



LES TECHNIQUES DE RECHARGE MAÎTRISÉE D'AQUIFÈRES

Des solutions envisageables
pour la constitution de ressources de substitution
dans le cadre des PTGE

SOMMAIRE

Avertissement	1
Préambule.....	1
1. Principes et conditions à remplir pour envisager un projet de recharge maîtrisée	3
1.1. Ce que dit le SDAGE Rhône-Méditerranée en matière de gestion quantitative.....	3
1.2. Les questions à poser au préalable avant d'envisager un projet de recharge maîtrisée dans un objectif de substitution de ressource	4
2. La recharge maîtrisée, une solution complémentaire ou alternative pour la gestion durable des ressources en eau de surface et souterraine	6
2.1. Présentation de la recharge maîtrisée et de ses usages.....	6
2.2. Exemples de mise en œuvre de recharge maîtrisée à différentes échelles et pour différents objectifs. 9	
2.2.1. Lutte contre la sécheresse en Arizona et en Californie et stockage d'eau souterrain pour l'irrigation	9
2.2.2. Hyères (83) : Un dispositif de recharge maîtrisée pour contrer les intrusions salines	11
2.2.3. Crépieux-Charmy (69) : accroître la capacité de l'aquifère pour l'alimentation en eau potable et le protéger de pollutions accidentelles	13
2.2.4. Deux projets non aboutis à titre d'illustration d'autres objectifs pouvant être assignés à la recharge maîtrisée	16
2.3. Quelles sont les conditions pour envisager la recharge maîtrisée sur un territoire ?	19
2.3.1. Conditions techniques	19
2.3.2. Dimensionnement d'un projet et éléments de coût de la recharge maîtrisée.....	22
2.3.3. Différentes étapes pour la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée	31
2.3.4. Etude de pré faisabilité d'un projet de recharge maîtrisée d'aquifère	32
2.3.5. Apprécier l'opportunité économique de la solution de recharge maîtrisée	35
3. Analyse spatiale multicritères sur l'aptitude des aquifères des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse à pouvoir accueillir des projets de recharge maîtrisée par bassins d'infiltration	35
4. Conclusions et perspectives	39
Table des illustrations	40
Références	42
ANNEXES.....	43
ANNEXE 1 – Estimation des surfaces de bassin d'infiltration nécessaires.	43
ANNEXE 2 - Cartes et commentaires sur la faisabilité de la recharge maîtrisée indirecte (par bassins d'infiltration) par région	44
1. Carte de faisabilité de la recharge maîtrisée - Région PACA.....	44
2. Carte de faisabilité de la recharge maîtrisée - Région Auvergne Rhône-Alpes	45
3. Carte de faisabilité de la recharge maîtrisée - Région Bourgogne Franche-Comté	46
4. Carte de faisabilité de la recharge maîtrisée - Région Occitanie	47

Avertissement

La présente note du secrétariat technique du SDAGE Rhône-Méditerranée apporte une information sur les techniques de réalimentation maîtrisée des aquifères et l'intérêt qu'elles peuvent présenter, comme moyen pour réduire les déséquilibres quantitatifs ou préserver les équilibres entre la ressource en eau et les besoins des usages et des milieux, lorsque le contexte hydrogéologique local s'y prête, et ainsi contribuer à l'atteinte des objectifs du SDAGE.

Ces techniques utilisent la capacité de stockage naturelle des aquifères. L'alimentation supplémentaire apportée aux nappes peut être mise à profit pour rétablir les équilibres quantitatifs des eaux souterraines. Elle peut aussi servir les usages anthropiques, en substitution des prélèvements directs dans les milieux aquatiques superficiels (cours d'eau, plans d'eau). Dans certains cas, l'eau stockée en plus dans l'aquifère peut aussi permettre d'accroître l'alimentation en eau des milieux aquatiques en lien avec les nappes, en périodes de basses eaux, renforçant ainsi leur résilience aux effets du changement climatique.

C'est donc bien dans un objectif d'appui à la mise en œuvre du SDAGE et à l'atteinte de ses objectifs en matière de bon état quantitatif des eaux souterraines et de bon état des cours d'eau, que le secrétariat technique a souhaité porter à connaissance des services de l'État et des acteurs de la politique de l'eau, l'existence, l'intérêt et les conditions techniques du recours à la recharge maîtrisée des aquifères, en complément des actions d'économies d'eau, dans le cadre concerté des projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE).

Lorsque les conditions locales font apparaître des potentialités de stockage dans les aquifères, le secrétariat technique du SDAGE invite donc à étudier le recours à cette technique, parmi l'ensemble des solutions envisageables, pour améliorer la gestion quantitative sur les territoires et pour renforcer la résilience des milieux naturels. La présente note n'a pas pour objectif de promouvoir cette technique si d'autres solutions, seules ou combinées, apparaissent mieux adaptées pour répondre aux orientations fondamentales du SDAGE Rhône-Méditerranée.

Préambule

Le bassin bénéficie d'une ressource en eau encore globalement abondante mais inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. Environ 70 territoires ont été confirmés en situation de déséquilibre ou d'équilibre précaire, entre la ressource disponible et les prélèvements par le SDAGE 2016-2021 et le SDAGE 2022-2027 : 55% d'entre eux concernent des eaux superficielles, 15% concernent les eaux souterraines et 30% concernent à la fois des eaux superficielles et souterraines. Sur ces territoires, des solutions sont à trouver pour rétablir les équilibres quantitatifs conformément aux objectifs de bon état des masses d'eau superficielles et souterraines tout en recherchant la satisfaction des principaux usages.

Au-delà des déséquilibres déjà actuellement constatés, les signes d'aggravation possible liée au changement climatique se multiplient. La tendance à des tensions accrues sur la ressource pour l'avenir est établie : les débits estivaux des cours d'eau ou la recharge pluviale des nappes diminueraient alors qu'à l'inverse, le réchauffement des températures et l'assèchement des sols conduiraient à des besoins croissants en eau. Ces éléments obligent à renforcer l'intégration de l'anticipation du changement climatique dans la gestion équilibrée de la ressource en eau.

Dans les zones en déséquilibre ou en équilibre fragile identifiés par le SDAGE, celui-ci demande (dans sa disposition 7-01) que soit mise en œuvre une démarche concertée d'**amélioration de la gestion quantitative** de l'eau, tenant compte des besoins des usages et des milieux, dans le cadre de **plans territoriaux de gestion de l'eau (PTGE)** pour définir et mettre en œuvre les actions **de partage de la ressource** et d'**économies d'eau, en favorisant aussi la désimperméabilisation et l'infiltration des eaux**. Le SDAGE (disposition 7-04) invite aussi les acteurs des autres territoires à engager des démarches de PTGE pour anticiper les effets du changement climatique et les risques de tension future sur la ressource.

Lorsque les actions de réduction des besoins (économies d'eau) et de meilleur partage ne sont pas suffisantes pour permettre le retour à l'équilibre, des **solutions de substitution** des prélèvements peuvent être envisagées à partir du **transfert d'eau** depuis d'autres bassins versants ou nappes non déficitaires, ou par la création de **retenues de stockage**.

Une solution, peu explorée jusqu'à présent, consiste dans la **recharge dite artificielle ou maîtrisée d'aquifères** qui consiste à **utiliser la capacité naturelle de stockage d'eau de certains aquifères** pour constituer **des réserves supplémentaires en sous-sol** à partir de l'infiltration maîtrisée d'une **eau prélevée** dans le milieu superficiel (cours d'eau ou plan d'eau) **en période d'abondance**. Le volume accru de ressource disponible constitué est alors utilisable en période de basses eaux pour substituer certains prélèvements affectant les écoulements de surface ou pour restaurer l'état quantitatif des eaux souterraines.

La recharge maîtrisée peut être employée comme solution de substitution dans les PTGE

Ce procédé peut être aussi utilisé pour d'autres objectifs, comme la **protection contre les intrusions salines en nappe littorale**, la **création de barrières hydrauliques** par exemple en cas de pollution du cours d'eau lorsqu'on prélève dans sa nappe d'accompagnement, le **soutien du débit de sources ou de cours d'eau drainant l'aquifère rechargé**, ou encore **l'amélioration des apports d'eau de nappe aux zones humides**.

Contrairement au stockage d'eau en surface par des retenues, les dispositifs de recharge maîtrisée par bassins d'infiltration nécessitent des surfaces d'infiltration qui restent modestes, ce qui limite les pertes par évaporation. Par ailleurs, il n'y a pas lieu de modifier l'occupation des sols au droit de la nappe rechargée et les eaux infiltrées bénéficient d'une épuration naturelle lors de leur transfert en profondeur (particulièrement vis-à-vis des micro-organismes). L'eau injectée, dont la qualité doit être compatible avec les objectifs de qualité et d'état des eaux souterraines, est généralement prélevée localement dans les cours d'eau **lorsque la ressource est abondante** (hautes eaux) afin de **ne pas impacter le fonctionnement des écosystèmes aquatiques**.

Cette technique n'est cependant pas adaptée à tous les territoires. Il faut en effet être en présence à la fois, d'un aquifère susceptible de pouvoir assurer le stockage d'une quantité d'eau suffisante et dans la durée pour que sa recharge présente un intérêt, et d'un cours d'eau situé à proximité de l'aquifère à recharger, en capacité de fournir, à certaines périodes de l'année, le volume et la qualité d'eau nécessaire pour le stockage envisagé.

Ce document vise plusieurs objectifs :

- 1- En premier lieu, le document rappelle les principes d'intégration des réflexions autour de tels projets dans le cadre des PTGE, notamment sur les secteurs en déséquilibres ou équilibres précaires identifiés par le SDAGE, et en particulier, les conditions de leur contribution à l'objectif de gestion équilibrée de la ressource en complément des actions d'économie d'eau et de rationalisation des usages.
- 2- Dans un second temps, le document présente les principes de la recharge maîtrisée d'aquifère et les différentes techniques utilisées en abordant ses diverses utilisations possibles. Il indique les prérequis nécessaires pour pouvoir envisager l'implantation d'un dispositif sur un territoire en apportant des éléments d'information sur la conception, le dimensionnement et les coûts. Il expose par la suite les étapes à franchir pour valider la faisabilité de la mise en place d'un tel projet.
- 3- Enfin, le document présente les résultats d'une analyse multicritères sur l'aptitude des aquifères du bassin Rhône-Méditerranée à pouvoir accueillir des projets de recharge maîtrisée. Les résultats sont rapportés par région et appellent, par la suite, un examen plus en détail de la possibilité d'envisager le recours à ce type de solution dans le cadre des PTGE, notamment sur les sous-bassins et aquifères identifiés par le SDAGE Rhône-Méditerranée comme en déséquilibre quantitatif ou en équilibre précaire.

Cette note s'adresse plus particulièrement aux services de l'État et ses établissements publics (agence de l'eau et OFB) et aux structures de gestion des milieux aquatiques, investis sur la gestion quantitative de la ressource en eau. Elle s'appuie en grande partie sur les résultats d'une étude conduite par le BRGM avec le soutien de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse portant sur la faisabilité de la mise en œuvre des solutions de recharge maîtrisée d'aquifère à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée.

1. Principes et conditions à remplir pour envisager un projet de recharge maîtrisée

1.1. Ce que dit le SDAGE Rhône-Méditerranée en matière de gestion quantitative

Les préconisations de gestion quantitative des aquifères sont détaillées dans l'orientation fondamentale n°7 du SDAGE Rhône-Méditerranée. Afin d'atteindre et de préserver l'équilibre quantitatif des masses d'eau, le SDAGE intègre des mesures de maîtrise de la demande et de partage de l'eau dans le cadre des PTGE, concertés et multi-usages, à l'échelle des bassins versants.

Sur les secteurs d'ores et déjà en déséquilibre ou en équilibre fragile, ces projets doivent en particulier définir les volumes maximaux prélevables pour résorber le déséquilibre constaté ou préserver l'équilibre, puis un plan d'actions répartissant, entre les usages, ces volumes prélevables tout en respectant les besoins des milieux, en privilégiant les économies d'eau et l'optimisation des infrastructures existantes. Le SDAGE appelle en outre à anticiper les effets du changement climatique dans le cadre de ces PTGE, en développant les démarches prospectives sur l'évolution des ressources et des besoins en eau des usages.

En dehors des secteurs actuellement en déséquilibre, si les signes climatiques le justifient au regard des tendances évolutives observées sur le territoire ou de projections futures, le SDAGE invite également les acteurs locaux à développer une démarche de projet de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) afin d'anticiper les tensions futures sur la gestion quantitative de l'eau et maintenir dans la durée un équilibre entre besoins et ressources disponibles en respectant le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

Lorsque des mesures de meilleure gestion de la ressource ne s'avèrent pas suffisantes pour résorber les déséquilibres d'ores et déjà constatés sur certaines masses d'eau ou préserver l'équilibre entre la ressource et les besoins des usages et des milieux, le recours à des ressources de substitution peut s'envisager pour réduire les pressions sur les ressources en tension, en veillant à ne pas accroître la vulnérabilité d'autres milieux.

Les mesures de substitution consistent à remplacer le prélèvement sur une ressource en tension par un prélèvement dans une autre ressource qui ne l'est pas, sans mettre en péril les équilibres hydrologiques, biologiques et morphologiques du milieu aquatique prélevé. Parmi ces mesures de substitution, les solutions les plus utilisées consistent, en fonction des contextes, en la mise en place de retenues ou de réservoirs de stockage d'eau constitués en période de hautes eaux pour pouvoir en bénéficier de manière décalée dans le temps (désaisonnalisation), de report des prélèvements dans une nappe plutôt que dans le cours d'eau ou encore de transfert d'eau depuis un autre bassin non déficitaire. La recharge maîtrisée d'aquifère peut également faire partie de ces solutions pour accroître les volumes disponibles en nappe et permettre le report de certains prélèvements posant problème vers la nappe rechargée. En effet, la dynamique des écoulements dans les nappes est plus lente que dans les cours d'eau et la recharge permet donc de constituer un stock d'eau qui pourra être sollicité de façon décalée dans le temps.

Les besoins en ressources de substitution doivent être évalués dans le cadre d'un PTGE au regard des économies d'eau réalisables, des mesures prises en termes de partage de l'eau et des marges d'optimisation des ouvrages de stockages et transferts existants.

L'objectif visé est la gestion équilibrée et durable de la ressource en eau, dans la durée, en combinant les différentes actions afin d'assurer la sécurité et la santé publique et de répondre aux exigences environnementales et aux besoins économiques, en tenant compte des effets du changement climatique.

Les projets de substitution, qu'il s'agisse d'aménagement de stockages superficiels, de transfert et de recharge maîtrisée de nappe, ne doivent pas remettre en cause l'objectif de non dégradation de l'état des masses d'eau conformément aux exigences de la DCE déclinées en particulier dans l'orientation fondamentale n°2 du SDAGE Rhône-Méditerranée.

Enfin, une attention particulière doit être portée, dans le cadre de l'élaboration des PTGE, à la viabilité des projets et à leur efficacité économique sur le long terme, en référence notamment aux effets attendus du changement climatique sur la disponibilité de la ressource.

1.2. Les questions à poser au préalable avant d'envisager un projet de recharge maîtrisée dans un objectif de substitution de ressource

L'arbre décisionnel qui suit vise à guider le lecteur dans ses prises de décision par rapport à l'intérêt d'étudier les solutions de recharge maîtrisée sur le territoire dont il a la gestion. La réponse aux questions de l'arbre de décision pourra se référer soit à la situation actuelle, soit à des situations susceptibles d'advenir.

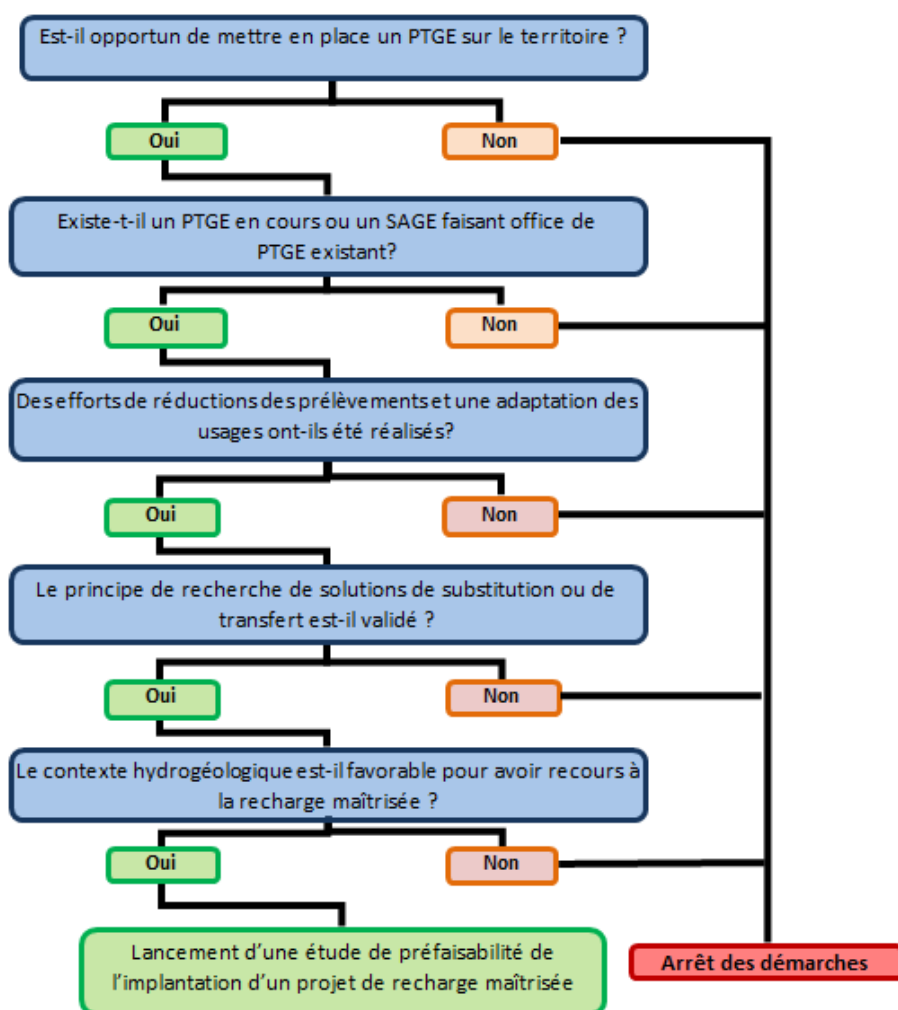


Figure 1 - Arbre de décision proposé pour évaluer l'intérêt d'étudier la mise en place d'une solution de recharge maîtrisée d'aquifères dans le cadre d'un PTGE.

2. La recharge maîtrisée, une solution complémentaire ou alternative pour la gestion durable des ressources en eau de surface et souterraine

2.1. Présentation de la recharge maîtrisée et de ses usages

La recharge ou la réalimentation maîtrisée (RM) d'un aquifère consiste à introduire, de manière volontaire et maîtrisée, de l'eau dans une nappe pour augmenter sa recharge naturelle, pour une utilisation ultérieure ou un bénéfice environnemental.

Ce procédé (en anglais Managed Aquifer Recharge : MAR), déjà particulièrement développé dans différents pays devant faire face à des situations de stress hydriques récurrentes (Australie, USA, Israël, Afrique du Sud...), est une solution complémentaire et temporaire ou parfois alternative aux ouvrages de retenues superficielles dès lors qu'un stockage en aquifère peut être envisagé et que les conditions de la recharge et du stockage décrites dans la partie 2.3 de la présente note sont adaptées.

En France, la recharge maîtrisée est principalement utilisée à des fins d'amélioration des capacités des nappes fortement sollicitées pour l'alimentation en eau potable, mais la méthode peut être envisagée pour répondre à d'autres besoins : restauration ou maintien du bon état quantitatif et/ou qualitatif d'une masse d'eau, lutte contre une intrusion saline dans un aquifère côtier, soutien indirect du débit d'étiage d'un cours d'eau et/ou de sources l'alimentant, maintien ou restauration des milieux humides.

La constitution de stocks souterrains par la recharge maîtrisée d'aquifère comme pour les stockages superficiels, permet de désaisonnaliser les prélèvements dans les cours d'eaux ou nappes, en les effectuant en dehors des périodes de basses eaux, de manière à ne pas impacter le fonctionnement des écosystèmes et préserver les habitats. Toutefois, la recharge maîtrisée présente souvent des avantages environnementaux supérieurs aux stockages superficiels par des retenues d'eau, listés dans le tableau suivant [Tableau 1] :

Propriétés	Retenue de surface	Stockage en aquifère
Superficie de terrain requise	Élevée	Très faible
Compatibilité d'implantation / présence zones urbaines et aménagements existants	Faible	Envisageable
Pertes du stock constitué par fuites aval ou latérales	Aucunes à faibles	Modérées à élevées
Pertes par évaporation	Modérées	Nulles ou négligeables
Risque de développement d'algues toxiques / moustiques	Modéré	Faible
Épuration des eaux stockées et élimination des micro-organismes	Faible	Significative
Risque de pollution des eaux stockées	Modéré	Aucun à modéré
Coûts des études préalables	Elevés	Modérés
Coûts d'investissements	Elevés	Faibles à modérés
Coûts énergétiques (construction)	Elevés	Faible
Coûts énergétiques (fonctionnement)	Faibles à modérés	Modérés

Tableau 1- Comparaison des propriétés des solutions de stockage d'eau en surface avec celles de stockage en aquifère. Adaptation d'après Dillon et al., 2009.¹

Les eaux injectées peuvent être selon les pays et leur législation, des eaux de surface, des eaux usées traitées², des eaux souterraines, des eaux pluviales ou issues de dessalement d'eau de mer.

¹ Le type de stockage le plus avantageux est coloré en vert.

² En France, l'ANSES, dans son autosaisine de 2016 sur les « Risques sanitaires liés à la recharge artificielle de nappes d'eau souterraine », recommande de veiller à ne pas altérer la qualité de la nappe souterraine rechargée et que la qualité de l'eau de recharge soit de qualité supérieure ou au moins équivalente à l'eau de la nappe.

Différentes techniques de recharge maîtrisée peuvent être distinguées [Figure 2].

- La **recharge maîtrisée indirecte** par bassin d'infiltration est la plus répandue dans le monde. Cette technique consiste à faire percoler un volume d'eau depuis la surface jusqu'à la nappe, au travers de la zone non saturée. Généralement utilisée pour recharger une nappe libre située à faible profondeur, elle présente l'avantage de permettre la filtration et l'épuration de l'eau lors de sa percolation. L'infiltration se fait principalement via des bassins d'infiltration, des tranchées et puits d'infiltration et parfois des barrages, digues, carrières de sables ou de graviers peuvent être utilisées. L'épandage de crue ou la sur-irrigation sur les terres agricoles peuvent également être pris en compte comme étant de la recharge indirecte.
- La **recharge maîtrisée directe** consiste à injecter de l'eau directement dans la nappe par l'intermédiaire d'un forage pour la stocker. Cette technique est essentiellement utilisée pour recharger des nappes captives ou semi-captives (l'injection doit alors se faire sous pression), mais peut aussi être intéressante pour des nappes libres dont la surface piézométrique est située à grande profondeur ou lorsque la surface disponible au sol est trop limitée pour mettre en œuvre une technique de recharge indirecte. Différentes techniques existent : l'ASR (Aquifer Storage and Recovery) où l'eau est injectée par l'intermédiaire d'un puits et captée en différé à partir du même puits, l'ASTR (Aquifer Storage, Transfert and Recovery) où l'eau est injectée dans un forage et récupérée au niveau d'un second forage situé à quelques centaines de mètres minimum du point d'injection.

Lors de l'utilisation de ces techniques de recharge directe, on se heurte classiquement, au bout de durées d'utilisation plus ou moins longues, à un colmatage des puits ou forages d'injection ce qui nécessite un traitement régulier des ouvrages. Par ailleurs l'injection directe de l'eau de recharge dans l'aquifère ne permet pas son épuration naturelle comme dans le cas d'une percolation depuis la surface.

- Par ailleurs, en marge des techniques de recharge maîtrisée proprement dite, certaines actions peuvent faciliter la recharge de la nappe par un cours d'eau, c'est le cas par exemple de la **filtration sur berge** qui consiste à exploiter un ou plusieurs forages à proximité d'un cours d'eau afin de créer une dépression engendrant un transfert depuis le cours d'eau. On peut noter que cette technique permet aussi d'obtenir une épuration de l'eau du cours d'eau lors de son transfert au travers des berges ou du fond de son lit. Par ailleurs, de simples **curages** de canaux lors d'entretiens favorisent l'infiltration de l'eau dans les berges en limitant leur colmatage par des particules fines et peuvent contribuer à des effets de recharge augmentée de la nappe d'accompagnement. D'une manière similaire, le fait de **rehausser le niveau d'un cours d'eau** (restauration morphologique, construction de seuils, ou reconstitution d'un lit sédimentaire par exemple) peut contribuer à alimenter davantage la nappe. On souligne toutefois que certaines de ces techniques peuvent avoir des conséquences négatives sur le fonctionnement et l'état des milieux aquatiques, comme par exemple la mise en place de seuils qui peuvent aller à l'encontre du rétablissement de la continuité écologique.
- De même, la restauration de l'infiltration naturelle qui prévalait sur certains ruisseaux recalibrés ou repris par des fossés, la désimperméabilisation et l'**infiltration des eaux pluviales** issues de surface imperméabilisées (comme les chaussées), peuvent contribuer à une recharge améliorée des aquifères.

Les incidences environnementales de ces solutions techniques sont à considérer au cas par cas dans une recherche d'évitement d'impacts, dans le cadre des études en amont du choix des solutions de substitution les plus adaptées aux territoires.

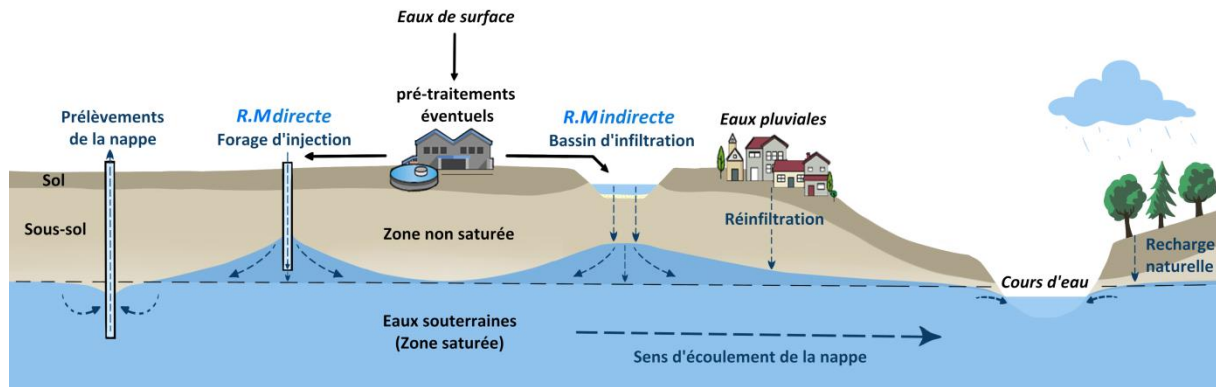


Figure 2 - Schéma conceptuel du dispositif de recharge maîtrisée directe et indirecte

La recharge maîtrisée d'aquifères peut avoir plusieurs finalités :

Pour les eaux souterraines :

- **assurer un stockage d'eau supplémentaire** : en étant comparable à un stockage dans un réservoir, la recharge maîtrisée permet d'accroître le stock en eau souterraine pour autoriser des volumes de prélèvements supplémentaires ;
- **restaurer ou maintenir le bon état quantitatif d'une masse d'eau** : l'apport d'eau permet de pallier un déséquilibre de la ressource entre prélèvements et recharge naturelle et peut également permettre de stabiliser des niveaux piézométriques initialement en baisse ;
- **réduire les impacts du changement climatique** : dans la perspective d'une évolution défavorable de la recharge naturelle des aquifères, la recharge maîtrisée peut permettre dans certains cas de compenser ces baisses de recharge, à condition que les apports des précipitations (pluviales ou nivales) sur les bassins versants restent suffisants pour alimenter les cours d'eau à partir desquels il est envisagé d'organiser la recharge des aquifères ;
- **contrer une intrusion saline dans un aquifère côtier** : l'introduction d'une charge d'eau douce supplémentaire dans l'aquifère permet de repousser les eaux salées vers la mer ;
- **améliorer ou restaurer la qualité des eaux d'une nappe** : dans le cas de nappes contaminées, l'introduction d'eau de meilleure qualité peut permettre dans certaines conditions d'accroître le renouvellement de la ressource et par dilution d'abattre les concentrations en éléments polluants. On peut noter également l'utilisation de la recharge maîtrisée pour créer une « barrière hydraulique » en maintenant une charge de nappe haute entre une arrivée d'eau susceptible de subir des pollutions accidentelles - par exemple le long d'un cours d'eau - et un champ captant avec une forte exigence de qualité sur les eaux prélevées.

Pour les milieux aquatiques superficiels :

- **soutenir indirectement le débit d'étiage d'un cours d'eau et/ou de sources l'alimentant** : il s'agit d'augmenter artificiellement la recharge de nappes dont les flux alimentent les cours d'eau, pour bénéficier de manière déphasée d'un volume accru de ces flux et ainsi accroître le débit du cours d'eau en période critique (le cas échéant, ce procédé peut permettre également de contrôler localement la hausse des températures de l'eau) ;
- **améliorer la situation piézométrique d'une nappe, favorable au maintien ou à la restauration de zones humides** : en rehaussant les niveaux piézométriques, la recharge maîtrisée peut contribuer à la préservation de zones humides ou à l'augmentation des flux sortant de l'aquifère au profit des zones humides.

2.2. Exemples de mise en œuvre de recharge maîtrisée à différentes échelles et pour différents objectifs

La partie suivante présente des exemples de mise en œuvre de solutions de recharge maîtrisée avec des finalités variées. Les différents cas exposés montrent que la recharge maîtrisée peut être une solution intéressante à envisager dans certains contextes pour répondre aux objectifs des PTGE.

2.2.1. Lutte contre la sécheresse en Arizona et en Californie et stockage d'eau souterrain pour l'irrigation

De nombreux projets visant à augmenter la disponibilité de la ressource en eau par le stockage ou le transport de l'eau ont été réalisés dans les États de Californie et de l'Arizona [Figure 3].

Différents projets ont été développés afin de pallier les périodes de sécheresses, amplifiées par le changement climatique. En premier lieu, des réservoirs de stockage ont été construits afin de récupérer des eaux de surface lorsque la ressource est en excès. La construction de réservoirs a connu un point culminant du milieu à la fin du 20^{ème} siècle. Cependant la population a continué de s'accroître alors que la majorité des réservoirs étaient déjà implantés et occupaient les endroits les plus optimaux dans la plupart des régions. De nombreuses études se sont donc tournées vers les grands volumes d'eau stockés dans les aquifères. Toutefois, ces volumes se sont rapidement avérés insuffisants pour satisfaire les besoins d'exploitation, puisque les volumes prélevés dépassaient souvent les volumes rechargés naturellement. Des déficits majeurs en eau souterraine sont survenus (US High plains, California Central Valley, South Central Arizona) engendrant des situations de stress hydrique, avec des baisses de la piézométrie de 30 à plus de 60 m au cours du siècle, des affaissements du sol atteignant parfois 6 m et des pertes définitives d'une partie de leur capacité de stockage. Les transferts d'eau par canaux et conduites depuis des bassins de rétention et des retenues par barrages, sont largement utilisés, mais ne suffisent plus face aux demandes et les nappes sont fortement sollicitées malgré la réalisation de vastes projets comme le « Central Valley Project » (22 réservoirs, deux canaux principaux de 188 et 245 km respectivement) ou le « Central Arizona Project » incluant un pipeline de 542 km depuis le Colorado jusqu'à Phoenix et Tucson. Sur la période 2005-2015 par exemple, la piézométrie du « Tulare Basin » a diminué de 30 m.

Dans ce contexte où le stockage en surface est limité, mais où la ressource superficielle est abondante lors d'épisodes ponctuels de fortes précipitations, l'utilisation conjointe d'eaux souterraine et de surface (Conjonctive Use, C.U) et la recharge maîtrisée ont été développées, couplées à des modèles de gestion des eaux de surface et souterraines [Figure 5]. En Californie, la recharge maîtrisée s'effectue via des bassins d'infiltration (RM indirecte) ayant une épaisseur en eau variant de 0,5 à 1 m pour une surface cumulée totale d'environ 115 km². En Arizona, 69 bassins d'infiltration couvrant une surface de 44 km² environ sont recensés. Les rivières locales, les canaux et parfois les eaux usées, après traitement, sont utilisées pour la recharge. Ces dispositifs ont permis d'inverser les tendances piézométriques à la baisse en stockant pour plusieurs années de l'eau durant les périodes humides [Figure 4]. (Scanlon *et al*, 2016).

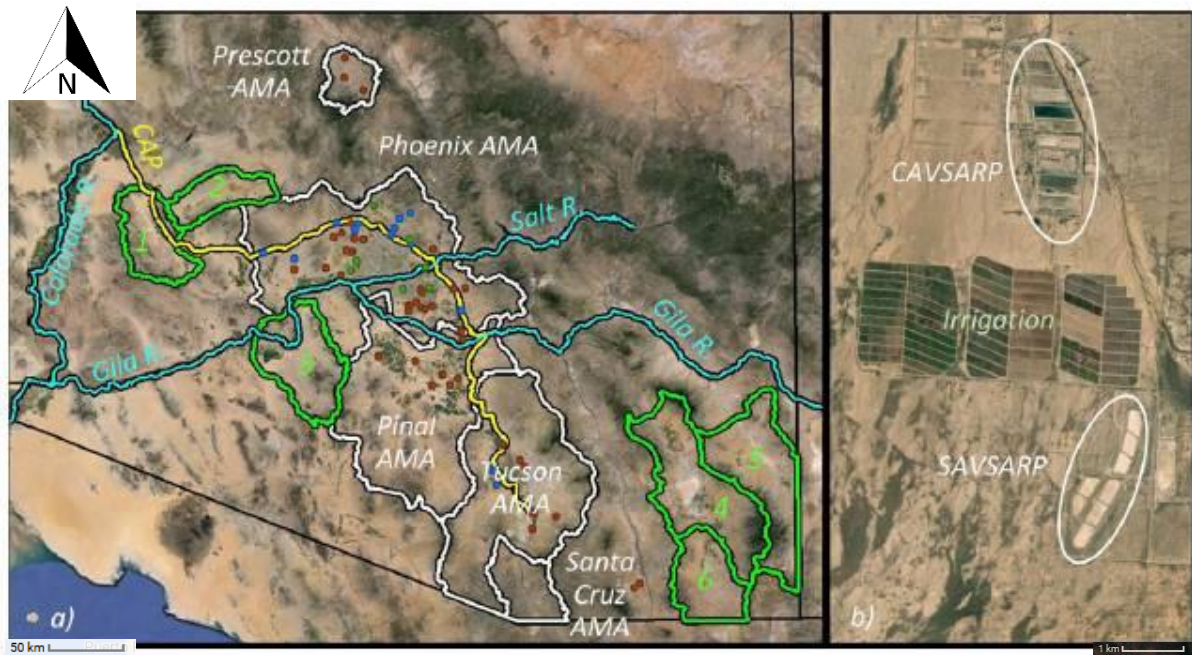


Figure 3 - (a) Carte du réseau hydrographique (en bleu) et des zones de gestion actives en blanc (AMA). Les bassins en vert sont des zones irriguées sans accès aux eaux de surface du « Central Arizona Project » (en jaune). Les points colorés indiquent les secteurs où s'effectue la RM utilisant de l'eau issue du CAP (en bleu), de rejets d'eaux usées (en marron) et des deux sources avec parfois une utilisation d'eau de surface locale (vert). (b) Photographie aérienne du "Central and Southern Avra Valley Storage Project" (CAVSARP et SAVSARP) avec bassins d'infiltration (nord et sud) et zone irriguée (au centre) par le projet, Tucson AMA

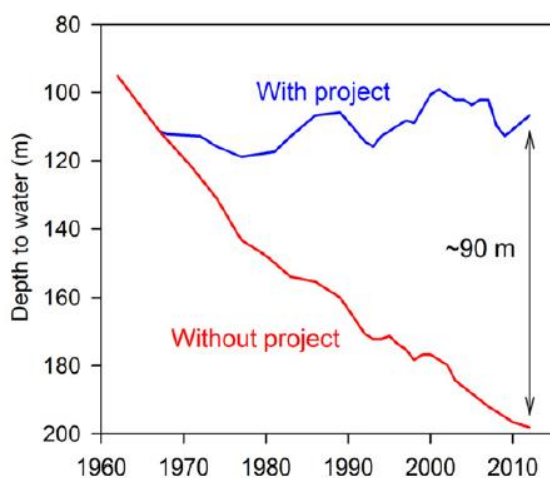


Figure 4 - Moyenne du niveau de l'eau mesuré avec recharge maîtrisée (bleu) et modélisé sans recharge maîtrisée (rouge) dans le « Arvin-Edison Water Storage district », opérationnel depuis 1960. L'aquifère rechargé est presque isolé hydrologiquement par les montagnes environnantes, ce qui limite les pertes des eaux injectées.

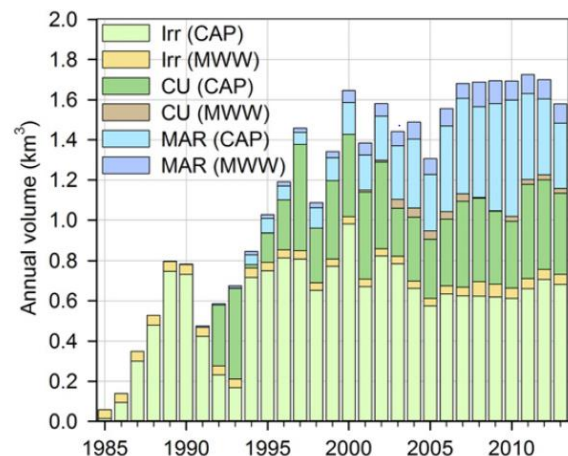


Figure 5 - Volumes d'eau annuels utilisés pour l'irrigation, « Conjointive Use » et recharge maîtrisée (MAR) au cours du temps pour de l'eau prélevée dans le Colorado via le « Central Arizona Project » (CAP), et pour des eaux usées traitées (Municipal Waste Water, MWW) dans l'Arizona. On remarque ici l'accroissement de l'usage conjoint des eaux de surface et souterraines au début des années 1992, puis de la recharge maîtrisée en 1994.

2.2.2. Hyères (83) : Un dispositif de recharge maîtrisée pour contrer les intrusions salines

La ville d'Hyères (83), située à proximité du littoral, était jusqu'en 2012 totalement dépendante de la nappe du Gapeau pour son alimentation en eau potable et devait recourir de manière très récurrente à des achats d'eau.

Avec une population multipliée par quatre en période estivale, la ville devait faire face de manière récurrente à des difficultés pour assurer les volumes de distribution nécessaires durant les années de déficit hydrique. Cette situation a conduit à la surexploitation de la nappe alluviale du Gapeau et a réduit la disponibilité de la ressource en eau. Ainsi, en 2006, le déplacement d'eau salée à l'intérieur des terres jusqu'à 2 km de la côte a nécessité une forte réduction des prélèvements dans la nappe au point de contraindre l'arrêt du champ captant du « Père éternel » et d'engendrer la diminution de la capacité de la ressource. En 2012, la ville d'Hyères et son nouveau concessionnaire SUEZ ont développé le projet Aqua Renova, un programme de réhabilitation et de restauration des nappes d'eau souterraine exposées aux intrusions salines visant à redonner à Hyères son autonomie en eau [Figure 6 et Figure 9].

Le projet a consisté dans un premier temps et dès 2012, à ajuster les volumes prélevés en nappe en fonction de l'évolution des niveaux piézométriques. La méthode des gradients, mise en place dès 2012, consiste à contrôler le niveau piézométrique afin de maintenir le niveau d'eau de la nappe au-dessus du niveau de la mer, de manière à empêcher une intrusion d'eau salée dans l'aquifère. Dans un second temps, une réalimentation artificielle de la nappe alluviale du bas Gapeau a été mise en place dès 2015 pour repousser l'eau salée et améliorer la qualité des eaux souterraines [Figure 7]. Le dispositif de recharge de la nappe consiste en deux bassins d'infiltration de 400 et 600 m² alimentés par un petit fleuve local (Le Roubaud). Il permet de rehausser le niveau de la nappe entre la mer et les ouvrages de captage en accroissant le stock d'eau douce en période hivernale. Un dispositif de surveillance étendu permet le suivi des niveaux d'eau et de la conductivité et de contrôler la position du biseau salé. Le volume d'eau injecté, de l'ordre de 300 000 m³/j durant l'hiver, entre les mois de novembre et d'avril, permet de maintenir le niveau de la nappe à environ + 1m NGF au niveau des forages exploités et de maintenir les eaux salées à distance en ajustant les volumes prélevés [Figure 8].

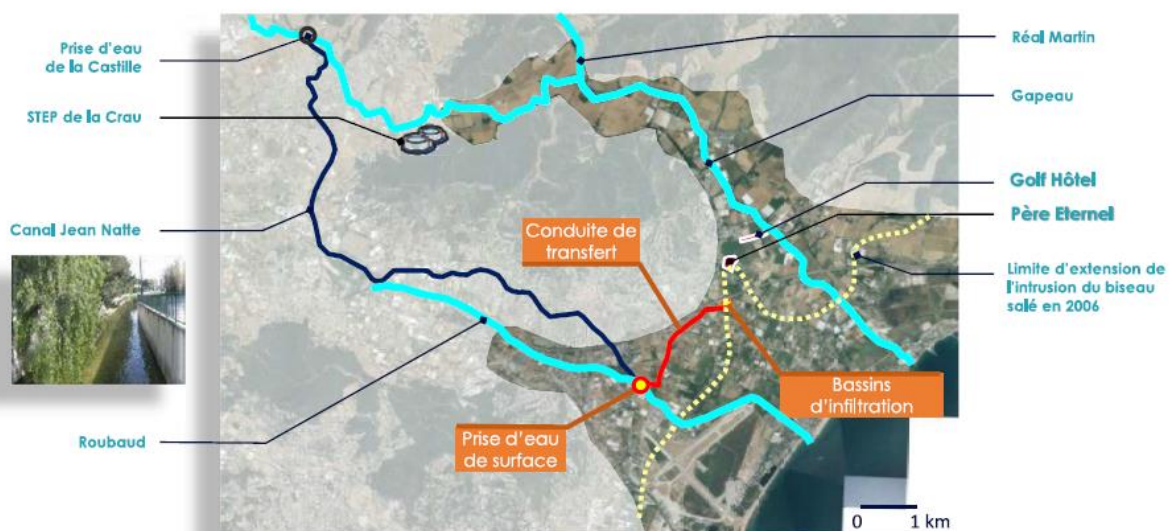
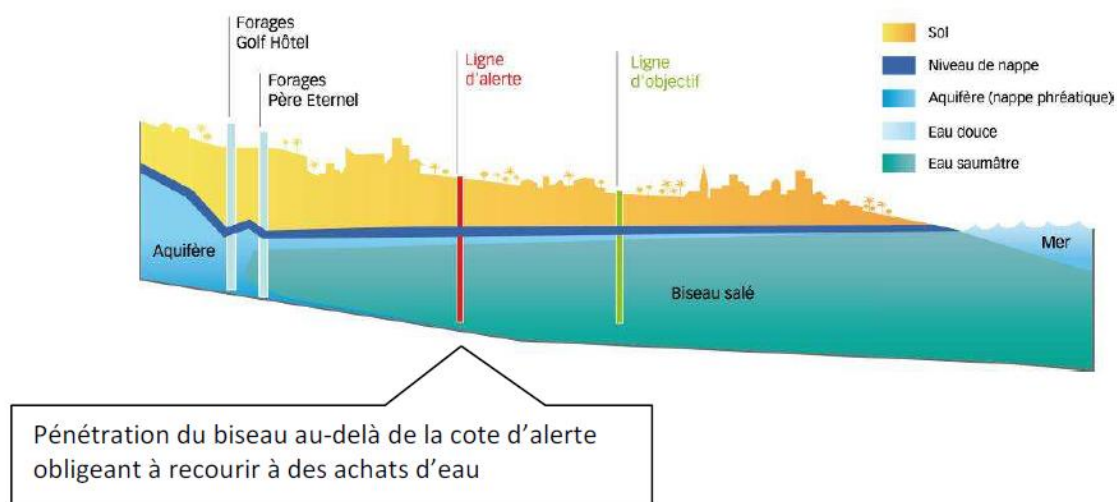


Figure 6 - Vue en plan du projet

SÉCHERESSE : PROGRESSION DU BISEAU SALÉ (à fin 2006)



RESTAURATION DE LA NAPPE CONTINENTALE

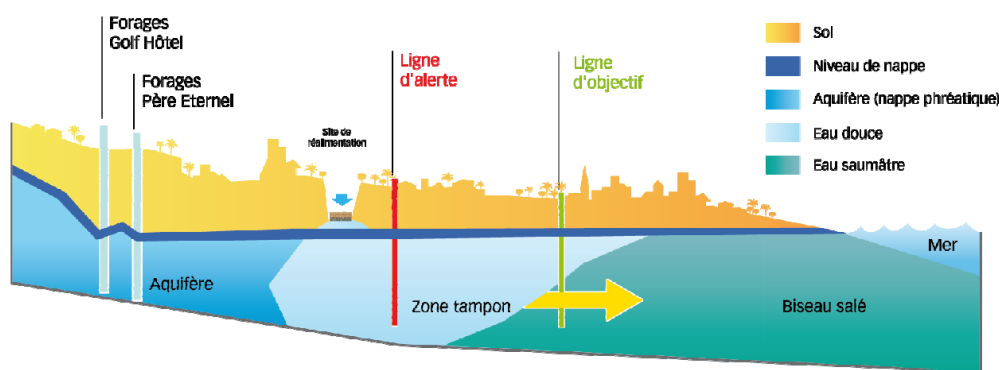


Figure 7 - Schéma de la nappe du bas Gapeau avant et après la mise en place du dispositif de recharge maîtrisée indirecte (Lyonnaise des Eaux, 2014)

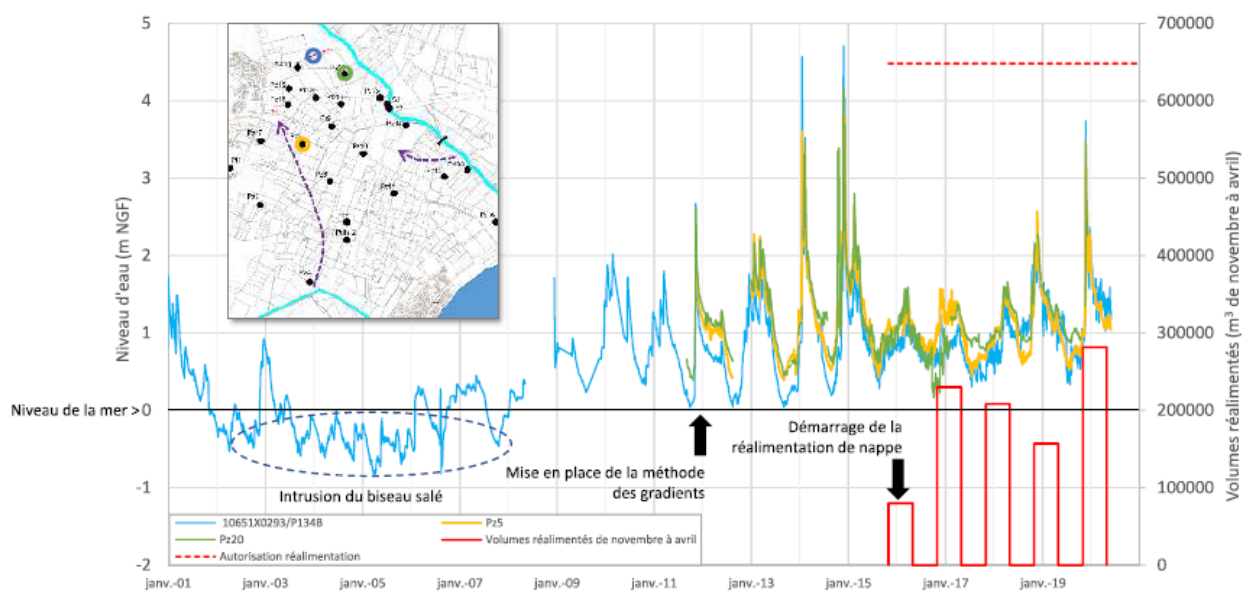


Figure 8 - Niveaux piézométriques avant et après la mise en fonctionnement des dispositifs d'Aqua Renova



Figure 9 - Planche photo du bassin d'infiltration en fonctionnement lors des essais de qualification en 2015

2.2.3. Crépieux-Charmy (69) : accroître la capacité de l'aquifère pour l'alimentation en eau potable et le protéger de pollutions accidentelles

Le champ captant (composé de 114 puits et forages implantés dans les alluvions du Rhône) situé entre les canaux de Miribel et de Jonage et le vieux Rhône alimente 98% de l'agglomération lyonnaise. Les prélèvements journaliers moyens sur la période 2003-2013 se situent autour de 250 000 m³/j avec des pointes qui peuvent atteindre 420 000 m³/j (juin 2002 ou juin 2003).

Un dispositif de recharge, initié dans les années 70 et 80, recharge la nappe et accroît les capacités de l'aquifère, tout en jouant le rôle de barrière hydraulique en protection d'une éventuelle pollution accidentelle du Rhône. L'eau de recharge, prélevée dans le Rhône, est tout d'abord stockée dans des pré-bassins pour éliminer les flottants et effectuer une légère décantation. L'eau est ensuite acheminée vers 12 bassins d'infiltration, d'une profondeur de 4 à 5 m et d'une superficie totale cumulée de 146 462 m² [Figure 10 et Figure 11]. Le dispositif permet d'infiltrer au maximum 76,6 Mm³/an, contre environ 109 Mm³/an de prélèvement AEP dans la nappe, ce qui représente donc au maximum 70% des volumes annuels prélevés. Le fonctionnement de la recharge maîtrisée est optimisé grâce à un suivi en temps réel de la nappe via divers capteurs en place sur le site.

La vitesse d'infiltration dans les bassins à l'état neuf est différente d'un bassin à l'autre, et globalement comprise entre 1 et 2 m/j. Malgré la décantation de l'eau dans des pré-bassins prévus à cet effet, et en respectant un seuil de turbidité maximum de 50 NTU pour le fonctionnement de la réalimentation, le colmatage des bassins est inévitable et visible après quelques mois de mise en eau.

Pour remédier au colmatage des bassins, deux principales actions sont effectuées (Loizeau, 2013) :

- un décolmatage « léger » : cette opération consiste à passer une herse sur le fond des bassins afin de casser les dépôts et les amas algaux en place ; cette technique s'avère efficace si la couche de surface est éliminée du bassin, mais a tendance à compacter le sable plus en profondeur ;
- un décolmatage « lourd » : cette opération consiste à retirer tout ou partie de la couche de sable filtrante et d'en remettre une nouvelle. Des analyses sédimentologiques ont montré que les particules fines ne progressent pas à plus de 10 cm de profondeur dans la couche de sable [Figure 12]. Le remplacement d'une épaisseur de 10 cm s'avère suffisant pour recouvrir des caractéristiques hydrauliques proches de l'état neuf. Un diagnostic sur le terrain est effectué pour ajuster l'épaisseur de sable à retirer en fonction de la progression des particules fines qui peut être différente d'un bassin à l'autre. La récurrence de ces opérations d'entretien est de 4 à 6 ans suivant l'importance du colmatage des bassins.

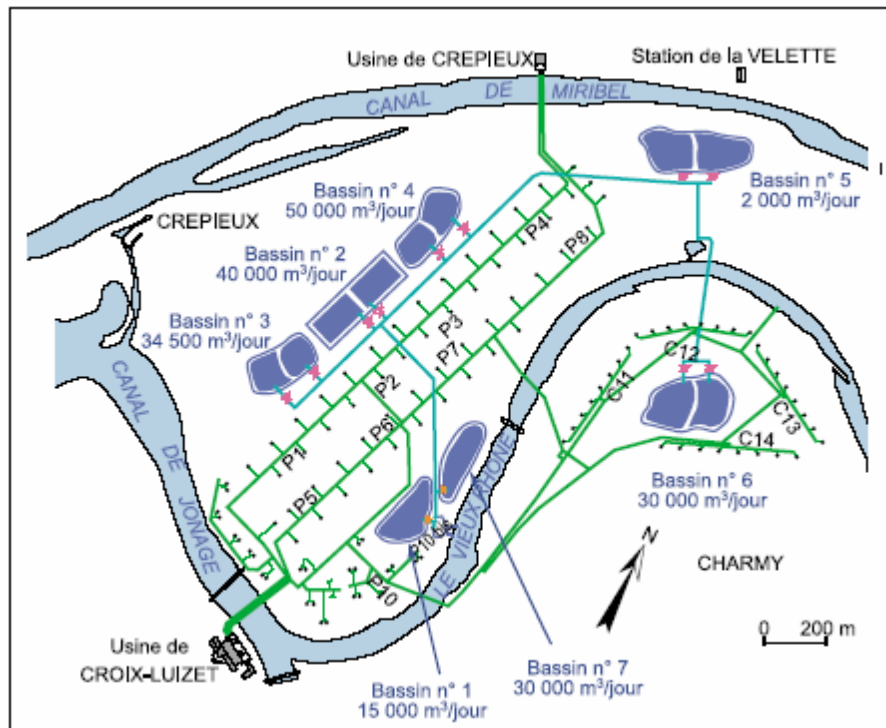


Figure 10 - Plan schématique du champ captant de Crépieux-Charmy (Casanova et al., 2012)



Figure 11 – Vue du remplissage d'un bassin d'infiltration (a) et d'une tranchée dans le fond d'un bassin d'infiltration (b) (Loizeau 2013)

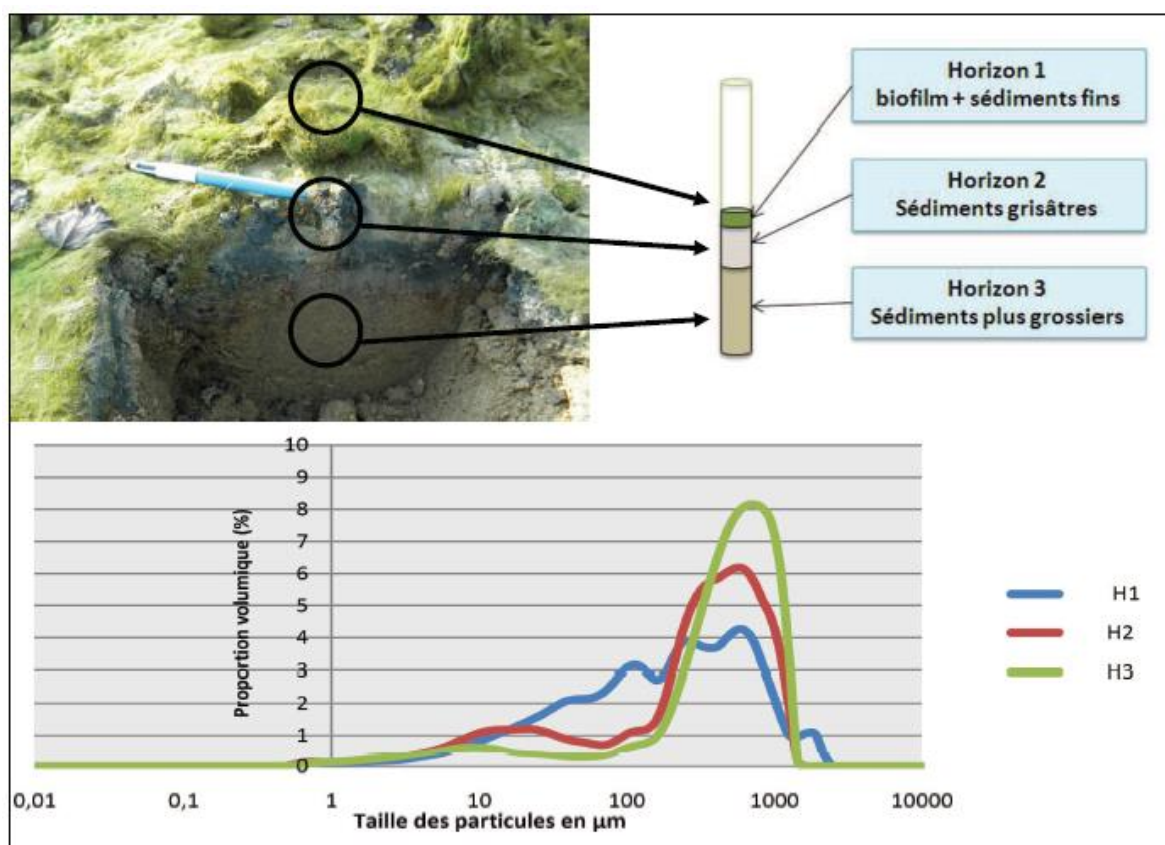


Figure 12 - Granulométrie réalisée sur le fond des bassins d'infiltration du site de captage de Crépieux-Charmy (Bouvarot, 2011)

2.2.4. Deux projets non aboutis à titre d'illustration d'autres objectifs pouvant être assignés à la recharge maîtrisée

Le projet de recharge artificielle de la nappe alluviale de la plaine d'Alex (26) : une tentative pour réduire les prélèvements pour l'irrigation en rivière en sollicitant davantage la nappe

Dans les années 2010, le Syndicat d'Irrigation d'Alex-Montoison (SIAM) a entrepris une étude avec le bureau d'études Idées Eaux pour trouver une solution pour minimiser l'impact de ses prélèvements sur le milieu naturel dans le secteur de la plaine d'Alex, dans la basse vallée de la Drôme, en période de basses eaux.

Il s'agissait d'assurer les besoins avec des prélèvements en rivière lorsque le débit de la Drôme est satisfaisant et suffisant, puis de basculer sur un prélèvement majoritaire ou total en nappe alluviale par l'intermédiaire de ses puits dès que le débit de la Drôme deviendrait faible (Idées Eaux, 2011 et 2012).

La capacité de la nappe n'étant pas suffisante pour permettre ce basculement en période d'étiage, la solution d'une recharge artificielle de l'aquifère à partir d'eau de la Drôme au printemps pour constituer un stock a été étudiée.

Pour valider la viabilité de cette solution de recharge, des essais d'infiltration ont été effectués en mai 2010 avec une injection d'eau durant 10 jours à un débit voisin de 550 m³/h à partir de deux tranchées réalisées dans les alluvions (300 m³/h sur le site Ouest et 250 m³/h sur le site Est) localisées à 2,5 kilomètres en amont du site de pompage du syndicat [Figure 13 - Plaine d'Alex (26) – Expérience de recharge de l'aquifère].

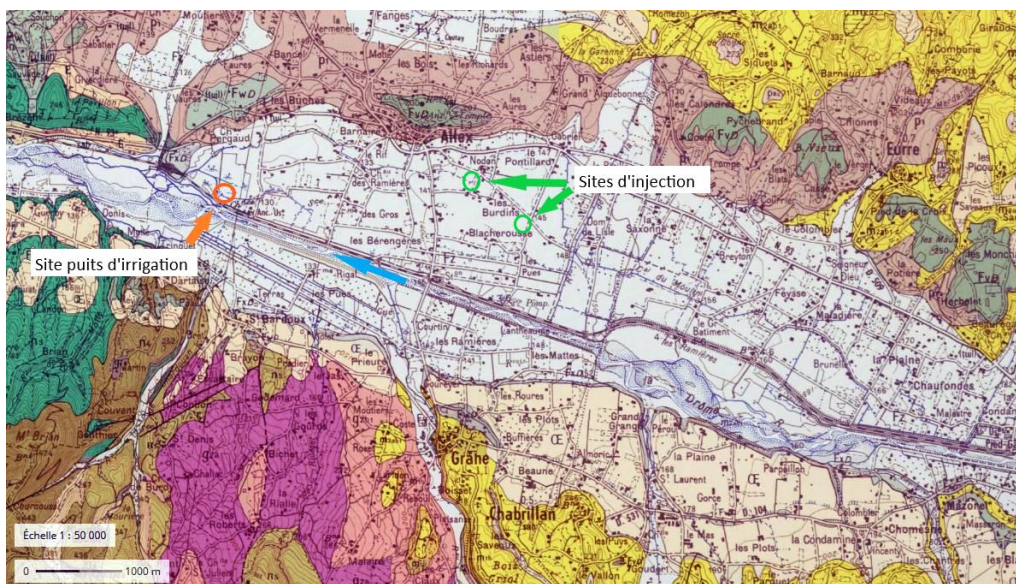


Figure 13 - Plaine d'Alex (26) – Expérience de recharge de l'aquifère
Localisation des sites d'injection et de pompage

Après l'arrêt de l'injection, une hausse d'environ 1 m du niveau de la nappe sur le secteur proche du site de recharge a été observée, puis 0,6 m après 10 jours, 0,3 m après 1 mois, et 0,1 m après 3 mois.

Les modélisations réalisées montraient une augmentation maximale du débit de la nappe à l'Ouest de la plaine pouvant être de l'ordre de 25% à 30 %.

L'exploitation des résultats de la surveillance réalisée à plus large échelle suite à l'essai et la modélisation du devenir du dôme piézométrique créé par la recharge pour des volumes plus importants et sur une plus longue durée, ont montré que la recharge artificielle de la nappe alluviale contribuait à soutenir le niveau de la nappe et son débit à l'aval. Toutefois ces observations et les simulations effectuées ont montré que l'injection d'eau dans la partie amont de la nappe, en période favorable pour le prélèvement en rivière (en fin de printemps), avait un bénéfice trop limité en volume (seulement 1/3 du volume d'eau injecté à l'amont arrive à l'exutoire de la nappe à l'Ouest là où se situent les ouvrages du syndicat) et en durée.

Une partie des eaux infiltrées à l'amont sont en effet perdues pour l'aval de la nappe, car rejoignant plus ou moins directement la rivière Drôme latéralement [Figure 14].

Le projet a donc été abandonné ; l'augmentation des volumes disponibles dans la nappe aurait été trop faible et serait intervenu trop tôt par rapport à la période d'irrigation pour réduire la sollicitation sur la rivière.

On voit donc, avec cet exemple, que même si les conditions hydrogéologiques sont favorables pour l'infiltration et la captation d'eau à des volumes importants, le contexte peut être défavorable pour la constitution de stocks remobilisables de manière déphasée dans l'aquifère. Ceci démontre bien l'importance de vérifier préalablement la faisabilité des projets par des études poussées et des tests préalables.

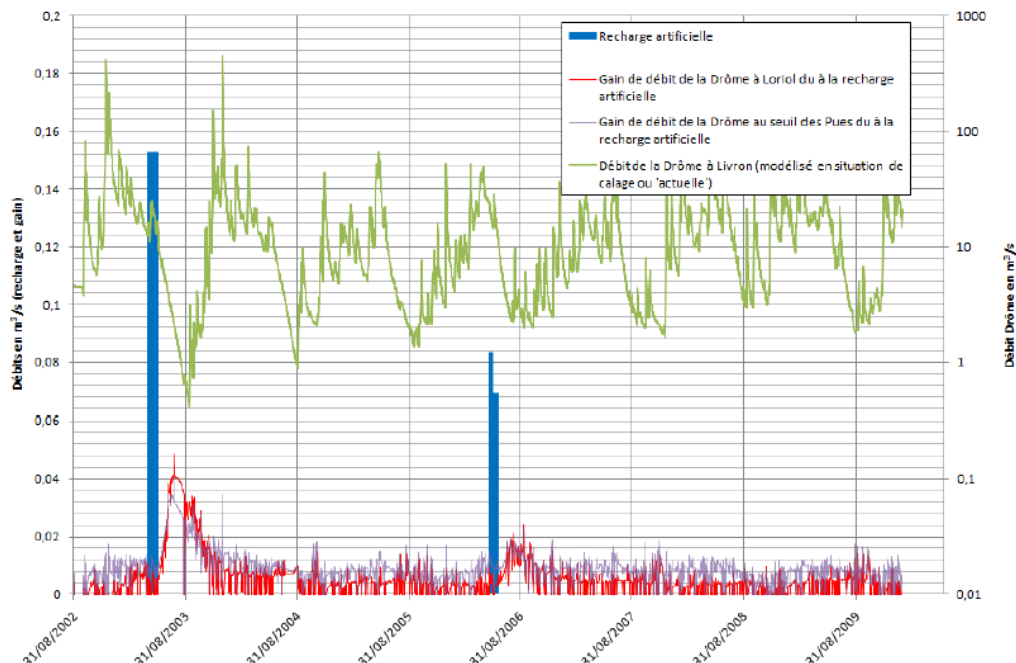


Figure 14 - Comparaison des gains de débits de la Drôme à Livron et au Seuil des Pues avec recharge de la nappe (Idées Eaux, 2012)

Le projet de restauration du niveau de la nappe - Ile de la Platière - Péage de Roussillon (38) pour réhydrater la forêt alluviale

La nappe alluviale du Rhône dans le secteur de Péage-de-Roussillon est désignée comme nécessitant des actions pour restaurer l'équilibre de la ressource en eau. Les aménagements du Rhône et le développement d'activités consommatrices d'eau ont en effet entraîné un abaissement du niveau de la nappe alluviale conduisant, en particulier, à sa déconnexion de la forêt alluviale présente sur la Réserve Naturelle de l'Ile de la Platière.

Suite à une étude d'évaluation des volumes prélevables (EVP) menée en 2015 et à un avis rendu par le Conseil scientifique du comité de bassin (2017), l'État a demandé le lancement d'une concertation pour l'élaboration d'un Plan de Gestion de la Ressource en Eau (PGRE). Ce plan vise à retrouver un équilibre quantitatif pour concilier le mieux possible les besoins des milieux naturels et des usages. Malgré les efforts d'économie d'eau entrepris et à poursuivre, il s'avère que les marges de réduction des prélèvements ne seront pas suffisantes pour rétablir l'équilibre quantitatif et redonner la dynamique nécessaire pour réenclencher un cycle d'évolution favorable de la forêt alluviale.

Une étude de différents scénarios visant à réalimenter la nappe alluviale a par conséquent été menée. La solution privilégiée est le scénario de remise en eau de paléo-chenaux de l'ancien Rhône présents sur l'île pour permettre l'infiltration de l'eau superficielle et donc une recharge maîtrisée de la nappe alluviale. Il s'agit du scénario qui apparaît le plus efficient et le plus vertueux sur le plan environnemental, permettant de recréer des milieux naturels à plus forte biodiversité [Figure 15 - Principe de la réalimentation de l'Île des Graviers] en complément d'économies d'eau industrielles supplémentaires.

A la date de rédaction de la présente note, ce projet nécessitait toutefois encore :

1. une validation préalable de l'opportunité du projet auprès des instances en charge de la gestion patrimoniale du site de la réserve (Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel, conseil départemental de l'Isère). Les membres du CSRPN réunis le 15/09/2020, ont émis un avis favorable avec les recommandations suivantes :
 - privilégier les solutions fondées sur un processus naturel ;
 - prévoir un suivi scientifique, notamment sur la dynamique forestière ;
 - prévoir une gestion adaptative en fonction des résultats du suivi.

Cet avis sera à prendre en compte dans le cadre de la demande d'autorisation de la modification de la réserve si le projet de remise en eau des paléo-chenaux se concrétise. L'avis du CSRPN sera également sollicité sur les études avant-projet et projet ;

2. un accord entre les parties prenantes, CNR (Compagnie Nationale du Rhône) et DREAL, sur la possibilité d'utilisation d'une partie du débit du Rhône court-circuité ou de la réserve de débit de la concession CNR - la CNR est partie prenante du PGRE et accompagne la réflexion ;
3. la poursuite du portage du projet sur le plan politique pour convaincre les différents acteurs de son intérêt et mobiliser les financements, ce qui implique de définir en amont les modalités de la gouvernance du projet et de maîtrise d'ouvrage (potentiellement le CEN - Conservatoire des Espaces Naturels).

Cette proposition de recharge de la nappe pour un bénéfice sensible et directement au profit des milieux naturels s'inspire de l'opération de remise en eau d'un ancien bras du Rhin à Kembs (68) dans la Petite Camargue Alsacienne.

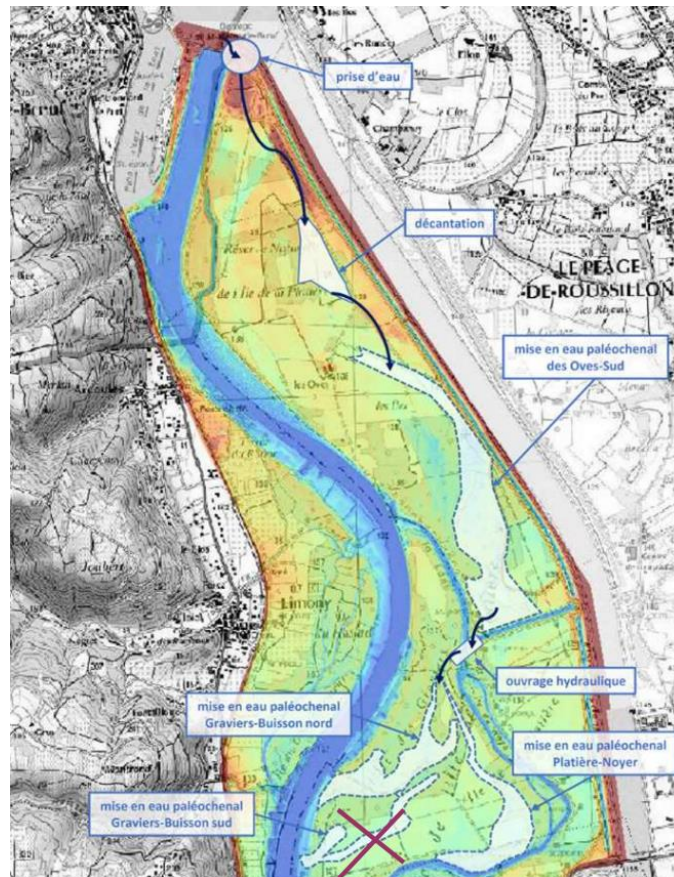


Figure 15 - Principe de la réalimentation de l'Île des Graviers

2.3. Quelles sont les conditions pour envisager la recharge maîtrisée sur un territoire ?

2.3.1. Conditions techniques

La recharge maîtrisée ne doit pas être utilisée comme seul moyen d'assurer la gestion de la ressource ou d'atteindre le bon état des eaux. Si elle est envisagée, elle doit l'être comme mesure complémentaire à d'autres actions d'économies d'eau dans le cadre des PTGE, et de préservation de la recharge naturelle de l'aquifère en luttant par exemple contre l'imperméabilisation. Deux points importants doivent par ailleurs être étudiés : les caractéristiques de l'aquifère influençant la plus ou moins bonne aptitude au stockage et les spécificités (origine, quantité disponible, qualité, traitabilité) des eaux qui seraient infiltrées.

➤ *Quels aquifères sont favorables à la recharge maîtrisée ?*

La partie suivante porte principalement sur la recharge maîtrisée indirecte puisque ce type de recharge est la technique la plus répandue et la plus facile à mettre en œuvre.

Tous les types d'aquifères ne sont pas propices à la mise en œuvre de recharge maîtrisée indirecte. Celle-ci s'effectue généralement dans des aquifères **libres**, le caractère **semi-captif** étant peu favorable. Les **aquifères captifs** conduisent obligatoirement à imaginer un procédé par recharge directe en raison de la situation de l'aquifère sous couverture imperméable.

Pour les projets de recharge indirecte, différents paramètres doivent être pris en compte pour évaluer la faisabilité de la recharge :

- l'**épaisseur de la zone non saturée** doit être suffisante pour permettre d'infiltrer de l'eau sans débordement en permettant de stocker de l'eau par développement d'un dôme piézométrique ; cette épaisseur ne doit toutefois pas être trop importante quand même (<50 m) pour éviter un décalage trop important entre le démarrage de la recharge du bassin en surface et l'arrivée de l'eau à la nappe avec un stockage intermédiaire dans la zone non-saturée, mais assez élevée pour conserver également une capacité d'autoépuration de l'eau satisfaisante ;
- la **perméabilité de la zone non saturée** contrôle à la fois la vitesse d'infiltration de l'eau et une partie de la capacité d'autoépuration du milieu. Des perméabilités de 10^{-4} à 10^{-5} m/s permettent l'infiltration de quelques mètres d'eau par jour tout en conservant une capacité d'autoépuration intéressante. La **perméabilité de l'aquifère** doit être suffisante pour qu'il puisse se constituer un stock utilisable en différé et pour permettre à l'eau de s'écouler vers le point de récupération. Une perméabilité trop élevée augmente le risque de voir l'eau injectée s'écouler trop rapidement vers les exutoires naturels de la nappe ;
- le **coefficient d'emmagasinement / porosité** de l'aquifère doit également être suffisant pour permettre de stocker un volume de recharge satisfaisant ;
- la **diffusivité** (rapport entre la transmissivité et l'emmagasinement) ne doit pas être trop élevée pour que le stockage de la nappe soit efficace, au risque d'avoir des écoulements trop rapides qui ne permettront pas de garder l'eau rechargée dans le périmètre du dispositif mis en œuvre suffisamment longtemps pour permettre son utilisation différée [Figure 16] ;

Au fil du temps, l'accumulation de particules fines dans les pores ou la formation d'agréats par des microorganismes, de biofilms bactériens, la précipitation de minéraux... engendrent un processus de colmatage des bassins d'infiltration, diminuant leur perméabilité et leur capacité d'infiltration journalière. Il convient par conséquent de surveiller l'évolution des capacités d'infiltration dans le temps pour pouvoir intervenir en temps et heure de manière adaptée, pour assurer le décolmatage des dispositifs d'infiltration.

Propriétés	Perméabilité	Coefficient d'emmagasinement	Diffusivité	Profondeur
	Pour une porosité continue: $3,9 \cdot 10^{-4} < K < 10^{-2}$ 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 $6,4 \cdot 10^{-1}$ m ² /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)

Figure 16 - Propriétés des aquifères généralement retenues favorables pour la recharge maitrisée indirecte (BRGM, 2018)

Les formations les plus favorables sont de type sédimentaire de nature alluvionnaire **ou sablo-gréseuses**. Les formations calcaires **karstifiées** sont moins favorables en raison de l'organisation du drainage de ces formations sous forme de conduits très transmissifs et de l'écoulement rapide de l'eau vers les exutoires, réduisant les capacités de stockage dans la durée. Enfin, les formations de socle de type **fissurées** présentent un intérêt faible en raison de perméabilités trop hétérogènes et d'une capacité de stockage limitée. La capacité de géo-épuration des sols et de la zone non saturée est également un critère à prendre en compte pour le choix du site.

Une approche complémentaire a été menée par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée-Corse, en lien avec le BRGM en 2020, pour tenter de mieux discriminer la capacité des formations sédimentaires à accueillir des projets de recharge maîtrisée. L'exploitation des données de perméabilité, emmagasinement, transmissivité et diffusivité de différentes entités alluviales et sédimentaires des bassins Rhône-Méditerranée montre que les formations de nature **alluviales anciennes** sont en général plus favorables à la recharge maîtrisée en raison d'une perméabilité et d'un emmagasinement globalement plus élevés, et une diffusivité plus faible que les formations alluviales récentes. Les formations de type **molassique ou sableuses** se présentent comme les moins favorables. De plus, les formations alluviales **anciennes** forment parfois des terrasses, moins dépendantes des cours d'eau, pouvant présenter de meilleures perméabilités et une capacité de stockage supérieure [Figure 17].

<i>Alluvions anciennes</i>	Alluvions anciennes Plaine de Valence	Alluvions anciennes Plaine de Bievre Valloire	Alluvions anciennes fluvio- glaciaires Est Lyonnais	Valeur moyenne
Code ME	FRDG 146	FRDG303	FRDG334	-
Perméabilité moyenne (m/s)	5,0E-03	1,0E-02	1,2E-02	9,0E-03
Emmagasinement (S) moyen	12%	7%	12,50%	11%
Transmissivité moyenne (m ² /s)	1,0E-03	1,0E-02	1,0E-01	3,7E-02
Diffusivité (m ² /s)	8,3E-03	0,14	0,80	0,32

<i>Alluvions modernes</i>	Alluvions modernes du Rhône (champ captant Mauboule)	Alluvions modernes du Rhône (champ captant Miribel Jonage)	Alluvions modernes de la Drôme expérimentation d'Allex	Valeur moyenne
Code ME	FRDG381	FRDG338	FRDG337	-
Perméabilité (m/s)	1,0E-03	2,0E-03	4,5E-03	2,5E-03
Emmagasinement (S) moyen	12,50%	15%	2%	10%
Transmissivité moyenne (m ² /s)	2,0E-01	3,0E-02	4,0E-02	9,0E-02
Diffusivité (m ² /s)	1,6	0,2	2	1,3

<i>Molasses et sables</i>	Molasses miocènes du Bas Dauphiné	Sables Astiens du Languedoc	Molasses du Comtat (84)	Valeur moyenne
Code ME	FRDG219	FRDG224	FRDG218	-
Perméabilité (m/s)	1,4E-05	1,5E-04	5,0E-06	5,6E-05
Emmagasinement (S) moyen	0,75%	10%	0,00025	4%
Transmissivité moyenne (m ² /s)	1,4E-03	1,0E-04	5,0E-04	6,7E-04
Diffusivité (m ² /s)	0,19	1,00E-03	2,00	0,73

Figure 17 - Paramètres hydrodynamiques moyennés pour différentes entités sédimentaires du bassin Rhône-Méditerranée

➤ Disponibilité et qualité des eaux infiltrées

Il est nécessaire de s'intéresser à la qualité et à la disponibilité des eaux de l'aquifère et des eaux de recharge ainsi qu'aux différents usages qui en dépendent.

L'ANSES recommande que la « recharge artificielle n'altère pas la qualité de l'eau de la nappe souterraine rechargée ni impose des traitements supplémentaires par rapport à une eau non rechargée destinée à la même utilisation et que l'eau de recharge soit de qualité supérieure ou équivalente à l'eau souterraine ». Ainsi, des prétraitements sont souvent nécessaires, avec a minima des bassins intermédiaires de décantation et filtration (traitement primaire) pour limiter le colmatage des ouvrages de recharge. Des traitements secondaires peuvent être aussi nécessaires en fonction du type d'eau utilisé (eaux usées ou pluviales). Dans le cas d'une recharge directe par injection d'eau à partir de forage, procédé que nous ne détaillons pas dans cette note, des traitements complexes de type coagulation-floculation, décantation lamellaire, filtration, désinfection, oxygénation, ultrafiltration, osmose inverse, désinfection aux UV... peuvent être aussi nécessaires.

Pour limiter le risque de colmatage des dispositifs, il est en particulier préconisé que l'eau de recharge contienne moins de 1000 ppm de matières en suspension. Enfin, pour répondre aux objectifs de qualité, il peut être nécessaire de mettre en place une station d'alerte sur le cours d'eau prélevé pour éviter l'infiltration d'une eau contaminée suite à une pollution accidentelle.

Un critère fondamental pour l'implantation d'un projet est la disponibilité d'une eau de recharge en qualité et quantité suffisantes à proximité du site d'injection, afin d'assurer un apport régulier et limiter l'énergie utilisée ainsi que les coûts potentiels de transport. Il conviendra donc de localiser le dispositif de la manière la plus adaptée en fonction de la position du réseau hydrographique de surface, mais aussi de la mer (dans le cas d'un aquifère littoral pour lutter contre l'intrusion saline) ou des champs captants en nappe.

Il est également indispensable de ne prélever dans les eaux de surface que lorsque la ressource est suffisamment abondante pour pouvoir l'envisager. La connaissance des débits d'écoulements mensuels et journaliers dans les cours d'eau est nécessaire pour estimer les volumes et le débit maximum prélevables pour la recharge ainsi que le débit minimum à laisser dans le cours d'eau, sans porter atteinte au bon état et au bon fonctionnement des milieux aquatiques superficiels. Si les régimes des cours d'eau sont intermittents ou soumis à une forte variabilité saisonnière qui peut rendre plus compliquée la gestion du prélèvement, la mise en œuvre d'action de recharge maîtrisée peut rester envisageable, à condition de prélever en période de hautes eaux et de ne pas rendre l'assec plus pénalisant pour la biologie (durée, fréquence, linéaire).

Quelle réglementation pour l'implantation d'un dispositif de recharge de d'aquifère ?

Le code de l'environnement dans son article 214 (points 1 à 3 de la rubrique 2.3.2.0 concernant les installations, ouvrages travaux et aménagements dans le domaine de l'eau) précise que la recharge artificielle des eaux souterraines est soumise à autorisation environnementale, quel que soit le volume rechargé. Par ailleurs l'article R122-2 du même code dans son annexe (item 17) indique que les projets de recharge sont soumis à évaluation environnementale pour des volumes rechargés supérieurs à 10 millions de m³/an et à examen au cas par cas pour des volumes inférieurs.

2.3.2. Dimensionnement d'un projet et éléments de coût de la recharge maîtrisée

Si les conditions nécessaires pour envisager un projet de recharge maîtrisée sur un territoire sont réunies et qu'une zone d'intérêt est définie, la question du dimensionnement et des coûts d'un projet de recharge maîtrisée peut être étudiée. L'évaluation économique d'un dispositif de recharge maîtrisée repose principalement sur son dimensionnement en termes de volume d'eau rechargée (correspondant au surplus d'eau stockée dans l'aquifère) [Figure 18].

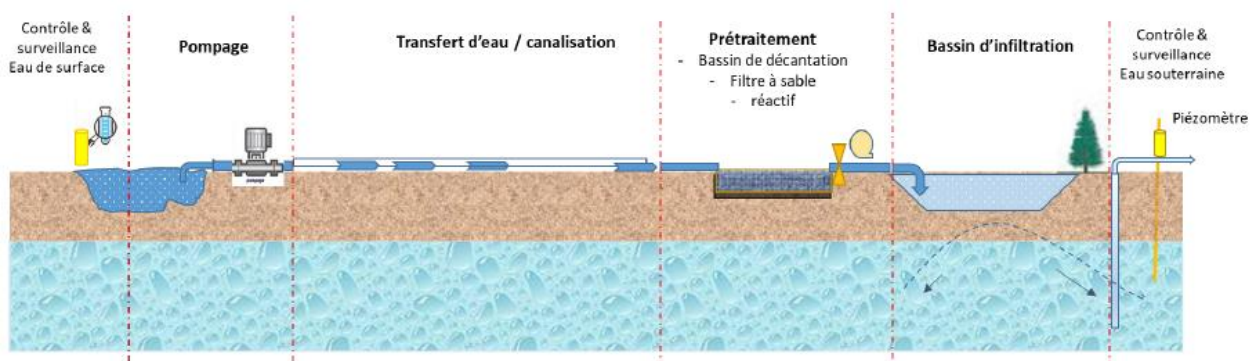


Figure 18 - Schéma simplifié d'un dispositif type de recharge maîtrisée par bassin d'infiltration (BRGM, 2019)

➤ Dimensionnement des bassins d'infiltration

Pour dimensionner au mieux les ouvrages, une fois les objectifs annuels de recharge définis (qualité, quantité), il est nécessaire d'étudier les caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'intérêt pour l'implantation ainsi que les caractéristiques de la ressource en eau de surface pouvant être utilisée pour l'alimentation de la nappe. Les caractéristiques physiques du territoire (localisation des cours d'eau par rapport au site de recharge envisageable, distance, dénivelé...) sont aussi à examiner.

Le volume d'eau rechargé est déterminé au regard des objectifs visés par le projet de recharge. Les dispositifs de recharge maîtrisée n'ont jamais un rendement de 100% en raison des écoulements et des pertes au profit des exutoires naturels de l'aquifère. La fixation des volumes de recharge doit donc en tenir compte. Des investigations poussées sur site, pour permettre d'appréhender les caractéristiques physiques de l'aquifère (et leur variabilité spatiale), des tests d'injection et des modélisations sont également indispensables pour permettre de vérifier quels sont les gains en volume à attendre dans l'aquifère pour différentes conditions de réalimentation.

Des effets de colmatage diminuent la perméabilité des dispositifs et/ou des formations rechargées, sous l'effet de l'accumulation de particules fines, de la formation de biofilms bactériens, de la précipitation de minéraux... La réduction des performances des ouvrages peut être évitée par des opérations d'entretien ou de renouvellement, dont le coût doit être pris en compte dans l'analyse du projet.

L'infiltration de l'eau dans un bassin d'infiltration induit la création d'un dôme piézométrique dont la hauteur et l'étalement augmentent progressivement au cours du temps en fonction des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère. La hauteur du dôme doit être maîtrisée afin de rester inférieure à l'épaisseur de la zone non saturée, ce qui permet d'éviter un refus à l'infiltration sous le bassin. Des méthodes de calculs existent, comme la méthode d'Hantush (1967) permettant d'estimer la hauteur et l'étendue du dôme piézométrique créé par l'infiltration de l'eau dans un bassin rectangulaire, en considérant la vitesse d'infiltration, la porosité, la perméabilité du terrain, les dimensions du dispositif (hauteur d'eau, longueur et largeur du bassin), la durée de la recharge et l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère [Figure 19].

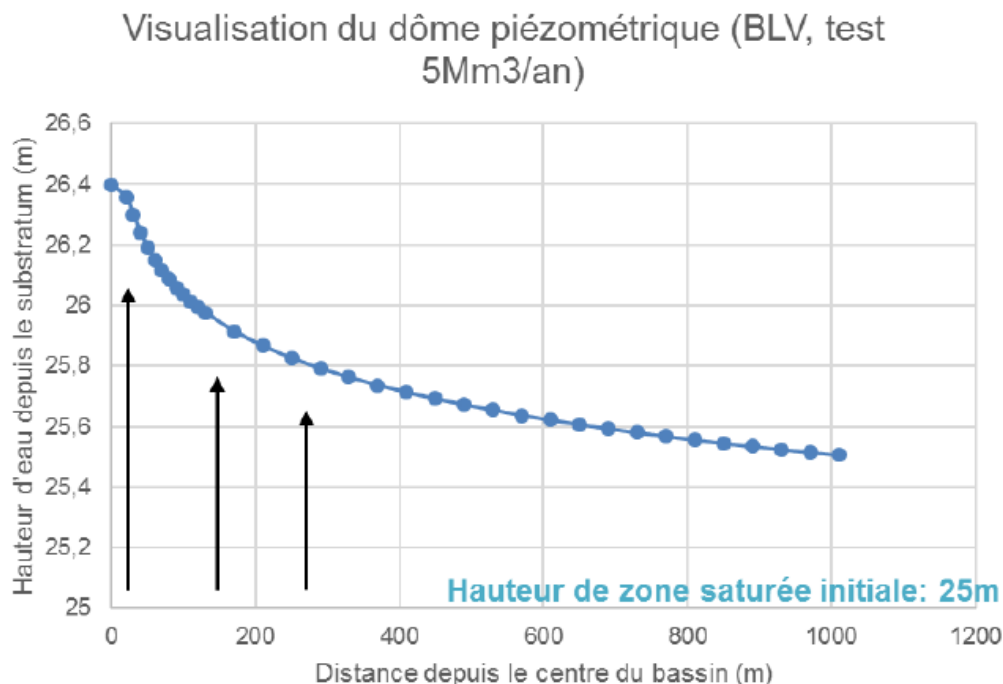


Figure 19 – Résultat graphique de l'estimation de dômes piézométriques : exemple du site de Bièvre-Liers-Valloire (région AURA) selon la solution analytique de Hantush (BRGM, 2019)

Dans le cas de nappes bien connectées avec un cours d'eau ou des points d'émergences qui la drainent, le dimensionnement des ouvrages de réalimentation devra tenir compte du ratio attendu «Volumes repris très rapidement par les cours d'eau / Volumes stockés ». Leur dimension sera également conditionnée par les coûts d'investissement et de fonctionnement et la surface disponible pour l'implantation du / des bassins d'infiltration.

➤ *Superficie des bassins d'infiltration et débits de recharge*

Le dispositif de recharge par bassin d'infiltration est à dimensionner en fonction du volume objectif de recharge, incluant la notion de dôme piézométrique induit par l'infiltration de l'eau.

La superficie du bassin d'infiltration, sera établie en fonction :

- ✓ de la vitesse d'infiltration, qui est fonction des caractéristiques du sous-sol ;
- ✓ du nombre de jour par an où le prélèvement en cours d'eau ou plan d'eau est possible ;
- ✓ du débit d'apport envisageable ;
- ✓ des pertes par évapotranspiration (au droit du bassin).

La superficie totale du ou des bassin(s) d'infiltration (S_b) est estimée en fonction du volume objectif de recharge (V_r tel que défini précédemment), de la capacité d'infiltration dans l'aquifère et du nombre de jours de remplissage du bassin :

$$S_b (m^2) = V (m^3/an) / [i (m/j) \times N_j (j/an)]$$

Où :

V : Volume (Mm^3/an) objectif de recharge

N_j : 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

S_b : Superficie totale du ou des bassin(s) d'infiltration (m^2)

i : Capacité d'Infiltration de l'eau dans le bassin (m/j)

Estimation chiffrée pour un objectif de recharge de 1 million de mètres-cubes par an

A titre d'exemple, l'annexe 1 présente comment il est possible d'estimer les superficies des bassins d'infiltration nécessaires pour parvenir à une recharge d'un million de mètres-cubes en considérant la possibilité de prélever sur une période où l'eau est suffisamment abondante dans le cours d'eau.

Les calculs ont été réalisés, pour une période de 6 mois de recharge (de mi-octobre à mi-avril), ou de 5 mois (de novembre à mars). Ces durées et périodes sont bien entendu indiquées à titre d'exemple et doivent être ajustées pour perturber le moins possible la vie aquatique, en fonction du fonctionnement du cours d'eau dans lequel il est envisagé de prélever et de son hydraulicité.

La superficie nécessaire va également varier en fonction des valeurs d'infiltration atteignables au droit du bassin. Les calculs ont été faits pour des ordres de grandeur comparables aux valeurs couramment constatées sur les sites de réalimentation en activité en France (lesquelles s'échelonnent entre 0,5 et 2,5 m/j).

En disposant d'une période favorable pour le fonctionnement du bassin de 5 mois complets (151 jours) de novembre à mars, pour injecter un volume de 1 million de mètres-cubes en aquifère, il est nécessaire de prélever dans les eaux de surface, un débit en continu de 77 l/s.

Selon la capacité d'infiltration des eaux sous le bassin, la surface de bassin nécessaire pour l'injection, va varier entre 2 650 m² et 13 250 m² de la façon suivante :

Capacité d'infiltration du(des) bassin(s) (en m/j)	Surface de bassin nécessaire (en m ²)
0.5	13245
1.0	6623
2.0	3311
2.5	2649

Evaporation de l'eau dans les bassins d'infiltration

Une partie de l'eau apportée dans le bassin d'infiltration est perdue par évaporation, toutefois les précipitations compensent, au moins pour partie, ces valeurs d'évaporation.

Différentes études ont montré que la valeur de l'évaporation sur un plan d'eau est comparable à la valeur de l'évapotranspiration potentielle³ sur le territoire où se situe ce plan d'eau.

Les bilans hydrauliques sur ces bassins durant leur période de prélèvement pour la recharge maîtrisée, entre novembre et mars, ont été évalués à partir des valeurs d'évapotranspirations potentielles et des valeurs de précipitations sur les stations météo rattachées aux principales villes du bassin Rhône-Méditerranée.

On voit ci-dessous que partout les précipitations tombées sur la période compensent largement l'évaporation à la surface des plans d'eau, excepté pour Marignane (13) avec un bilan très légèrement négatif de 18 mm évaporés.

Station meteo	Cumul ETP nov. à mars (5 mois)	Cumul précip.5 mois nov. à mars (5 mois)	Bilan en eau 5 mois (précip. - ETP)
Besançon	97.9	471.7	+373.8
Macon	113.5	313.5	+200
Amberieu	116.1	440.0	+323.9
Grenoble	123.8	334.0	+210.2
Dijon - Longvic	109.7	257.9	+148.2
Lyon-Bron	139.5	278.8	+139.3
Aix-en-Provence	153.7	238.0	+84.3
Embrun	196.2	282.8	+86.6
Carpentras	162.7	230.2	+67.5
Montélimar	178.3	327.3	+149
Carcassonne	184.1	299.7	+115.6
Nice	268.8	349.0	+80.2
Montpellier-Aéroport	216.0	275.2	+59.2
Perpignan	262.4	274.7	+12.3
Marignane	229.6	211.3	-18.3

Tableau 2 - Comparaison des valeurs de précipitation et d'évaporation sur la période automnale et hivernale pour différentes villes du bassin Rhône-Méditerranée

³ Evapotranspiration potentielle ou ETP : demande en eau théorique, en conditions de disponibilité en eau non limitante, combinant l'évaporation du sol et du couvert végétal et la transpiration de la végétation. On utilise ici la formule de Penman pour évaluer cette évaporation.

Dans le Tableau 3 sont présentés des exemples de dimensionnement de différents dispositifs de recharge maîtrisée, sur plusieurs sites en activité (BRGM, 2018).

Site RA	Volume de recharge maximal (Mm ³ /an)	Dimensionnement du dispositif de RA
Crépieux-Charmy, (France)	76,6	12 bassins d'infiltration (~20 000 m ² /bassin de 4-5 m de profondeur) d'une superficie totale de 146 462 m ²
Croissy - Le Pecq (France)	25	10 bassins, d'une superficie totale de 120 000 m ²
Flins - Aubergenville (France)	8	6 forages primaires de 7,5 m de profondeur moyenne 7 bassins (110 000 m ²)
Verneuil - Vernouillet (France)	1,75	2 forages primaires de 15m de profondeur et 1 étang de 320 000 m ² faisant office de bassin d'infiltration
Aquarenova (France)	0,28 (2017)	2 bassins de superficie totale: 1000 m ²
Basse vallée de la Durance (France)	15	3 sites de recharge : Plan d'Orgon (un bassin de 50 400 m ²), Cavaillon-Cheval Blanc (28 forages de 18 à 20m de profondeur) et Châteaurenard (10 puits de 20m de profondeur)
Lavelanet de Comminges (France)	1,75	3 bassins de 500 m ² et de 2,5 m de profondeur et d'une superficie totale: 1500 m ² .
Vessy (Suisse)	11	5 km de tuyaux infiltrants avec une superficie totale de 30 000 m ²
Parafield (Australie)	1,1	4 forages de 165 à 185 m de profondeur.
El Prat del Llobregat (Espagne)	5	15 forages d'injection

Tableau 3 - Exemples de dimensionnement de différents dispositifs de recharge maîtrisée, sur quelques sites opérationnels en France et dans le monde (BRGM, 2018)

➤ Éléments de coûts

Les coûts de mise en œuvre d'un projet de recharge maîtrisée peuvent être très variables car dépendants de nombreux paramètres : dimensionnement du projet en fonction de l'objectif de volume d'eau rechargée, procédé de recharge, qualité des eaux de recharge, localisation géographique du projet par rapport à son alimentation potentielle (distance et dénivelé par rapport au point de prélèvement), etc...

Le BRGM dans son rapport de 2019 « Recommandations pour l'analyse de la pré faisabilité de la recharge de la nappe au moyen d'eau de surface : application aux bassins Rhône-Méditerranée et Corse » propose une méthode pour une pré-évaluation des coûts d'un projet de recharge maîtrisée indirecte de type bassin d'infiltration. Nous n'en proposons ci-dessous qu'un résumé très incomplet.

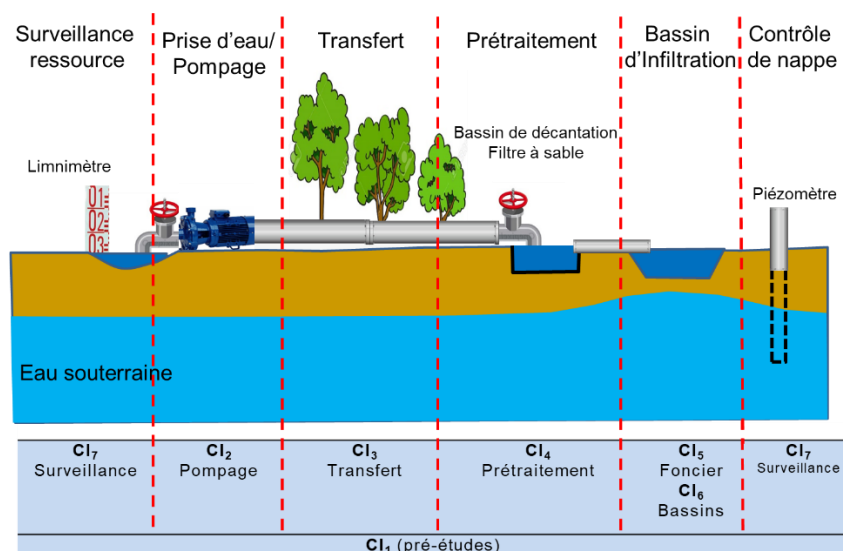
Nous invitons le lecteur qui souhaiterait mieux approcher ces questions de coût à se reporter au document cité (chapitres 7.3. *Évaluation du coût d'un dispositif de recharge indirecte* et 7.4. *Évaluation des coûts : exemple d'application*).

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 l'analyse du BRGM (que nous ne reprenons pas dans la présente note) sont des ordres de grandeur, basés sur un certain nombre d'hypothèses. La réalisation d'évaluations détaillées au cas par cas après sélection de secteurs précis au sein de chaque territoire est nécessaire pour mieux appréhender les dépenses à prévoir pour l'ensemble des postes de coûts décrits ci-après.

Le coût moyen annuel total de la recharge maîtrisée peut être séparé en deux composantes : coûts d'investissements (ponctuels lors de l'année de réalisation du projet) et coûts opérationnels /ou de fonctionnement (récurrents, à l'échelle annuelle ou pluriannuelle durant toute la durée de vie d'un projet, estimée à 30 ans).

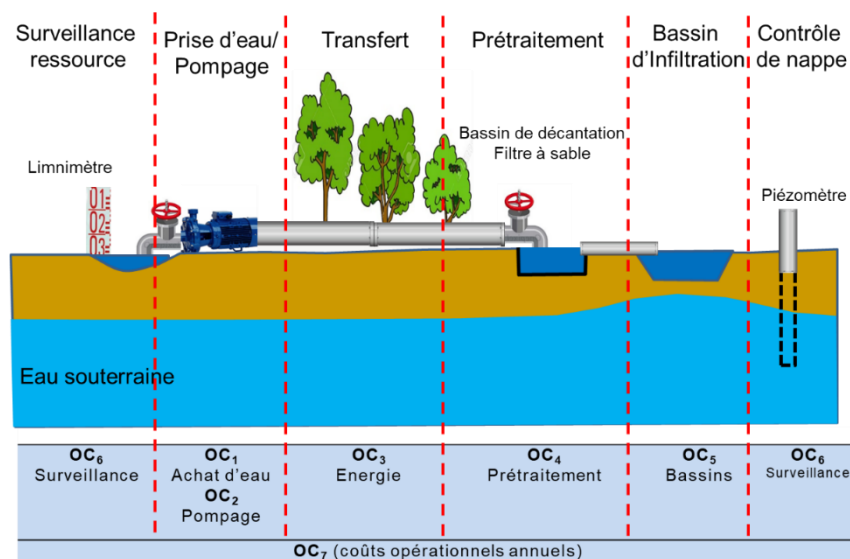
Coûts d'investissement	Coût de fonctionnement
- études préalables - prise d'eau et transfert sur le site de recharge - unités de prétraitement des eaux de recharge - foncier / acquisition de terrains - création des bassins d'infiltration /ouvrages d'injection - coûts annexes (équipements pour contrôle et surveillance des eaux prélevées et dans la nappe), travaux annexes de protection et d'aménagement du site de recharge...)	- achat d'eau - redevance de prélèvement - entretien et maintenance de la prise d'eau et des dispositifs de surveillance - énergie - prétraitement des eaux infiltrées (entretiens, renouvellement matériaux, produits...) - entretien et maintenance des ouvrages d'infiltration - surveillance - autres charges annuelles (charges de gestion administratives et de personnel, charges financières des emprunts d'investissement et assurances...)

Figure 20 : Évaluation des coûts d'un projet de recharge maîtrisée.
Nature des postes à prendre en compte pour les coûts d'investissement et de fonctionnement



CI = couts investissement

Figure 21 – Répartition des coûts d'investissement pour un dispositif de recharge indirecte



OC = coûts opérationnels

Figure 22 : Répartition des coûts opérationnels pour un dispositif de recharge indirecte

Compte tenu du faible nombre de projets de recharge maîtrisée réalisés ces dix dernières années en France, l'approche des coûts de référence sur les principaux postes de dépense parmi ceux mobilisés dans des dispositifs de recharge maîtrisée présentés dans les paragraphes suivants, s'est faite sur la base de coûts observés sur des infrastructures analogues développées en dehors de projets de recharge maîtrisée.

Les prélèvements dans un cours d'eau ou un lac pour la recharge maîtrisée d'un aquifère sont-ils soumis à redevance auprès de l'agence de l'eau ?

L'article L213-10-9 du code de l'environnement relatif aux redevances pour prélèvement sur la ressource en eau précise au point II. 5° que « sont exonérés de la redevance, les prélèvements effectués hors de la période d'étiage, pour des ouvrages destinés à la réalimentation des milieux naturels ». Ainsi seuls les prélèvements hors période d'étiage et régulièrement autorisés (cf. encart précédent sur la réglementation) peuvent être exonérés, sous réserve de fournir les éléments nécessaires démontrant que l'objectif du prélèvement et la constitution d'un stock en nappe vise bien une amélioration des milieux aquatiques en période d'étiage.

Si le volume prélevé dans un cours d'eau hors période d'étiage pour alimenter un aquifère est exonéré dans les conditions exposées ci-avant, les volumes prélevés dans cet aquifère sont, eux, soumis à la redevance.

Éléments de coût d'investissement d'infrastructure d'adduction d'eau

Les informations et données de coût d'investissement de transfert d'eau sont issues de l'observatoire des coûts de l'Agence de l'eau RMC, établi dans le cadre de la circulaire DCE 2007/08 du 16 janvier 2007. L'estimation du coût de référence est basée sur les dossiers subventionnés par les Agences de l'eau entre 1997 et 2009, avec un échantillon de 26 dossiers (17 dossiers sur RMC) à partir desquels une analyse statistique a été réalisée [Tableau 4].

Poste de dépenses d'opération de transfert d'eau	Part moyenne du coût total en % (nombre de dossier)
Ouvrage de captage de la ressource (prise d'eau en rivière, forage, piquage sur une canalisation, etc.)	11,2% (6)
Ouvrage de stockage fonctionnel de reprise (bâche de reprise, stockage tampon, marnage de poste de pompage, etc.)	13,6% (3)
Ouvrage de pompage de transfert (pompe de forage/adduction, pompes prises d'eau/adduction, pompes de reprise, surpresseurs ou accélérateurs en ligne, etc.)	29,9% (18)
Ouvrage de transfert (conduite ou canal), incluant terrassement, génie civil, fourniture et la pose des canalisations, la robinetterie intermédiaire de protection et de maintenance	73,6% (25)
Dépenses annexes : main d'œuvre (MOE, MOA), frais de déclaration réglementaire (Loi sur l'Eau ou DUP) et autres dépenses (frais de chantier, acquisitions foncières, servitudes, branchement EDF, etc.).	10,1% (21)

Tableau 4 - Part des coûts concernant l'adduction d'eau d'un lieu de captage vers un lieu de distribution et d'utilisation (AEP principalement)

Les postes de dépenses en ouvrages de pompages (gravitaires ou sous pression) et de transfert (canalisation ou canal) sont les plus importants et représentent respectivement près de 30% et 74% du coût total. Dans le cas d'une opération de transfert d'eau pour un projet de stockage souterrain, les ouvrages de stockage fonctionnel ou intermédiaire ne sont pas forcément mis en œuvre.

Éléments de coût des procédés de traitement de l'eau brute

Les procédés de traitement de l'eau brute (prise d'eau en rivière) pour la recharge maîtrisée sont, en partie, identiques aux procédés mobilisés pour le traitement et la production d'eau potable. Le coût de traitement des différentes filières dépend de la qualité de pointe de traitement de l'unité de traitement en fonctionnement normal (charge volumétrique en m^3/j). La figure ci-dessous donne des ordres de grandeurs du coût unitaire global (investissement et exploitation) des principales filières [Figure 23].

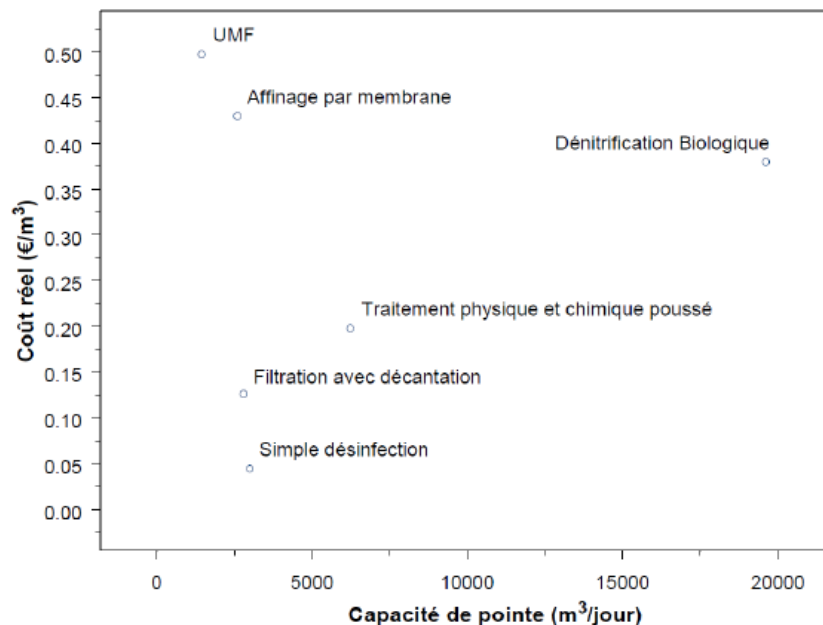


Figure 23 - Ordres de grandeur des coûts unitaires globaux (traitement et exploitation) de différentes filières de traitement (BRGM, 2019)

Les coûts peuvent varier significativement selon l'origine de l'eau brute et la capacité de traitement. Pour les projets de recharge maîtrisée, il convient de retenir, au minimum, les ordres de grandeur suivants :

- Recharge indirecte : $> 0,15 \text{ €/m}^3$ (traitement primaire par filtration avec décantation) ;
- Recharge directe : $> 0,20 \text{ €/m}^3$ (traitements physico-chimique avancé, voire traitement biologique).

Eléments de coût d'investissement des bassins d'infiltration

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.).

Peu d'informations et de données de coût d'investissement des bassins d'infiltration sont disponibles. Cependant ces dispositifs peuvent être assimilés aux ouvrages techniques des retenues collinaires. L'observatoire des coûts de l'Agence de l'eau RMC définit une retenue collinaire « technique » comme tout ouvrage ayant une capacité de stockage inférieure à un million de mètres cubes et dont le coût de réalisation est supérieur de 30% par rapport à une retenue collinaire dite « rustique » (ex : plan d'eau en terre). Pour l'estimation des coûts d'investissement, il est proposé d'assimiler les bassins d'infiltration à des retenues collinaires techniques [Figure 24].

Poste de dépenses des ouvrages de retenues collinaires	Part moyenne du coût total en % (nombre de dossier)
Etude de projet détaillé	10% (14)
Frais de DUP et/ou d'autorisation	2% (10)
main d'œuvre / honoraires	6% (37)
Ouvrage de captage	2% (47)
Retenue et/ou digue	70% (46)
Vidange et évacuateur de crue	11% (43)
Divers / dépenses annexes	8% (47)
Surcoût de prise d'eau (par rapport au coût global)	+32% (8)
Surcoût des retenues techniques (par rapport au coût global)	+30% (8)

Figure 24 - Part moyenne du coût total des postes de dépenses des ouvrages de retenues collinaires

L'estimation du coût de référence est basée sur un échantillon de 8 dossiers sur un total de 47 subventionnés entre 1998 et 2005 et peut être estimé par la fonction suivante :

$$\text{Coût de référence}_{2005}(\text{€}) = 1,30 (\text{€/m}^3) * \text{Capacité} (\text{m}^3) + 47\,000 (\text{€})$$

Cette formulation est actualisée à l'année 2017 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 référence « ouvrages techniques » devient :

$$\text{Coût de référence}_{2017} (\text{€}) = 2,28 (\text{€/m}^3) * \text{Capacité} (\text{m}^3) + 61\,100 (\text{€})$$

2.3.3. Différentes étapes pour la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée

Les principales étapes de la conception et de la mise en œuvre d'un dispositif de recharge maîtrisée sont schématisées dans l'illustration ci-dessous [Figure 25 - Principales étapes de l'évaluation et de la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée, modifié d'après Australian Government (2009)].

- L'étape 1, réalisée « en chambre », consiste à rassembler les informations disponibles (cartes, données spatiales, temporelles, informations géologiques, de forage, besoins en eau...) pour évaluer si le projet est potentiellement envisageable : on l'appellera étude de pré faisabilité. Durant cette étape, les données manquantes doivent être identifiées pour être ensuite collectées durant l'étape 2.
- La 2^{ème} étape consiste à réaliser les mesures et investigations nécessaires sur le terrain pour identifier la solution de recharge maîtrisée et les risques associés. Des mesures préventives sont alors imaginées, simulées et leurs effets évalués. Si le niveau de risques est suffisamment maîtrisé, on peut passer à l'étape 3.
- La 3^{ème} étape consiste à construire le dispositif de recharge (bassin ou forages), à faire des tests de mise en service et à apporter les éventuelles mesures correctrices.
- La 4^{ème} et dernière étape consiste à mettre le dispositif de recharge maîtrisée en service.

Pré faisabilité

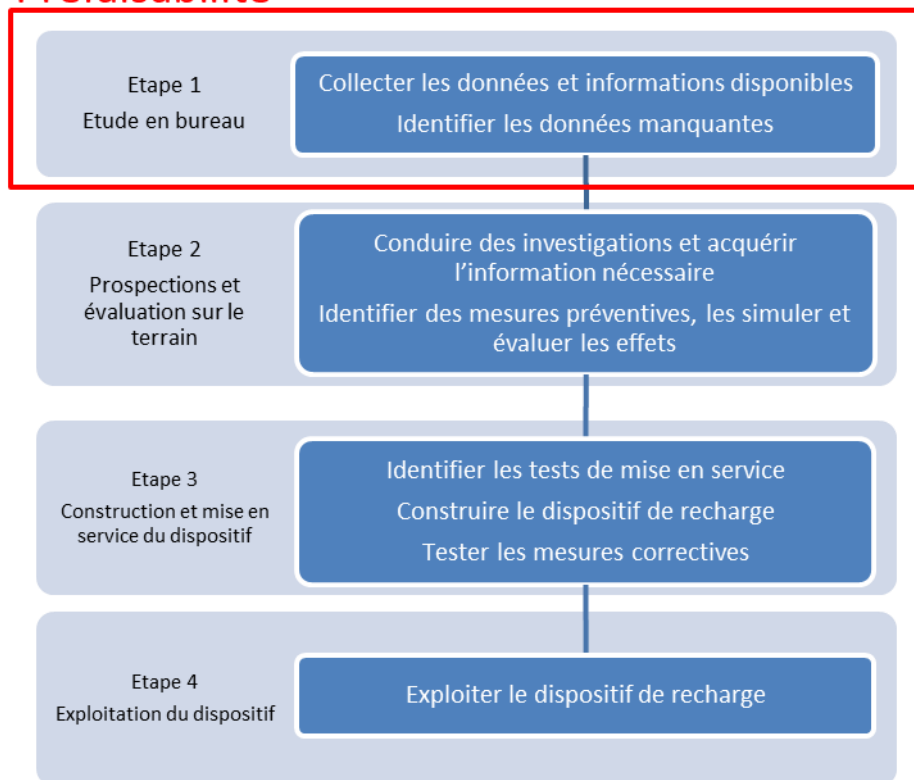


Figure 25 - Principales étapes de l'évaluation et de la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée, modifié d'après Australian Government (2009)

Dans la suite de la présente note, la seule partie concernant l'étude de pré faisabilité est détaillée.

2.3.4. Etude de pré faisabilité d'un projet de recharge maîtrisée d'aquifère

Les potentiels maîtres d'ouvrage doivent commencer par vérifier si les cinq conditions qui suivent sont réunies pour envisager de passer à la réalisation d'un projet de recharge.

Les cinq conditions nécessaires à la réussite d'un tel projet sont les suivantes :

- une demande suffisante en eau pour justifier le projet ;
- une source d'eau adéquate pour la recharge ;
- un aquifère approprié dans lequel stocker et récupérer l'eau ;
- suffisamment d'espace dont le foncier est maîtrisé pour récolter, traiter et infiltrer l'eau ;
- une capacité à gérer efficacement un tel projet d'un point de vue technique (et institutionnel et politique) et économique.

Chacune de ces conditions est détaillée dans la suite du texte.

➤ 1. *Existe-t-il un besoin et quel est l'objectif en volume de la recharge?*

Il est important de rappeler les préconisations du SDAGE Rhône-Méditerranée dans son orientation fondamentale n°7 : avant d'envisager un projet de stockage, il est préconisé en premier lieu d'effectuer des économies d'eau, de mettre en place une répartition équilibrée des prélèvements, de maîtriser les nouvelles demandes de prélèvements et d'optimiser les infrastructures existantes. Si ces efforts ne suffisent pas, le recours à des ressources de substitution comme la recharge maîtrisée peuvent être envisagées pour réduire les pressions sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques, si les équilibres hydrologiques, biologiques et morphologiques ne sont pas mis en péril par cette action.

Par la suite, il est nécessaire d'identifier pour quel(s) objectif(s) (mentionnés dans la partie 2.1) la recharge maîtrisée est envisagée : assurer un stockage d'eau supplémentaire, restaurer ou maintenir le bon état quantitatif d'une masse d'eau déjà en tension, anticiper une baisse de recharge d'une nappe sous l'effet du changement climatique, améliorer ou restaurer la qualité des eaux d'une nappe, contrer une intrusion saline dans un aquifère côtier, soutenir indirectement le débit d'étiage d'un cours d'eau et/ou de sources l'alimentant, améliorer le niveau piézométrique d'une nappe pour préserver ou restaurer des zones humides...

Enfin, le besoin doit être quantifié, en estimant le volume de recharge souhaitable en fonction de l'objectif poursuivi. La méthode d'évaluation de ce volume est à adapter en fonction de l'objectif à atteindre, des caractéristiques de l'aquifère à recharger et notamment de la dynamique de la nappe et des éventuelles pertes d'une partie des eaux rechargées vers les exutoires naturels de la nappe.

➤ 2. *Existe-t-il une ressource en eau disponible et pouvant supporter de nouveaux prélèvements ?*

Les sources d'eau de recharge peuvent être de deux types : soit des eaux puisées dans les cours d'eau ou plans d'eau, soit des eaux usées traitées.

En France, les conditions de réutilisation des eaux usées traitées sont nouvellement définies par le décret n° 2022-336 du 10 mars 2022 relatif aux usages et aux conditions de réutilisation des eaux usées traitées. Faute de consignes claires, on examinera donc en premier lieu, la disponibilité de la ressource superficielle en fonction des contraintes environnementales et ensuite de ses caractéristiques chimiques.

Pour les prélèvements en cours d'eau, ils devront être réalisés en période de moyennes ou hautes eaux pour ne pas impacter les milieux aquatiques. Le débit de prélèvement maximum sera fixé de manière à garantir des niveaux d'écoulement et une dynamique hydrologique suffisants dans le cours d'eau pour le bon fonctionnement biologique des communautés aquatiques. Il s'agira aussi d'éviter l'aménagement de nouveaux seuils en travers pour alimenter les prises d'eau, en privilégiant des dispositifs de prélèvement par surverse latérale alimentant des bassins de mise en charge, lorsque cela est possible.

De point de vue de la qualité de la ressource envisagée pour la recharge, il s'agira de vérifier la qualité chimique et bactériologique des eaux, leur charge en matière en suspension, leur turbidité ... et l'évolution des différents paramètres dans le temps. En l'absence de données disponibles, des analyses devront être effectuées durant les périodes envisagées pour la mise en opération du système.

En premier filtre, concernant les eaux de surface, les paramètres physico-chimiques de l'état écologique doivent être en état *très bon*, *bon*, voire *moyen* (les seuils considérés pour qualifier l'état écologique des eaux de surface en application de la DCE sont basés sur la vie des organismes aquatiques dans ces eaux, seuils plus stricts que ceux considérés pour l'état chimique des eaux souterraines, basés sur les seuils sanitaires pour l'alimentation en eau potable), et l'état chimique doit être au moins équivalent à *bon*..

Il s'agira également de vérifier la compatibilité des faciès chimiques entre les eaux de recharge et l'eau souterraine native pour pouvoir adapter par traitement les caractéristiques des eaux à infiltrer si besoin pour préserver les équilibres physico-chimiques et réduire les risques de mise en solution de certains éléments ou de colmatage par précipitation.

➤ 3. *L'aquifère est-il favorable pour le stockage et la récupération de l'eau ?*

Les paramètres permettant d'évaluer si un aquifère est favorable à l'implantation d'un projet de recharge maîtrisée ont été listés dans la partie 2.3.1. De manière plus globale, à l'échelle des entités et masses d'eau, le BRGM a développé une méthode de cartographie de l'évaluation de la faisabilité de la recharge maîtrisée à l'échelle des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse et déclinée par régions, sur la base de critères physiques, avec une identification des secteurs les plus favorables à la mise en place d'un dispositif. La méthode d'analyse du BRGM, complétée par l'Agence de l'eau RMC, est présentée dans la partie 3.

Il faut toutefois préciser qu'il s'agit d'une carte générale qui apporte une première information à l'échelle régionale. La faisabilité devra nécessairement être évaluée de façon plus précise par une étude spécifique à l'échelle du site envisagé, car elle dépend fortement du contexte hydrogéologique local.

➤ 4. *Existe-t-il un espace disponible suffisant pour la prise, le traitement et l'infiltration de l'eau ?*

Les contraintes principales sont liées à l'occupation du sol. Une méthode d'analyse multicritères de la potentialité de la recharge maîtrisée indirecte vis-à-vis des critères de contrainte a été développée par le BRGM. Les critères de contrainte à l'échelle d'un territoire sont résumés dans l'illustration suivante [Tableau 5].

Critères de Contraintes	
Occupation du sol (CLC)	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)	Ces secteurs ne sont pas favorables à la recharge artificielle.
Débordement de nappe	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 recharge artificielle.
Zones protégées	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. Terrains sans zones protégées plus favorables à la recharge artificielle, mais recharge artificielle possible dans des zones protégées pour des objectifs de protection de faune, des zones humides, etc....

Tableau 5 - Tableau récapitulatif des données de contrainte liées à l'occupation du sol à l'échelle d'un territoire (BRGM, 2019)

➤ 5. *Résumé des questions à aborder lors de l'élaboration d'un projet de recharge maîtrisée et points à étudier lors de la réalisation de l'étude de faisabilité du projet*

Les différentes questions à se poser lors de l'élaboration d'un projet de recharge maîtrisée sont résumées ci-dessous :

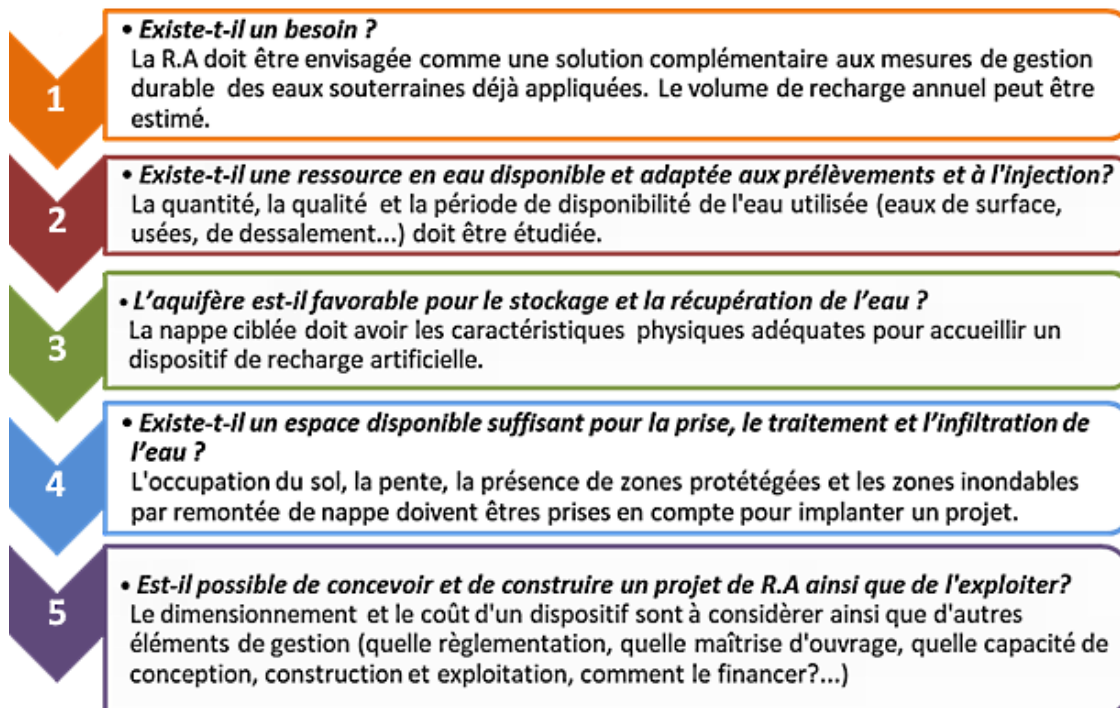


Figure 26 - Liste de contrôle pour déterminer, en phase de préfaçabilité, s'il y a lieu d'entreprendre un projet de recharge artificielle (R.A) d'un aquifère (adapté d'Australian Government, 2009 dans BRGM, 2019)

Si les éléments nécessaires à la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée sur un territoire sont favorables, une étude de faisabilité pourra être engagée en s'appuyant sur les compétences de bureaux d'études afin de valider plusieurs éléments, parmi lesquels :

- estimation des capacités d'infiltration des sols au moyen de tests d'infiltration in-situ ;
- vérification de l'ampleur du dôme piézométrique attendu, en fonction des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère rechargé ;
- évaluation du devenir de l'eau infiltrée au moyen de modèles numériques et/ou solutions analytiques ;
- vérification de la longueur des conduites nécessaires, en tenant compte des sinuosités éventuelles ;
- évaluation des prétraitements nécessaires, en fonction de la qualité de l'eau prélevée ;
- estimation des potentiels problèmes de colmatage, en fonction de la turbidité de l'eau prélevée et du développement algal ;
- évaluation des coûts d'investissement et des coûts opérationnels... ;
- estimation des gains prévisibles par rapport à l'objectif initial ayant motivé la recharge maîtrisée.

2.3.5. Apprécier l'opportunité économique de la solution de recharge maîtrisée

Une fois la solution technique précisée en termes de faisabilité et de coûts d'investissements, le choix du recours in fine à un projet de recharge maîtrisée doit être confronté à son opportunité économique pour notamment rétablir l'équilibre quantitatif dans le cadre d'un PTGE. Pour l'apprécier, il est recommandé de mener une analyse coûts-bénéfices qui vient mettre en balance les coûts induits par le projet au-delà des seuls investissements (coûts indirects sur des usagers du territoire) avec les bénéfices attendus pour le territoire au regard de l'objectif d'équilibre quantitatif.

Cette analyse pourra s'appuyer sur l'approche proposée par INRAE pour conduire l'analyse économique des projets de territoires, accessible par le lien suivant : <https://www.inrae.fr/actualites/analyse-economique-financiere-projets-territoire-gestion-leau-ptge-composante-agricole>

3. Analyse spatiale multicritères sur l'aptitude des aquifères des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse à pouvoir accueillir des projets de recharge maîtrisée par bassins d'infiltration

Une méthode de calcul permettant de cartographier les territoires favorables à l'implantation de la recharge maîtrisée sur les bassins Rhône-Méditerranée et de Corse a été développée par le BRGM en 2019 à partir de différentes couches SIG, notamment la BD LISA⁴. Cette base de donnée classe les systèmes aquifères selon plusieurs critères : « Nature » (qui permet de caractériser si la formation est aquifère ou non), « État » (caractère libre ou captif de la nappe), « Thème » et « Milieu » (qui décrit la nature géologique de l'aquifère et si le milieu est poreux, karstifié ou fracturé). Ces critères sont caractérisés par des codes fournissant leur description [Figure 27].

⁴ La BDLISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) est un référentiel cartographique du Système d'Information sur l'Eau. Cette base de donnée classe le sous-sol en entités hydrogéologiques qui sont décrites selon différentes propriétés : aquifère ou imperméable, écoulements libres ou captifs, milieu poreux, fracturé, karstique...

« Nature »	« Etat »	« 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	-	-	-

Figure 27 - Présentation des codes utilisés pour la BDLISA en fonction des critères (Sandre, 2015)

Par la suite, le BRGM a standardisé les codes des critères sur une échelle allant de 0 (défavorable à la recharge maîtrisée) à 4 (favorable à la recharge maîtrisée) [Figure 28].

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

Figure 28 - Mise en relation des codes et valeurs décrivant des critères physiques de la BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge maîtrisée indirecte (BRGM, 2019)

La valeur des notes de chaque critère est utilisée pour former une carte générale de la note globale du critère physique de la BDLISA. Les critères « Nature » et « Milieu » ont été jugés les plus importants, le poids de leur note dans l'équation a donc été doublé (équation 1):

$$BDLISA = (2 \times \text{Nature} + 1 \times \text{Etat} + 2 \times \text{Milieu} + 1 \times \text{Thème})/6$$

Par la suite, le critère physique BDLISA a été combiné avec d'autres couches SIG (pente, IDPR et épaisseur de la ZNS) auxquelles ont été attribuées des notes de manière similaire à la méthode utilisée pour les critères de la BDLISA. L'IDPR est l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, et décrit la capacité d'infiltration ou de ruissellement des formations. La zone non saturée (ZNS) correspond à la partie d'une formation aquifère située au-dessus d'une nappe libre et traduit la capacité de stockage supplémentaire de cet aquifère. La carte de la faisabilité de la recharge maîtrisée, d'après les critères physiques cités précédemment, a par la suite été obtenue par l'équation suivante (équation 2):

$$\text{Critères Physiques} = (4 \times BDLISA + 2 \times \text{Pente} + 2 \times IDPR + 1 \times ZNS)/9$$

De la même manière, des coefficients multiplicatifs ont été attribués aux critères physiques en fonction de leur importance, suite à un atelier rassemblant le comité de pilotage de l'étude et des représentants du BRGM.

Par la suite, la notation de la carte obtenue a été modifiée par l'Agence de l'eau RMC pour introduire davantage de discrimination dans la production de la carte des critères physiques, et pour différencier les entités hydrogéologiques de type alluvions en fonction de la nature des formations constituant l'aquifère. Des valeurs de perméabilité et d'emménagement des entités issues de l'atlas hydrogéologique des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse ont été utilisées pour modifier la note des critères physiques en prenant en compte un nouveau critère, « Paramètres Aquifères », défini à partir de différentes entités des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse présentées en Figure 17 de manière à discriminer au mieux les formations alluviales anciennes, récentes et de type molassique ou sableuse [Figure 29].

Classe	Défavorable	Très peu favorable	Peu Favorable	Relativement Favorable	Favorable
Note attribuée	0	1	2	3	4
Type de critère					
K	$K < 10^{-6}$	$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	$K > 10^{-2}$ et $10^{-4} \leq K < 5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} \leq K \leq 10^{-2}$
S	$S < 0,01\%$	$0,01\% < S \leq 0,1\%$	$0,1\% < S \leq 1\%$	$1\% < S \leq 3\%$	$3\% < S$

Figure 29 - Notation de la faisabilité de la recharge maîtrisée en fonction des valeurs de K et S

La méthode utilisée est la suivante.

- Lorsque les données (K conductivité hydraulique en m/s et S porosité efficace ou coefficient d'emménagement) sont disponibles sur l'atlas hydrogéologique des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse, une note « paramètres aquifères » est calculée pour les entités de nature alluviale.
- La note « Paramètres aquifères » de l'entité est comparée à la notation de la carte de faisabilité de la recharge maîtrisée indirecte (Critères physiques) :
 - si « Paramètres aquifères » ≤ 3 et « Critères physiques » = 4, la note de l'entité est ramenée à 3,
 - si « Paramètres aquifères » = 4 et « Critères physiques » = 3, la note de l'entité est ramenée à 4,
 - si « Paramètres aquifères » = « Critères physiques », la note de l'entité n'est pas modifiée,
 - si « Critères physiques » < 3, la note de l'entité n'est pas modifiée.
- Si seule la donnée de perméabilité est disponible pour une entité, une valeur moyenne de S de 10% est attribuée automatiquement afin de calculer le critère « paramètres aquifères », sans que cela n'influence la note finale. En effet cette valeur (associée à une note de « 4 » pour le critère S) n'a pas d'incidence sur la notation finale de la carte. En effet, Si $K \leq 3$ et $S = 4$, « Paramètres aquifères » ≤ 3 et la notation de l'entité sera par conséquent ramenée à 3 sur la nouvelle carte des critères physiques. Cependant, si une valeur de S est faible (Note de $S \leq 2$), la note « Paramètres aquifères » associée peut être déclassée si la différence entre la note de K et S est supérieure ou égale à 2. De cette manière, le critère S n'a une influence sur la note finale que si une donnée d'emménagement est disponible et que cette valeur est faible.
- Enfin, la notation des entités de nature sédimentaire reste inchangée, puisqu'une majeure partie de ces formations est notée « peu favorable » à « défavorable ».

Toutes les entités situées en milieu sédimentaire karstique ont été notées en « défavorable ». Ces milieux sont classés ainsi en raison de l'organisation de leur drainage sous la forme de réseaux de conduits souterrains très transmissifs conduisant à une évacuation rapide de l'eau infiltrée vers les exutoires, rendant ce type de milieux défavorable au stockage. Des cartes de faisabilité ont ainsi été créées à l'échelle des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse, et pour chaque région [Figure 30 et Annexes 1 à 5].

Les couches créées sur système d'information géographique, à partir de l'exploitation des données évoquées sont accessibles en ligne à l'adresse <http://carmen.carmencarto.fr/283/RA-AERMC.map>

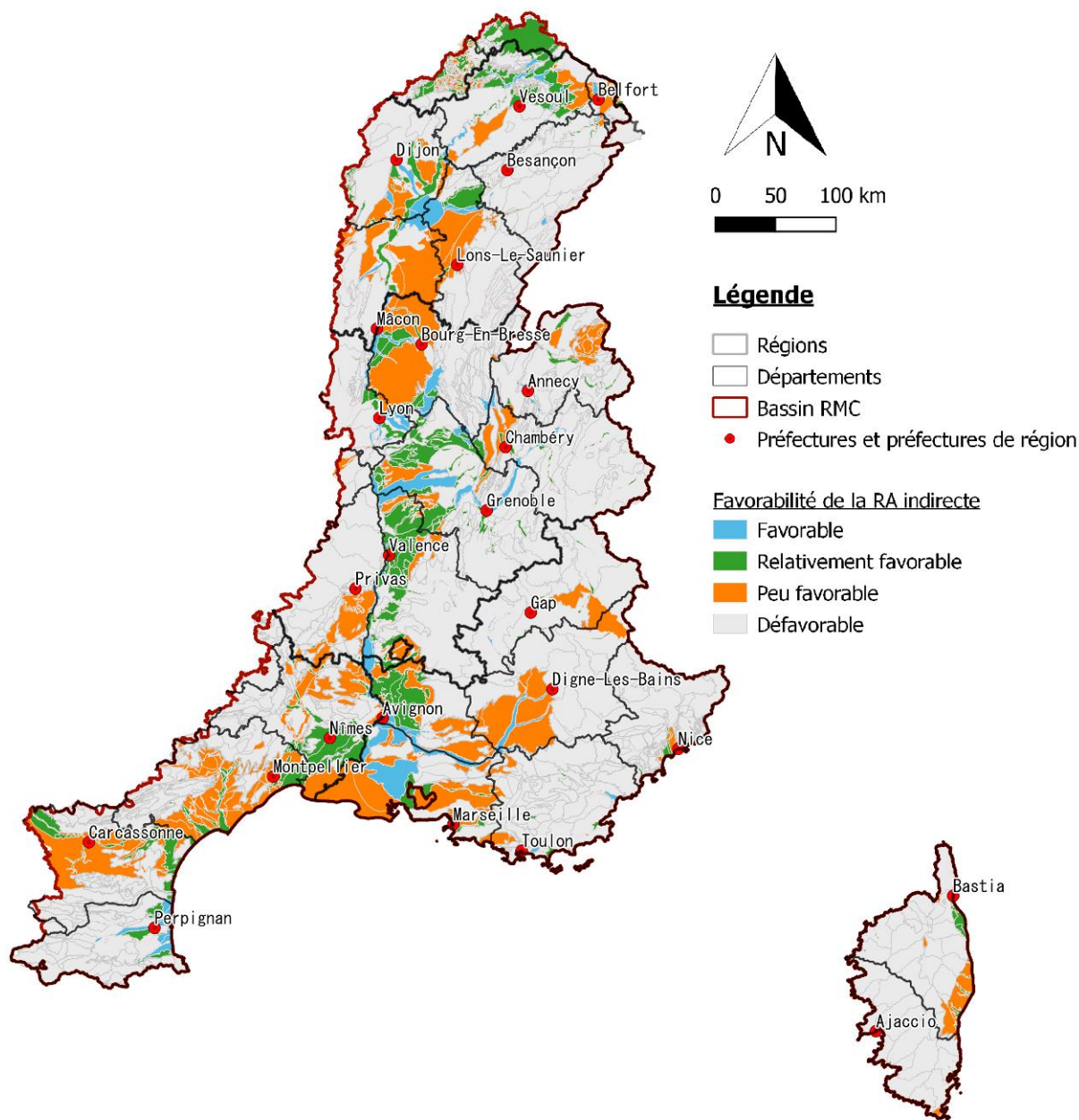


Figure 30 - Carte de la faisabilité de la recharge maitrisée indirecte à l'échelle des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse- Critères physiques

Il faut garder à l'esprit que cette approche est très macroscopique et qu'elle ne permet pas de fournir une vision précise de la faisabilité de la recharge. Il est ainsi possible que certaines entités que la méthode indiquerait comme favorables à la recharge maîtrisée indirecte s'avèrent en réalité moins propices, et inversement. On ne tient compte en effet dans la méthode que d'un nombre de paramètres réduit et de données relativement peu nombreuses.

Dans les annexes qui suivent sont présentés les résultats des différents croisements réalisés sous la forme de **cartes régionales** avec un bref commentaire sur les résultats obtenus. Il est important de souligner que **ces cartes donnent uniquement une information sur la possibilité de la formation géologique à recevoir un projet de recharge maîtrisée sans aborder la question de la possible récupération de l'eau infiltrée par les cours d'eau adjacents** ni la question du besoin et de l'intérêt que pourrait présenter l'implantation de dispositifs de recharge sur les territoires.

4. Conclusions et perspectives

Les projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) mis en place en particulier sur les territoires soumis à un déséquilibre entre la ressource et les besoins des usages et des milieux du bassin Rhône-Méditerranée permettent de définir et mettre en œuvre les actions de partage de la ressource en privilégiant les économies d'eau afin de résorber des déséquilibres déjà constatés ou de maintenir dans la durée l'équilibre entre la ressource et les besoins des usages et des milieux, en tenant compte des effets du changement climatique. En cas de ressources insuffisamment abondantes, malgré les efforts accomplis, ces plans peuvent envisager la mise en place de solutions de substitution aux prélèvements directs dans les milieux naturels sous tension. Parmi ces solutions, la recharge maîtrisée des aquifères, lorsque les conditions hydrogéologiques s'y prêtent, mérite d'être étudiée, en particulier dans le contexte actuel du changement climatique qui conduit à une réduction des volumes d'eau issus des précipitations rejoignant les nappes souterraines et les cours d'eau avec une pression des usages devenant plus forte, en proportion, sur les milieux aquatiques.

De multiples territoires du bassin Rhône-Méditerranée présentent des contextes hydrogéologiques favorables à la mise en place de solutions de recharge avec à proximité des ressources en eau de surface potentiellement mobilisables pour la recharge des nappes. Sur les territoires pour lesquels les économies d'eau ne suffiraient pas à rétablir ou maintenir un équilibre entre les ressources et les besoins des usages et des milieux, ces solutions peuvent présenter un certain nombre d'avantages par rapport au stockage d'eau en surface : économie d'espace, plus faible évaporation, épuration naturelle des eaux infiltrées, investissements plus réduits.

Ces solutions peuvent générer des bénéfices variés en contribuant à une gestion active et intégrée du cycle de l'eau à l'échelle d'un territoire.

Les projets de recharge doivent toutefois faire l'objet d'une évaluation précise de leurs avantages et inconvénients en intégrant l'ensemble des éléments du cycle de l'eau et des services/bénéfices que ces solutions peuvent rendre.

La présente note aborde l'étude de la préfaisabilité d'une solution de recharge indirecte à partir d'eau de surface sur une entité hydrogéologique identifiée préalablement comme favorable, sur la base d'une étude « en chambre » valorisant les données existantes. Cette démarche se situe donc à l'amont de la mise en œuvre d'une solution de recharge et, si ses conclusions s'avèrent positives, doit déboucher sur une étude de faisabilité menée par un bureau d'études qui devra valider les hypothèses réalisées grâce à de nouvelles études sur les secteurs pré-identifiés.

Table des illustrations

Figure 1 - Arbre de décision proposé pour évaluer l'intérêt d'étudier la mise en place d'une solution de recharge maîtrisée d'aquifères dans le cadre d'un PTGE.....	5
Figure 2 - Schéma conceptuel du dispositif de recharge maîtrisée directe et indirecte.....	8
Figure 3 - (a) Carte du réseau hydrographique (en bleu) et des zones de gestion actives en blanc (AMA). Les bassins en vert sont des zones irriguées sans accès aux eaux de surface du « Central Arizona Project » (en jaune). Les points colorés indiquent les secteurs où s'effectue la RM utilisant de l'eau issue du CAP (en bleu), de rejets d'eaux usées (en marron) et des deux sources avec parfois une utilisation d'eau de surface locale (vert). (b) Photographie aérienne du "Central and Southern Avra Valley Storage Project" (CAVSARP et SAVSARP) avec bassins d'infiltration (nord et sud) et zone irriguée (au centre) par le projet, Tucson AMA	10
Figure 4 - Moyenne du niveau de l'eau mesuré avec recharge maîtrisée (bleu) et modélisé sans recharge maîtrisée (rouge) dans le « Arvin-Edison Water Storage district », opérationnel depuis 1960. L'aquifère rechargé est presque isolé hydrologiquement par les montagnes environnantes, ce qui limite les pertes des eaux injectées.	10
Figure 5 - Volumes d'eau annuels utilisés pour l'irrigation, « Conjonctive Use » et recharge maîtrisée (MAR) au cours du temps pour de l'eau prélevée dans le Colorado via le «Central Arizona Project » (CAP), et pour des eaux usées traitées (Municipal Waste Water, MWW) dans l'Arizona. On remarque ici l'accroissement de l'usage conjoint des eaux de surface et souterraines au début des années 1992, puis de la recharge maîtrisée en 1994.....	10
Figure 6 - Vue en plan du projet.....	11
Figure 7 - Schéma de la nappe du bas Gapeau avant et après la mise en place du dispositif de recharge maîtrisée indirecte (Lyonnaise des Eaux, 2014).....	12
Figure 8 - Niveaux piézométriques avant et après la mise en fonctionnement des dispositifs d'Aqua Renova.....	12
Figure 9 - Planche photo du bassin d'infiltration en fonctionnement lors des essais de qualification en 2015.....	13
Figure 10 - Plan schématique du champ captant de Crépieux-Charmy (Casanova et al., 2012).....	14
Figure 11 – Vue du remplissage d'un bassin d'infiltration (a) et d'une tranchée dans le fond d'un bassin d'infiltration (b) (Loizeau 2013)	15
Figure 12 - Granulométrie réalisée sur le fond des bassins d'infiltration du site de captage de	15
Figure 13 - Plaine d'Allex (26) – Expérience de recharge de l'aquifère.....	16
Figure 14 - Comparaison des gains de débits de la Drôme à Livron et au Seuil des Pies avec recharge de la	17
Figure 15 - Principe de la réalimentation de l'Ile des Graviers.....	19
Figure 16 - Propriétés des aquifères généralement retenues favorables pour la recharge maîtrisée indirecte (BRGM, 2018).....	20
Figure 17 - Paramètres hydrodynamiques moyennés pour différentes entités sédimentaires du bassin Rhône-Méditerranée.....	21
Figure 18 - Schéma simplifié d'un dispositif type de recharge maîtrisée par bassin d'infiltration (BRGM, 2019).....	22
Figure 19 – Résultat graphique de l'estimation de dômes piézométriques : exemple du site de Bièvre-Liers-Valloire (région AURA) selon la solution analytique de Hantush (BRGM, 2019)	23
Figure 20 : Évaluation des coûts d'un projet de recharge maîtrisée.....	27
Figure 21 – Répartition des coûts d'investissement pour un dispositif de recharge indirecte.....	27
Figure 22 : Répartition des coûts opérationnels pour un dispositif de recharge indirecte.....	28
Figure 23 - Ordres de grandeur des coûts unitaires globaux (traitement et exploitation) de différentes filières de traitement (BRGM, 2019).....	29
Figure 24 - Part moyenne du coût total des postes de dépenses des ouvrages de retenues collinaires .	30
Figure 25 - Principales étapes de l'évaluation et de la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée, modifié d'après Australian Government (2009).....	31

Figure 26 - Liste de contrôle pour déterminer, en phase de pré faisabilité, s'il y a lieu d'entreprendre un projet de recharge artificielle (R.A) d'un aquifère (adapté d'Australian Government, 2009 dans BRGM, 2019).....	34
Figure 27 - Présentation des codes utilisés pour la BDLISA en fonction des critères (Sandre, 2015) .	36
Figure 28 - Mise en relation des codes et valeurs décrivant des critères physiques de la BDLISA, avec la notation de faisabilité de la recharge maîtrisée indirecte (BRGM, 2019)	36
Figure 29 - Notation de la faisabilité de la recharge maitrisée en fonction des valeurs de K et S	37
Figure 30 - Carte de la faisabilité de la recharge maitrisée indirecte	38
Tableau 1- Comparaison des propriétés des solutions de stockage d'eau en surface avec celles de stockage en aquifère.	6
Tableau 2 - Comparaison des valeurs de précipitation et d'évaporation sur la période automnale et hivernale	25
Tableau 3 - Exemples de dimensionnement de différents dispositifs de recharge maîtrisée, sur quelques sites opérationnels en France et dans le monde (BRGM, 2018)	26
Tableau 4 - Part des coûts concernant l'adduction d'eau d'un lieu de captage vers un lieu de distribution et d'utilisation (AEP principalement).....	29
Tableau 5 - Tableau récapitulatif des données de contrainte liées à l'occupation du sol à l'échelle d'un territoire (BRGM, 2019).....	34

Références

Nous présentons ici les références essentielles utilisées pour la rédaction de cette note.

Le document de référence à consulter par le lecteur est le rapport du BRGM publié en 2019, signé de Maréchal J-C., Bouzit M., Caballero Y., Moiroux F., qui figure en gras dans la liste ci-dessous et qui donne les recommandations pour l'analyse de la préfaisabilité de la recharge de la nappe au moyen d'eau de surface.

ANSES, 2016. *Risques sanitaires liés à la recharge artificielle de nappes d'eau souterraine*, Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Saisine n°2012-SA-0255., <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2012SA0255Ra.pdf>

Australian Government, 2009, *Australian Guidelines for Water Recycling. Managed Aquifer Recharge*. National water quality management strategy. Document No 24. (July).

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 final BRGM/RP-67534-FR, 162p. Il est cité (BRGM, 2018) dans cette note.

Casanova J., Cagnimel M., Devau N., Pettenati M., Stollsteiner P., 2013. *Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives*. Rapport final, 227p.

Detay M., 1997. *La gestion active des aquifères*, 440 p, ed. Masson.

Dillon P., Pavelic P., Page D., Beringer H. and Ward J., 2009. *Managed Aquifer Recharge : An introduction*, Waterlines Report No 13, Feb 2009.

Idées Eaux, 2012. *Résultats de la modélisation hydrodynamique sur la plaine d'Allex : Simulation de pompage et de recharge artificielle de la nappe alluviale*. Rapport d'étude, 11p.

Idées Eaux, 2011. *Suivi de l'influence d'un prélèvement dans la Drôme et sa nappe d'accompagnement – Simulations par modélisation mathématique*. Rapport d'étude, 69p.

Loizeau S., 2013. *Amélioration de la compréhension des fonctionnements hydrodynamiques du champ captant de Crépieux-Charmy*. Thèse, université de Grenoble, 220p.

Lyonnaise des eaux, 2014. *Aqua Renova à Hyères, un dispositif de réalimentation de la nappe phréatique unique en Provence Alpes Côte d'Azur*. Dossier de presse, 11p.

Maréchal J-C., Bouzit M., Caballero Y., Moiroux F., 2019. *Recommandations pour l'analyse de la préfaisabilité de la recharge de la nappe au moyen d'eau de surface : application au bassin RMC*. Rapport final BRGM/RP-69662-FR, 86p. Il est cité (BRGM, 2019) dans cette note.

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-69551-FR, 180p.

Scanlon B.R, Reedy R.C, Faunt C.C, Pool D. and Uhlman K., 2016. *Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona*. Environmental Research Letters, Volume 11, Number 3, 17p.

ANNEXES

ANNEXE 1 – Estimation des surfaces de bassin d'infiltration nécessaires.

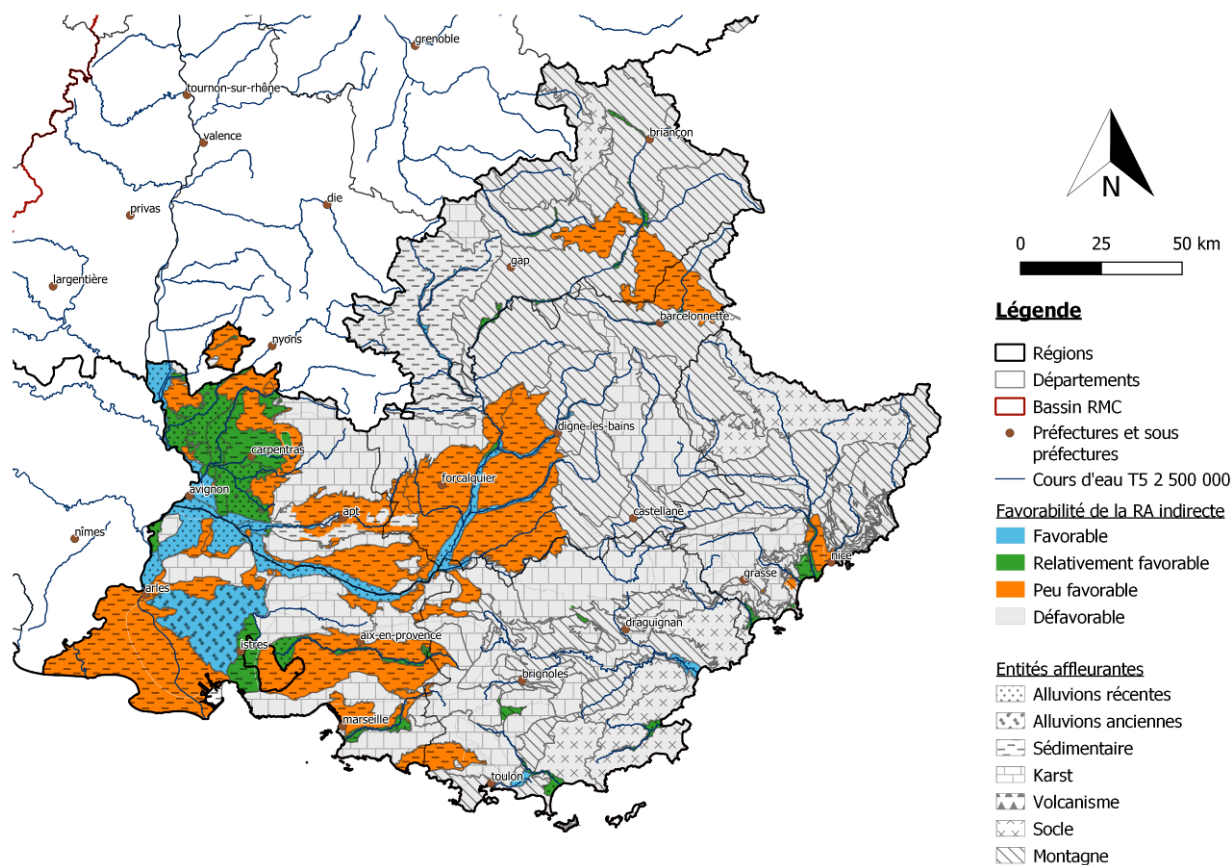
On présente ci-dessous l'estimation de la surface de bassin(s) d'infiltration nécessaire pour un objectif de recharge de 1 million de mètre-cubes par an, pour différentes valeurs d'infiltration et en fonction du nombre de jour disponible pour l'approvisionnement en eau de surface et son infiltration.

On indique également les débits qu'il est nécessaire de prélever dans les eaux superficielles pour satisfaire ces volumes de recharge en fonction du nombre de mois sur lesquels pourront être réalisés les prélèvements.

Capacité d'infiltration du(des) bassin(s) (en m/j)	Durée et période de prélèvement et de fonctionnement du dispositif de recharge	Volume moyen de prélèvement nécessaire dans le cours d'eau ou plan d'eau (m3/s)	Surface de bassin en nécessaire (en m ²) pour 6 mois d'infiltration	Précision période de prélèvement dans une eau de surface	Volume moy. de prél. nécessaire dans le cours d'eau ou plan d'eau (m3/s)	Surface de bassin nécessaire en m ² – pour 5 mois d'infiltration soit 151 j
0.5	6 mois (soit 181 j) de mi oct. à mi avril	0.064	11050	5 mois complets (soit 151 j) de nov. à mars	0.077	13245
1		"	5525		"	6623
2		"	2762		"	3311
2.5		"	2210		"	2649

ANNEXE 2 - Cartes et commentaires sur la faisabilité de la recharge maîtrisée indirecte (par bassins d'infiltration) par région

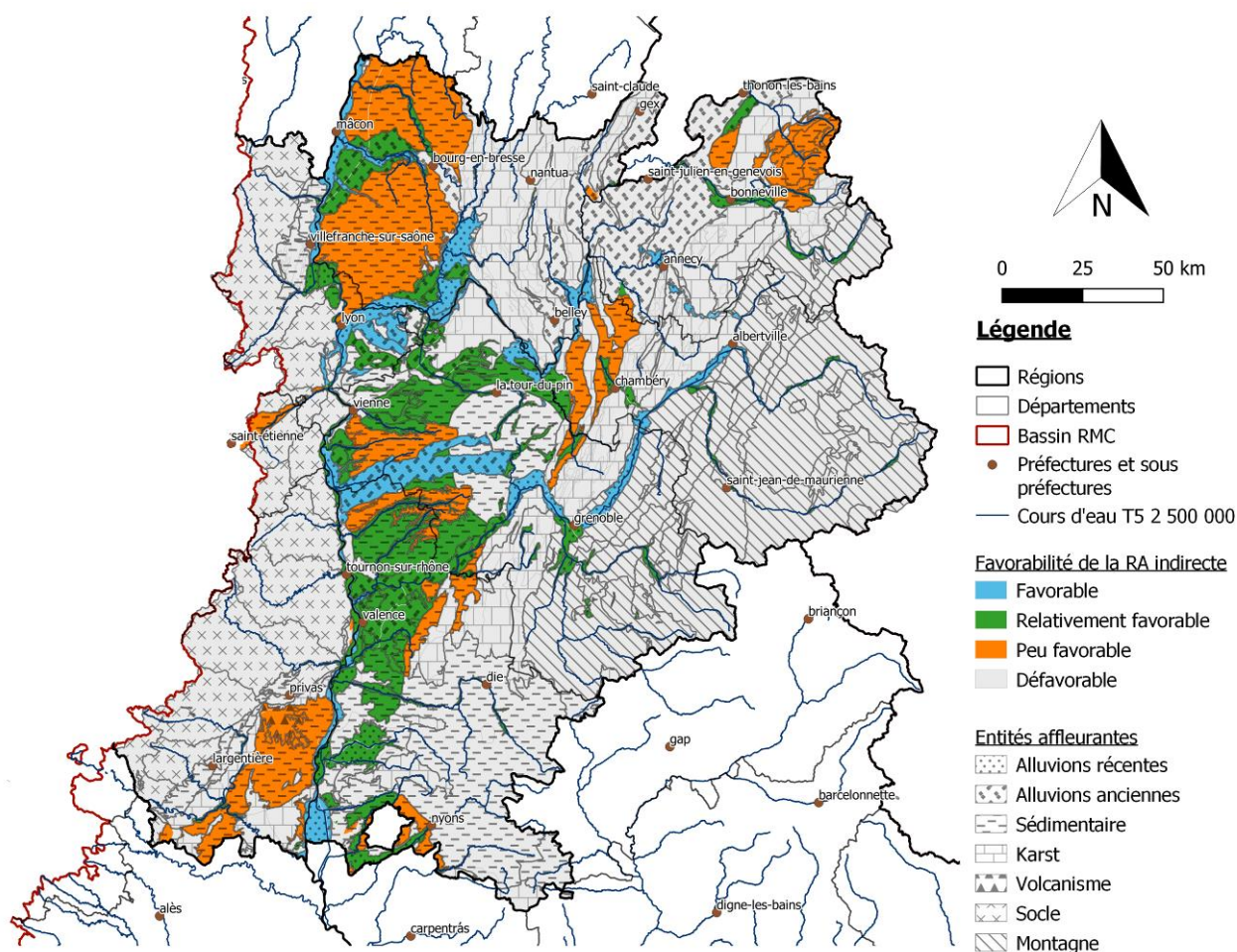
1. Carte de faisabilité de la recharge maîtrisée - Région PACA



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 maîtrisée indirecte (sauf pour les alluvions récentes de la Guisane, ainsi que celles de Haute-Durance et de l'Ubaye et les alluvions du Haut Drac (en situation relativement favorable seulement)). 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, de la Nesque et de Graveson-Maillane, de la moyenne et de la basse Durance avec dans la partie amont les alluvions récentes du Buëch, de la Bléone et de l'Asse, et du Rhône de Tarascon à Arles ; ou du littoral méditerranéen avec, d'ouest en est, les alluvions récentes de l'Arc, du Gapeau, de l'Argens et de la plaine de l'Eygoutier. Les alluvions de l'Huveaune, de la Giscle et de la Môle, de la Siagne et de la basse vallée du Var et des Paillons apparaissent un peu moins favorables que les précédentes pour des questions de valeur d'infiltration déduites de l'IDPR moins favorable et/ou de profondeur trop faible de la ZNS. Les cailloutis plio-quaternaires de la plaine de la Crau se présentent comme favorables à la recharge maitrisée indirecte.

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 et les sables blancs cénomaniens de Bédoin-Mormoiron.

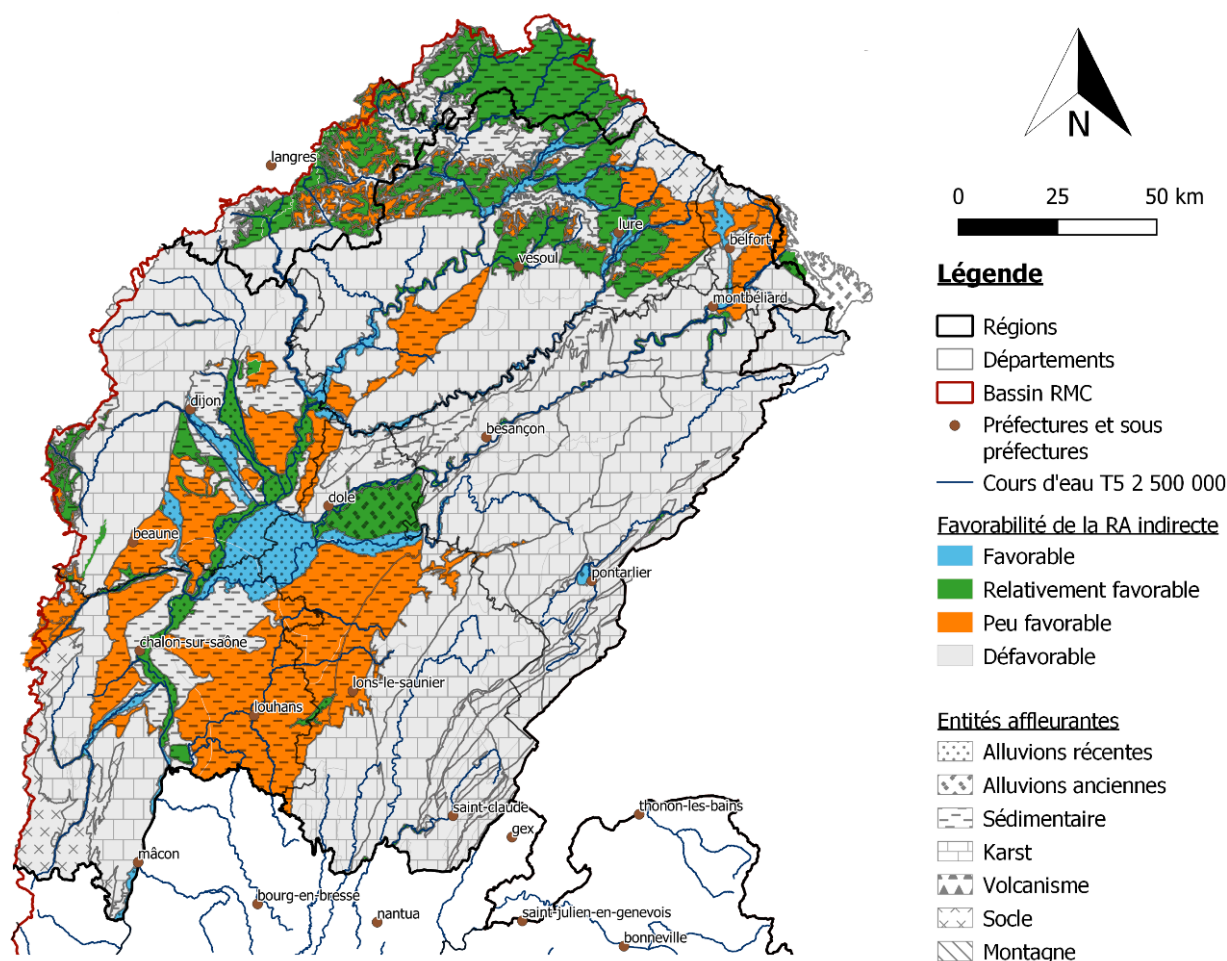
2. Carte de faisabilité de la recharge maîtrisée - Région Auvergne Rhône-Alpes



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 et de l'Isère. D'autres secteurs 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'Arly, de la Fure, de l'Ainan, de la Morge, de la Veyle, de la Chalaronne et de la vallée du Bréda. Parmi les entités alluviales classées comme relativement favorables, on trouve les alluvions du Giffre, du Drac, de la Bourbre, du Roubion, de Jabron, de Chantabot, des Rivoires, du Catelan, de la Roizonne, de l'Arve, de la Romanche, de la Bonne, de la rive droite du Rhône, entre la confluence de la Drôme et celle de la Saône, 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. Les alluvions anciennes de la plaine de l'Isère et de Valence apparaissent moins favorables en termes de perméabilité. Un certain nombre de systèmes alluvionnaires de moindre importance sont aussi en situation relativement favorable : les alluvions de la Reyssouze, de l'Azergues et de la Brévenne.

En dehors des alluvions, les autres types de formations relativement favorables à la recharge indirecte seraient, du nord au sud, le plio-quaternaire de la Dombes (probablement seulement localement), les formations morainiques de la basse vallée de l'Ain, les formations molassiques du Bas-Dauphiné, les anciennes terrasses de l'Isère et les cailloutis calcaires quaternaires d'Alixan (probablement fortement drainé par les cours d'eau), et le secteur nord de la molasse miocène du Comtat. Les formations fluvio-glaciaires des couloirs de l'Est lyonnais, comme celles de la plaine de Bièvre-Valloire-Liers et les terrasses fluvio-glaciaires du Rhône entre Vertrieux et Saint-Romain-de-Jalionas sont favorables.

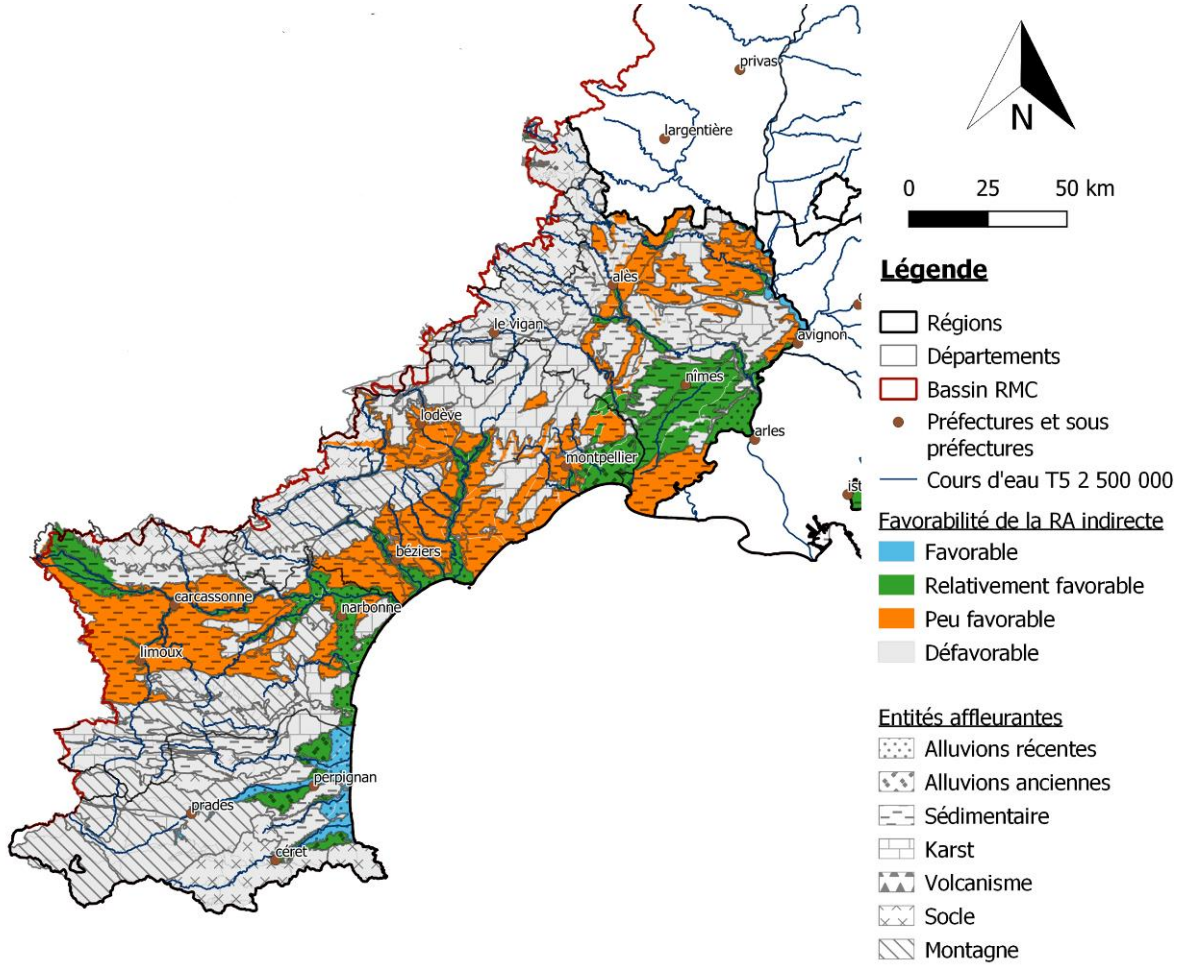
3. Carte de faisabilité de la recharge maîtrisée - Région Bourgogne Franche-Comté



Les entités hydrogéologiques de type alluvial présentent logiquement les conditions les plus favorables, en particulier dans les vallées du Doubs et de la Saône et à leur confluent, comme les alluvions de l'Ognon. Plus au nord, les alluvions de la Tille, de Dijon-sud, de la Vouge, de la Dheune et, plus au sud, de la Guye, seraient aussi intéressantes avec certaines situations moins favorables, pour des questions de perméabilité ou de profondeur de la ZNS. Plus en amont 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 d'infiltrabilité (IDPR) sur ce secteur. Plus à l'ouest, les alluvions récentes du Breuchin et de la Lanterne ainsi que celles de la Saône en amont de Dampierre-sur-Salon présentent aussi des conditions favorables à la recharge maîtrisée indirecte.

En dehors des alluvions, les formations relativement favorables à la recharge indirecte seraient, du nord au sud, les grès du Trias inférieur nord Franche-Comté (résultats probablement incertains à l'échelle de l'entité, au regard de sa forte hétérogénéité verticale qui rend probablement difficile l'infiltration d'eau depuis la surface), 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 maîtrisée), les horizons gréseux de l'Hettangien-Sinemurien, du Pliensbachien et du Lias inférieur et, tout à l'Ouest, les grès 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 maîtrisée.

4.



En Occitanie, pour les départements du Gard, de l'Hérault, de l'Aude et des Pyrénées-Orientales, les formations géologiques qui apparaissent favorables à la recharge maîtrisée indirecte se situent essentiellement le long du littoral. 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, celles du bas Gardon en aval de Remoulins et du Rhône rive droite entre Beaucaire et Villeneuve lès Avignon. Les alluvions du Gardon d'Alès et d'Anduze et plus à l'aval, du moyen Gardon apparaissent aussi favorables, comme celles 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 et Tech. Les alluvions anciennes de l'Agly, de la Têt et du Tech apparaissent moins favorables.

En dehors des alluvions, les seules formations relativement favorables sont les graviers et grès du Paléocène et de l'Eocène inférieur et moyen au sud de la montagne Noire (secteur de Castelnau-dary).



LES TECHNIQUES DE RECHARGE MAÎTRISÉE D'AQUIFÈRES

Cette note aborde les procédés de recharge artificielle ou maîtrisée d'aquifères, la faisabilité de leur implantation sur le bassin Rhône-Méditerranée ainsi que les conditions de mise en œuvre de projets.

Le document rappelle les principes d'intégration des réflexions autour de ce procédé dans le cadre des projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) pour préserver l'équilibre ou résorber un déséquilibre entre la ressource et les besoins des usages et des milieux en complément des actions d'économie d'eau et de rationalisation des usages.

Le document présente également les principes de la recharge maîtrisée d'aquifère, les différentes techniques existantes et les diverses utilisations possibles. Il indique les prérequis nécessaires pour étudier l'implantation d'un dispositif de recharge maîtrisée indirecte à partir d'eau de surface sur un territoire. Il apporte des informations sur la conception, le dimensionnement et les coûts. Ensuite, sont exposées les étapes à franchir pour valider la faisabilité de la mise en place d'un tel projet.

Enfin, le document présente les résultats d'une analyse multicritères sur l'aptitude des aquifères du bassin Rhône-Méditerranée à pouvoir accueillir des projets de recharge maîtrisée. Sur les territoires favorables, il est possible d'engager des études pour recourir à ce type de solution.

Cette note s'adresse plus particulièrement aux services de l'État et ses établissements publics (agence de l'eau et office français de la biodiversité), structures et organismes investis sur la gestion quantitative de la ressource en eau. Elle s'appuie en partie sur les résultats d'une étude du BRGM conduite avec l'Agence de l'eau sur la faisabilité de la mise en œuvre des solutions de recharge maîtrisée d'aquifères à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée.