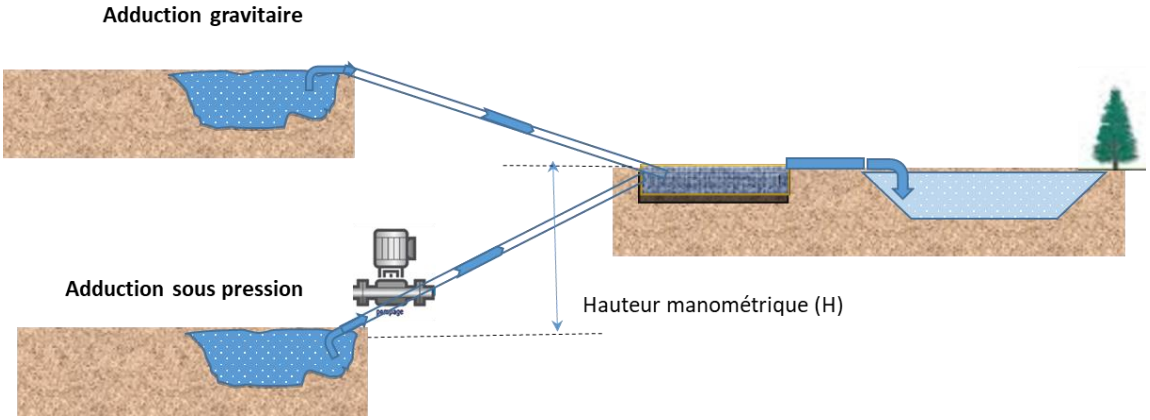


Illustration 131 : Définition du paramètre de relevage H.

Sites	Rivières	H min	H moy	H max
Bièvres – Liers – Valloire	Rival/Raille	-252	-13	127
	Collières	-286	-39	85
Vistrenque et Costières	Vidourle	-143	-37	18
	Canal P. Lamour BRL	-123	-32	30
	Canal des Costières BRL	-76	24	93
	Canal de Campagne BRL	-70	30	95
	Réseau d'eau brute gardois (>400mm) BRL	-68	-1	86
Sables astiens	Hérault	-113	-29	16
	Orb	-111	-33	2
	Réseau AquaDomitia BRL	-65	12	56
Alluvions de la Figarella	Réseau d'eau brute OEHC	-26	6	37

Illustration 132 : Estimation du paramètre H (en m) pour les quatre sites.

Le paramètre *H* intervient notamment dans l'estimation des consommations énergétiques et son coût. Si *H* est positive, le coût énergétique sera nul (adduction gravitaire). Pour les valeurs de *H* négatives, une hauteur manométrique (*HMT*) est alors calculée.

La HMT est définie comme la pression totale que doit fournir une pompe, exprimée en mètres de colonne d'eau. Elle est approximée par la somme des hauteurs suivantes :

- la hauteur de relevage *H* ;
- les pertes de charges dans la canalisation (frottement ou turbulence) :
  - pertes de charge linéaires[13] : proportionnelles au linéaire de canalisation et fonction des caractéristiques de la conduite (matériaux),
  - pertes de charge singulières[14] : qui sont fonction des raccordements (coudes, tés, jonctions, etc.) présents le long de la canalisation.

[13] Pertes de charge linéaire (Internet) : https://www.thermexcel.com/french/ressourc/pdc_line.htm

[14] Pertes de charge singulière (Internet) : https://www.thermexcel.com/french/ressourc/pdc_singu.htm

Les pertes de charges diminuent avec le diamètre intérieur de la canalisation. À titre de simplification, elles sont ici supposées indépendantes du diamètre. Pour des conduites en fontes, les hypothèses suivantes sont considérés [15] :

- pertes de charge linéaires ≈ 10 mm/ml par mètre linéaire de canalisation (*D*) ;
- pertes de charge singulières ≈ 10% des pertes de charge linéaires.

Considérant ces hypothèses, le calcul simplifié de HMT est donné par :

$$HMT\ (m) = -\ H\ (m) + 0{,}011\ D\ (m)$$

Où *H* et le différentiel d'élévation et *D* est le linéaire de canalisation (§ 6.3.1).

6.3.3. Diamètre de canalisation d'adduction d'eau (di)

Le diamètre intérieur de la canalisation de transfert d'eau, est exprimé par [16]:

$$di\ (mm) = 22{,}9\ (Qrm_bass\ \ en\ m^3/h)^{0{,}4}$$

Avec *Qrm_bass* le débit de remplissage des bassins (majoré par les pertes) durant *Nj*.

6.3.4. Fuites d'eau d'adduction

Outre les pertes d'eau liées à l'évaporation dans les bassins d'infiltration (§ 6.2.2), il convient également de considérer les fuites lors du transfert de l'eau. Dans ce cas, le volume ou le débit de recharge majoré (Vrm ou Qrm) doivent être augmentés des pertes d'eau durant l'adduction exprimé en pourcentage absolu (α_{addu}). Le débit de prélèvement est alors calculé par :

$$Qrm\ (1+ \alpha_{addu})$$

En première approximation, il est supposé que les pertes d'adduction sont négligeables (α_{addu} =0) car la canalisation est neuve.

6.3.5. Volumes prélevés en eau de surface

Pour chacun des territoires test, les volumes prélevés, fixés en § 5.2, sont rappelés ci-dessous :

Sites/ nappe visées par la RA	*Vrm* Mm³/an
Plaine de BLV	5
Vistrenque - Costières	1
Sables astiens	0,5
Alluvions de la Figarella	0,5

Illustration 133 : Volumes prélevés en eau de surface pour les quatre sites.

[15] À dire d'expert (Y. NOEL, BRGM)

[16] Diamètre du tube (Internet) : https://www.thermexcel.com/french/ressourc/etude_thermique_fluide_chauffant.htm

6.5. SYNTHESE DES PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT (EXEMPLE REFERENCE)

Les tableaux ci-dessous (Illustration 134 et Illustration 135) récapitulent les critères de dimensionnement, pour un exemple référence (ne correspondant pas à un territoire test), ayant un *Vr* (ou Qr) de 1 Mm^3/an, sur *Nj* = 243 jours/an, *i* = 1 m/j, *D* = 1 km et *H* = -100m. Avec ces caractéristiques, la superficie du bassin d'infiltration devrait être de 4,1 km² environ. En incluant les abords du bassin, l'emprise du dispositif est estimée à 4,5 km² environ. Les critères dont les valeurs sont écrites en rouge et en gras seront testés par la suite pour leur sensibilité (§ 7.7).

Notation	Paramètres	Type données	Formulation, source de données et/ou hypothèses	Valeur	Unité
Qr	Débit de recharge (Mm^3/an, m^3/h ou l/s)	**Objectif** simulé par site pilote	Evalué à partir de l'évolutions des prélevements et/ou des usages futurs et/ou consultation des gestionnaires/experts	**1.0**	Mm^3/an
				114.2	m^3/h
				31.7	l/s
Perte1	Coefficient de perte transfert (fuites d'adduction) & évapotranspiration	*hyp. fixe*	*hyp. indicatif :* ***0% (car canalisations neuves)***	*0%*	%
Perte2	Pertes écoulement horizontal dans la nappe	*Inconnu*	*Non pris en compte*	*0%*	
Qrm	Débit de recharge **majoré** par les pertes	Calculé	Qrm = Qr * (1 + Coeff-perte1 + Coeff-perte2)	1.00	Mm^3/an
Qrm_bass	Débit de remplissage des bassins durant Nj	Calculé selon Nj	Qrm_bass = Qrm (m^3/an) / (Nj*24)	**171**	m^3/h

Illustration 134 : Tableau récapitulant les critères de débits/volumes de la recharge, dans le cas de l'exemple référence.

Notation	Paramètres	Type données	Formulation, source de données et/ou hypothèses	Valeur	Unité
Nj	Nombre de jours de remplissage	Constante	Fonction du cours d'eau	243	j
D	Distance entre RA (m) et ressource	Données SIG	Calculé par SIG pour chaque maille (50m*50m)	1 000	m (ml)
di	Diamètre intérieur de canalisation	Fomule simplifiée	di (mm) =22,9*Qrm_bass^0,4 (AVEC Qrm_bass en m3/h)	179	mm
H	Différentiel de l'élévation	Données SIG	H (m) = Elévation Rivière - Elévation bassin d'infiltration	-100	m
Perte de charges	Pertes de charges linéaires	*Hyp. Fixe (dire d'expert Yves NOEL, BRGM)*	*~ 10 mm/ml de canalisation (i.e., distance "D")*	*0.01*	m/ml
	Pertes de charge singulières		*~ 10% des pertes de charges linéaire = 0,001*	*10%*	%
	Totale Pertes de charge		*0,001*(1+10%)*	*0.011*	m/ml
HMT	Hauteur Manométrique (m)	Calculé	HMT (m) = - H (m) + 0,011 * D (m)	111	m
i	Taux d'Infiltration du sol (m/j)	Données SIG	Exprimé en m/j	1	m/j
Sb	Superficie totale des Bassins d'infiltration	Calculé	Sb (m^2) = Qrm (m^3/an) / [i (/m/j) * Nj (j/an)] = Qrm_bass (m3/h)*24 (h) / i (m/j)	4 115	m²
maj_sb	*% de majoration Sb pour la superficie annexe*	*Hyp.fixe*	*~ 10 % de Sb (e.g., périmètre de protection autour du bassin)*	*10%*	%
Sb_maj	Superficie Bassins Majoré	Calculé		4 527	m²

Illustration 135 : Tableau récapitulant les critères de dimensionnement du bassin d'infiltration, en considérant les débits décrits en Illustration 134, dans le cas de l'exemple référence.

7. Formulation et analyse des fonctions de coûts d'un dispositif de recharge indirecte

Notation des paramètres économiques

CI : coût d'investissement total (€) ; CO : coût opérationnel total (€/an) ;

CMAT : coût moyen annuel total (€/an)

T : Durée de vie du dispositif recharge artificielle (an) ; *a* : Taux d'actualisation (%) ;

CRA : coût unitaire de la recharge artificielle (€/m^3 de volume d'eau rechargé)

CI1 : coût des études préalables (investissement)

CI2 : coût de prise d'eau/piquage en réseau, et de pompage (investissement)

CI3 : coût de transfert de l'eau de recharge (investissement)

CI4 : coût des unités de prétraitement des eaux de recharge (investissement)

CTtp : coût total et unitaire du prétraitement des eaux de recharge (€/m^3)

CI5 : coût foncier lié à l'acquisition des terrains (investissement)

VVT, VVT_aj : valeur vénale des terres agricoles (€/ha), valeur *VVT* ajustée en fonction de l'occupation des sols (CLC) (€/m^2)

CI6 : coût de réalisation des bassins d'infiltration (investissement)

CI7 : coût annexe (équipements de contrôle et surveillance, etc…) (investissement)

CO1 : coût d'achat d'eau (opérationnel)

CO1_Abon : redevance abonnement ou redevance de débit (€/m3/h)

PxEau : redevance de volume (€/m^3)

CO2 : coût d'entretien et de maintenance de la prise d'eau/du piquage (opérationnel)

CO3 : coût énergétique (opérationnel)

η_p: rendement de la pompe (%) ; *PxElec* : prix de l'énergie électrique (€/kWh)

CO4 : coût d'entretien des infrastructures de prétraitement (opérationnel)

CO5 : coût d'entretien des bassins d'infiltration (opérationnel)

N : nombre d'années entre 2 curages du bassin, *Hc* : hauteur de matériau à curer toutes les N années (m)

CO6 : coût de surveillance (opérationnel)

CO7 : coût des autres charges annuelles (opérationnel)

7.1. OBJECTIF ET CHOIX DES CRITERES DE COUTS

7.1.1. Objectif : développement d'une cartographie d'iso-coûts de la recharge artificielle indirecte

Les cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte ont été définies à l'aide de plusieurs critères pondérés et agrégés en deux familles : critères physiques (épaisseur de la ZNS, pente, IDPR, perméabilité, recouvrement) et critères de contraintes (occupation du sol (CLC et BDCarto), remontée de nappe et zones protégées).

Plusieurs autres critères interviennent dans la faisabilité de la recharge artificielle indirecte qui n'ont pas pu être pris en compte dans la cartographie, faute de données géo-référencés adéquates à l'échelle du bassin RMC. Il s'agit notamment de critères associés aux paramètres de dimensionnement (§ 6).

À l'échelle des territoires test, ces critères peuvent être pris en compte explicitement par des indicateurs spécifiques (ex : paramètre de distance) ou bien agrégés dans un indicateur unique de « coût de la recharge artificielle indirecte ». C'est cette dernière option qui est considérée par la suite. L'objectif est alors de développer une nouvelle cartographie d'iso-coût à l'échelle des territoires test.

Ce choix se justifie par l'avantage d'un indicateur unique et agrégé qui permet d'éviter la multiplication du nombre de critères et de limiter la « subjectivité » des poids accordés à chacun des sous-critères. Par ailleurs, un critère monétaire (coût de la recharge artificielle indirecte) est facilement compréhensible par les acteurs de l'eau.

7.1.2. Type d'analyse économique des coûts

Cette analyse des coûts s'inscrit dans le cadre d'une étude de préfaisabilité d'un projet de recharge artificielle indirecte de type bassin d'infiltration. Les différents critères considérés dans la fonction de coût sont issus de sources diverses, de retours d'expériences et, dans certains cas, basés exclusivement sur du dire d'expert à défaut de disposer d'une information issue de la littérature. Il est donc important de prendre en considération que les coûts obtenus à l'issue de cette analyse sont des ordres de grandeur, basés sur un certain nombre d'hypothèses. La réalisation de devis détaillés au cas par cas après sélection de secteurs précis au sein de chaque territoire test est nécessaire pour mieux appréhender les dépenses à prévoir pour l'ensemble des postes de coûts décrits ci-après.

L'évaluation menée se rapproche d'une Analyse Coût-Efficacité (ACE), en considérant que la totalité des volumes d'eau apportés aux bassins d'infiltration sont rechargés et stockés en nappe (pas de prise en considération des « pertes » post-infiltration potentielles, par exemple vers les cours d'eau ou d'autres aquifères). L'analyse réalisée n'intègre pas les bénéfices des projets de recharge artificielle indirecte, dans le sens où il n'a pas été possible d'estimer précisément le devenir de l'eau rechargée et les conséquences positives détaillées de cette recharge au droit de chacun des territoires test. Pour les appréhender, la réalisation de modèles hydrodynamiques précis et actualisés sur chacun des sites s'avère indispensable.

7.1.3. Choix des critères de coûts

Pour la construction d'une cartographie d'iso-coûts, trois composantes de l'indicateur de « coût de la recharge artificielle indirecte » peuvent être considérées pour :

- ***CI* : Coûts d'Investissement** (ou CAPEX) du projet, en € ;
- ***CO* : Coûts Opérationnels** (ou OPEX) du projet de recharge artificielle ou en coût fonctionnels, incluant exploitation, entretien et maintenance (récurrents en €/an) ;
- ***CMAT* : Cout Moyen Annuel Total** (€/an).

Avec :

$$CMAT = CI\ \frac{a\ (1\ +a)^T}{(1\ +a)^T - 1} + CO$$

T : Durée de vie du dispositif recharge artificielle ;

a : Taux d'actualisation (entre 2 et 6 %) (CGSP, 2013).

Dans nos calculs (exemple de référence), la durée de vie *T* du dispositif est estimée à 30 ans, en considérant une durée de vie moyenne des différentes composantes du dispositif (tuyau, pompe, bassin en lui-même, etc.). Il s'agit également de la durée de vie moyenne observée pour les bassins de rétention. Il s'agit sans doute d'une valeur à minima, les durées de vie de tels dispositifs pouvant être potentiellement plus longues. Le paramètre de durée peut cependant être ajusté par l'utilisateur de la fonction de coût. Une analyse de la sensibilité du *CMAT* (plus exactement du *CRA* – voir ci-dessous) à la durée de vie du dispositif est présentée au § 7.7.2. Les coûts d'investissement sont consentis au début, à la réalisation du dispositif de recharge artificielle (par exemple, la 1ère année), alors que les coûts opérationnels sont répartis tout au long de la durée de vie du dispositif. Le taux d'actualisation a permis de ramener les coûts d'investissement à des valeurs présentes. L'interprétation de l'indicateur *CMAT* est schématisée dans la figure ci-dessous :

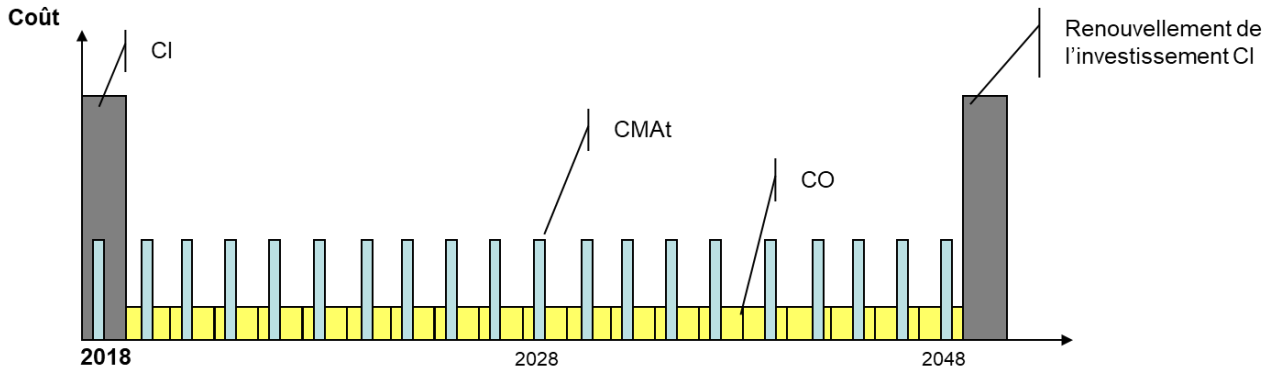


Illustration 136 : Schématisation des indicateurs de coûts recharge artificielle par rapport au temps.

Dans le projet, l'indicateur retenu est le *CMAT*. Par la suite, il est rapporté au volume annuel rechargé. Il est exprimé par :

$$CRA\ (€/m^3) = \frac{CMAT\ (€/an)}{Vr\ (m^3/an)}$$

Avec *CRA* coût unitaire de la recharge artificielle (€/m^3 de volume d'eau rechargée) et *Vr* volume annuel de recharge.

Ce choix d'indicateur unitaire se justifie par les besoins de comparaison du coût recharge artificielle avec d'autres alternatives de stockage d'eau de surface (notamment, les retenues collinaires) (Caballero *et al*., 2018).

7.2. COMPOSANTES DES COUTS DE DISPOSITIF RECHARGE ARTIFICIELLE INDIRECTE

Les coûts d'investissement et opérationnels sont respectivement décomposés en **7 composantes** de coûts. Ces éléments de coûts sont décrits ci-dessous puis schématisés dans l'Illustration 137.

7.2.1. Composantes des coûts d'investissement

Les coûts d'investissement d'un projet de recharge artificielle indirecte type bassin d'infiltration recouvrent sept postes de dépenses principaux :

- **coût des études préalables (*CI_1*)** : Il comprend l'ensemble des études de caractérisation préliminaire du site de recharge (e.g., caractérisation géologique et hydrogéologique, étude technico-économique, étude d'impact réglementaire et préparation du dossier d'autorisation). En général dans les projets « eau », ce coût représente entre 5 et 20 % du coût total d'investissement selon la taille et la complexité du projet de recharge ;
- **coût de prise d'eau (*CI_2*) :** coût des travaux de génie civil de la prise d'eau dans la rivière/le canal ou le piquage en réseau d'eau, et d'équipement de pompage (dans le cas où l'adduction gravitaire n'est pas possible) ;
- **coût de transfert d'eau de recharge (*CI_3*)** : dans la plupart des cas, il sera nécessaire de transférer l'eau de recharge jusqu'au site de recharge. Ce poste d'investissement concerne alors la réalisation des infrastructures d'adduction d'eau comprenant la canalisation d'adduction. Selon les distances (pouvant atteindre quelques dizaines de km) et les volumes, ce poste de coût d'investissement peut être important par rapport à l'investissement total ;
- **coût des unités de (pré)traitement des eaux de recharge (*CI_4*)** : la qualité de l'eau de recharge doit être meilleure ou équivalente à celle de la nappe à recharger. A minima, des bassins intermédiaires de décantation et filtration (traitement primaire[17]) seront nécessaires pour limiter le colmatage des ouvrages de recharge. Un traitement supplémentaire (traitement secondaire ou tertiaire) peut être nécessaire (surtout dans le cas d'une recharge directe). Dans ces cas, le coût des unités de traitement de l'eau de recharge est plus important pour ce poste d'investissement ;
- **coût foncier lié à l'acquisition des terrains (*CI_5*) :** il s'agit du coût d'achat du foncier pour la réalisation des bassins d'infiltration (RA indirecte) qui peut être important selon la localisation du site de recharge (milieu rural ou urbanisé). Il est fonction du nombre et de la superficie totale des bassins qui elle-même dépendra du taux d'infiltration du site d'implémentation ;
- **coût des bassin d'infiltration (*CI_6*)** : en général, c'est le principal poste d'investissement. Il s'agit du coût des travaux de génie civil pour la réalisation de bassin d'infiltration (recharge indirecte) ou des forages d'injection (recharge directe), ainsi que leurs équipements, par exemple le système de pompage destiné à réguler les débits d'eau à infiltrer ou à injecter ;

[17] Le traitement primaire implique généralement une simple décantation qui permet de supprimer la majeure partie des matières en suspension. Il peut faire appel à différents procédés incluant des phases de dégrillage, dessablage, déshuilage-dégraissage, la décantation, la flottation, etc.

- **coût annexe (CI_7) :** ce poste de coût d'investissement comprend notamment le coût des équipements de contrôle et de surveillance de l'état quantitatif et qualitatif de la nappe (ex. réalisation des piézomètres), ainsi que le coût des travaux annexes (ex. travaux de protection et d'aménagement du site de recharge).

Le coût d'investissement total est alors :

$$CI = \sum_{i=1}^{7} CI_i$$

7.2.2. Composantes des coûts de fonctionnement

Les coûts de fonctionnement recouvrent les dépenses d'exploitation et de maintenance du dispositif de recharge artificielle. Ce sont des charges annuelles et récurrentes, exprimées en €/an. Ces dépenses peuvent être également regroupées en sept postes principaux :

- **coût d'achat d'eau (CO_1) :** le cas échéant comprend le coût d'achat dans le cas d'un prélèvement en canal ou réseau d'eau, ainsi que les redevances prélèvements ou autres taxes ;
- **coût d'entretien et de maintenance de la prise d'eau (CO_2) :** il comprend la maintenance du système de pompage d'eau de recharge dans la rivière ;
- **coût énergétique (CO_3) :** il correspond aux consommations électriques des équipements et du système de pompage utilisés pour l'adduction de l'eau de recharge vers le site de recharge (si adduction non gravitaire). Dans le cas des dispositifs de recharge directe, s'ajoute la consommation électrique des pompes d'injection qui augmente la part du coût énergétique. Il sera fonction de la profondeur du forage, du débit et du prix de l'énergie ;
- **coût opérationnel de prétraitement (CO_4) :** ce sont les coûts opérationnels et de maintenance des infrastructures de prétraitement de l'eau de recharge (hors investissement). Ils comprennent, par exemple, le coût d'entretien et de curage des bassins de décantation, le coût des produits de chloration, etc. ;
- **coût d'entretien et de maintenance des bassins d'infiltration (CO_5) :** il comprend la maintenance du dispositif de recharge (ex. curage des bassins d'infiltration) et de ses abords ;
- **coût de surveillance (CO_6) :** ce sont l'ensemble des coûts liés au contrôle et la surveillance périodique de la qualité de l'eau souterraine ou de l'eau de recharge (ex. coût d'analyse en laboratoire) ou encore les coûts associés au contrôle du bon fonctionnement du dispositif (essentiellement coût de main d'œuvre si un système de contrôle automatisé n'est pas mis en place) ;
- **autres charges annuelles (CO_7)** : ce poste de coût regroupe toutes les charges financières non citées précédemment : les charges de gestion administrative et du personnel, les charges financières des emprunts d'investissement et d'assurances, etc.

Le coût opérationnel total est alors :

$$CO = \sum_{i=1}^{7} CO_i$$

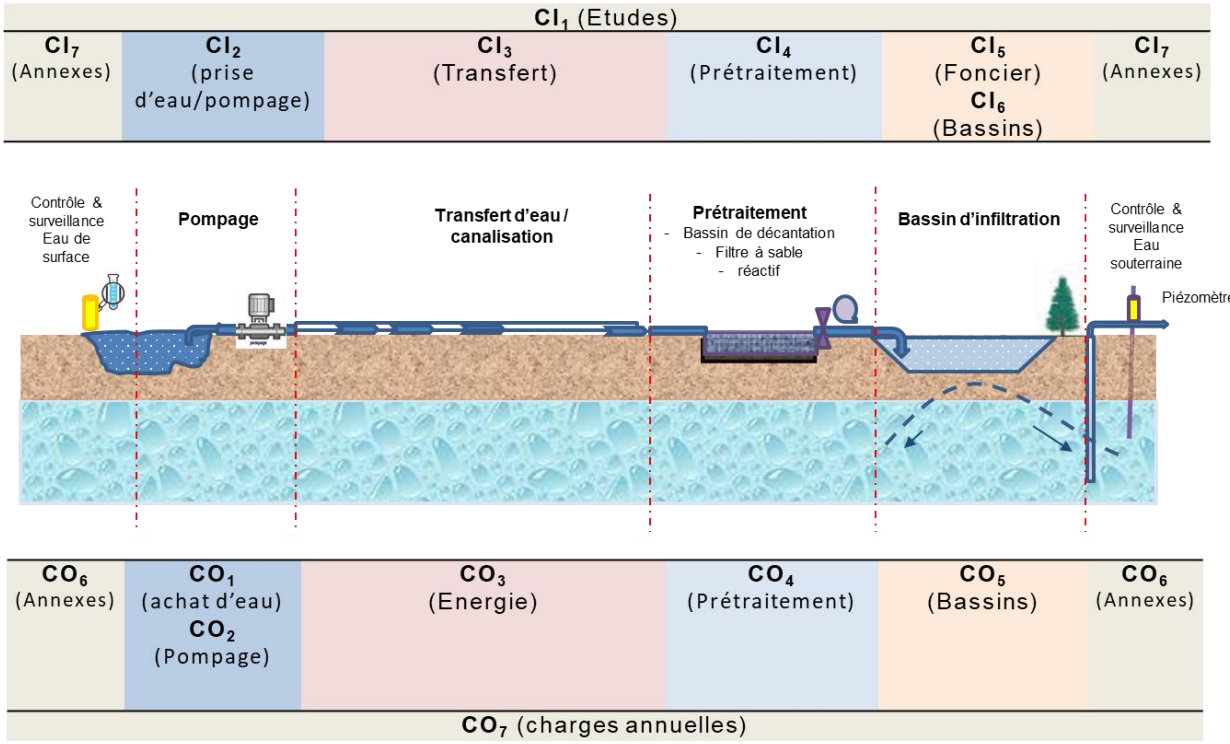


Illustration 137 : Répartition des différentes composantes de coûts d'investissement (CI) et coûts opérationels (CO) du dispositif recharge artificielle indirecte.

7.3. FONCTIONS DES COÛTS D'INVESTISSEMENT

7.3.1. Coût des études (CI_1)

Les études préalables comprennent notamment :

- étude de caractérisation topographique, géologique et hydrogéologique du site présélectionné ;
- étude hydrologique et hydrogéologique de contrôle de qualité des eaux ;
- étude de faisabilité et de conception du transfert d'eau ;
- étude de faisabilité du bassin d'infiltration (maitrise d'œuvre et assistance d'ouvrage, étude technico-économique de conception, étude d'impact réglementaire et préparation du dossier d'autorisation).

Selon la complexité du site, ce poste de coût devrait représenter entre 5 à 20 % du coût total d'investissement. Par la suite (cas référence), un pourcentage de 10 % est retenu, considérant une bonne connaissance préalable des sites :

$$CI_1 = 0{,}1 \sum_{i=2}^{7} CI_i$$

7.3.2. Coût de la prise d'eau (*CI_2*)

Ce poste de coût d'investissement est volontairement distingué du poste de coût de transfert car il n'intervient que dans le cas d'adduction sous pressions (installation de système de pompage). Il comprend :

- ouvrage de prise en rivière ;
- ouvrages de génie civil associé pour installation des équipements de pompages ;
- équipements électromécaniques et hydraulique.

En général, ce coût est fonction du débit de pompage, (ici *Qrm_bass*). L'étude de l'observatoire des coûts RMC (SOGREAH, 2010), retient la formulation suivante (Illustration 138) :

Coût « référence » des ouvrages de pompage (€) = 4000 Q (l/s) + 160000

Avec Q le débit de pompage en l/s et inférieur à 200 l/s.

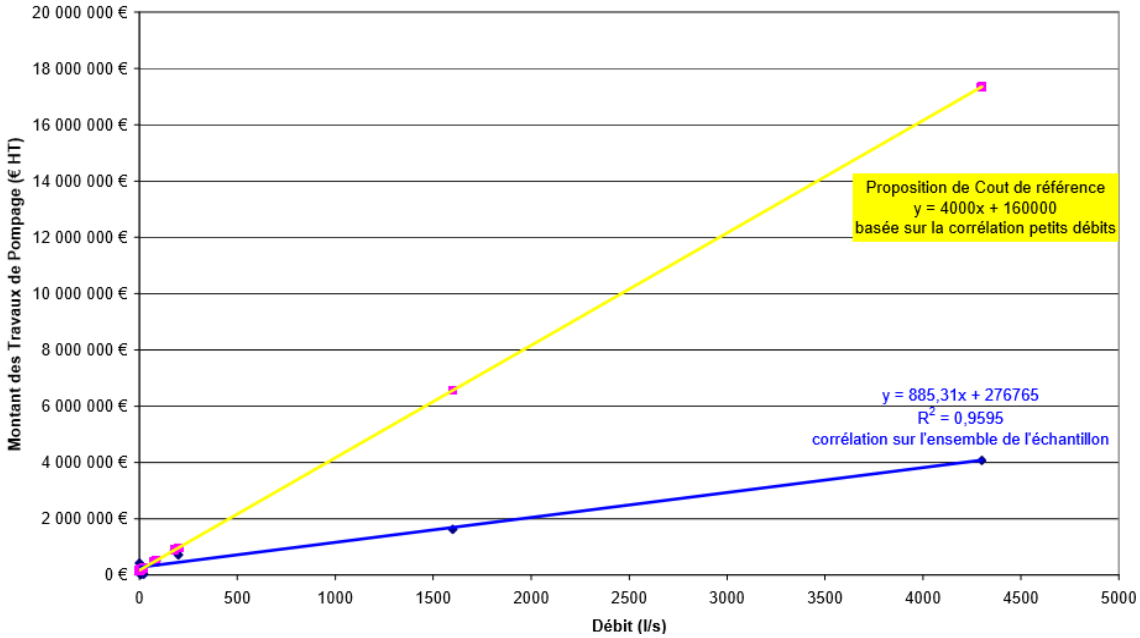


Illustration 138 : Fonction de coût unitaire d'investissement en ouvrage de pompage (SOGREAH, 2010).

Cependant la corrélation établie n'est valable que pour des ouvrages de petits débits (< 200 l/s) et aucune formulation du coût « plafond » n'a pu être établie pour ce poste du fait du manque de références disponibles dans la littérature.

Au regard des débits d'infiltration dans les bassins *Qrm_bass* des quatre territoires test (Illustration 139), seule la nappe de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire présente un débit objectif supérieur à 200 l/s. Cependant, elle reste dans la gamme des faibles débits caractéristiques des dispositifs de recharge artificielle et nous supposons que la formulation du coût de l'étude RMC (2010) reste approximativement valable.

Nappes visées par la RA	*Qrm_bass* (l/s)
Bièvre-Liers-Valloire	238
Vistrenque et des Costières	48
Sables astiens	24
Alluvions de la Figarella	95

Illustration 139 : Débit Qrm_bass en l/s des quatre territoires test.

Par la suite, les deux coefficients de coût de l'équation précédente sont actualisés par l'index des prix TP02 « *index des ouvrages d'art en site terrestre, fluvial ou maritime et fondations spéciales* », pour l'année 2017 :

$$C_{2017} = C_{2010} \frac{TP02_{2017}}{TP02_{2010}}$$

Avec respectivement $TP02_{2017}$ et $TP02_{2010}$ les index de prix TP02 de Janvier 2017 et Janvier 2010 (base 2010)[18].

L'équation de coût CI_2 est alors donnée par :

$$CI_2 (€) = 4520\ Qrm_bass\ (l/s) + 180800$$

Cette fonction ne concerne que les prises en rivières et en canaux. Concernant les prélèvements depuis les réseaux d'eau considérés sur certains sites (réseau gardois et AquaDomitia BRL, réseau d'eau brute OEHC de la vallée de la Figarella), un prix relatif à un piquage sur canalisation est appliqué.

D'après BRL, il faut compter entre 10 000 et 20 000 € pour un piquage sur une conduite existante constituée d'un diamètre moyen, en considérant une recharge de 1 Mm^3 sur 8 mois (243 j), comme c'est le cas pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières. Pour un piquage sur le réseau d'eau brute gardois BRL, un *CI2* de 15 000 € (moyenne des valeurs données par BRL) a été retenu. Concernant l'adducteur Aqua Domitia (site des Sables Astiens), les points de piquage sont peu nombreux sur le linéaire, et il serait très couteux d'en créer un spécifique compte tenu du diamètre de 1 000 mm. Pour cette ressource, le résultat obtenu par le calcul type d'une prise d'eau en rivière présenté ci-dessus est conservé par mesure de précaution et à défaut de disposer d'autres méthodes d'estimation du coût de ce piquage. Pour les alluvions de la Figarella, le piquage sur le réseau d'eau brute OEHC a été estimé à 40 000 € (prix validé par l'OEHC), considérant une recharge de 0,5 Mm^3 sur 2 mois, soit un débit instantané deux fois plus important que pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières.

7.3.3. Coût de transfert d'eau (CI_3)

Ce poste de coût comprend notamment :

- travaux de terrassement ;
- fourniture et pose de la canalisation et de raccordement ;

[18] Index Travaux Publics - TP02 - Travaux de génie civil et d'ouvrages d'art neufs ou rénovation - Base 2010 (Internet) : https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/001710987

- ouvrages spécifiques de traversée ;
- réfection de voirie le cas échéant.

En général, ce coût est fonction du paramètre distance (*D*) et du diamètre de canalisation (*di*). Par simplification, le type de matériaux de la canalisation n'est pas pris en considération.

La formulation du coût de transfert d'eau est issue des travaux de l'observatoire des coûts RMC, établi dans le cadre de la circulaire DCE 2007/18 du 16 janvier 2007.

Ces travaux se basent sur les dossiers subventionnés par les agences de l'eau entre 1997 et 2009 (SOGREAH, 2010). L'échantillon comprend 26 dossiers (17 dossiers RMC) à partir desquels une analyse statistique a été réalisée pour établir des fonctions linéaires du coût unitaire d'investissement (en €/ml) des opérations de transfert d'eau.

Dans ce projet, la formulation retenue est celle du coût « plafond » en fonction du diamètre de canalisation (Illustration 140). Pour tenir compte de la complexité géologique des tracés, ce coût est majoré de 30 % par rapport au coût de « référence » de transfert, et est établi pour des petits débits et des diamètres de canalisations (*di*) inférieurs à 300 mm :

*Coût de transfert « référence » (€/ml) = 0,55 * di (mm) + 15*

*Coût de transfert « plafond » (€/ml) = 1,30 * Coût de « référence »*

Ce qui donne (droite bleu clair de l'Illustration 140) :

*Coût de transfert « plafond » (€/ml) = 0,715 * di (mm) + 19,5*

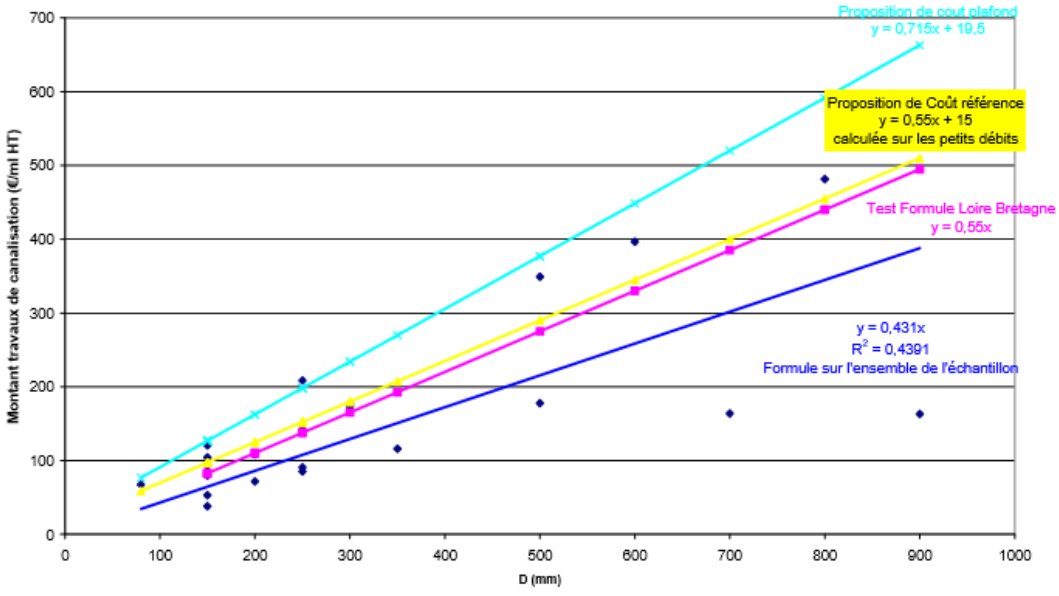


Illustration 140 : Fonctions de coût unitaire d'investissement en transfert d'eau (SOGREAH, 2010).

Les deux coefficients de coût de l'équation précédente sont également actualisés par l'index des prix TP11 « Canalisations grande distance avec fourniture de tuyaux », pour l'année 2017 :

$$C_{2017} = C_{2010} \frac{TP11_{2017}}{TP11_{2010}}$$

Avec respectivement $TP11_{2017}$ et $TP11_{2010}$ les index de prix TP11 de Janvier 2017 et Janvier 2010 (base 2010)[19]. L'équation de coûts actualisés ne change pas :

*Coût unitaire de transfert « plafond » (€/ml) = 0,71 * di (mm) + 19,5*

En remplaçant *di* par l'équation de dimensionnement du diamètre de la conduite (§ 6.3.3), le coût unitaire peut alors être exprimé en fonction du débit *Qrm_bass* uniquement :

$$\text{Coût unitaire de transfert « plafond » (€/ml)} = 0{,}71 * 22{,}9\ (Qrm_bass)^{0{,}4} + 19{,}5$$

Le coût total d'investissement en canalisation de transfert d'eau est calculé par :

$$CI_3\ (€) = D * \text{Coût unitaire} = D \times [0{,}71 * (22{,}9 * (Qrm_bass)^{0{,}4}) + 19{,}5]$$

$$CI_3\ (€) = D\ (m) \times [16{,}34 * (Qrm_bass)^{0{,}4} + 19{,}5]$$

Le coût de transfert peut être exprimé en fonction des couples de paramètre (*D, Qrm_bass*) ou (*D, di*) :

$$CI_3\ (€) = D\ (m) \times [0{,}71 * di\ (mm) + 19{,}5]$$

7.3.4. Coût d'investissement de prétraitement (CI_4)

Pour la recharge artificielle indirecte, ce coût intègre un dispositif de traitement primaire. Il implique généralement des procédés naturels et physiques et consiste en une simple décantation (ou sédimentation) qui permet de supprimer la majeure partie des MES (matières en suspension). Il fait appel à différents procédés pouvant inclure plusieurs phases :

(i) dégrillage (l'eau brute passe à travers des grilles qui retiennent les gros corps flottants) ;

(ii) tamisage (passage dans des tamis plus fin qui retiennent les débris, les alluvions, etc.) ;

(iii) décantation simple (l'eau est stocké dans des bassins de décantation pour déposer les particules) ;

(iv) filtration (circulation de l'eau à travers des membranes/ filtres constitués de sable ou le charbon actif) ;

(v) flottation (l'air sous pression est insufflé depuis le fond du bassin permettant ainsi aux particules de remonter en surface ou elles sont raclées puis évacuées).

L'origine, la qualité de l'eau brute et la qualité de l'eau requise en sortie de procédé jouent un rôle fondamental dans la constitution du coût de référence de la filière de traitement primaire.

Dans le cadre de la recharge artificielle indirecte, il suppose un prétraitement combinant les procédés (iii) et (iv), soit une filtration avec décantation**.** Le coût d'investissement comprend alors :

- bassin de décantation ;
- dispositif de filtration ;
- équipements électromécaniques et hydrauliques.

[19] Index Travaux Publics - TP11 - Canalisations grandes distances de transport / transfert avec fourniture de tuyaux - Base 2010 (Internet) : https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/001711001#Telechargement

Il existe très peu de données économiques sur les coûts de traitement primaire des eaux brutes. Les données existantes concernent le traitement de l'eau pour l'usage AEP.

Une synthèse bibliographique de l'ENGREF (2006) sur le coût de traitement de l'eau potable aboutit à un coût total de traitement variant de 0,05 €/m^3 (simple désinfection pour une capacité de pointe de 2 500 m^3/j) et 0,50 €/m^3 (procédé ultra membrane filtration pour une capacité de pointe de près de 2 000 m^3/j). Pour un procédé de filtration avec décantation, ce coût est de l'ordre de 0,15 €/m^3 pour environ 2 500 m^3/j (Illustration 141).

Néanmoins, ce coût représente un coût total qui intègre à la fois le coût d'investissement et le coût opérationnel.[20] Le coût total va dépendre essentiellement des paramètres de la qualité de l'eau et de la charge volumétrique d'eau à traiter. La charge volumétrique d'eau à traiter est définie comme la capacité de traitement du dispositif filtration/décantation, en m^3/h (ou m^3/jour), c'est-à-dire le débit de pointe que le bassin de décantation est en mesure de traiter en fonctionnement normal.

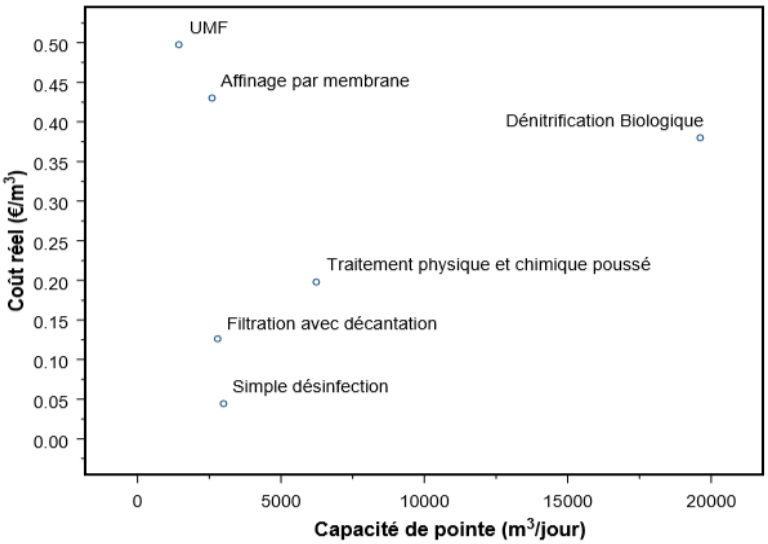


Illustration 141 : Coûts indicatifs des différents procédés de traitement d'eau potable (Corisco-Perez, 2006).

Dans une autre étude réalisée par UFC que choisir (2007)[21], le coût d'investissement en captage et traitement de l'eau a été évalué à partir de quelques données de réalisation d'usine de traitement d'eau potable dans plusieurs villes. Selon la qualité de l'eau à traiter, l'étude retient un coût d'investissement compris entre 0,10 €/m^3 (bonne qualité) et 0,15 €/m^3 (mauvaise qualité). Le coût d'exploitation (opérationnel) est évalué entre de 0,09 à 0,15 €/m^3 selon la taille des villes (Illustration 142).

Selon cette même étude, le coût total de traitement de l'eau pour l'AEP (y compris captage d'eau) se situe dans une fourchette de 0,19 à 0,30 €/m^3 (coûts d'investissement + exploitation) et que le coût d'exploitation peut atteindre jusqu'à 100 % du coût d'investissement.

	Classe de qualité de l'eau	**Taille ville**

[20] Pour des obligations de comptabilité analytique (i.e. bilan d'exploitation) des compagnies d'eau, le coût de traitement est généralement exprimé en coût total (€/m^3 traitée). La part de l'investissement est alors considérée comme une immobilisation qui doit être annualisé et amortie sur la durée de vie du dispositif de traitement.

Coût de traitement eau potable (€/m³)	A1 (qualité bonne)	A2 (qualité médiocre)	A3 (qualité mauvaise)	> 1 million d'hab.	> 300 mille hab.	100 -200 mille hab.
Coût d'investissement	0,10	0,125	0,15			
Coût d'exploitation				0,09 – 0,10	0,10 – 0,11	0,13 – 0,15

Illustration 142 : Coûts de traitement retenus dans l'étude UFC-Choisir (2007) [21].

Dans ce projet, les coûts d'investissement (CI_4) et opérationnel (CO_4) en prétraitement sont volontairement dissociés, afin d'homogénéiser l'évaluation avec les autres postes de coûts. Par ailleurs, seul le coût d'investissement peut faire l'objet de subvention et d'aide de l'agence de l'eau.

Les données bibliographiques sont prises, avec précaution (ordre de grandeur), comme base de simulation moyennant les hypothèses suivantes :

- coût total de « référence » du traitement d'eau potable selon la qualité de l'eau : 0,15 – 0,30 €/m³ ;
- coût total de traitement primaire filtration/décantation = 1/3 du coût de traitement de l'eau potable, soit 0,05 €/m³ (qualité bonne) à 0,10 €/m³ (qualité mauvaise) ;
- part du coût d'investissement / coût total : 30 % ;
- part du coût d'exploitation / coût total : 70 %.

Assumant ces hypothèses (hautes), le coût d'investissement en traitement primaire est approximé par l'équation suivant :

$$CI_4\ (€/an) = 30\% * CTtp\ (€/m^3) * Qrm\ (m^3/an)$$

Où *CTtp* est le coût total et unitaire du prétraitement des eaux de recharge.

Pour exprimer le coût d'investissement en euro total et actuel, le coût annualisé doit être capitalisé sur la durée de vie du dispositif (*T*) :

$$CI_4\ (€) = 0{,}30 * CTtp\ (€/m^3)\ x\ Qrm\ (m^3/an) * T\ (an)$$

La valeur de *CTtp* utilisée dépend alors de la qualité de l'eau à recharger. Le prix de 0,05 €/m³ est attribué aux ressources de qualité satisfaisante (d'après les données de référence du SDAGE 2016-2021 et les informations transmises par certains gestionnaires), tandis que le prix de 0,10 €/m³ est considéré dans le cas de ressources de qualité plus dégradée. Les différences de coût de traitement primaire peuvent être simplement liées au dimensionnement du dispositif de traitement, en fonction de la quantité et de la qualité de l'eau à traiter (filtres plus nombreux ou plus onéreux, et potentiellement changés plus fréquemment, si la qualité de l'eau est moins bonne, par exemple).

- **Plaine de Bièvre-Liers-Valloire :** La qualité de l'eau du Rival et de la Raille étant renseignée comme Moyenne (Physico-chimique) à Mauvaise (Chimique) (§ 6.4), un *CTtp* de 0,10 €/m³ est appliqué, par précaution. L'eau des Collières étant indiquée comme présentant une meilleure qualité, un *CTtp* de 0,05 €/m³ est utilisé pour ce cours d'eau.

[21] Profits de l'eau – Le modèle de calcul de l'UFC-Que Choisir (2007) (Internet) : https://www.quechoisir.org/dossier-de-presse-profits-de-l-eau-le-modele-de-calcul-de-l-ufc-que-choisir-n12365/#le-cout-d-investissement

- **Nappes de la Vistrenque et des Costières :** La qualité de l'eau du Vidourle étant renseignée comme Bonne (§ 6.4), un *CTtp* de 0,05 €/m^3 est appliqué pour ce cours d'eau. Concernant l'eau des dispositifs BRL (Canaux P. Lamour, des Costières, de Campagne ; réseau d'eau brute gardois), l'eau provenant du Rhône, il a été considéré par précaution un *CTtp* de 0,10 €/m^3 en dépit des appréciations positives fournies par BRL au sujet de la qualité de cette eau.
- **Sables astiens d'Agde-Valras :** La qualité des eaux de l'Orb et de l'Hérault étant Bonne (§ 6.4), un *CTtp* de 0,05 €/m^3 est appliqué pour ces cours d'eau. D'après V. Dubois (SMETA), ce prix pourrait s'avérer moins important. Les coûts de prétraitement des eaux de l'Orb et de l'Hérault obtenus en conservant un CTtp de 0,05 €/m^3 peuvent donc être considérés comme coûts de prétraitement maximaux. Concernant l'eau du réseau AquaDomitia (BRL), de la même manière que pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières, un *CTtp* de 0,10 €/m^3 a été retenu (eau provenant essentiellement du Rhône, ainsi que de l'Orb).
- **Alluvions de la Figarella :** Si l'eau rechargée provient de la retenue de Codole, un traitement important peut s'avérer indispensable, la qualité de l'eau pouvant être dégradée tant sur un plan physico-chimique que biologique (avec notamment la présence de cyanobactéries). En revanche, si l'eau provient de la Figarella (par le biais de la future retenue de Sambuccu notamment), il ne devrait pas être nécessaire d'envisager un traitement important avant recharge dans la mesure où d'une part, l'eau qui en serait issue proviendrait exclusivement du cours d'eau de la Figarella (très bonne qualité biologique et physicochimique, même si elle est faiblement minéralisée) et d'autre part, le temps de séjour dans cette retenue ne sera que de quelques semaines au moment où la recharge de la nappe pourrait être opérée. Il est alors considéré que l'eau rechargée proviendrait de la Figarella (prise en cours d'eau hors période estivale, retenue de Sambuccu en période estivale). Le *CTtp* retenu est donc de 0,05 €/m^3. L'OEHC a également suggéré de diviser par deux ce montant, l'eau de la Figarella présentant une excellente qualité et pour laquelle un simple dégrillage semblerait suffire (remarque faite en fin de projet, qui n'a pas pu être prise en considération dans la fonction de coût).

7.3.5. Coût d'investissement foncier (*CI_5*)

Ce coût concerne l'investissement nécessaire en acquisition foncière pour la réalisation des bassin d'infiltration. Il est notamment fonction de la superficie majorée des bassins (*Sbm*) et du prix du foncier.

Le prix du foncier est approché à partir des valeurs vénales moyennes des terres agricoles (*VVT*) fixées par arrêté ministériel et établies pour les petites régions agricoles (PRA), à l'échelle nationale.[22] Le barème des *VVT* 2006 utilisé dans cette étude est établi par l'arrêté du 27 août 2017 du Ministère de l'agriculture.

Les *VVT* sont les prix de vente (hors taxes et frais d'acte) des terres agricoles, parcelles ou exploitations entières, non bâties, et destinées à conserver, au moment de la transaction, leur vocation agricole. Ils s'appliquent aux terres libres de tout bail ou dont le bail est résilié dans l'acte de vente, d'une superficie supérieure ou égale à 70 ares (soit 0,7 hectares).

Trois *VVT* sont données dans le barème national :

- valeur dominante : prix de vente le plus souvent pratiqué tel qu'il a pu être constaté ou estimé ;
- valeur minimum : 95 % des prix sont supérieurs à ce seuil (prix pratiqués pour les terres les moins chères) ;

[22] Prix des terres agricoles (Internet) : http://agreste.agriculture.gouv.fr/donnees-de-synthese/prix-des-terres/

- valeur maximum : 5 % des prix sont supérieurs à ce seuil (prix pratiqués pour les terres les plus chères).

Ces valeurs ne sont pas géo-référencées et sont établies par PRA ou par groupement de 2 à 3 PRA. Pour les besoins de cartographie, les données *VTT* sont croisées avec les 537 PRA géo-référencées. Les mêmes valeurs dominantes de *VVT* sont affectées pour les PRA groupées.

Par ailleurs, l'analyse des données *VVT* en France métropolitaine montre une forte variabilité avec une moyenne de la valeur dominante de 6 136 €/ha (0,61 €/m^2) et un fort écart-type de 4 239 €/ha (0,42 €/m^2) - Illustration 143).

VTT (€/ha)	Dominante	Minimum	Maximum
Min	1 680	510	3 570
Max	26 540	10 890	53 600
Moyenne	6 136	1 933	14 231
Écart-type	4 239	1 216	7 449

Illustration 143 : Analyse de la variabilité des données VVT en France.

Afin de prendre en compte cette forte variabilité, les données VVT ont été croisées avec le type d'occupation des sols (Corine Land Cover, niveau 2) puis ajustées (à dire d'experts) selon les hypothèses de l'Illustration 144.

Code CLC Niv.2	Libellé CLC	Hypothèse VVT
11	Zones urbanisées	10 * VVT max
12	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	10 * VVT max
13	Mines, décharges et chantiers	1 * VVT max
14	Espaces verts artificialisés, non agricoles	VTT min
21	Terres arables	VTT min
22	Cultures permanentes	VTT max
23	Prairies	VTT dom
24	Zones agricoles hétérogènes	(VTT dom + VTT min)/2
31	Forêts	VTT max
32	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	(VTT dom + VTT min)/2
33	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	VTT dom
41	Zones humides intérieures	non applicable
42	Zones humides côtières	
51	Eaux continentales	
52	Eaux maritimes	

Illustration 144 : Hypothèses retenues pour l'ajustement des VVT en fonction de l'occupation des sols.

Le coût foncier est alors intégré à la superficie totale et majorée du bassin :

$$CI_5 = VVT_aj\ (€/m^2) * Sbm\ (m^2)$$

Territoires tests	VVT_aj min (€/ha)	VVT_aj moy (€/ha)	VVT_aj max (€/ha)
Bièvre – Liers – Valloire	1 089	8 873	83 340
Vistrenque et Costières	2 313	44 043	225 500
Sables astiens (affleurements)	4 730	48 410	225 500
Alluvions de la Figarella	9	2 968	274 000

Illustration 145 : Tableau récapitulatif des VVT_aj minimales, moyennes et maximales obtenues pour les quatre territoires test.

En dépit de cette pondération en fonction de l'occupation des sols, les coûts fonciers obtenus par ces calculs en zones urbaines s'avèrent trop faibles par rapport à la réalité. Par exemple, pour le site de Bièvre-Liers-Valloire, au niveau de la commune de Beaurepaire, *VVTMax**10 donne 1,96 €/m², alors que le prix du terrain à bâtir à proximité de la ville est d'environ 100 – 120 €/m² soit près de 500 fois la *VVTMax* (d'après les informations disponibles sur le site Internet www.achat-terrain.com/). Par ailleurs, le ratio prix des terrains à bâtir / prix des terrains agricoles n'est pas identique d'une commune à l'autre. Il n'est donc pas possible d'établir une pondération qui puisse être pertinente et généralisable à l'échelle des territoires test pour estimer correctement les coûts des terrains constructibles. La pondération proposée en Illustration 144 est conservée, et un masque est appliqué sur les zones où les cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères de contraintes sont défavorables (note=0), afin d'exclure définitivement les zones urbanisées de l'analyse des coûts.

7.3.6. Coût de construction des bassins d'infiltration (*CI_6*)

Ce coût dépend essentiellement de la capacité du bassin d'infiltration (volume en m^3) et de la nature du terrain, qui déterminent le volume de terre à excaver et la nature du terrassement du bassin et des travaux préparatoires annexes (ex. : abattage d'arbres, réalisation de chemins d'accès au terrain, etc.).

Pour établir ce coût à partir des données existantes de l'observatoire des coûts RMC (données de coût sur la période 1998-2005), la fonction du coût de référence de construction des ouvrages techniques (rubrique portant sur les retenues colinéaires) est retenue comme base (AERMC, 2005) :

$$Coût\ de\ référence_{2005}(€) = 1{,}30\ (€/m^3) * Capacité\ (m^3) + 47\ 000\ (€)$$

Cette formulation est actualisée par l'index des travaux public TP02 (index des ouvrages d'art en site terrestre, fluvial ou maritime et fondations spéciales) :

$$C_{2017} = C_{2005}\ \frac{TP02_{2017}}{TP02_{2005}}$$

L'équation du coût révisé de de référence « ouvrages techniques » devient :

$$Coût\ de\ référence_{2017}\ (€) = 2{,}28\ (€/m^3) * Capacité\ (m^3) + 61\ 100\ (€)$$

En assimilant les bassins d'infiltration à des « retenues collinaires de type ouvrages techniques », l'équation précédente est utilisée pour estimer le coût CI_6 à partir de la superficie du bassin d'infiltration (*Sb*) et sa profondeur (*p*) :

$$CI_6 = 2{,}28\ (€/m^3) * Sb\ (m^2) * p\ (m) + 61\ 100\ (€)$$

Avec *p* la profondeur du bassin d'infiltration (entre 1,5 et 3 m, pour la plupart des sites de recharge artificielle utilisant ce type de dispositif, considérée égale à 2,5 m pour l'étude des coûts sur les quatre territoires test).

7.3.7. Coût d'investissement annexe (CI_7)

Ce coût « annexe » regroupe le coût d'investissement en équipements de contrôle et de surveillance de l'état quantitatif et qualitatif de la nappe (ex. : réalisation de piézomètres pour le suivi de la nappe) et le coût des travaux annexes (ex. : travaux de protection et d'aménagement du site de recharge).

Ce coût va dépendre du contexte et de la taille du dispositif de recharge artificielle indirecte. Il peut être exprimé en pourcentage de l'ensemble des autres coûts d'investissement (hors études). Par simplification, ce coût est supposé fixe et estimé approximativement à 20 000 € (indicatif, à dire d'expert) pour les quatre territoires test :

$$CI_7 = 20\ 000\ (€)$$

7.4. FONCTIONS DES COÛTS OPÉRATIONNELS

7.4.1. Coût d'achat d'eau et redevance de prélèvement d'eau (CO_1)

Dans certains cas, l'eau de recharge n'est pas gratuite et son coût doit être pris en compte. Le cas d'achat de l'eau est calculé par :

$$CO_1\ (€/an) = Coût\ Abonnement\ (€/an) + PxEau\ (€/m^3) * Qrm\ (m^3/an)$$

Avec *PxEau*, le prix de l'eau brute.

C'est le cas notamment pour les sites des Sables Astiens et des nappes de la Vistrenque et des Costières, pour lesquels sont considérés les réseaux d'eau BRL (canaux Philippe Lamour et des Costières, réseaux enterrés gardois, réseau Aquadomitia). Les informations transmises par BRL induisent les remarques suivantes :

- il n'existe pas de tarif standard correspondant à l'usage étudié (recharge artificielle), d'où la difficulté de considérer dans cette analyse un coût qui sera celui réellement appliqué si cette ressource en eau vient à être utilisée pour cet usage ;
- le tarif agricole permet d'avoir un ordre de grandeur du coût de mobilisation de l'eau brute distribuée par BRL (ce tarif est homogène sur l'ensemble du réseau BRL, donc en Vistrenque comme en Biterrois) ;
- compte tenu des caractéristiques particulières de cette recharge de nappe, pouvant solliciter des débits élevés en continu sur une grande partie de l'année, cela devrait conduire à l'élaboration d'un tarif spécifique, au regard des volumes concernés mais aussi des exigences éventuelles de continuité de service et des couts énergétiques liés à la desserte hivernale. Il n'est à ce stade pas possible de dire si cela se traduirait par un tarif inférieur ou plus élevé que le tarif agricole standard.

Les coûts d'installation de compteur, bien que négligeables au vu du reste des composantes, sont inclus en coûts d'investissement (composante *CI2*).

Dans les cas où la ressource en eau considérée concerne le réseau BRL, la fonction de coût retenue est la suivante :

$$CO1\ (€/an) = (CO1_Abon\ (€/m^3/h) * Qrm_bass(m^3/h)) + (PxEau(€/m^3) * Qrm(m^3/an))$$

Avec *CO1_Abon* la redevance abonnement (63,415 €/m^3/h), et *PxEau* la redevance de volume (0,1015 €/m^3), en considérant la souscription à un contrat de type Standard Pro (Annexe 14).

Dans le cas des alluvions de la Figarella, il est considéré que l'OEHC serait propriétaire du dispositif de recharge artificielle. Aucun coût d'achat d'eau n'est alors à considérer.

Dans d'autres cas, une redevance prélèvement peut être due par l'exploitant du dispositif de RA. L'assiette de calcul de redevance est basée sur le volume d'eau prélevé supérieur à 10 000 m^3/an (> 7 000 m^3/an en zone de répartition des eaux, ZRE), à laquelle est appliqué un taux de redevance variable selon l'usage :

$$Redevance = volume\ prélevé\ x\ taux\ de\ redevance$$

Certains prélèvements sont exonérés de cette redevance. A priori, chaque agence de l'eau fixe des règles d'exonération qui lui sont propres. Pour RMC, les prélèvements pour des usages de « réalimentation des milieux naturels » est exonérée.

En conclusion, un *CO1* nul s'applique pour le site de Bièvre-Liers-Valloire, pour le Vidourle sur le site des nappes de la Vistrenque et des Costières, pour l'Orb et l'Hérault sur le site des sables astiens, et pour les alluvions de la Figarella.

7.4.2. Coût opérationnel de l'ouvrage de pompage (*CO$_2$*)

Ce poste de coût concerne principalement l'entretien de l'ouvrage de pompage et de renouvellement de la pompe. Il est exprimé en pourcentage du coût d'investissement de l'ouvrage de pompage (*CI$_2$*). Un pourcentage de 3 à 5 % est généralement considéré pour ce type d'ouvrage. À titre indicatif (à dire d'expert), la borne minimale de 3 est retenue, pour les 4 territoires test :

$$CO_2\ (€/an) = 0{,}03 * CI_2$$

7.4.3. Coût énergétique de pompage (*CO$_3$*)

Ce coût serait probablement le principal de poste des dépenses d'exploitation si l'adduction d'eau est réalisée sous pression (*HTM* > 0).

Dans ce cas, la puissance électrique *PE* (en kW) nécessaire est calculée :

$$PE\ (kW) = Qrm_bass\ (m^3/h) * HMT\ (m) / (367*\eta_p)$$

Et l'énergie consommée *E* (en kWh) par :

$$E\ (kWh) = PE\ (kW) * 24 * Nj$$

Le coût énergétique est alors estimé par l'équation suivante :

$$CO_3\ (€/an) = PxElec\ (€/kWh) * 24*Nj * Qrm_bass\ (m^3/h) * HMT\ (m) / 367*\eta_p$$

Avec :

Qrm_bass: Débit de recharge du bassin (m^3/h) ;
HMT : hauteur manométrique (m) ;
η_p : rendement de la pompe (fixé à 80%) ;
Nj : nombre de jour fonctionnement (durant 24 h/j) ;
PxElec : prix de l'énergie électrique (€/kWh).

Le prix de l'électricité (*PxElec*) recouvre :

- les frais fixes d'abonnement et taxes (fonction de la puissance souscrite au compteur, exprimé en kilovoltampère ou kVA) ;
- le prix du kWh d'électricité (variable selon les options de consommation et le fournisseur).

À titre indicatif, la grille tarifaire règlementée de l'offre bleu d'EDF est donnée ci-dessous :

Tarif réglementé d'EDF - options Base et Heures pleines/creuses TTC à jour au 5 février 2018

Puissance souscrite (kVA)	Option Base		Option Heures Pleines - Heures Creuses		
	Abonnement (/an)	Prix du kWh	Abonnement annuel	Prix du kWh heures pleines	Prix du kWh heures creuses
3	68.88 €	0.1555 €	-	-	-
6	107.04 €	0.1467 €	120.72 €	0.1593 €	0.1244 €
9	125.04 €	0.1483 €	147.00 €	0.1593 €	0.1244 €
12	143.52 €	0.1483 €	171.12 €	0.1593 €	0.1244 €
15	162.00 €	0.1483 €	193.44 €	0.1593 €	0.1244 €
18	183.24 €	0.1483 €	213.96 €	0.1593 €	0.1244 €
24	220.92 €	0.1483 €	262.08 €	0.1593 €	0.1244 €
30	261.48 €	0.1483 €	282.36 €	0.1593 €	0.1244 €
36	293.52 €	0.1483 €	316.68 €	0.1593 €	0.1244 €

Illustration 146 : Grille tarifaire de l'électricité offre Bleu d'EDF (févier 2018) [23].

Pour une installation de pompage avec un débit important, il convient de retenir :

- un compteur d'une puissance électrique à usage professionnel supérieure ou égale à 36 kVA : le prix de l'abonnement annuelle est de l'ordre de 300 €/an ;
- un profil de tarif bleu d'EDF avec l'option Base avec un prix de 0,1483 €/kWh.

Un prix arrondi de 0,15 €/kWh est utilisé comme base de calcul du coût CO_3, auquel est ajouté le prix de l'abonnement :

$$CO_3\,(€/an) = 300\,(€/an) + 0{,}15\,(€/kWh) * 24*Nj * Qrm\,(m^3/h) * HMT\,(m) / (367*\eta_p)$$

Il faut toutefois noter qu'avec l'ouverture à la concurrence du marché de l'électricité, ce tarif peut être négocié et revu à la baisse. C'est le cas notamment pour les gros industriels et exploitants des services publics de l'eau. Un prix entre 0,07 et 0,10 €/kWh pourrait être envisagé.

[23] Tarif Bleu EDF - Prix du kWh option heures creuses et base (Internet): https://www.kelwatt.fr/prix/tarif-bleu-edf

7.4.4. Coût opérationnel de prétraitement (*CO_4*)

Le coût opérationnel et de maintenance du dispositif de filtration/décantation comprend notamment :

- l'entretien et le curage des bassins de décantation ;
- le renouvellement des filtres à sables ;
- les produits de chloration.

Comme mentionné précédemment, ce coût peut représenter jusqu'à 70% du coût total de prétraitement (*CI_4* + *CO_4*). Assumant l'hypothèse de 70%, le coût opérationnel est approximé par l'équation suivant :

$$CO_4\ (€/an) = 0{,}70 * CTtp\ (€/m^3) * Qrm\ (m^3/an)$$

Avec *CTtp* le coût total de traitement primaire compris entre 0,05 et 0,10 €/m^3 (§ 7.3.4).

7.4.5. Coût opérationnel des bassins d'infiltration (*CO_5*)

Ce poste concerne principalement le curage des bassins d'infiltration et les gros entretiens tel que le remplacement des équipements annexes. Ce coût va dépendre de la qualité de l'eau après prétraitement. Il est calculé en considérant par similitude les coûts d'entretien de bassins de rétention d'eau pluviale (Guide BBP, NORPAC et IDDR), en s'appuyant sur l'exemple suivant :

Entretien	
Curage d'un bassin (tous les 3 - 5 ans)	3 €/m^3
Tonte / taille des abords du bassin (annuelle)	1,30 €/m²/an
Prix du sable (après curage, tous les 3 - 5 ans)	8 - 20 €/m^3

Dans ce cas, *CO5* peut être calculé à partir de la géométrie du bassin (superficie *Sb*) et *hc* (hauteur de matériau à curer) :

$$CO5\ (€/an) = CO5a\ (Curage + PxSable) + CO5b\ (Entretien\ Abords)$$

$$CO5\ (€/an) \approx (1/N * (3 + 10) * Sb * Hc) + (1{,}3 * (Sbm - Sb))$$

Avec *N* nombre d'années entre deux curages.

En moyenne, l'épaisseur de sable calibré mis en place en fond de bassin est comprise entre 10 et 50 cm (valeurs observées sur différents sites en France et à l'étranger). *Hc* ne correspond pas à toute la tranche de sable mise en place dans le bassin, mais bien à l'épaisseur de matériau à retirer (déposé en plus, et/ou épaisseur de sable colmatée), sauf dans les cas où toute l'épaisseur de sable est systématiquement curée.

La surface des abords du bassin est estimée à 10 % de la surface du bassin *Sb* (§ 6.2.4).

Étant donné la prise en compte par ailleurs de coûts de prétraitement primaire de l'eau infiltrée, il a été décidé de considérer pour les quatre territoires test les valeurs ci-après (sur base des retours d'expériences) : *Hc* = 0,3 m ; *N* = 5 années.

Le coût d'achat du sable est fortement dépendant de son origine et transport : un coût moyen de 10 €/m^3 a été retenu (valeur estimée à dire d'expert).

a) *Retours d'expérience concernant les problèmes de colmatage des bassins d'infiltration*

Épaisseur de massif filtrant impacté par le colmatage (*Hc*) **:** d'après Detay (1997), ce sont dans un certain nombre de cas les 10 premiers centimètres des massifs filtrants qui sont impactés par le phénomène de colmatage. Cette observation a également été faite au droit des bassins de Crépieux-Charmy (nord de Lyon), où des analyses sédimentométriques ont montré que les particules fines ne progressent pas à plus de 10 cm de profondeur dans la couche de sable. Le remplacement d'une épaisseur de 10 cm s'avère dans ce cas suffisant pour recouvrer des caractéristiques hydrauliques proches de l'état neuf (Gette-Bouvarot, 2014 ; Loizeau, 2013). Plusieurs expériences, menées par Schuh (1990), ont permis de montrer que l'infiltration d'une eau relativement turbide dans un bassin (15*15*1,22m) sur des durées d'un mois pouvait réduire de manière notable la capacité d'infiltration du bassin sur près de 40 cm d'épaisseur et qu'une mise à sec ne s'avérait efficace que sur les huit premiers centimètres impactés.

Méthodes de décolmatage **:** d'après Detay (1997), le colmatage ne se limite pas à la couche superficielle des bassins ; au cours des mises en eau successives, il s'étend progressivement aux couches de plus en plus profondes. On distingue donc le traitement de surface du traitement de fond.

- La méthode la plus simple et la moins coûteuse consiste en un grattage superficiel de la couche colmatante (possible même sans vidange du bassin, donc peut être fait fréquemment). Elle a pour but d'enlever ou de désorganiser les matériaux déposés sur le filtre.
- Pendant les périodes de séchage, le nettoyage peut être plus poussé, en particulier grâce à l'utilisation d'engins de chantier, rendant possible un remaniement complet des couches supérieures du filtre (Illustration 147). Dans certains cas, la mise au sec sans traitement particulier a permis au dispositif de recouvrer son efficacité (site de Croissy-Le Pecq, au Nord de Paris). La réalisation de plusieurs bassins d'infiltration au droit d'un même secteur de recharge permet une rotation des bassins pendant ces périodes de mise à sec, afin de conserver un débit de recharge artificielle constant.
- Dans certains cas aux États-Unis, des cordons détonants sont déposés sur le filtre, l'explosion permet alors de désorganiser le classement granulométrique de la couche filtrante et d'en augmenter la perméabilité tout en évitant le tassement qui accompagne le passage des engins de nettoyage.
- Le lavage du matériau filtrant constitue le traitement le plus efficace, mais le plus coûteux, dans la mesure où il nécessite le prélèvement, le transport, le lavage et le rétablissement du sable avant remise en eau du bassin. Cette méthode est appliquée pendant des périodes de mise à sec des bassins, sur le site de Flins-Aubergenville (nord de Paris). Sur le site de Crépieux-Charmy (nord de Lyon), le sable extrait est utilisé comme sous-couche dans les travaux routiers, et un nouveau matériau est disposé en fond de bassin.

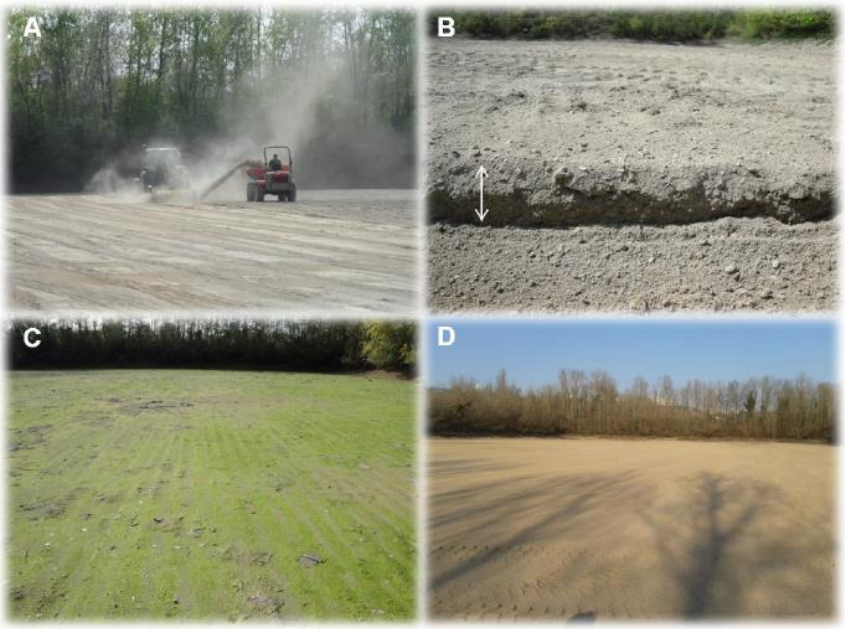


Illustration 147 : Photos du raclage d'un bassin de Crépieux-Charmy (Lyon): pendant l'opération (A), le substrat raclé (B), et un bassin avant (c) et après (D) raclage (Gette-Bouvarot, 2014).

7.4.6. Coût de surveillance (*CO_6*)

Ce poste de coût comprend les dépenses de contrôle et la surveillance périodique de la qualité de l'eau souterraine et/ou de l'eau de recharge (ex. : coût d'analyse en laboratoire) ou encore les coûts associés au contrôle du bon fonctionnement du dispositif (ex. : coût de main d'œuvre si un système de contrôle automatisé n'est pas mis en place).

Il est fait l'hypothèse de quatre campagnes annuelles d'analyse de l'eau durant toute la période de fonctionnement du dispositif de recharge. En considérant, à dire d'expert, un coût d'environ 50 000 €/ campagne, le coût opérationnel est fixé à :

$$CO_6 \text{ (€/an)} = 20\,000 \text{ €/an}$$

Dans le cas d'installation où l'eau infiltrée serait de très bonne qualité, il peut être fait l'hypothèse d'un nombre moins important de campagnes d'analyses par an. Pour le site des alluvions de la Figarella, le nombre de campagnes est ramené à deux par an, soit un CO_6 de 10 000€/an.

7.4.7. Charges annuelles annexes (*CO_7*)

Les autres charges annuelles et annexes comprennent notamment :

- les charges de gestion du personnel et frais de déplacements ;
- les charges de gestion administrative ;
- le petit équipement de faible valeur ;
- les assurances et frais bancaires ;
- les commissions d'achat ;
- les frais administratifs divers ;
- etc.

On considère que ces charges sont fixes et représentent approximativement 10 % de l'ensemble des autres frais opérationnels :

$$CO_7 (€/an) = 0{,}10 \sum_1^6 CO_i$$

7.5. ÉVALUATION DES COÛTS : EXEMPLE RÉFÉRENCE

7.5.1. Coûts d'Investissement : exemple référence

Le tableau (Illustration 148) et le graphique (Illustration 149) ci-dessous récapitulent les critères et résultats des coûts d'investissement, pour un exemple référence (ne correspond pas à un territoire test), ayant un *Vr* (ou Qr) de 1 Mm^3/an, sur *Nj* = 243 j/an, *i* = 1 m/j et H = -100 m (même exemple qu'en § 6.4). L'eau rechargée est considérée de qualité moyenne (d'où un *CTtp* à 0,10 €/m^3). Le prix du terrain de cet exemple référence est fixé à 10 000 €/ha. La profondeur *p* du bassin est de 2,5 m (même valeur retenue pour les quatre territoires test). Les critères dont les valeurs sont écrites en rouge sont testés en analyse de sensibilité (§ 7.7). Le coût d'investissement total obtenu est de près de 1,7 million d'euros. Les postes de coût prédominants sont le coût relatif à la réalisation du dispositif de prétraitement CI_4, ainsi que le coût de mise en place de la prise d'eau CI_2 (ici, l'exemple référence considère une prise d'eau en rivière), correspondant respectivement à 53 % et 23 % du CI_{total} (Illustration 149). Les coûts liés au foncier CI_5 ainsi que les coûts annexes CI_7 représentent une part négligeable des coûts d'investissement totaux. Le coût relatif au transfert d'eau CI_3 est peu important en comparaison avec CI_4 et CI_2. Dans le cas où la distance *D* (1000 m dans l'exemple référence) entre la ressource en eau de surface et la zone de recharge est plus élevée, ce poste de coût peut prendre une part conséquente du CI_{total}. Les remarques faites sur cet exemple référence s'appliquent généralement pour les quatre territoires test, avec quelques variations liées notamment à la qualité de l'eau rechargée, à la capacité d'infiltration du sol, à la distance et au dénivelé entre la ressource à prélever et le bassin d'infiltration.

Notation	Paramètres	Type données	Formulation, source de données et/ou hypothèses	Valeur	Unité
CI_1	Coût des études préalables	hyp.fixe	CI1 = 10% * (CI2 + CI3 + CI4 + CI5 + CI6 + CI7)	155 195 €	
CI1_(%)	*% du coût des études du coût CI total*		*Entre 5 (cas simple bien connu) à 20% (cas complexe peu connu)*	*10%*	%
CI_2	Coût de la prise d'eau / système de pompage	Estimé en fn du débit majoré Qrm	CI2 (€) = 4520 * Qrm_bass (l/s) + 180800	396 087 €	
CI2_(a)	*paramètres de la fonction de cout CI2*		*Fonction linéaire de l'observatoire des coûts RMC (2010), actualisée*	*4 520 €*	€/(l/s)
CI2_(b)				*180 800 €*	€
CI_3	Coût de transfert d'eau	Fn des para D et di (ou bien D, Qrm)	CI_3 (€) = D (m) * [0,71 * di(mm) + 19,5 (€/m)]	146 782 €	€/ml
CI3_(a)	*paramètres de la fonction de cout unitaire CI3*		*Fonction linéaire de l'observatoire des coûts RMC (2010), actualisée*	*0.71*	
CI3_(b)				*19.5 €*	
CI_4	Coût prétraitement (primaire)	Calculé (30% CTtp)	CI4 (€) = 0,30 * CT_tp(€/m3) * Qrm (m3/an) * T (an)	900 000 €	
CI4_preT	*Part investissement CI4 du cout total prétraitement*	*hyp. Litérature*	*30% du coût total de prétraitement*	*30%*	%
CT4_PreT	*Coût total de traitement primaire*	*biblio*	*0,05 – 0,10 €/m3 (classification A1 de l'ARS pour eau potable)*	*0.1*	€actuel/m3
CI_5	Coût foncier	Fn de Sb	CI_5 = coeff.vvt * VVT (€/m^2) *Sb_maj (m^2)	4 527 €	
VVT	*Valeur Vénale des terrain Terrain*	*Données SIG par PRA*	*Moyenne VVT (€/ha)*	*10 000*	€/ha
coeff_vvt	*Coefficient de correction VVT selon CLC*	*expertise*	*Coeff. entre 1 & 10 différencié selon typologie CLC Niveau 2*	*1*	
CI_6	Coût bassin d'infiltration	Estimé en fn de Sb et profondeur du bassin	CI6 = 2,28 (€/m^3) * [Sb (m^2) *p (m)] + 61 100 (€)	84 557 €	
CI6_(a)	*paramètres de la fonction de cout CI6*		*Fonction linéaire de l'observatoire des coûts RMC (2010), actualisée*	*2.28 €*	€/m3
CI6_(b)				*61 100 €*	€
prof_bass	*Profondeur bassin (en m)*		*Profondeur entre 1,5 et 3m*	*2.5*	m
CI_7	Coût investissement annexe (contrôle et surveillance)	hyp.fixe	2 piézomètres à 5000€ l'unité + 10000€ de travaux de protection et autres	20 000 €	
CI	Total Coûts Investissement		$CI = CI_1 + CI_2 + CI_3 + CI_4 + CI_5 + CI6 + CI_7$	1 707 148 €	

Illustration 148 : Tableau récapitulant les critères et résultats de coûts d'investissement, en considérant le dimensionnement décrit en § 6.4, dans le cas de l'exemple référence.

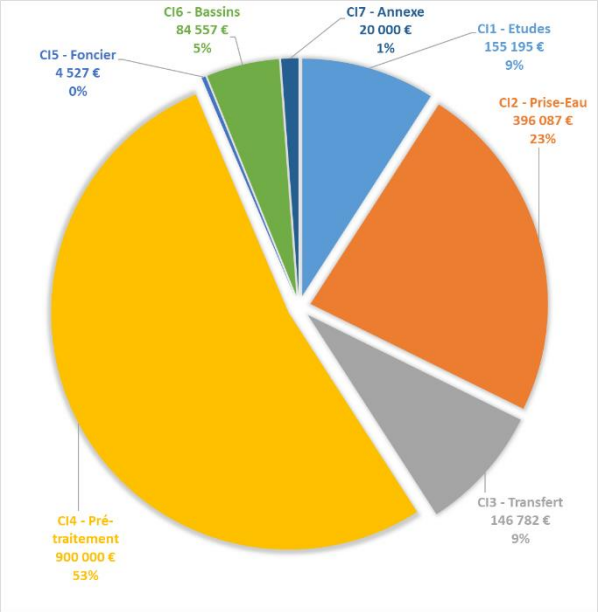


Illustration 149 : Graphique illustrant la part de chaque poste de coût d'investissement sur le CI_{total}, dans le cas de l'exemple référence.

7.5.2. Coûts Opérationnels : exemple référence

Le tableau (Illustration 150) et le graphique (Illustration 151) ci-dessous récapitulent les critères et résultats de coûts opérationnels, pour le même exemple référence. Comme pour les quatre territoires test, le curage est fixé tous les 5 ans, sur un retrait et un remplacement de 30 cm de massif filtrant. Les critères dont les valeurs sont écrites en rouge et en gras sont testés en analyse de sensibilité (§ 7.7). Le coût opérationnel total obtenu est de près de 180 000 €/an. Les postes de coût prédominants sont le coût relatif au prétraitement de l'eau CO_4, ainsi que le coût lié à la consommation énergétique CO_3, correspondant respectivement à 38 % et 31 % du CO_{total} (Illustration 151). Le CO_3 est élevé dans notre exemple référence dans la mesure où un fort dénivelé (100 m) a été choisi pour mettre en évidence l'impact de ce paramètre. Si l'apport d'eau au dispositif était gravitaire, le CO_3 aurait été négligeable. Dans le cas où l'eau est prélevée en canaux ou réseau d'eau, le coût d'achat d'eau CO_1 devient l'un des principaux postes de coût. Même s'il est généralement ressenti comme élevé par les exploitants, le coût d'entretien du bassin et de ses abords CO_5 est peu important par rapport aux autres postes de coûts, notamment CO_4. Comme pour les coûts d'investissement, les remarques faites sur cet exemple référence s'appliquent généralement pour les quatre territoires test, avec quelques variations liées notamment à la qualité de l'eau rechargée, à la capacité d'infiltration du sol et au dénivelé entre la ressource à prélever et le bassin d'infiltration.

Notation	Paramètres	Type données	Formulation, source de données et/ou hypothèses	Valeur	Unité
CO_1	Achat d'eau ou redevance	hyp. pas de redevance	CO1 (€/an) = (CO1_Abon. (€/m3/h) * Qrm_bass (m3/h)) + (PxEau (€/m3) * Qrm (m3/an))	.00 €/an	€/an
CO1_Abon.	*Abonnement*		*CO1_Abon: coût d'abonnement (redevance de débit) (€/m3/h)*	*0.00*	€/m3/h
PxEau	*Prix de l'eau brute*		*Coût d'achat de l'eau brute (ou redevance de volume) (€/m3)*	*0.00*	€/m3
CO_2	Coût opérationnnel de la prise d'eau / système de pompage	% de CI2	CO_2 (€/an) = %_CO2* CI_2	11 883 €/an	
%_CO2	*part cout oper. / cout inv.*	*hyp.fixe*	*Entre 3 à 5% du même poste de coût d'investissement (dire d'expert)*	*3%*	%
CO_3	Coût énergie (pompage)	Variable	CO_3 (€/an) = PxAbon (€/an) + PxElec (€/kWh) * 24 * Nj * Qrm_bass (m^3/h) * HMT(m) / 367 * η_p	57 010 €/an	
ηp	*Rendement de la pompe (ηp en %)*	*Constante*	*fixé à 80%*	*80%*	%
PxElec	*Prix électricité (€/kWh)*	*EDF 2018*	*tarif Bleu EDF, Puissance professionnelle (36 kVA), option base*	*0.15*	€/kWh
PxAbonElec	*Prix de l'abonnement*	*EDF 2018*		*300*	€/an
CO_4	Coût Opér. Prétraitement	Calculé (70% CTtp)	CO4 (€) = 70% * CTtp (€/m3) * Qrm (m3/an)	70 000 €/an	
%_CO4	*part C°4 du cout total prétraitement*	*hyp.fixe*	*70% du coût total de prétraitement (CI4 + CO4).*	*70%*	%
CTtp	*Coût total de traitement primaire*	*biblio*	*Compris entre 0,05 à – 0,10 €/m3*	*0.1*	€/m3
CO_5	Coût Opér. bassins infiltration	Variable	CO5 = 1/N * ((CO5_(a)+ PxSable)* Sb * Hc) + CO5_(b) * Sb* *maj_Sb(=0,1)*	3 745 €/an	
N	*Nombre d'années entre 2 curages*	*Variable*	*De 1 à 5 en fonction des dispositifs*	*5*	an
CO5_(a)	*Indice de prix de curage*	*biblio*	*Fixé à 3€/m3 (Guide BBP, NORPAC et IDDR)*	*3*	€/m3
PxSable	*Coût du sable du massif filtrant à remettre*	*dire d'expert (littoralistes BRGM)*	*Fixé à 10€/m3 de sable remplacé*	*10*	€/m3
Hc	*Epaisseur de filtre colmatée*	*biblio*	*D'après études, de 10 à 30cm*	*0.3*	m
CO5_(b)	*Indice de prix d'entretien des abords*	*biblio*	*Fixé à 1,3€/m² (Guide BBP, NORPAC et IDDR)*	*1.3*	€/m²
CO_6	Coût de surveillance	hyp.fixe	4 campagnes de mesure à 5000 €/campagne (dire d'expert)	20 000 €/an	
CO_7	Autres charges annuelles	hyp.fixe	CO7 = 10% * Somme (CO1+…+CO6)	16 264 €/an	
%_CO7	*part cout oper. / cout inv.*			*10%*	%
CO	Total Coûts Opérationnels		CO = CO1 + CO2 + CO3 + CO4 + CO5 + CO6 + CO7	178 901 €/an	

Illustration 150 : Tableau récapitulant les critères et résultats de coûts opérationnels, en considérant le dimensionnement décrit en § 6.4, dans le cas de l'exemple référence.

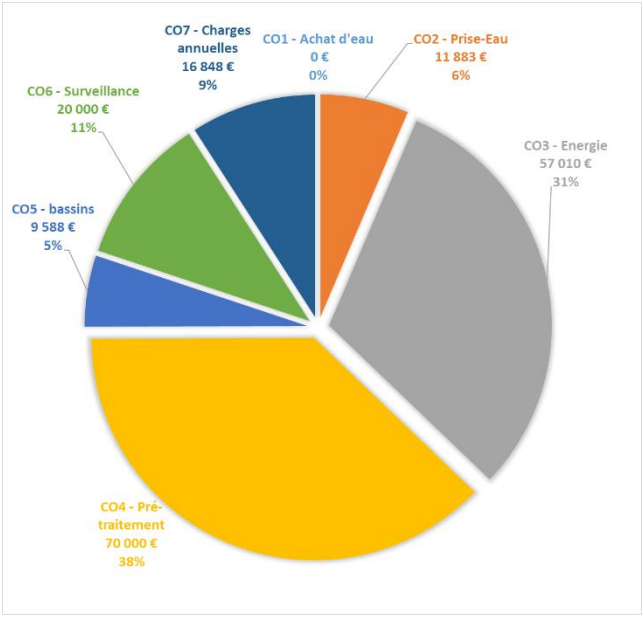


Illustration 151: Graphique illustrant la part de chaque poste de coût opérationnel sur le CO_{total}, dans le cas de l'exemple référence.

7.5.3. Coût unitaire total : exemple référence

Dans l'exemple référence décrit en § 6.4, 7.5.1 et 7.5.2, le coût de recharge unitaire CRA est de 0,28 €/m^3 d'eau rechargée (ici 1 Mm^3/an), dont près de 65 % de coûts opérationnels (Illustration 152).

CRA par rapport à Qrm (à comparer par rapport au coût de stockage d'eau)					
Notation	**Paramètres**	**Type données**	**Données & formulation**	**Valeur**	**Unité**
CMAt_CI	Coût d'investissement annualisé	Calculé (€/an)	Coeff_a * CI	98 725	€/an
CMAt-CO	Coût opérationnel annualisé		total CO	178 901	€/an
CMAt	Cout Moyen Annuel total (€/an)		CMAt = Coeff_a * CI + CO	277 626	€/an
CRA_CI	Cout RA unitaire - part investissement	Calculé (€/m3 d'eau recharge)	CRA_CI (€/m3) = CMAt_CI (€/an) / Qr (m3/an)	0.10	€/m3
CRA_CO	Cout RA unitaire - part opérationnel		CRA _CO (€/m3) = CMAT_CO(€/an) / Qr (m3/an)	0.18	€/m3
CRA	Cout RA unitaire - total		CRA (€/m3) = CMAT (€/an) / Qr (m3/an)	0.28	€/m3
CRA par rapport à Qrm (à comparer par rapport au prix de l'eau)					
CRA_CI	Cout RA unitaire - part investissement	Calculé (€/m3 d'eau rechargée)	CRA_CI (€/m3) = CMAt_CI (€/an) / Qrm (m3/an)	0.10	€/m3
CRA_CO	Cout RA unitaire - part opérationnel		CRA _CO (€/m3) = CMAT_CO(€/an) / Qrm (m3/an)	0.18	€/m3
CRA	Cout RA unitaire - total		CRA (€/m3) = CMAT (€/an) / Qrm (m3/an)	0.28	€/m3

Illustration 152 : Tableau récapitulant les critères et résultats des coûts totaux, dans le cas de l'exemple référence.

7.6. ÉVALUATION ET CARTOGRAHIE DES COUTS : TERRITOIRES TEST

Les calculs décrits précédemment pour un exemple référence ont été réalisés pour chacune des mailles constituant les quatre territoires test (maillage 50 m * 50 m), en considérant pour chaque site l'ensemble des ressources en eau de surface conservées, indépendamment l'une de l'autre (§ 5.6). Pour chaque maille n'est retenu que le *CRA* minimal parmi les *CRA* obtenus pour chaque ressource considérée (par exemple, pour le site de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire, si en une certaine maille, le *CRA* relatif à une recharge par les Collières est plus faible que celui relatif à une recharge par la Raille/le Rival, le *CRA* relatif aux Collières sera retenu pour cette maille).

Pour réaliser ces calculs, les données suivantes sont extraites en chaque maille :

- distance *D* maille – point de la ressource en eau de surface le plus proche (à partir du MNT) ;
- dénivelé *H* maille – point de la ressource en eau de surface le plus proche (à partir du MNT);
- capacité d'infiltration *i* au droit de la maille (à partir des cartes de vitesse d'infiltration (§ 4.2.5));
- valeur Vénale des Terres *VVT* au droit de la maille (à partir de la carte des *VVT* spatialisée par Petites Régions Agricoles).

Les autres critères d'entrée de la fonction de coût ne sont pas spatialisés et sont donc fixés pour chaque site et chaque ressource considérée.

Les cartes de coûts (*CRA*) obtenues pour les quatre territoires test sont présentées ci-après. Les zones en noir correspondent aux secteurs exclus de l'analyse des coûts (masque créé à partir des secteurs défavorables des cartes de contraintes), afin d'isoler les zones urbanisées, artificialisées, où il serait peu faisable et moins intéressant d'implanter un dispositif de recharge artificielle indirecte de type bassin d'infiltration (en plus de la difficulté d'estimer les coûts du foncier sur ces secteurs).

Des tableaux permettant de connaître la part de chaque poste de coût par rapport aux coûts d'investissement et opérationnels ont été réalisés. Ces ratios ont été calculés pour chaque ressource en eau de surface, en considérant la moyenne des résultats obtenus pour chaque

poste de coût sur la totalité des mailles. Ces tableaux illustrent les prix moyens pour chacune de ces composantes de coût si l'on considérait une recharge exclusivement par le biais de la ressource en eau de surface concernée. Ils sont donc à nuancer, notamment pour les postes de coûts incluant la distance et le dénivelé mailles-ressource en eau de surface (CI3 : transfert d'eau ; CO3 : coûts relatifs à l'énergie consommée), sachant que, dans la plupart des cas, lorsque la distance (et/ou le dénivelé) entre une maille et une ressource particulière devient trop importante, il devient souvent moins coûteux de prélever dans une autre ressource sélectionnée située à plus faible distance (et/ou dénivelé).

7.6.1. Plaine de Bièvre-Liers-Valloire

Sur ce secteur, les coûts de recharge unitaire CRA vont de moins de 0,10 €/m^3 (le long des Collières) à plus de 0,40 €/m^3 (à l'est de la plaine de Liers) (Illustration 153). Le CRA moyen (moyenne sur toute l'entité) est de 0,18 €/m^3. Les critères ressortant le plus sont :

- la distance à la ressource *D* (croissance de coût depuis les cours d'eau, lié à l'augmentation du coût de transport de l'eau) ;
- le dénivelé *H* (visible notamment au niveau d'un secteur plus plat le long du Rival sur les communes de Sardieu et la Côte-Saint-André, permettant un coût énergétique plus faible) ;
- la capacité d'infiltration *i* (zones moins infiltrantes visibles à la jonction des plaines de Bièvre et de Liers, et au Nord de l'aéroport Grenoblie-Isère, provoquant une augmentation de la superficie du bassin d'infiltration à réaliser et donc des coûts du foncier, de création et d'entretien du bassin) ;
- le coût de prétraitement unitaire de l'eau *CTtp* (considéré égal à 0,10 €/m^3 pour le Rival/la Raille et à 0,05 €/m^3 pour les Collières).

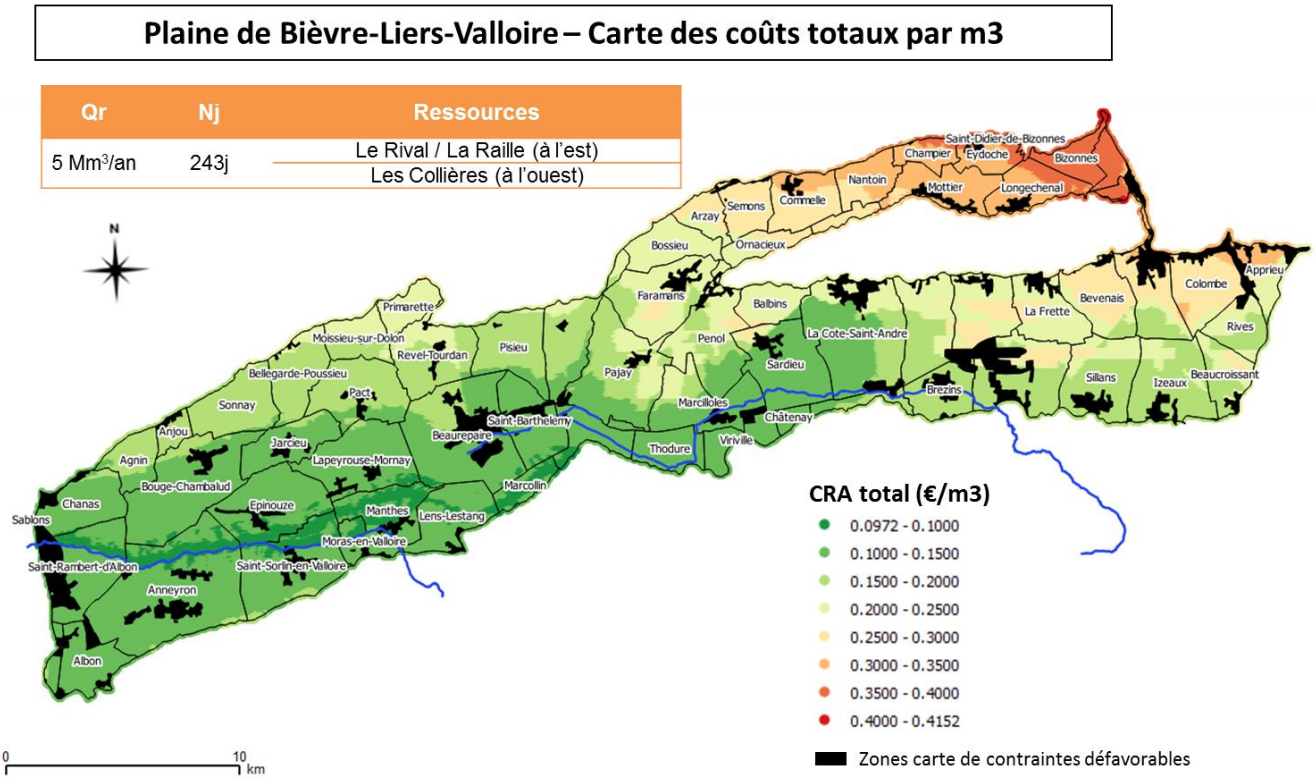


Illustration 153 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire.

Le tableau (Illustration 154) présente les coûts moyens de chaque poste et leur ratio par rapport au CI_{total} ou au CO_{total}, pour les ressources Rival/Raille et Collières. Pour le Rival / la Raille, le prétraitement est le principal poste de coût, en coûts d'investissement (CI_4) comme opérationnels (CO_4), lié au fait que le *CTtp* est de 0,10 €/m^3 contre 0,05 €/m^3 pour les Collières. De manière générale, les coûts de transfert (CI_3) et de consommation énergétique (CO_3) sont élevés, de par les distances et dénivelés importants pouvant exister entre certaines mailles et les ressources en eau de surface.

Coûts calculés pour des valeurs moyennes					
		Rival/Raille		Collières	
CI1	CI1 - Etudes	772 600 €	9%	632 022 €	9%
CI2	CI2 - Prise-Eau	1 257 237 €	15%	1 257 237 €	18%
CI3	CI3 - Transfert	1 726 951 €	20%	2 571 173 €	37%
CI4	CI4 - Pré-traitement	4 500 000 €	53%	2 250 000 €	32%
CI5	CI5 - Foncier	28 568 €	0%	28 568 €	0%
CI6	CI6 - Bassins	193 243 €	2%	193 243 €	3%
CI7	CI7 - Annexe	20 000 €	0%	20 000 €	0%
CI	**CI - Total**	8 498 599 €		6 952 243 €	
CO1	CO1 - Achat d'eau	0 €	0%	0 €	0%
CO2	CO2 - Prise-Eau	37 717 €	6%	37 717 €	6%
CO3	CO3 - Energie	158 239 €	25%	359 499 €	53%
CO4	CO4 - Pré-traitement	350 000 €	54%	175 000 €	26%
CO5	CO5 - bassins	21 097 €	3%	21 097 €	3%
CO6	CO6 - Surveillance	20 000 €	3%	20 000 €	3%
CO7	CO7 - Charges annuelles	58 705 €	9%	61 331 €	9%
CO	**CO - Total**	645 758 €		674 643 €	

Illustration 154 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée, pour le site de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire.

7.6.2. Nappes de la Vistrenque et des Costières

Sur ce secteur, *Qr* = 1 Mm^3/an, et *Nj* = 243 j/an. Les coûts de recharge unitaire *CRA* vont de 0,13 €/m^3 (le long du Vidourle) à près de 0,55 €/m^3 (sur les contours de l'entité, au niveau de la commune de Bellegarde) (Illustration 155). Le *CRA* moyen (moyenne sur toute l'entité) est de 0,29 €/m^3. Les critères ressortant le plus sont :

- l'achat d'eau à BRL CO_1 (coûts élevés à proximité des canaux et réseaux d'eau brute gardois) ;
- le coût de prétraitement unitaire de l'eau *CTtp* (considéré à 0,10 €/m^3 pour les ressources BRL et à 0,05 €/m^3 pour le Vidourle) ;
- la distance à la ressource *D* (décroissance de prix depuis les ressources en eau de surface, liée à l'augmentation du coût de transport de l'eau) ;
- la capacité d'infiltration *i* (zones moins infiltrantes visibles au droit de la sous-entité 150E, constituée de sables astiens des Costières, formation moins perméable que les autres, au niveau des communes de Beauvoisin, Générac, Saint-Gilles et Bellegarde) ;
- le dénivelé *H* (visible notamment au niveau d'un secteur plus plat au niveau de la commune du Cailar).

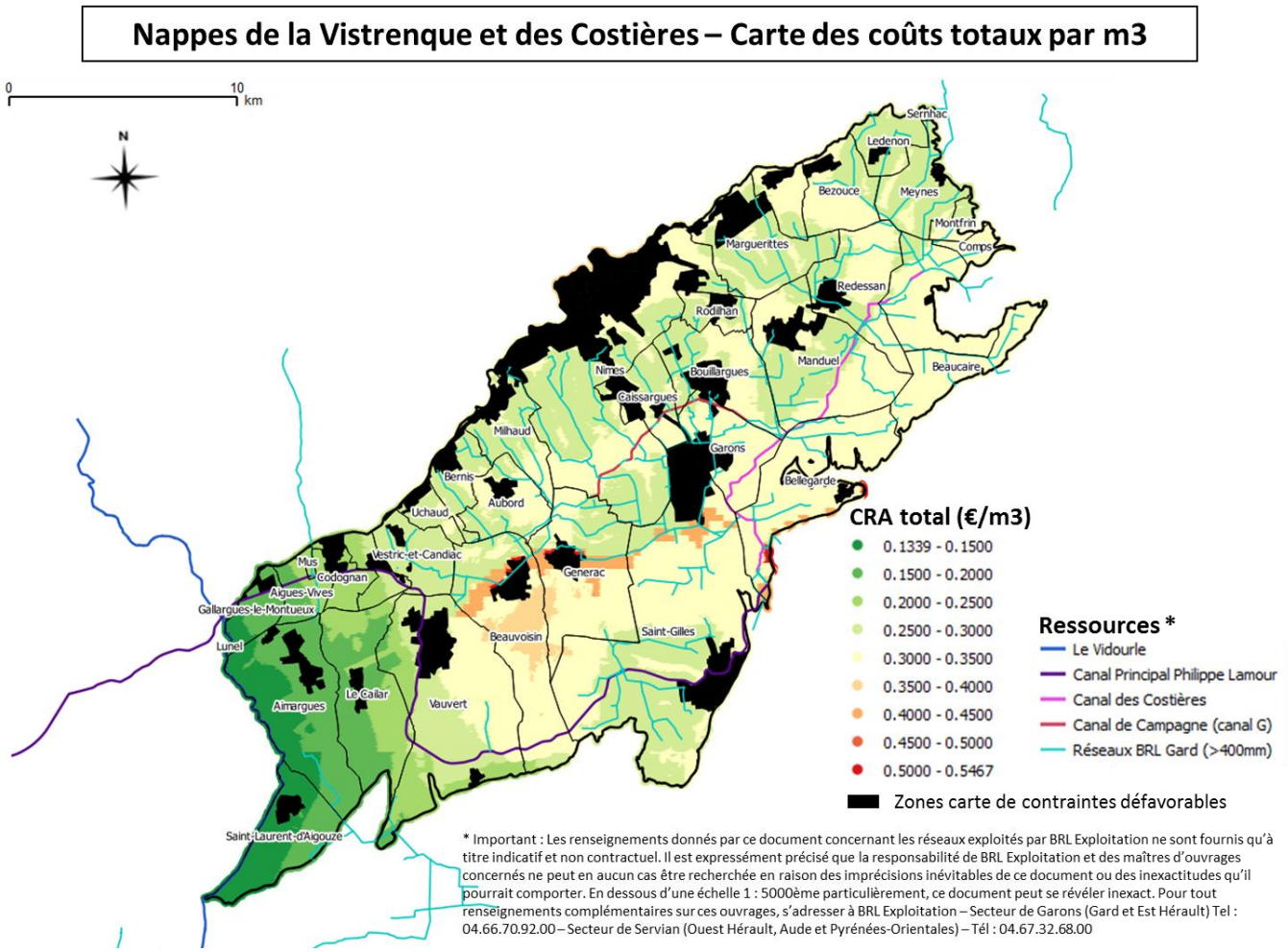


Illustration 155 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières.

Le tableau (Illustration 156) présente les coûts moyens de chaque poste et leur ratio par rapport au CI_{total} ou au CO_{total}, pour les ressources Vidourle, canaux P. Lamour, des Costières et de Campagne, et réseau d'eau brute gardois (BRL). Le *CRA* est de manière générale élevé, à cause de l'achat d'eau pour les ressources BRL (CO_1), ou, dans le cas du Vidourle, d'un fort besoin d'énergie pour acheminer l'eau sur toute l'entité (CO_3). Le prétraitement est également un poste de coût important (CI_4, CO_4) dans le cas des ressources BRL (*CTtp* plus élevé), ainsi que les coûts de transfert (CI_3), valable également pour le Vidourle. Mais, comme précisé en introduction, ces résultats sont biaisés par le fait que l'analyse par ressource présentée dans ce tableau est faite sur toute la superficie du territoire test : les distance peuvent par conséquent être très longues (par exemple, recharge au Nord de l'entité en considérant le Vidourle), et le résultat présenté dans le tableau n'est donc, sur ce poste de coûts (ainsi que sur CO_3), pas représentatif de la réalité.

Coûts calculés pour des valeurs moyennes											
		Vidourle		C.P. Lamour		C. Costières		C. Campagne		Réseau EB Gard	
CI1	CI1 - Etudes	367 179 €	9%	250 141 €	9%	272 494 €	9%	261 076 €	9%	119 921 €	9%
CI2	CI2 - Prise-Eau	396 087 €	10%	396 087 €	14%	396 087 €	13%	396 087 €	14%	15 000 €	1%
CI3	CI3 - Transfert	2 665 185 €	66%	1 044 808 €	38%	1 268 330 €	42%	1 154 149 €	40%	123 695 €	9%
CI4	CI4 - Pré-traitement	450 000 €	11%	900 000 €	33%	900 000 €	30%	900 000 €	31%	900 000 €	68%
CI5	CI5 - Foncier	38 066 €	1%	38 066 €	1%	38 066 €	1%	38 066 €	1%	38 066 €	3%
CI6	CI6 - Bassins	102 453 €	3%	102 453 €	4%	102 453 €	3%	102 453 €	4%	102 453 €	8%
CI7	CI7 - Annexe	20 000 €	0%	20 000 €	1%	20 000 €	1%	20 000 €	1%	20 000 €	2%
CI	**CI - Total**	4 038 971 €		2 751 556 €		2 997 430 €		2 871 831 €		1 319 136 €	
CO1	CO1 - Achat d'eau	0 €	0%	111 965 €	37%	111 965 €	45%	111 965 €	45%	111 965 €	48%
CO2	CO2 - Prise-Eau	11 883 €	6%	11 883 €	4%	11 883 €	5%	11 883 €	5%	450 €	0%
CO3	CO3 - Energie	119 570 €	56%	54 199 €	18%	7 880 €	3%	4 227 €	2%	4 541 €	2%
CO4	CO4 - Pré-traitement	35 000 €	16%	70 000 €	23%	70 000 €	28%	70 000 €	28%	70 000 €	30%
CO5	CO5 - bassins	6 602 €	3%	6 602 €	2%	6 602 €	3%	6 602 €	3%	6 602 €	3%
CO6	CO6 - Surveillance	20 000 €	9%	20 000 €	7%	20 000 €	8%	20 000 €	8%	20 000 €	9%
CO7	CO7 - Charges annuelles	19 305 €	9%	27 465 €	9%	22 833 €	9%	22 468 €	9%	21 356 €	9%
CO	**CO - Total**	212 360 €		302 114 €		251 162 €		247 144 €		234 914 €	

Illustration 156 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée, pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières.

7.6.3. Sables Astiens d'Agde-Valras

Sur ce secteur, *Qr* = 0,5 Mm^3/an, et *Nj* = 212 j/an. Les coûts de recharge unitaire *CRA* vont de 0,22 €/m^3 (à proximité de l'Hérault, sur l'affleurement de Florensac) à près de 0,57 €/m^3 (à proximité de la ville de Mèze) (Illustration 157). Le *CRA* moyen (moyenne sur toute l'entité) est de 0,39 €/m^3. Les critères ressortant le plus sont :

- l'achat d'eau à BRL CO_1 (coûts plus faibles en se reliant à l'Orb (Corneilhan) et à l'Hérault (Florensac et partiellement Mèze) que sur le réseau AquaDomitia pourtant situé plus près) ;
- le coût de prétraitement unitaire de l'eau *CTtp* (considéré à 0,10 €/m^3 pour l'eau du réseau AquaDomitia et à 0,05 €/m^3 pour l'Orb et l'Hérault) ;
- la distance à la ressource *D* (décroissance de coût depuis les ressources en eau de surface, liée à l'augmentation du coût de transport de l'eau) ;
- la capacité d'infiltration *i* (le secteur de Corneilhan est plus infiltrant que celui de Florensac, celui de Mèze étant le moins infiltrant des trois).

À titre d'information, 55 % des mailles se rapportent à la ressource Hérault, 32 % à l'Orb, contre 13 % seulement au réseau AquaDomitia.

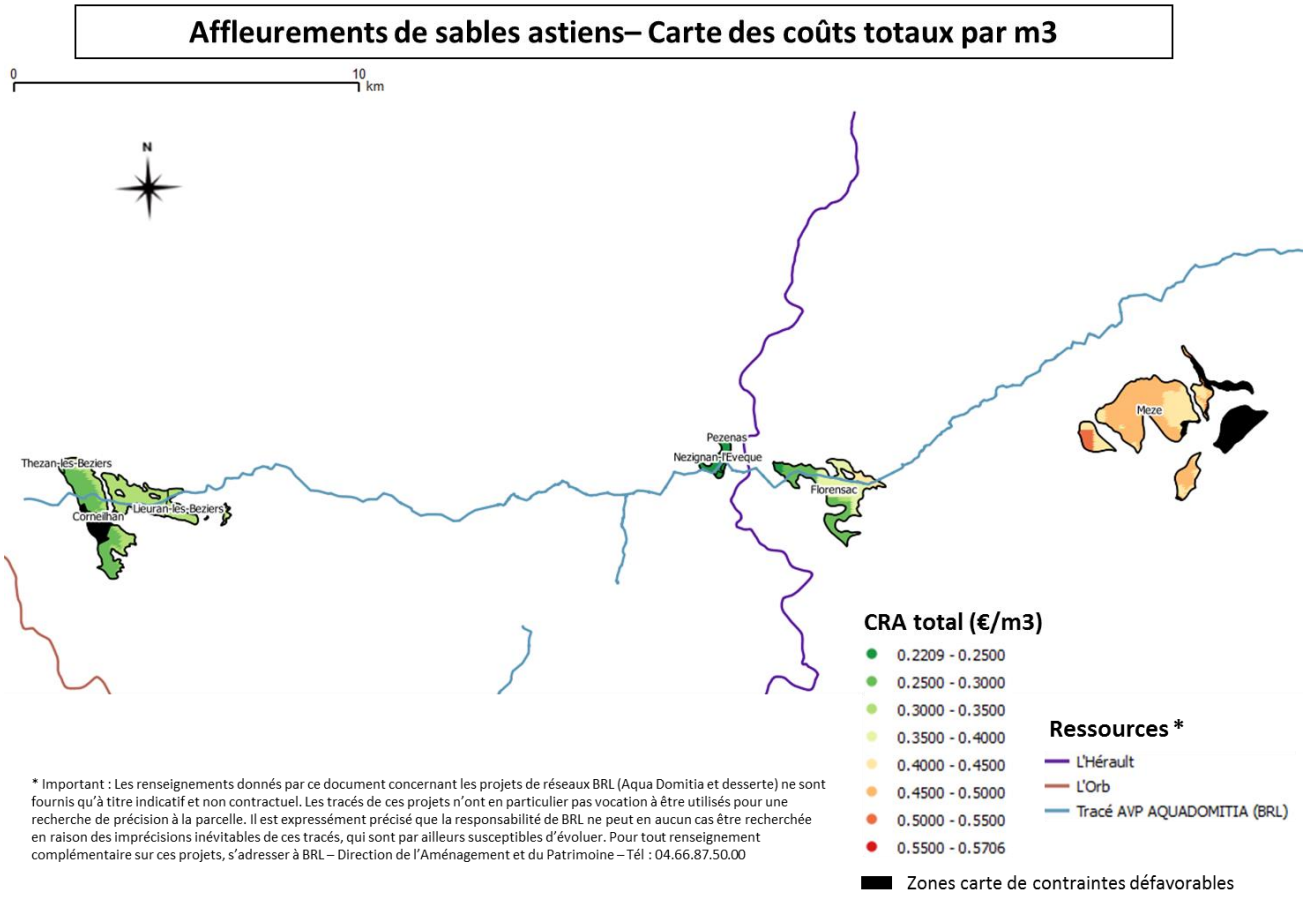


Illustration 157 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site des sables astiens d'Agde-Valras (affleurements).

Le tableau (Illustration 158) présente les coûts moyens de chaque poste et leur ratio par rapport au CI_{total} ou au CO_{total}, pour les ressources Hérault, Orb et réseau AquaDomitia (BRL). Le *CRA* élevé est principalement lié aux coûts de création et d'entretien des bassins (CI_6 et CO_5), ceux-ci ayant une plus grande surface que sur les trois autres sites pour pouvoir infiltrer le volume donné (0,5 Mm^3/an), la mauvaise capacité d'infiltration des terrains sur ce territoire test rendant la recharge plus difficile. Sur le tableau-ci-dessous, ces coûts ressortent peu. En effet, et notamment pour l'Hérault et l'Orb, ce sont les coûts de transferts CI_3 et de consommation d'énergie CO_3 qui ressortent le plus. Mais, comme précisé en introduction, ces résultats sont biaisés par le fait que l'analyse par ressource présentée dans ce tableau est faite sur toute la superficie du territoire test : les distance peuvent par conséquent être très longues (par exemple, recharge à Mèze en considérant l'Orb), et le résultat présenté dans le tableau n'est donc, sur ces postes de coûts, pas représentatif de la réalité. Concernant la ressource AquaDomitia, les coûts de prétraitements (CI_4, CO_4) sont très élevés (lié au fait que le *CTtp* ait été fixé à 0,10 €/m^3 pour cette ressource), et le coût d'achat d'eau à BRL représente le principal poste de coût opérationnel.

Coûts calculés pour des valeurs moyennes							
		Hérault		Orb		AquaDomitia	
CI1	CI1 - Etudes	215 709 €	9%	293 126 €	9%	123 684 €	9%
CI2	CI2 - Prise-Eau	304 184 €	13%	304 184 €	9%	304 184 €	22%
CI3	CI3 - Transfert	1 352 692 €	57%	2 126 864 €	66%	207 441 €	15%
CI4	CI4 - Pré-traitement	225 000 €	9%	225 000 €	7%	450 000 €	33%
CI5	CI5 - Foncier	92 214 €	4%	92 214 €	3%	92 214 €	7%
CI6	CI6 - Bassins	162 999 €	7%	162 999 €	5%	162 999 €	12%
CI7	CI7 - Annexe	20 000 €	1%	20 000 €	1%	20 000 €	1%
CI	**CI - Total**	2 372 798 €		3 224 387 €		1 360 521 €	
CO1	CO1 - Achat d'eau	0 €	0%	0 €	0%	56 982 €	37%
CO2	CO2 - Prise-Eau	9 126 €	9%	9 126 €	7%	9 126 €	6%
CO3	CO3 - Energie	56 756 €	53%	34 845 €	26%	17 500 €	11%
CO4	CO4 - Pré-traitement	17 500 €	16%	17 500 €	13%	35 000 €	23%
CO5	CO5 - bassins	16 268 €	15%	16 268 €	12%	16 268 €	11%
CO6	CO6 - Surveillance	20 000 €	19%	20 000 €	15%	20 000 €	13%
CO7	CO7 - Charges annuelles	9 648 €	9%	11 965 €	9%	13 859 €	9%
CO	**CO - Total**	106 128 €		131 614 €		152 448 €	

Illustration 158 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée, pour le site des sables astiens d'Agde-Valras (affleurements).

7.6.4. Alluvions de la Figarella

Sur ce secteur, les coûts de recharge unitaire CRA vont de 0,11 €/m^3 (à proximité immédiate des canalisations du réseau d'eau brute de l'OEHC) à plus de 0,19 €/m^3 (sur les contours de l'entité, au niveau de la commune de Bellegarde) (Illustration 159). Le *CRA* moyen (moyenne sur toute l'entité) est de 0,14 €/m^3. Les critères ressortant le plus sont :

- la distance à la ressource *D* (décroissance de prix depuis les ressources en eau de surface, lié à l'augmentation du coût de transport de l'eau) ;
- la capacité d'infiltration *i* (le secteur sud à l'amont du seuil de San Antonio est moins infiltrant que le secteur nord) ;
- le dénivelé *H* (surtout en secteur amont, à l'ouest et au sud).

Le coût de traitement de l'eau est le même sur tout le linéaire du réseau d'eau.

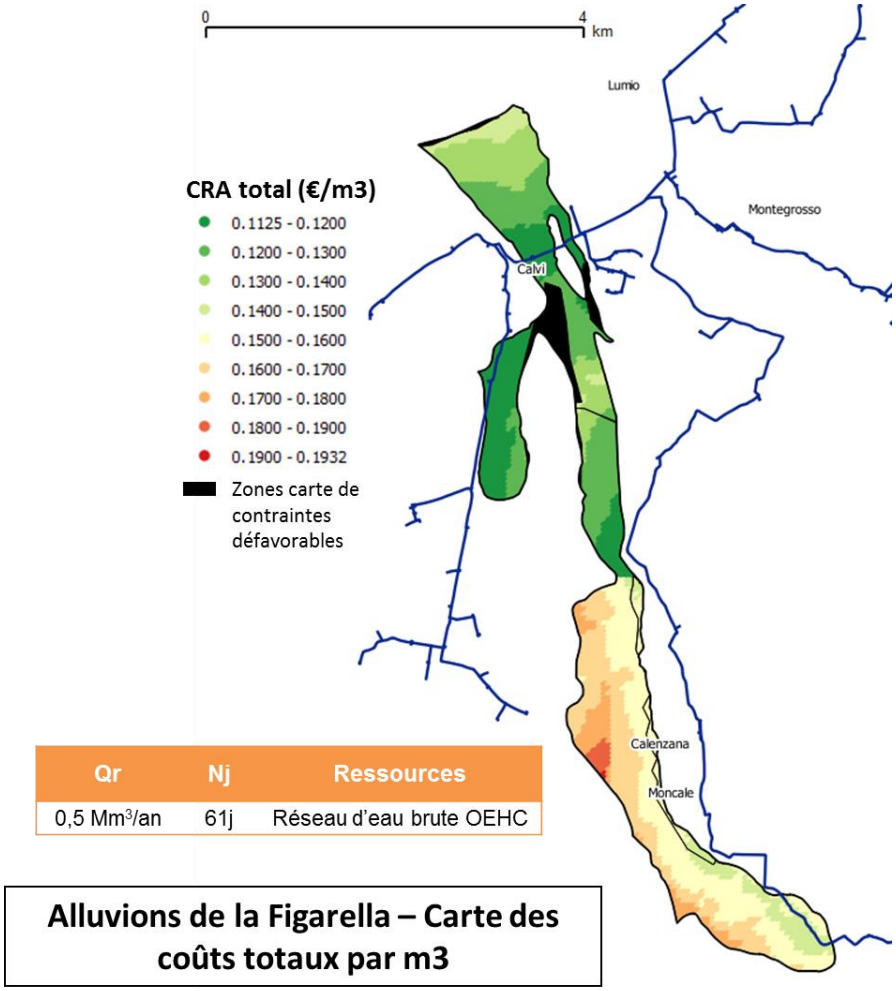


Illustration 159 : Carte des coûts unitaires de recharge artificielle indirecte totaux CRA pour le site des alluvions de la Figarella.

Le tableau (Illustration 160) présente les coûts moyens de chaque poste et leur ratio par rapport au CI_{total} ou au CO_{total}, pour la ressource « Réseau d'eau brute OEHC ». De manière générale, par rapport aux trois sites précédents, les coûts sont moins élevés (pas d'achat d'eau, alimentation en gravitaire principalement, distances à la ressources assez faibles, terrain infiltrant). En coût d'investissement comme en coût opérationnel, le prétraitement représente le poste de coût le plus important (CI_4, CO_4). Les coûts liés au bassin (CI_6, CO_5) et au transfert d'eau (CI_3) sont également importants, de par le fait que le débit de recharge instantané est plus élevé que pour la Vistrenque et les Sables astiens (recharge de 0,5 Mm^3 pendant seulement 61 jours), obligeant la réalisation d'un bassin de taille assez conséquente ainsi que des canalisations de transport d'eau ayant un diamètre adéquat pour un tel débit.

Coûts calculés pour des valeurs moyennes			
CI1	CI1 - Etudes	48 119 €	9%
CI2	CI2 - Prise-Eau	40 000 €	8%
CI3	CI3 - Transfert	93 268 €	18%
CI4	CI4 - Pré-traitement	225 000 €	43%
CI5	CI5 - Foncier	2 755 €	1%
CI6	CI6 - Bassins	100 164 €	19%
CI7	CI7 - Annexe	20 000 €	4%
CI	**CI - Total**	529 306 €	

CO1	CO1 - Achat d'eau	0 €	0%
CO2	CO2 - Prise-Eau	1 200 €	3%
CO3	CO3 - Energie	586 €	2%
CO4	CO4 - Pré-traitement	17 500 €	45%
CO5	CO5 - bassins	6 237 €	16%
CO6	CO6 - Surveillance	10 000 €	26%
CO7	CO7 - Charges annuelles	3 552 €	9%
CO	**CO - Total**	39 075 €	

Illustration 160 : Tableau représentant les coûts moyens pour chaque ressource considérée (ici, réseau d'eau brute de l'OEHC), pour le site des alluvions de la Figarella.

7.6.5. Bilan sur l'analyse des cartes de coûts et les tableaux de coûts moyens

Les paramètres ressortant le plus sur les cartes de coûts, de manière générale, sont :

- la distance *D* et le dénivelé *H* entre la maille et la ressource en eau de surface. Ils impactent les coûts de transfert d'eau CI_3 et de consommation énergétique CO_3 ;
- la capacité d'infiltration i. Elle influe sur la superficie du bassin, et donc sur les coûts de réalisation et d'entretien du dispositif (CI_6 et CO_5), ainsi que sur coût relatif au foncier CI_5 ;
- le coût unitaire de prétraitement de l'eau *CTtp*, impactant CI_4 et CO_4 ;
- le coût d'achat d'eau CO_1.

L'ensemble de ces critères influent sur CI_1 (études préalables) et CO_7 (autres charges annuelles), estimés en pourcentage des autres *CI* et *CO*.

Parmi ces postes de coûts, *CI3, CI4, CO1, CO3* et *CO4* sont dans la majeure partie des cas prédominants sur les autres composantes de coûts. Afin de réduire ces dépenses, il convient de limiter l'éloignement du site de recharge par rapport à sa ressource, et d'opter pour une eau à recharger qui ne nécessite pas d'achat auprès d'un gestionnaire et qui soit naturellement de bonne qualité.

7.7. ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES COÛTS

Ce chapitre a pour objectif de tester la sensibilité du coût unitaire (€/m^3 d'eau rechargée) à un certain nombre de critères inclus dans la fonction de coût. Les analyses ont donc été menées indépendamment sur 14 critères (listés dans les tableaux en Illustration 161 à Illustration 164), pour chacun des quatre sites (soit un total de 56 analyses).

Le paramètre de sensibilité utilisé est la sensibilité normalisée telle que définie par Kabala (2009) :

$$S_{i,t} = \frac{\partial O}{\partial P_i / P_i} = P_i \frac{\partial O}{\partial P_i}$$

où Si est la sensibilité normalisée au paramètre i, O est la fonction de sortie (dans notre cas le coût CRA) et *Pi* est le paramètre d'entrée i (dans notre cas : *Qr, Nj, D, H*…). La dérivée partielle de cette équation peut être approximée par la relation différentielle suivante :

$$\frac{\partial O}{\partial P_i} = \frac{O(P_i + \Delta P_i) - O(P_i)}{\Delta P_i}$$

Cette équation mesure l'influence qu'un changement relatif (ou une erreur relative) dans un paramètre exerce sur le résultat.

7.7.1. Paramètres de référence des territoires test

Pour chacun de territoires test, une situation de référence a été fixée (Illustration 161 à Illustration 164), permettant, lors de l'étude de la variation d'un critère, de conserver des valeurs fixes et similaires d'une analyse à l'autre pour les critères non-testés et non-calculés à partir d'autres critères. Ces valeurs ont été fixées soit en conservant les valeurs renseignées dans la fonction de coûts (pour les critères immuables), soit en réalisant une moyenne à l'échelle de chaque territoire test pour les données spatialisées telles que *D, H, i* et *VVT_aj*. Les gammes de valeurs utilisées pour faire varier les critères étudiés correspondent à celles observées sur le territoire test (pour *D*, *H, VVT_aj, i* : gammes (min et max) propres à chaque site) ou à des échelles issues de l'étude en elle-même (*Qr, Nj*: gammes générales identiques pour chaque site) ou de données issues de la bibliographie et de retours d'expérience (*Para_CI1, CTtp, p, CO1, N, Hc, a* et *T*: gammes générales identiques pour chaque site).

Paramètre	Unité	Utilisé pour	BLV	
			Donnée fixe	Bornes testées
Qr (débit de recharge)	Mm3/an	Dimensionnement	5	0,05 à 10
Nj	jour/an	Dimensionnement	243	61 à 365
D (distance ESU-RA)	m	Dimensionnement	D moyen (8209)	0 à 32000
H (dénivelé ESU-RA)	m	Dimensionnement	H moyen (26)	0 à 300
i (infiltration)	m/j	Dimensionnement	i moyen (6,05)	0,5 à 20
CI1_(%) (pourcentage du coût des études du CI_total)	%	CI1 (études préalables)	10	5 à 20
CTtp (Coût total de traitement primaire)	€/m3	CI4 et CO4 (prétraitement)	0,05	0 à 0,5
VVT_aj (valeur vénale des terrains), coefficient CLC considéré	€/ha	CI5 (foncier)	VVT moyen (8873)	1000 à 84000
p (Profondeur du bassin)	m	CI6 (bassin d'infiltration)	2,5	0 à 5
CO1_Abon (abonnement, redevance débit)	€/m3/h	CO1 (achat d'eau)	0	Regroupement en test de sensibilité à CO1 avec CO1 de 0 à 1316000 (borne max obtenue avec CO1_Abon à 76 et PxEau à 0,25)
PxEau (redevance volume)	€/m3	CO1 (achat d'eau)	0	
N (nombre d'années entre 2 entretiens)	an	CO5 (entretien bassin)	5	0,5 à 6
Hc (épaisseur du filtre colmatée)	m	CO5 (entretien bassin)	0,3	0 à 0,5
a (taux d'actualisation)	%	CMA et CRA	4	2 à 6
T (durée de vie)	an	CMA et CRA	30	10 à 30

Illustration 161 : Scénario de référence pour le site de Bièvre-Liers-Valloire (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité.

Paramètre	Unité	Utilisé pour	Vistrenque	
			Donnée fixe	Bornes testées
Qr (débit de recharge)	Mm3/an	Dimensionnement	1	0,05 à 10
Nj	jour/an	Dimensionnement	243	61 à 365
D (distance ESU-RA)	m	Dimensionnement	D moyen (9524)	0 à 39000
H (dénivelé ESU-RA)	m	Dimensionnement	H moyen (3)	0 à 150
i (infiltration)	m/j	Dimensionnement	i moyen (1,22)	0,1 à 6
CI1_(%) (pourcentage du coût des études du CI_total)	%	CI1 (études préalables)	10	5 à 20
CTtp (Coût total de traitement primaire)	€/m3	CI4 et CO4 (prétraitement)	0,05	0 à 0,5
VVT_aj (valeur vénale des terrains), coefficient CLC considéré	€/ha	CI5 (foncier)	VVT moyen (44043)	2000 à 230000
p (Profondeur du bassin)	m	CI6 (bassin d'infiltration)	2,5	0 à 5
CO1_Abon (abonnement, redevance débit)	€/m3/h	CO1 (achat d'eau)	0	Regroupement en test de sensibilité à CO1 avec CO1 de 0 à 131500 (borne max obtenue avec CO1_Abon à 76 et PxEau à 0,25)
PxEau (redevance volume)	€/m3	CO1 (achat d'eau)	0	
N (nombre d'années entre 2 entretiens)	an	CO5 (entretien bassin)	5	0,5 à 6
Hc (épaisseur du filtre colmatée)	m	CO5 (entretien bassin)	0,3	0 à 0,5
a (taux d'actualisation)	%	CMA et CRA	4	2 à 6
T (durée de vie)	an	CMA et CRA	30	10 à 30

Illustration 162 : Scénario de référence pour le site des nappes de la Vistrenque et des Costières (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité.

Paramètre	Unité	Utilisé pour	Astien	
			Donnée fixe	Bornes testées
Qr (débit de recharge)	Mm3/an	Dimensionnement	0,5	0,05 à 10
Nj	jour/an	Dimensionnement	212	61 à 365
D (distance ESU-RA)	m	Dimensionnement	D moyen (10126)	0 à 30000
H (dénivelé ESU-RA)	m	Dimensionnement	H moyen (16)	0 à 120
i (infiltration)	m/j	Dimensionnement	i moyen (0,27)	0,05 à 0,65
CI1_(%) (pourcentage du coût des études du CI_total)	%	CI1 (études préalables)	10	5 à 20
CTtp (Coût total de traitement primaire)	€/m3	CI4 et CO4 (prétraitement)	0,05	0 à 0,5
VVT_aj (valeur vénale des terrains), coefficient CLC considéré	€/ha	CI5 (foncier)	VVT moyen (48410)	4000 à 230000
p (Profondeur du bassin)	m	CI6 (bassin d'infiltration)	2,5	0 à 5
CO1_Abon (abonnement, redevance débit)	€/m3/h	CO1 (achat d'eau)	0	Regroupement en test de sensibilité à CO1 avec CO1 de 0 à 132000 (borne max obtenue avec CO1_Abon à 76 et PxEau à 0,25)
PxEau (redevance volume)	€/m3	CO1 (achat d'eau)	0	
N (nombre d'années entre 2 entretiens)	an	CO5 (entretien bassin)	5	0,5 à 6
Hc (épaisseur du filtre colmatée)	m	CO5 (entretien bassin)	0,3	0 à 0,5
a (taux d'actualisation)	%	CMA et CRA	4	2 à 6
T (durée de vie)	an	CMA et CRA	30	10 à 30

Illustration 163 : Scénario de référence pour le site des affleurements de sables astiens (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité.

Paramètre	Unité	Utilisé pour	Figarella	
			Donnée fixe	Bornes testées
Qr (débit de recharge)	Mm3/an	Dimensionnement	0,5	0,05 à 10
Nj	jour/an	Dimensionnement	61	61 à 365
D (distance ESU-RA)	m	Dimensionnement	D moyen (498)	0 à 1350
H (dénivelé ESU-RA)	m	Dimensionnement	H moyen (0)	0 à 30
i (infiltration)	m/j	Dimensionnement	i moyen (2,35)	0,5 à 5
CI1_(%) (pourcentage du coût des études du CI_total)	%	CI1 (études préalables)	10	5 à 20
CTtp (Coût total de traitement primaire)	€/m3	CI4 et CO4 (prétraitement)	0,05	0 à 0,5
VVT_aj (valeur vénale des terrains), coefficient CLC considéré	€/ha	CI5 (foncier)	VVT moyen (2968)	0 à 300000
p (Profondeur du bassin)	m	CI6 (bassin d'infiltration)	2,5	0 à 5
CO1_Abon (abonnement, redevance débit)	€/m3/h	CO1 (achat d'eau)	0	Regroupement en test de sensibilité à CO1 avec CO1 de 0 à 151000€ (borne max obtenue avec CO1_Abon à 76 et PxEau à 0,25)
PxEau (redevance volume)	€/m3	CO1 (achat d'eau)	0	
N (nombre d'années entre 2 entretiens)	an	CO5 (entretien bassin)	5	0,5 à 6
Hc (épaisseur du filtre colmatée)	m	CO5 (entretien bassin)	0,3	0 à 0,5
a (taux d'actualisation)	%	CMA et CRA	4	2 à 6
T (durée de vie)	an	CMA et CRA	30	10 à 30

Illustration 164 : Scénario de référence pour le site des alluvions de la Figarella (données fixes) et bornes testées pour chaque critère en analyse de sensibilité.

7.7.2. Analyses de sensibilité des scénarios des territoires test

En appliquant les bornes définies dans les tableaux ci-dessus au 14 critères pour chacun des quatre sites indépendamment a permis d'évaluer quels critères impactent le plus la valeur de coût unitaire de recharge (CRA, en €/m^3) finale. Les résultats de ces analyses sont détaillés en Annexe 15 et Annexe 16 (graphiques pour chaque critère et tableau synthétique multi-sites et multicritères).

À titre d'exemple, l'évolution de la sensibilité du coût est illustrée pour quatre paramètres à l'Illustration 165 pour le cas du territoire de Bièvre-Liers-Valloire. On observe une baisse importante (de tendance puissance décroissante) de la sensibilité à la durée de vie lorsque celle-ci augmente (Illustration 165a). Cela traduit qu'au-delà d'une certaine durée de vie (supérieure à 25 ans), la sensibilité du coût unitaire à la durée de vie est faible. Une baisse très rapide (de tendance exponentielle décroissante) est observée pour la sensibilité en fonction du volume annuel de recharge (Illustration 165c). Cela traduit que le passage de 0 et 1 Mm^3/an permet de réduire fortement le coût unitaire mais qu'au-delà, l'économie d'échelle est relative. Les deux autres tests (Illustration 165b et d) montrent deux paramètres dont la sensibilité augmente de façon linéaire.

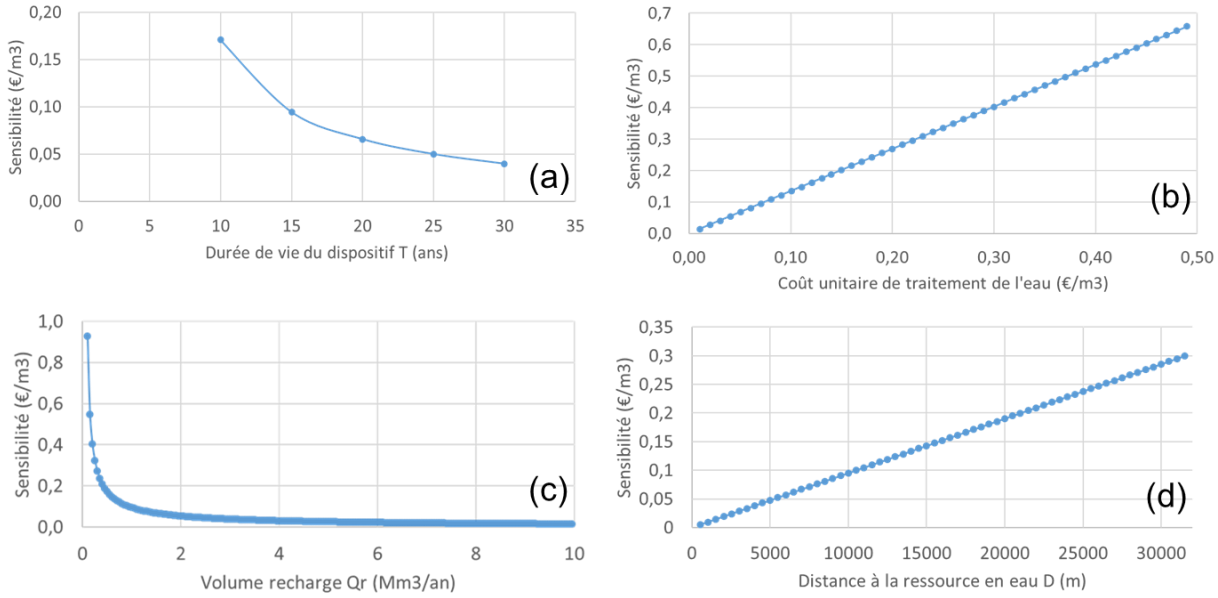


Illustration 165 : Évolution de la sensibilité du coût de la recharge en fonction de la durée de vie du dispositif de recharge, du coût unitaire de traitement de l'eau, du volume annuel de rechage et de la distance entre le point de prélèvement et le bassin d'infiltration. Cas de Bièvres-Liers-Valloire.

L'Illustration 166 permet une visualisation rapide de l'ensemble des résultats. Les observations suivantes peuvent être faites :

- pour l'ensemble des sites, les critères *Qr, CTtp, CO1* (incluant *CO1_Abon* et *PxEau*) et *T* impactent fortement la valeur du *CRA*, et selon la valeur de ces critères qui est considérée, le *CRA* peut se voir augmenté ou réduit de plusieurs dizaines de centimes d'euros ;

- l'impact des critères *D, H* et *i* sur le *CRA* varie d'un site à l'autre. En effet, la valeur de ces critères est propre à chacun. Dans les cas où *D* et *H* peuvent être importants[24] (tous les sites excepté les alluvions de la Figarella), la variation de *CRA* entre la situation où D et *H* sont faibles et celle où D et H sont élevés est importante (plusieurs dizaines de centimes d'euros). Concernant *i*, son impact sur le *CRA* est d'autant plus important que sa valeur est faible (fort impact sur le *CRA* pour le site des sables astiens, où i est inférieur aux trois autres sites) ;
- les critères *CI1, VVT_aj, p* et *Hc* ont globalement peu d'impact sur le *CRA* (inférieur à 5 centimes d'euros) ;
- pour les sables astiens, excepté pour les quatre critères cités au point précédent, la variation de chacun des critères testés impacte fortement le CRA. Pour ce site, les coûts finaux peuvent donc être très différents en fonction du lieu d'implantation du dispositif, de la ressource prélevée, du volume et de la durée de recharge décidés. À l'inverse, les alluvions de la Figarella étant un site de petite taille, relativement homogène en terme de caractéristiques physiques de l'aquifère, et pour lequel une seule ressource de bonne qualité est considérée, les coûts restent assez similaires en fonction du secteur d'implantation du dispositif. Les observations faites pour les sites de Bièvre-Liers-Valloire et de la Vistrenque et des Costières sont intermédiaires entre les deux sites précédemment décrits, les coûts finaux pouvant être plus évolutifs dans un cas ou l'autre pour certains critères, notamment en fonction de la configuration du site (*H* pouvant par exemple être plus élevé en plaine de Bièvre-Liers-Valloire).

Paramètre	Impact sur CRA			
	BLV	Vistrenque	Astien	Figarella
Qr (débit de recharge)				
Nj (durée de la recharge)				
D (distance ESU-RA)				
H (dénivelé ESU-RA)				
i (infiltration)				
CI1_(%) (pourcentage du coût des études du CI_total)				
CTtp (Coût total de traitement primaire)				
VVT_aj (valeur vénale des terrains), coefficient CLC considéré				
p (Profondeur du bassin)				
CO1 (prix de l'eau, incluant CO1_Abon redevance de débit, et PxEau redevance de volume)				
N (nombre d'années entre 2 entretiens)				
Hc (épaisseur du filtre colmatée)				
a (taux d'actualisation)				
T (durée de vie)				

Supérieur à 10 centimes d'€/m3
De 5 à 10 centimes d'€/m3
De 1 à 5 centimes d'€/m3
Inférieur à 1 centime d'€/m3

Illustration 166 : Tableau récapitulatif des observations résultant des analyses de sensibilité sur chacun des territoires test.

[24] À noter que nous avons considéré l'ensemble de la gamme de variation pour chacun des paramètres sur chacun des sites d'étude. Il en résulte des distances et dénivelés maxima qui sont largement supérieurs à ceux qu'un gestionnaire pourrait prendre en considération.

8. Secteurs retenus sur chaque territoire test

8.1. PARAMÈTRES PRIS EN COMPTE

L'étude bibliographique et les cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes ont servi d'appui pour définir, au sein des quatre territoires test, des secteurs potentiellement favorables et intéressants pour l'installation de bassins d'infiltration. Ces secteurs ont été sélectionnés en considérant les paramètres suivants :

- note de 4 (favorable) ou 3 (relativement favorable) sur les cartes des critères physiques et de contraintes réalisées à l'échelle des territoires test ;
- localisation en amont hydraulique des zones où les besoins sont les plus importants (prise en compte des sens d'écoulements d'après les cartes piézométriques existantes) ;
- exclusion des limites d'aquifère (surtout aval) pour permettre une recharge potentiellement plus efficace ;
- dans la mesure du possible, intégration des demandes faites par les syndicats locaux.

Dans un premier temps, pour chaque territoire test, une analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes a été réalisée pour chaque site afin de cibler les secteurs favorables qui en ressortent. Les échanges eus avec les acteurs locaux sont également évoqués afin d'appuyer le choix du ou des secteurs à retenir. Un croisement de l'ensemble des informations a été réalisé de manière à proposer un ou plusieurs secteurs, sur lequel des études plus poussées pourraient à l'avenir être menées. Des analyses statistiques réalisées sur les caractéristiques physiques, de contraintes, et économiques (issues des cartes de faisabilité et des coûts de la RA) sont présentées pour le secteur potentiellement le plus intéressant sur chacun des sites.

8.2. PLAINE DE BIÈVRE-LIERS-VALLOIRE

8.2.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants

Carte des critères physiques : les zones ressortant en gris (défavorable) et en orange (peu favorable) présentent généralement une épaisseur de la zone non saturée peu épaisse, s'ajoutant parfois à un IDPR peu favorable à l'infiltration et à la présence de recouvrement. De manière générale, l'IDPR est moins favorable dans la plaine de Valloire. La pente est relativement douce sur l'ensemble du site, excepté localement le long des cours d'eau. La perméabilité K est favorable à relativement favorable sur toute l'entité : elle semble plus favorable en plaine de Liers, dans une grande partie de la plaine de Bièvre, et moins en plaine de Valloire et à l'intersection directe des plaines de Bièvre et de Liers. Le recouvrement quant à lui est présent sur les pourtours du site, et surtout au Nord de l'entité et en partie à l'intersection des plaines de Bièvre et de Liers.

Carte des critères de contraintes : les zones ressortant en orange (peu favorable) présentent un potentiel risque de débordement de nappe. Les secteurs défavorables témoignent d'une occupation du sol non favorable à l'installation d'un bassin d'infiltration (aéroport Grenoble-Isère, ville de Beaurepaire, etc.). La carte ressort principalement en Relativement Favorable du fait d'une grande majorité de terrains agricoles (terrains cultivés, exploités, peu de prairies simples). Plusieurs zones protégées existent sur les pourtours et en partie amont, dont une au niveau de l'aéroport, mais leurs notes étant peu discriminantes, elles influent peu le résultat final.

Bilan : d'après la carte des contraintes, peu de secteurs sont favorables à la recharge artificielle indirecte. Les secteurs à conserver seront donc principalement Relativement favorables. D'après la carte des critères physiques, de l'est à l'ouest, la zone amont en plaine de Bièvre et le secteur nord de la Raille (intersection des plaines de Bièvre et de Liers, au niveau des communes de Pénol, Marcilloles) semblent intéressantes. Ces secteurs sont situés en amont et proche des zones de besoins (notamment le centre de l'entité, où les prélèvements sont importants, en partie lié à l'activité des pisciculture, secteurs retenus comme potentiellement en déficit à l'horizon 2025 par AnteaGroup en 2012, § 3.2.5). Un secteur ressort également à l'ouest, le long de l'Oron, en plaine de Valloire. Bien que moins intéressant que les deux secteurs précédemment cités (en aval, et moins de besoins), il pourrait être retenu dans la mesure où il serait prévu d'installer plusieurs dispositifs au sein de ce territoire test, prioritairement à l'amont.

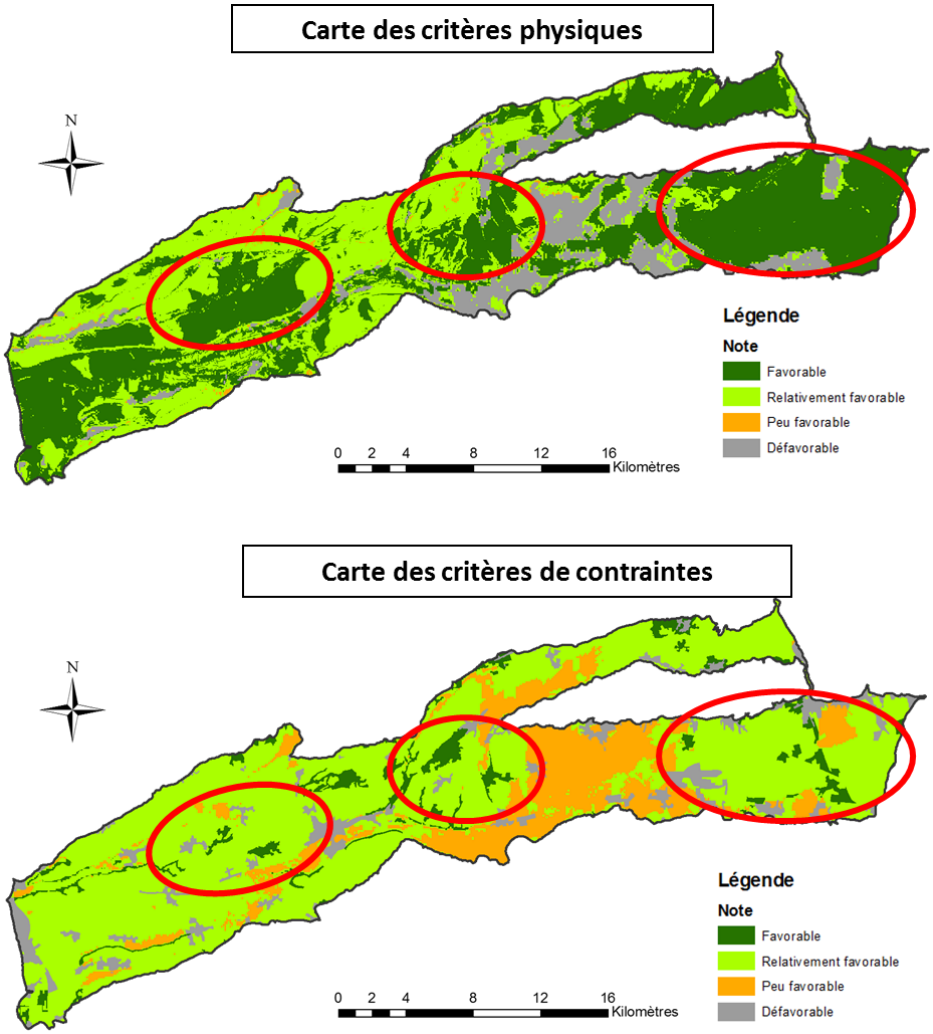


Illustration 167 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le territoire de Bièvre-Liers-Valloire.
Les secteurs intéressants sont entourés en rouge.

8.2.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques

Les différents échanges avec le Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de Bièvre-Liers-Valloire ont permis de relever ou de confirmer les points suivants :

- de nombreux prélèvements ont lieu en plaine de Valloire (irrigation), et notamment, à l'intersection des trois plaines (pisciculture). En dehors de l'exploitation pour des usages agricoles, ces secteurs, alimentés en partie par l'eau de l'aquifère fluvio-glaciaire, seront potentiellement déficitaires à l'avenir pour l'AEP. Il est donc nécessaire de recharger à l'amont de ces zones ;
- dn terme d'occupation du sol, il y aurait potentiellement plus de possibilités d'installer un ou plusieurs dispositifs dans la vallée de la Bièvre, où s'écoule le Rival puis la Raille. De nombreux acteurs locaux et associations souhaiteraient une recharge de la nappe par infiltration de ce cours d'eau, dont la qualité s'est améliorée depuis l'état des lieux du SAGE.

De fait, parmi les trois secteurs sélectionnés au paragraphe précédent (8.2.1), la zone de recharge la plus à même de répondre aux problématiques locales serait celle située à l'intersection des trois plaines (les deux autres secteurs n'étant pas exclus et pouvant également faire l'objet d'analyses plus poussées). Cette zone est localisée en Illustration 168 (délimitation approximative et exclusion des secteurs défavorables et peu favorables des cartes de critères physiques et de contraintes). Ses caractéristiques physiques, de contraintes, et économiques sont présentées en Illustration 169 à Illustration 171.

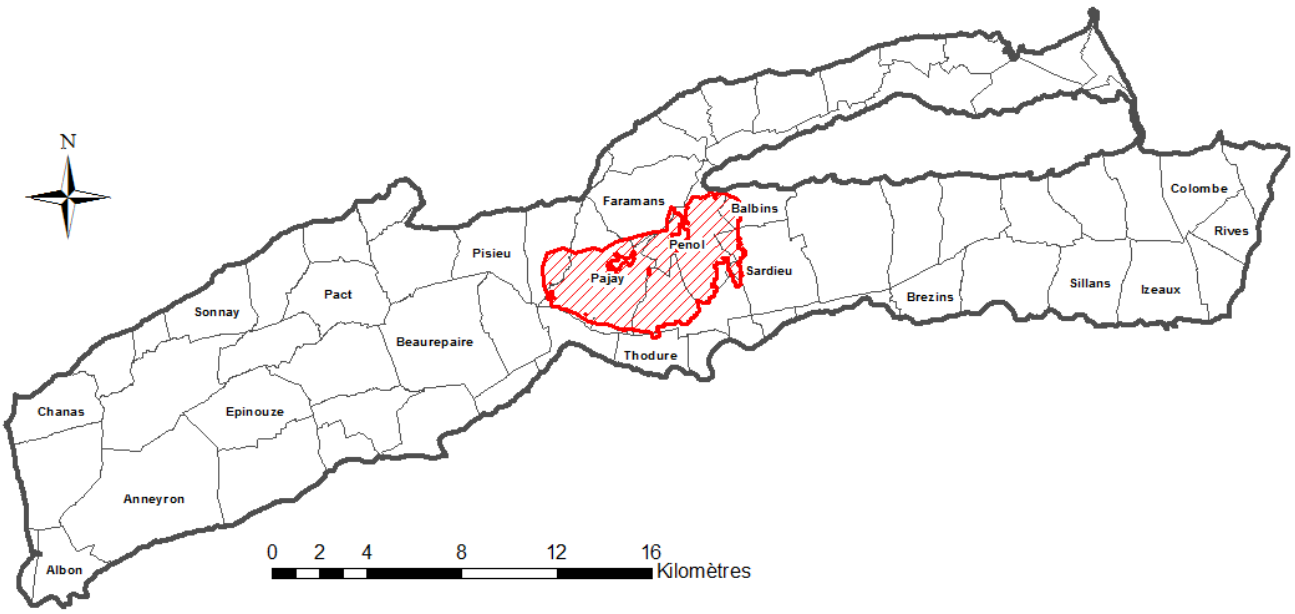


Illustration 168 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire de la plaine de Bièvre-Liers-Valloire.

PHYSIQUES	Min	Max	Moy	Med	E.T.*
EpZNS (m)	1,1	61,8	25,1	-	11,6
IDPR	0	2000	429	354	314
Pente (%)	0	35	4	-	4
K (m/s)	$2{,}5.10^{-5}$	$1{,}75.10^{-2}$	$1{,}14.10^{-3}$	-	$3{,}23.10^{-3}$
Vinf (ou i) (m/j)	0,1	12,8	1,2	-	2,4
Recouvrement	Oui. OEx: Loess et limons				

*Illustration 169 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire de Bièvre-Liers-Valloire ; * (E.T. écart type).*

CONTRAINTES	Description
Occupation du sol (CLC)	Terres arables, forêts de feuillus, systèmes culturaux et parcellaires complexes, surfaces agricoles interrompues par des espaces naturels importants, vergers, extraction de matériaux
Zones protégées	Aucune renseignée dans ce secteur
Débordement de nappe	Non

Illustration 170 : Tableau récapitulant les contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire de Bièvre-Liers-Valloire.

COÛTS	Min	Max	Moy	Med	E.T.*
CRA total (€/m3)	0,11	0,27	0,18	0,18	0,04
CRA CI (€/m3)	0,06	0,09	0,07	0,07	0,01
CRA CO (€/m3)	0,05	0,18	0,11	0,11	0,03

*Illustration 171 : Tableau récapitulant les coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire de Bièvre-Liers-Valloire (*E.T. écart type).*

8.3. NAPPES DE LA VISTRENQUE ET DES COSTIERES

8.3.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants

Cartes des critères physiques : les zones en gris (défavorable) et en orange (peu favorable) présentent une épaisseur de ZNS peu épaisse et un IDPR peu favorable (surtout au niveau de la plaine de la Vistrenque et des Costières Sud). Un recouvrement est présent sur toute la bordure

nord est et ouest de l'entité, ainsi que plus localement dans la plaine de la Vistrenque. Les pentes sont relativement faibles, excepté le long de certains cours d'eau, et en Costières Sud**.** La perméabilité *K* est majoritairement favorable sur toute l'entité, sauf sur certains petits secteurs en plaine de Vistrenque, et au droit des sables et argiles de l'Astien des Costières (entité BDRHF 150E).

Carte des critères de contraintes : les zones peu favorables (orange) sont essentiellement dues au risque potentiel de débordement de nappe, plus important en bordure nord est ouest. Les secteurs défavorables témoignent principalement d'une occupation du sol ne se prêtant pas à l'installation d'un bassin d'infiltration (terrains artificialisés: zones urbaines, aéroport de Nîmes, etc…). Comme pour le site de Bièvre-Liers-Valloire, la carte des contraintes ressort surtout relativement favorable à la recharge artificielle indirecte, lié à la forte présence de terrains agricoles de type vignobles, vergers, etc. (peu de prairies et de forêts). Plusieurs zones protégées existent sur le secteur (au Sud: Camargue; le long du Vistre, au Nord de la Vistrenque et des Costières) mais impactent peu la note.

Bilan : d'après la carte des contraintes, peu de secteurs sont favorables à la recharge artificielle indirecte. Les secteurs à conserver seront donc principalement relativement favorables. D'après la carte des critères physiques, du Sud vers le Nord, une bande nord-est/sud-ouest des communes de Vauvert à Nîmes, les Costières Nord (communes de Bellegarde et Beaucaire notamment), ainsi que l'extrémité nord-est de la plaine de la Vistrenque (communes de Montfrin, Comps, Redessan) sont plutôt favorables à la recharge artificielle et intéressantes, les besoins étant principalement en plaine de la Vistrenque. Les Costières Sud et le secteur de Saint-Gilles (sud de l'entité) ne sont pas retenus du fait qu'au droit de ces zones, les écoulements en nappe se font majoritairement vers le Sud et n'alimentent pas la Vistrenque. Par ailleurs, l'aquifère des Costières est compartimenté et moins connu que celui de la Vistrenque.

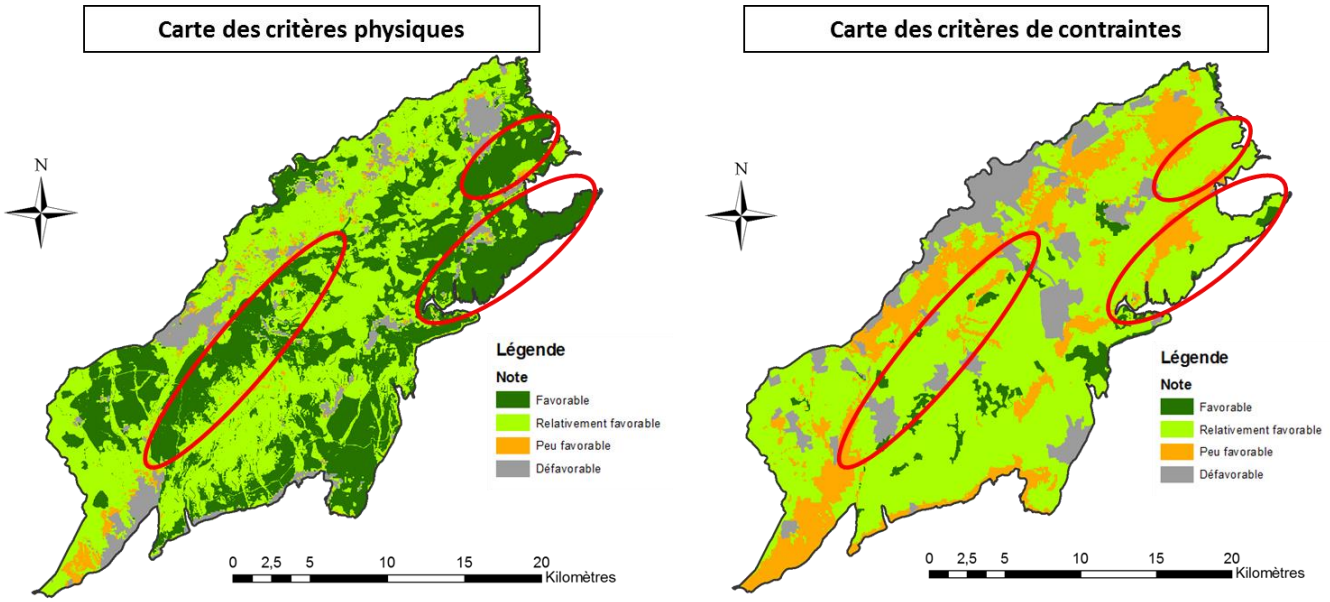


Illustration 172 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières. Les secteurs intéressants sont entourés en rouge.

8.3.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques

Les différents échanges eus avec le Syndicat Mixte des nappes Vistrenque et Costières ont permis de relever ou de confirmer les points suivants :

- au droit du secteur de Vauvert, secteur intéressant particulièrement le syndicat, l'aquifère n'est pas recouvert (excepté quelques niveaux argileux étendus localement, notamment en s'approchant du Vistre, mais peu épais) ;
- la recharge artificielle au droit de cette zone permettrait à la fois de répondre aux problématiques de quantité, mais également de qualité (nitrates notamment, et biseau salé au niveau de la commune de Vauvert lorsque l'aquifère est sollicité est que son niveau est déjà bas).

De fait, parmi les trois secteurs sélectionnés en partie précédente, la zone de recharge la plus à même de répondre aux problématiques locales serait celle située de Nîmes à Vauvert (les deux autres secteurs n'étant pas exclus et pouvant également faire l'objet d'analyses plus poussées). Cette zone est localisée en Illustration 173 (délimitation approximative et exclusion des secteurs défavorables et peu favorables des cartes de critères physiques et de contraintes). Ses caractéristiques physiques, de contraintes, et économiques sont présentées en Illustration 174 à Illustration 176.

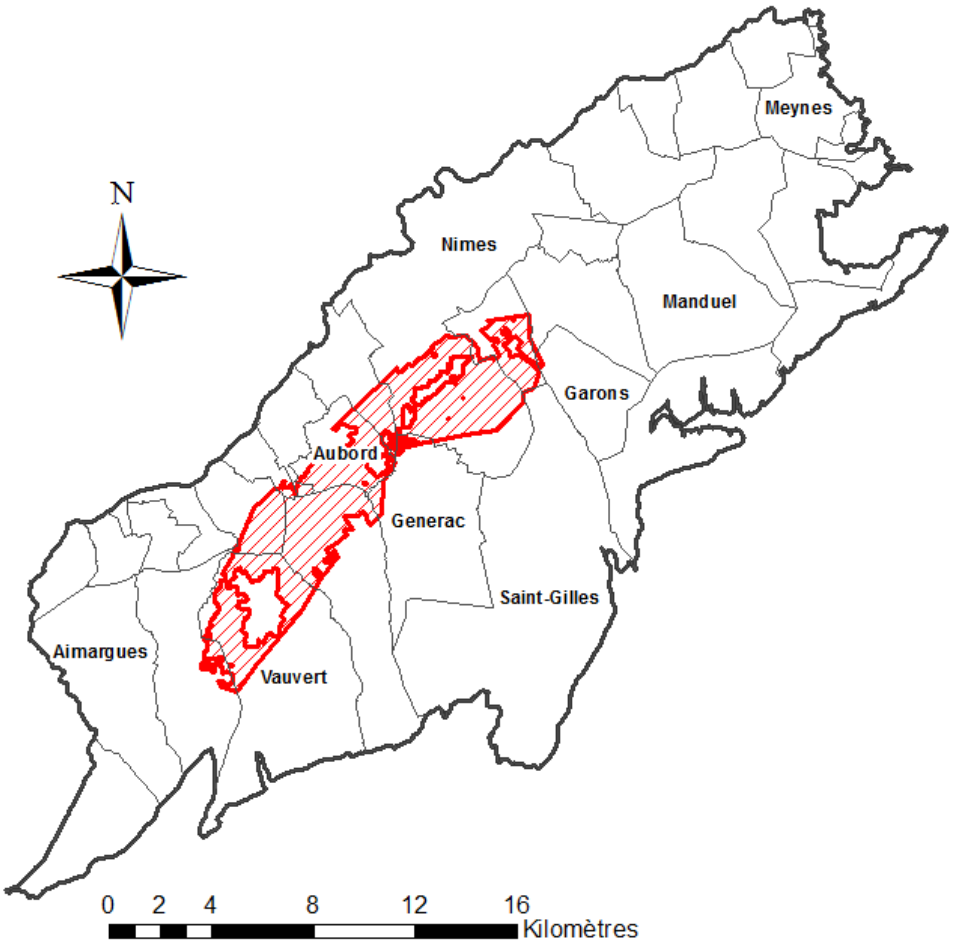


Illustration 173 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières.

PHYSIQUES	Min	Max	Moy	Med	E.T.*
EpZNS (m)	0,8	65,3	13,2	-	7,1
IDPR	0	2000	1119	1000	505
Pente (%)	0	24	2	-	2
K (m/s)	$1,1.10^{-5}$	$2,4.10^{-3}$	$4,8.10^{-4}$	-	$3,6.10^{-4}$
Vinf (ou i) (m/j)	0,05	3,1	0,8	-	0,5
Recouvrement	Oui (partie Nord). OE: Loess				

Illustration 174 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières (E.T. écart type).*

CONTRAINTES	Description
Occupation du sol (CLC)	Vignobles, systèmes culturaux et parcellaires complexes, vergers, prairies, forêts de feuillus, forêts mélangées
Zones protégées	Réserve de biosphère, ZICO (Sud), Natura 2000, ZNIEFF de type 1, ZNIEFF de type 2
Débordement de nappe	Non

Illustration 175 : Tableau récapitulatif des contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières.

COÛTS	Min	Max	Moy	Med	E.T.
CRA total (€/m3)	0,18	0,45	0,30	0,30	0,03
CRA CI (€/m3)	0,06	0,11	0,07	0,07	0,01
CRA CO (€/m3)	0,07	0,28	0,18	0,19	0,04

Illustration 176 : Tableau récapitulatif des coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire des nappes de la Vistrenque et des Costières.

8.4. SABLES ASTIENS DE VALRAS-AGDE

8.4.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants

Carte des critères physiques : Sur ce site, et comme sur les précédents, les zones défavorables et peu favorables sont surtout liées à une épaisseur de ZNS insuffisante couplé à un IDPR déclassant. La pente est globalement faible, excepté au niveau du secteur de Corneilhan et

localement au Nord du secteur de Florensac**.** La perméabilité *K* est plus favorable au droit du secteur affleurant de Corneilhan (note 4) que sur les deux autres (note 3). Mais cette différence impacte peu la note finale. Le recouvrement quant à lui est quasi inexistant.

Cartes des critères de contraintes : les zones peu favorables (orange) sont essentiellement dues au risque potentiel de débordement de nappe (secteur de Mèze). Les secteurs défavorables témoignent principalement d'une occupation du sol ne se prêtant pas à l'installation d'un bassin d'infiltration (terrains artificialisés). Peu de zones protégées existent sur ce site (à l'Est du secteur Mèze et au nord du secteur de Florensac) et impactent peu la note finale.

Bilan : d'après la carte des contraintes, peu de secteurs sont favorables à la recharge artificielle indirecte (lié à l'occupation du sol : vignobles essentiellement). Les secteurs à conserver seront donc principalement relativement favorables. D'après la carte des critères physiques, peu de zones sont défavorables sauf au niveau de Mèze. La plus grande surface favorable pouvant être retenue comme secteur d'intérêt est le centre de l'affleurements de Florensac (Illustration 177).

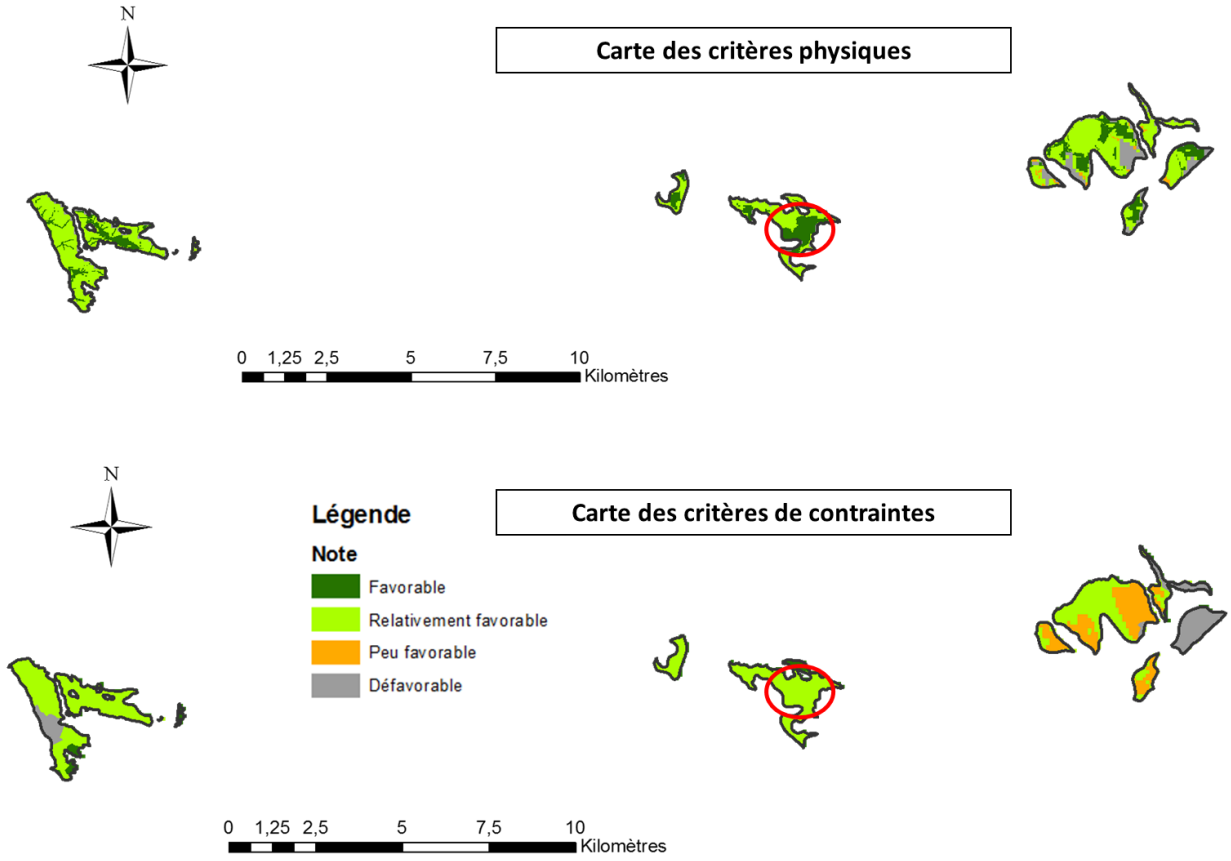


Illustration 177 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le territoire des sables astiens (affleurements).
Le secteur intéressant est entouré en rouge.

8.4.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques

Les différents échanges eus avec le Syndicat Mixte d'Études et de Travaux de l'Astien ont permis de relever ou de confirmer les points suivants :

- le secteur de Mèze, situé à l'extrémité est de l'aquifère, est de manière générale moyennement favorable, et seuls des petits cours d'eau rejoignant le bassin de Thau s'écoulent à proximité. Il s'avère donc peu intéressant. Par ailleurs, l'eau rechargée pourrait aller alimenter l'étang de Thau et non la partie aval de la nappe astienne ;
- l'eau s'infiltrant au droit du secteur de Corneilhan ne rejoint pas forcément la nappe (il se pose ici la question de la présence d'un axe drainant) ;
- le secteur de Florensac est donc à privilégier. Au vu de sa localisation (centrale), il semble plus intéressant, et, sauf dans sa partie sud, ses terrains sembleraient bien se prêter à la recharge artificielle indirecte.

De fait, la zone de recharge sélectionnée à partir des cartes de critères physiques et de contraintes (centre de l'affleurement de Florensac) paraît approprié. Cette zone est localisée en Illustration 178 (délimitation approximative et exclusion des secteurs défavorables et peu favorables des cartes de critères physiques et de contraintes). Ses caractéristiques physiques, de contraintes, et économiques sont présentées en Illustration 179 à Illustration 181.

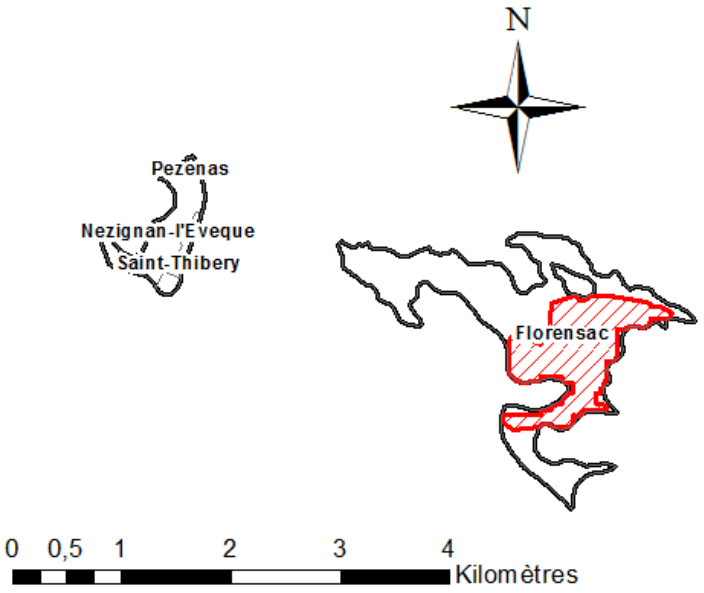


Illustration 178 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire des sables astiens (affleurements).

PHYSIQUES	Min	Max	Moy	Med	E.T.
EpZNS (m)	10,9	28,6	16,3	-	3,7
IDPR	0	2000	442	413	342
Pente (%)	0,4	9	4	-	2
K (m/s)	$1{,}05.10^{-5}$	3.10^{-5}	$2{,}03.10^{-5}$	-	$9{,}75.10^{-6}$
Vinf (ou i) (m/j)	0,05	0,11	0,08	-	0,03
Recouvrement	Non				

Illustration 179 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire des sables astiens (affleurements).

CONTRAINTES	Description
Occupation du sol (CLC)	Vignobles, systèmes culturaux et parcellaires complexes
Zones protégées	ZNIEFF de type 1 (Nord)
Débordement de nappe	Non

Illustration 180 : Tableau récapitulatif des contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire des sables astiens (affleurements).

COÛTS	Min	Max	Moy	Med	E.T.
CRA total (€/m3)	0,28	0,41	0,36	0,38	0,04
CRA CI (€/m3)	0,12	0,16	0,15	0,16	0,01
CRA CO (€/m3)	0,16	0,24	0,20	0,22	0,03

Illustration 181 : Tableau récapitulatif des coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire des sables astiens (affleurements).

8.5. ALLUVIONS DE LA FIGARELLA

8.5.1. Analyse des cartes de faisabilité de la recharge artificielle sur base de critères physiques et de contraintes et présélection de secteurs intéressants

Carte des critères physiques : sur ce site, et comme sur les précédents, les zones défavorables et peu favorables sont surtout liées à une épaisseur de ZNS insuffisante (notamment au nord vers le littoral) couplé à un IDPR non satisfaisant. La pente est globalement faible, excepté localement au sud de l'entité**.** La perméabilité *K* est favorable sur la totalité du site. D'après la carte géologique départementale harmonisée, le recouvrement de l'aquifère est inexistant.

Cartes des critères de contraintes : les zones peu favorables (orange) sont essentiellement dues au risque potentiel de débordement de nappe (au nord de l'entité principalement). Les secteurs défavorables sont rares et sont dus à la présence de terrains artificialisés (aéroport de Calvi). Il existe deux zones protégées au nord du site, impactant peu la note finale.

Bilan : les deux cartes présentent des résultats plutôt positifs quant à la faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur ce site. Les critères de contraintes sont peu précis pour ce cas d'étude (ceux-ci étant définis à grande échelle). D'après la carte des critères physiques, la partie à l'extrême amont est moins intéressante, ainsi que la zone bordant le littoral. De nombreux secteurs favorables sont observables en partie médiane, notamment en amont du seuil de San Antonio, mais également à proximité du champ captant de Calvi (Illustration 182).

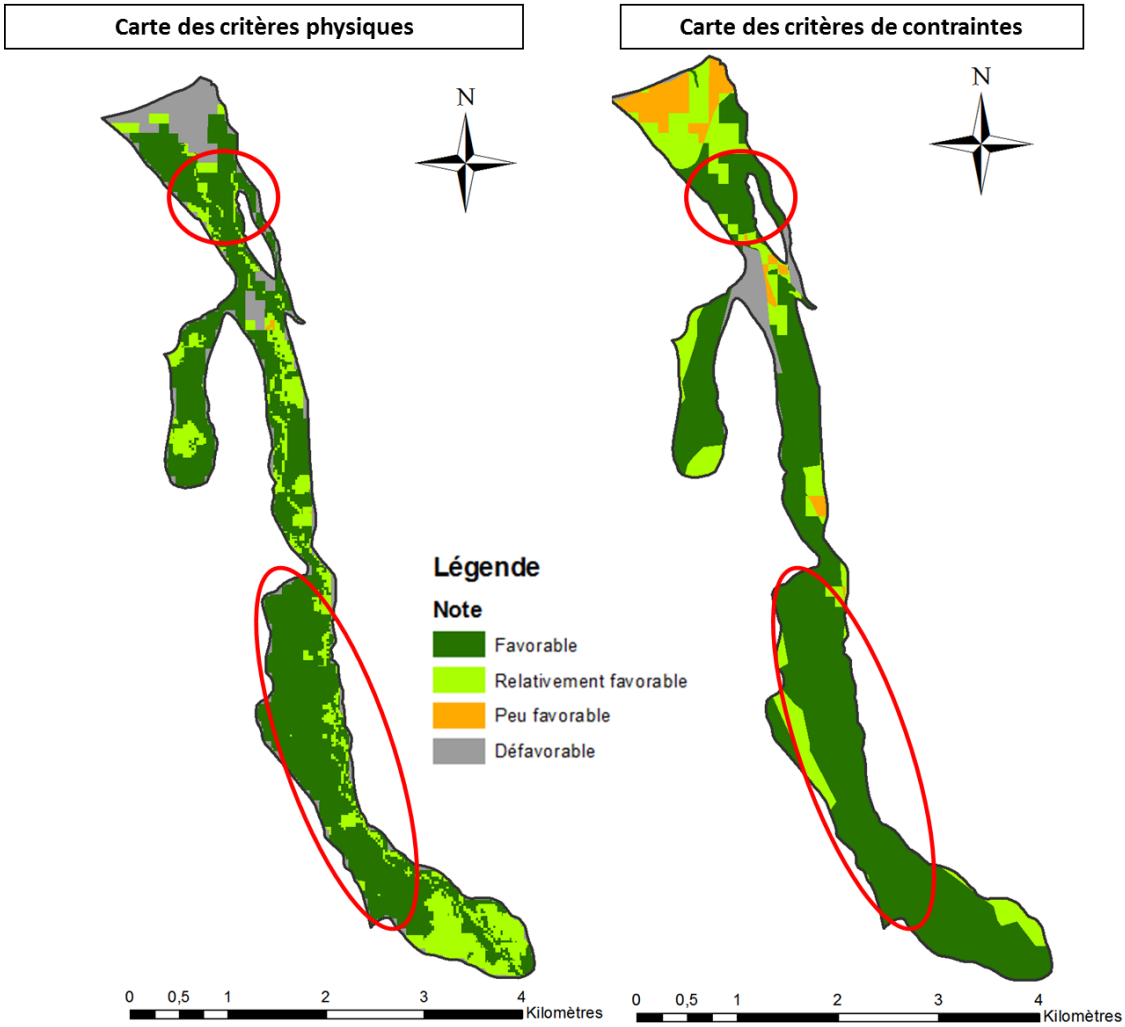


Illustration 182 : Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques et de contraintes pour le site des alluvions de la Figarella.
Les secteurs intéressants sont entourés en rouge.

8.5.2. Sélection d'un secteur et présentation de ses caractéristiques

L'entité est en grande partie favorable à la recharge artificielle indirecte. Mais les caractéristiques de l'aquifère permettant un temps de réponse rapide du système à une recharge, et celle-ci ayant pour principal objectif de contrer l'intrant salé au nord et d'éviter une contamination de l'eau captée, le secteur le plus approprié serait celui du champ captant de Calvi (secteur également proposé lors de l'étude de 1991 du BRGM, et intéressant l'Office d'Équipement Hydraulique de Corse). Cette zone est localisée en Illustration 183 (délimitation approximative et exclusion des secteurs défavorables et peu favorables des cartes de critères physiques et de contraintes). Ses caractéristiques physiques, de contraintes, et économiques sont présentées en Illustration 184 à Illustration 186.

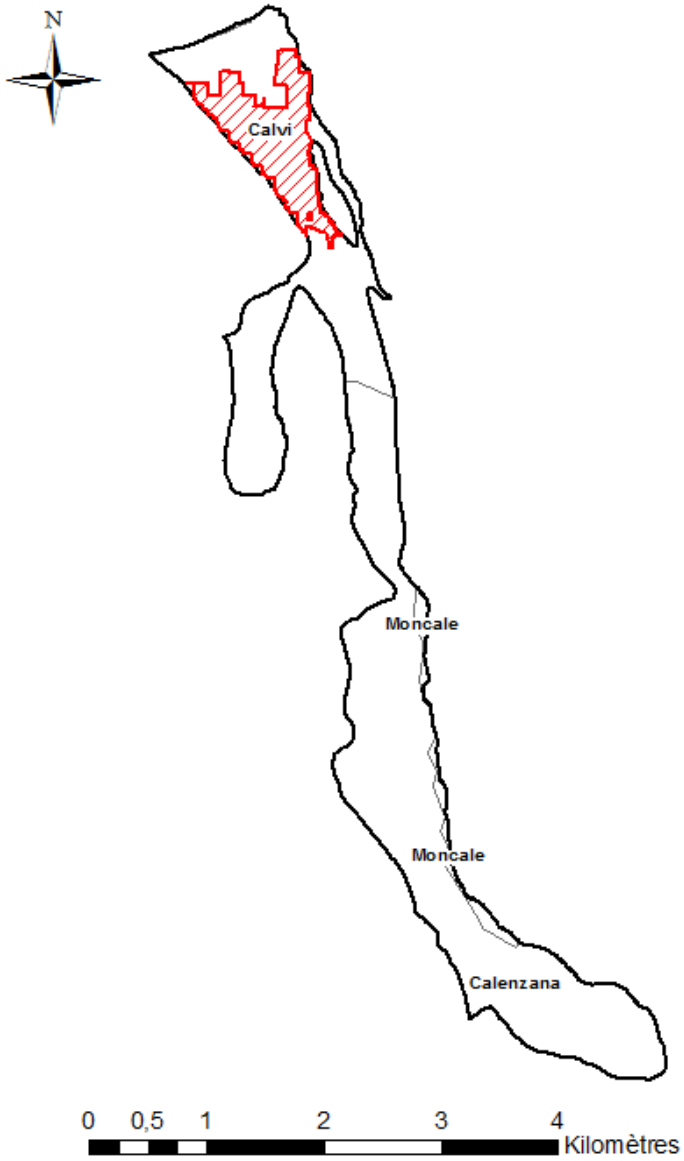


Illustration 183 : Délimitation approximative (en rouge et hachuré) du secteur principalement retenu pour le territoire des alluvions de la Figarella.

PHYSIQUES	Min	Max	Moy	Med	E.T.
EpZNS (m)	1,2	14,9	13,7	-	3
IDPR	0	2000	732	699	521
Pente (%)	0	7,6	2	-	0,7
K (m/s)	$1{,}8.10^{-3}$	$4{,}8.10^{-3}$	$2{,}5.10^{-3}$	-	$1{,}1.10^{-3}$
Vinf (ou i) (m/j)	2,3	4,9	3	-	0,9
Recouvrement	Non				

Illustration 184 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques du secteur retenu sur le territoire des alluvions de la Figarella.

CONTRAINTES	Description
Occupation du sol (CLC)	Forêts de conifères, prairies
Zones protégées	ZNIEFF de type 1, Site inscrit
Débordement de nappe	Globalement non (risque éventuel au nord)

Illustration 185 : Tableau récapitulatif des contraintes au droit du secteur retenu sur le territoire des alluvions de la Figarella.

COÛTS	Min	Max	Moy	Med	E.T.
CRA total (€/m3)	0,11	0,14	0,12	0,13	0,01
CRA CI (€/m3)	0,05	0,07	0,06	0,06	0,01
CRA CO (€/m3)	0,067	0,072	0,07	0,07	0,001

Illustration 186 : Tableau récapitulafif des coûts unitaires de recharge totaux (CRA), incluant la part d'investissement (CRA CI) et la part opérationnelle (CRA CO), pour le secteur retenu sur le territoire des alluvions de la Figarella.

9. Conclusion

Cette étude a permis de développer et tester des méthodologies de cartographie de potentialité de solution de recharge artificielle appliquées au contexte des bassins Rhône Méditerranée et Corse en prenant en compte les critères de faisabilité technique, d'intégration en fonction de l'occupation du territoire et des critères de coût économique. Quatre territoires test ont été choisis en concertation avec l'AERMC et les DREAL régionales dans le Bassin pour tester, sur des cas réels, les méthodologies développées. Il s'agit des sables de l'Astien (Hérault), de alluvions de la Plaine de la Vistrenque (Gard), des alluvions de la Figarella (Corse) et de la Plaine de Bievre-Liers-Valloire.

D'un point de vue de la faisabilité technique, la prise en compte des critères hydrogéologiques et géographiques s'est appuyée sur les données de la BDLISA. Même si cette approche est grossière, elle a permis de prendre en compte les caractéristiques des aquifères (libre/captif, type de porosité, type de fracturation et de perméabilité, lithologie…) favorables ou non à un dispositif de recharge artificielle. Le caractère potentiellement infiltrant des formations géologiques a été approché par l'indice IDPR qui traduit l'aptitude du sol à l'infiltration de l'eau. L'épaisseur moyenne de la zone non saturée a également été prise en compte de façon à intégrer la capacité des aquifères à absorber l'eau infiltrée. Ces paramètres, connus et cartographiés à l'échelle du Bassin, ont permis de produire des cartes de potentialité à la recharge artificielle (directe et indirecte) des aquifères pour l'ensemble du Bassin. Il convient de préciser que cette approche, a nécessité un certain nombre de simplifications et d'hypothèses pour pouvoir être menée à une échelle vaste (Bassin RMC) : l'hétérogénéité de certaines formations (notamment les entités dites « semi-perméables ») n'a pu être prise en compte, les aquifères karstiques ont été considérés a priori comme défavorables à la recharge artificielle, l'absence de données hydrodynamiques distribuées n'a pas permis d'intégrer, sur la durée, la capacité de stockage que conférait la porosité de l'aquifère… Une analyse plus détaillée, incluant des données plus précises, de préférence distribuées dans l'espace, est nécessaire à l'échelle de chaque entité hydrogéologique pour vérifier et confirmer son aptitude potentielle à la recharge artificielle. C'est l'objet des chapitres 4 à 8 dédiés à de telles approches à l'échelle de territoires test.

Les critères utilisés à l'échelle du Bassin, en y ajoutant la valeur de la perméabilité (lorsque disponible, en provenance de modèle numériques disponibles) et une information relative à la présence de formations superficielles (potentiellement peu perméables), ont été appliqués à l'échelle de territoires test (aquifères ou masses d'eau souterraine) sélectionnés dans le Bassin. Des propositions sont formulées pour dimensionner un dispositif de recharge indirecte, prenant en compte les propriétés hydrodynamiques de l'entité hydrogéologique considérée. Une analyse prenant en compte la diffusivité de l'aquifère ainsi que la distance aux exutoires potentiels (sources et cours d'eau de surface), a permis d'évaluer la capacité de l'aquifère à stocker l'eau rechargée sur la durée. Les contraintes liées à l'occupation du sol ont également été prises en compte en exploitant les données des couches de Corine Land Cover.

L'évaluation d'une fonction de coût distribuée a permis de calculer une cartographie de coût unitaire d'infiltration en chaque point des territoires test. Elle prend en compte les coûts opérationnels et d'investissement pour les différentes composantes d'un dispositif de recharge indirecte : prise d'eau, transfert, prétraitement, bassin d'infiltration et coûts annexes. La construction de cette fonction a mis en évidence le manque de données de coûts opérationnels disponibles et a en conséquence nécessité un certain nombre d'hypothèses. L'application de cette fonction de coût cartographique sur des territoires test est destinée à illustrer les potentialités d'une telle approche dans l'identification d'un secteur potentiel pour implanter un dispositif de recharge artificielle. Les différents paramètres entrant en jeu pour calculer le coût,

dont la sensibilité est mentionnée ci-dessous, doivent être précisés au cas par cas au moyen d'études complémentaires par le potentiel maître d'œuvre d'une telle solution afin d'améliorer les résultats de l'approche menée dans cette étude, qui se veut préliminaire.

L'analyse de sensibilité effectuée sur les quatre territoires test a permis de mettre en évidence les caractéristiques majeures influant sur le coût unitaire de la recharge indirecte. Logiquement, ce sont les coûts variables (coût de prétraitement ou d'achat de l'eau) qui impactent le plus le coût final unitaire. La durée de vie du dispositif est également un élément important pour l'amortissement des coûts d'investissement. Le débit de recharge impacte fortement les coûts, surtout dans la gamme des petits volumes (entre 0,05 et 2 Mm^3/an) car il induit des variations de taille du bassin d'infiltration, du diamètre des conduites et du débit de pompage en cas de dénivelé. La distance et le dénivelé entre la source d'eau de surface et le bassin d'infiltration jouent un rôle intermédiaire sur les coûts unitaires. La durée de la recharge et le taux d'infiltration jouent un rôle modéré sur les sites étudiés du fait des gammes de variation testées qui sont peu élevées. Cependant, dans l'absolu, ces deux caractéristiques doivent être considérées avec précaution car influant sur la taille du bassin d'infiltration. Les coûts d'acquisition du foncier et d'entretien des bassins (épaisseur de filtre colmatée, périodicité des entretiens) impactent modérément le coût unitaire de recharge.

Concernant les coûts unitaires estimés pour la recharge artificielle, il s'agit d'un coût exprimé en euros par m^3 d'eau infiltrée, sans garantie de récupération de ladite eau infiltrée. Son devenir est en effet incertain, en fonction des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de stockage, de la distance à de potentiels exutoires (sources, cours d'eau), de l'existence d'éventuels captages permettant de récupérer cette eau et plus spécifiquement du contexte local du dispositif de recharge artificielle incluant l'objectif du dispositif (lutte contre le biseau salé, soutien d'étiage d'un cours d'eau, lutte contre le déséquilibre quantitatif d'une masse d'eau souterraine…). L'unique façon de précisément estimer la part d'eau rechargée qui peut être valorisée suite à un dispositif est la modélisation numérique prenant en compte l'ensemble des paramètres jouant un rôle dans les écoulements de l'eau infiltrée. Cependant, une méthodologie permettant d'approcher les potentiels échanges entre un dispositif de recharge artificielle et les eaux de surface a été proposée. La solution analytique utilisée permet de calculer la part du volume infiltré qui pourrait rejoindre un éventuel cours d'eau en relation avec l'aquifère après une certaine période d'infiltration. Il est particulièrement intéressant de noter que cette part (ratio entre le volume d'eau s'écoulant vers la surface et le volume d'eau total infiltré) est indépendante du volume infiltré et de la taille du bassin d'infiltration.

La mise en commun des différents documents cartographiques produits a permis d'identifier des sites favorables, pour chacun des quatre territoires test, en leur associant un ordre de grandeur de coût. Ce dernier reste encore incertain au vu du manque de données de référence disponibles dans la littérature. Ce manque de données économiques et financières sur les dispositifs de recharge artificielle est rencontré dans l'ensemble des pays où cette solution a été mise en œuvre. Le volet économique de la mise en place d'une solution de recharge artificielle reste un élément d'incertitude important. Sur chacun des territoires test, une étude de faisabilité est maintenant nécessaire pour affiner l'analyse effectuée présentée dans ce rapport au moyen notamment de l'acquisition de nouvelles données et en précisant les objectifs de recharge avec les gestionnaires locaux.

Au vu de l'impact du changement climatique sur les volumes de recharge des aquifères et sur les débits des rivières, il conviendra de tenir compte des modifications de ces flux pour dimensionner un nouveau dispositif d'une durée de vie de 30 années, voire plus. D'un point de vue financier, il conviendra également d'adapter les coûts de traitement en fonction de l'origine de l'eau infiltrée : par exemple, dans le cas d'eaux usées traitées, les coûts peuvent être supérieurs aux coûts

considérés dans cette étude au vu de la nécessité d'améliorer la qualité de l'eau, mais ils peuvent également souvent y être inférieurs.

La méthodologie proposée dans cette étude peut être répliquée dans d'autres bassins du territoire français puisqu'elle repose sur des données cartographiques qui sont disponibles à l'échelle nationale. Dans un rapport à venir (Maréchal et al. 2019), elle sera déclinée de façon simplifiée en intégrant un certain nombre de recommandations en vue de guider le maître d'ouvrage d'un nouveau projet de recharge artificielle.

Plus généralement, il apparaît qu'un projet de recharge artificielle nécessite d'être considéré dans son ensemble en intégrant l'ensemble des acteurs, des coûts mais aussi des bénéfices potentiels générés par un dispositif de recharge artificielle dans une perspective de gestion intégrée de la ressource en eau. Une telle démarche pourrait permettre de faciliter la mise en œuvre d'un tel projet tout en identifiant un maître d'ouvrage légitime et en mesure de fédérer l'ensemble des acteurs.

Bibliographie

9.1. GÉNÉRAL

Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée – Corse (2005) – Références de coûts pour la construction des retenues collinaires. 46p.

Allier D., Brugeron A., Mardhel V. (2018) - Cartographie préliminaire de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée, à l'échelle du 1/100 000ème sur la France Métropolitaine. Rapport BRGM/RP-68354-FR.

Brugeron A., Bessiere H., Bourgine B., Stollsteiner P. (2018) – Étude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale. Rapport final. BRGM/RP-65452-FR. 119p.

Brugeron A., Paroissien J.B., Tillier L. (2018) - Référentiel hydrogéologique BDLISA version 2 : Principes de construction et évolutions. Rapport final BRGM/RP-67489-FR. 69 p., 33 fig., 11 tab., 3 ann.

Caballero Y., Moiroux F., Bouzit M., Desprats J-F., Maréchal J-C. (2018) – Faisabilité de la recharge artificielle dans le bassin Rhône Méditerranée Corse: contexte et analyse cartographique. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-67534-FR, 162 p., 62 fig., 4 ann., 1 CD.

Carleton G.B. (2010) - Simulation of groundwater mounding beneath hypothetical stormwater infiltration basins: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5102, 64 p.

Casanova J., Cagnimel M., Devau N., Pettenati M., Stollsteiner Ph. (2013). Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives. Rapport final. BRGM/RP-61821-FR. 99 p., 16 ill., 18 ann.

CGDD (2015), http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Le_Point_Sur/2015/lps219-occupation-des-sols-decembre 2015.pdf

Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective [CGSP] (2013) – L'évaluation socioéconomique des investissements publics. Rapport de la mission présidée par Émile QUINET. 352p.

Corisco-Perez C. (ENGREF) (2006) – Potabilisation: les coûts réels de production de l'eau potable. Synthèse technique. 12p.

Daher, W., Pistre, S., Kneppers, A., Bakalowicz, M. & Najem, W. Karst and artificial recharge: Theoretical and practical problems: A preliminary approach to artificial recharge assessment. J. Hydrol. 408, 189–202 (2011).

Detay M. (1997) - La gestion active des aquifères, 440 p, ed. Masson.

Escalante E.F. (2010) - DINA-MAR. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico. 495p.

Guette-Bouvarot M. (2014) – Rôle du compartiment biologique dans les processus de colmatage et décolmatage de bassins d'infiltration. Thèse en Ingénierie de l'environnement, ENTPE. 297p.

Hannappel S., Scheibler F., Huber A., Sprenger C. (2014). Characterization of European managed aquifer recharge (MAR) sites - Analysis, EU FP7 DEM'EAU project, http://demeau-fp7.eu/sites/files/M11_1%20catalogue%20of%20european%20MAR%20applications_plus_appendix.pdf

Hantush M.S. (1967) - Growth and decay of groundwater-mounds in response to uniform percolation. Water Resources Research, 3(1):227-234. DOI: 10.1029/WR003i001p00227.

IGN (2017) - BD-ALTI, version 2.0, Descriptif du contenu, http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_BDALTI_2-0.pdf

Loizeau S. (2013) – Amélioration de la compréhension des fonctionnements hydrodynamiques du champ captant de Crépieux-Charmy. Thèse en Sciences de la Terre, Université de Grenoble. 221p.

Mardhel V., Frantar P., Uhan J., Miso A. (2004) - Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. International conference on groundwater vulnerability assessment and mapping. Ustron, Poland, 15–18 June 2004

Maréchal JC., Bouzit M., Caballero, Y., Moiroux F. (2019) – Recommandations pour l'analyse de la préfaisabilité de la recharge de nappe au moyen d'eau de surface : application au Bassin RMC. Rapport final. BRGM/RP-68662-FR, 86 p., 51 ill.

Miotlinski, K., Barry, K, Dillon, P. and Breton, M. (2010). Alice Springs Soil Aquifer Treatment Project – Hydrological and Water Quality Monitoring 2008-2009 Report. Water for a Healthy Country Flagship Report, May 2010. http://www.clw.csiro.au/publications/waterforahealthycountry/2010/wfhc-AliceSprings-SAT-monitoring.pdf

NORPAC, IDDR (pas de date renseignée) – Guide BBP – Biodiversité et gestion de l'eau à la parcelle : les bassins de rétention. 6p.

Paroissien J.B., Brugeron A., Sedan O., Renaud C., Quique R., Taffoureau E. (2015) – Référentiel hydrogéologique Français BDLISA version 1 : Présentation du référentiel. Principe de construction et mise en œuvre. Rapport final. BRGM/RP-65370-FR, 84 p., 24 fig., 15 tabl.

Saaty L. T. (2008) - Decision making with the analytic hierarchy process, Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, p.83-98

Sandre (2015) - BD LISA Version 1 – Scénario d'échange de données géographiques (Descriptif de livraison) Version 2. Éditeur : Ministère chargé de l'environnement. SiteWeb: http://www.reseau.eaufrance.fr/geotraitements/sites/default/files/avertissement_utilisation_BDLISA_version_1.pdf.

Schuh W. M. (1990) – Seasonal variation of clogging of an artificial recharge basin in a northern climate. Journal of Hydrogeology, 121, 193-215

Seguin J.J., Mardhel V., avec la collaboration de Schomburgk S., Allier D. (2013) - Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA-version V0. Présentation du référentiel, principes de construction et mise en œuvre. Rapport final. BRGM/RP-62261-FR. 156 p., 57 ill., 2 ann.

SOGREAH (2010) – Détermination du coût des opérations de transfert d'eau. Etude technico-économique. Mémoire restitutif. 46p.

Warner, J.W., Molden, D., Chehata, M. and Sunada, D.K. (1989) – Mathematical analysis of artificial recharge from basins, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 25: 401-411. doi:10.1111/j.1752-1688.1989.tb03077.x

Wuilleumier A., Seguin J.J. (2008). Réalimentation artificielle des aquifères en France : une synthèse. Rapport final. BRGM/RP-55063-FR, 122 pages, 21 figures, 3 tableaux et 5 annexe.

9.2. SITE DE BIÈVRE-LIERS-VALLOIRE

AnteaGroup (2012) - Étude des zones stratégiques pour l'alimentation en eau potable actuelle et future de la nappe de Bièvre Liers Valloire. Rapport de phase 1. N°64359/C. 67p.

AnteaGroup (1996) - Réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Bièvre-Valloire. Phase 3. Conseil général de l'Isère.

BURGEAP, ASCA (2016) - Diagnostic du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau du bassin Bièvre-Liers-Valloire. Rapport d'état des lieux, de diagnostic et de synthèse globale. Phase 1 – État des lieux et diagnostic. REAUCE01300-03. 179p.

Commission Locale de l'Eau du SAGE Bièvre-Liers-Valloire (2011) - Synthèse de l'état des lieux et du diagnostic global. 16p.

Commission Locale de l'Eau du SAGE Bièvre-Liers-Valloire (2016) - Stratégie du SAGE Bièvre Liers Valloire. 49p.

Dubar C., Fournier I. (1994) - Synthèse Hydrogéologique du bassin de Bièvre-Valloire. BRGM/RN-01678-FR. 557p

Ingedia (2012) – Conseil Général de l'Isère : Aéroport de Grenoble-Isère, dossier de porter à connaissance.

Martin J.C., Putot E. (2008a) - Élaboration de règles de gestion volumique en eau de la nappe de Bièvre-Valloire. Phase 1 – Acquisition, mise en forme et analyse des données disponibles. Rapport d'avancement. BRGM/RP-56117-FR.117p.

Martin J.C., Putot E., Brenot A. (2008b) - Élaboration de règles de gestion volumique en eau de la nappe de Bièvre-Valloire. Phase 2 – Modélisation globale des écoulements souterrains. Phase 3 – Élaboration de règles de gestion volumique. Rapport final. BRGM/RP-56651-FR.107p.

SETIS (2014) – Affouillement du sol en vue de la création d'un bassin de rétention – Commune de Champier (38). État initial. 0C069.2910.I01

SOGREAH (2008) - État des lieux quantitatif et qualitatif de la nappe de Bièvre Liers Valloire. N° 1 74 0865 R3V2. 90p.

SOGREAH, Asconit (2011) - Étude de détermination des volumes maximums prélevables du bassin Bièvre-Liers-Valloire. Rapport de phase 1. N°1741885. 79p.

9.3. SITE DES NAPPES DE LA VISTRENQUE ET DES COSTIERES

AnteaGroup (2015) - Étude des zones stratégiques à préserver pour l'alimentation en eau potable actuelle et future des nappes Vistrenque et Costières. Rapport de phase 1. A 78545/B. 76p.

BRL (2017b) – Qualité de l'eau. Ressource RHONE. Canal Philippe LAMOUR et autres canaux rhodaniens. 2p.

Établissement Public Territorial du Bassin du Vistre, Syndicat Mixte d'Étude et de Gestion de la Nappe de la Vistrenque (2014) – SDAGE Vistre, Nappes Vistrenque et Costières, Département du Gard. Orientations stratégiques. 55p.

GINGER Environnement et Infrastructures (2012b) – Étude de détermination des volumes prélevables. Bassin versant du Vidourle. Phases 1, 2 et 3. 290p.

GINGER Environnement et Infrastructures (2010a) – SAGE du Vistre et des nappes Vistrenque et Costières : État Initial.240p.

GINGER Environnement et Infrastructures (2010b) – SAGE du Vistre et des nappes Vistrenque et Costières : Diagnostic.68p.

Pinzelli S. (2006) – Modélisation de la nappe de la Vistrenque. Travail de diplôme 2006. 94p.

Piro J.S. (2008) – Modélisation numérique des nappes des cailloutis villafranchiens de la Vistrenque pour le suivi et la gestion de la ressource. Mémoire de stage de 2ème année de master. 110p.

Syndicat Mixte d'Étude et de Gestion de la Nappe de la Vistrenque, Syndicat Mixte du Bassin Versant du Vistre (2005) – Bassin versant du Vistre, nappes de la Vistrenque et des Costières : un SAGE pour mieux protéger et gérer durablement la ressource en eau et le milieu aquatique. Dossier de saisine. 44p.

9.4. SITE DES SABLES ASTIENS

BRL (2017a) – Qualité de l'eau. Ressource ORB. Stations de pompage de Réals, Gaujac, Cessenon. 2p.

CEREG Ingénierie (2015) – Élaboration du schéma directeur de la ressource en eau sur le bassin de l'Hérault. Détermination des volumes maximums prélevables. Actualisation du bilan des prélèvements (phase 1). M11169. 149p.

DREAL Languedoc-Roussillon (2015a) – Gestion quantitative des ressources en eau superficielles du bassin versant du fleuve Hérault. 3p.

DREAL Languedoc-Roussillon (2015b) – Gestion quantitative des ressources en eau superficielles du bassin versant du fleuve Orb. 3p.

Eaucéa (2014) – Gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant de l'Aude. Étude de détermination des volumes prélevables. Bilans et scénarios. 71p.

GINGER Environnement et Infrastructures (2012a) – SAGE de la Nappe Astienne : État des lieux. État Initial.185p.

GINGER Environnement et Infrastructures (2010c) – Étude pour la protection des affleurements de sables astiens. 97p.

Hanot F. (2000) – Étude de la Nappe Astienne : Détermination de la géométrie de l'aquifère pour la partie marine. Rapport BRGM. 12p.

HYDROEXPERT (2001) – Modélisation hydrodynamique biphasique de la nappe astienne. Rapport final. RP01M041. 65p.

Laurent A. (1993) – La gestion en bien commun des eaux souterraines : la nappe des sables astiens de Valras-Agde (Hérault), une opération pilote en Languedoc-Roussillon. Thèse. 171p.

Syndicat Mixte d'Études et de Travaux de l'Astien (2017) – SAGE de la nappe astienne. Plan de Gestion de la Ressource en Eau de la nappe astienne. 111p.

Syndicat Mixte d'Études et de Travaux de l'Astien (2014) - SAGE de la nappe astienne. Stratégie. Principes directeurs. 86p.

Syndicat Mixte d'Études et de Travaux de l'Astien (2007) - SAGE de la nappe astienne. Dossier préliminaire. Proposition de périmètre. 42p.

9.5. SITE DES ALLUVIONS DE LA FIGARELLA

Aquascop (2016) - Étude des plans d'eau du programme de surveillance des bassins Rhône Méditerranée et Corse - rapport de données brutes et interprétation. Retenue de Codole – suivi annuel 2015. 54p.

Farand R., Garnier J.L. (1991) – Alimentation en eau potable de Calvi (Haute-Corse), champ de captage de la Figarella, réalimentation artificielle de la nappe en période d'étiage. Simulation sur modèle mathématique. BRGM/RR-33247-FR, 44p.

Frissant N. (2015a) – Nappe alluviale du champ captant de la Figarella, aide à l'instrumentation pour le suivi de la nappe. Rapport intermédiaire. Phase 1. BRGM/RP-65040-FR, 54 p.

Frissant N., Genevier M. (2015b) – Nappe de la Figarella, gestion de crise, étiage 2014. Rapport final. BRGM/RP-64498-FR, 75p.

Graveline N., Courtois N., Frissant N., Rinaudo J.D. (2010) – Évolution des pressions quantitatives sur les eaux souterraines de Corse : situation actuelle et évolution possible à l'horizon 2025. Rapport final. BRGM/RP-58254-FR, 120p.

Nguyen-Thé D., Palvadeau E., Sinzelle B. (2003) – Atlas cartographique des aquifères littoraux de Corse. Rapport BRGM / RP-52191-FR, 99p.

Office d'Équipement Hydraulique de Corse (2015) – Étude d'incidence des prélèvements en rivière sur la nappe alluviale de la Figarella. Demande de modification de l'arrêté préfectoral de prélèvement. 100p.

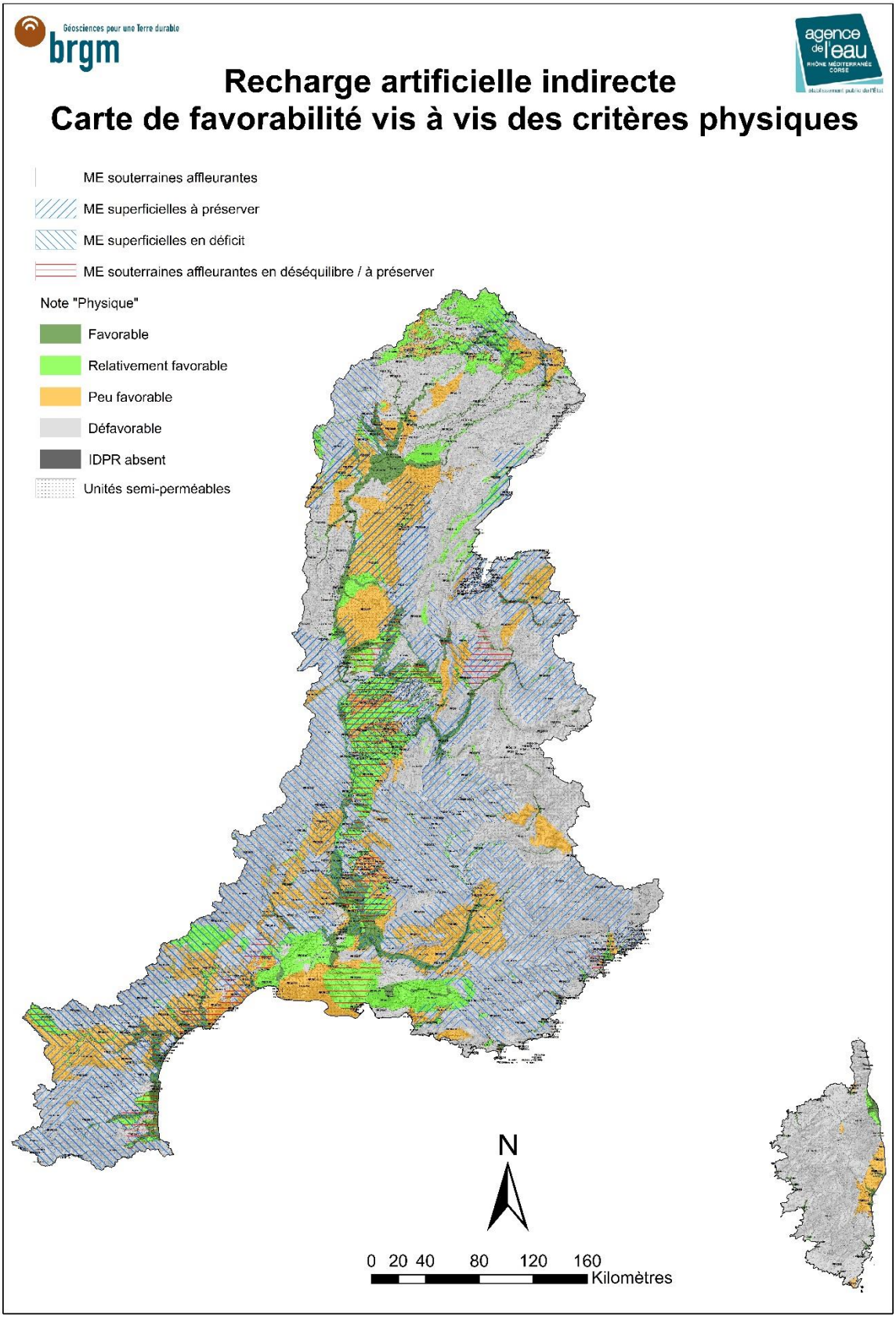
Sciences et Techniques de l'Environnement (Rédacteur : Coppin H.) (2013) – Étude des plans d'eau du programme de surveillance des bassins Rhône-Méditerranée et Corse. Rapport de données brutes et interprétation. Retenue de Codole. Rapport n°08-283/2013-PE2012-08, 65p.

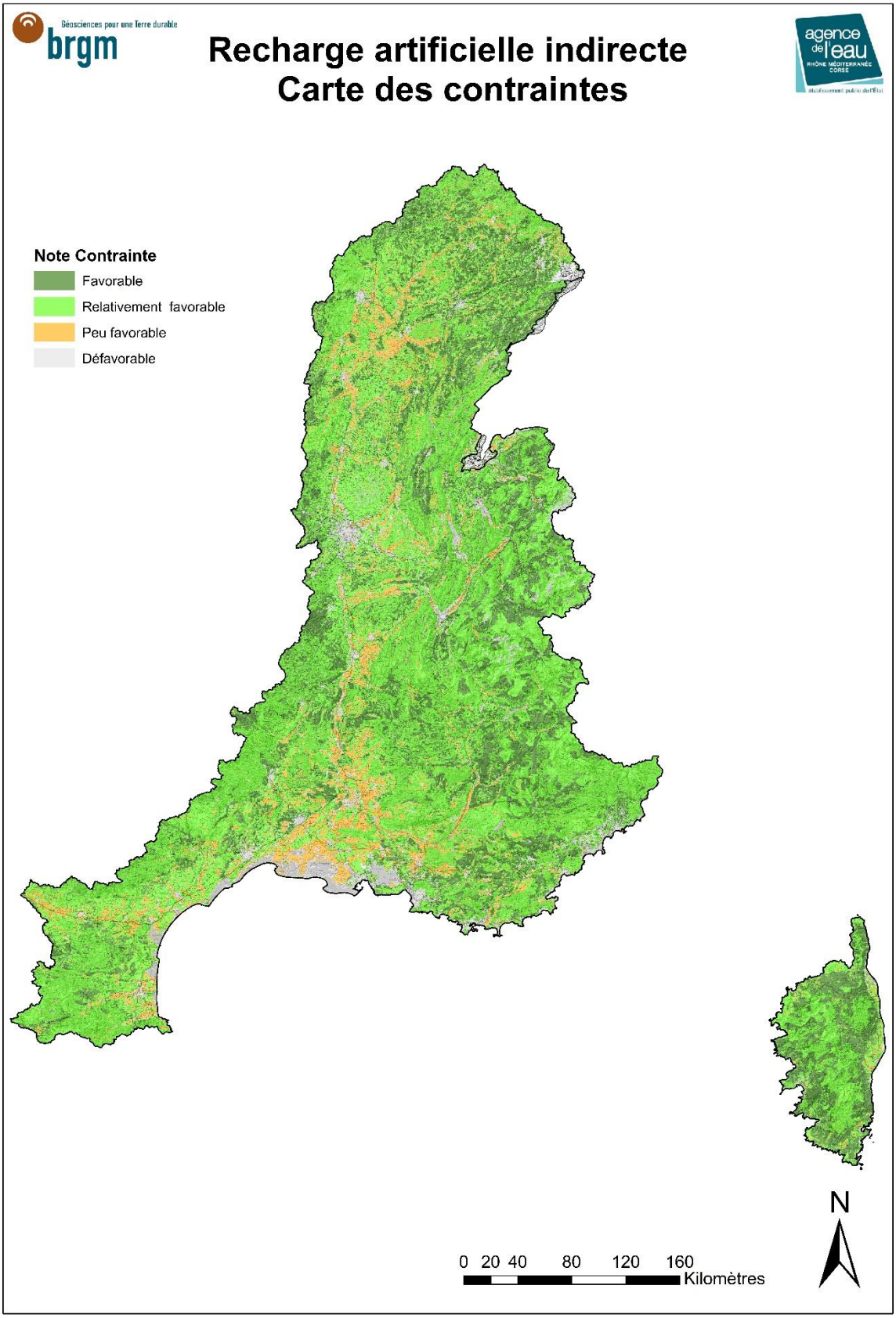
Terce P. (1987) – Recherche et estimation des ressources en eau pour une collectivité territoriale. Hydrogéologie et exploitation de la nappe alluviale de la Figarella en Haute Corse. Conservatoire national des arts et métiers de Paris.

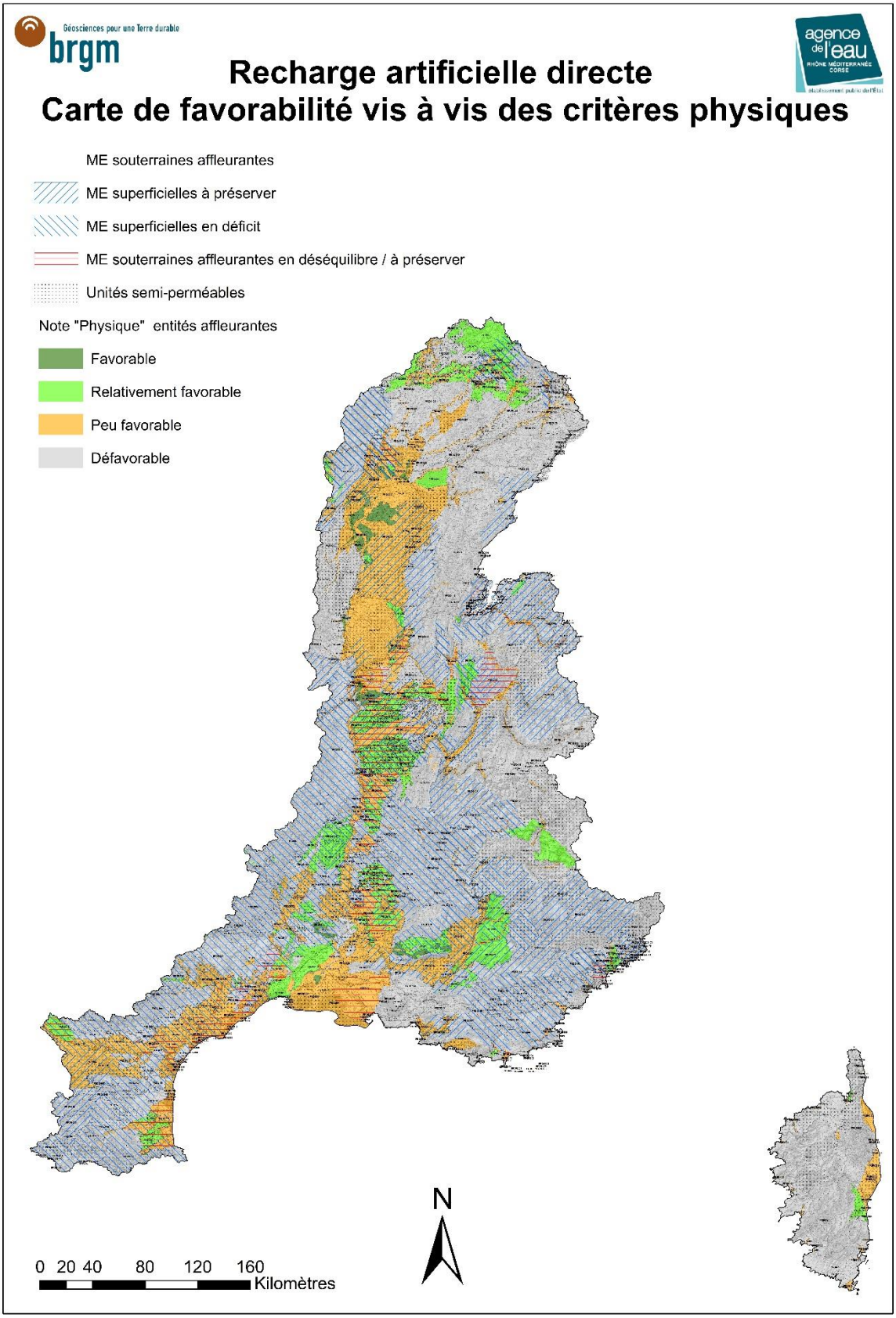
Annexes

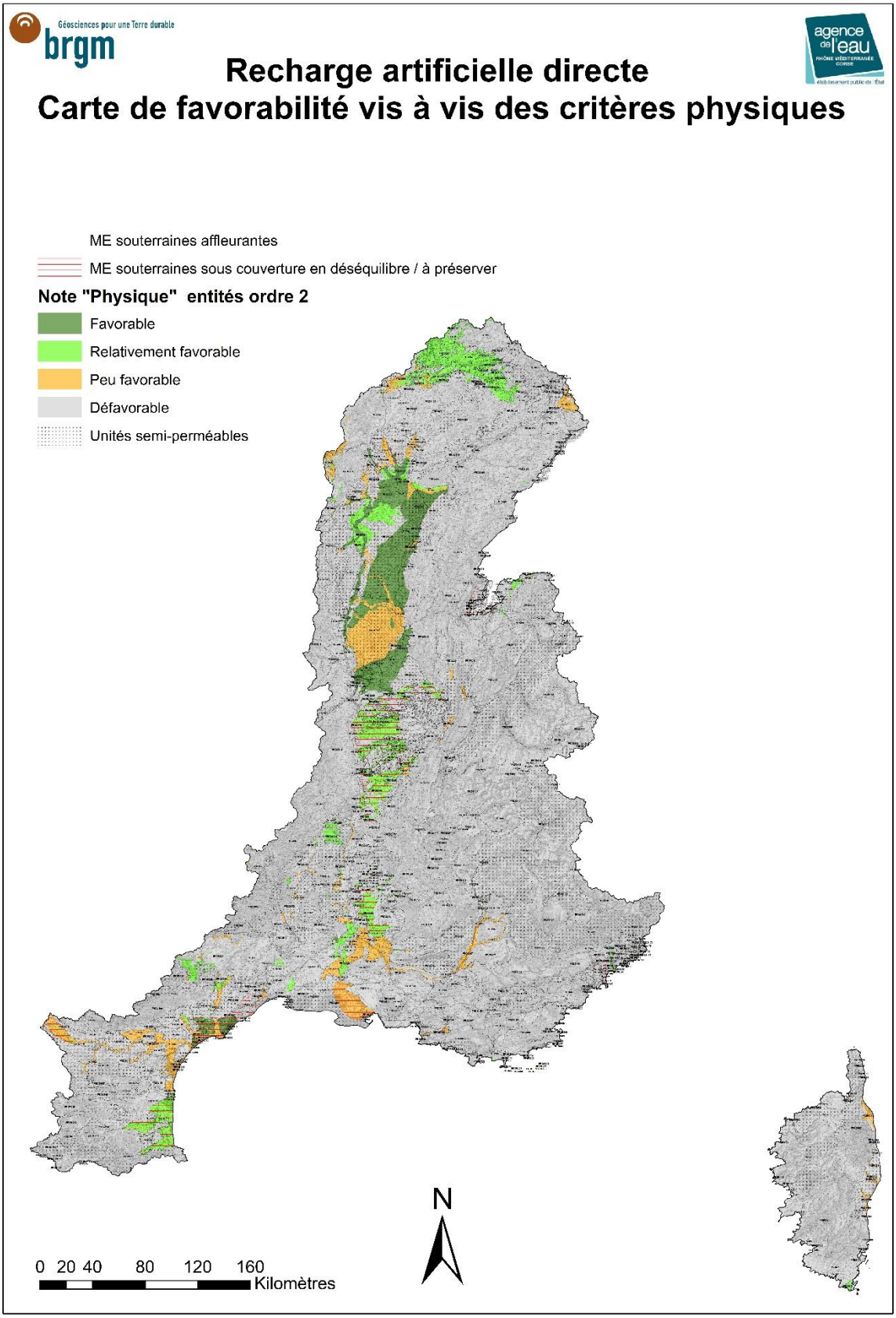
Annexe 1

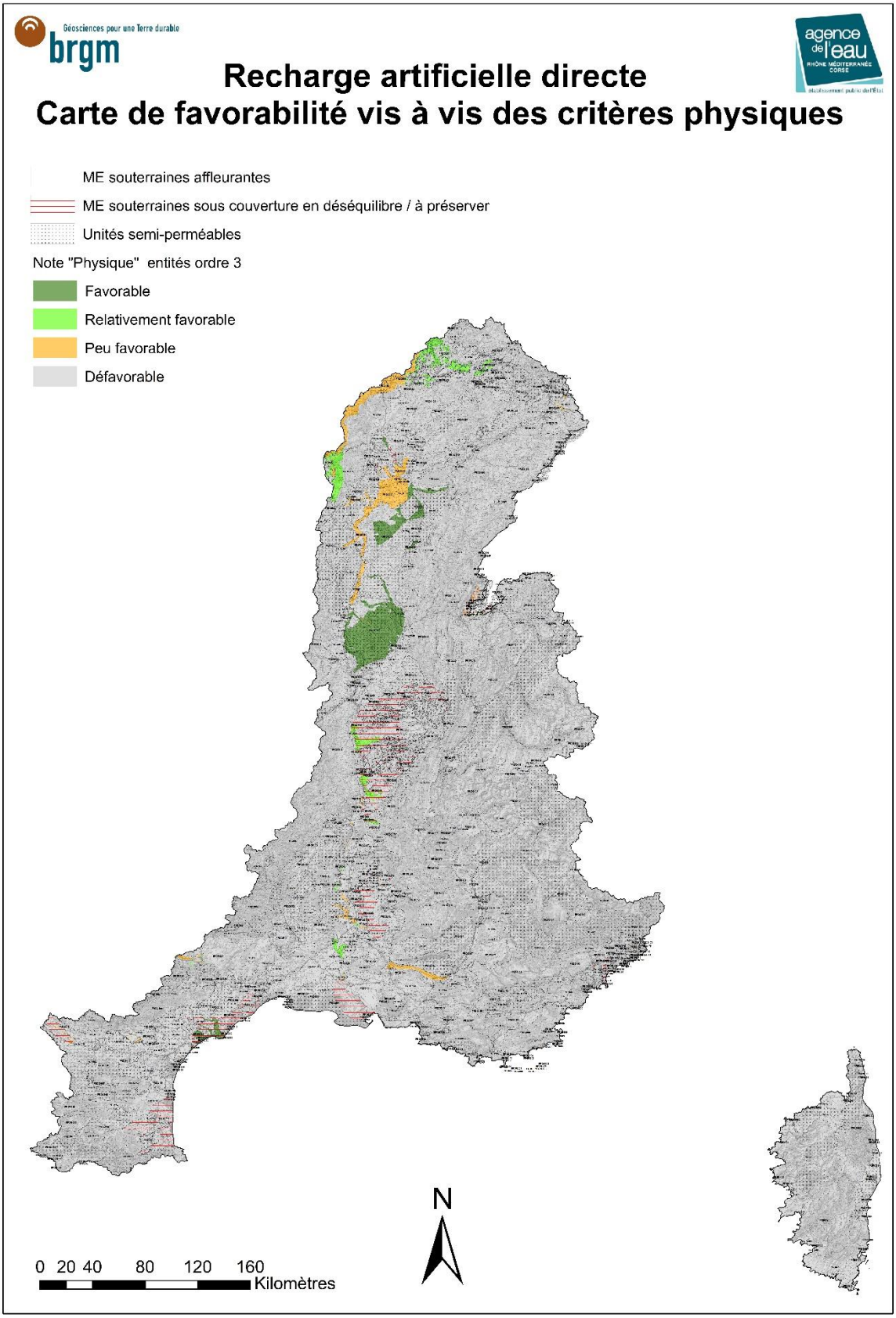
Cartes de la faisabilité (sur base de critères physiques et de contraintes) de la recharge artificielle indirecte et directe à l'échelle du bassin RMC

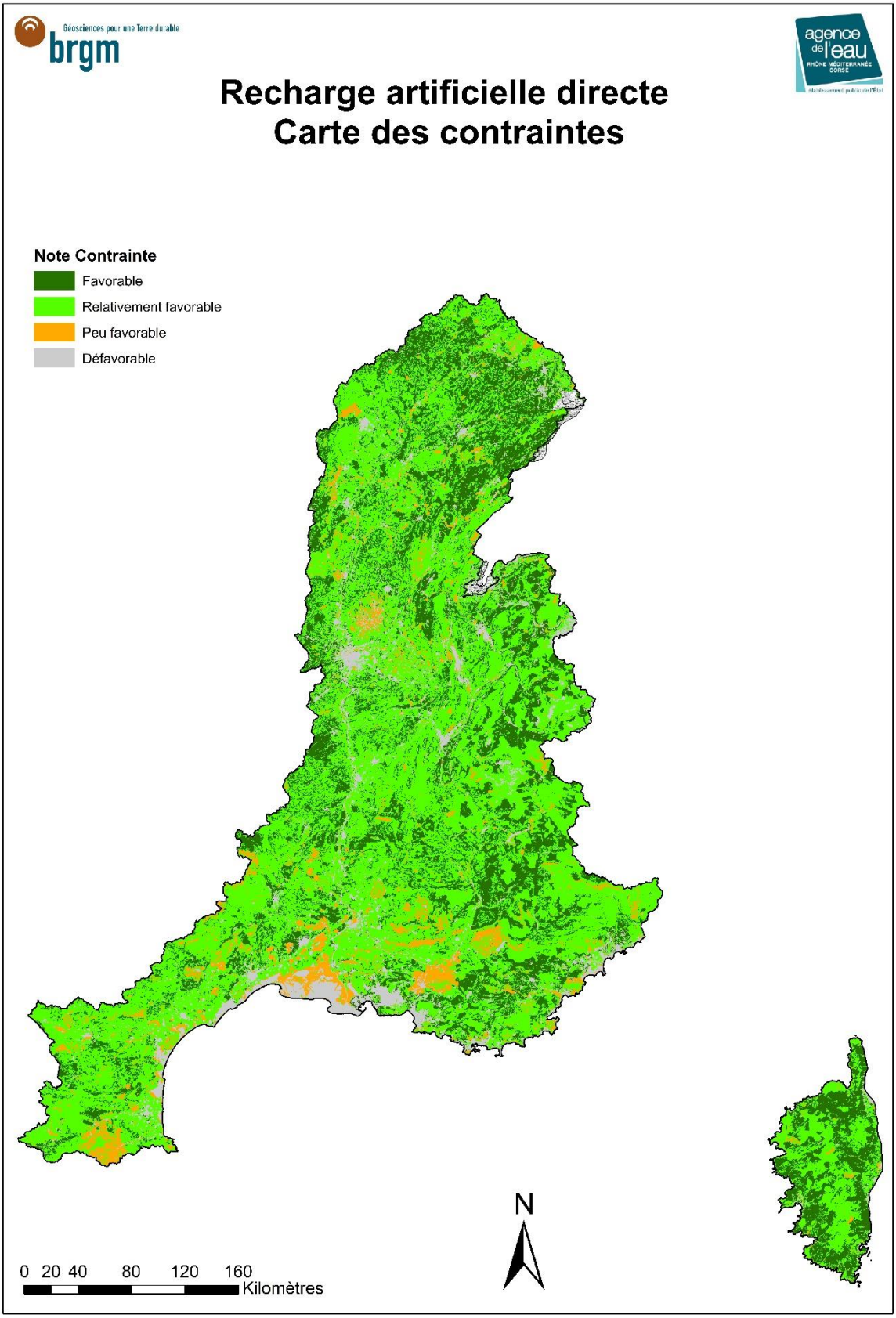

Géosciences pour une Terre durable
brgm
agence de l'eau
RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
Recharge artificielle indirecte
Carte de favorabilité vis à vis des critères physiques
ME souterraines affleurantes
ME superficielles à préserver
ME superficielles en déficit
ME souterraines affleurantes en déséquilibre / à préserver
Note "Physique"
Favorable
Relativement favorable
Peu favorable
Défavorable
IDPR absent
Unités semi-perméables
N
0 20 40 80 120 160
Kilomètres


Géosciences pour une Terre durable
brgm
Recharge artificielle indirecte
Carte des contraintes
agence de l'eau
RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
Note Contrainte
Favorable
Relativement favorable
Peu favorable
Défavorable
N
0 20 40 80 120 160
Kilomètres


Géosciences pour une Terre durable
brgm
agence de l'eau
RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
Recharge artificielle directe
Carte de favorabilité vis à vis des critères physiques
ME souterraines affleurantes
ME superficielles à préserver
ME superficielles en déficit
ME souterraines affleurantes en déséquilibre / à préserver
Unités semi-perméables
Note "Physique" entités affleurantes
Favorable
Relativement favorable
Peu favorable
Défavorable
N
0 20 40 80 120 160
Kilomètres

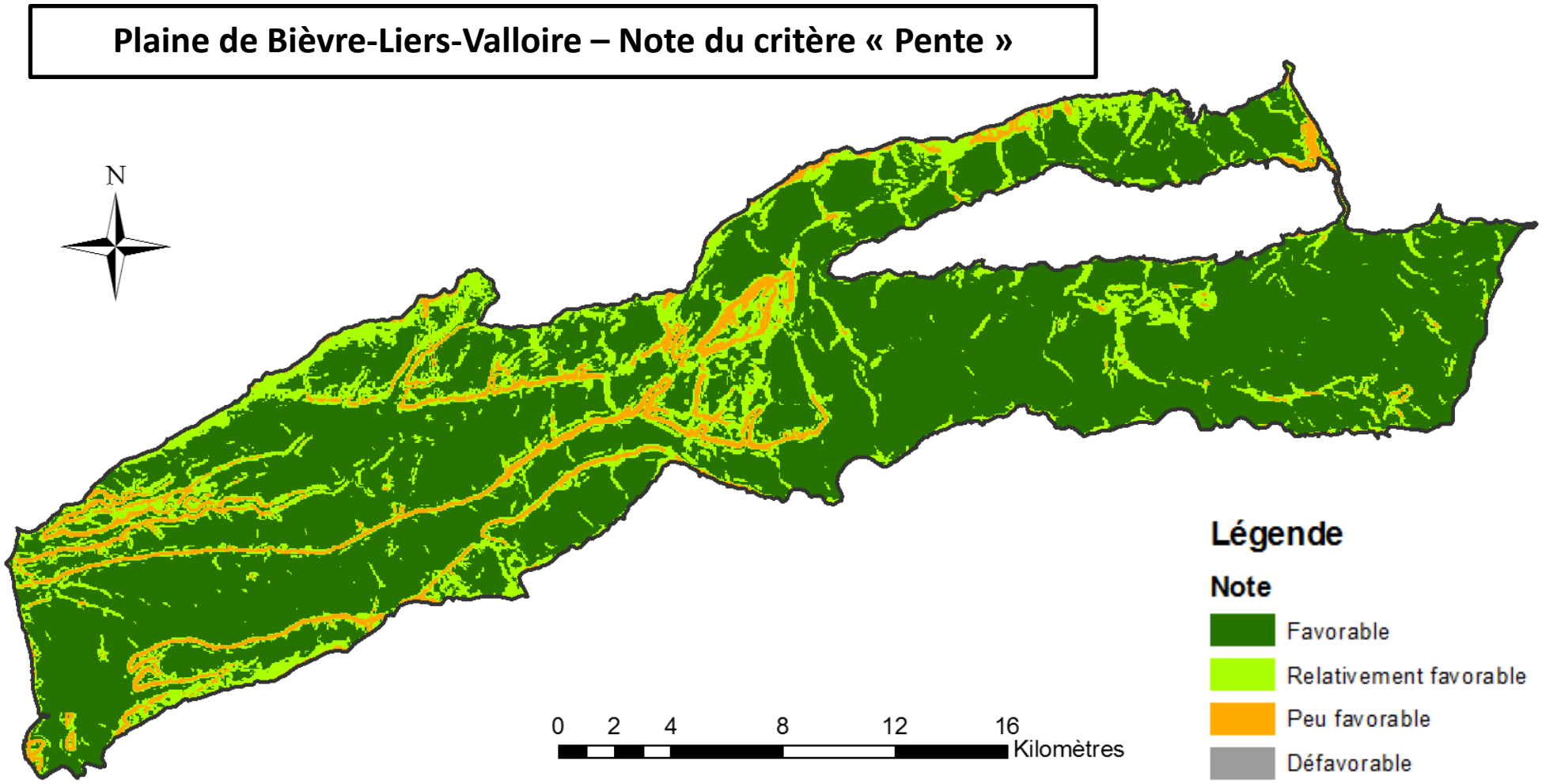

Géosciences pour une Terre durable
brgm
agence de l'eau
Recharge artificielle directe
Carte de favorabilité vis à vis des critères physiques
ME souterraines affleurantes
ME souterraines sous couverture en déséquilibre / à préserver
Note "Physique" entités ordre 2
Favorable
Relativement favorable
Peu favorable
Défavorable
Unités semi-perméables
N
0 20 40 80 120 160
Kilomètres


Géosciences pour une Terre durable
brgm
agence de l'eau
RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
Recharge artificielle directe
Carte de favorabilité vis à vis des critères physiques
ME souterraines affleurantes
ME souterraines sous couverture en déséquilibre / à préserver
Unités semi-perméables
Note "Physique" entités ordre 3
Favorable
Relativement favorable
Peu favorable
Défavorable
N
0 20 40 80 120 160
Kilomètres

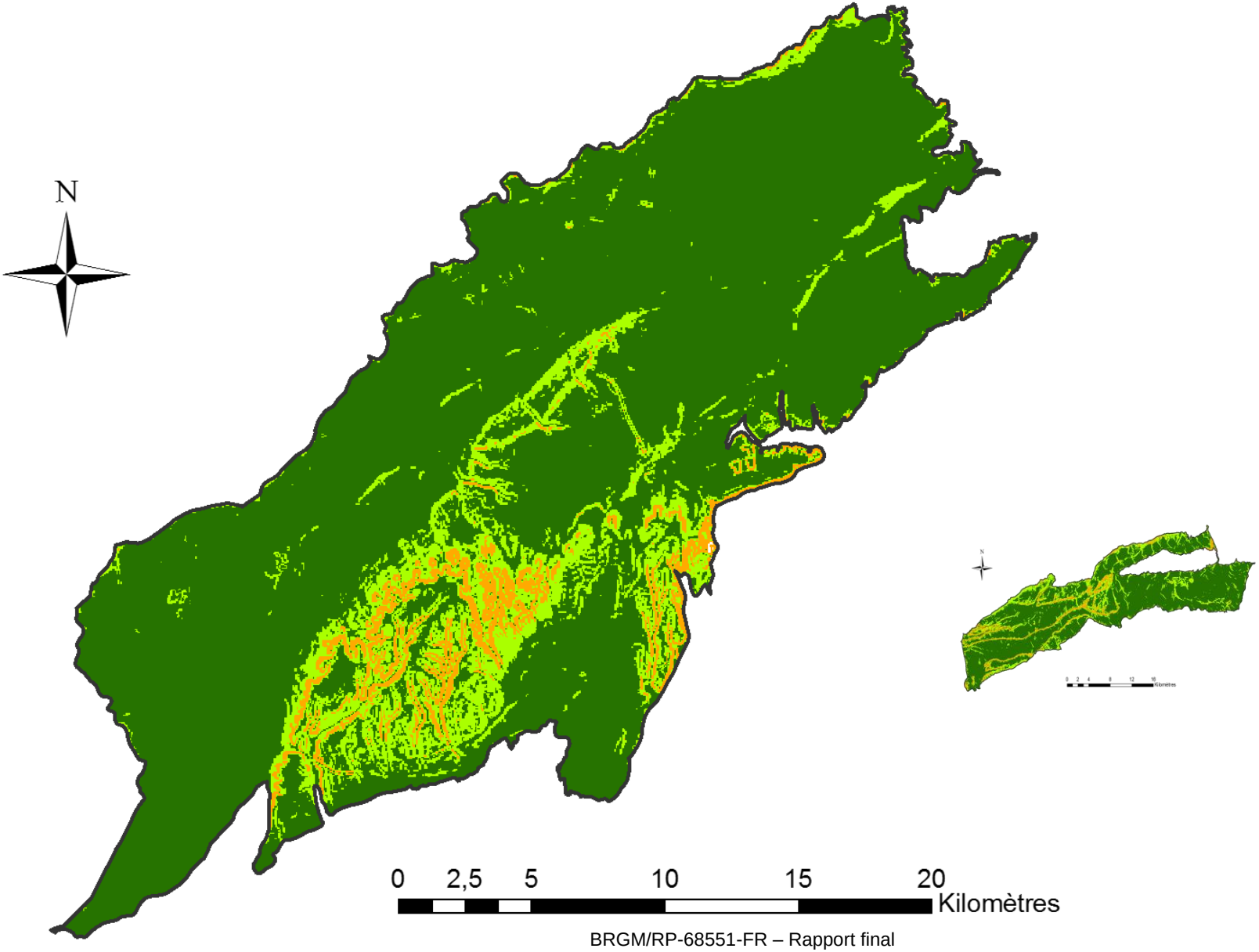

Géosciences pour une Terre durable
brgm
agence de l'eau
RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
Recharge artificielle directe
Carte des contraintes
Note Contrainte
Favorable
Relativement favorable
Peu favorable
Défavorable
N
0 20 40 80 120 160
Kilomètres

Annexe 2

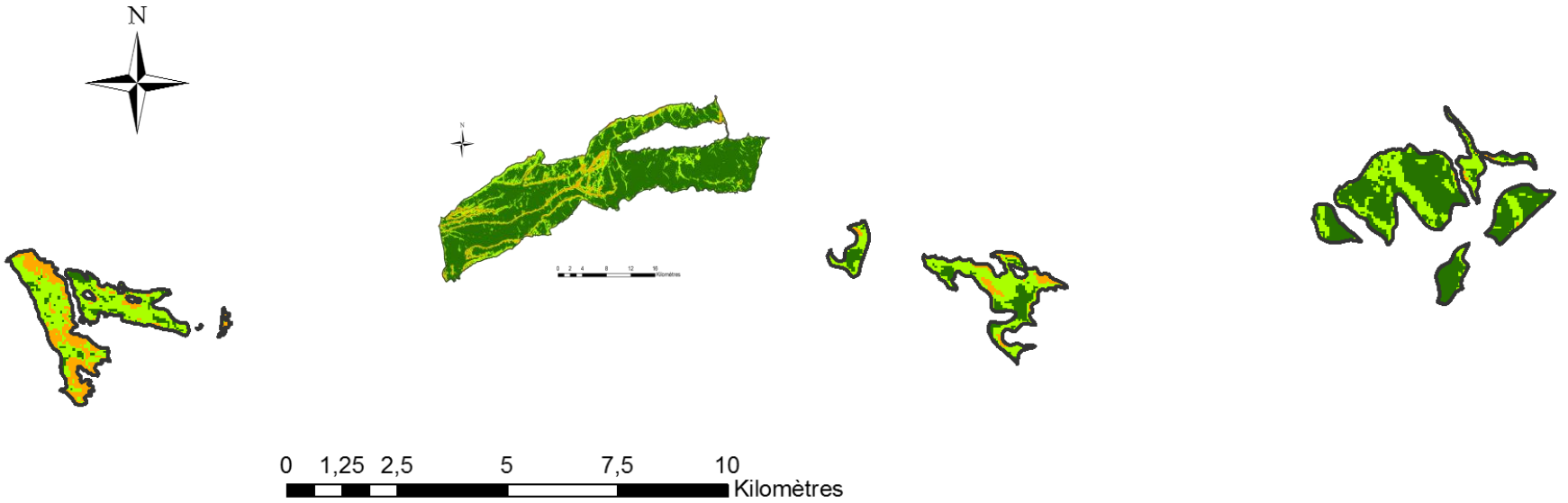
Cartes du critère « Pente » à l’échelle des quatre territoires test


Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Note du critère « Pente »
N
0 2 4 8 12 16
Kilomètres
Légende
Note
Favorable
Relativement favorable
Peu favorable
Défavorable

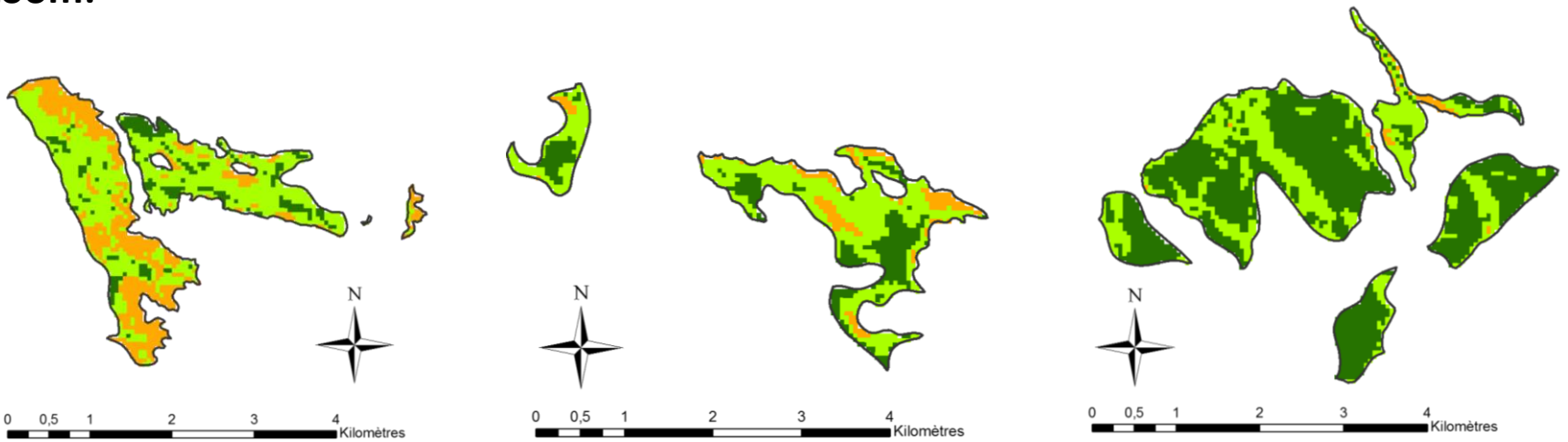
Nappes de la Vistrenque et des Costières – Note du critère « Pente »



Affleurements de sables astiens – Note du critère « Pente »



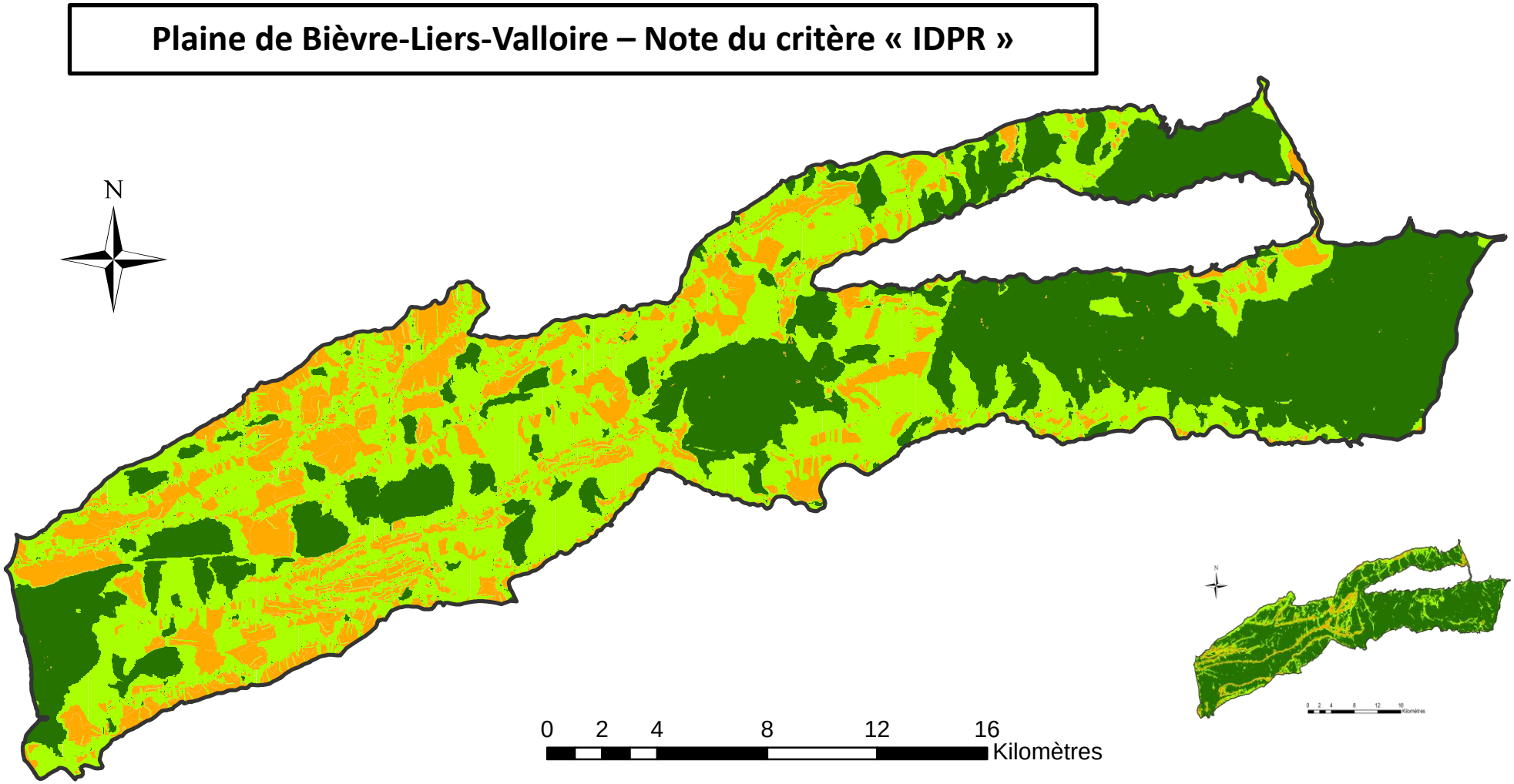
Zoom:



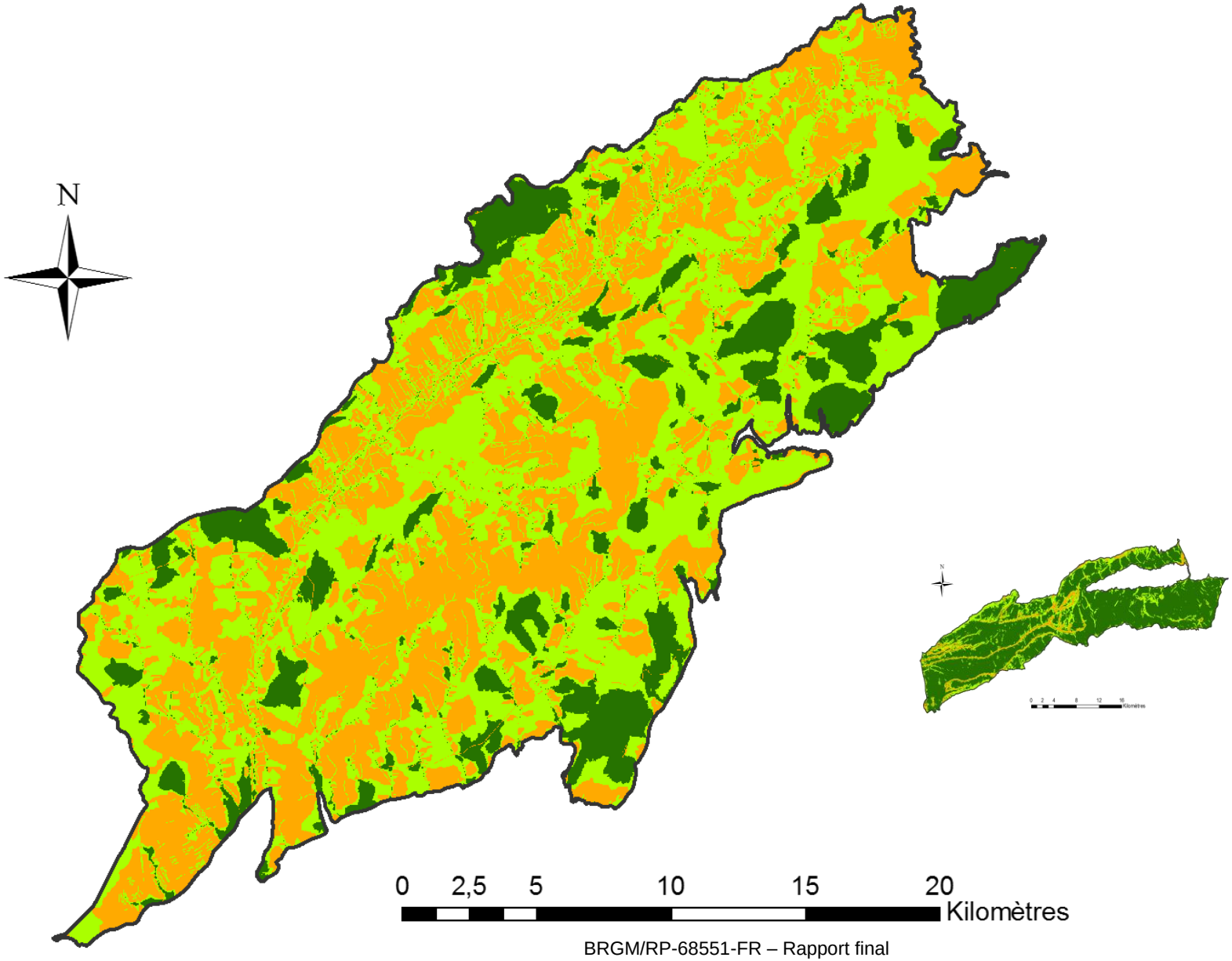
Alluvions de la Figarella – Note du critère « Pente »

Annexe 3

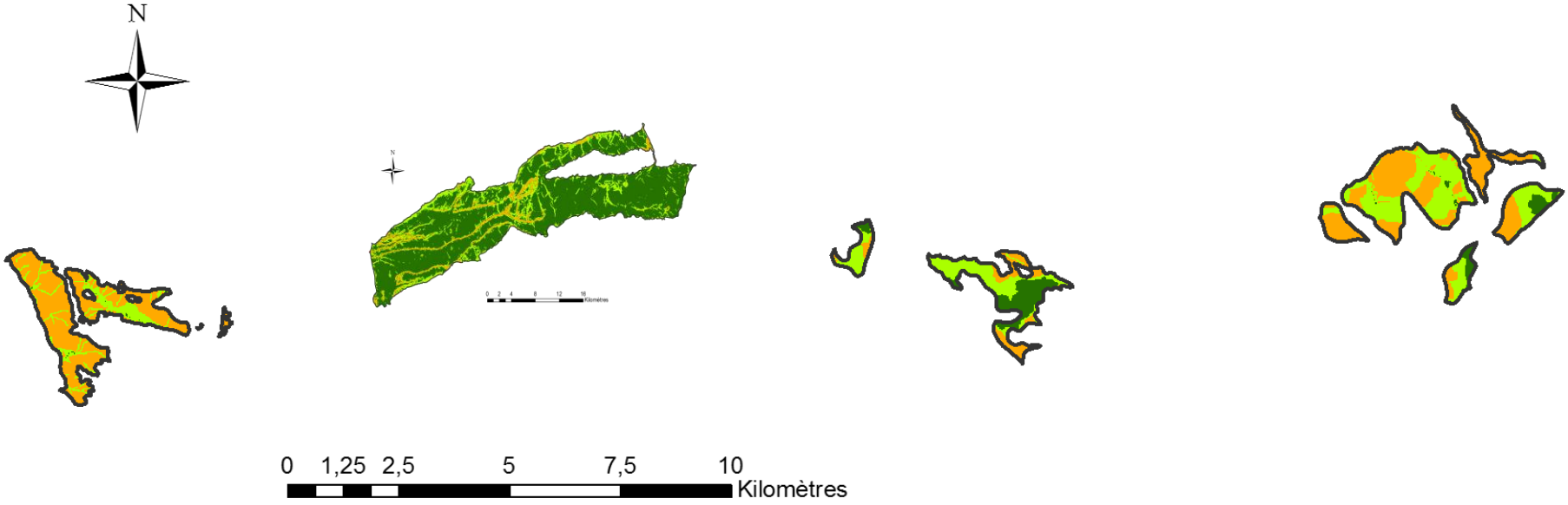
Cartes du critère « IDPR » à l'échelle des 4 territoires test


Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Note du critère « IDPR »
N
0 2 4 8 12 16
Kilomètres

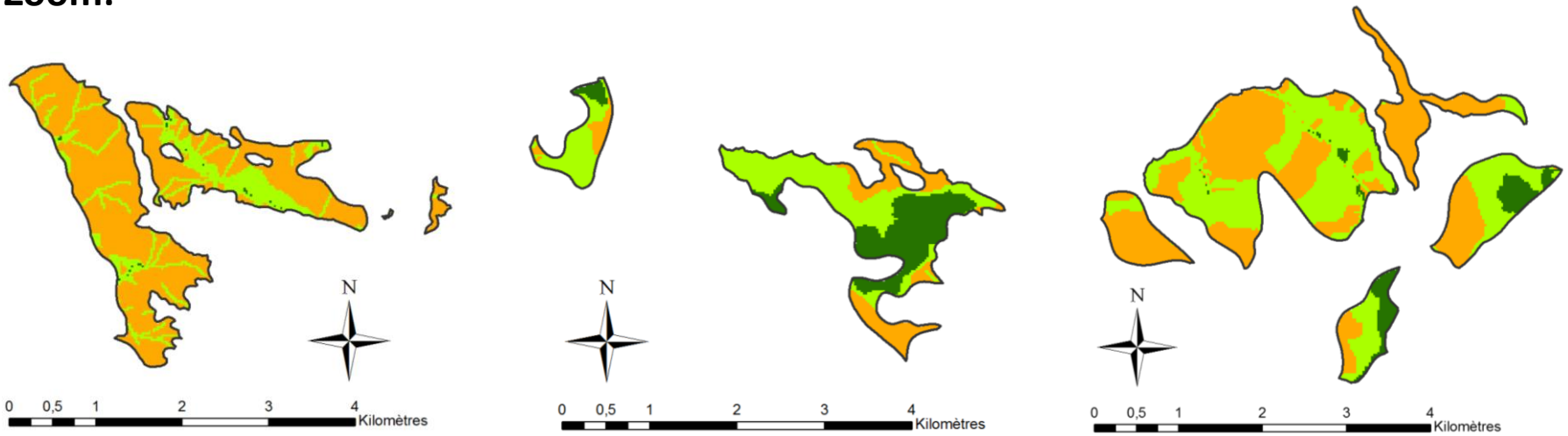
Nappes de la Vistrenque et des Costières – Note du critère « IDPR »



Affleurements de sables astiens – Note du critère « IDPR »



Zoom:

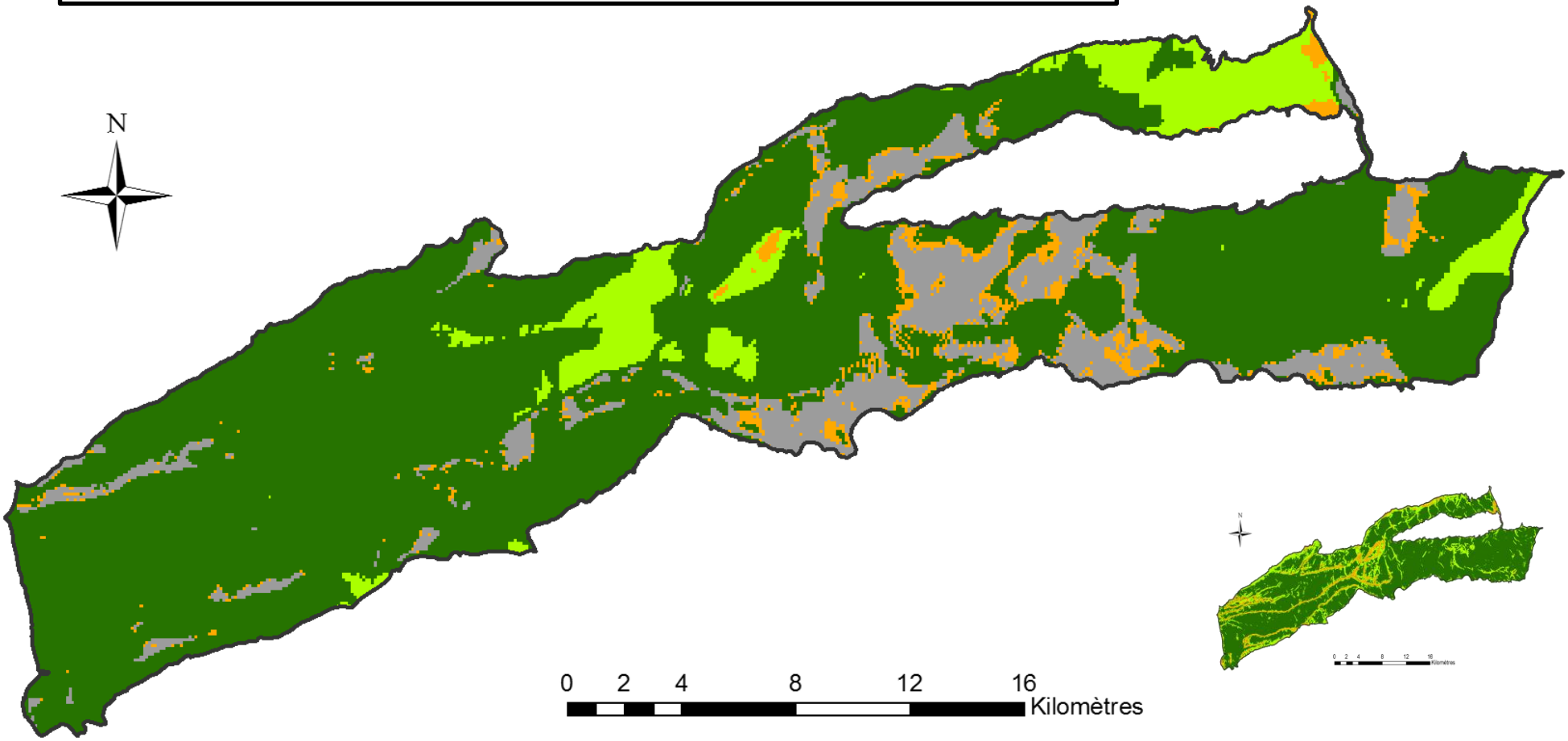


Alluvions de la Figarella – Note du critère « IDPR »

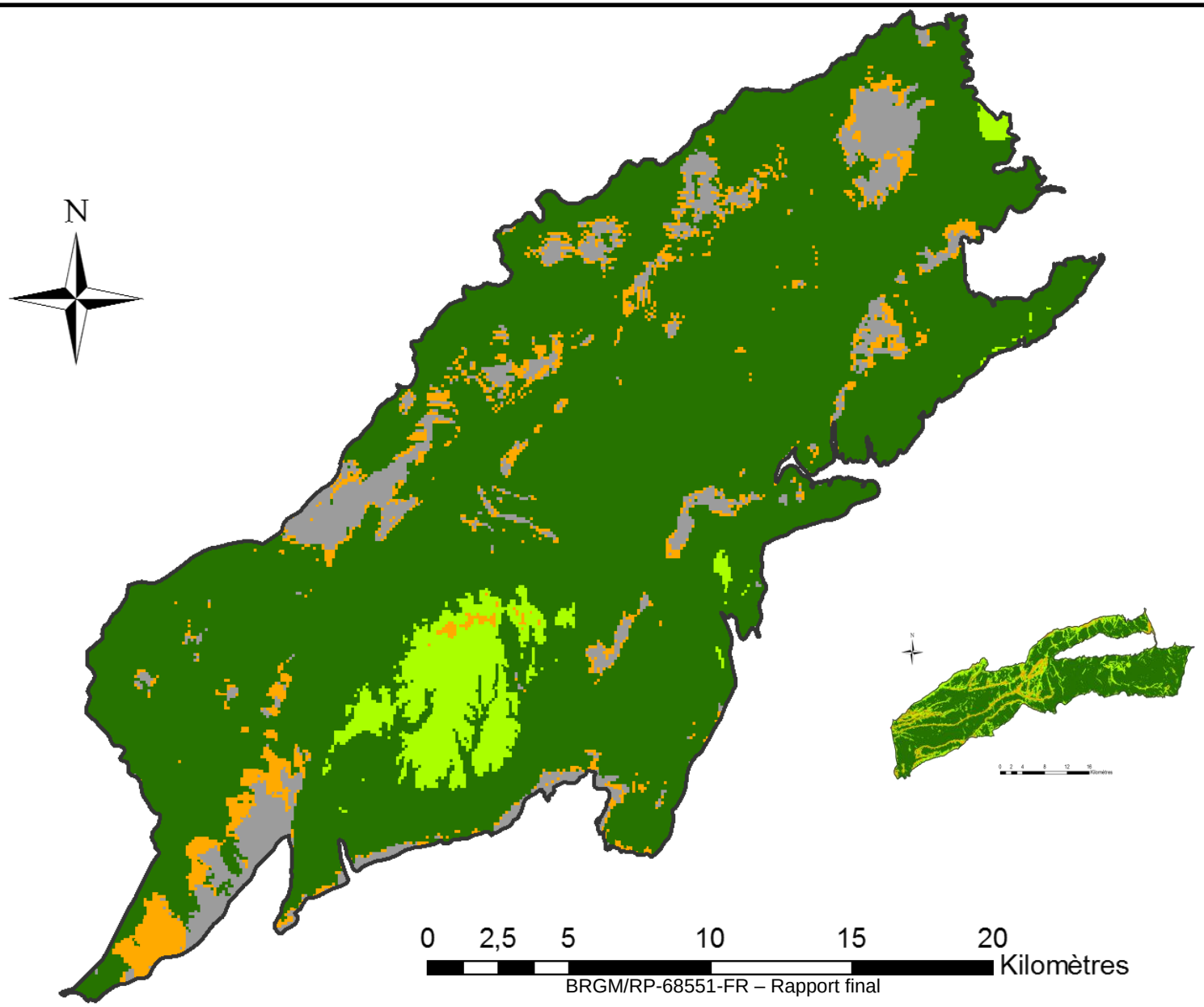
Annexe 4

Cartes du critère « EpZNS » à l'échelle des 4 territoires test

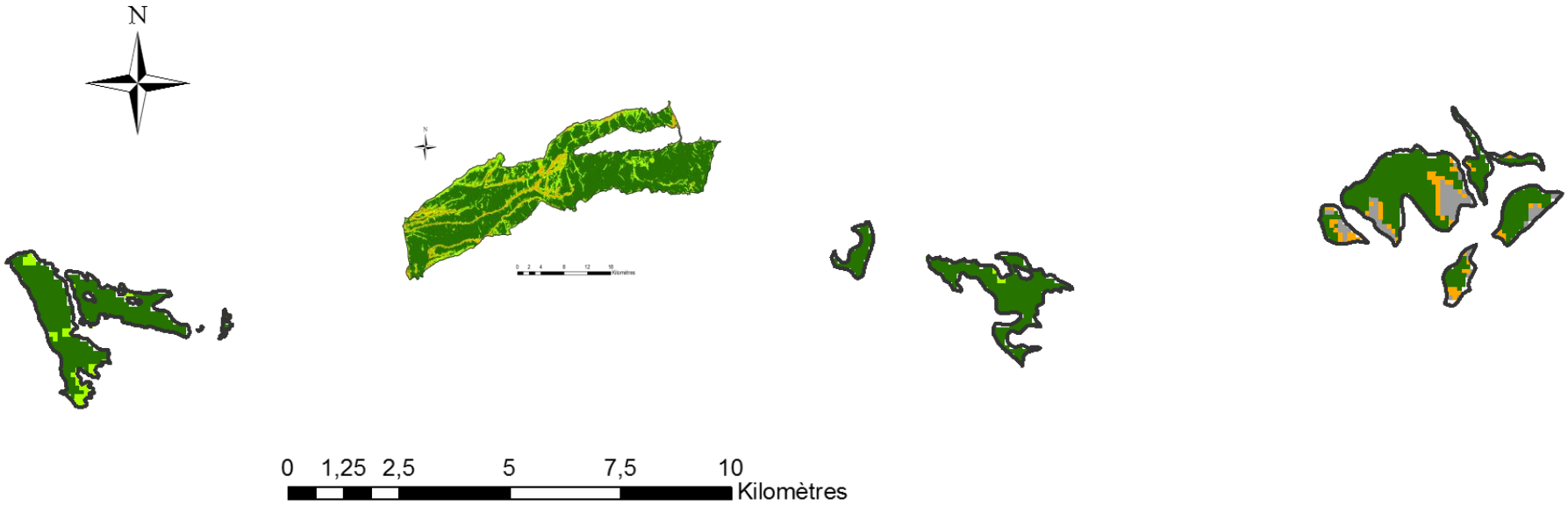
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Note du critère « EpZNS »



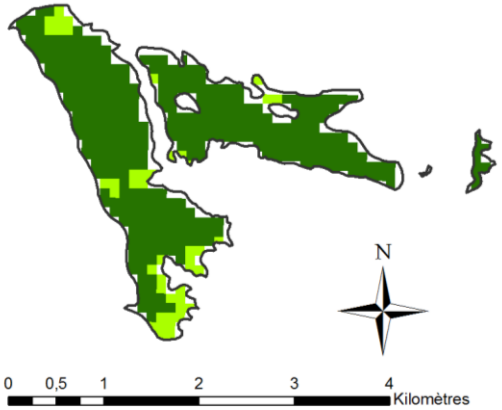
Nappes de la Vistrenque et des Costières – Note du critère « EpZNS »

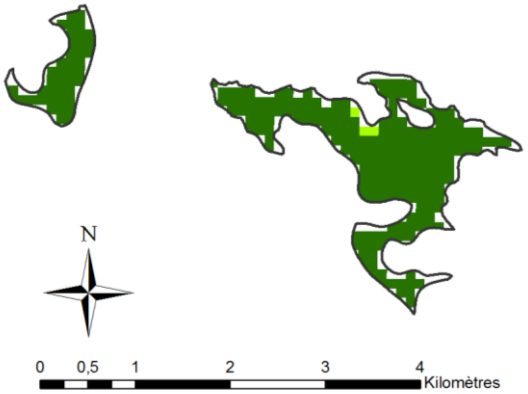


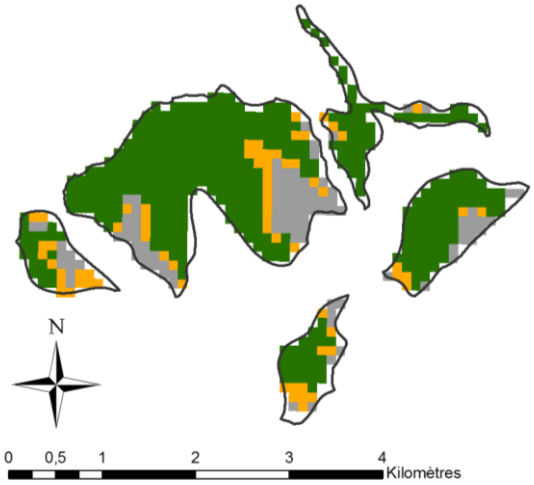
Affleurements de sables astiens – Note du critère « EpZNS »



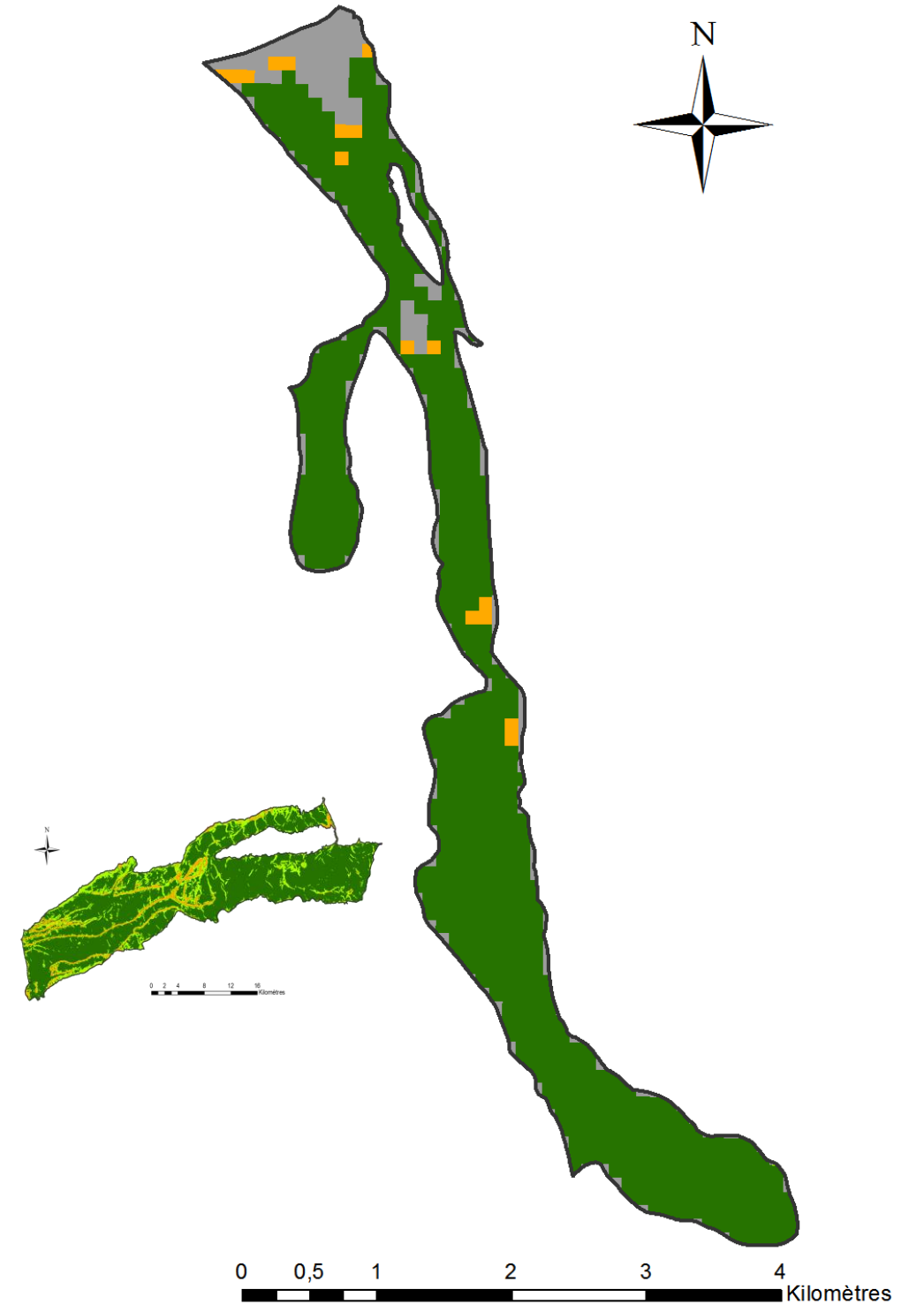
Zoom:





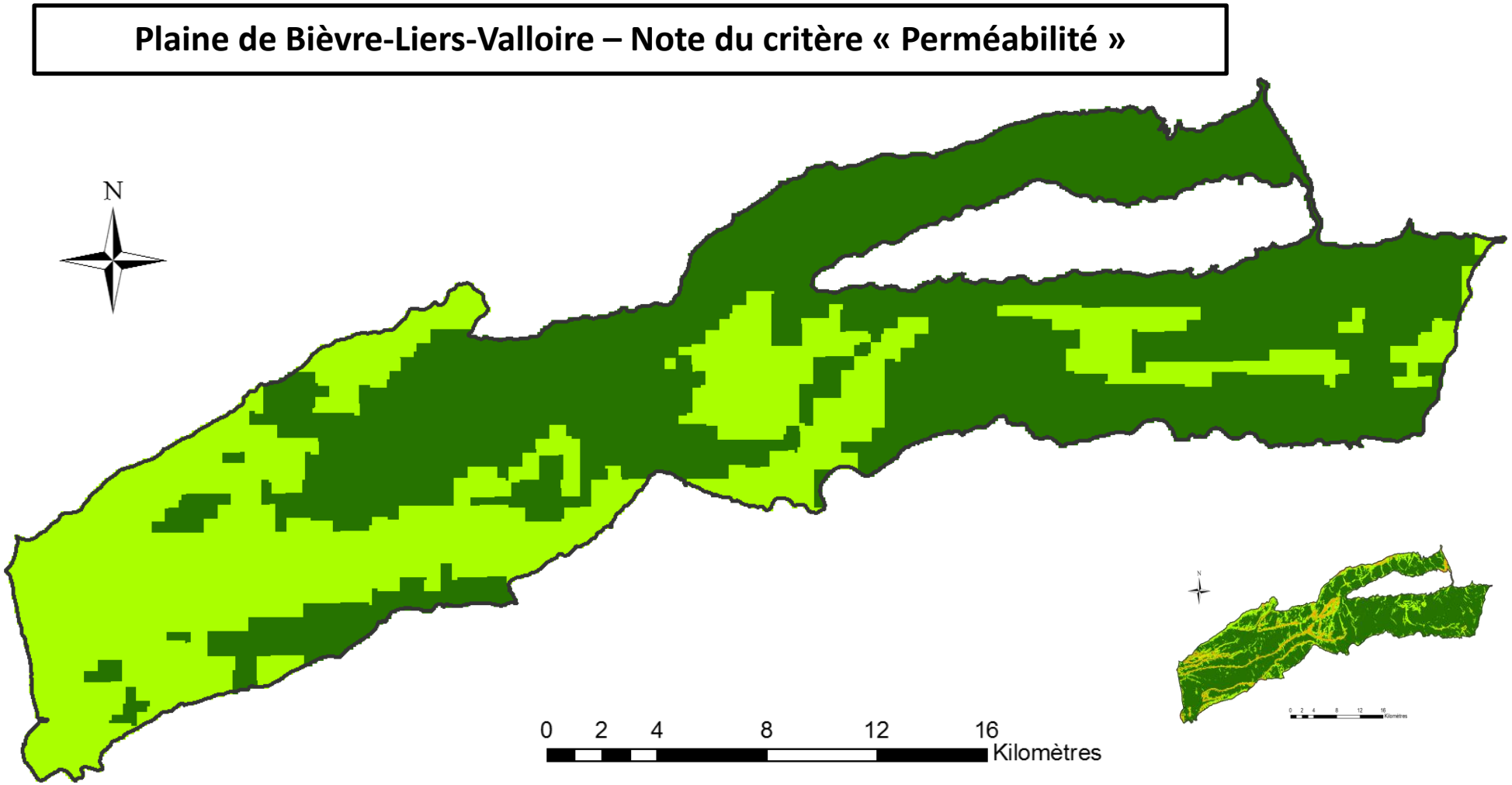


Alluvions de la Figarella – Note du critère « EpZNS »

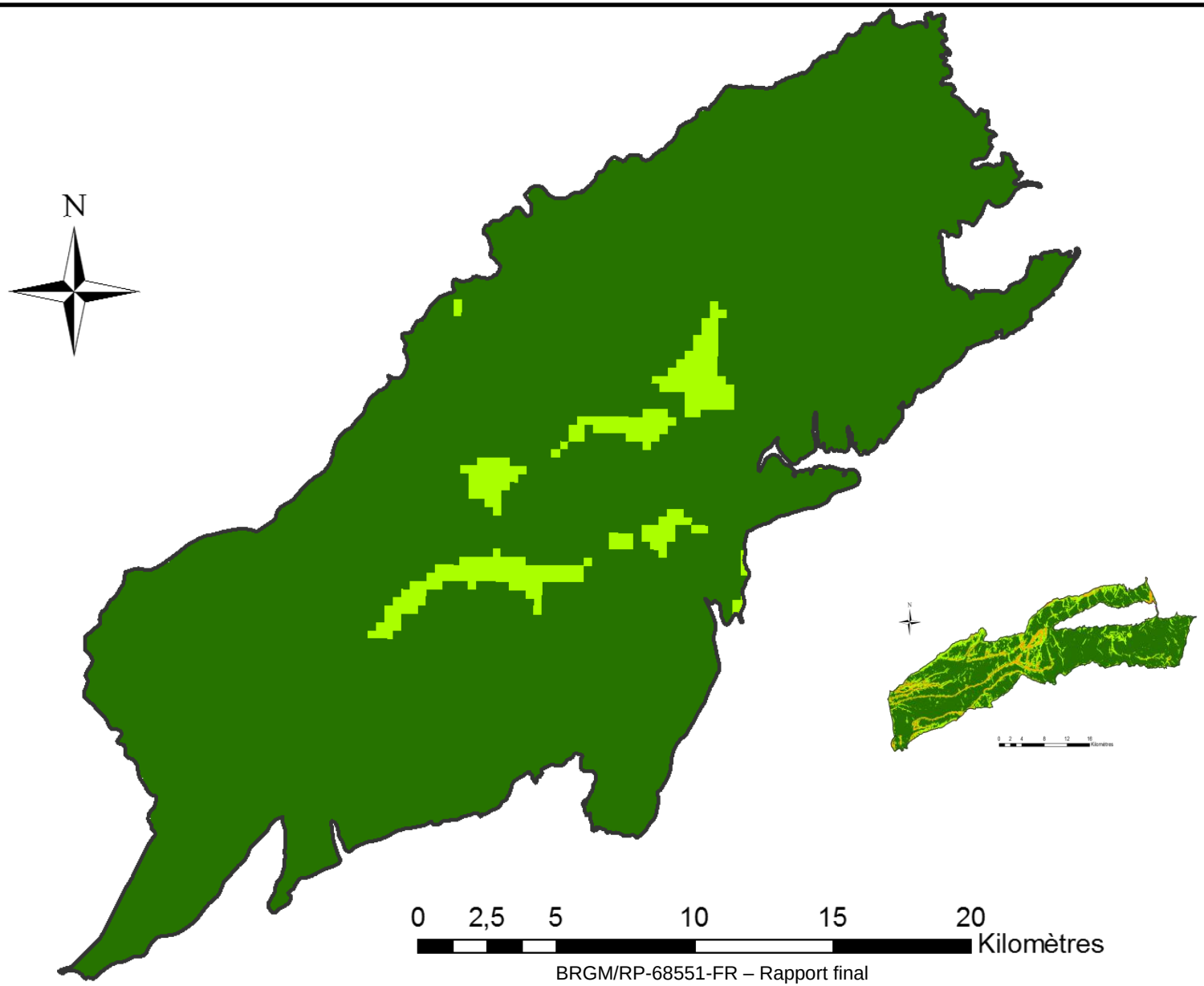


Annexe 5

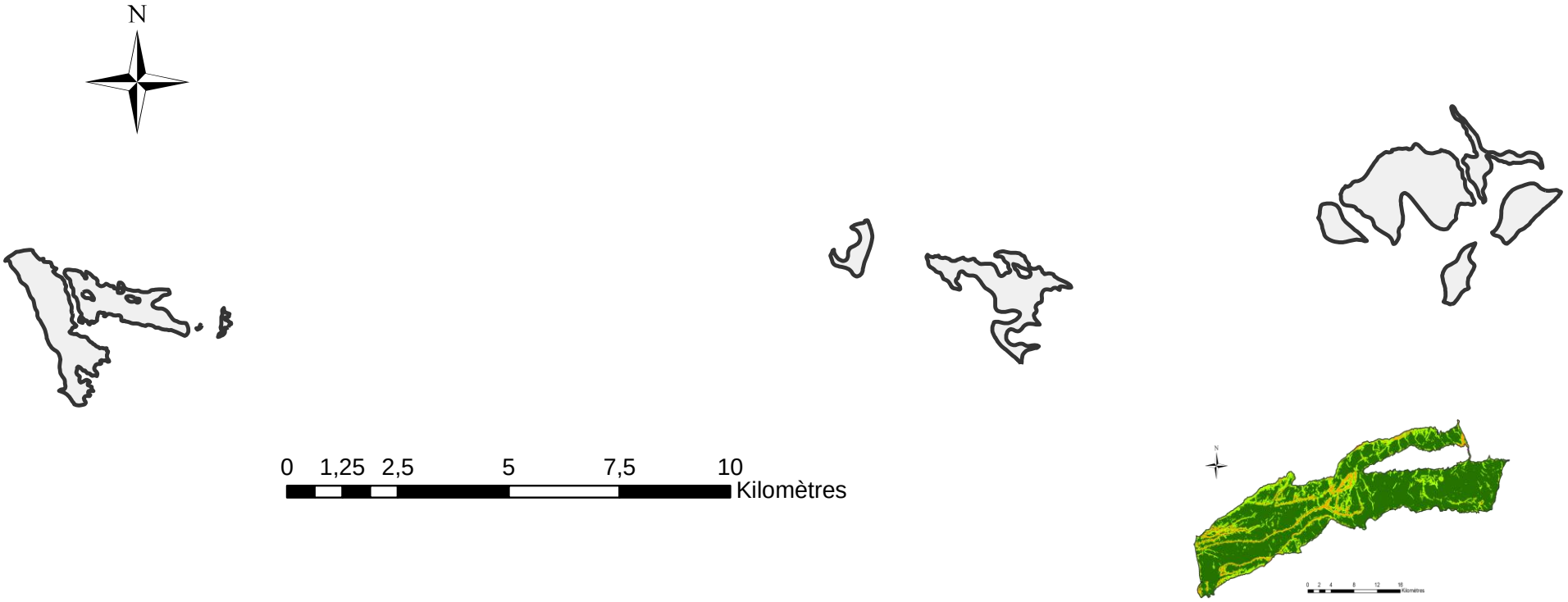
Cartes du critère « Perméabilité » à l'échelle des 4 territoires test


Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Note du critère « Perméabilité »
N
0 2 4 8 12 16
Kilomètres

Nappes de la Vistrenque et des Costières – Note du critère « Perméabilité »

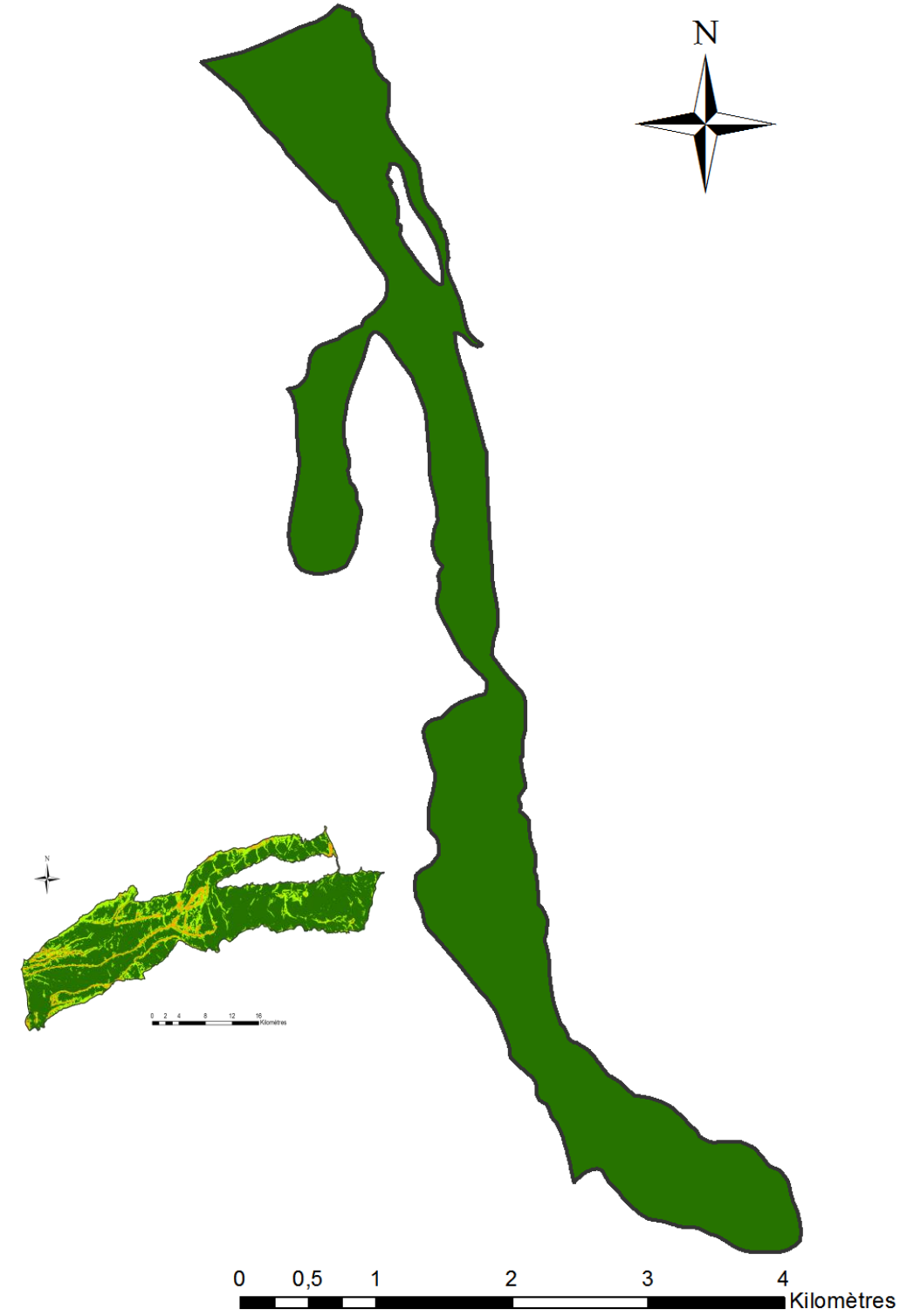


Affleurements de sables astiens – Note du critère « Perméabilité »



Zoom pas nécessaire. Affleurements: Corneilhan favorable, Florensac et Mèze relativement favorables.

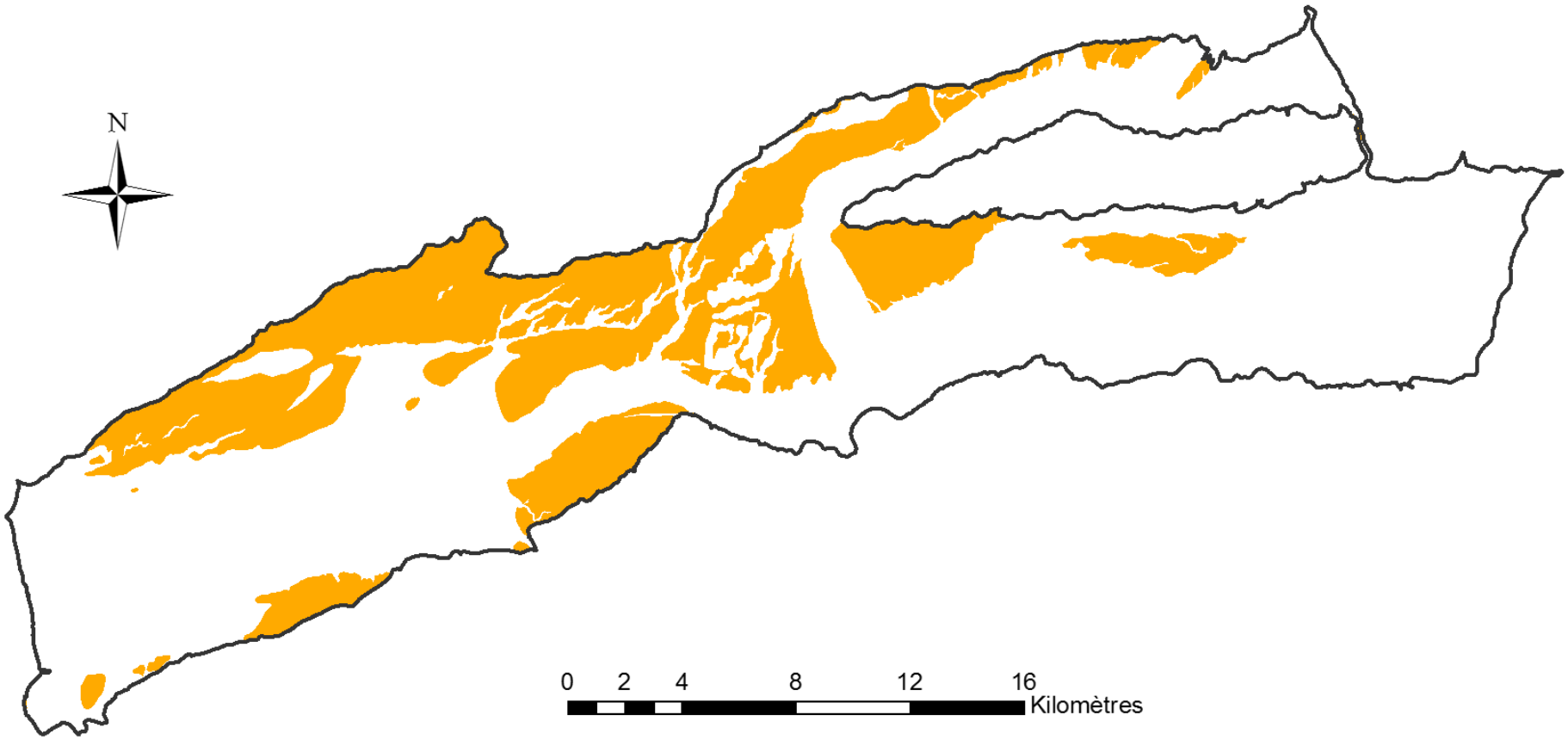
Alluvions de la Figarella – Note du critère « Perméabilité »



Annexe 6

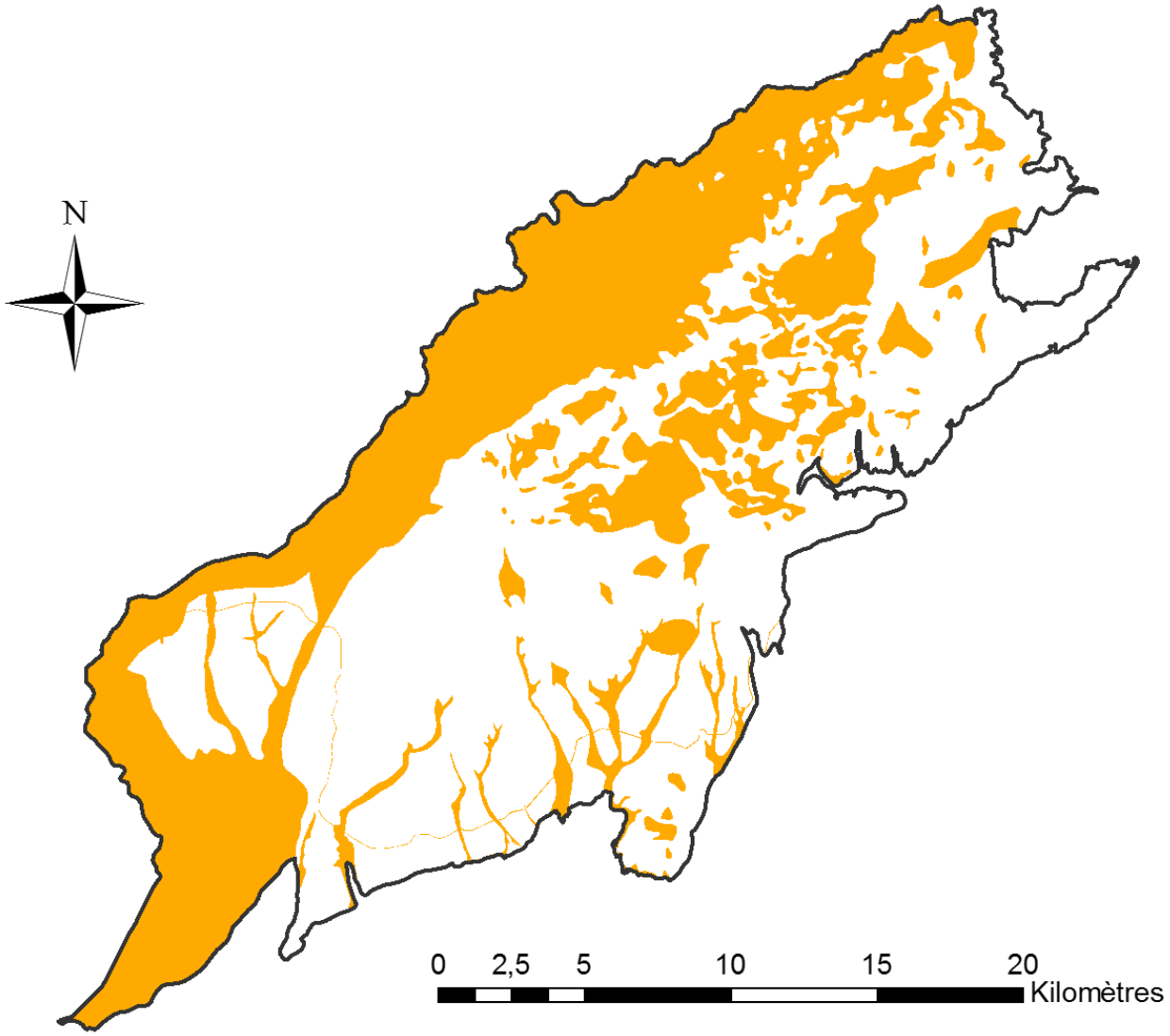
Cartes de présence de recouvrement à l'échelle des sites de Bièvre-Liers-Valloire, Vistrenque et Costières

Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Présence de recouvrement



Toute la zone non colorée → Favorable (pas de recouvrement)

Nappes de la Vistrenque et des Costières – Présence de recouvrement

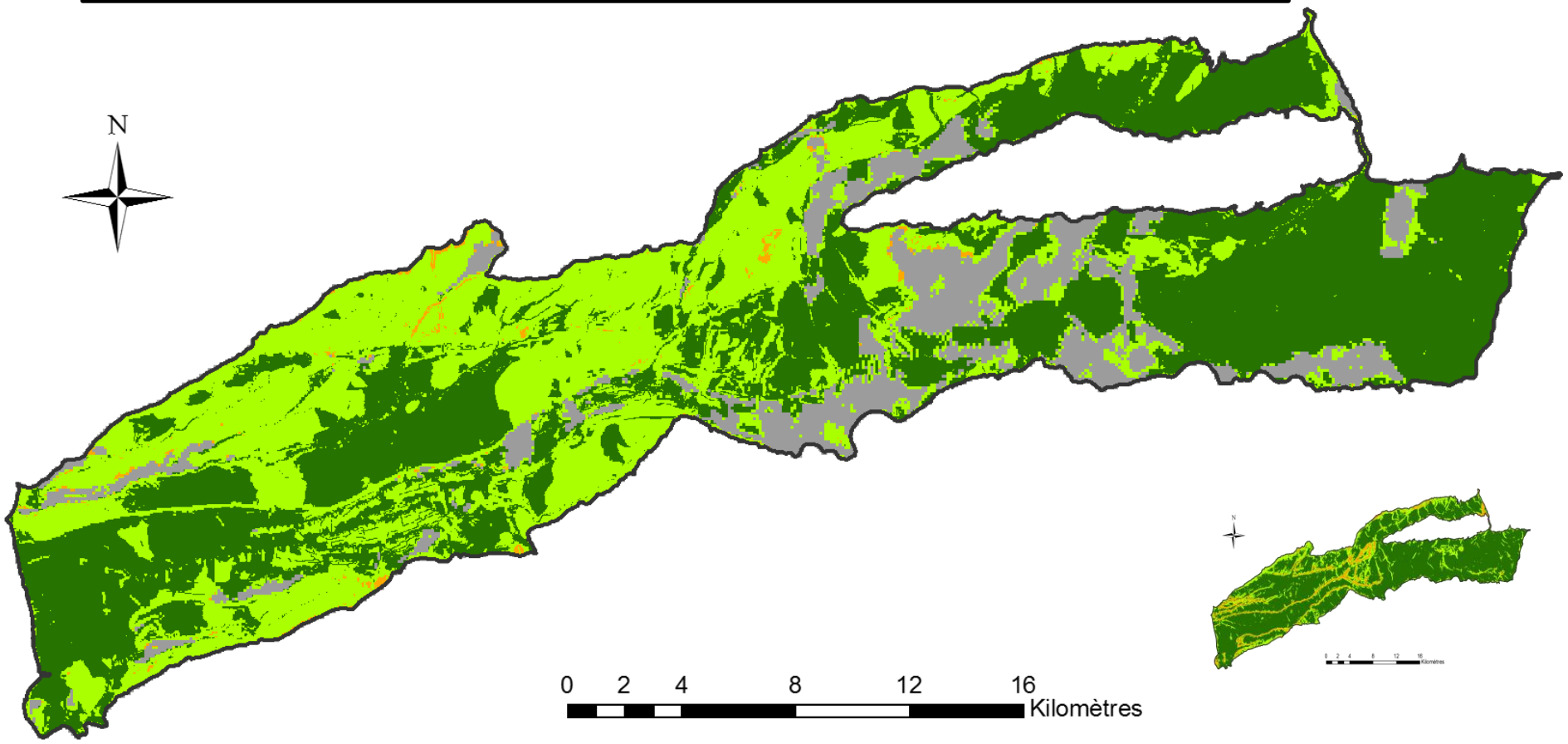


Toute la zone non colorée → Favorable (pas de recouvrement)

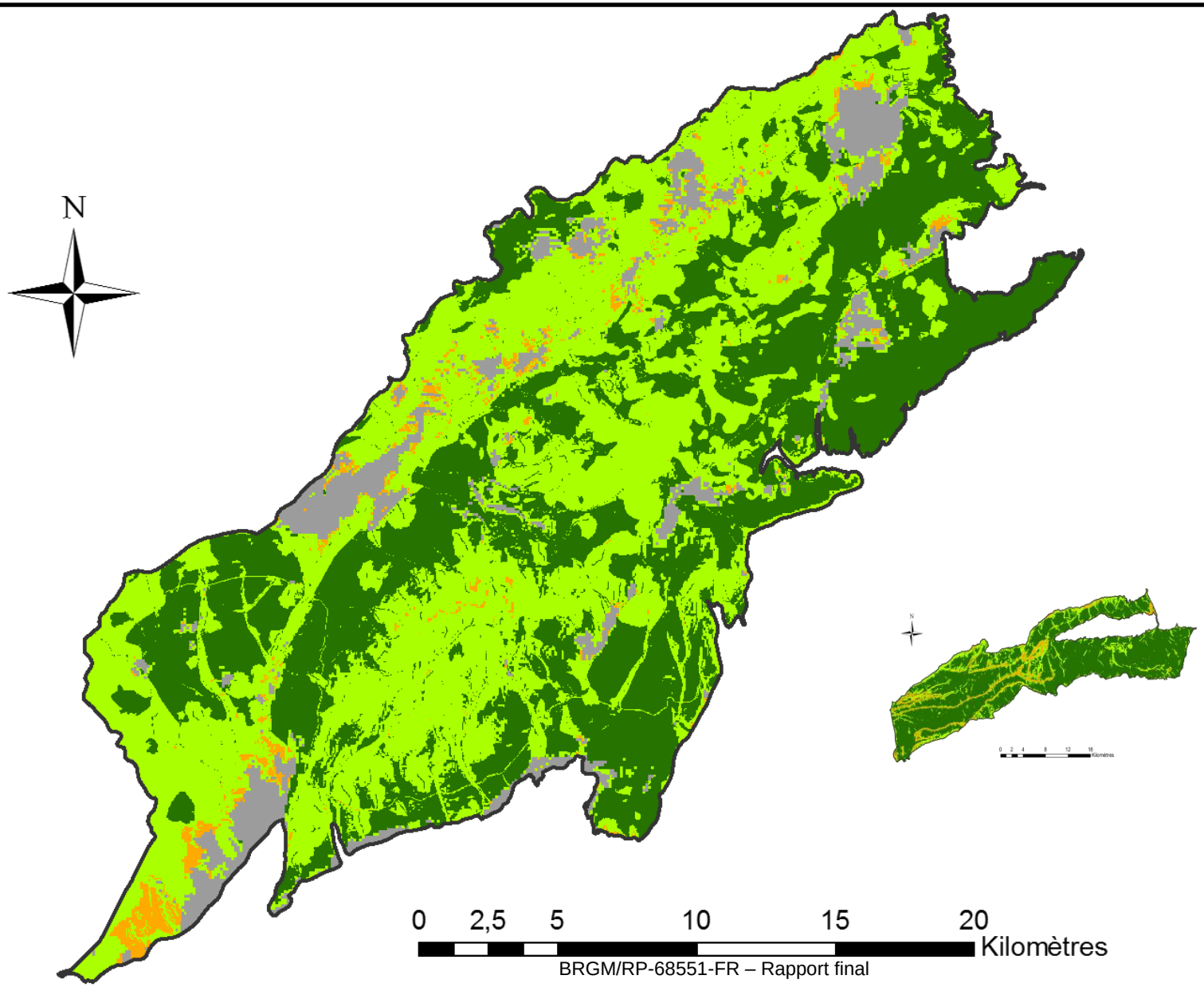
Annexe 7

Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères physiques, à l'échelle des 4 territoires test

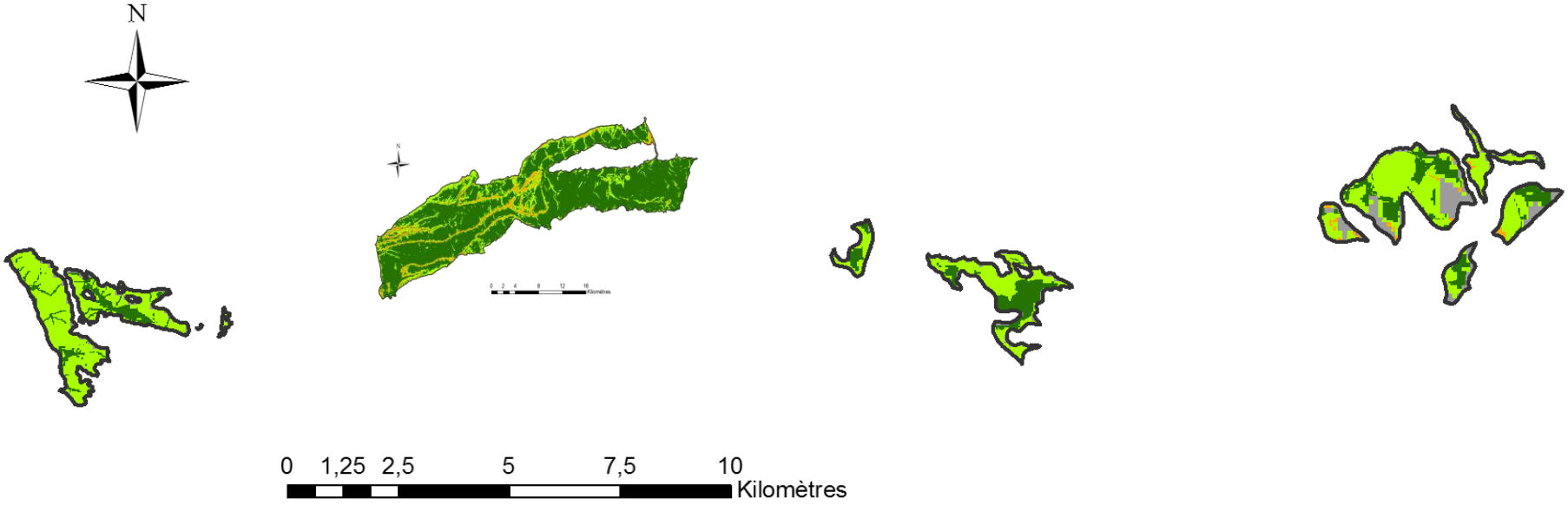
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Carte des critères physiques



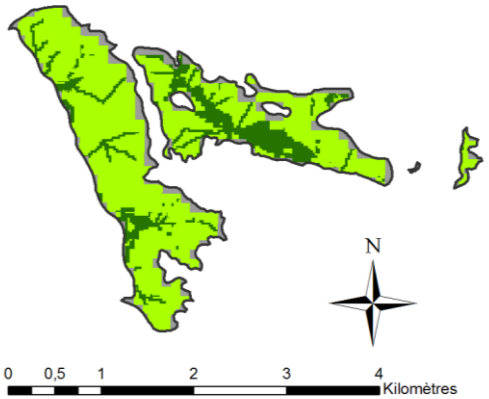
Nappes de la Vistrenque et des Costières – Carte des critères physiques

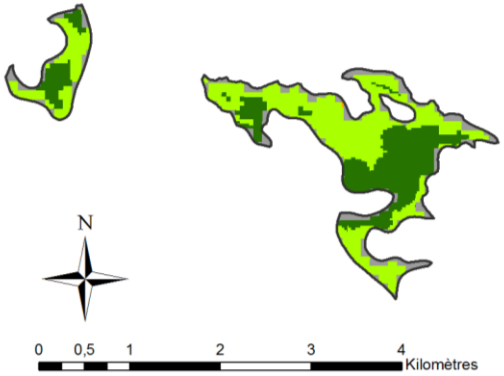


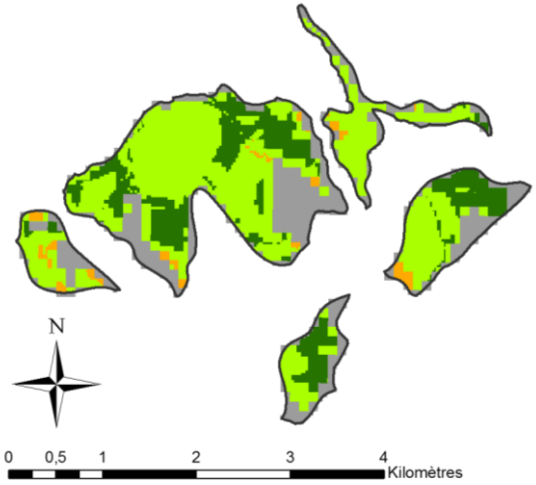
Affleurements de sables astiens – Carte des critères physiques



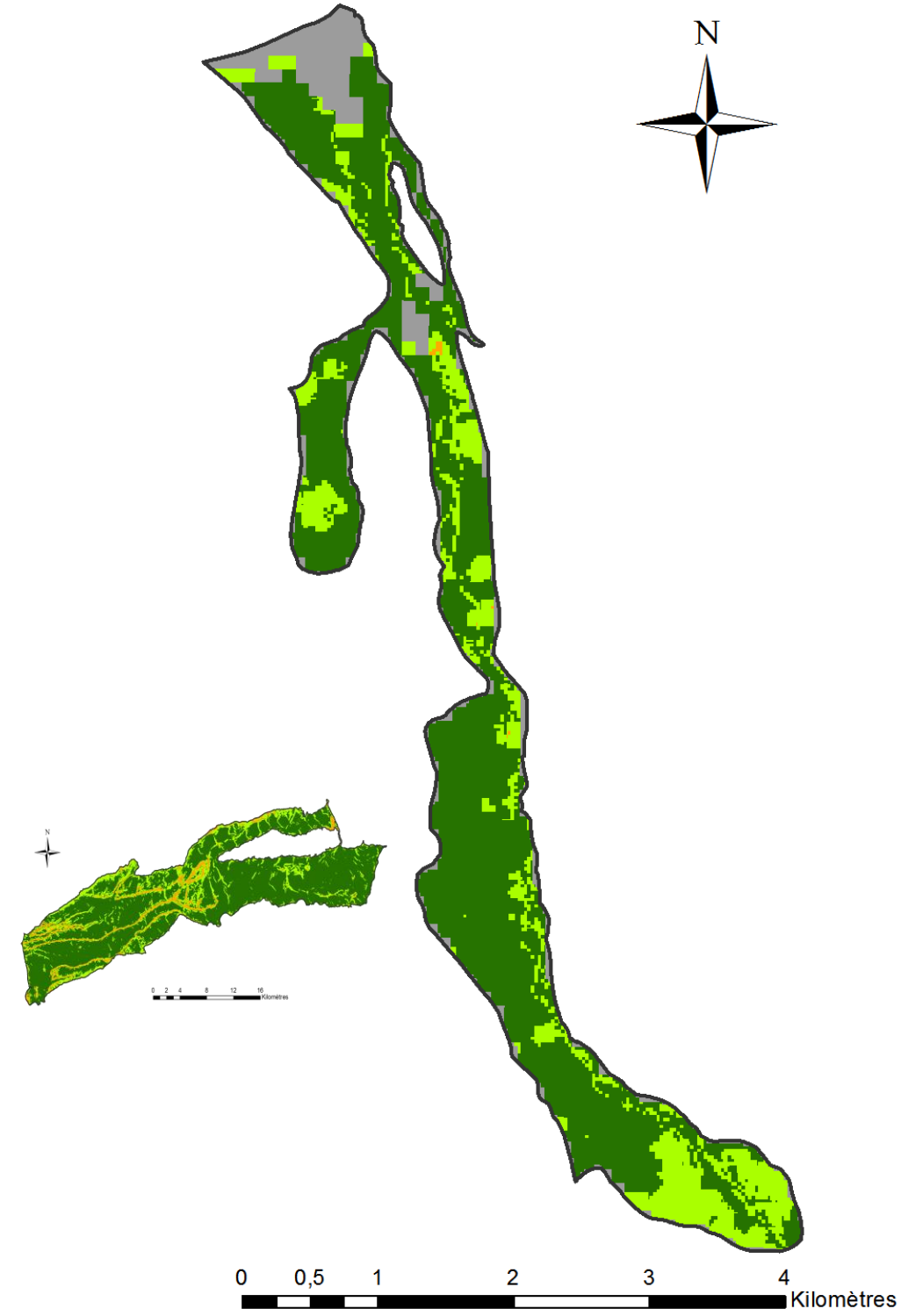
Zoom:







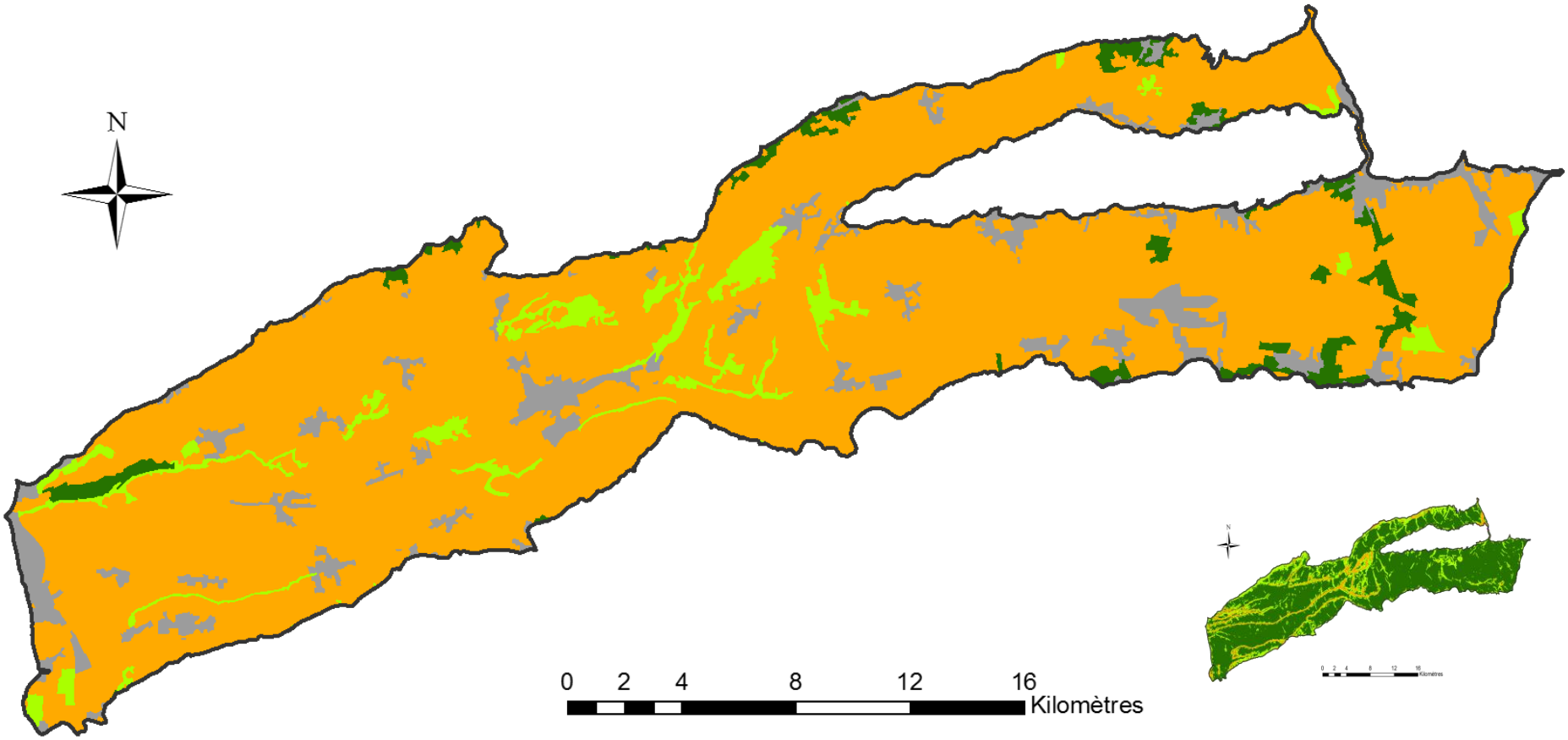
Alluvions de la Figarella – Carte des critères physiques



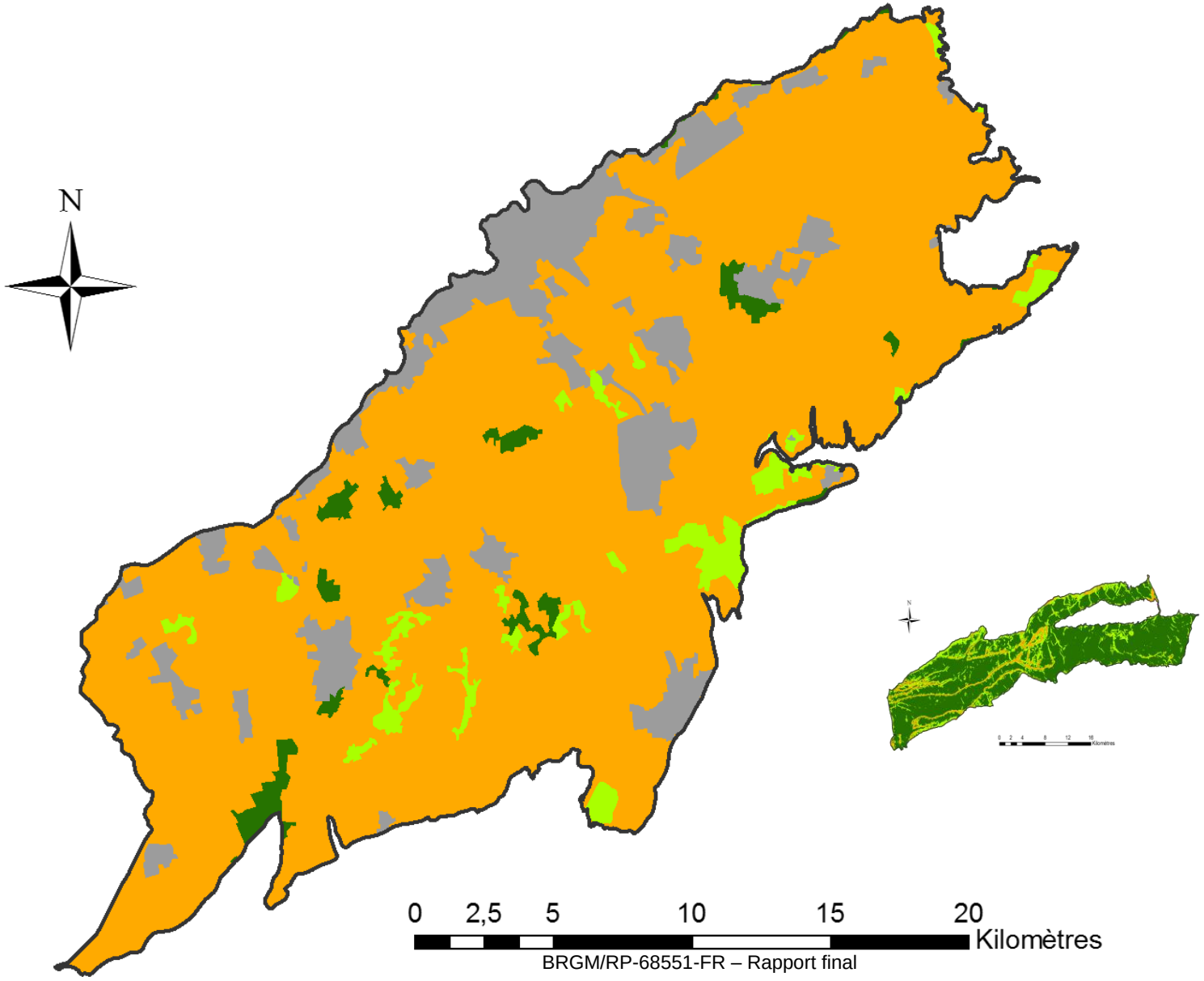
Annexe 8

Cartes du critère « Occupation du sol » à l'échelle des 4 territoires test

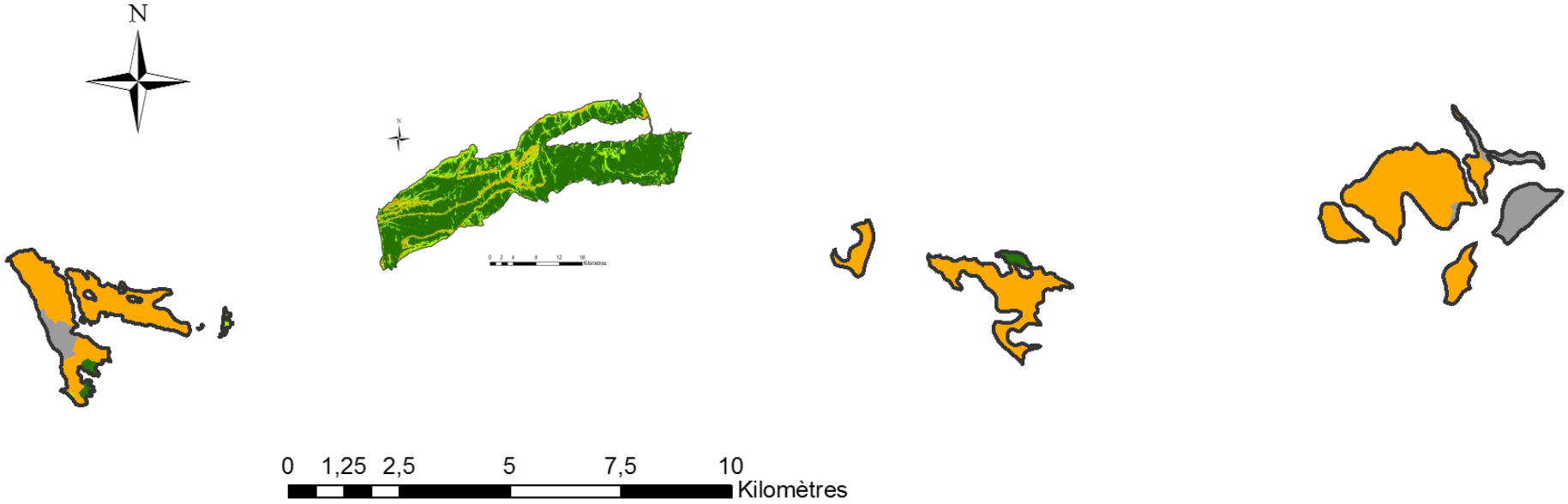
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Note du critère « Occupation du sol »



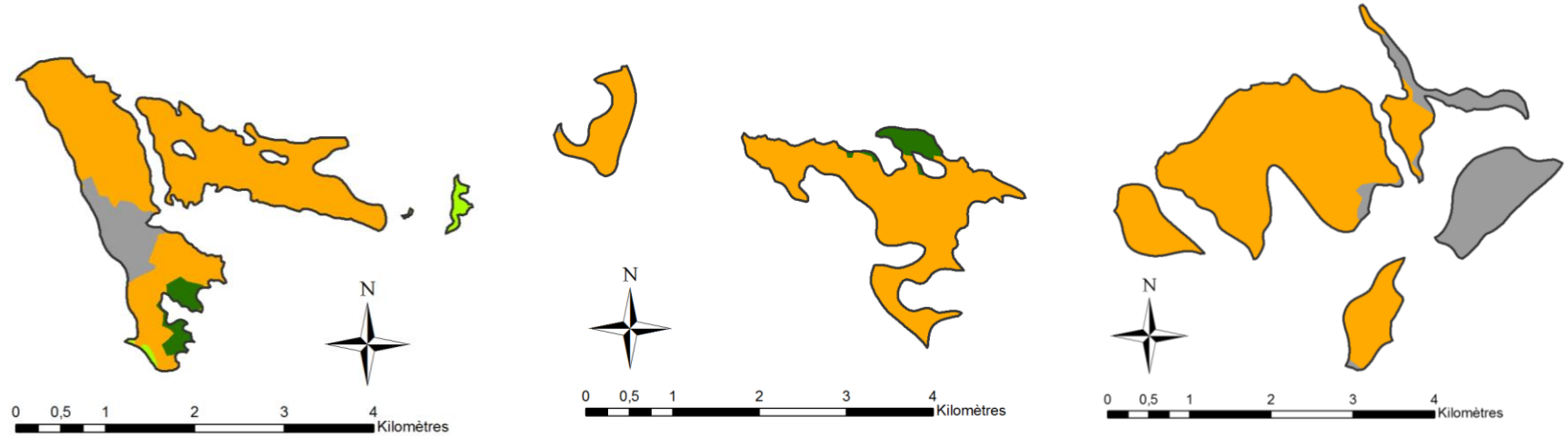
Nappes de la Vistrenque et des Costières – Note du critère « Occupation du sol »



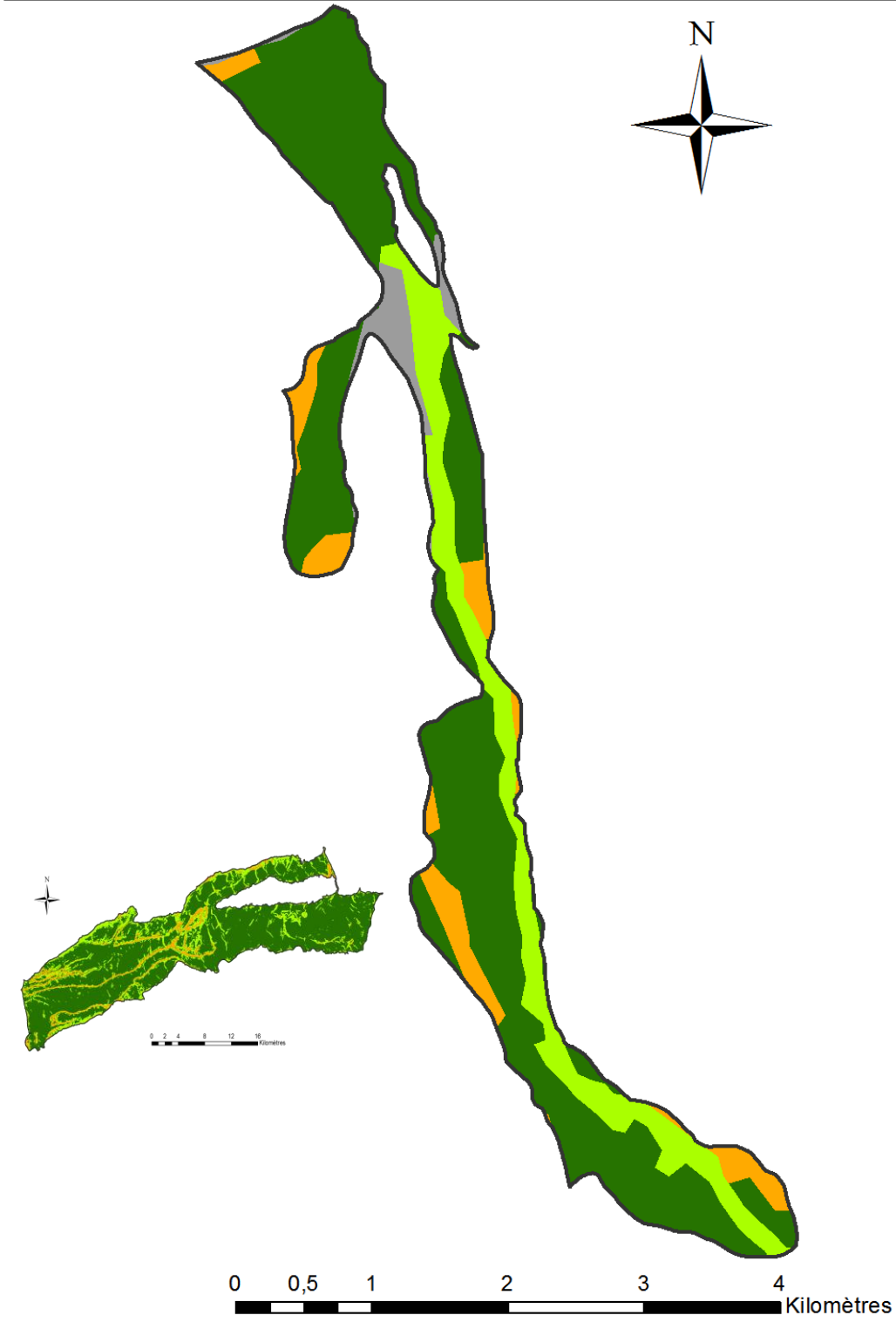
Affleurements de sables astiens – Note du critère « Occupation du sol »



Zoom:



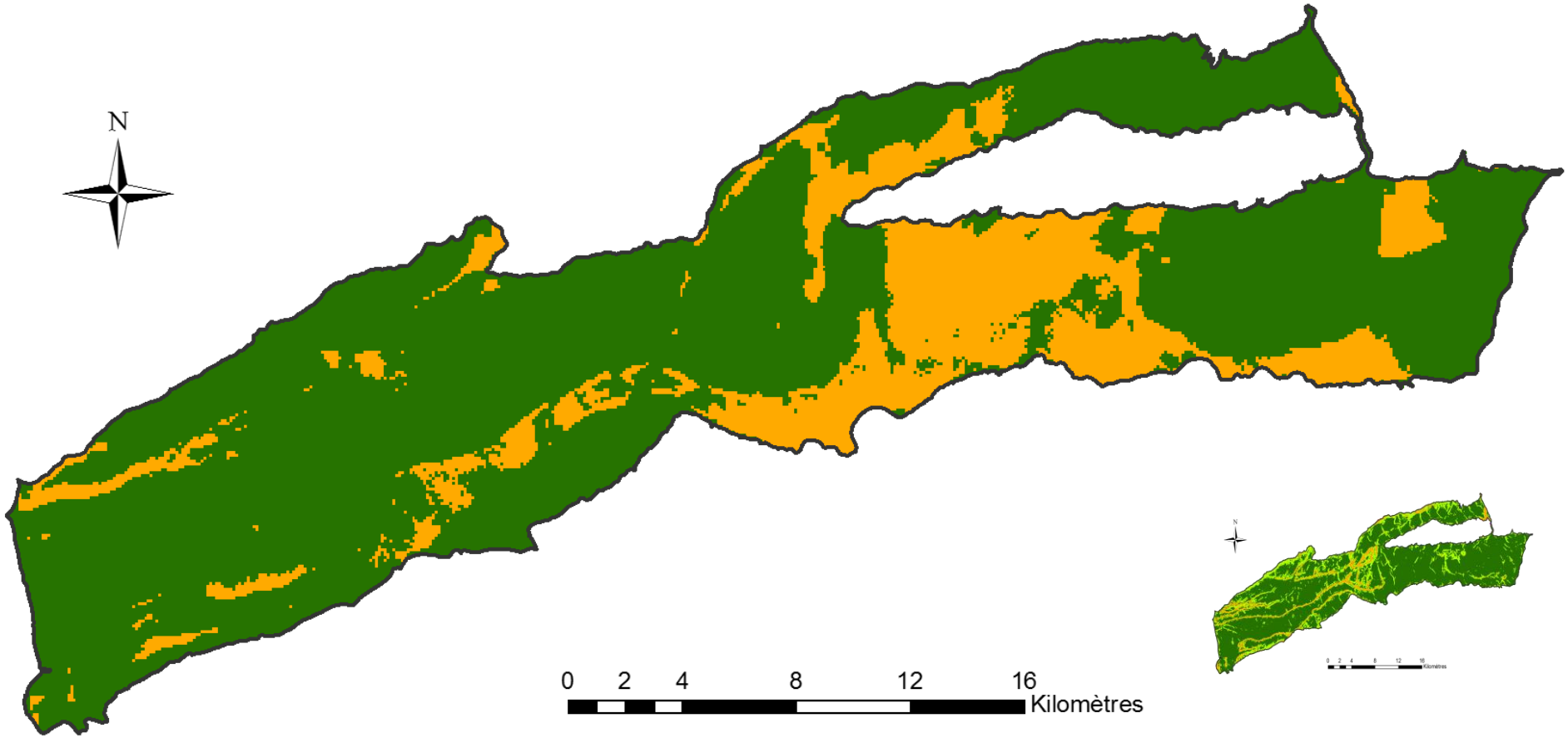
Alluvions de la Figarella – Note du critère « Occupation du sol »



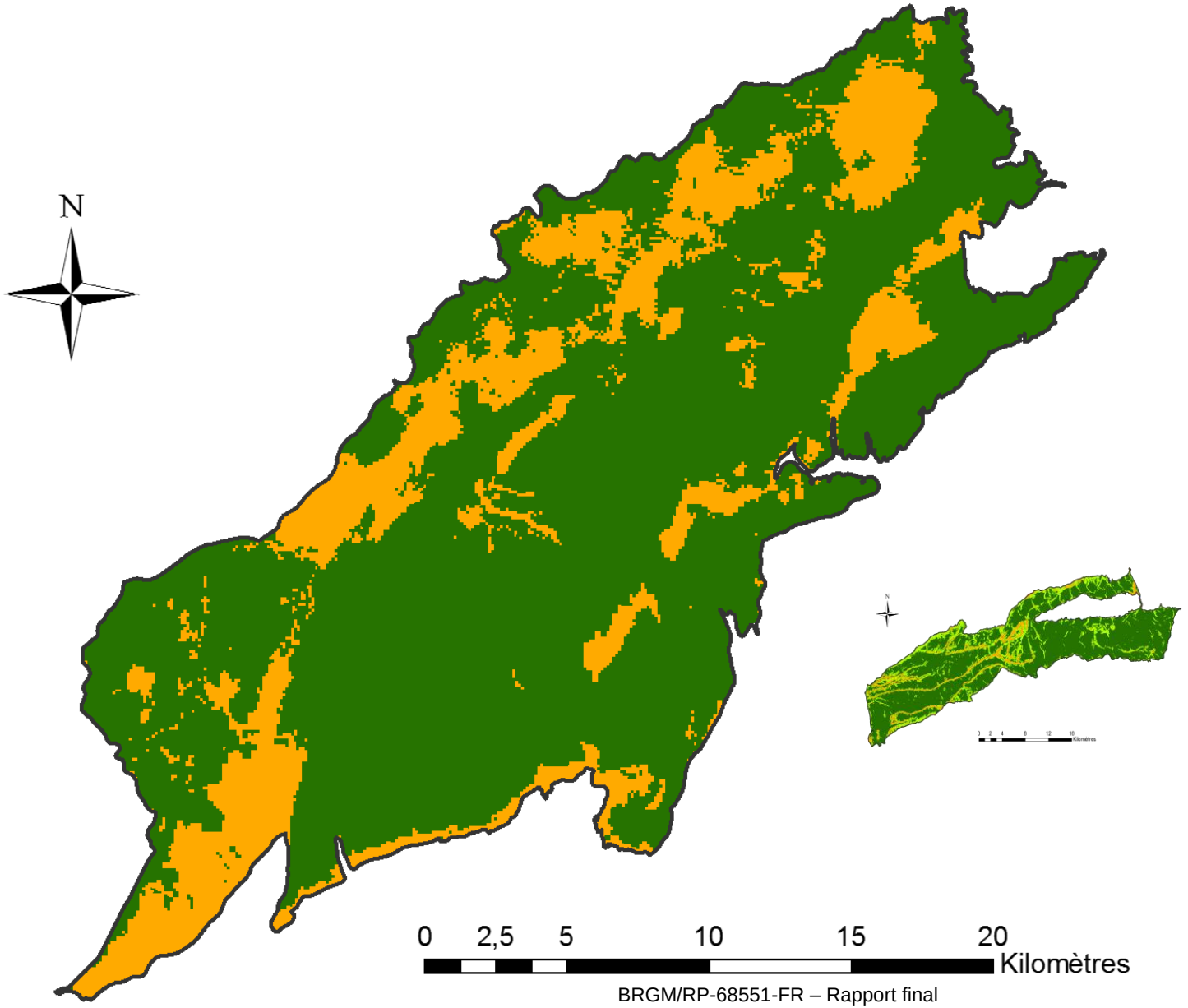
Annexe 9

Cartes du critère « Débordement de nappe » à l’échelle des 4 territoires test

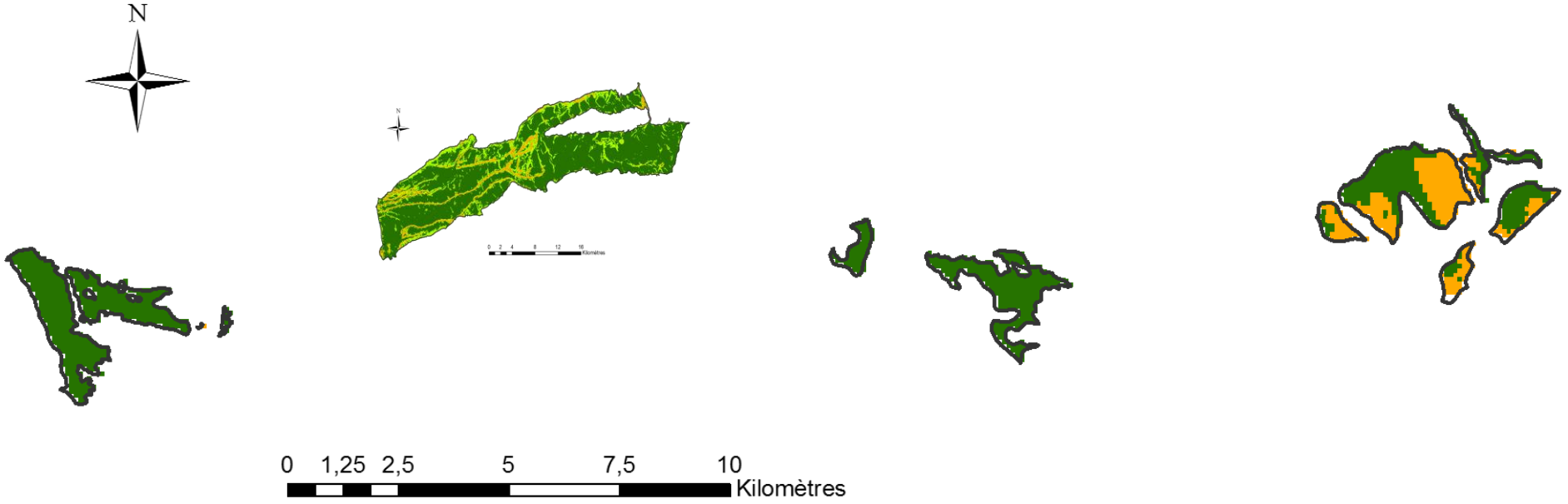
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Note du critère « Débordement de nappe »



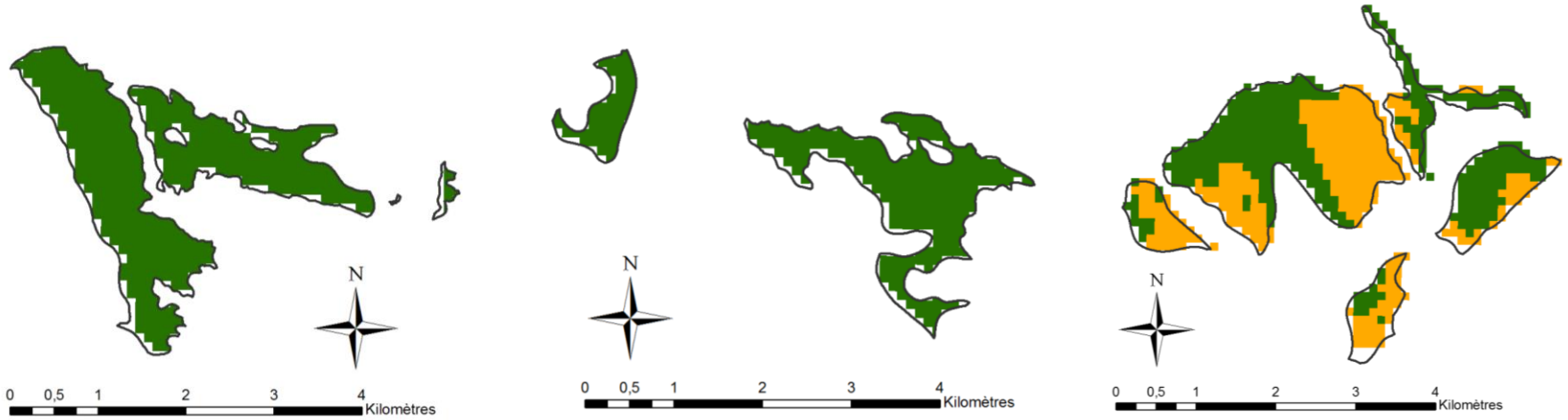
Nappes de la Vistrenque et des Costières – Note du critère « Débordement de nappe »



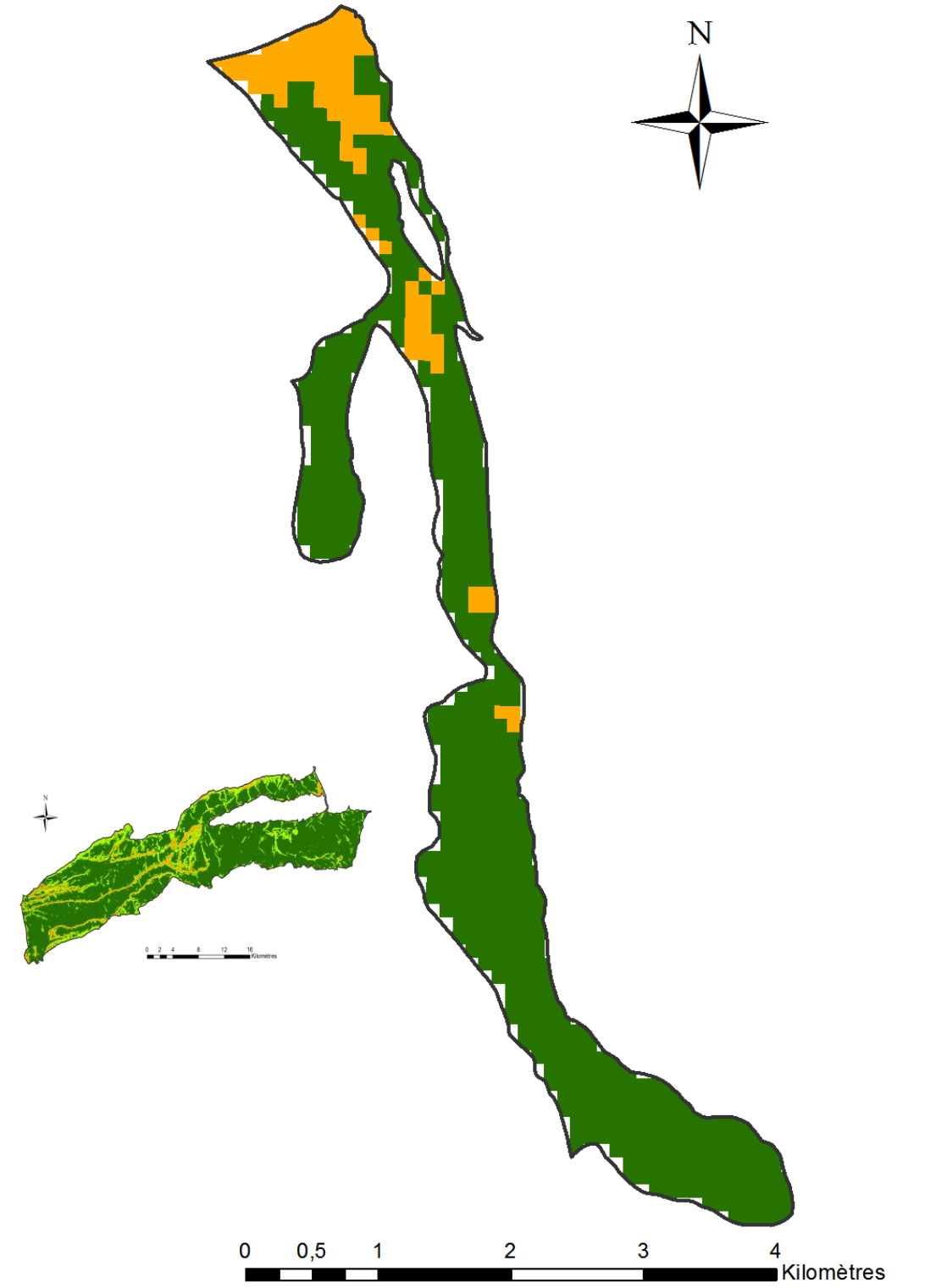
Affleurements de sables astiens – Note du critère « Débordement de nappes »



Zoom:



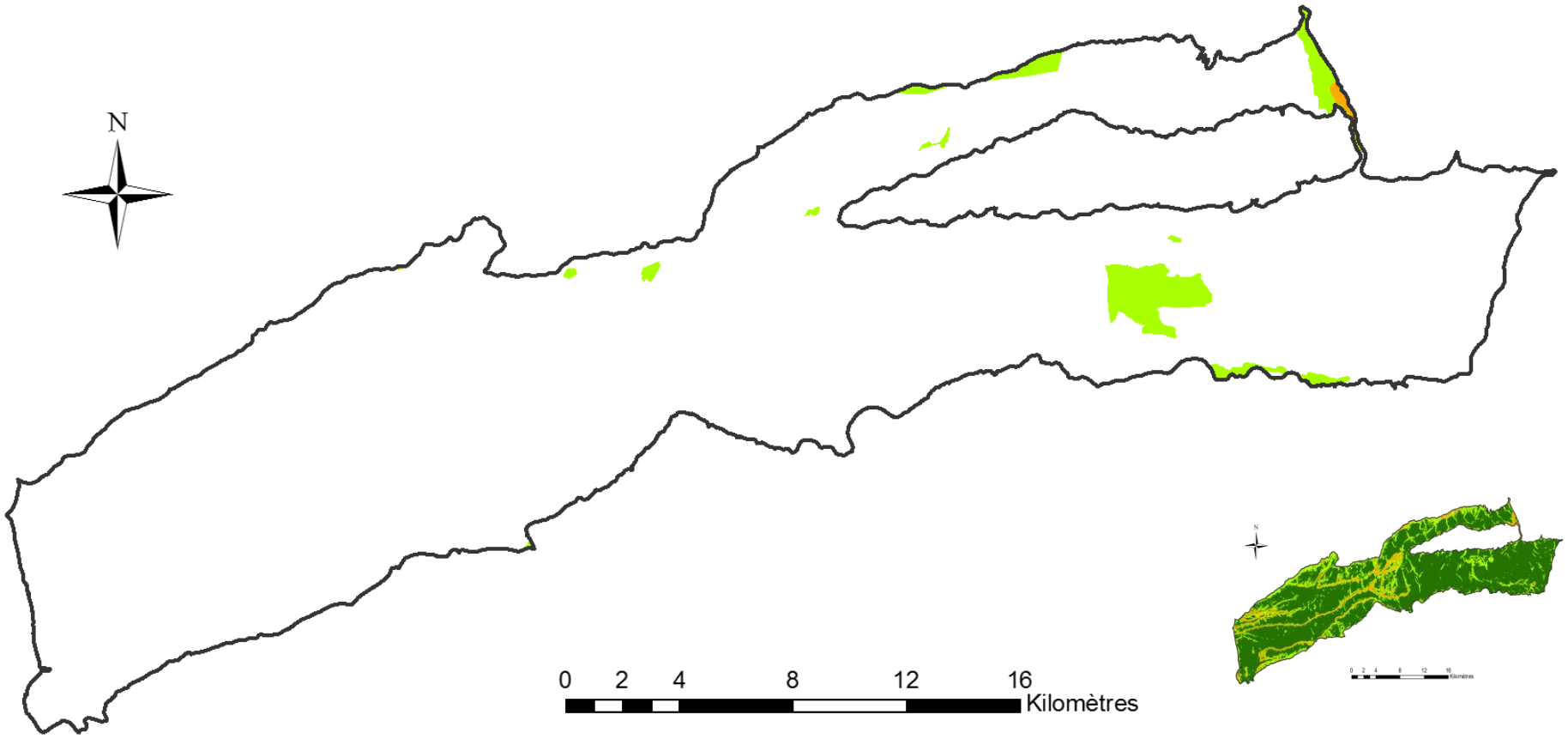
Alluvions de la Figarella – Note du critère « Débordement de nappe »



Annexe 10

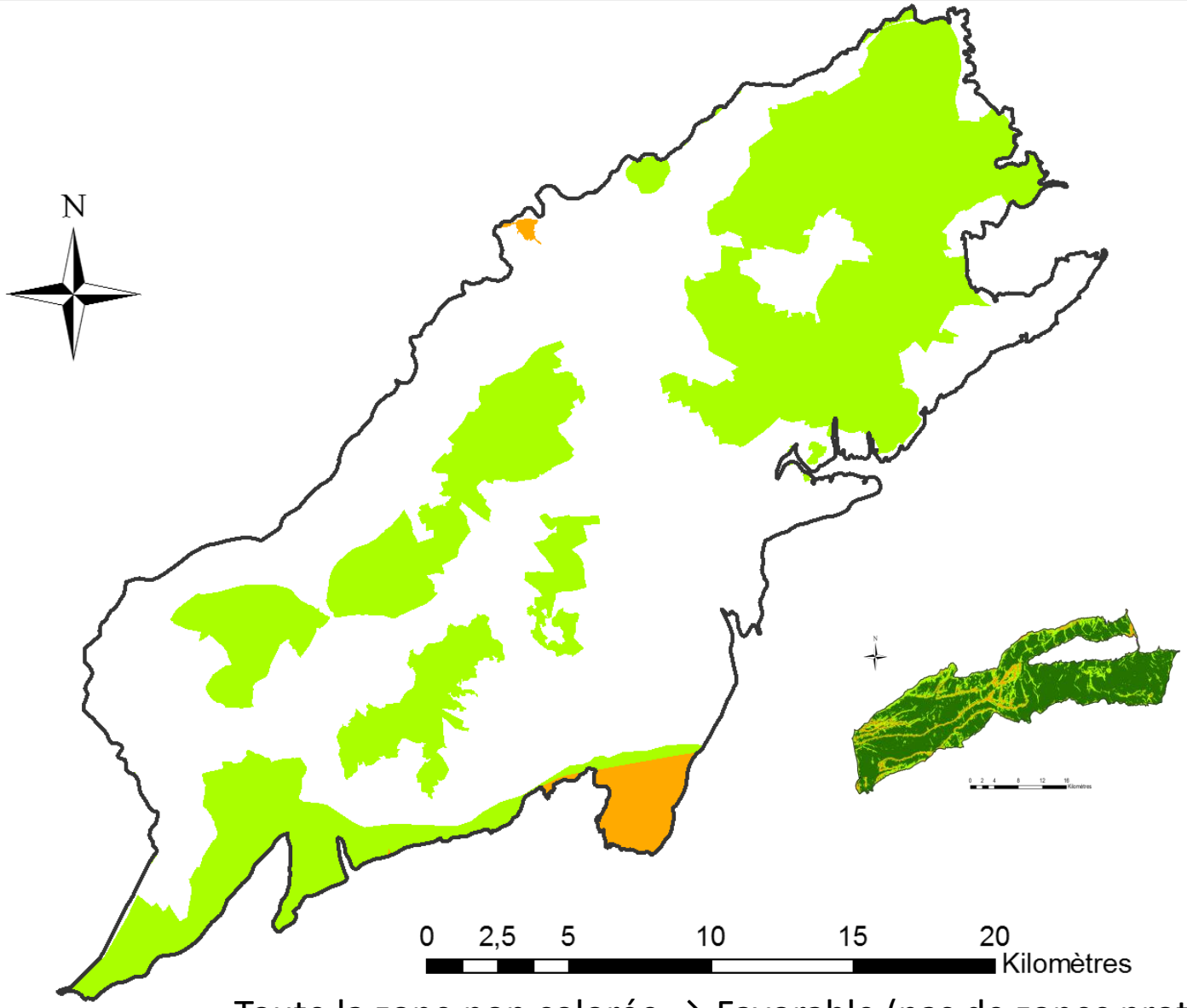
Cartes du critère « Zones protégées » à l’échelle des 4 territoires test

Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Note du critère « Zones protégées »



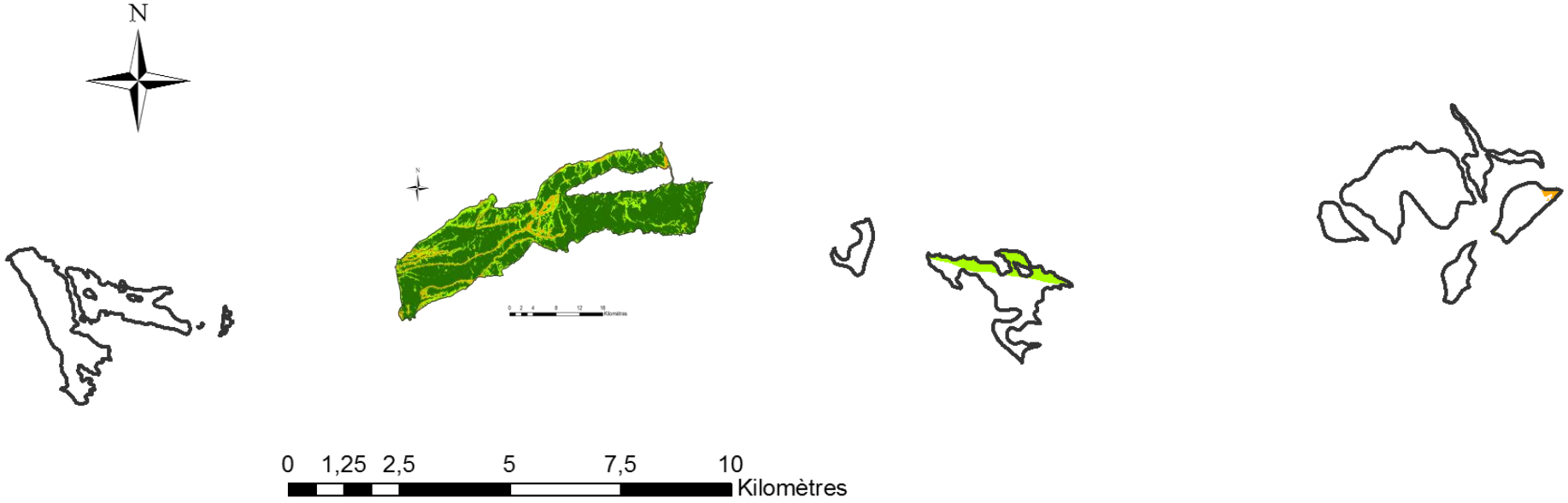
Toute la zone non colorée → Favorable (pas de zones protégées)

Nappes de la Vistrenque et des Costières – Note du critère « Zones protégées »



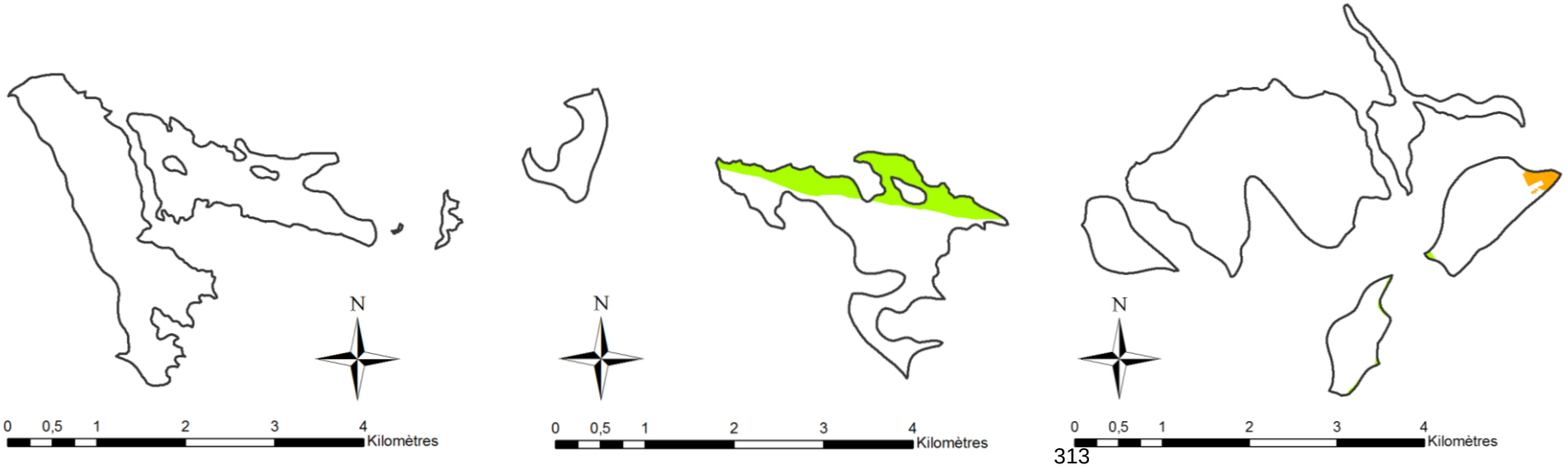
Toute la zone non colorée → Favorable (pas de zones protégées)

Affleurements de sables astiens – Note du critère « Zones protégées »

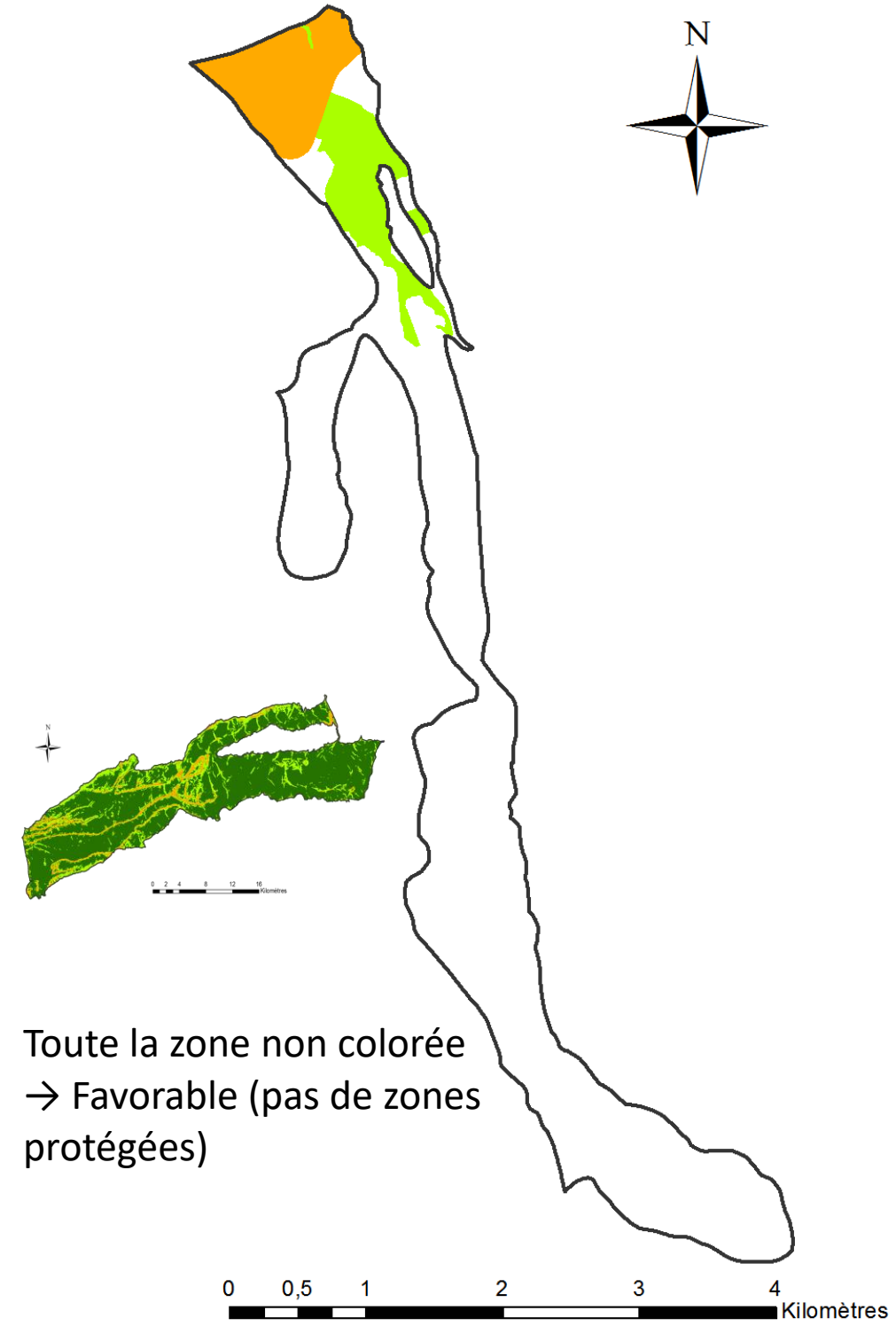


Toute la zone non colorée → Favorable (pas de zones

Zoom:



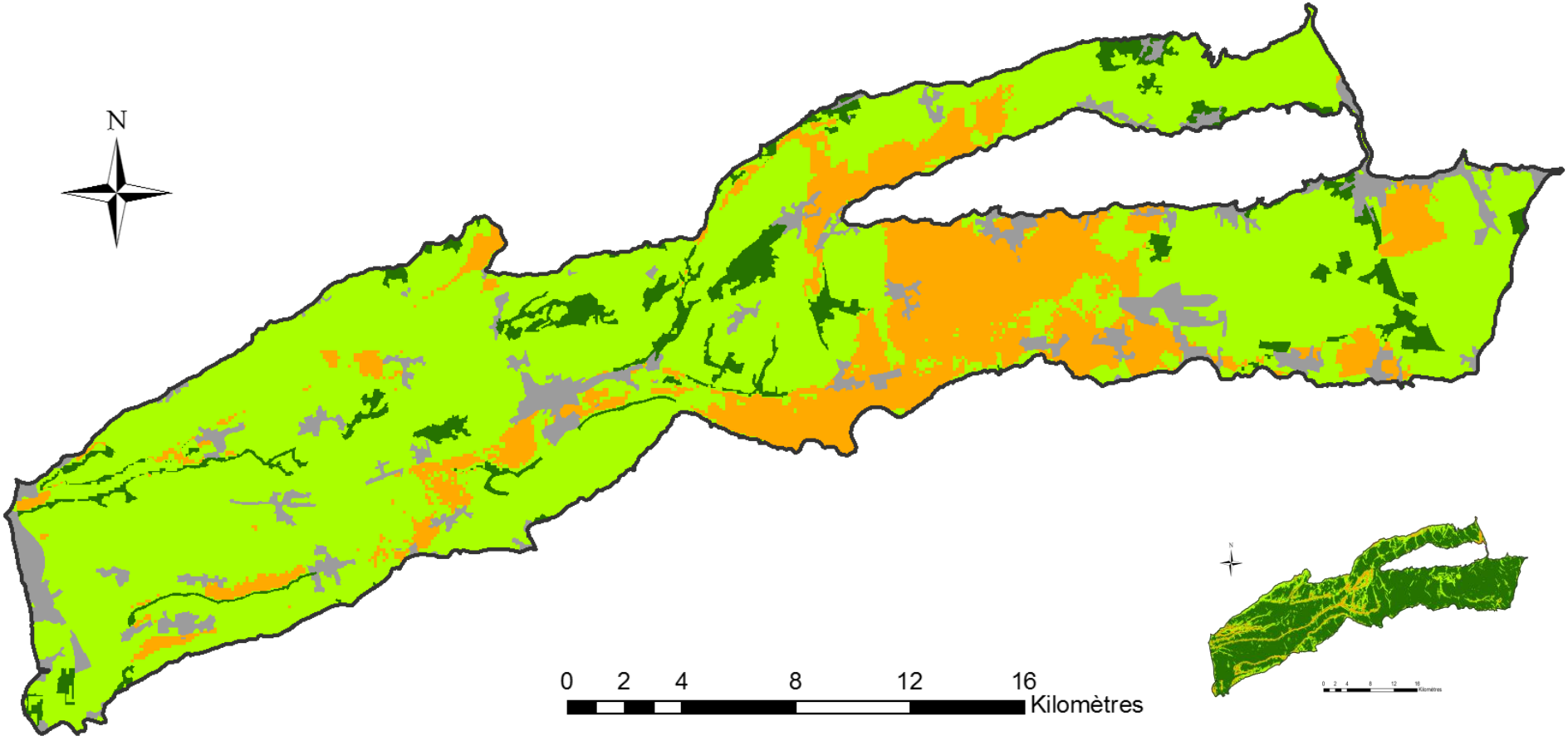
Alluvions de la Figarella – Note du critère « Zones protégées »



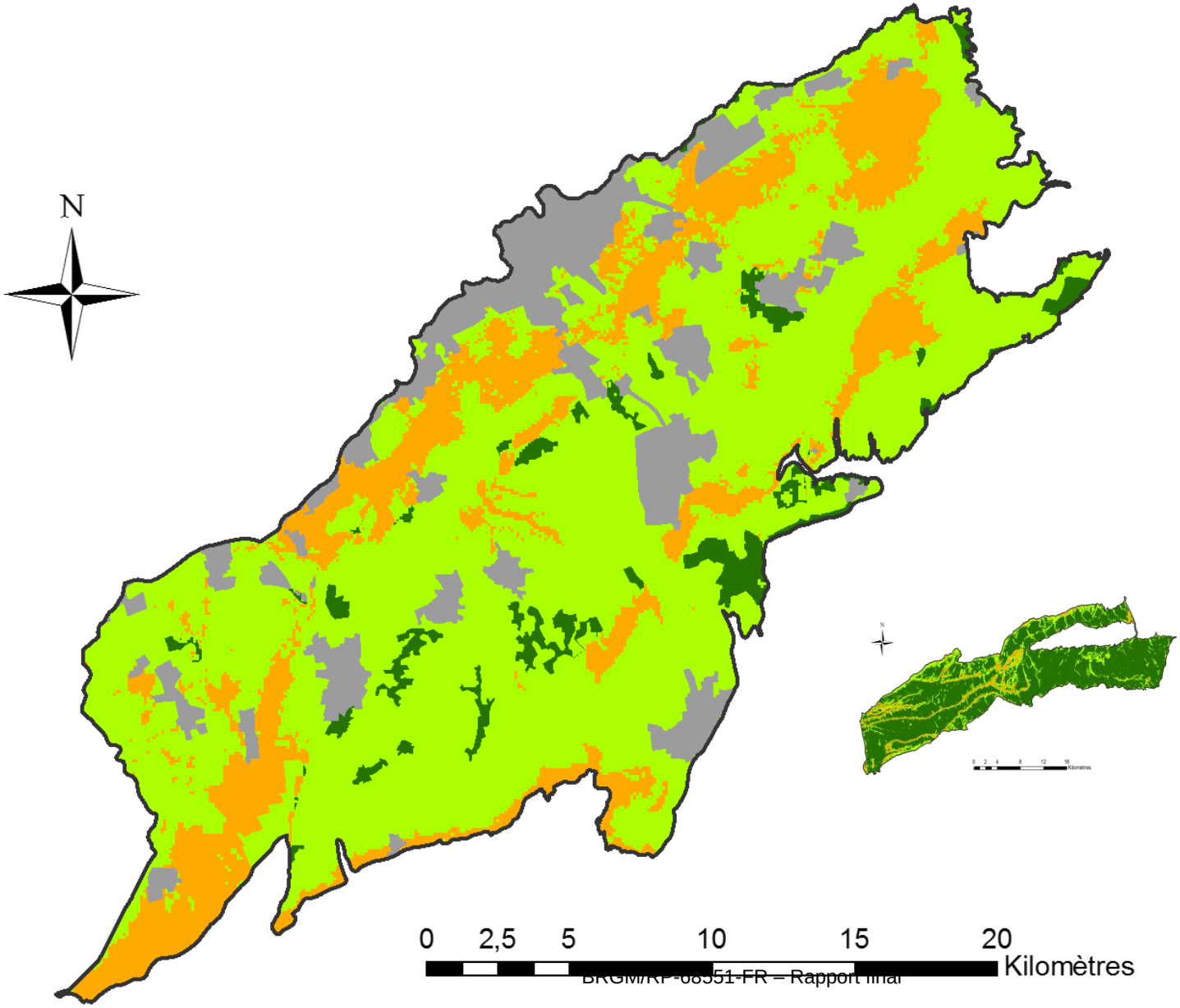
Annexe 11

Cartes de faisabilité de la recharge artificielle indirecte sur base de critères de contraintes, à l'échelle des 4 territoires test

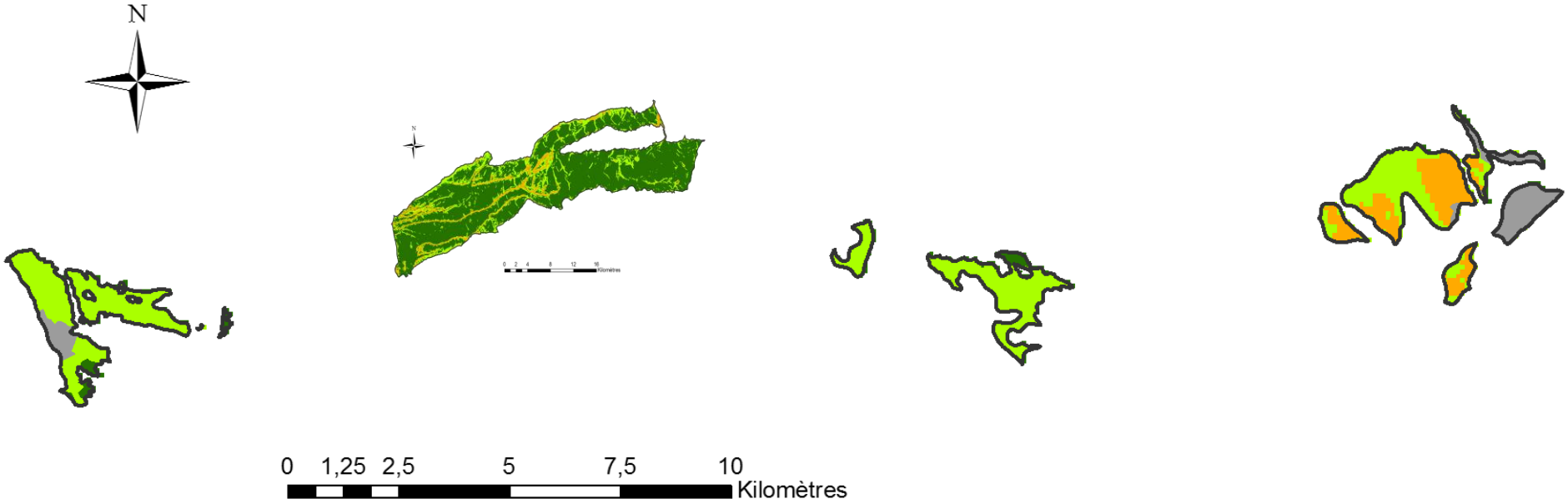
Plaine de Bièvre-Liers-Valloire – Carte des critères de contraintes



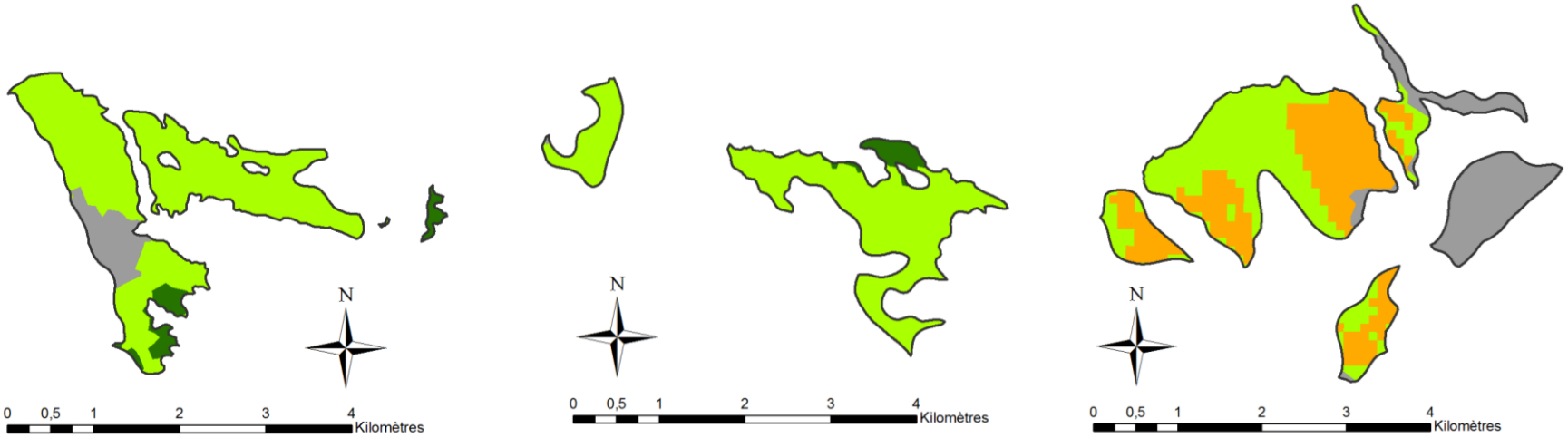
Nappes de la Vistrenque et des Costières – Carte des critères de contraintes



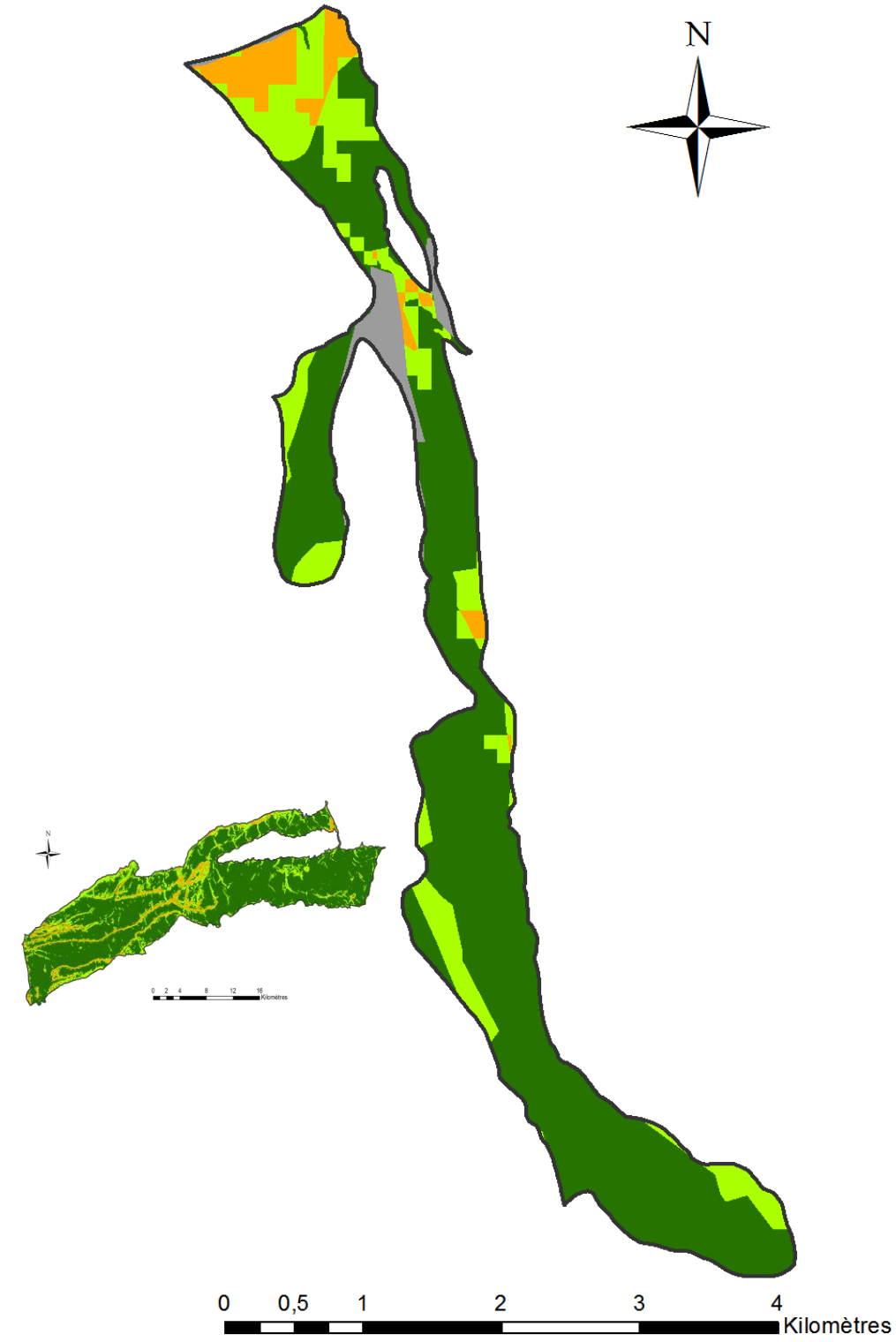
Affleurements de sables astiens – Carte des critères de contraintes



Zoom:



Alluvions de la Figarella – Carte des critères de contraintes



Annexe 12

Résultats de l'analyse quantitative sur les masses d'eau de surface des différents territoires test

Les tableaux ci-après résument les données utilisées pour sélectionner les ressources en eau de surface pouvant fournir les volumes à recharger définis.

Pour chaque site, le premier tableau reprend les Modules, QMNA5, Qréservés et DOE connus pour chaque cours d'eau. Les débits de recharge souhaités sont rappelés (Qr annuel et Qr instantané ramené aux nombres de jours de recharge). Le second tableau donne les résultats des calculs Module – Qréservés, QMNA5 – Qréservés et QMNA5 – DOE. Le troisième tableau soustrait aux résultats du 2ème tableau le Qr instantané. Le code couleur est le suivant : **vert** lorsque le résultat est supérieur à 0,1m^3/s ; **jaune** lorsqu'il est positif mais inférieur à 0,1m^3/s ; **rouge** lorsqu'il est nul ou négatif. Une appréciation est ensuite donnée concernant la sélection ou l'exclusion de la ressource considérée, sur base des critères de quantité.

Plaine de Bièvre-Liers-Valloire (Q en m³/s)						Etude des volumes prélevables (SOGREAH, 2011)			
Masse d'eau	Cours d'eau	Module	QMNA5	Q réservé	Source	DOE Juin	DOE Juillet	DOE Août	DOE Septembre
FRDR10774	Le Régrimay	0,171	0,021	*0,0171*	BURGEAP, 2016				
FRDR466a	Le Rival à la station hydrométrique de Brézins	0,611	0,137	*0,0611*	Banque HYDRO	0,113	0,04	0,028	0,02
	La Raille à la station hydrométrique de Beaufort	0,877	0,041	*0,0877*	Banque HYDRO	0,234	0,085	0,089	0,085
FRDR466b	L'Oron en aval de la confluence avec le Fayaret	1,422	0,96	*0,1422*	BURGEAP, 2016	0,72	0,72	0,605	0,585
	L'Oron en amont de la confluence avec les Collières	1,595	0,725	*0,1595*	BURGEAP, 2016				
FRDR466c	Le Dolure en amont de la confluence avec le Régrimay	0,011	0,006	*0,0011*	BURGEAP, 2016				
	Le Dolure en amont de la confluence avec les Collières	0,024	0,012	*0,0024*	BURGEAP, 2016				
	Les Collières à la station hydrométrique de Saint-Rambert-d'Albon	2,59	0,48	*0,259*	Banque HYDRO	0,935	0,635	0,6	0,605

Qr annuel (Mm3/an)	**5**
Qr instantané moins été: 243j (m3/s)	0,24

Masse d'eau	Cours d'eau	Module- Qréservé	QMNA5-Qréservé	QMNA5-DOE				
FRDR10774	Le Régrimay	0,1539	0,0039					Plaine de Bièvre-Liers-Valloire
FRDR466a	Le Rival à la station hydrométrique de Brézins	0,5499	0,0759	0,024	0,097	0,109	0,117	
	La Raille à la station hydrométrique de Beaufort	0,7893	-0,0467	-0,193	-0,044	-0,048	-0,044	
FRDR466b	L'Oron en aval de la confluence avec le Fayaret	1,2798	0,8178	0,24	0,24	0,355	0,375	
	L'Oron en amont de la confluence avec les Collières	1,4355	0,5655					
FRDR466c	Le Dolure en amont de la confluence avec le Régrimay	0,0099	0,0049					
	Le Dolure en amont de la confluence avec les Collières	0,0216	0,0096					
	Les Collières à la station hydrométrique de Saint-Rambert-d'Albon	2,331	0,221	-0,455	-0,155	-0,12	-0,125	

Masse d'eau	Cours d'eau	Comparaison avec Qrecharge moins été (243j)						Plaine de Bièvre-Liers-Valloire	Appréciation Quantité
FRDR10774	Le Régrimay	-0,0842	-0,2342						Non conservé
FRDR466a	Le Rival à la station hydrométrique de Brézins	0,3118	-0,1622	-0,2141	-0,1411	-0,1291	-0,1211		Oui hors période estivale
	La Raille à la station hydrométrique de Beaufort	0,5512	-0,2848	-0,4311	-0,2821	-0,2861	-0,2821		Oui hors période estivale
FRDR466b	L'Oron en aval de la confluence avec le Fayaret	1,0417	0,5797	0,0019	0,0019	0,1169	0,1369		Oui toute l'année
	L'Oron en amont de la confluence avec les Collières	1,1974	0,3274						Oui toute l'année (report tronçon du dessus)
FRDR466c	Le Dolure en amont de la confluence avec le Régrimay	-0,2282	-0,2332						Non conservé
	Le Dolure en amont de la confluence avec les Collières	-0,2165	-0,2285						Non conservé
	Les Collières à la station hydrométrique de Saint-Rambert-d'Albon	2,0929	-0,0171	-0,6931	-0,3931	-0,3581	-0,3631		Oui hors période estivale
Autres cours d'eau du site: pas de données quantitatives → non considérés.									

Nappes de la Vistrenque et des Costières (Q en m ^{3} /s)						Etude des volumes prélevables (GINGER, 2012b)		
Masse d'eau	Cours d'eau	Module	QMNA5	Q réservé	Source	DOE Juillet	DOE Août	DOE Septembre
FRDR134b	Le Vidourle à Sommières [Mairie]	6,88	0,22	*0,688*	Banque HYDRO	0,22	0,2	0,17
	Le Vidourle [Vidourle aval] à Marsillargues	7,58	0,039	*0,758*				
FRDR133	Le Vistre à Bernis	2,23	0,45	*0,223*				
FRDR133	Le Vistre à Vestric-et-Candiac	3,21		*0,321*				
FRDR133	Le Vistre [lit mineur] au Cailar	3,67	0,83	*0,367*				

Canaux BRL	Capacité	Volume idéal	Source
Prise au Rhône	Max: 75. Pointe actuel: 10 à 12	*2365 Mm3/an*	GINGER, 2010a
Philippe Lamour	63	*1987 Mm3/an*	GINGER, 2010a
Costières	12	*378 Mm3/an*	GINGER, 2010a

Qr annuel (Mm3/an)	**1**
Qr instantané moins été: 243j (m3/s)	0,048

Masse d'eau	Cours d'eau	Module - Qréservé	QMNA5-Qréservé	QMNA5 - DOE			
FRDR134b	Le Vidourle à Sommières [Mairie]	6,192	-0,468	0	0,02	0,05	Vistrenque et Costières
	Le Vidourle [Vidourle aval] à Marsillargues	6,822	-0,719				
FRDR133	Le Vistre à Bernis	2,007					
FRDR133	Le Vistre à Vestric-et-Candiac	2,889	-0,321				
FRDR133	Le Vistre [lit mineur] au Cailar	3,303	0,463				

Masse d'eau	Cours d'eau	Comparaison avec Qrecharge moins été (243j)					Vistrenque et Costières	Appréciation Quantité
FRDR134b	Le Vidourle à Sommières [Mairie]	6,1444	-0,5156	-0,0476	-0,0276	0,0024		Oui hors période estivale
	Le Vidourle [Vidourle aval] à Marsillargues	6,7744	-0,7666					
FRDR133	Le Vistre à Bernis	1,9594						Oui hors période estivale
FRDR133	Le Vistre à Vestric-et-Candiac	2,8414	-0,3686					
FRDR133	Le Vistre [lit mineur] au Cailar	3,2554	0,4154					
Autres cours d'eau du site: pas de données quantitatives → non considérés.								

Canaux BRL	Comp. Qr 243j
Philippe Lamour	62,95237007
Costières	11,95237007

Oui, possible toute l'année

Sables astiens d'Agde-Valras (Q en m³/s)						Etude des volumes prélevables		
Masse d'eau	Cours d'eau	Module	QMNA5	Q réservé	Source	Station	DOE	Source
FRDR174	L'Aude à Coursan [Arminis]	28,3	1	*2,83*	Banque HYDRO	Aude aval	4	Eaucéa, 2014
FRDR161b	L'Hérault à Montagnac	41,7	2,6	*4,17*		Hérault - Amont Thongue	3,5	DREAL LR, 2015a
						Hérault - Exutoire mer	2,25	DREAL LR, 2015a
FRDR151b	L'Orb à Béziers [Tabarka]	23,4	3,5	*2,34*		Orb - Béziers amont prise VNF	2	DREAL LR, 2015b

Réseau	Capacité	Source
Réseau Aquadomitia	2,5m3/s	BRL

Qr annuel (Mm3/an)	**0,5**
Qr instantané 212j (m3/s)	0,027

Masse d'eau	Cours d'eau	Module - Qréservé	QMNA5-Qréservé	QMNA5 - DOE	
FRDR174	L'Aude à Coursan [Arminis]	25,47	-1,83	-3	Sables astiens
FRDR161b	L'Hérault à Montagnac	37,53	-1,57	-0,9	
				0,35	
FRDR151b	L'Orb à Béziers [Tabarka]	21,06	1,16	1,5	

Masse d'eau	Cours d'eau	Comparaison avec Qrecharge 212j				Appréciation Quantité
FRDR174	L'Aude à Coursan [Arminis]	25,44270266	-1,857297345	-3,027297345	Sables astiens	Oui hors période estivale
FRDR161b	L'Hérault à Montagnac	37,50270266	-1,597297345	-0,927297345		Oui hors période estivale
				0,322702655		
FRDR151b	L'Orb à Béziers [Tabarka]	21,03270266	1,132702655	1,472702655		Oui toute l'année (mais remarque gestionnaires: difficile en période estivale)
Autres cours d'eau du site: pas de données quantitatives → non considérés.						

Réseau	Comp. Qr 212j	
Réseau Aquadomitia	2,5	Oui, hors période estivale (tous débits estivaux déjà alloués à autres usages)

Alluvions de la Figarella (Q en m³/s)					
Masse d'eau	**Cours d'eau**	**Module**	**QMNA5**	**Q réservé**	**Source**
FRER51	La Figarella à Calenzana		0,017		Banque HYDRO
FRER51	La Figarella, prise basse OEHC	0,841	0,0493	*0,0841*	OEHC, 2015
FRER51	La Figarella, champ captant Calvi	1,508		*0,1508*	OEHC, 2015

Ouvrages OEHC	Capacité	Source
Barrage de Codole	7 Mm3 (cote normale d'exploitation)	H. Politi (OEHC)
Canalisations Eau Brute	500 m3/h (débit de transit hors période estivale), *soit 0,14m3/s env.* / 10 000 m3/j en période estivale, *soit 0,12m3/s env.*	H. Politi (OEHC)

Qr annuel (Mm3/an)	**0,5**
Qr instantané 61j (m3/s)	0,095

Masse d'eau	Cours d'eau	Module - Qréservé	QMNA5-Qréservé	QMNA5 - DOE	Alluvions de la Figarella
FRER51	La Figarella à Calenzana				
FRER51	La Figarella, prise basse OEHC	0,7569	-0,0348		
FRER51	La Figarella, champ captant Calvi	1,3572			

Masse d'eau	Cours d'eau	Comparaison avec Qrecharge 61j			Alluvions de la Figarella	Appréciation Quantité
FRER51	La Figarella à Calenzana					Oui hors période estivale
FRER51	La Figarella, prise basse OEHC	0,6620	-0,1297			
FRER51	La Figarella, champ captant Calvi	1,2623				
Autres cours d'eau du site: pas de données quantitatives → non considérés.						

Réseaux	Comp. Qr 61j
Canalisations Eau Brute hors période estivale	0,0440
Canalisations Eau Brute période estivale	0,0209

Oui mais débits restants faibles. S'assurer qu'ils répondent aux autres besoins.

Annexe 13

Résultats de l’analyse qualitative sur les masses d’eau de surface des différents territoires test

Plaine de Bièvre-Liers-Valloire					
Masse d'eau	**Cours d'eau**	**Etat écologique**	**dont Physico-chimique**	**Etat chimique**	**Appréciation Qualité**
FRDR10774	Le Régrimay	Médiocre	non précisé	Bon	Non
FRDR466a	Le Rival / la Raille	Mauvais	Moyen	Mauvais	Non (mais conservé suite à l'intérêt porté par les gestionnaires et associations locales à ce cours d'eau)
FRDR466b	L'Oron	Moyen	Moyen	Mauvais	Non
FRDR466c	Le Dolure / les Collières	Moyen	Moyen	Bon	Oui

Nappes de la Vistrenque et des Costières					
Masse d'eau	**Cours d'eau**	**Etat écologique**	**dont Physico-chimique**	**Etat chimique**	**Appréciation Qualité**
FRDR134b	Le Vidourle	Bon	Bon	Bon	Oui
FRDR133	Le Vistre	Moyen	Médiocre	Bon	Non

Canaux BRL	Commentaire qualité	
Philippe Lamour	Provenance: Rhône. Sa turbidité et ses caractéristiques bactériologiques correspondent à une bonne qualité. Sa minéralisation et son taux de matières organiques sont modérés. Les concentrations en nutriments (nitrates, ammoniaque) sont également faibles. Bien que présentant une certaine concentration en métaux et autre microéléments minéraux, **aucune non-conformité n'a été détectée pour des eaux brutes à potabiliser**. La même remarque peut être faite en terme de qualité radiologique et de pesticides (BRL, 2017b)	Oui
Costières		

Sables astiens d'Agde-Valras					
Masse d'eau	Cours d'eau	Etat écologique	dont Physico-chimique	Etat chimique	Appréciation Qualité
FRDR174	Aude	Moyen	Bon	Mauvais	Non
FRDR161b	Hérault	Moyen	Bon	Bon	Oui
FRDR151b	Orb	Moyen	Bon	Bon	Oui

Canaux BRL	Commentaire qualité	
AquaDomitia	Provenance: Rhône et Orb. L'eau du Rhône circulant au sein du réseau présente une qualité satisfaisante (pour des eaux brutes à potabiliser ou utilisées pour l'irrigation), aussi bien en terme de caractéristiques bactériologiques, turbidité, minéralisation, taux de matières organiques, que de concentrations en nutriments, métaux, pesticides et éléments radiologiques (BRL, 2017b). L'eau de l'Orb présente une qualité similaire voire sensiblement meilleure que celle du Rhône sur l'ensemble de ces paramètres, mais les phénomènes de crues peuvent temporairement (quelques heures à quelques jours) faire augmenter la teneur en charges solides de l'eau brute (BRL, 2017a).	Oui

Alluvions de la Figarella					
Masse d'eau	Cours d'eau	Etat écologique	dont Physico-chimique	Etat chimique	Appréciation Qualité
FRER51	La Figarella	Très bon	non précisé	Bon	Oui

Réseau OEHC	Etat écologique	dont Physico-chimique	Etat chimique	
Canalisations Eau Brute. Provenance Figarella	Se référer à la qualité du cours d'eau de la Figarella.			Oui
Canalisations Eau Brute. Provenance Lac de Codole	Moyen	non précisé	Bon	Oui

Annexe 14

Fiche tarifaire 2018 BRL : Eau brute à usage agricole

L'EAU BRUTE A USAGE AGRICOLE
TARIF 2018 RESEAU HYDRAULIQUE REGIONAL

Les contrats agricoles BRLE sont réservés aux exploitants agricoles en activité et à des fins de productions végétales. Le service de l'eau est assuré en libre service toute l'année.

Les tarifs agricoles comprennent 3 redevances :

- **Abonnement (RD)** qui est proportionnelle au débit souscrit et exprimé en € par m³/heure.
- **Volume (RV)** qui correspond au volume distribué au compteur en m³.
- **Compteur (RC)** qui correspond aux frais de location annuels du compteur selon le type de borne.

Les 2 tarifs principaux

(valeur en prix 2018 en € HT, TVA 5,5% en sus) :

- **Tarif PRO** pour des irrigations régulières mobilisant des volumes importants.
- **Tarif APPOINT** pour des consommations plus ponctuelles mobilisant de faibles volumes.

Gamme de débit disponible :
Borne "A" = 5–7–10–15–20–25–30–35 m³/h
Borne "B" = 15–20–25–30–35–40–50–60–80–100–120 m³/h

Redevance annuelle de compteur :
Si débit <40 m³/h = 50,733 € HT
Si débit >40 m³/h = 126,824 € HT

Type de contrat	Durée	TARIF	Redevance abonnement par m³/h souscrit HT	Redevance de volume par m³ Consommé HT(*)
Standard	5 ans renouvelable par période de 2 ans	PRO	63,415 €	0,1015 €
		APPOINT	38,049 €	0,2536 €
Annuel	1 an renouvelable par période de 1 an	PRO	76,099 €	0,1015 €
		APPOINT	50,733 €	0,2536 €

(*) Le prix unitaire du m³ consommé doit être majoré des taxes et redevances prélevées pour le compte de l'Agence de l'eau et des Voies Navigables de France. Le montant de ces deux taxes variait en 2017 suivant les secteurs entre 0,0144 € HT et 0,0352 € HT.

Les tarifs précisés ci-dessus peuvent bénéficier de certaines remises : «Aide aux Jeunes Agriculteurs », « Remise sur contrat de 10 ans », « Remise sur chiffre d'affaires », ... N'hésitez pas à nous contacter.

Conditions du contrat de distribution d'eau

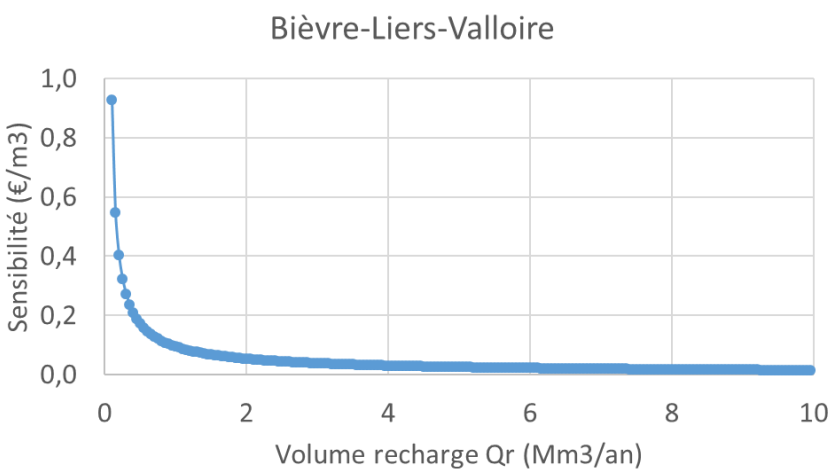
- Les contrats sont souscrits pour une durée de 1 ou 5 campagnes. Ils entrent en vigueur au 1er novembre.
- Facturation de la redevance d'abonnement (RD) en avril. Pour les contrats souscrits après cette date, le règlement de la redevance d'abonnement s'effectue à la signature du contrat.
- Facturation de la redevance de volume (RV) et de la redevance de compteur (RC) mi-novembre.
- **La première souscription d'un contrat** donne lieu à des frais de dossier d'un montant de 82,45 € HT. Ces frais ne s'appliquent pas pour un contrat STANDARD.
- La souscription d'un contrat ANNUEL donne lieu à des frais de pose : débit < 40 m³/h = 76,09 € HT; débit ≥ 40 m³/h = 126,82 € HT. Ces frais ne s'appliquent pas pour un contrat STANDARD.
- Les contrats « ANNUEL » doivent être souscrits avant le 1er juin. Au-delà de cette date, seuls les contrats STANDARD ou SECOURS sont acceptés. (Pour le tarif SECOURS, nous consulter).
- Les contrats STANDARD peuvent être déplacés sur une autre borne BRL, sans frais, une fois par an.

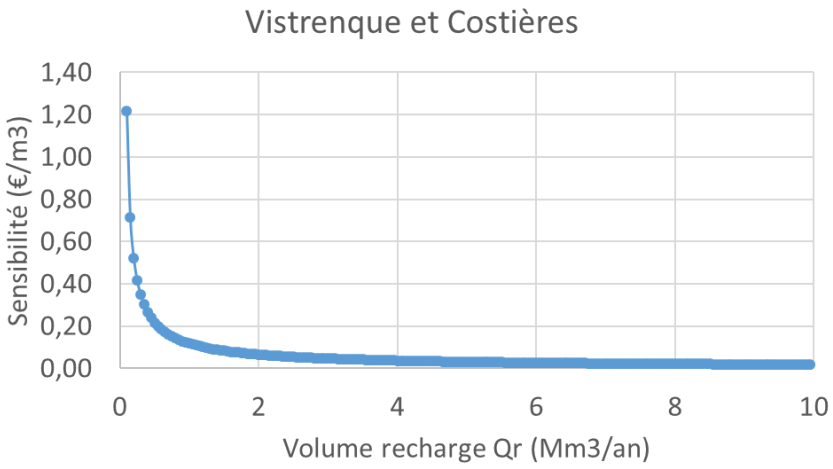
Document non contractuel

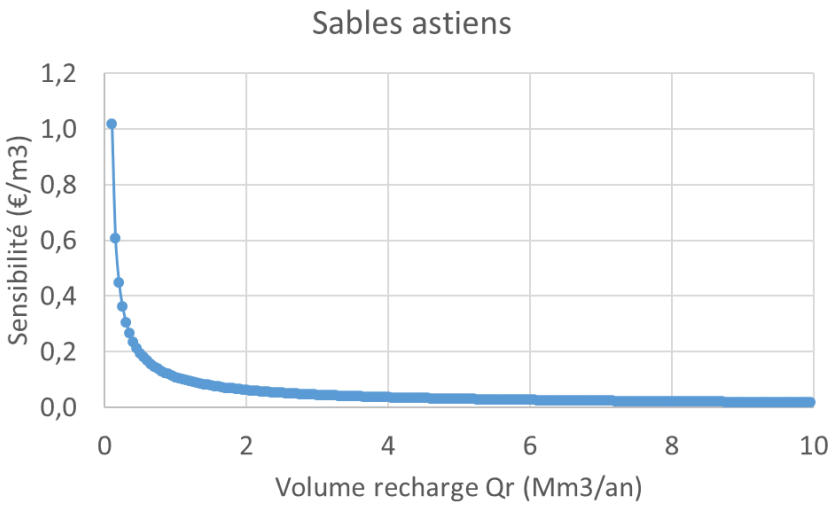
Annexe 15

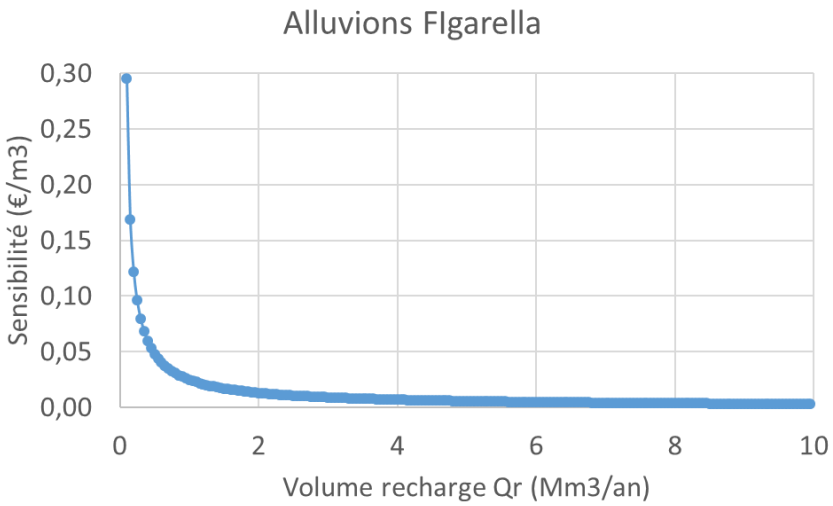
Analyses de sensibilité : graphiques de sensibilité du coût unitaire de recharge CRA à l'évolution de 14 critères de la fonction de coût, pour les 4 territoires test

Sensibilité par rapport au volume rechargé Qr (Mm3/an)

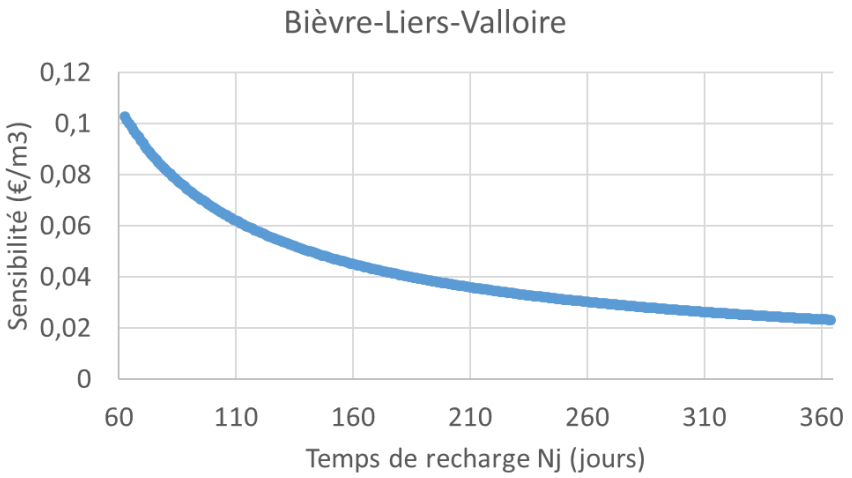


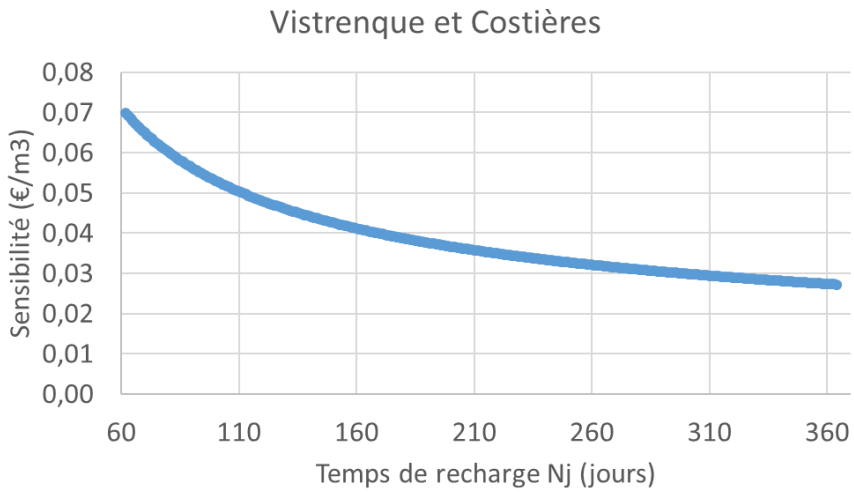


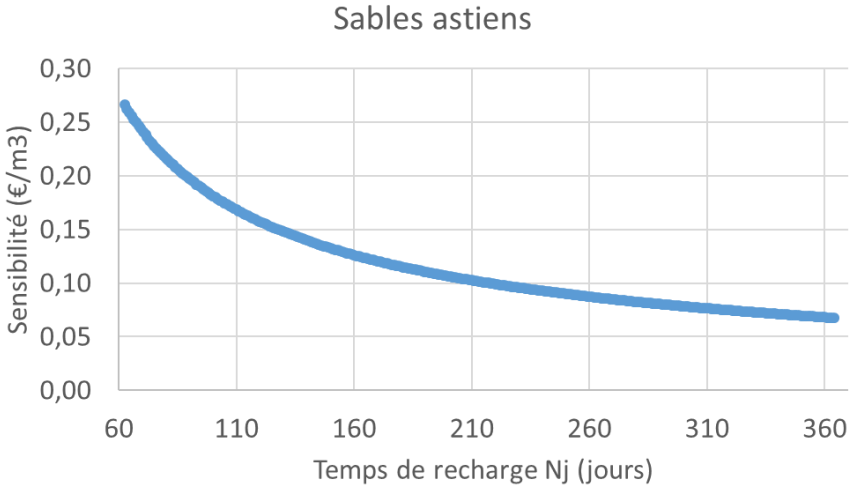


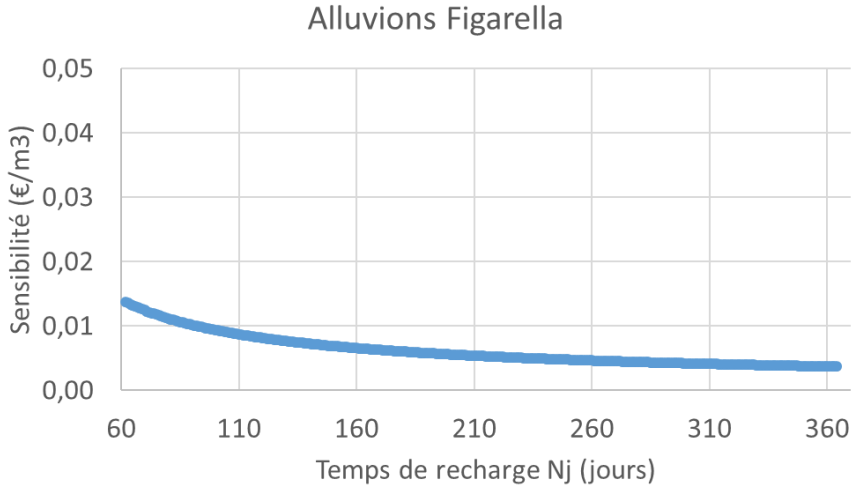


Sensibilité par rapport au temps de recharge Nj (jours)

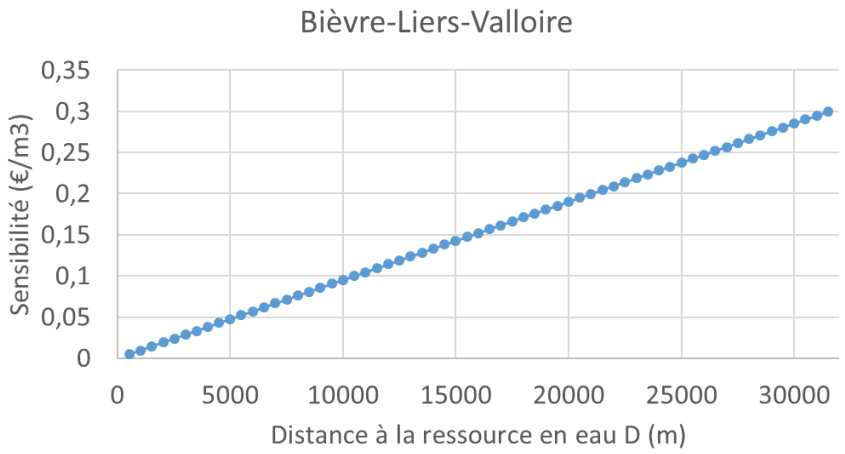


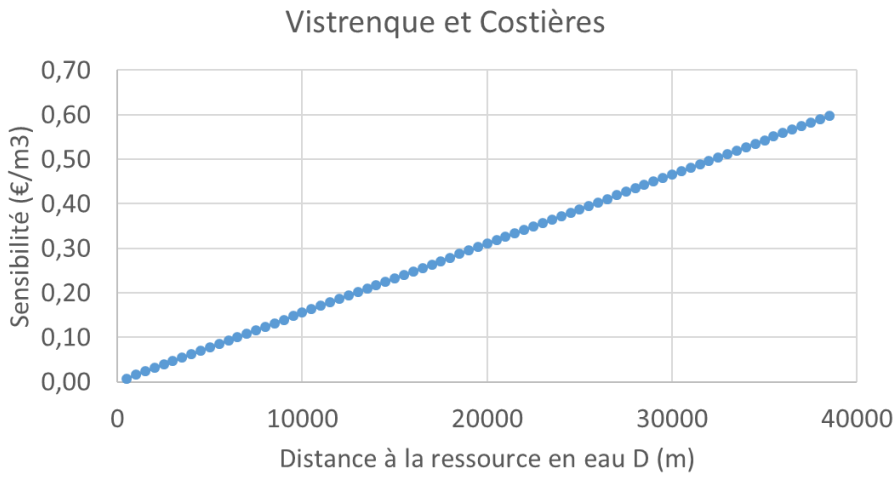


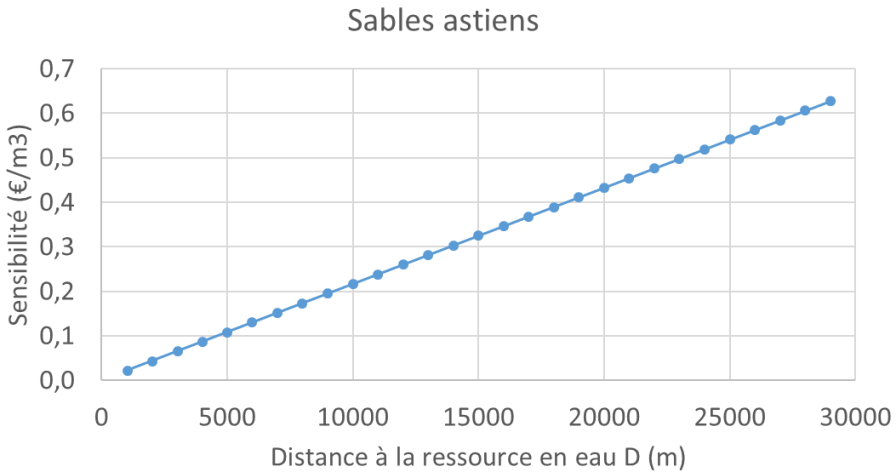


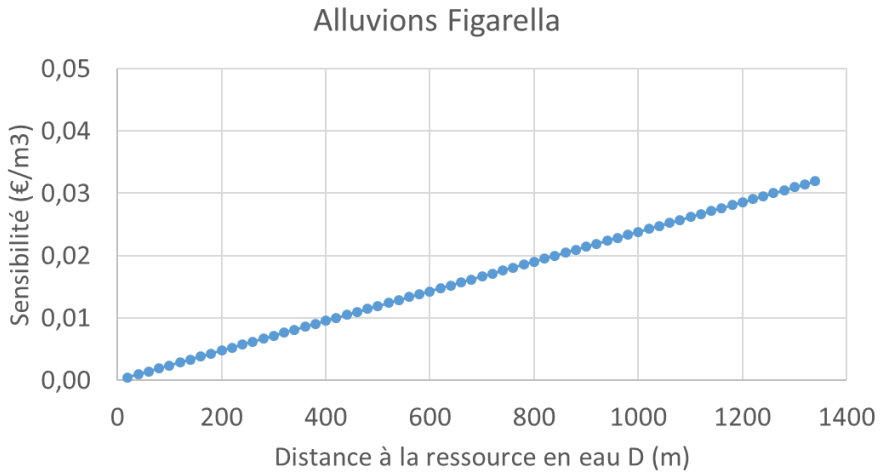


Sensibilité par rapport à la distance à la ressource en eau D (m)

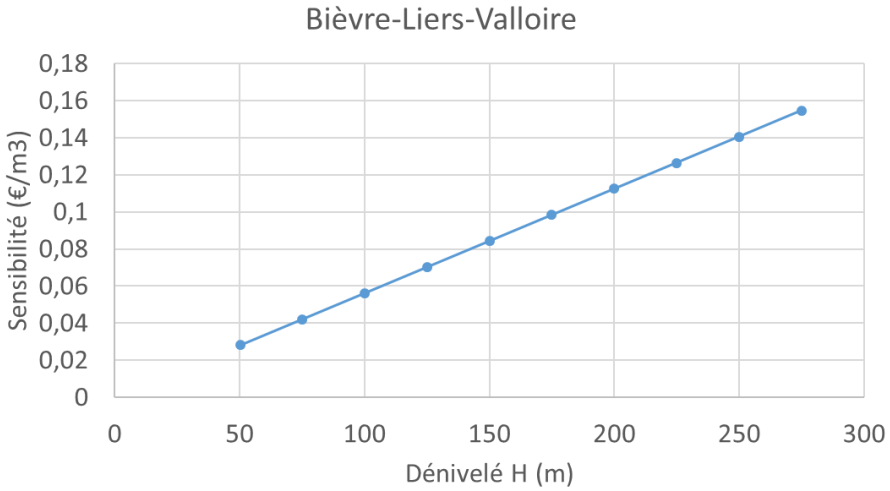


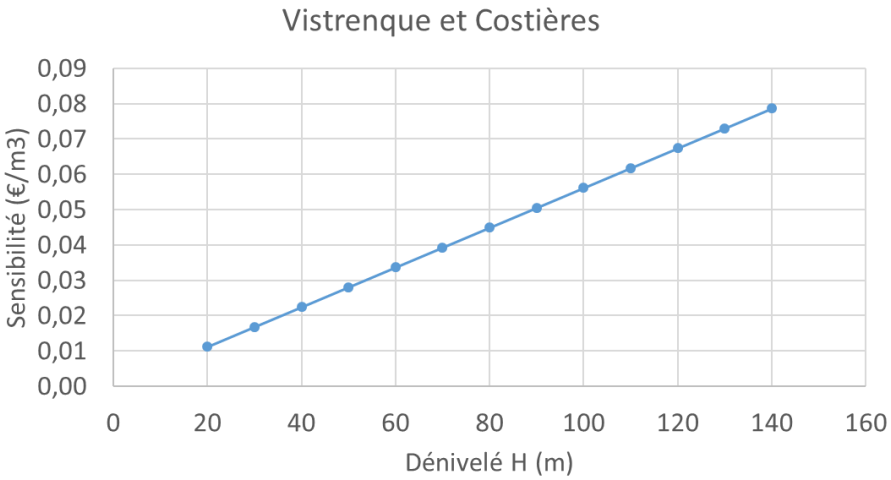


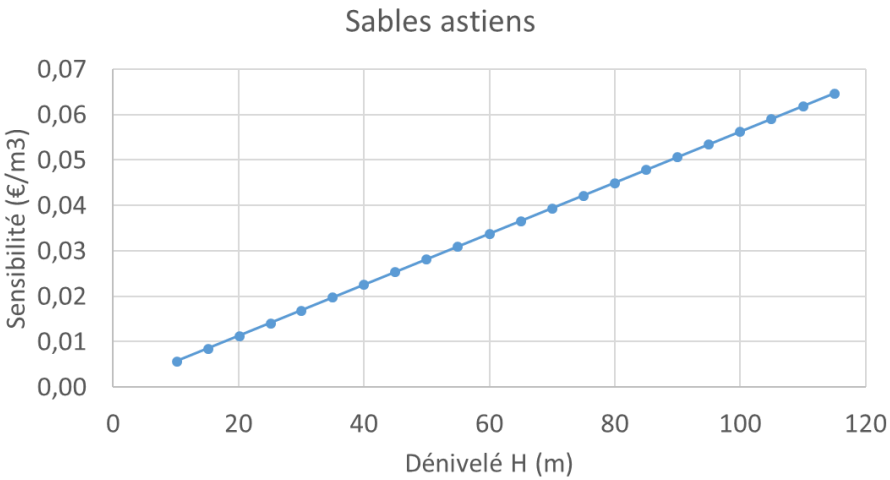


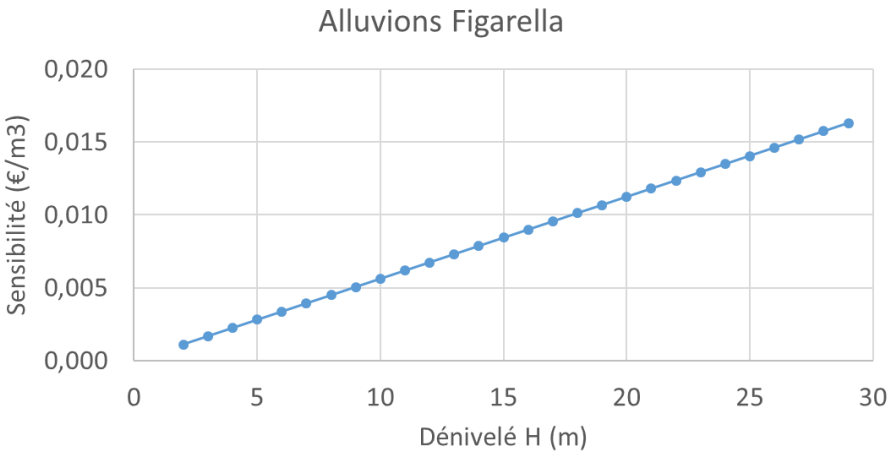


Sensibilité par rapport au dénivelé H (m)

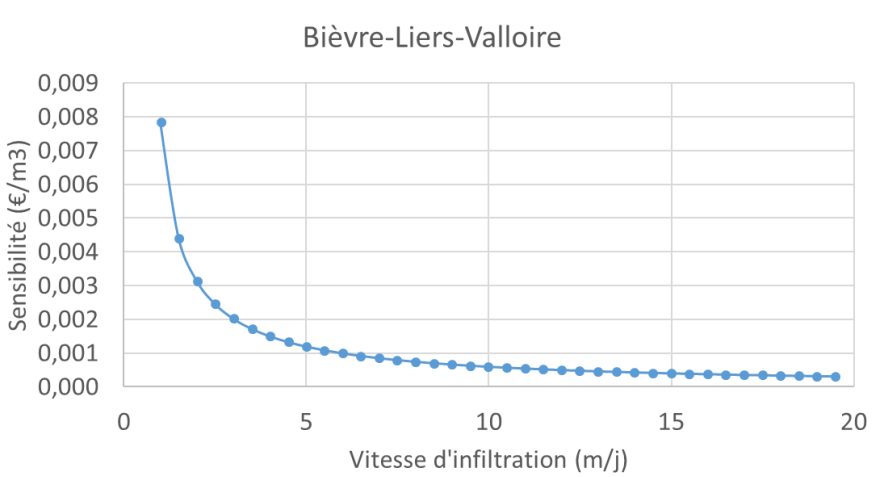


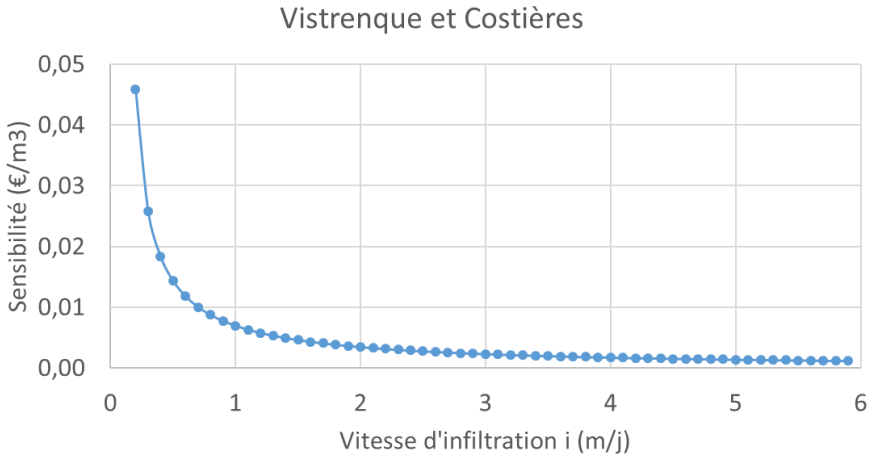


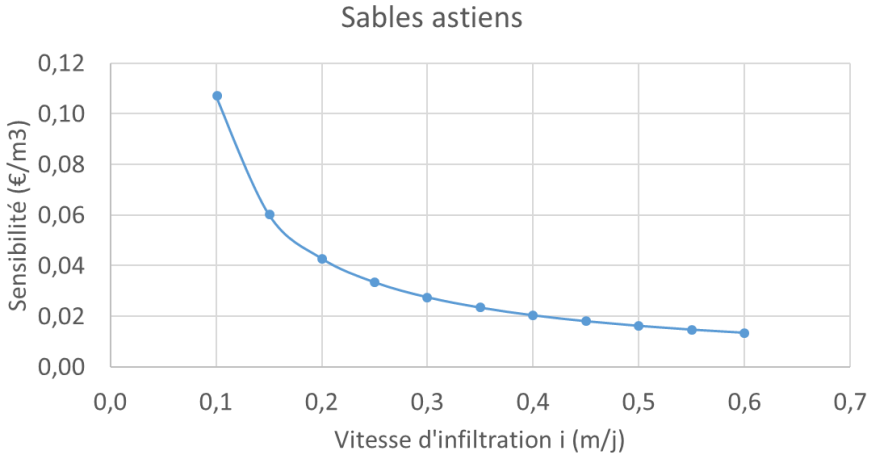


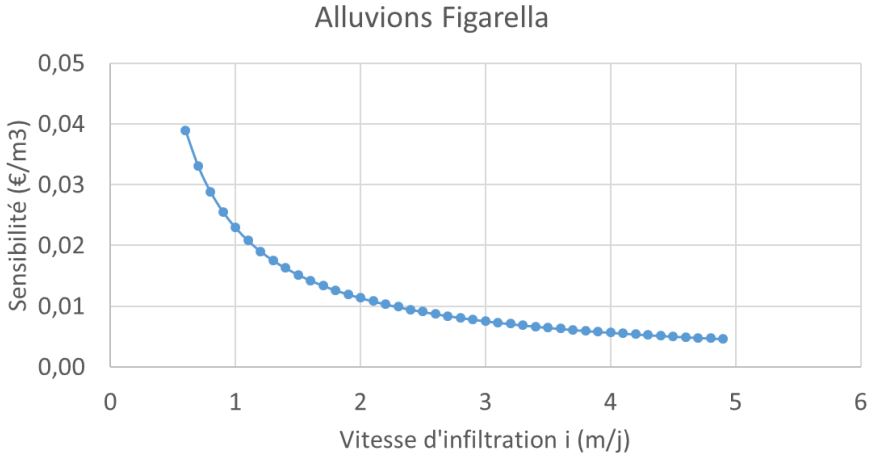


Sensibilité par rapport à la vitesse d'infiltration i (m/j)

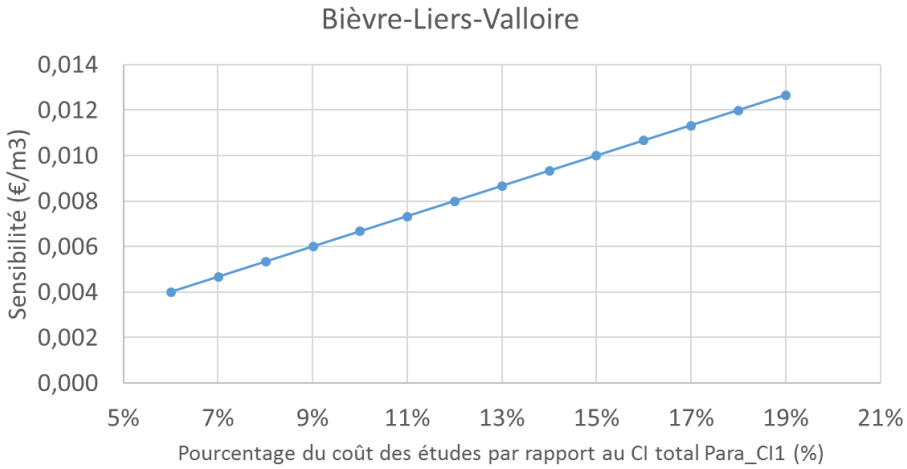


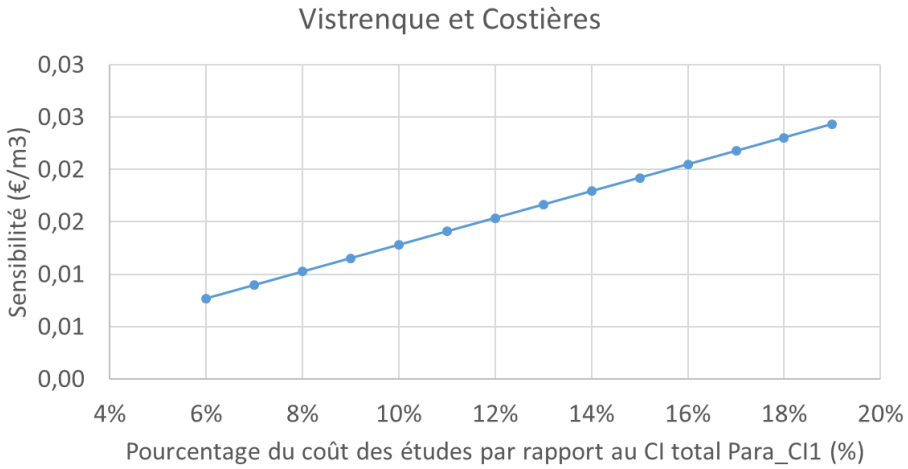


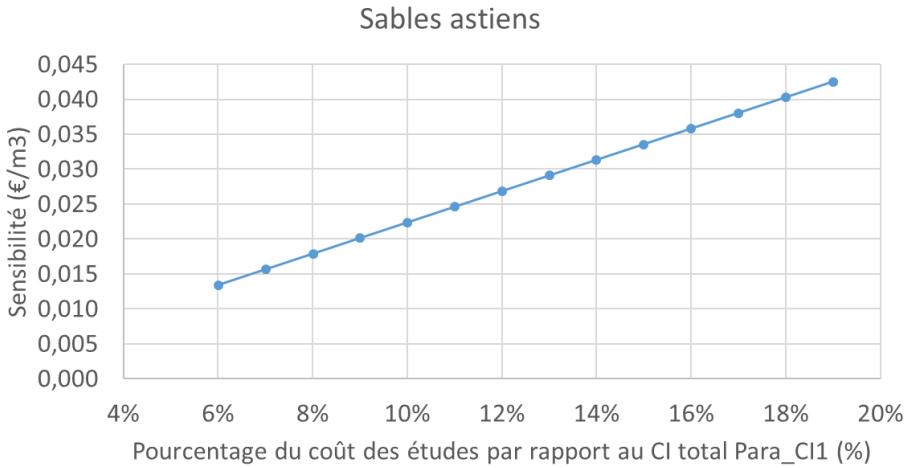


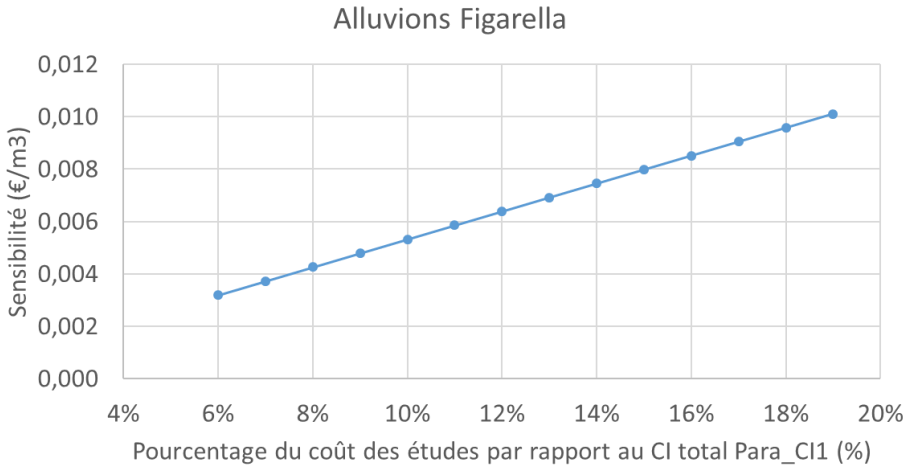


Sensibilité par rapport au pourcentage du coût des études par rapport au CI total Para_ CI1 (%)

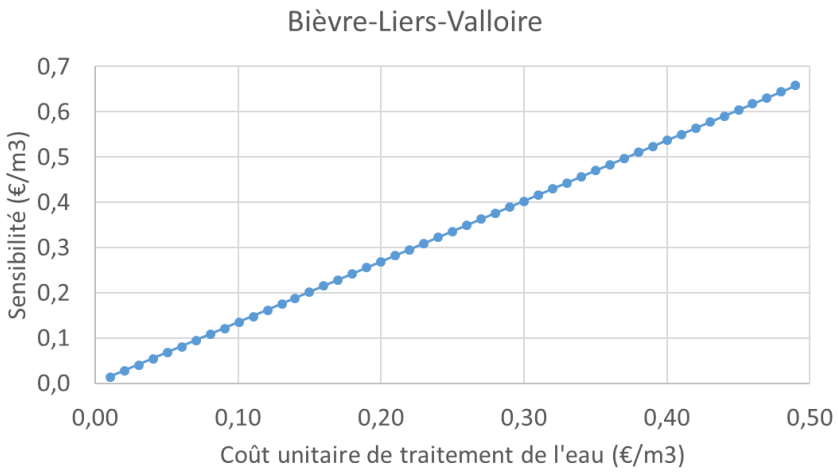


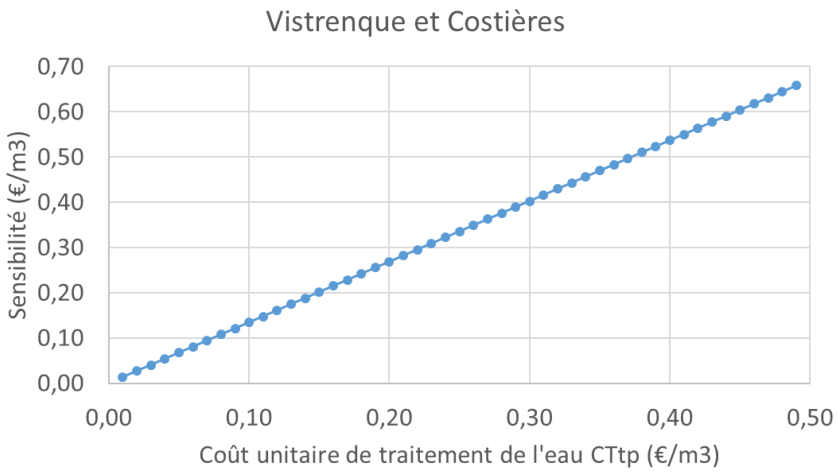


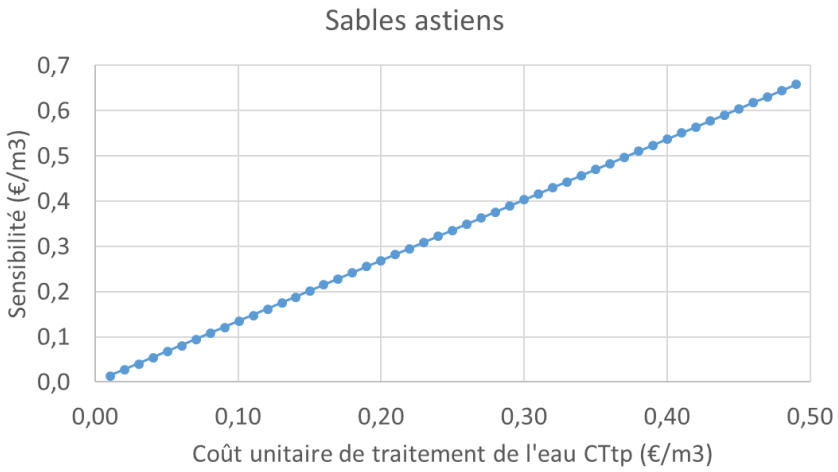


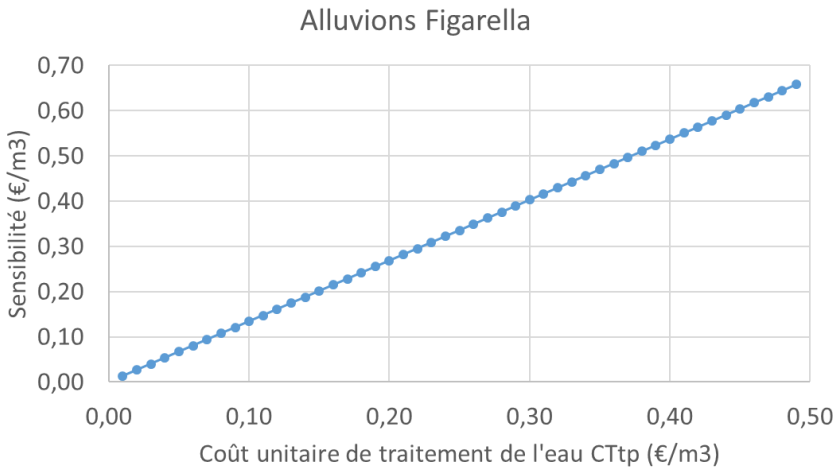


Sensibilité par rapport au coût unitaire de traitement de l'eau CTtp (€/m3)

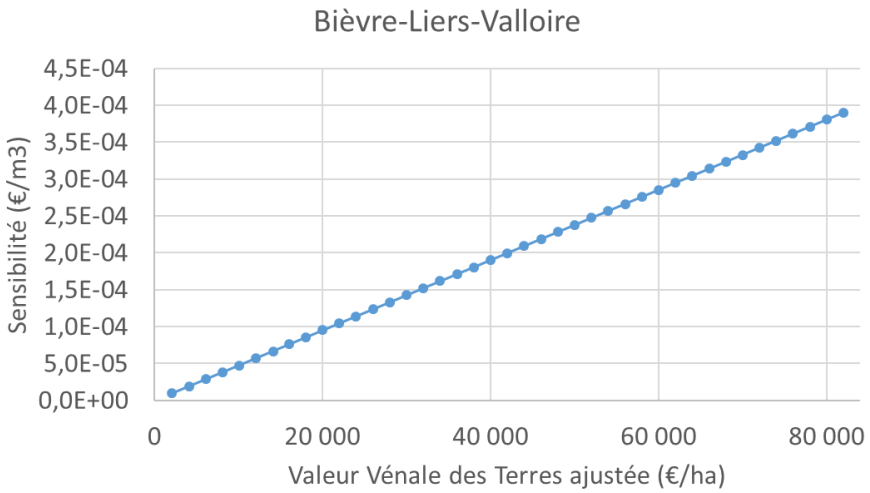


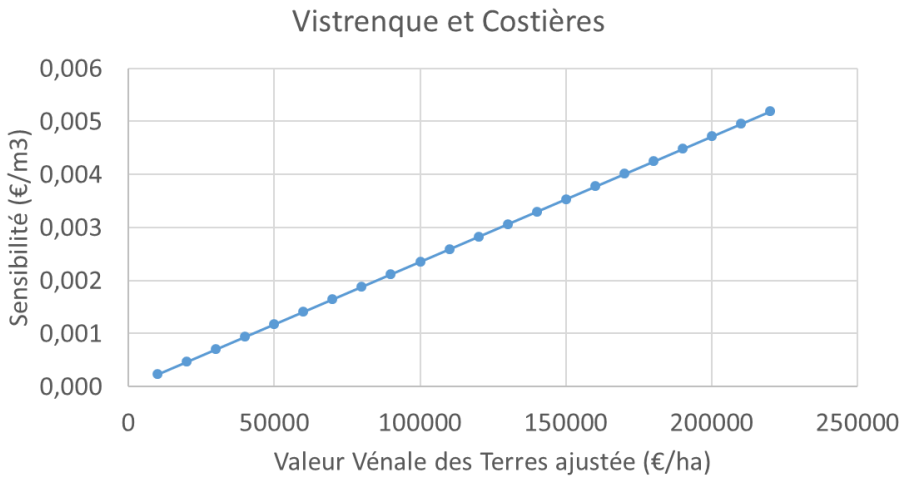


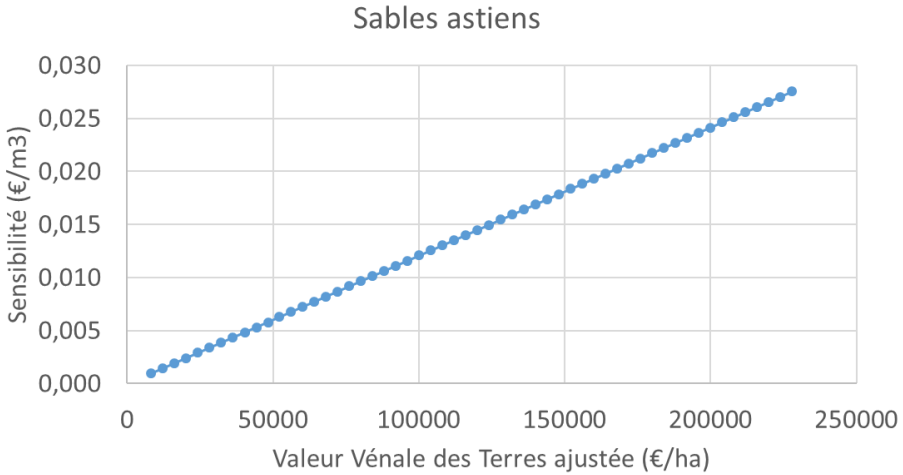


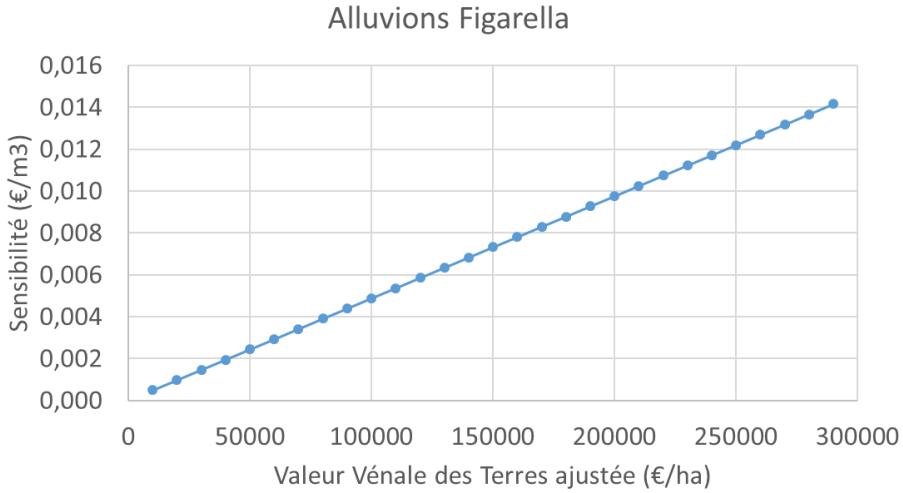


Sensibilité par rapport à la valeur vénale des terres ajustée VVT_aj (€/ha)

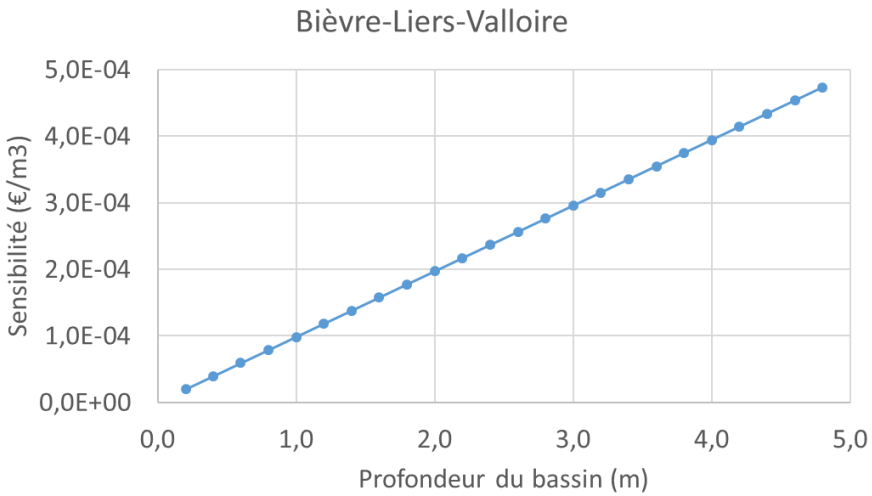


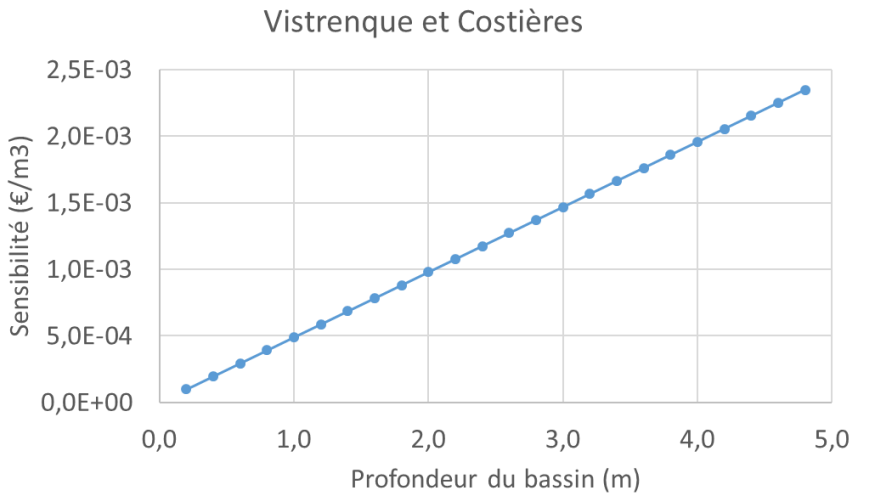


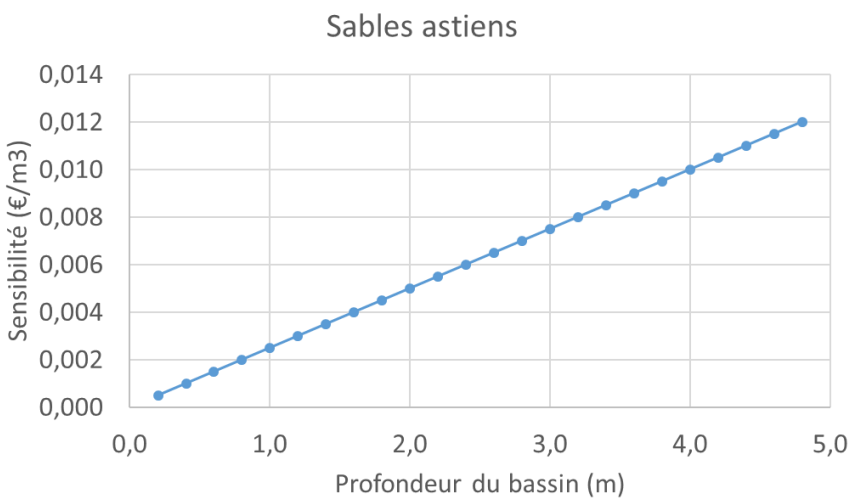


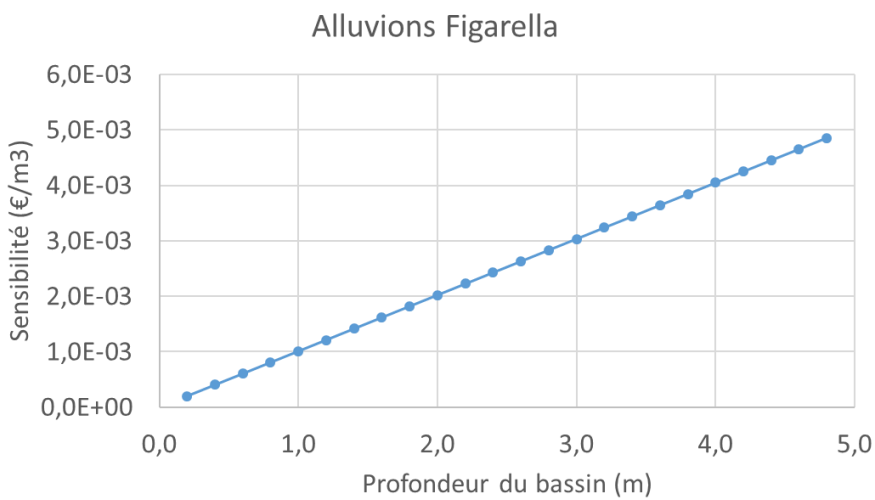


Sensibilité par rapport à la profondeur du bassin p (m)

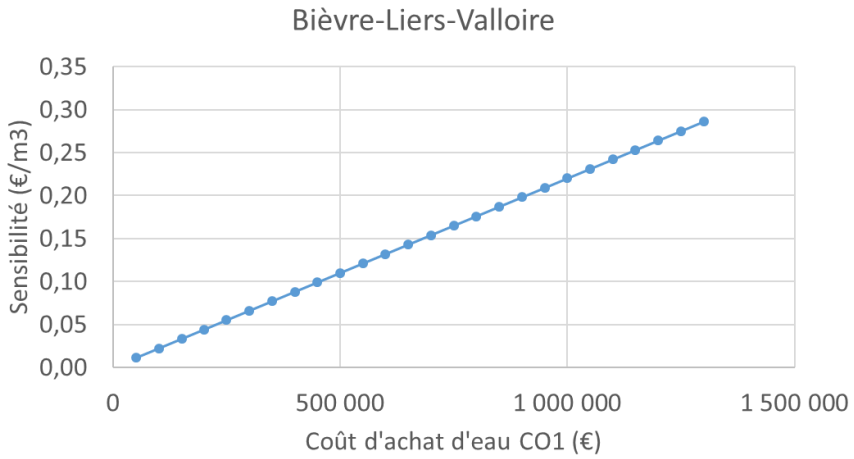


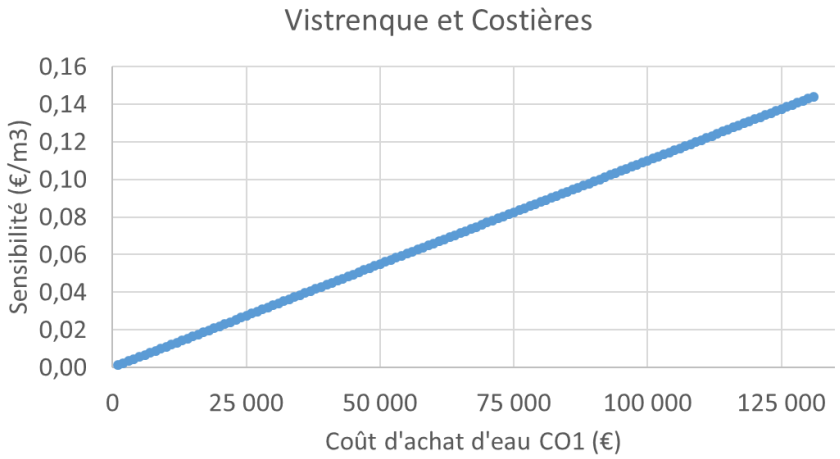


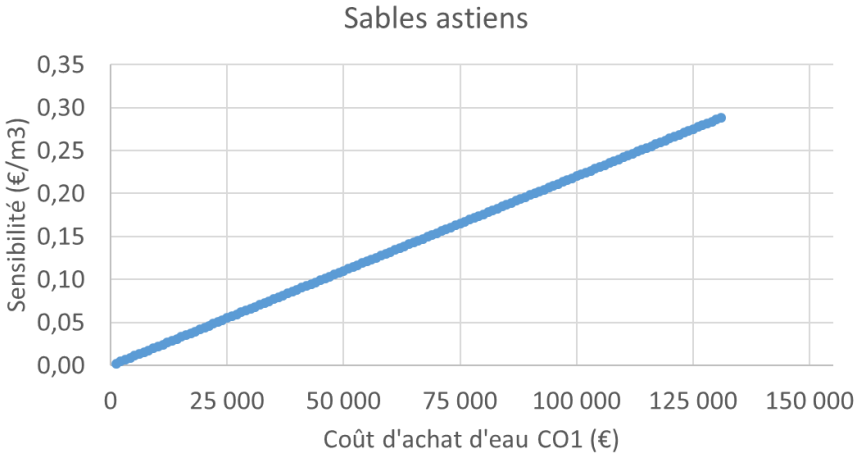


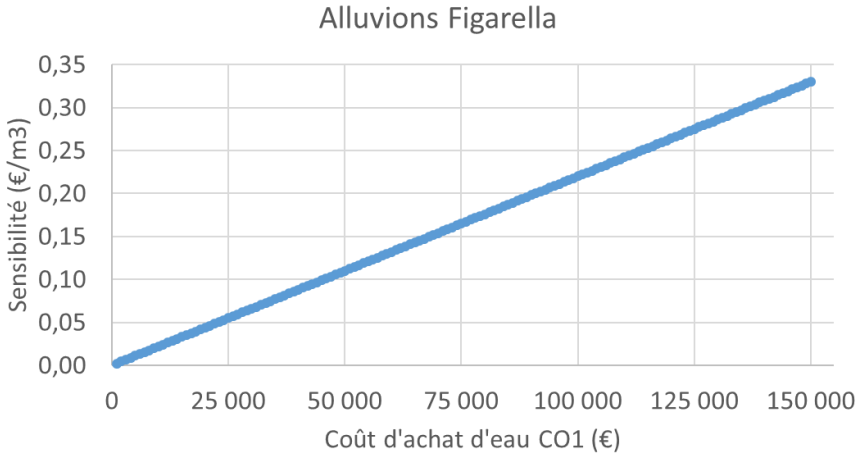


Sensibilité par rapport au coût d'achat d'eau CO1 (€)

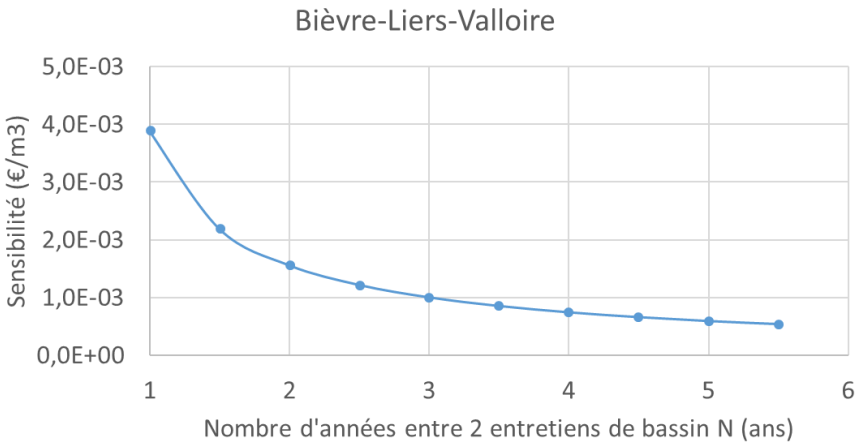


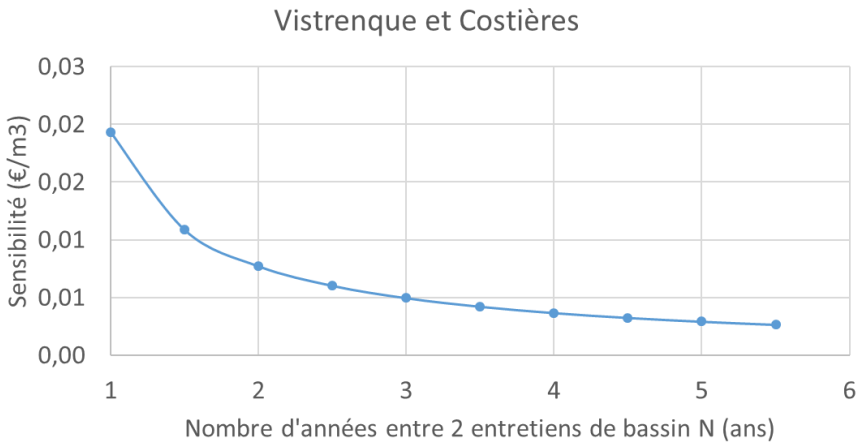


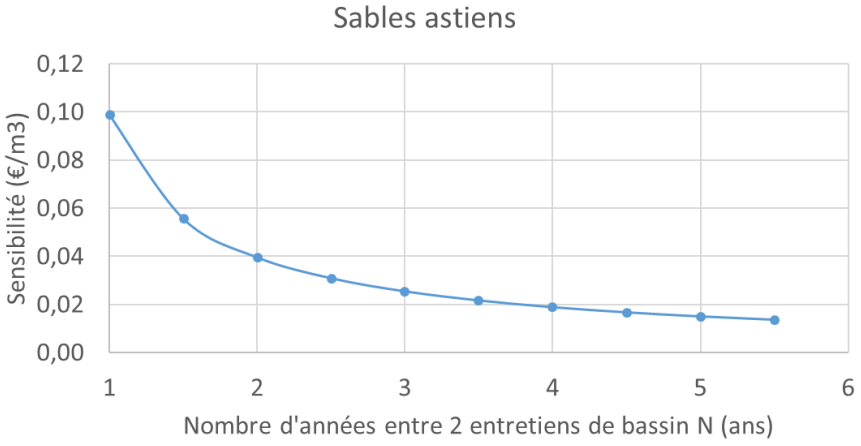


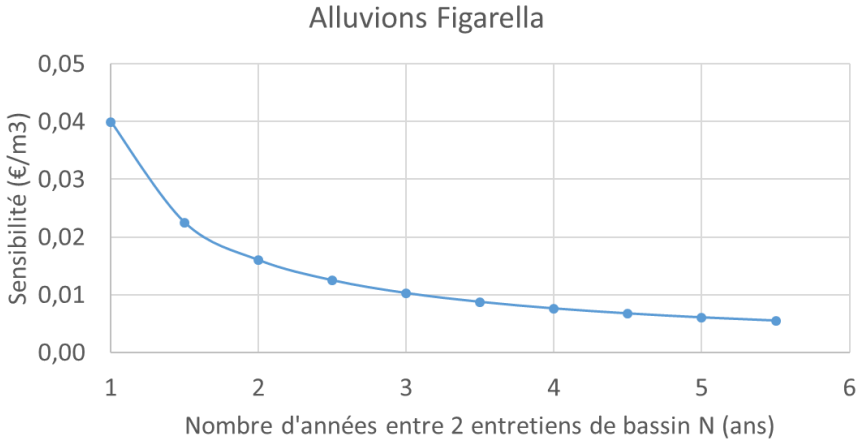


Sensibilité par rapport au nombre d'années entre 2 entretiens de bassin N (ans)

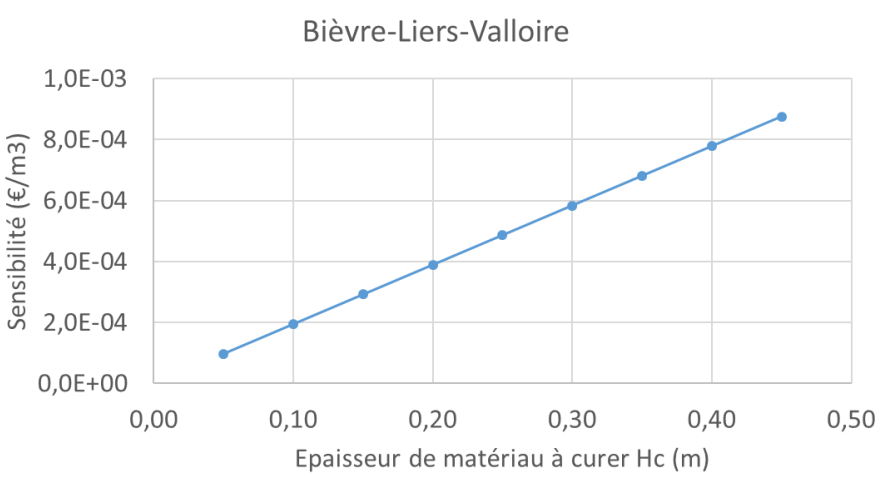


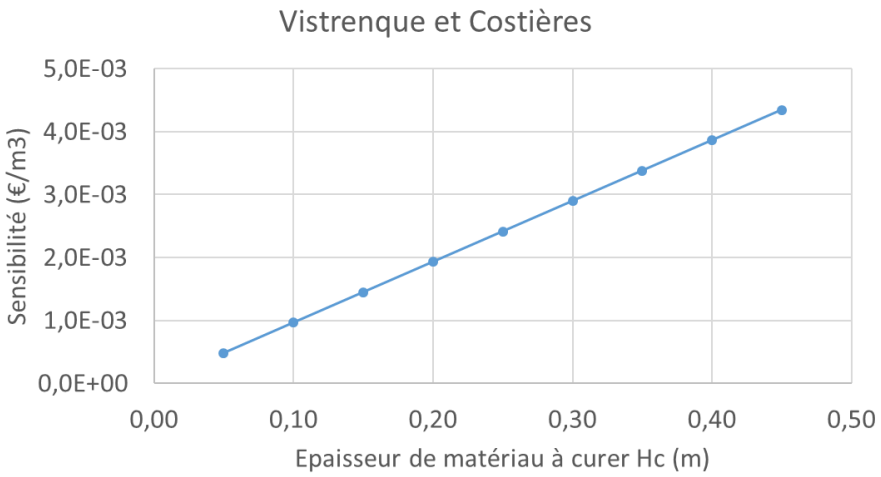


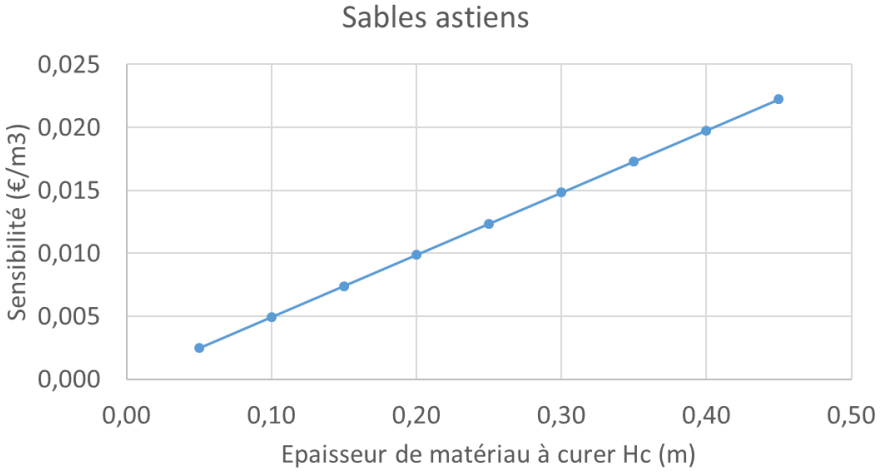


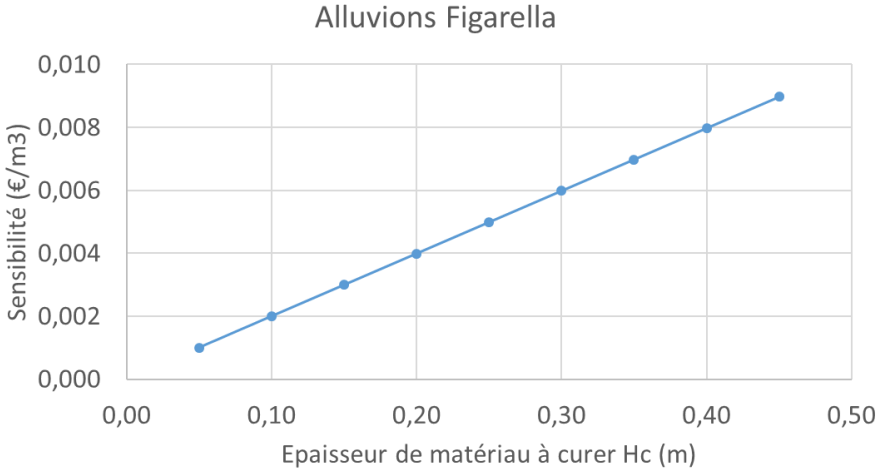


Sensibilité par rapport à l'épaisseur de matériau à curer Hc (m)

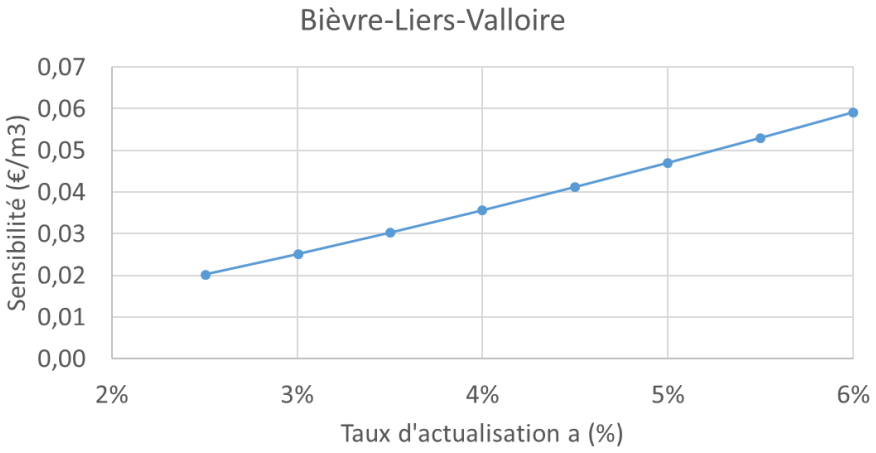


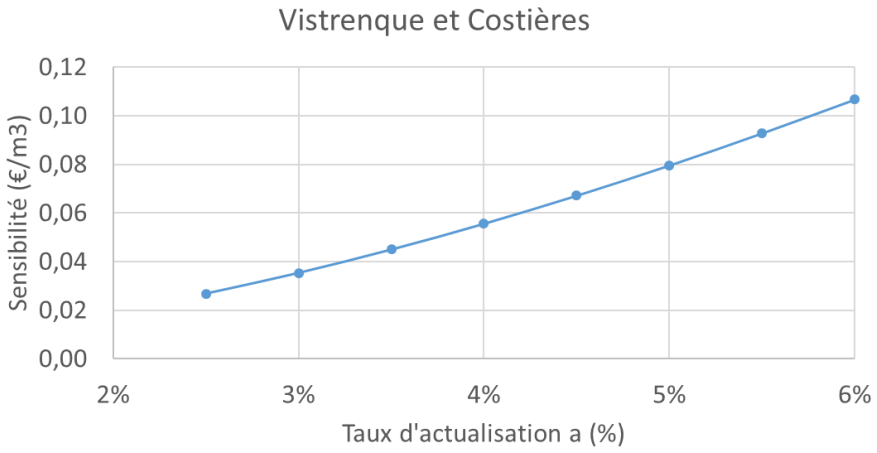


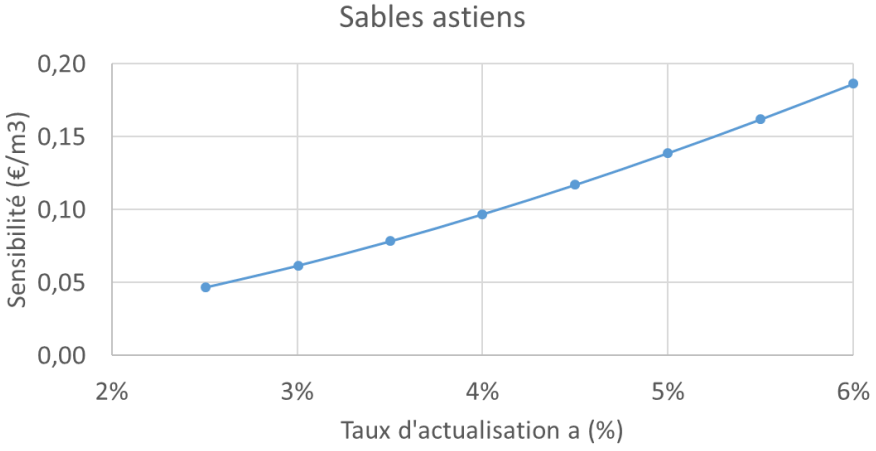


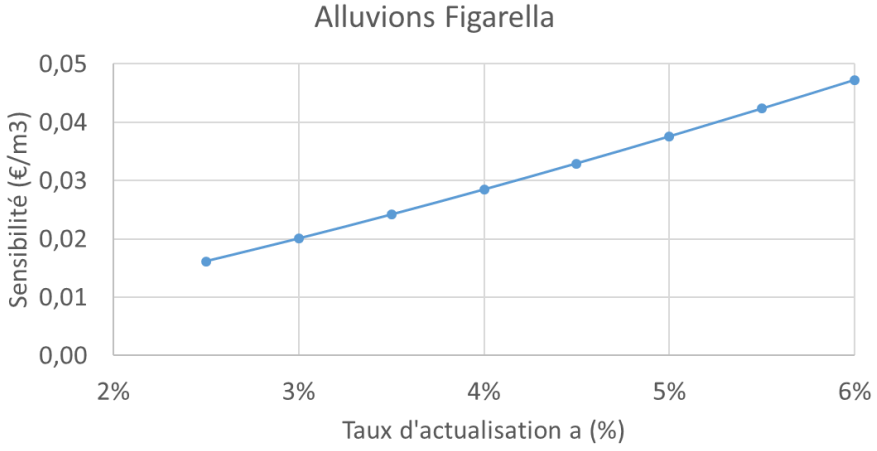


Sensibilité par rapport au taux d'actualisation a (%)

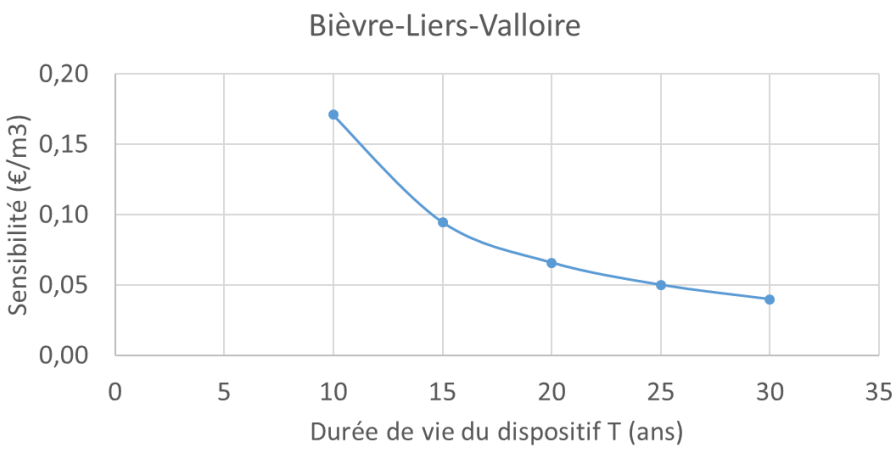


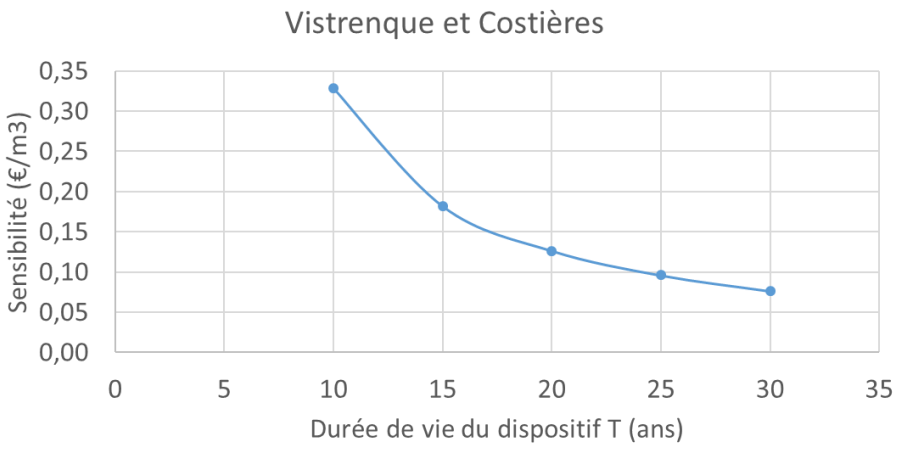


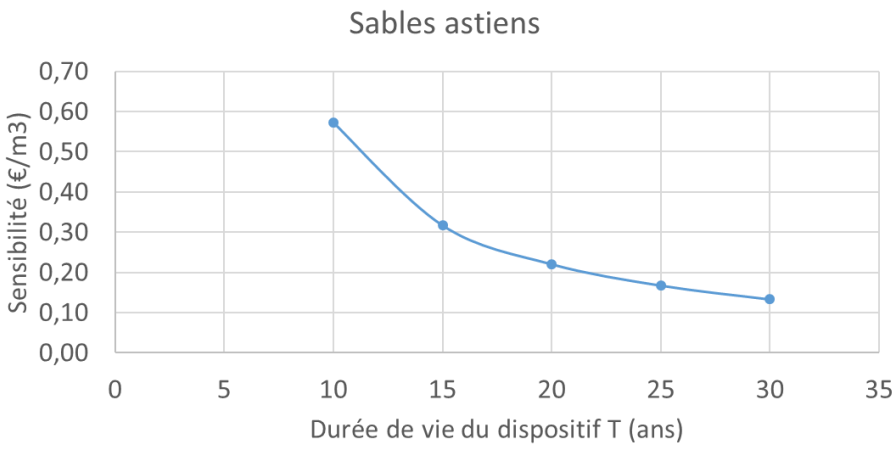


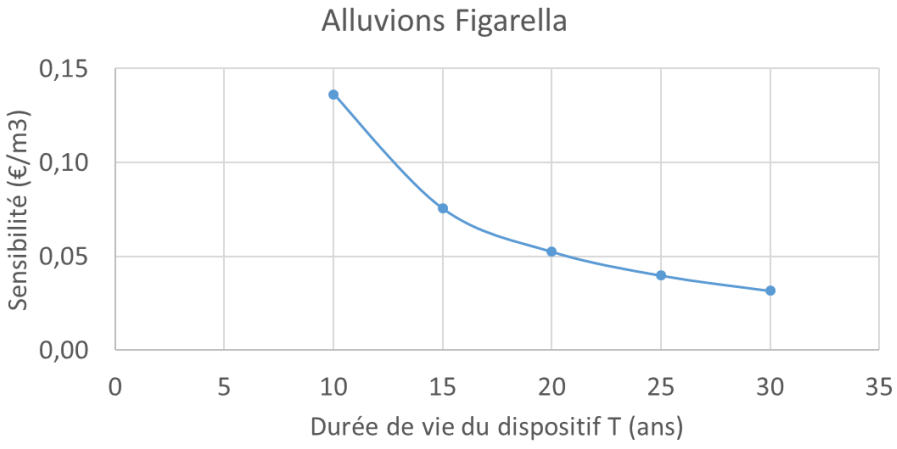


Sensibilité par rapport à la durée de vie du dispositif T (ans)









Annexe 16

Analyses de sensibilité : tableau synthétisant les résultats des analyses sur les 14 critères testés, pour les 4 territoires test

Paramètre	Unité	Utilisé pour	BLV	Vistrenque	Astien	Figarella
			Sensibilité (€/m3)	Sensibilité (€/m3)	Sensibilité (€/m3)	Sensibilité (€/m3)
Qr (débit de recharge)	Mm3/an	Dimensionnement	**-1**	**-1,2**	**-1**	**-0,3**
Nj	jour/an	Dimensionnement	-0,08	-0,04	**-0,2**	-0,01
D (distance ESU-RA)	m	Dimensionnement	**0,3**	**0,6**	**0,65**	0,03
H (dénivelé ESU-RA)	m	Dimensionnement	**0,16**	0,085	0,065	0,017
i (infiltration)	m/j	Dimensionnement	-0,009	-0,05	**-0,12**	-0,035
CI1_(%) (pourcentage du coût des études du CI_total)	%	CI1 (études préalables)	0,01	0,02	0,035	0,009
CTtp (Coût total de traitement primaire)	€/m3	CI4 et CO4 (prétraitement)	**0,65**	**0,65**	**0,65**	**0,65**
VVT_aj (valeur vénale des terrains), coefficient CLC considéré	€/ha	CI5 (foncier)	0,0004	0,005	0,025	0,014
p (Profondeur du bassin)	m	CI6 (bassin d'infiltration)	0,0005	0,0025	0,013	0,005
CO1_Abon (abonnement, redevance débit)	€/m3/h	CO1 (achat d'eau)	**0,3**	**0,15**	**0,3**	**0,35**
PxEau (redevance volume)	€/m3	CO1 (achat d'eau)				
N (nombre d'années entre 2 entretiens)	an	CO5 (entretien bassin)	-0,0045	-0,02	**-0,11**	-0,04
Hc (épaisseur du filtre colmatée)	m	CO5 (entretien bassin)	0,001	0,005	0,025	0,01
a (taux d'actualisation)	%	CMA et CRA	0,045	0,09	**0,15**	0,035
T (durée de vie)	an	CMA et CRA	**-0,13**	**-0,25**	**-0,45**	0,1

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction Eau Environnement, Procédés et Analyses
Unité NRE
1039, rue de Pinville
34400 – Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 90