

# Réalimentation artificielle des aquifères en France

## Une synthèse

BRGM/RP-55063-FR  
Octobre 2008



# Réalimentation artificielle des aquifères en France. Une synthèse

BRGM/RP-55063-FR  
Octobre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM

A. Wuilleumier, J.J. Seguin

**Vérificateur**

Original signé par :

**Approbateur**

Original signé par :

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse

**Mots clés** : France, réalimentation artificielle, recharge artificielle, aquifère.

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

**Wuilleumier A., Seguin J.J.** - 2008. Réalimentation artificielle des aquifères en France. Une synthèse. Rapport final. BRGM/RP-55063-FR, 122 pages, 21 figures, 3 tableaux et 5 annexes.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Techniques de réalimentation artificielle des aquifères</b> .....	<b>11</b>
2.1. DISPOSITIFS DE RÉALIMENTATION A FAIBLE PROFONDEUR POUR UN AQUIFÈRE SANS COUVERTURE IMPERMEABLE.....	12
2.1.1. Bassin d'infiltration.....	13
2.1.2. Tranchées d'infiltration .....	13
2.1.3. Infiltration dans le lit d'un cours d'eau .....	14
2.1.4. Epanchage .....	15
2.1.5. Filtre à sable et terre d'infiltration .....	16
2.2. DISPOSITIFS DE RÉALIMENTATION PAR INJECTION DIRECTE DANS UN AQUIFÈRE .....	18
2.2.1. Stockage et reprise différée dans le temps (ASR) .....	18
2.2.2. Stockage et reprise différée dans le temps et l'espace (ASTR) .....	21
2.3. ALIMENTATION ARTIFICIELLE INDUITE .....	21
2.4. BARRAGES SOUTERRAINS .....	22
2.5. QUALITÉ DE L'EAU DESTINÉE A LA RÉALIMENTATION D'UN AQUIFÈRE ..	22
2.6. LA RÉALIMENTATION ARTIFICIELLE DANS LE MONDE .....	23
<b>3. Réalimentation artificielle d'aquifère à des fins autres que l'AEP</b> .....	<b>27</b>
3.1. REALIMENTATION ARTIFICIELLE D'AQUIFERE ENVISAGEE SUITE A DES AMENAGEMENTS DE COURS D'EAU OU DE LIT MAJEUR .....	27
3.1.1. Basse vallée de la Durance (Bouches-du-Rhône et Vaucluse).....	27
3.1.2. Donzère-Mondragon (Vaucluse) .....	29
3.2. REALIMENTATION ARTIFICIELLE REALISEE DANS LE CADRE D'UN PROJET DE RECHERCHE .....	30
3.2.1. Projet MEDALUS II à Agen / Le Passage (Lot-et-Garonne).....	30
3.2.2. Projet REGAL (REalimentation et Gestion Active des nappes Littorales ; région PACA).....	31
3.3. INFILTRATION DES REJETS D'UNE STATION D'EPURATION .....	31
3.3.1. L'infiltration percolation en France.....	31
3.3.2. Argelès-sur-mer (Pyrénées Orientales).....	33
3.4. INFILTRATION D'EAUX PLUVIALES.....	35
3.5. INJECTION DANS UN RESERVOIR PETROLIFERE.....	35

<b>4. Réalimentation artificielle d'aquifère destinée à l'approvisionnement en eau potable.....</b>	<b>37</b>
4.1. DESCRIPTION DES STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE : SITES MAJEURS .....	38
4.1.1.4.1.1. Croissy-sur-Seine (Yvelines).....	38
4.1.2. Flins-Aubergenville (Yvelines).....	39
4.1.3. Crépieux-Charmy (Rhône).....	42
4.1.4. Houlle-Moulle (Pas-de-Calais) .....	44
4.2. STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE EN RÉGION MIDI-PYRÉNÉES....	45
4.2.1. Blagnac (31).....	45
4.2.2. Calmont (31) .....	46
4.2.3. Cintegabelle (31).....	47
4.2.4. Grenade (31).....	47
4.2.5. Lavelanet-de-Comminges (31).....	47
4.2.6. Noé (31) .....	48
4.2.7. Pinsaguel (31) .....	48
4.2.8. Portet-sur-Garonne (31).....	48
4.2.9. Roques (31) .....	49
4.2.10. Saint-Jory (31).....	49
4.2.11. Seysses (31) .....	50
4.2.12. Villeneuve-Tolosane (31) .....	50
4.2.13. Autres stations de Haute Garonne.....	51
4.2.14. Essai d'infiltration dans le lit du Galage (Ariège).....	51
4.2.15. Foissac (Aveyron) .....	51
4.2.16. Capdenac-Gare (Aveyron) .....	52
4.2.17. Brousse-le-Château (Aveyron).....	52
4.2.18. Lafrançaise (Tarn-et-Garonne) .....	52
4.2.19. Autres.....	53
4.3. PROJETS DE STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE EN REGION NORD-PAS-DE-CALAIS .....	53
4.3.1. Avesnes-le-sec et Roeulx (Nord) .....	53
4.3.2. Ferin (Nord).....	53
4.3.3. Brébières et Corbehem (Pas-de-Calais) .....	54
4.4. STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE DANS LE BASSIN RHONE-MEDITERRANEE-CORSE .....	54
4.4.1. Basse vallée du Var (Alpes-Maritimes).....	54
4.4.2. Vaux-sur-Vienne (Vienne).....	55
4.4.3. Fontagneux (Isère).....	55
4.4.4. Calvi – bassin de la Figarella (Haute-Corse) .....	56
4.4.5. Autres sites .....	56

4.5. AUTRES STATIONS OU PROJETS DE STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE EN FRANCE .....	58
4.5.1. Saint-Quentin (Aisne) .....	58
4.5.2. Brienne-le-Château (Aube).....	59
4.5.3. Le Theil-de-Bretagne (Ille-et-Vilaine).....	60
4.5.4. Messein (Meurthe-et-Moselle) .....	62
4.5.5. Neuville-sur-Moselle (Meurthe-et-Moselle) .....	62
4.5.6. Appoigny (Yonne).....	63
<b>5. Critères d'implantation.....</b>	<b>65</b>
5.1. PRINCIPAUX CRITÈRES.....	65
5.2. CRITÈRES HYDROGÉOLOGIQUES .....	65
5.2.1. Zone non saturée (ZNS).....	66
5.2.2. Type d'aquifères .....	67
<b>6. Conclusions .....</b>	<b>69</b>
<b>7. Bibliographie.....</b>	<b>71</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Avantages et inconvénients de différentes techniques de RAA par infiltration.....	12
Tableau 2 : Essais d'infiltration à Flins-Aubergenville sur 6 sablières après décolmatage selon des techniques différentes (source : M. Detay).....	40
Tableau 3 : Production et réalimentation du champ captant de Houlle-Moulle de 1995 à 2003 (source : Rapport annuel sur le prix et la qualité des services de l'eau (Dunkerque Grand littoral, synthèse 2003) .....	44

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'un bassin d'infiltration avec apport de matériaux graveleux (F. Bel, 1988).....	13
Figure 2 : Tranchées drainantes (d'après H.H. Hantke et W. Schlegel, 1994) .....	14
Figure 3 : Terre d'infiltration (Plaquette de présentation du Conseil Général de la Charente).....	17
Figure 4 : Schéma d'une injection et reprise .....	18
Figure 5 - Ouvrages d'ASR aux Etats-Unis en juillet 2003.....	19
Figure 6 : Schéma d'un site d'ASR (" Technical Guidance for ASR ", P. Dillon, février 2006).....	20
Figure 7 : Critères proposés par l'OMS (2003) pour la recharge artificielle d'aquifère à partir d'eaux usées traitées (usage eau potable) .....	23
Figure 8 – Exemple de réalimentation par ASR en Floride (source: DWAF, 2007) .....	25
Figure 9 : Schéma de l'alimentation artificielle de Donzère-Mondragon.....	30
Figure 10 : Infiltration percolation avec poursuite de l'infiltration dans l'aquifère (ici un calcaire) .....	32
Figure 11 : Infiltration percolation étanchéifiée et drainée à la base du massif de sable.....	32
Figure 12 : Répartition des sites d'infiltration percolation par département .....	33
Figure 13 : Schéma du site de Croissy-sur-Seine (J. Bize).....	38
Figure 14 : Débits d'infiltration dans trois sablières lors des essais de décolmatage de 1991 à Flins-Aubergenville (source : M. Detay) .....	41
Figure 15 - Fonctionnement hydrodynamique du procédé Bi'Eau .....	42
Figure 16 : Plan schématique du champ captant de Crépieux-Charmy.....	43
Figure 17 : Schéma type d'une station de réalimentation artificielle de nappe en Haute-Garonne.....	45
Figure 18 : Evolution spatiale des ions azotés, des phosphates et de la conductivité le 11 décembre 1987 à la station de Saint-Jory.....	50
Figure 19 : Localisation de la tranchée d'injection par rapport aux puits de prélèvement .....	59
Figure 20 - Coupe schématique d'une tranchée d'injection .....	60
Figure 21 : Schéma en plan et en coupe de l'alimentation artificielle de la nappe de la Moselle à Messein (Nancy) .....	62

## Liste des annexes

Annexe 1 Schéma de dispositifs de filtre à sable (plaquettes du Conseil Général de la Charente)	
Annexe 2 Plan des stations de réalimentation du département de la Haute-Garonne et de Lafrançaise (Tarn-et-Garonne)	
Annexe 3 Vues en plan et en coupe de la station de Vaux-sur-Vienne (Vienne)	
Annexe 4 Liste des sites et/ou projets de réalimentation identifiés	
Annexe 5 Carte de localisation des sites et/ou projets de réalimentation artificielle en France	

# 1. Introduction

Suite à plusieurs épisodes de sécheresse, un « Plan de gestion de la rareté de l'eau » a été mis en place en 2006 par le MEDAD. Ce plan prévoit un certain nombre d'actions à conduire pour instaurer une gestion économe de l'eau, établir un partage entre les différents usages et obtenir une meilleure valorisation de l'eau.

Les solutions envisagées pour atteindre ce dernier objectif sont :

- le développement de la récupération et de l'utilisation des eaux de pluies pour certains usages ;
- le développement de la réutilisation des eaux usées traitées ;
- la désalinisation de l'eau de mer ;
- une meilleure valorisation des eaux souterraines et notamment le recours à la recharge artificielle des nappes.

La recharge artificielle des aquifères est utilisée dans de nombreux pays pour faire face à des situations d'approvisionnement critiques (on stocke alors de l'eau en aquifère pour une utilisation différée en période déficitaire, ou bien on réalimente par des eaux usées pour augmenter la ressource ou pour freiner une intrusion d'eau salée...) ou bien pour améliorer la qualité des eaux de surface en les infiltrant pour utiliser la capacité épuratrice du sol (avec comme avantage secondaire le soutien des niveaux de la nappe exploitée).

A la demande de la Direction de l'Eau du MEEDDAT, ce rapport fait le point sur les sites de recharge artificielle ("active") existant ou ayant existé en France.

Une première partie (§ 2) est consacrée à un rappel des principales techniques de réalimentation artificielle. Une deuxième partie (§ 3 et § 4) présente les sites de réalimentation recensés dans cette étude. Un tableau récapitulatif est fourni en annexe 4 et une carte de localisation en annexe 5.

La recharge "passive" des aquifères (fuites des canaux, surplus d'eau d'irrigation) n'est pas abordée bien qu'elle joue souvent un rôle significatif dans le soutien des nappes en basses eaux. Cette recharge passive est par exemple importante dans le sud – est de la France (aquifère des cailloutis de la Crau, des alluvions de la Durance, des alluvions de l'Hérault, des alluvions quaternaires du Roussillon,...).

Le recensement des sites avec lâchers de barrages pouvant induire une infiltration accrue de l'eau des cours d'eau vers l'aquifère alluvial connecté n'est pas non plus abordé.

...



## 2. Techniques de réalimentation artificielle des aquifères

La réalimentation artificielle d'un aquifère (**RAA**) consiste à introduire dans un réservoir souterrain une quantité d'eau plus importante que celle qui y parviendrait selon un fonctionnement naturel. Le plus souvent, la ou les actions anthropiques mises en œuvre ont pour objectif de conduire une gestion active de l'aquifère. Cependant, des formes non intentionnelles de RAA se produisent, notamment dans le cas de fuites à partir des réseaux de distribution de l'eau ou dans des zones d'irrigation.

La mise en œuvre d'une RAA répond à des objectifs très variés:

- endiguer ou diminuer une baisse du niveau piézométrique liée à la surexploitation d'un aquifère ;
- améliorer la qualité de l'eau souterraine par injection d'une eau de meilleure qualité que celle disponible dans le réservoir (effet de dilution du contaminant) ;
- lutter contre la progression du biseau salé par la mise en place d'une barrière hydraulique ;
- stocker de l'eau à moindre coût, comparativement aux infrastructures nécessaires à du stockage de surface ;
- diminuer les pertes en eau liées à l'évaporation ;
- conserver de l'eau de pluie ou de ruissellement qui s'évacuerait sinon en mer ;
- profiter d'une épuration de l'eau lors de sa percolation dans la zone non saturée ;
- maintenir ou à défaut soutenir le débit des cours d'eau ou le niveau des lacs ;
- lutter contre des phénomènes de subsidence en rétablissant dans un aquifère déprimé (ou en se rapprochant de) la pression initiale.

D'autre part, la RAA permet de réintégrer dans un cycle de l'eau mobilisable pour l'alimentation en eau potable des eaux usées en les infiltrant ou en les injectant dans un aquifère après traitement. Ceci favorise en effet l'acceptation par les populations d'un usage des eaux usées traitées.

Il existe de nombreuses méthodes de réalimentation d'un aquifère. Elles peuvent être rangées dans deux catégories : celles qui recourent à une injection directe en aquifère et celles qui mettent en œuvre une infiltration vers un aquifère à nappe libre (sans couverture imperméable) et de faible profondeur.

Les principales méthodes sont décrites ci-après (§2.1, §2.2 et §2.3).

## 2.1. DISPOSITIFS DE RÉALIMENTATION A FAIBLE PROFONDEUR POUR UN AQUIFÈRE SANS COUVERTURE IMPERMEABLE

Ce qui suit, à quelques ajouts et modifications prêts et hormis le chapitre 2.1.4, est issu du rapport de C. Le Guern, P. Lachassagne et Y. Noël intitulé "*Dessalement et recharge artificielle : Synthèse technico-économique*" (BRGM/RP-52262-FR, mars 2003).

Les dispositifs de recharge à faible profondeur sont utilisés pour réalimenter des nappes libres dont la surface piézométrique se situe à des profondeurs pouvant aller de 1 à 40 m (mais parfois plus).

Ils s'appuient, à des degrés divers selon les dispositifs, sur les processus hydrodynamiques de l'infiltration. En fonction de la qualité des eaux utilisées, ils se heurtent cependant à des risques de colmatage, liés à des dépôts de matière en suspension, à des développements bactériens, à la croissance d'algues, au gonflement et à la dispersion d'argiles. Ils peuvent bénéficier en revanche d'une épuration du fluide injecté (cas d'effluents par exemple) : une partie des pollutions peut en effet être éliminée au cours de l'infiltration et du stockage.

On peut distinguer 5 grands types de dispositifs de recharge artificielle à faible profondeur, décrits dans le tableau 1 :

	<b>Caractéristiques</b>	<b>Observations</b>	<b>Type d'eau utilisée</b>
<b>Bassins d'infiltration</b>	Infiltration par le fond Bassins fonctionnant en alternance	Risque important de colmatage: opérations d'entretien nécessaires	Eau en provenance de cours d'eau. Effluents préalablement traités.
<b>Tranchée d'infiltration</b>	Tranchées remplies de matériaux sablo-graveleux.  Injection par drains ou par la surface. Infiltration à travers les parois latérales.	Faible emprise au sol et coût d'entretien minime. Faible colmatage sauf exception Couverture des tranchées pour limiter le développement des algues, les apports éoliens et donc le colmatage.	Eaux superficielles
<b>Barrage et diguette, infiltration dans le lit d'un cours d'eau</b>	Rendement de l'infiltration accru en cherchant à gagner sur: la superficie de la plage d'infiltration la charge hydraulique la durée de l'infiltration	Utilisation essentiellement en pays arides ou semi-arides	Eau de cours d'eau
<b>Epandage</b>	Sur terres agricoles	Risque d'un lessivage excessif des terres pouvant entraîner une pollution par les engrais et pesticides	Eau de cours d'eau en période non déficitaire, hors période culturale.
<b>Filtre à sable et terre d'infiltration</b>	Drains ou écoulement direct Bassins fonctionnant en alternance (alimentation et mise au repos)	Faisabilité économique dépendante de l'investissement mais aussi beaucoup des coûts de fonctionnement	Eaux usées  Eau superficielle pour utilisation en eau potable

Tableau 1 - Avantages et inconvénients de différentes techniques de RAA par infiltration

### 2.1.1. Bassin d'infiltration

Les bassins sont souvent réalisés en déblai-remblai. Selon son origine et sa qualité, l'eau est ou n'est pas préalablement traitée avant d'être dirigée dans le bassin. Elle s'infiltré préférentiellement par le fond ; l'infiltration a également lieu – dans une moindre mesure – par les parois.

Cette technique est sujette au colmatage. Il est donc nécessaire de s'assurer de la qualité des eaux à infiltrer et de prévoir les opérations d'entretien nécessaires, d'évaluer leur fréquence et d'estimer leur coût (critère de faisabilité économique importante). Ils peuvent être utilisés pour l'infiltration d'eau en provenance de cours d'eau ou pour infiltrer des effluents préalablement traités.

Pour des raisons d'entretien et d'optimisation de l'infiltration, il est souvent nécessaire de réaliser plusieurs bassins fonctionnant en alternance. Leur dimension et leur disposition sur le site dépendent de la perméabilité naturelle des terrains, du pouvoir colmatant de l'eau à infiltrer et des besoins. L'intégration dans le paysage peut conduire à une géométrie et à une disposition particulière des bassins. La plantation d'arbres à feuilles caduques est à proscrire à proximité de ces bassins.

Lorsque le pouvoir épurateur du terrain situé au fond du bassin n'est pas suffisant pour permettre une épuration des eaux infiltrées, il peut être nécessaire de rapporter en fond des matériaux graveleux plus sableux (figure 1).

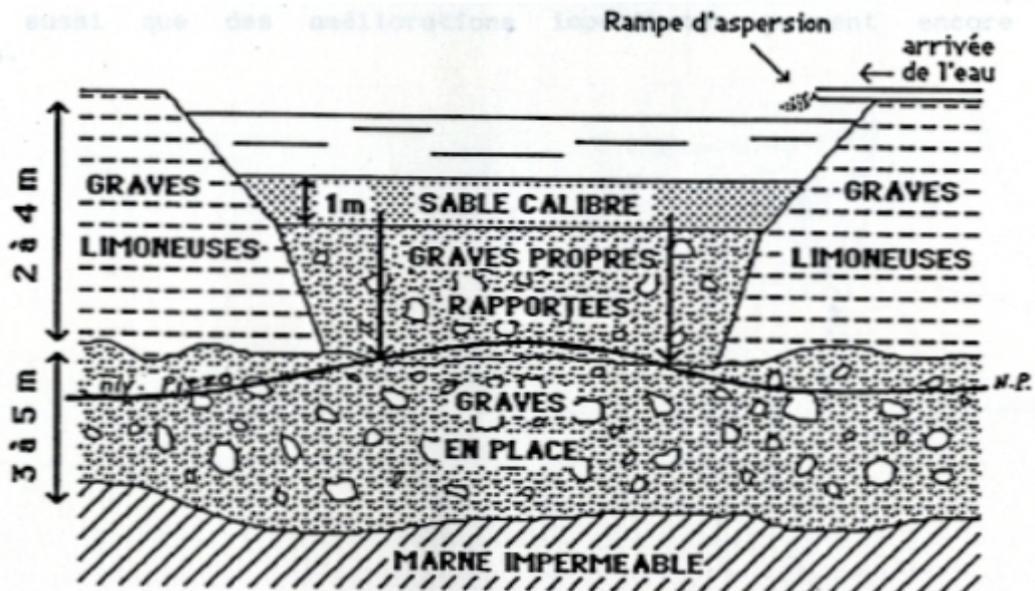


Figure 1 : Schéma d'un bassin d'infiltration avec apport de matériaux graveleux (F. Bel, 1988)

### 2.1.2. Tranchées d'infiltration

Des tranchées dont la profondeur dépend du contexte hydrogéologique (profondeur des terrains perméables et profondeur de la surface de la nappe) sont creusées puis remplies de matériaux sablo-graveleux pour en assurer la stabilité. L'injection de l'eau se fait soit par l'intermédiaire d'un drain placé dans la tranchée, soit en surface.

Dans une tranchée d'infiltration, de par sa géométrie (surface des parois supérieure à la surface du fond), la plus grande part de l'infiltration s'effectue à travers les parois latérales. Le dépôt des matières en suspension sur le fond de la tranchée n'engendre donc le colmatage que d'une partie de la surface d'infiltration. La diminution des lames d'eau infiltrées au cours du temps est ainsi moins importante que dans le cas de bassins. Cette infiltration par les parois peut également être favorisée par la perméabilité horizontale souvent supérieure à la perméabilité verticale.

Lorsqu'il est possible de creuser des tranchées relativement profondes, cette technique peut s'avérer économique du fait de son emprise au sol moindre et d'un coût d'entretien minime.

L'eau est généralement dirigée au sommet de la tranchée remplie de matériaux inertes grossiers (Figure 2). Elle percole au travers de ce matériau, une couche colmatante peut se mettre en place au sommet, un raclage périodique peut donc être nécessaire, avec remplacement éventuel du matériau de remplissage. Ce matériau peut se colmater totalement dans certains cas extrêmes. Il est alors nécessaire de le remplacer totalement. Afin d'éviter un développement algair important et leur colmatage par des apports éoliens, les tranchées sont souvent couvertes.

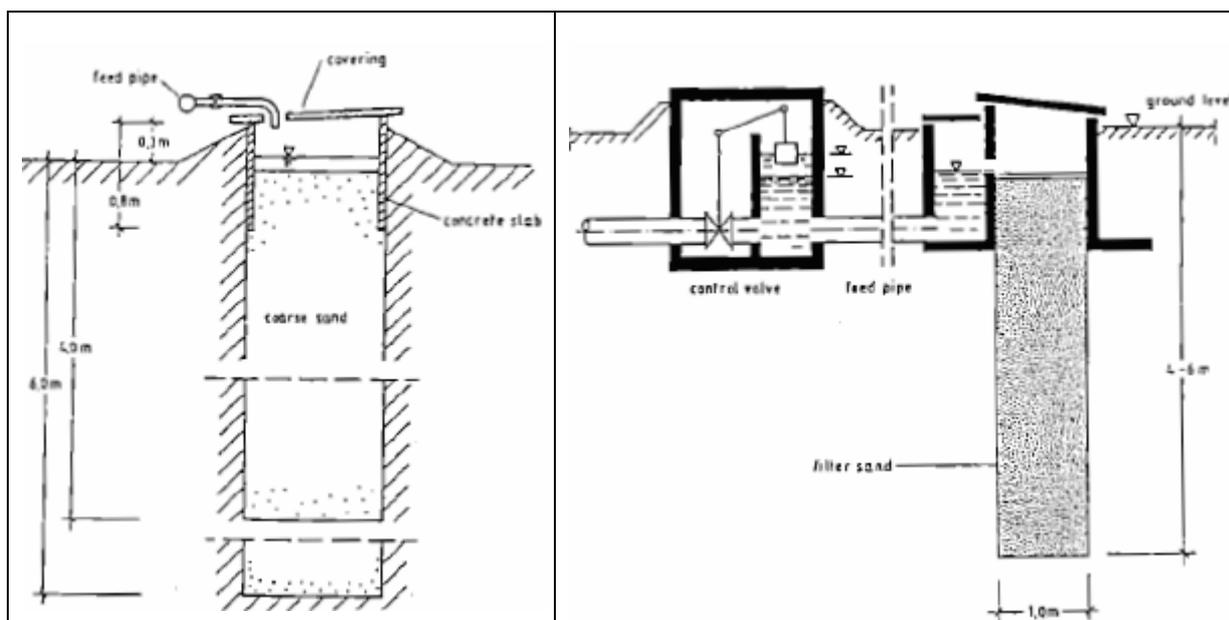


Figure 2 : Tranchées drainantes (d'après H.H. Hantke et W. Schlegel, 1994)

### 2.1.3. Infiltration dans le lit d'un cours d'eau

L'objectif est d'accroître le rendement de l'infiltration naturelle en cherchant à gagner sur :

- la surface de la plage d'infiltration ;
- la charge hydraulique ;
- la durée de l'infiltration.

Le gain de surface d'infiltration peut être obtenu par dérivation d'une partie du débit la surface de la plage d'infiltration, d'un lit mineur actif sur un ou plusieurs bras morts.

Une autre possibilité est l'aménagement de levées qui vont allonger le trajet des eaux de ruissellement dans le lit (digues en chicane).

La charge hydraulique, la durée d'infiltration mais également la surface d'infiltration peuvent être augmentées par création d'un ou plusieurs barrages sur un cours d'eau dans les zones propices à l'infiltration (terrain perméable, cours d'eau perché par rapport à la nappe).

Ces dispositifs ont tous comme caractéristique commune de piéger et/ou de ralentir les eaux de cours d'eau en crue charriant une masse importante de matière en suspension. Il existe plusieurs techniques pour limiter le dépôt de matière solide et donc le colmatage et le comblement progressif du réservoir ;

- entretien nettoyage et évacuation des dépôts ;
- digue construite en matériaux meubles dimensionnée pour être emportée par une crue de fréquence donnée et donc permettre le nettoyage de l'amont. Une variante de ce dispositif consiste à réaliser une digue semi-destructive seule une partie de la digue sera emportée par la crue ;
- mise en place de barrage mobile ou gonflable que l'on abaisse lors du passage d'une crue pour permettre le nettoyage de l'amont ou que l'on ne lève qu'une fois le pic de crue passé afin d'éviter la sédimentation des M.E.S présentes dans ses eaux ayant la plus forte charge solide ;
- réalisation de barrages en cascade, les barrages se remplissant progressivement de l'amont vers l'aval, les premiers jouant le rôle de " barrière de décantation ".

Ces techniques sont essentiellement utilisées en pays arides ou semi-arides (Maroc, Tunisie, Arabie Saoudite, sud des Etats-Unis, Australie, ...).

Une alternative, dans ce même type de contexte favorable au drainage de la rivière par la nappe, consiste à effectuer des lâchers d'eau provenant d'un barrage situé en amont hydraulique des aquifères à recharger. Les débit, volume, durée, fréquence, etc. des lâchers sont optimisés afin de réaliser une recharge maximale des aquifères en relation avec le cours d'eau (ou de certains aquifères choisis). De cette manière, le barrage ainsi vidé, est apte à emmagasiner de nouveaux volumes d'eau en cas de précipitations.

#### **2.1.4. Epannage**

L'eau à infiltrer est épanchée en général sur des terres agricoles, par l'intermédiaire de rainures (sillon de labour), son écoulement peut être freiné par la réalisation de diguettes de faible hauteur. La ressource en eau est constituée par des eaux de cours d'eau en période excédentaire, hors période culturale.

Ces dispositifs rustiques présentent l'avantage d'être peu coûteux et de ne pas geler les surfaces d'épandage qui, hors période d'infiltration, peuvent être utilisées par les cultures. L'alliance épandage, culture (donc labour) évite les phénomènes de colmatage. Les coûts de fonctionnement sont donc exclusivement dus à la réalisation périodique de rainures et de diguettes.

Ces techniques sont bien adaptées aux pays en voie de développement à main d'oeuvre bon marché.

On peut rapprocher ces techniques de celles utilisées dans certains pays froids (Islande, USA, Canada, Danemark) : accumulation par l'homme de neige sur des aires propices à la réalimentation. Au redoux, l'eau issue de la fonte des neiges percolera lentement vers la nappe et contribuera ainsi à sa recharge.

La réalisation de dispositif de rétention des sols et des eaux pour lutter contre l'érosion des sols, en créant des zones humides artificielles de façon temporaire, a pour effet secondaire une recharge renforcée des eaux souterraines.

Le danger de ce type de pratique réside dans l'éventualité d'un lessivage excessif des terres agricoles ce qui peut entraîner une pollution par les engrais et les pesticides ou une salinisation des eaux souterraines. Il est donc nécessaire d'optimiser les surfaces d'épandage en fonction des besoins de recharge, de la qualité des eaux servant à la recharge et des flux d'éléments indésirables pouvant transiter jusqu'à la nappe.

#### **2.1.5. Filtre à sable et terre d'infiltration**

Ces techniques sont utilisées en général lorsque l'un des objectifs est le traitement d'eau (eau usée, eau superficielle pour utilisation en eau potable...). Les eaux à infiltrer sont épandues à la surface d'un massif sableux (en place ou reconstitué) par l'intermédiaire de drains, ou par écoulement direct. Lorsque la surface piézométrique de la nappe phréatique est trop proche du sol, un terre d'infiltration en matériaux sableux peut être mis en œuvre ; les dispositifs (terrassment important, approvisionnement de matériaux sableux lorsqu'ils n'existent pas sur place) ne peuvent pas a priori intéresser de grands volumes d'eau à infiltrer et seront donc utilisés plutôt dans un contexte local (assainissement autonome par exemple).

La faisabilité économique du projet dépend de l'investissement mais également beaucoup des coûts de fonctionnement.

Afin de favoriser l'aération du massif d'infiltration, il est nécessaire de pratiquer l'alimentation alternée, ce qui induit de multiplier les surfaces d'infiltration en fonction de la durée des cycles (alternance alimentation et mise au repos des bassins).

Les filtres à sable peuvent être mis en œuvre verticalement ou horizontalement. Dans le cas d'un dispositif vertical, l'eau de percolation peut être infiltrée vers l'aquifère ou drainée vers un exutoire de surface.

Des schémas de ces installations sont reportés en annexe. La figure 3 présente un schéma de terre d'infiltration.

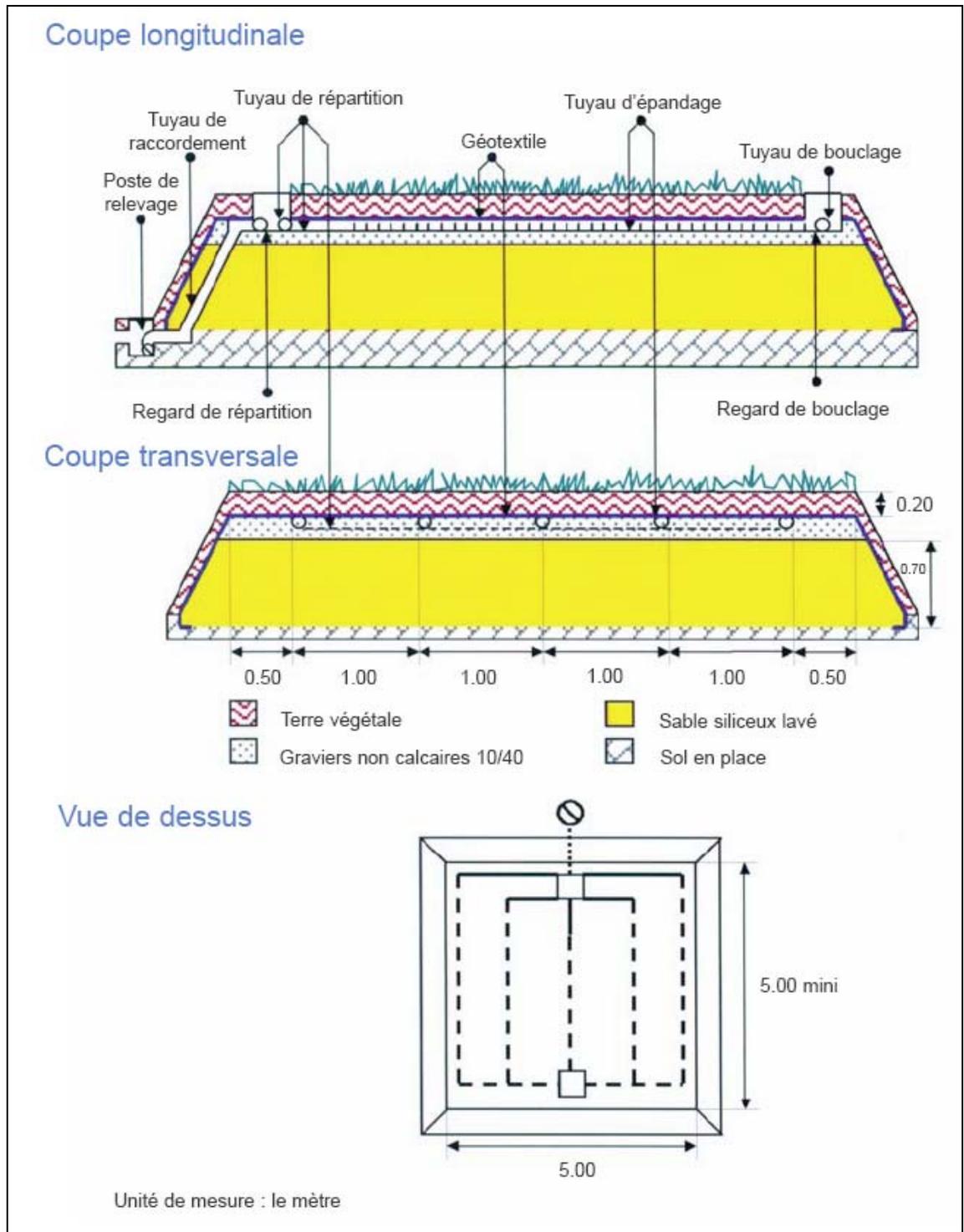


Figure 3 : Terre d'infiltration (Plaquette de présentation du Conseil Général de la Charente)

## 2.2. DISPOSITIFS DE RÉALIMENTATION PAR INJECTION DIRECTE DANS UN AQUIFÈRE

### 2.2.1. Stockage et reprise différée dans le temps (ASR)

Cette technique est connue en anglais sous le nom d'ASR : Aquifer Storage and Recovery.

Le principe de l'ASR consiste à injecter de l'eau dans un aquifère puis à pomper ultérieurement à partir du même forage (Figure 4). La définition proposée par Pyne (1995, réf. 3) implique des périodes de disponibilité de l'eau (injection) et de forte demande (pompage).

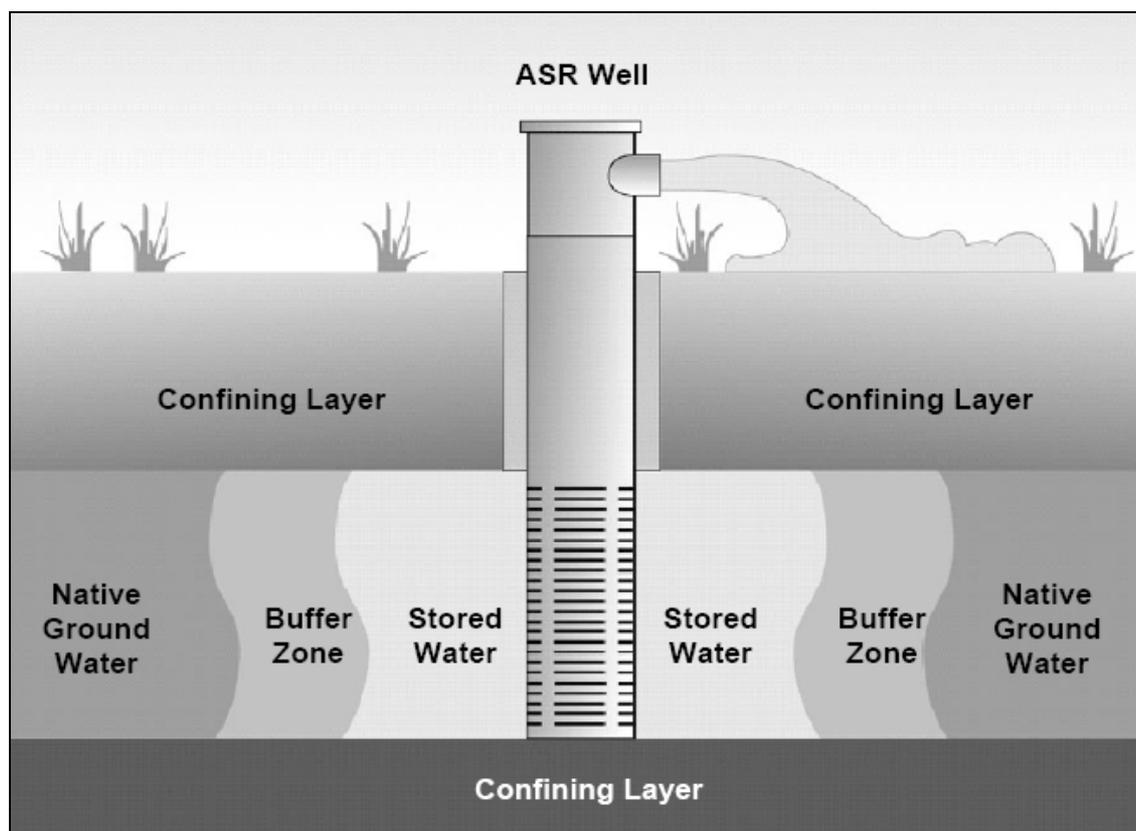


Figure 4 : *Schema d'une injection et reprise*  
(Saint-Jones River Water Management District, 2004, in association with Pyne)

Ceci peut être réalisé dans des aquifères présentant une eau saumâtre, voire polluée, dans la mesure où le temps de résidence de l'eau injectée dans l'aquifère permettra la reprise d'une eau adaptée en qualité à l'usage auquel elle est destinée. Le concept de bulle d'eau douce dans un aquifère salé a été développé.

L'ASR est généralement mis en œuvre dans des aquifères à nappe captive ou semi-captive. Les aquifères à nappe libre présentent deux inconvénients :

- leur vulnérabilité aux pollutions ;
- le fait que la vitesse de déplacement de l'eau qu'ils contiennent est généralement plus élevée qu'en domaine captif.

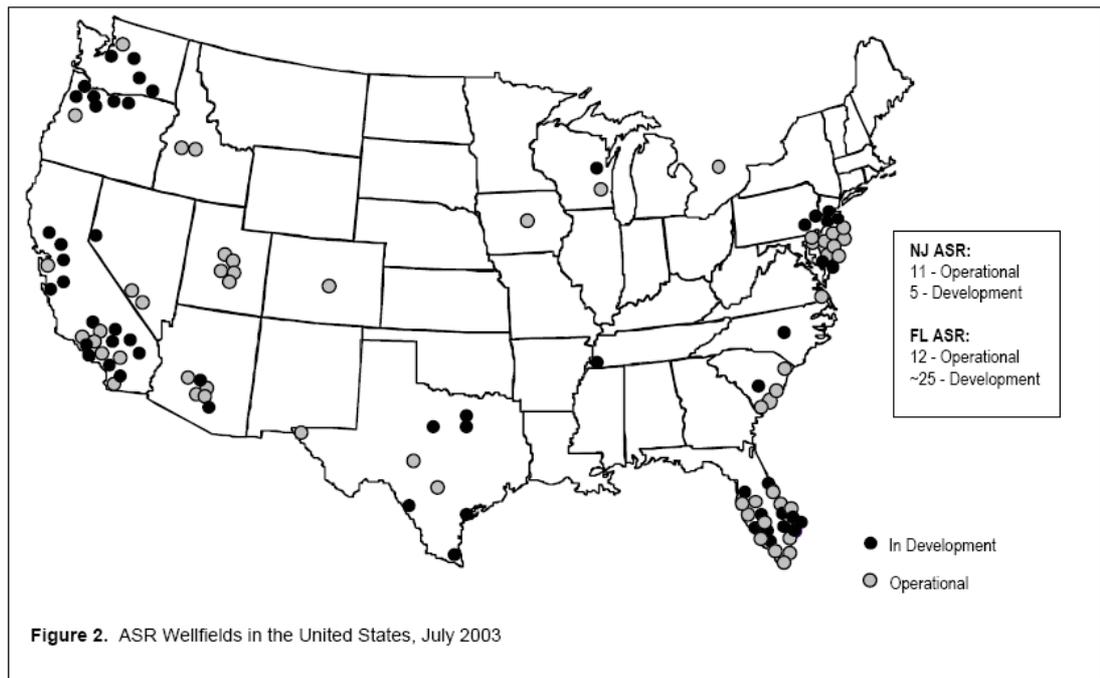
L'eau reprise lors du pompage est un mélange d'eau native et d'eau injectée. Ainsi, le suivi des teneurs en chlorures lors de la phase de pompage a montré pour un dispositif d'ASR en Californie que pour une reprise équivalente à 50% du volume injecté préalablement, l'eau prélevée était composée à 82% d'eau injectée. Seule une partie de l'eau injectée peut être reprise après un pompage.

L'intérêt de cette méthode réside dans l'alternance des phases d'injection et de pompage sur un même ouvrage. En effet, celle-ci induit une inversion du sens de la circulation de l'eau au niveau des crépines et de l'aquifère à leur voisinage, réduisant ainsi la vitesse du colmatage. Cet atout doit bien entendu être complété par une décantation préalable des eaux destinées à l'injection.

Par ailleurs, l'utilisation d'un même ouvrage pour l'injection et le pompage réduit les coûts d'investissement.

P. Dillon a publié en février 2006 un guide technique pour la réalisation d'un programme d'ASR en Australie. Il propose notamment une description d'un site d'ASR (Figure 6 page suivante) et une approche des risques associés à sa mise en œuvre basée sur la méthode HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points). Cet ouvrage s'appuie sur celui de Pyne (1995).

L'ASR est très largement répandu aux Etats-Unis, comme le montre la figure 5.



*Figure 5 - Ouvrages d'ASR aux Etats-Unis en juillet 2003*  
(Saint-Jones River Water Management District, 2004, in association with Pyne)

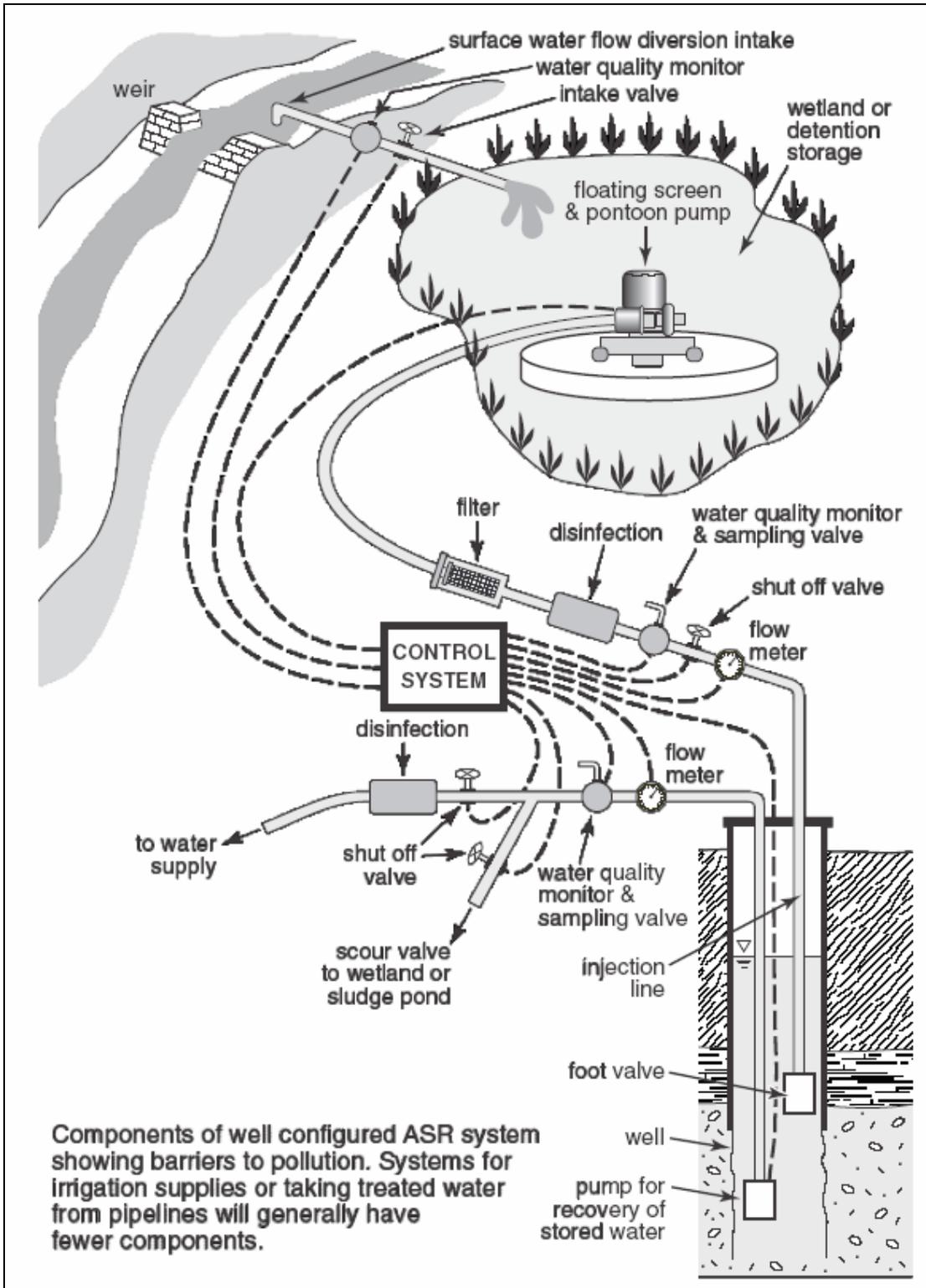
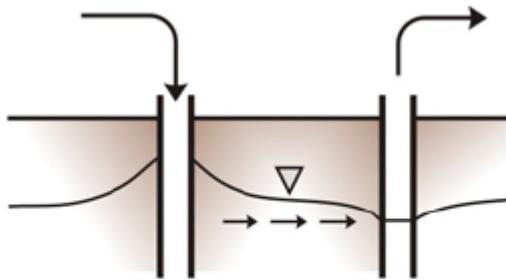


Figure 6 : Schéma d'un site d'ASR (" Technical Guidance for ASR ", P. Dillon, février 2006)

### 2.2.2. Stockage et reprise différée dans le temps et l'espace (ASTR)

Cette technique est connue en anglais sous le nom d'ASTR : Aquifer Storage, Transfer and Recovery.

L'ASTR suppose l'injection et la reprise d'eau par un point de prélèvement différent du point d'injection. L'eau injectée circule donc préalablement dans l'aquifère.



Source: DWAF (Department Water Affairs and Forestry), Republic of South Africa .

Artificial Recharge Strategy – Version 1.3 - 2007

### ASTR

Cette technique est le plus souvent utilisée lorsque l'eau souterraine native est de bonne qualité pour une exploitation à des fins d'eau potable.

L'exemple type de mise en œuvre d'ASTR est le site " Factory 21 " dans le Conté d'Orange en Californie. En 1956, des pompages importants dans un aquifère côtier ont induit un rabattement tel que le biseau salé a avancé de 8 km à l'intérieur des terres. Il a été décidé de créer une barrière hydraulique consistant en 23 forages d'injection. La première eau traitée a été injectée en octobre 1976, ce qui a permis de rétablir l'équilibre dans le bilan quantitatif de l'aquifère et donc de poursuivre l'exploitation pour l'AEP. Environ 100 000 m<sup>3</sup> d'une eau présentant un résidu sec de 500 mg/l sont injectés quotidiennement.

Un autre exemple d'ASTR est le site de Greenfields dans le sud de l'Australie. L'objectif du projet est de démontrer l'intérêt du stockage d'eaux pluviales dans un aquifère avant de les prélever pour l'AEP. Les eaux pluviales subissent une décantation avant de traverser une zone humide dans laquelle filtration et aération interviennent. L'eau est ensuite injectée dans des forages puis prélevées après circulation dans l'aquifère. Une modélisation des sites d'injection et de reprise a été effectuée afin d'optimiser leur emplacement et espacement.

### 2.3. ALIMENTATION ARTIFICIELLE INDUITE

Le schéma classique d'un dispositif d'infiltration induite consiste en une ligne de forages parallèle et proche d'un cours d'eau. Les pompages dans les forages induisent un rabattement de la nappe dans l'aquifère et donc une modification – avec le cas échéant une inversion – des écarts de pression existant entre l'eau dans le cours d'eau et l'eau de l'aquifère. Ces pompages vont donc entraîner une infiltration d'eau de surface via les berges, dans la mesure où celles-ci ne sont pas colmatées et où le débit de pompage est suffisant.

Une filtration des eaux de surface intervient lors de leur parcours souterrain. Un temps de transit minimal avant prélèvement est cependant à maintenir.

Compte tenu des quantités souvent importantes de matières en suspension présentes dans les eaux de surface, un colmatage des zones d'infiltration intervient dans ce processus. Afin de diminuer la vitesse de colmatage, il est préférable de maintenir un débit d'infiltration relativement faible et de prévoir un entretien régulier de ces zones. Celui-ci est à effectuer durant les périodes de basses-eaux.

Cette technique ne vise pas à augmenter le volume d'eau stocké dans l'aquifère. Il s'agit surtout de mettre à profit l'effet filtre des berges et la capacité d'épuration de l'aquifère au cours du transfert souterrain.

En France, cette technique, en association avec des bassins d'infiltration, est utilisée par exemple sur les grands sites de recharge artificielle de Croissy-sur Seine, Flins-Aubergenville (vallée de la Seine, près de Paris), Crepieux Charmy (utilisant l'eau du Rhône, à Lyon).

## **2.4. BARRAGES SOUTERRAINS**

De nombreux barrages souterrains sont réalisés au sein d'aquifères alluviaux côtiers, au Japon et en Chine par exemple, dans le but :

- de limiter la vidange naturelle des aquifères trop perméables ;
- d'interdire l'invasion par l'eau de mer d'aquifères côtiers trop sollicités.

En Chine, la capacité de stockage de nombreux aquifères karstiques est améliorée par la création de barrages souterrains destinés à surélever le niveau des émergences, permettant ainsi l'augmentation des prélèvements par pompage dans leur secteur.

Pour compléter ces informations, on peut se référer par exemple à " Geotechnical Développement of subsurface Dam Project in Japan " qui donne notamment la liste des barrages de sub-surface réalisés ou en projet en 1992 au Japon.

## **2.5. QUALITÉ DE L'EAU DESTINÉE A LA RÉALIMENTATION D'UN AQUIFÈRE**

D'un point de vue théorique, un aquifère peut être réalimenté par n'importe quel type d'eau (eau pluviale, eaux de ruissellement ou eau usée traitée) à partir du moment où certains critères de qualité sont atteints. Ceux-ci sont définis à partir :

- de la nature de l'aquifère et du contexte hydrogéologique local (par exemple, la nappe concernée par la réalimentation est-elle en lien hydraulique avec une nappe captée pour l'AEP ?) ;
- la technique de réalimentation utilisée ;
- l'usage prévu de l'eau réinjectée.

Un traitement préalable peut être nécessaire, notamment en cas d'injection dans un aquifère à partir d'eaux usées traitées.

Concernant l'utilisation d'eaux usées traitées pour réalimenter un aquifère destiné à une exploitation pour l'AEP, l'OMS a publié en 2003 un état de l'art intitulé : " Health risks in aquifer recharge using reclaimed water ". Un essai de synthèse des lois existantes a conduit à proposer des critères proches de ceux définis par Cotruvo en 2001 (figure 7). Une distinction est faite entre l'infiltration vers un aquifère à nappe libre sans couverture imperméable (" spreading ") et l'injection dans un aquifère.

Recharge by spreading into potable aquifers

- Primary treatment and disinfection, plus during SAT, handling of dry and wet cycles as well as hydraulic and mass charges, so as to avoid soil colmatation, in the event that suspended solids are mostly mineral.
- Primary advanced treatment and disinfection, plus handling of dry and wet cycles as well as hydraulic and mass charges so as to avoid soil colmatation, in the event that suspended solids are mostly mineral.
- Secondary treatment and disinfection with a well operated SAT.
- Possibly advanced treatment under site-specific considerations.
- Meet drinking water standards after percolation.
- Monitoring for coliforms. pH, chlorine residual, drinking water standards plus site-specific others.
- Distance to point of extraction (600 meters) or dependent on site-specific factors

Recharge by injection into potable aquifers.

- Secondary treatment, filtration, disinfection, advanced wastewater treatment.
- Meet drinking water standards no detectable faecal coliforms in 100 mL, turbidity limits, 1 mg/L chlorine residual, pH between (6.5 and 8.5), others.
- Monitoring for turbidity, coliforms, chlorine residual, pH, drinking water standards, others.
- Distance to point of extraction (600 meters) or dependent on site-specific factors.

Adapted from: Cotruvo (2001)

Indark letter modification proposed to Contruvo Guidelines

Figure 7 : Critères proposés par l'OMS (2003) pour la recharge artificielle d'aquifère à partir d'eaux usées traitées (usage eau potable)

En France, l'article 24 du décret n° 94-469 du 3 juin 1994 fonde le statut réglementaire de la réutilisation des eaux usées urbaines (REU) : " *Les eaux usées peuvent, après épuration, être utilisées à des fins d'arrosage ou d'irrigation, sous réserve que leurs caractéristiques et leur modalité d'emploi soient compatibles avec les exigences de protection de la santé publique et de l'environnement (...). Les conditions d'épuration et les modalités d'irrigation ou d'arrosage requises, ainsi que les programmes de surveillance à mettre en oeuvre, sont définis, après avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) et de la Mission Interministérielle de l'Eau par un arrêté du ministre de la Santé, du ministre chargé de l'Environnement et du ministre chargé de l'Agriculture.* "

La réutilisation des eaux usées traitées pour l'AEP est donc exclue. L'annexe n°86 du rapport du Sénat sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France (sous la direction de Gérard Micquel, mars 2003) précise que " la recharge de nappe souterraine revient, le plus souvent, à réutiliser indirectement des eaux usées pour produire de l'eau potable. "

## 2.6. LA RÉALIMENTATION ARTIFICIELLE DANS LE MONDE

Une recherche bibliographique (Miracapillo C., Barbiero G., réf. 79) des publications internationales sur le thème de la recharge artificielle faite en 2005 par interrogation de 8 bases de données internationales (Enviroline, Pascal, Geobase, Chemabs, Inspec, Ulidat, Fluidex, Ntis) donne un aperçu de la répartition par pays de ces publications.

Les publications les plus nombreuses concernent les Etats-Unis (116). Puis viennent l'Allemagne (13), l'Angleterre(13), l'Inde (11), Israël (11), l'Australie (10), les Pays Bas (8).

La France apparaît avec une publication (vraisemblablement le site de Flins – Aubergenville).

### Quelques exemples

- Aux Etats-Unis, comme déjà mentionné ci-dessus, la réalimentation artificielle par la technique ASR est très répandue, souvent pour répondre à des besoins locaux. Mais ces dernières années, on note une orientation vers la réalisation de projets à vocation plus régionale (cf réf. 11, rapport 2007 du DWAF: Department Water Affairs and Forestry, Republic of South Africa). Parmi ces grands projets le rapport du DWAF cite les exemples suivants:

- en Floride: 6,4 M de m<sup>3</sup>/jour fourni à partir de 330 forages,
- ville de New York: 0,85 M m<sup>3</sup>/jour,
- San Antonio au Texas: 0,23 M m<sup>3</sup>/jour,

En 2007, l'opération de réalimentation par ASR la plus importante était celle de la vallée de Las Vegas avec une capacité de 0,59 M m<sup>3</sup>/jour.

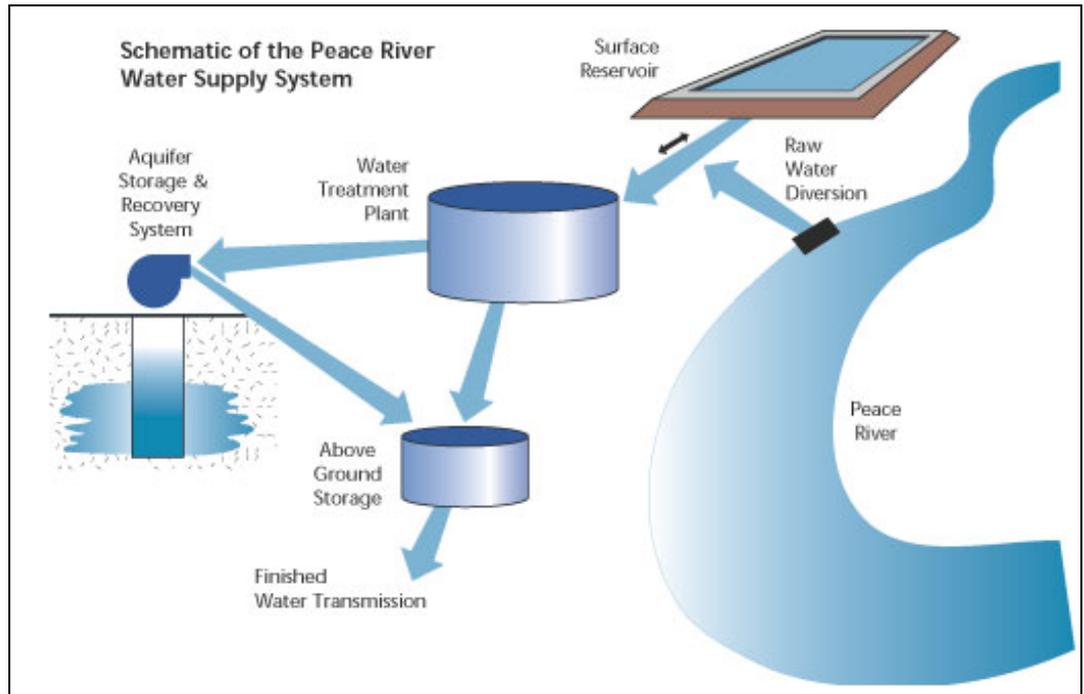
Le rapport de la DWAF cite aussi un exemple d'ASR à finalité régionale réalisé en Floride (Peace River) avec injection d'eau dans un système aquifère calcaire bi-couche contenant de l'eau saumâtre. Les caractéristiques de l'aquifère et de l'opération sont indiquées sur la figure 8 ci-après.

- En Allemagne (d'après le rapport du DWAF), la réalimentation artificielle existe depuis longtemps pour approvisionner quelques grandes villes : Berlin (1916), Wiesbaden(1921), Hambourg(1928). La méthode la plus répandue est celle de la réalimentation induite, avec des sites le long du Rhin, de l'Elbe, de la Rhur, du Main. Environ 15 % de l'eau potable provient de la réalimentation artificielle.

Les objectifs principaux sont l'alimentation en eau potable (54% des sites) et la compensation d'une baisse des niveaux (20 %). Le stockage d'eau en aquifère reste marginal (4 %).

- Aux Pays Bas, la réalimentation artificielle est mise en œuvre pour combattre la baisse des niveaux de certaines nappes, pour l'alimentation en eau potable (60 % de l'eau potable à Amsterdam, par infiltration dans la zone des dunes : 40 bassins occupant 86 ha) et pour freiner l'intrusion d'eau salée provoquée par une exploitation intensive.

Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse



<b>Scheme</b>	Peace River	
<b>Purpose</b>	Primary: Seasonal storage Secondary: Water banking	
<b>Aquifer</b>	Two limestone aquifers: Upper: 122 – 152 m deep (30 m thick) Transmissivity: 450 m <sup>2</sup> /day; storativity: 0.0004 Lower: 174 – 274 m deep (100 m thick) Transmissivity: 560 m <sup>2</sup> /day; storativity: 0.0001	
<b>Source water</b>	Peace River. The variable flows and quality mean no diversions are allowed for periods of up to 7 months. Water is stored in the aquifer to cover these periods.	
<b>Pre-treatment</b>	Water is treated to domestic standards prior to injection	
<b>Water quality</b>	Recharge water (average): Conductivity: 47 mS/m Alkalinity (as CaCO <sub>3</sub> , mg/L): 50	Groundwater: Conductivity: 122 mS/m Alkalinity (as CaCO <sub>3</sub> , mg/L): 143
<b>Post treatment</b>	None	
<b>Injection/recovery capacity</b>	Injection and recovery capacities per borehole: 2000 – 4000 m <sup>3</sup> /day	
<b>Injection/recovery history</b>	In the main ASR area, a storage volume of 6 400 Mm <sup>3</sup> has been developed during the past 19 years (81 percent of the target storage volume).	
<b>Clogging management</b>	Seasonal back-flushing of boreholes	
<b>Recovery efficiency</b>	100%	
<b>Implementation stages</b>	1985: 2 ASR boreholes (~6 000 m <sup>3</sup> /day) 1988: Additional 4 ASR boreholes (~18 000 m <sup>3</sup> /day) 2005: 21 ASR boreholes in total with a combined recovery capacity of 68 000 m <sup>3</sup> /day.	
<b>Key opportunities and challenges</b>	By deferring or eliminating the need for surface reservoir expansion and relying instead on sub-surface storage, this system is expected to meet regional water demands at less than half the capital cost of other water supply alternatives. Recent elevated arsenic concentrations (in some areas) have led to post treatment, and research into assessing ways of minimising these concentrations. In other areas, the arsenic concentrations have decreased.	
<b>Planning process</b>	Planning through the Regional Water Supply Authority has resulted in a comprehensive and phased approach to ensuring the long-term sustainability of water supplies (including the implementation of water conservation measures) and the needs of the environment. A major part of the water supply augmentation plans is to maximise sub-surface storage. The aim is to store excess water during high river flow and withdraw less water from the river during the dry months. By expanding the ASR facilities, they will maximise existing capital investments and enable the Peace River Facility to operate at full capacity.	

Figure 8 – Exemple de réalimentation par ASR en Floride (source: DWAF, 2007)



### **3. Réalimentation artificielle d'aquifère à des fins autres que l'AEP**

La réalimentation artificielle de nappe peut être conduite dans des objectifs très variés, voire de façon involontaire. L'objet du recensement effectué sont les R.A.N. à destination de l'amélioration de l'alimentation en eau potable des populations – du point de vue quantitatif mais également qualitatif. Cependant, des exemples de situations différentes sont présentés dans ce chapitre.

#### **3.1. REALIMENTATION ARTIFICIELLE D'AQUIFERE ENVISAGEE SUITE A DES AMENAGEMENTS DE COURS D'EAU OU DE LIT MAJEUR**

##### **3.1.1. Basse vallée de la Durance (Bouches-du-Rhône et Vaucluse)**

Les informations relatives à ce secteur sont connues par le rapport réalisé par J. Margat en 1972 ("*L'alimentation artificielle des nappes souterraines en France / Aide-mémoire sur les expériences et les réalisations entreprises*"). La partie concernant la basse vallée de la Durance est citée presque in extenso ci-après :

"Dans la basse vallée de la Durance, (Vaucluse et Bouches-du-Rhône), un important complexe d'aménagements hydro-électriques a été réalisé par Electricité de France (EDF) sur une centaine de kilomètres. En dehors des crues, la plus grande partie du débit de la Durance, régularisé par le barrage de Serre-Ponçon, est désormais canalisé entre chaque usine, avant d'être déversé finalement en direct dans l'étang de Berre, c'est-à-dire dans la Méditerranée.

Ce détournement a fait craindre que les nappes alluviales de la vallée subissent des baisses de niveau, attribuables selon les secteurs à des défauts d'alimentation présumés ou à un drainage plus actif, dû à l'abaissement de la ligne d'eau du fleuve. Bien que ces craintes aient pu être jugées peu fondées, en dehors de sites localisés, et qu'au contraire l'irrigation ait été accrue – la distribution de plus de 100 m<sup>3</sup>/s étant garantie, même en étiage -, l'EDF a été contrainte, sous la pression des usagers, de démontrer la possibilité technique d'agir si besoin sur les niveaux des nappes par l'alimentation artificielle. Plusieurs installations préventives ont été réalisées et expérimentées, de 1953 à 1957, mais leur mise en service régulière n'a pas été nécessaire depuis, sauf durant l'hiver 1967-1968, pour compenser les effets d'une succession d'années sèches. Le volume injecté alors a été de 15 millions de m<sup>3</sup>. Les réservoirs aquifères à réalimenter sont des couches d'alluvions graveleuses très perméables ( $K = 2 \text{ à } 13.10^{-3} \text{ m/s}$ ) assez puissantes (15 à 30 m), en partie recouverte de limons, parfois assez épais (jusqu'à 15 m) mettant les nappes légèrement en charge et disposées en une série de bassins indépendants séparés par des goulets rocheux fractionnant la vallée de la Durance. "

Les différents sites sont présentés dans les paragraphes suivants.

### **Châteaurenard (Bouches-du-Rhône)**

Cinq dispositifs de réalimentation, situés dans la partie libre de la nappe, ont fonctionné pendant un mois en 1956 à un débit moyen de 830 l/s et avec une capacité maximale d'absorption de 1,1 m<sup>3</sup>/s. Des recharges supérieures à 200 mm ont été générées jusqu'à 2 km de distance.

L'épaisseur de l'aquifère est de l'ordre de 30 m.

### **Peyrolles-en-Provence (Bouches-du-Rhône)**

13 sites de réalimentation ont été testés sur une période d'un mois en 1956, chacun infiltrant 20 l/s (pour un débit total moyen de 220 l/s). L'épaisseur de l'aquifère y est de l'ordre de 8 m. L'eau infiltrée provient de sources situées dans les coteaux.

### **Plan d'Orgon (Bouches-du-Rhône)**

Deux dispositifs distants de 1,5 km ont été mis en œuvre. Leur description est issue de l'aide-mémoire de Jean Margat :

" Une fosse de 12 \* 70 m creusée jusqu'à 3 m de la nappe complétée par une tranchée large de 2 m atteignant la nappe et par des puits de gros diamètre (600 mm) foncés jusqu'à 5 à 6 m dans la nappe, le tout comblé de galets calibrés puis recouvert d'une couche de graviers et de sable filtrant. Ce système peut absorber en moyenne 0,7 m<sup>3</sup>/s d'eau décantée. La couche de sable, colmatée régulièrement, doit être régulièrement régénérée.

L'autre dispositif comprend 5 forages de gros diamètre (1400 mm) placés dans le fond d'une gravière, pénétrant de 5 à 6 m dans la nappe et remplis de galets lavés. En surface des filtres de sable préservent les ouvrages du colmatage. Cette installation a permis d'injecter 0,3 m<sup>3</sup>/s. "

### **Cavaillon (Vaucluse)**

Quatre dispositifs de réalimentation ont été mis en place en 1957 selon un alignement et avec un espacement de 1,5 à 2 km. Le niveau de la nappe alluviale se situe à une profondeur de 4 m et l'aquifère a une épaisseur de 15 à 25 m.

Chaque dispositif est constitué " par un groupe de forages de gros diamètre (560 mm crépiné en 300 mm) ou de petit diamètre (125 mm crépiné en 100 mm) munis de massifs de graviers filtrants (3 à 6 cm), distants de 5 à 15 mètres : au total 10 forages de gros diamètre et 14 de petit diamètre pouvant absorber ensemble 700 l/s. Ces forages ont absorbé chacun en moyenne 400 000 m<sup>3</sup> sans signe de colmatage ; 5 millions de m<sup>3</sup> ont été injectés en 1967-68 dans les 4 centres, en 3 ou 4 mois (débit moyen : 550 l/s). L'eau injectée, prélevée dans la Durance, subit un traitement préalable : filtration dans des bacs à lit de sable calibré (...) épais de 30 cm, dimensionnés sur la base de 1 m<sup>2</sup> de filtre par l/s de débit. Les stations de filtration comportent 3 bacs : deux sont en service pendant qu'un troisième est, à tour de rôle, en cours de régénération par lavage sur tamis vibrant. "

Par ailleurs, Jean Margat indique également l'existence d'un autre site : " Entre Cavaillon et Plan d'Orgon c'est le lit mineur de la Durance, perché dans ce secteur au-dessus de la nappe, qui a été aménagé par scarification sur 7 km de longueur et

création d'un plan d'eau par une digue d'alluvions haute de 2,5 m. Ces travaux ont favorisé l'infiltration d' $1 \text{ m}^3/\text{s}$  sur les 3 apports par la Durance. "

### **Hôpital et Puy (Vaucluse)**

Deux sites de réalimentation ont été testés, chacun comportant deux forages d'injection de gros diamètre (600 mm crépiné en 300 mm) profonds de 10 à 25 m. C'est l'eau brute de la Durance qui a été injectée, sans traitement préalable. Malgré une charge solide moyenne de 0,1 g/l, les forages ont absorbé 2,5 millions de  $\text{m}^3$  pendant 8 mois (entre 1967 et 1968) sur l'ensemble des deux sites (débit moyen par forage : 30 l/s). Le niveau de la nappe est à 3 à 4 m sous la surface du sol.

Enfin, deux autres sites ont été implémentés, l'un à Redoutier, l'autre à Leuze. Tout deux sont des bassins d'infiltration (de respectivement 3 à 4 ha et 1 ha), complétés par des forages d'injection de 10 à 15 m (diamètre de 7 et 8 pouces). A Redoutier, le débit d'injection a décliné de 280 à 170 l/s (1967-1968) à cause du colmatage. A Leuze, le débit injecté était de l'ordre de 100 l/s.

### **3.1.2. Donzère-Mondragon (Vaucluse)**

La réalisation d'un canal de fuite sur le Rhône au lendemain de la seconde guerre mondiale a entraîné un rabattement important du niveau de la nappe alluviale du Rhône. Le canal agit en effet comme un formidable drain, entaillant les alluvions du Rhône jusqu'à leur substratum imperméable. En son absence, la nappe alluviale (graviers) était maintenue en charge par des limons de surface peu perméables. Le percement de ce canal sur 6,5 km de longueur a notamment eu comme impact l'assèchement de nombreux puits du secteur (figure 9).

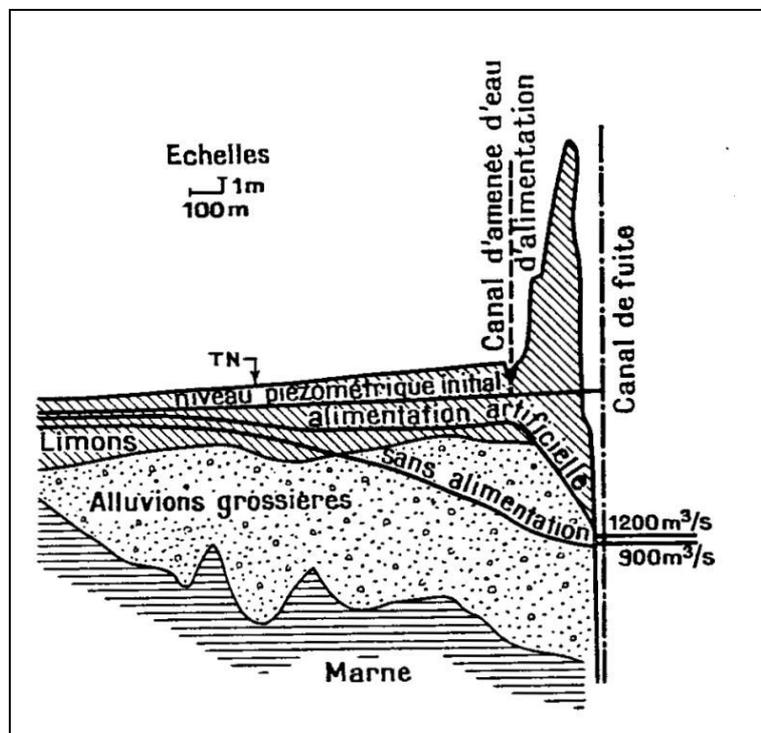


Figure 9 : Schéma de l'alimentation artificielle de Donzère-Mondragon

Pour pallier à ce phénomène, le maître d'œuvre – la Compagnie Nationale du Rhône – a réinjecté de l'eau du Rhône dans la nappe alluviale au moyen de forages d'injection répartis tout au long du canal de fuite. En détails, il s'agit de 121 fosses ou forages absorbants  $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$  en rive droite et 112 fosses ou forages absorbants  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  en rive gauche. L'influence quantitative de l'injection a été estimée à 1200 ha, réparties sur les deux rives. Aucun prétraitement n'est réalisé. La charge en sédiments étant plus élevée lors des crues, la réalimentation artificielle est suspendue durant cette période.

Les travaux ont démarré en 1952.

La perméabilité horizontale moyenne des alluvions est de l'ordre de  $2.10^{-3} \text{ m/s}$ .

L'injection d'une eau non traitée contenant 50 mg/l de sédiments limite la durée d'activités des ouvrages à 8 ans. Les ouvrages sont abandonnés après ce délai.

Concernant le colmatage des forages, M. Detay indique dans son ouvrage (" la gestion active des aquifères ") :

" Du fait de l'absence de traitement, on a calculé que tous les ans, une tonne de matière solide est introduite dans le terrain par kilomètre de front. Le colmatage, qui se limite aux massifs de graviers mis en place dans les forages, est facilité par les arrêts d'injection car le puits fait alors office de drain et collecte toutes les particules du terrain. Des essais de décolmatage à l'air-lift permettent de rétablir provisoirement le débit d'injection d'origine mais par la suite, le colmatage est encore plus rapide. "

## **3.2. REALIMENTATION ARTIFICIELLE REALISEE DANS LE CADRE D'UN PROJET DE RECHERCHE**

### **3.2.1. Projet MEDALUS II à Agen / Le Passage (Lot-et-Garonne)**

En raison d'une baisse importante du niveau de la nappe alluviale de la Garonne et compte tenu des enjeux locaux – notamment agricoles – le Conseil Général du Lot-et-Garonne a souhaité tester en 1995-1996 la faisabilité d'une recharge artificielle de l'aquifère. Un site expérimental a été identifié au lieu-dit " Le Passage ", à l'ouest d'Agen et de la Garonne.

Ces travaux ont été effectués par le BRGM dans le cadre d'un projet de l'Union Européenne intitulé MEDALUS II.

Après caractérisations géologique et hydrogéologique du site, un test d'infiltration a été mené dans les alluvions, via un fossé d'une profondeur maximale de 4 m, longeant le canal sur 750 m puis traversant le site sur 1 km avant de se jeter dans la Garonne. Le test a duré 48 jours pendant lesquels un volume total de  $132\ 000 \text{ m}^3$  a été infiltré. L'eau utilisée a été pompée dans le canal latéral à la Garonne et n'a pas fait l'objet d'un traitement avant d'être transférée dans le fossé.

Les transmissivités calculées à partir d'essais de pompage varient de  $2.10^{-3}$  à  $4,5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et le coefficient d'emmagasinement moyen est de l'ordre de 7,5%.

Un modèle numérique aux différences finies a été conçu afin d'évaluer le volume disponible au droit du site un mois et deux mois plus tard. Il a également été utilisé pour simuler une injection de 480 000 m<sup>3</sup> sur une période de 100 jours.

Les conclusions du rapport ont préconisé la réalisation d'une application en vraie grandeur, à un débit de 4800 m<sup>3</sup>/j pendant 100 jours (injection 24h/24h).

### **3.2.2. Projet REGAL (REalimentation et Gestion Active des nappes Littorales ; région PACA)**

Ce projet européen, labellisé le 16 juin 2006, est porté par VEOLIA EAU et est réalisé en partenariat avec le BRGM et le CNRS, ainsi qu'avec un partenaire privé spécialisé en maîtrise d'œuvre (ACRI). Il a pour objectif de déboucher sur un outil de gestion active permettant le pilotage des prélèvements pour la production d'eau potable et de la réalimentation artificielle de la nappe en milieu côtier.

Ce projet prévoit notamment la mise en œuvre d'un site expérimental de réinjection dans un aquifère côtier, en vue d'évaluer les possibilités de création d'une barrière hydraulique contrecarrant la progression du biseau salé à l'intérieur des terres. Une modélisation hydrogéologique maillée sera réalisée par le BRGM ; elle prendra en compte la position du biseau salé et son évolution dans le temps.

### **3.3. INFILTRATION DES REJETS D'UNE STATION D'EPURATION**

Le plus souvent les rejets de STEP dans le milieu souterrain ne sont pas effectués dans l'optique d'un soutien qualitatif ou quantitatif d'une nappe. Ils constituent cependant une forme de réalimentation artificielle.

Nous ne disposons pas de chiffres sur les volumes ou la localisation des sites de rejets de STEP dans un aquifère.

Nous présentons ci-après la méthode de l'infiltration percolation, décrite notamment dans un document réalisé en 1991 par les Agences de l'Eau (étude Inter-Agences n°9), puis une étude conduite à Argelès-sur-Mer dans les Pyrénées-Orientales sur la faisabilité du rejet des eaux de la STEP en milieu souterrain.

#### **3.3.1. L'infiltration percolation en France**

Celle-ci consiste à faire percoler l'eau usée sur des sables rapportés ou en place. L'eau épurée poursuit son infiltration dans le sol en place pour rejoindre la nappe phréatique (figure 10) ou bien elle est drainée sous le sable puis rejetée au ruisseau ou récupérée (figure 11).

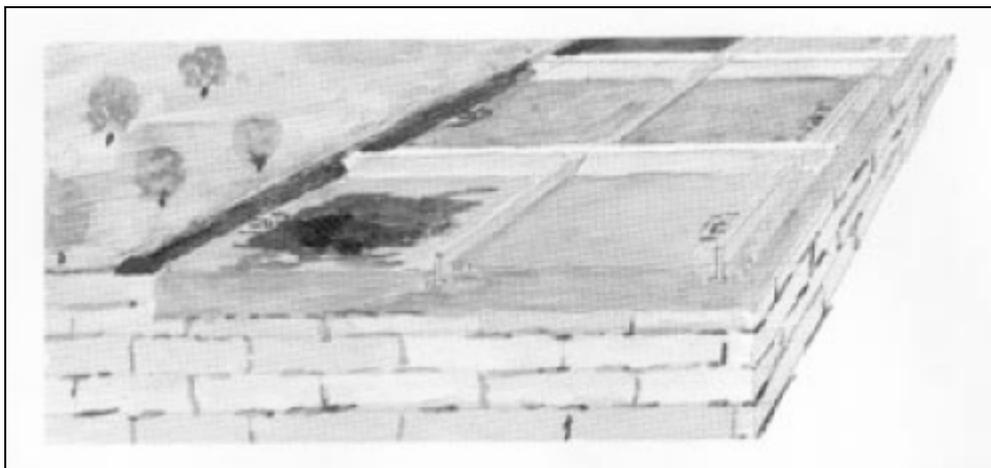


Figure 10 : Infiltration percolation avec poursuite de l'infiltration dans l'aquifère (ici un calcaire)

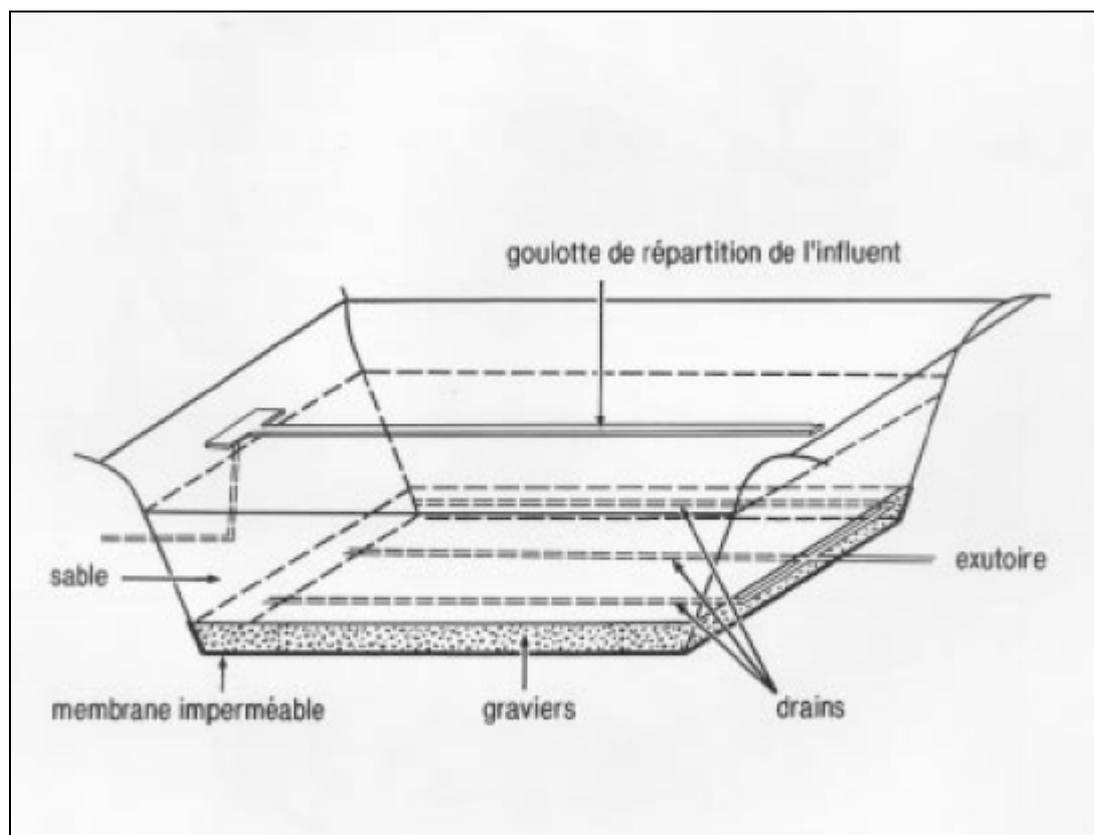


Figure 11 : Infiltration percolation étanchéifiée et drainée à la base du massif de sable

Dans le cadre de cette étude Inter-Agences, 56 sites avaient été identifiés, dont la plupart (environ 95%) rejette l'eau dans un aquifère. Pour 80% de ces STEP, les flux en entrée sont inférieurs à 4000 Equivalent-Habitant. Leur répartition par département est donnée par la figure 12.



Figure 12 : Répartition des sites d'infiltration percolation par département (source : étude Inter-Agences n°9)

### 3.3.2. Argelès-sur-mer (Pyrénées Orientales)

La faisabilité technique de la réinjection – après traitement – des eaux usées traitées de la station d'épuration de la commune d'Argelès-sur-Mer a été évaluée en 1992. Le secteur étudié couvre une superficie d'environ 2,5 km<sup>2</sup>, située au pied des Albères schisteuses, où ces formations cristallophylliennes plongent sous les dépôts plus récents constituant le bassin sédimentaire du Roussillon. Les formations quaternaires sont représentées par des sables et graviers avec intercalations de sables fins, d'argiles et de niveaux de vases dans les basses plaines du littoral, avec une couverture limoneuse plus ou moins développée. On distingue deux aquifères : celui des formations pliocènes et celui des alluvions. La nappe concernée par le projet de réalimentation est la nappe alluviale quaternaire. Celle-ci n'est pas exploitée pour l'alimentation en eau potable.

Le projet de réinjection a eu quatre buts principaux :

- compléter l'épuration des eaux usées grâce à la percolation des effluents à travers une couche suffisante de matériaux sableux, dans lesquels vit une importante microflore ;
- supprimer une partie du rejet en mer des eaux usées de la commune d'Argelès-sur-Mer, notamment en période estivale ;
- recharger la nappe superficielle dans le but d'en augmenter les ressources afin d'arroser les espaces verts du complexe touristique ;
- repousser le biseau salé qui peut, lors des pompages intensifs estivaux, compromettre la qualité de l'eau.

Deux méthodes de recharge artificielle ont été envisagées :

- l'infiltration-percolation qui permet une épuration des eaux usées lors de la percolation à travers la zone non saturée ;
- l'injection dans des aquifères, qui permet aussi une amélioration de la qualité des eaux injectées, mais dans une moindre mesure du fait du court trajet effectué par les eaux entre le puits d'injection et la zone saturée. L'amélioration se fait ici essentiellement par dilution avec l'eau de la formation aquifère, à condition que celle-ci soit de meilleure qualité.

Un certain nombre de facteurs sont favorables au projet de réalimentation dans le secteur étudié :

- il n'existe pas de contraintes majeures quant à l'occupation actuelle des sols entre la station d'épuration et la Méditerranée (lieu-dit " Prade Basse " ) ;
- les captages d'eau des formations pliocènes sont inexistantes et ceux de la nappe alluviale s'avèrent peu exploités ;
- les risques de contamination de l'aquifère pliocène profond s'avèrent nuls, du fait de la différence de charge positive de 5 m par rapport à l'aquifère superficiel.

Néanmoins, d'autres facteurs se montrent défavorables au projet :

- les dépôts quaternaires s'avèrent très hétérogènes de par leur nature et la zone non saturée est souvent représentée par des limons et des vases, à l'exception du cordon dunaire ;
- l'épaisseur de la zone non saturée (siège de la principale épuration) ne dépassait pas 0,50 à 1 m durant la période d'observation (mai à juin 1992) ;
- la transmissivité des dépôts quaternaires est généralement faible (inférieure à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s), à l'exception des sables dunaires (supérieure à  $5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s) dont l'extension est trop réduite pour créer une infrastructure de réinjection des eaux, et d'une zone située en amont du port où des transmissivités supérieures à  $5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s ont été calculées ;
- la teneur en azote des ouvrages situés dans la zone d'étude dépasse les normes et la teneur en ammonium s'est avérée localement importante. De plus, des minéralisations très élevées avec des eaux saumâtres ont été observées dans les secteurs à faciès les plus perméables (en amont du port).

La synthèse de ces caractéristiques n'est pas parue favorable au projet de réalimentation de la nappe superficielle avec les eaux usées traitées de la station d'épuration. L'infiltration-percolation paraît difficilement réalisable en raison de la

présence de niveaux limoneux et vaseux à proximité de la surface. De plus, les perméabilités réduites constitueraient un risque de " gonflement " de la nappe avec remontée excessive du niveau piézométrique. Seul le petit secteur situé en amont du port pourrait être éventuellement retenu, sous réserve de vérifier, en période d'étiage, la position précise de la nappe et la lithologie exacte des terrains non saturés. En cas de résultats défavorables de cette vérification, la technique d'infiltration-percolation serait alors totalement abandonnée.

La méthode par injection directe serait alors examinée, mais en sachant que le rôle de filtration de la zone non saturée ne pourra être joué et que le risque de colmatage du système s'avère important.

### **3.4. INFILTRATION D'EAUX PLUVIALES**

A titre de rappel, il existe en France de nombreux bassins d'infiltration mis en place suite à la réalisation d'aménagements anthropiques : autoroutes ou autres axes routiers importants, parkings à grande surface imperméabilisée, bassin d'infiltration en sortie d'un bassin de rétention d'eaux pluviales, bassins destinés à la lutte contre l'érosion des sols lors de l'utilisation de terres à forte pente à des fins agricoles ou viticoles...

Ces innombrables aménagements constituent – lorsqu'ils ne sont pas colmatés – des sites de réalimentation artificielle des aquifères.

### **3.5. INJECTION DANS UN RESERVOIR PETROLIFERE**

L'exploitation d'un champ pétrolifère étant grandement facilitée par l'existence de pressions importantes dans le réservoir, des projets d'injection d'eau ont vu le jour.

Dans une étude consultée sur cette thématique, il était envisagé – au milieu des années 1980 – de prélever jusqu'à 3000 m<sup>3</sup>/j dans un aquifère superficiel pour les injecter dans un réservoir profond, le Trias. Ce projet est situé dans le bassin parisien, dans l'Est de la région Ile-de-France. La réalisation effective de l'injection n'est pas connue.



## 4. Réalimentation artificielle d'aquifère destinée à l'approvisionnement en eau potable

Les sites présentés dans ce chapitre sont issus de la bibliographie listée en fin de ce rapport. Des éléments complémentaires ont été apportés par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et par un entretien avec la Lyonnaise des Eaux.

Le dépouillement des données bibliographiques a permis d'identifier 51 sites d'études et/ou de réalisation de réalimentation artificielle d'aquifère en France. 43 d'entre eux sont directement liés à la production d'eau potable.

La localisation des différents sites dédiés à l'AEP figure dans la carte placée en annexe 3. Les sites de Donzère-Mondragon, de la basse vallée de la Durance et d'Agen / Le passage (projet de recherche MEDALUS II) sont aussi reportés sur cette carte.

Quatre sites principaux se dégagent de cette recherche :

- Croissy-sur-Seine et Flins-Aubergenville pour l'alimentation en eau de la ville de Paris et de la partie ouest de l'agglomération parisienne, avec respectivement 25 et 8 millions de m<sup>3</sup> infiltrés en moyenne par an (les informations relatives à ces sites sont majoritairement issues des différentes synthèses produites par M. Detay) ;
- Houlle-Moulle pour la ville de Dunkerque, avec un volume infiltré très variable d'une année à l'autre : de 0 à 7,2 millions de m<sup>3</sup> par an entre 1995 et 2003 ;
- Crépieux-Charmy (ville de Lyon) dont la capacité totale d'infiltration est de l'ordre de 200 000 m<sup>3</sup>/j (les volumes réellement infiltrés sont bien inférieurs).

Il existe par ailleurs une concentration importante de sites dans le département de la Haute-Garonne, liée à l'implication du Conseil Général dans cette démarche.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser au premier abord, l'objectif de la mise en œuvre d'une RAA à proximité d'un captage AEP n'est pas systématiquement lié au quantitatif : bon nombre de stations – notamment en Haute-Garonne – ont été réalisées pour diminuer les teneurs en nitrates, en bénéficiant d'une eau de surface bien moins chargée que la nappe captée.

Enfin, il paraît certain que cet inventaire des sites de RAA liés à l'AEP en France n'est pas exhaustif et qu'il mériterait d'être complété par une approche régionale voire départementale, notamment auprès des services déconcentrés du Ministère de la Santé et des Conseils Généraux.

## 4.1. DESCRIPTION DES STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE : SITES MAJEURS

### 4.1.1. Croissy-sur-Seine (Yvelines)

Le champ captant de Croissy-sur-Seine (premiers prélèvements en 1920) est situé en vallée de la Seine, à une dizaine de kilomètres à l'ouest de Paris. L'aquifère capté est celui de la craie sénonienne (Masse d'eau souterraine 3107 "Eocène et Craie du Vexin") en communication avec les alluvions sus-jacentes. La nappe alluviale est elle-même en lien hydraulique avec le fleuve.

L'état des lieux réalisé dans le bassin Seine-Normandie lors de la définition des masses d'eau (décembre 2004) fait état des chiffres suivants (Fiche de caractérisation initiale de la ME 3 107 -2005- Appréciation du risque de non atteinte du bon état en 2015):

- volume moyen annuel infiltré: 25 M de m<sup>3</sup>
- débit maximum d'infiltration de 150 000 m<sup>3</sup>/jour
- volume moyen prélevé: 45 M de m<sup>3</sup>.

La volonté de mettre en œuvre une technique de RAN sur ce site fait suite au constat de l'existence d'une forte composante d'eaux résiduaires urbaines non traitées dans le débit de la Seine (50% lors des étiages accentués), à laquelle s'ajoutaient des rejets industriels "nombreux et plus ou moins nocifs" rendant l'eau "de très mauvaise qualité" (J. Margat, 1972).

Les enjeux identifiés lors de la mise en œuvre de cette RAN furent :

- la reconstitution des réserves ;
- la régularisation et l'augmentation des ressources disponibles par une utilisation combinée des eaux superficielles et souterraines ;
- la conservation de la qualité des eaux souterraines ;
- la régularisation thermique.

La recharge artificielle de l'aquifère a démarré en 1959, à partir d'eau de la Seine filtrée. La réalimentation se fait au travers de bassins d'infiltration. En 1965, 11 millions de m<sup>3</sup> étaient injectés dans la nappe par ce biais, avec une vitesse d'infiltration estimée à 1 m/j environ.

J. Bize ("Alimentation artificielle des nappes souterraines", 1972) propose un schéma du site de Croissy-sur-Seine (figure 13).

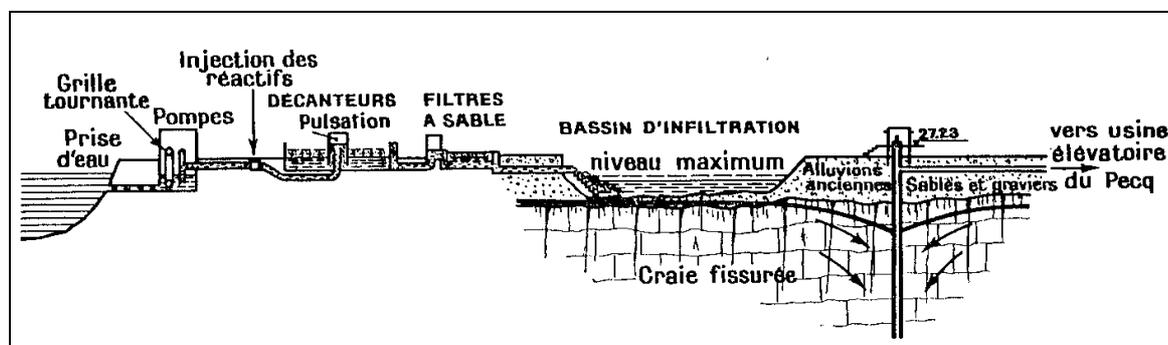


Figure 13 : Schéma du site de Croissy-sur-Seine (J. Bize)

L'eau de la Seine est traitée par microfiltration, coagulation, décantation et filtration sur sable. Les bassins d'infiltration occupent une superficie de 15 ha environ.

En 1974, de la RAN par injection directe a été testée sur le site, via un puits d'injection de 1500 mm de diamètre. Le sol autour du puits a été chargé et fortement compacté, afin de contrecarrer d'éventuelles résurgences à proximité de l'ouvrage. En fonctionnement continu, le débit d'infiltration atteint fut de l'ordre de 3500 m<sup>3</sup> par jour en moyenne. Suite à d'importants problèmes d'exploitation, notamment de colmatage, cette technique a été abandonnée.

Dans son livre ("La gestion active des aquifères", 1991), M. Detay précise les conditions dans lesquelles se colmatent les bassins d'infiltration :

"Sur ce site, le colmatage résulte de la précipitation des carbonates, des poussières de l'atmosphère, des fines arrachées aux parois, du développement du plancton et du compactage des couches superficielles.

Le colmatage superficiel est causé principalement par le développement du plancton. L'encrassement est très important au cours de la saison sèche, lorsque la croissance algale est maximale. Une sablière mise en eau en avril 1976 a dû être arrêtée en mai car un tapis de plancton quasiment étanche s'était formé en fond de bassin. Une mise au sec et une exposition au soleil pendant deux mois sans aucun traitement mécanique a suffi pour désagréger la matière organique et éliminer toute trace de colmatage. Le bassin a retrouvé sa capacité d'infiltration initiale.

Les autres éléments tels que les fines argileuses ont un rôle colmatant plus progressif."

L'état des lieux réalisé lors de la définition des masses d'eau dans le bassin Seine-Normandie (décembre 2004) fait état d'un volume annuel moyen infiltré de l'ordre de 25 millions de m<sup>3</sup>.

#### **4.1.2. Flins-Aubergenville (Yvelines)**

Le champ captant de Flins-Aubergenville est situé dans la plaine alluviale de la Seine en amont de Mantes-la-Jolie ; il couvre une superficie de 16 km<sup>2</sup>. Son exploitation a démarré en 1957. Actuellement la production d'eau potable est de 144 000 m<sup>3</sup>/jour.

Depuis 1980, la nappe est soutenue par réalimentation artificielle en utilisant les eaux de la Seine après traitement.

L'aquifère capté est constitué de deux couches : les alluvions de la Seine et la craie sous-jacente. L'exploitation du champ captant (37 puits et forages) a engendré une vaste zone piézométrique déprimée dont le rabattement peut atteindre 9 m. La réalimentation induite de l'aquifère bi-couche par la Seine est de l'ordre de 80 % ("Atlas des eaux souterraines de France" – Editions BRGM).

L'état des lieux réalisé dans le bassin Seine-Normandie lors de la définition des masses d'eau (décembre 2004) fait état des chiffres suivants (Fiche de caractérisation initiale de la ME 3 107 -2005- Appréciation du risque de non atteinte du bon état en 2015):

- volume moyen annuel infiltré: 8 M de m<sup>3</sup>
- débit maximum d'infiltration de 36 000 m<sup>3</sup>/jour

Les éléments de description qui suivent proviennent :

- de l'ouvrage de M. Detay : "*La gestion active des aquifères*", Masson 1997;
- d'un article de 2001 par H. Haeffner, J.J. Grandguillaume et A. Vanrenthergem: "La réalimentation des nappes: exemples d'application en France" – (La Houille Blanche, n° 3-4, 2001);

- d'un article récent (2007) de H. Haeffner, J.J. Grandguillaume : " *Le procédé Bi'Eau. Une solution innovante pour un traitement in-situ des ressources en eau*". Colloque "Gestion active des eaux" Paris, 12-13 Juin 2007 - Publications de la SHF.

#### Dispositif de réalimentation avant mise en service du procédé Bi'Eau

Le dispositif de réalimentation artificielle est composé de sept bassins d'infiltration (6 de 6000 m<sup>2</sup> et un de 15 ha). L'eau utilisée est celle de la Seine, après traitement. Les vitesses d'infiltration sont de l'ordre de 0,4 à 1 m/j (M. Detay).

Les sablières dans lesquelles s'infiltrait l'eau ont été considérées comme étant complètement colmatées en 1991 (des tests sur des carottes avaient donné des transmissivités de 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s dans les premiers centimètres de craie en fond de sablière). De plus, de l'aluminium a été rencontré en forte concentration.

Différents essais de décolmatage ont été conduits :

- raclage des 15 premiers centimètres de craie (sablière n°6) ;
- réalisation de tranchées drainantes remplies de sables (sablière n°5) ;
- fissuration et fracturation provoquées (explosif) dans la zone non saturée (5m) dans la sablière n°2.

Le Tableau 2, extrait de l'ouvrage de M. Detay, donne un premier aperçu des conséquences de ces essais sur la capacité infiltrante des bassins.

Sablière	Volume infiltré en 5 semaines (m <sup>3</sup> )	Infiltration moyenne en 5 semaines (m/j)
1- sans traitement	60 000	0,29
2- explosifs	210 000	0,88
3- sans traitement	80 000	0,29
4- sans traitement	180 000	0,77
5- tranchées	250 000	1,08
6- décapage	135 000	0,55

Tableau 2 : Essais d'infiltration à Flins-Aubergenville sur 6 sablières après décolmatage selon des techniques différentes (source : M. Detay)

Ceci étant, un arrêt de l'usine trois semaines après la réalisation des essais fausse ces résultats, notamment pour la sablière n°2 dont la capacité infiltrante est de fait sous-estimée. La figure 14, extraite également de l'ouvrage de M. Detay, rend compte de ce phénomène, ainsi que d'un effet à plus long terme des différentes techniques utilisées.

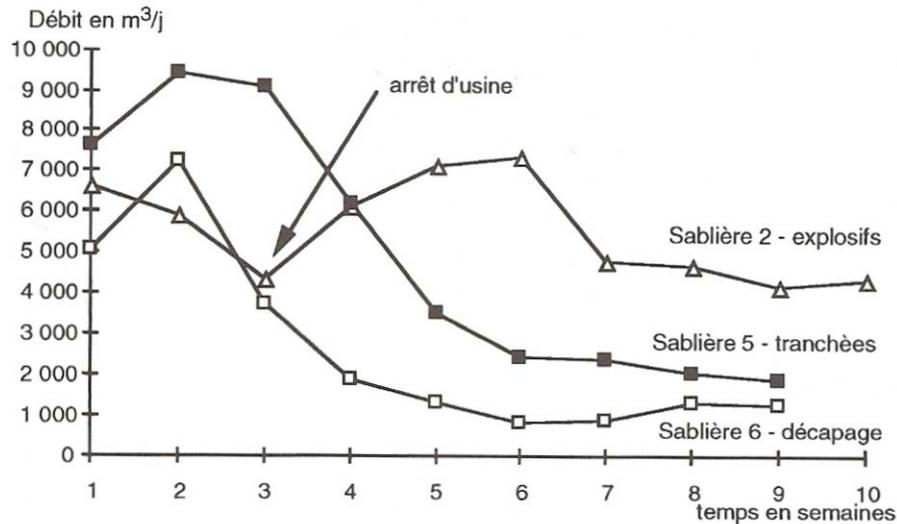


Figure 14 : Débits d'infiltration dans trois sablières lors des essais de décolmatage de 1991 à Flins-Aubergenville (source : M. Detay)

#### Fonctionnement du site depuis 2006

Pour utiliser au mieux les capacités naturelles de filtration et d'autoépuration de l'aquifère, un procédé de réalimentation artificielle développé par la Lyonnaise des Eaux et le CIRSEE est mis en œuvre sur le site (procédé Bi'Eau).

Au plan hydrodynamique, le principe du procédé repose sur la mise en œuvre d'une circulation de l'eau dans le milieu souterrain en 2 étapes successives.

1) il y a d'abord un pompage dit "primaire" : prélèvement de l'eau de la nappe soit en bordure de cours d'eau, soit dans une gravière proche du cours d'eau (en relation hydraulique avec celui-ci); on met ainsi à profit la fonction de filtration sur berges des eaux du cours d'eau (filtration mécanique et bio-géochimique).

2) l'eau pompée est ensuite dirigée vers des bassins de réalimentation à partir desquels elle est réinfiltrée vers la nappe; il y a ainsi une deuxième filtration, se produisant en milieu aéré oxydant.

Un deuxième pompage (dit "secondaire") prélève l'eau à proximité des bassins d'infiltration pour l'acheminer vers l'usine de traitement.

Le fonctionnement hydrodynamique du dispositif est illustré par la figure 15 ci-après.

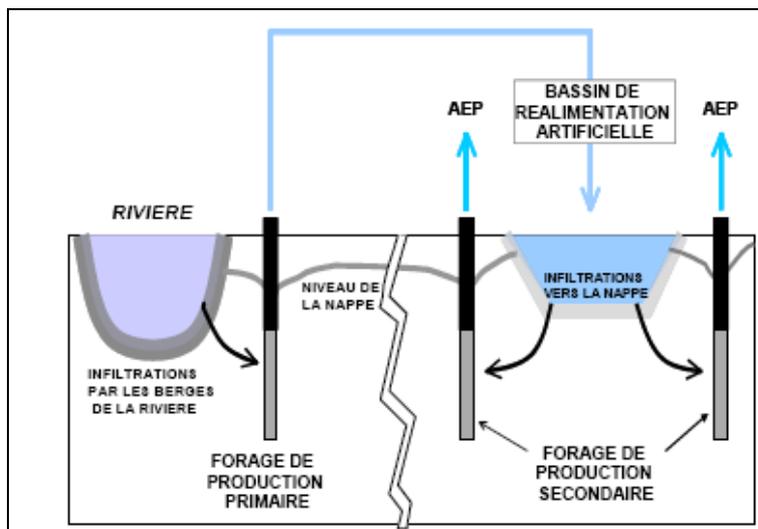


Figure 15 - Fonctionnement hydrodynamique du procédé Bi'Eau

Extrait, avec autorisation de l'auteur, de l'article " *Le procédé Bi'Eau. Une solution innovante pour un traitement in-situ des ressources en eau*". Colloque "Gestion active des eaux" Paris, 12-13 Juin 2007 - Publications de la SHF.

Ce procédé a été mis en œuvre à Flins-Aubergenville en remplacement de l'alimentation directe des bassins d'infiltration par l'eau de la Seine après traitement, permettant ainsi une réduction importante (75 %) des quantités de boues issues de ce traitement.

Par ailleurs, il y a eu amélioration de la qualité de l'eau brute arrivant à l'usine de traitement, notamment pour le fer, le manganèse et l'ammonium.

#### 4.1.3. Crépieux-Charmy (Rhône)

C'est l'un des plus grands champs captant d'Europe, assurant l'alimentation en eau potable de l'agglomération Lyonnaise à 98%.

Il est situé à l'amont immédiat de l'agglomération entre les 2 bras principaux du fleuve, le canal de Jonage et le canal de Miribel (figure 16) et occupe une superficie de 375 ha en zone de protection immédiate.

La nappe captée est la nappe des alluvions modernes du Rhône

Quelques chiffres donnent l'importance du dispositif de captage des eaux souterraines, qui comporte 114 puits et 164 pompes (les plus grosses débitant 9 000 m<sup>3</sup>/h), (...).

La demande moyenne journalière est de l'ordre de 300 000 m<sup>3</sup> (109,5 M m<sup>3</sup>/an) pouvant dépasser 400 000 m<sup>3</sup> en pointe.

La qualité est excellente : l'eau est naturellement potable, les nitrates sont entre 5 et 7 mg/l, il n'y a ni pesticide ni micropolluant.

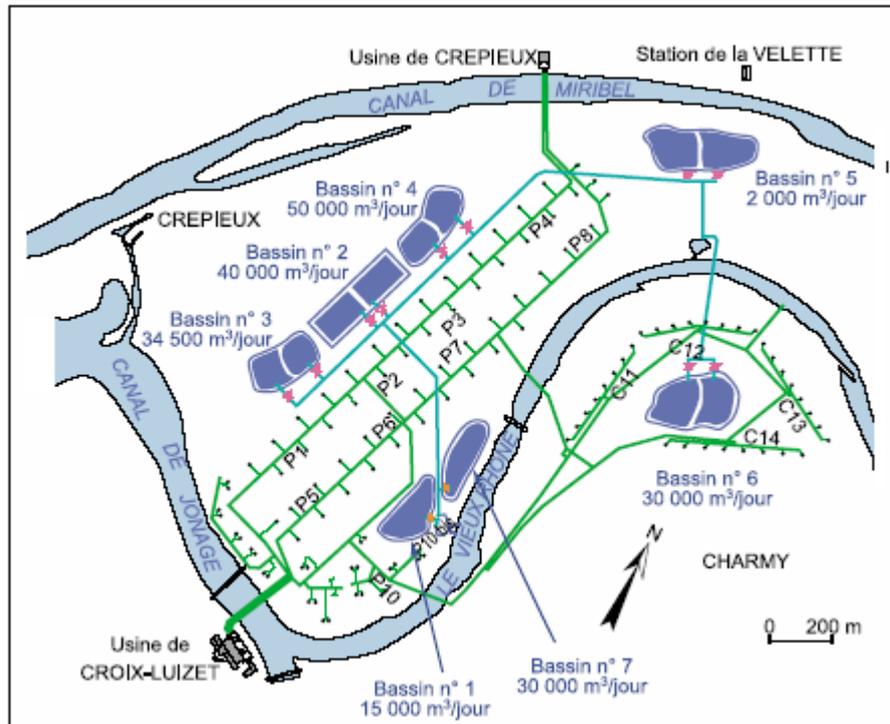


Figure 16 : Plan schématique du champ captant de Crépieux-Charmy

### Protection de la nappe

Les pompages créant un important cône de dépression et de forts gradients hydrauliques, la nappe, en liaison hydraulique avec le Rhône, peut donc être menacée par une pollution du Rhône.

Pour protéger le champ captant des bassins d'infiltration ont donc été creusés entre les bras du fleuve et les forages. L'eau infiltrée (venant du Rhône) fait remonter les niveaux de la nappe et crée un dôme piézométrique au droit des bassins, créant ainsi une barrière hydraulique (en cas de pollution, l'alimentation des bassins est stoppée mais le dôme piézométrique mettra un certain temps à se résorber, faisant donc obstacle à la propagation d'une pollution).

Au total le dispositif permet de passer 2 jours sans restriction, soit 3 à 4 fois la durée moyenne d'une pollution.

### Caractéristiques des bassins

Les bassins sont actuellement au nombre de 12 et représentent une superficie d'infiltration de 150 000 m<sup>2</sup>. Ils sont profonds de 4 à 5 m avec une tranche d'eau variant entre 0.5 m et 2.5 m.

Une zone non saturée de 2 à 3 m d'épaisseur est maintenue sous les bassins pour que l'épuration bactériologique de l'eau brute puisse se réaliser.

Les volumes infiltrés représentent à 30 à 40 % des volumes produits.

Pour une information plus détaillée, on pourra se reporter à l'article de R. Jonac et C. Michelot: "Protection active de la nappe alluviale de Crépieux-Charmy (Lyon)" Publications de la SHF: Colloque "Gestion active des Eaux" des 12 et 13 Juin 2007.

#### 4.1.4. Houlle-Moulle (Pas-de-Calais)

Le champ captant de Houlle-Moulle produit annuellement 17 millions de m<sup>3</sup> d'eau environ, à partir de forages captant la nappe de la craie sénonienne au niveau de sa limite de captivité. L'eau est majoritairement destinée à l'agglomération de Dunkerque.

Originellement, la nappe était captive, voire artésienne dans ce secteur. Si en période de forte pluviosité certains forages sont toujours artésiens, un déficit pluviométrique accentué engendre des baisses de niveau importantes, supprimant l'artésianisme dans des zones où existent des cressonnières dont l'activité s'en trouve de fait menacée. Ce phénomène, existant dès 1971, a conduit à la mise en place d'une réalimentation artificielle.

Le dispositif de réalimentation correspond à une recharge par bassins d'infiltration. L'eau est pompée dans la rivière la Houlle, affluent de l'Aa, puis traitée (ozonation, décantation, filtration) avant d'être infiltrée vers la nappe via deux bassins de 10 000 m<sup>2</sup> chacun.

Les volumes d'eau prélevés dans la Houlle en vue de la réalimentation ne peuvent excéder 50 000 m<sup>3</sup>/jour (par arrêté préfectoral).

Le programme de réalimentation de la nappe est géré par un modèle qui prend en compte les éléments de l'année précédente, les prévisions de pompages et le contexte hivernal de l'année (pluvieux, moyen ou sec). En fonction des résultats, on détermine si la réalimentation est nécessaire et dans quelles proportions. De fait, les volumes infiltrés sont très variables d'une année à l'autre : 7,2 Mm<sup>3</sup> en 1997, 1,7 Mm<sup>3</sup> en 1998.

	Unités	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Réalimentation de la nappe	m <sup>3</sup>	0	5 022 670	7 244 450	1 726 063	0	0	0	0	3 517 178
Production totale du champ captant	m <sup>3</sup>	17 148 420	17 668 274	17 494 970	16 438 594	16 118 283	15 791 989	16 491 788	16 424 517	17 324 250

Tableau 3 : Production et réalimentation du champ captant de Houlle-Moulle de 1995 à 2003 (source : Rapport annuel sur le prix et la qualité des services de l'eau (Dunkerque Grand littoral, synthèse 2003))

En maintenant une charge hydraulique suffisante, la réalimentation artificielle permet d'éviter la suppression de l'artésianisme de la zone de Tilques et de ses cressonnières.

Le site est exploité par la Lyonnaise des Eaux pour le compte du SMAERD (Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau de la Région Dunkerquoise).

## 4.2. STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE EN RÉGION MIDI-PYRÉNÉES

Entre 1975 et 1985, de nombreuses stations de réalimentation ont été réalisées dans le département de la Haute-Garonne (31), à l'instigation du Conseil Général. Elles ont été construites sur la base du modèle présenté par la figure 17.

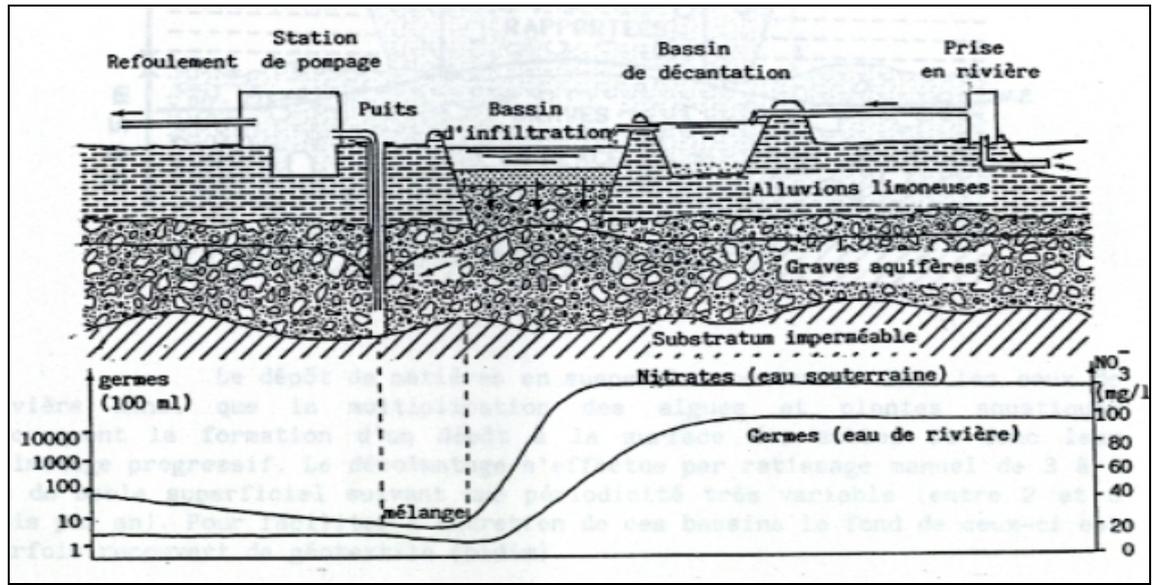


Figure 17 : Schéma type d'une station de réalimentation artificielle de nappe en Haute-Garonne

### 4.2.1. Blagnac (31)

La station de RAA de Blagnac a été mise en service en 1974, suite à une étude hydrogéologique préliminaire du BURGEAP conduite en 1972. La commune de Blagnac était alors propriétaire. La gestion de l'exploitation a été confiée à Veolia Water.

La station est implantée dans les alluvions actuelles de la Garonne, dont la transmissivité a été évaluée à  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Cette station comporte un bassin de décantation de 5000 m<sup>3</sup> et douze bassins d'infiltration de 400 m<sup>2</sup> chacun. L'eau prélevée dans la Garonne à moins de 100 mètres de là est décantée avant l'infiltration. Le plan de la station est placé en annexe.

Le volume infiltré est de l'ordre de 10 000 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 12 000 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 10 000 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station était équipée en 1986 d'un "truitomètre" (les prélèvements dans la Garonne sont arrêtés en cas de décès d'une truite, leur existence garantissant une "qualité minimale" de l'eau).

La station de pompage a été arrêtée fin 2003, au profit d'une interconnexion avec la ville de Toulouse. Les bassins d'infiltration ont été transformés en bassin d'ornement paysager (nénuphars, poissons,...).

#### 4.2.2. Calmont (31)

La station de Calmont a été mise en service en 1984, suite à une étude préalable du BRGM en 1983. Le propriétaire était à cette époque le Syndicat Hers-Ariège.

La finalité de la RAA n'est pas quantitative mais qualitative, l'injection des eaux de la rivière (teneur en nitrates de l'ordre de 5 mg/l) permettant de diluer une eau de nappe fortement nitratée (120 à 140 mg/l).

La station est implantée dans les alluvions modernes de l'Ariège, dont la transmissivité a été évaluée à  $2.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (coefficient d'emmagasinement de 5%).

Elle est constituée de deux bassins de décantation (surface totale de 1800 m<sup>2</sup> pour un volume de 3400 m<sup>3</sup>) et de trois bassins d'infiltration (surface totale : 4500 m<sup>2</sup>). Le plan de la station est placé en annexe.

Les eaux d'infiltration sont prélevées dans l'Ariège à un débit de 420 m<sup>3</sup>/h environ. Le volume infiltré est de l'ordre de 4000 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 9000 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 4300 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station était équipée en 1986 d'un " truitomètre " et d'un turbidimètre.

Au cours de l'hiver 1992/1993 et pour la première fois depuis sa création, la station de réalimentation de nappe de Calmont a produit une eau potable avec un taux de nitrates supérieur à la norme des 50 mg/l. De plus, une inondation du site est survenue et la nappe alluviale a affleuré dans le fond des bassins. L'infiltration a donc été gênée.

Une étude complémentaire a donc été réalisée (Rapport BRGM/RN-00073-FR), visant à tester par modélisation la réalisation d'un rabattement de nappe, par le biais de différentes techniques :

- un puits de pompage ;
- trois puits de pompage ;
- une tranchée drainante (drain enterré) ;
- un barrage hydraulique (palplanches).

Le barrage hydraulique s'est avéré inefficace compte tenu de la forte perméabilité des alluvions.

La tranchée drainante est décrite comme fiable, ne nécessitant qu'un débit d'exhaure limité (200 à 400 m<sup>3</sup>/h). Cependant, sa mise en place est délicate du fait de l'instabilité des graves et de l'emprise foncière.

Les techniques de rabattement par pompage présentant une contrainte importante (rejet dans l'Hers), il a été proposé de surélever le fond des bassins.

Enfin, le rapport BRGM/88SGN315MPY compare l'efficacité du fonctionnement des stations de Calmont et de Saint-Jory de septembre 1986 à mars 1988. Plusieurs paramètres ont été suivis :

- la physico-chimie et des ions majeurs (turbidité, conductivité, nitrates, ammonium, phosphates, oxygène dissous et température) ;
- les radio-isotopes de l'oxygène ;
- les paramètres microbiologiques ;
- les métaux lourds et les substances toxiques ;
- les fluctuations piézométriques.

Le site était en service en 2005.

#### **4.2.3. Cintegabelle (31)**

La station de Cintegabelle a été mise en service en 1976. Le propriétaire en 1986 est le Syndicat rive gauche – Ariège. Une étude hydrogéologique a été réalisée par le BRGM en 1983.

La station est implantée dans les alluvions modernes de l'Ariège, dont la transmissivité a été évaluée à  $3.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (coefficient d'emmagasinement de 3%).

Cette station comporte deux bassins de décantation (surface totale de 1000 m<sup>2</sup> pour un volume de 1800 m<sup>3</sup>) et quatre bassins d'infiltration de 500 m<sup>2</sup> chacun. Le plan de la station est placé en annexe.

Les eaux d'infiltration sont prélevées dans l'Ariège à un débit de 280 m<sup>3</sup>/h environ. Le volume infiltré est de l'ordre de 2000 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 2500 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 1500 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Le site était en service en 2005.

#### **4.2.4. Grenade (31)**

La station de RAA de Grenade a été mise en service en 1981, suite à une étude hydrogéologique préliminaire du BRGM conduite en 1974. Le syndicat de la vallée de la Save et des coteaux de Cadours était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions actuelles de la Garonne, dont la transmissivité a été évaluée à  $5.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (coefficient d'emmagasinement de 5%).

Cette station comporte un bassin de décantation (surface de 300 m<sup>2</sup> pour un volume de 600 m<sup>3</sup>) et quatre bassins d'infiltration (trois de 400 m<sup>2</sup> et un de 600 m<sup>2</sup>). Le plan de la station est placé en annexe.

Les eaux d'infiltration sont prélevées dans la Garonne à un débit de 200 m<sup>3</sup>/h environ. Le volume infiltré est de l'ordre de 3000 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 5600 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 2500 m<sup>3</sup>/j en 1986.

#### **4.2.5. Lavelanet-de-Comminges (31)**

Les communes de Cazères, Lavelanet de Comminges et Saint-Julien (au sud-est de Toulouse, en rive gauche de Garonne) étaient alimentées (au moins jusqu'en 1989, date de la référence bibliographique) par deux puits de 15 m de profondeur. Les puits captent l'eau de la nappe alluviale et sont situés au lieu-dit Cap-Blanc. Cette alimentation avait suffi à fournir les 3000 m<sup>3</sup>/jour nécessaires aux trois agglomérations, même en cas de sécheresse comme en 1989. Cependant, les teneurs en nitrates de l'eau souterraine exploitée avaient dépassé le seuil des 50 mg/l. Pour pallier à ce problème, une réalimentation artificielle de la nappe a été envisagée.

Le fonctionnement envisagé consiste dans un premier temps à prélever l'eau brute dans la nappe alluviale, chargée en nitrates, en amont de la station de captage. Puis, à l'aide de bassins, cette eau est réintroduite dans la nappe par infiltration, à proximité des captages, juste en amont de ceux-ci. L'eau subit ainsi une filtration naturelle durant son passage dans la zone non saturée.

L'aquifère est constitué d'une quinzaine de mètres d'alluvions, correspondant à un ancien chenal de la Garonne, dont la zone non saturée est épaisse de 7 à 8 m. Le débit de production du captage est de l'ordre de 200 m<sup>3</sup>/h.

La station de RAA a été créée sur la base suivante (cf. plan en annexe):

- une prise d'eau brute dans la nappe, à environ 500 m en amont des captages ;
- deux bassins de décantations de 300 m<sup>2</sup> chacun ;
- trois bassins d'infiltration de 500 m<sup>2</sup> chacun, à 5 m environ en amont des captages. Les 1500 m<sup>2</sup> de bassins doivent permettre d'infiltrer 3000 m<sup>3</sup>/jour, soit la consommation habituelle des trois communes. Le fractionnement en 3 bassins favorise l'entretien des infrastructures.

#### **4.2.6. Noé (31)**

La station de RAA de Noé a été mise en service en 1985, suite à une étude hydrogéologique préliminaire du BRGM réalisée en 1983. La commune de Noé était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions modernes de la Garonne, dont la transmissivité a été évaluée à 6.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s (coefficient d'emmagasinement de 5%).

Cette station comporte un bassin de décantation (surface totale de 420 m<sup>2</sup> pour un volume de 500 m<sup>3</sup>) et deux bassins d'infiltration de 350 m<sup>2</sup> chacun. Le plan de la station est placé en annexe.

Les eaux d'infiltration sont prélevées dans la Garonne à un débit de 150 m<sup>3</sup>/h environ. Le volume infiltré est de l'ordre de 400 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 1600 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 600 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station était équipée en 1986 d'un " truitomètre " et d'un turbidimètre.

#### **4.2.7. Pinsaguel (31)**

La station de RAA de Pinsaguel a été mise en service en 1978. Le syndicat Plaine-Ariège-Garonne était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions actuelles de l'Ariège et les eaux d'infiltration sont prélevées dans l'Ariège à un débit de 100 m<sup>3</sup>/h environ, à 55 mètres du bassin de décantation. Le volume infiltré est de l'ordre de 1000 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 1200 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 1200 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station comporte un bassin de décantation de 400 m<sup>2</sup> pour un volume de 600 m<sup>3</sup> et deux bassins d'infiltration de 400 et 500 m<sup>2</sup>. Le plan de la station est placé en annexe.

Le site était en service en 2005.

#### **4.2.8. Portet-sur-Garonne (31)**

La station de RAA de Portet-sur-Garonne a été mise en service en 1978. Le syndicat de Portet-Roques était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions modernes de la Garonne et les eaux d'infiltration sont prélevées dans le canal de Saint-Martory (écoulement gravitaire). Le

volume infiltré est de l'ordre de 1000 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 1200 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 2600 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station comporte un bassin de décantation de 300 m<sup>2</sup> pour un volume de 500 m<sup>3</sup> et trois bassins d'infiltration de 600 m<sup>2</sup> chacun. Le plan de la station est placé en annexe.

#### **4.2.9. Roques (31)**

La station de RAA de Roques a été mise en service en 1978. Le syndicat de Portet-Roques était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions modernes de la Garonne et les eaux d'infiltration sont prélevées dans des gravières situées à 250 m du site de captage. Ce prélèvement en gravières pose des difficultés lors des périodes prolongées de déficit hydrique : à l'automne 1986, les 17 ha des gravières étaient presque à sec.

Le débit prélevé est de 100 m<sup>3</sup>/h environ pour un volume infiltré de l'ordre de 1200 m<sup>3</sup> par jour pour un débit de pointe de 2000 m<sup>3</sup>/j (chiffres de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 1000 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station qui ne comporte pas de bassin de décantation est équipée de deux bassins d'infiltration de 400 et 800 m<sup>2</sup>. Le plan de la station est placé en annexe.

#### **4.2.10. Saint-Jory (31)**

La station de RAA de Saint-Jory a été mise en service en 1984, suite à une étude réalisée par le BRGM en 1983. Le syndicat de Saint-Jory-Castelnau-d'Estretfonds était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions modernes de la Garonne, dont la transmissivité a été estimée à 1.10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s (coefficient d'emmagasinement de 3%).

Les eaux d'infiltration sont prélevées dans la Garonne à un débit de 180 m<sup>3</sup>/h, pour un volume infiltré de 2500 m<sup>3</sup>/jour (3200 m<sup>3</sup>/jour en pointe). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 2500 m<sup>3</sup>/j. Tous ces chiffres datent de 1986.

Cette station comporte un bassin de décantation de 450 m<sup>2</sup> pour un volume de 900 m<sup>3</sup> et est équipée de deux bassins d'infiltration de 1000 m<sup>2</sup> chacun. Le plan de la station est placé en annexe. Le site était équipé d'un " truitomètre ".

Le rapport BRGM/88SGN315MPY compare l'efficacité du fonctionnement des stations de Calmont et de Saint-Jory de septembre 1986 et de mars 1988. Plusieurs paramètres ont été suivis :

- la physico-chimie et des ions majeurs (turbidité, conductivité, nitrates, ammonium, phosphates, oxygène dissous et température) ;
- les radio-isotopes de l'oxygène ;
- les paramètres microbiologiques ;
- les métaux lourds et les substances toxiques ;
- les fluctuations piézométriques.

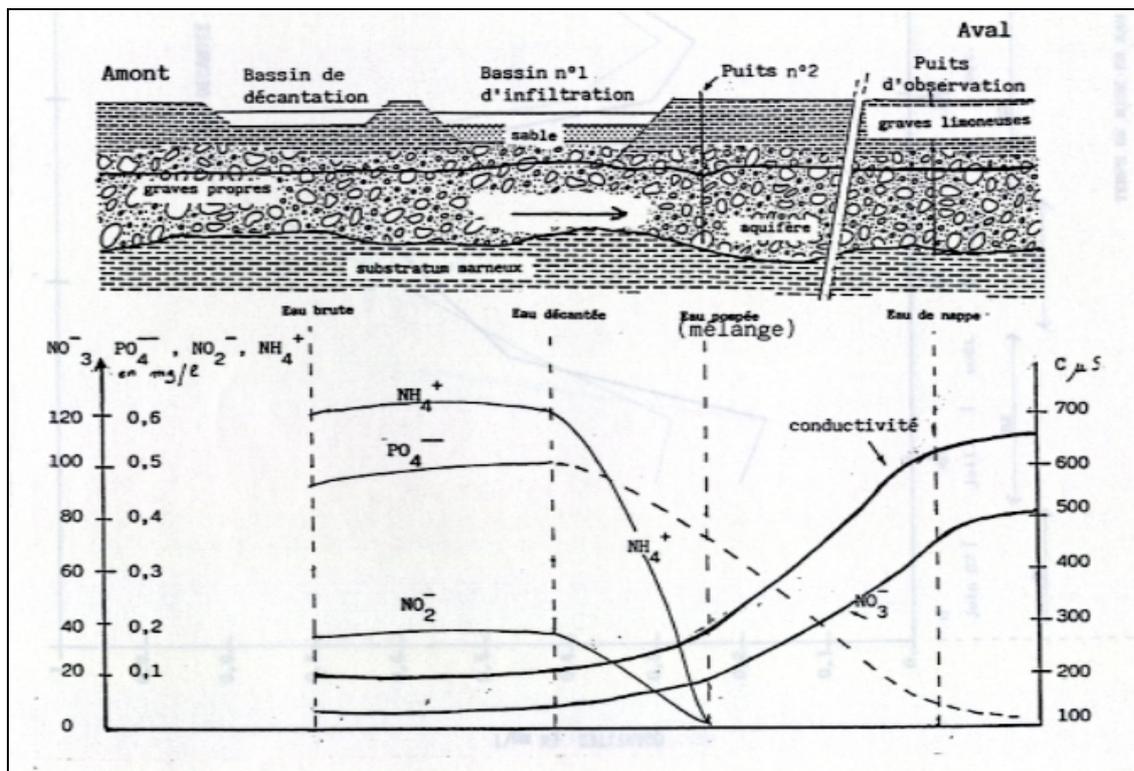


Figure 18 : Evolution spatiale des ions azotés, des phosphates et de la conductivité le 11 décembre 1987 à la station de Saint-Jory

La figure 18 montre l'évolution spatiale des phosphates, des ions azotés et de la conductivité dans les différentes étapes de fonctionnement de la station. Elle fait apparaître notamment :

- le processus d'oxydation des composés azotés ;
- que les phosphates présents dans l'eau de la Garonne à l'aval de Toulouse n'étaient pas totalement éliminés par la filtration et parvenaient donc jusqu'aux captages.

#### 4.2.11. Seysses (31)

La station de RAA de Seysses a été mise en service en 1976. Le syndicat de la banlieue Sud-Ouest était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions modernes de la Garonne et les eaux d'infiltration sont prélevées dans le canal de Saint-Martory (écoulement gravitaire). Le volume infiltré quotidiennement n'est pas connu. Les débits prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 3800 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station qui ne comporte pas de bassin de décantation est équipée de deux bassins d'infiltration de 400 et 1000 m<sup>2</sup>. Le plan de la station est placé en annexe.

#### 4.2.12. Villeneuve-Tolosane (31)

La station de RAA de Villeneuve-Tolosane a été mise en service en 1976. Le syndicat de la banlieue Sud-Ouest était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions modernes de la Garonne et les eaux d'infiltration sont prélevées dans le canal de Saint-Martory (écoulement gravitaire). Le volume infiltré quotidiennement n'est pas connu. Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient de 3650 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station qui ne comporte pas de bassin de décantation est équipée de quatre bassins d'infiltration de 400, 600 et de 800 m<sup>2</sup> pour les deux plus récents d'entre eux (réalisation en 1984 et 1985). Le plan de la station est placé en annexe.

#### **4.2.13. Autres stations de Haute Garonne**

Deux autres sites ont été identifiés en Haute-Garonne : Miremont et Vernet. Les deux sont situés dans les alluvions de l'Ariège. Un site à Fronton a également été évoqué mais il n'a pas été possible de contrôler la réalité de son existence dans le cadre de cette étude.

#### **4.2.14. Essai d'infiltration dans le lit du Galage (Ariège)**

Lors de l'été 1989, l'étiage particulièrement sévère a limité fortement l'usage des puits privés. La DDAF de l'Ariège a donc voulu étudier la faisabilité d'une recharge saisonnière de la nappe par infiltration d'eau prélevée dans l'Ariège. Cette eau serait infiltrée au niveau d'un émissaire pluvial de la basse plaine, la Galage (affluent de l'Ariège d'une longueur de 8 km), ainsi qu'au niveau des zones forestières environnantes du lit de ce cours d'eau.

Divers essais d'infiltrations ont été menés durant le mois d'octobre 1990. Les résultats ont été utilisés pour construire un modèle numérique dont l'objectif a été de représenter les écoulements souterrains induits par des infiltrations. Des modalités de recharge ont été proposées, en tenant compte des volumes réellement infiltrés, des volumes perdus et des volumes restitués à l'Ariège. Deux solutions ont été envisagées :

- l'injection d'un volume de 3 millions de m<sup>3</sup> en avril-mai si les pompages dans les puits débutent dès le mois de juin, et ceci à partir de 2 points sur la Galage et de 4 points d'épandage en forêt ;
- l'injection d'un volume de 2 millions de m<sup>3</sup> en avril-mai si les pompages dans les puits ne débutent qu'au 1<sup>er</sup> juillet, et ceci dans les mêmes conditions que précédemment.

Ces conditions permettent d'infiltrer 500 l/s sur le linéaire de 8 km de la Galage, en restituant 26 l/s dans le cours de l'Ariège.

La réalisation effective du projet de réalimentation n'est pas connue.

#### **4.2.15. Foissac (Aveyron)**

Afin de pérenniser l'approvisionnement en eau de Foissac, le syndicat AEP de Foissac a projeté de soutenir l'état des ressources en eaux souterraines par la mise en œuvre d'une réalimentation artificielle. Le forage du syndicat fournissant 30 m<sup>3</sup>/h, ce dernier souhaitait (en 1991) pouvoir poursuivre l'exploitation de la nappe à ce débit, avec un volume prélevé de 600 m<sup>3</sup>/jour.

Située à l'amont de ce puits d'exhaure, la station de RAA serait composée de :

- la prise d'eau en rivière dans le Lot. Celle-ci se ferait dans le milieu de la

tranche d'eau afin d'éviter les flottants de surface et les matières en suspension, ainsi que l'appauvrissement en oxygène du fond, sources de colmatage rapide des infrastructures.

- deux bassins d'infiltration dans les graves alluvionnaires. Etant donné la perméabilité du sous-sol ( $1.10^{-3}$  m/s) et en se basant sur une infiltration moyenne de  $2 \text{ m}^3/\text{jour}/\text{m}^2$  de bassin, une surface infiltrante de  $300 \text{ m}^2$  est nécessaire pour pouvoir infiltrer les  $600 \text{ m}^3/\text{jour}$  sollicités. Il est préférable de réaliser cette infiltration par l'intermédiaire de deux bassins de  $150 \text{ m}^2$  chacun, afin de faciliter l'entretien et le décolmatage.

Suite au retour d'expériences effectué en 1990 sur les 11 stations de RAA de Midi-Pyrénées, il n'a pas été envisagé au démarrage du projet de créer un bassin de décantation préalable au passage dans les bassins d'infiltration. En effet, l'eau du Lot a paru d'assez bonne qualité (en termes de turbidité) pour éviter ce surcoût. Néanmoins, il a été proposé d'en mettre un en place s'il s'avérait que le colmatage des bassins d'infiltrations était trop rapide.

La réalisation effective du projet n'est pas connue.

#### **4.2.16. Capdenac-Gare (Aveyron)**

En 1990, la municipalité de Capdenac-Gare est confrontée à un problème de manganèse dans l'eau prélevée au niveau de leur champ captant. Celui-ci est implanté dans les alluvions récentes du Lot. La réalisation d'une RAA a d'abord été envisagée (bassin d'infiltration), le résultat escompté étant notamment une meilleure oxygénation de l'eau qui favoriserait la précipitation du manganèse.

Suite à la détermination des mécanismes en cause et à la réalisation d'un modèle hydrodynamique du champ captant, l'idée d'une mise en place d'une station de RAA a été remise en cause puis abandonnée.

Le champ captant et sa gestion ont été reconfigurés, ce qui a permis de faire baisser considérablement les teneurs en manganèse dans les eaux prélevées.

L'étude s'est déroulée de 1990 à 1994.

#### **4.2.17. Brousse-le-Château (Aveyron)**

L'objectif de la mise en place de la RAA était d'augmenter le débit exploitable à partir des alluvions du Tarn. Une baisse des débits des puits en nappe alluviale avait effectivement été constatée par suite de l'approfondissement du lit du Tarn sous l'effet des exploitations de graviers (1987).

La réalisation de la station de réalimentation par bassins d'infiltration a été confiée au BURGEAP par la DDAF de l'Aveyron.

Le site de pompage et les bassins d'infiltration sont indiqués sur la carte IGN au  $1/25000^{\text{ème}}$ .

Le fonctionnement actuel du site est inconnu.

#### **4.2.18. Lafrançaise (Tarn-et-Garonne)**

La station de RAA de Lafrançaise a été mise en service en 1987, suite à une étude hydrogéologique préliminaire du BURGEAP réalisée en 1986. Le Syndicat des Eaux du Bas Quercy était alors propriétaire.

La station est implantée dans les alluvions modernes du Tarn, dont la transmissivité a été évaluée à  $1.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Cette station comporte un bassin de décantation (surface totale de 1400 m<sup>2</sup> pour un volume de 4000 m<sup>3</sup>) et quatre bassins d'infiltration de 500 m<sup>2</sup> environ chacun. Le plan de la station telle que définie dans l'avant-projet est placé en annexe.

Les eaux d'infiltration sont prélevées dans le Tarn. Le volume infiltré est de l'ordre de 4000 m<sup>3</sup> par jour (estimations de 1986). Les volumes prélevés en moyenne pour l'AEP étaient estimés à 4000 m<sup>3</sup>/j en 1986.

Cette station était équipée en 1986 d'un " truitomètre ".

#### **4.2.19. Autres**

Dans le département du Tarn-et-Garonne, trois sites ont été identifiés à Mas-Grenier, Réalville et Grisolles (en limite avec la commune de Verdun-sur-Garonne). Mas-Grenier et Grisolles sont situés dans les alluvions de la Garonne, tandis que Réalville est sur la Lère, un affluent en rive droite de l'Aveyron.

L'existence de deux autres sites demeure incertaine ; il s'agit de Castelsarrazin et Lacourt-Saint-Pierre (S.I. des Eaux de Montbeton).

Dans le département des Hautes-Pyrénées, des stations de RAA pourraient exister à Hiis et à Soues.

### **4.3. PROJETS DE STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE EN REGION NORD-PAS-DE-CALAIS**

#### **4.3.1. Avesnes-le-sec et Roelux (Nord)**

Au début des années 1970, l'Agence de bassin Artois-Picardie définit la régularisation des écoulements de surface comme l'un de ses objectifs. Elle précise que celle-ci peut être envisagée soit par la réalisation de réservoirs de surface, soit par le prélèvement du débit de hautes eaux des cours d'eau et l'alimentation des nappes d'eaux souterraines.

Lors d'une étude préalable, deux zones ont été identifiées (correspondant à 8 sites) dans le secteur d'Avesnes-le-Sec, Roelux-Mastaing et Bouchain. Elles ont ensuite été évaluées dans une étude réalisée en 1972 par le BRGM. La prise d'eau de surface envisagée était effectuée soit dans le Haut-Escaut (Avesnes-le-sec), soit dans la Sensée (Roelux-Mastaing).

Après estimation des valeurs de transmissivité et du coefficient d'emmagasinement, des temps et des débits d'injection ont été calculés. Les volumes de réservoir non saturé disponible pour l'injection, qui ont été estimés par ce biais n'ont pas excédés pour les plus élevés 150 000 m<sup>3</sup> à 500 000 m<sup>3</sup>.

La réalisation du site de réalimentation suite à cette étude préalable n'est pas connue.

Dans la carte nationale des sites de RAA, seuls deux des huit sites ont été présentés : ils sont localisés aux extrémités sud et nord de la zone couverte par l'étude.

#### **4.3.2. Ferin (Nord)**

En se basant sur l'assèchement d'exutoires superficiels de la nappe de la craie, une surexploitation locale de cette ressource a été diagnostiquée dans le sud du Douaisis

au début des années 1970. En conséquence, des études de faisabilité ont été menées en vue de réalimenter l'aquifère à l'amont des champs captants de Douai-Pecquencourt, à l'aide d'eaux superficielles (Scarpe et/ou Sensée). Cette démarche a été également dans le sens d'une régulation des écoulements de surface pendant les hautes eaux, cette action correspondant à un objectif fixé par l'AEAP à l'époque.

La réalisation de deux études antérieures par le BRGM (74SGN034NPA et 74SGN067NPA) a conduit à retenir le site de Ferin-Dechy, de préférence à ceux identifiés à Brébières et Corbehem dans le Pas-de-Calais.

Du 4 au 6 novembre 1974, un test d'injection de 69 heures a été réalisé dans un forage de 300 mm de diamètre, à un débit moyen de 13 m<sup>3</sup>/h. Son interprétation a fourni des valeurs de transmissivités comprises entre 6.10<sup>-4</sup> et 2,2.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Le coefficient d'emménagement varie lui entre 0,3 et 0,7%. Le volume disponible pour l'injection a été estimé à 420 000 m<sup>3</sup>.

Une réalimentation réalisée sur une période de 8 mois, à un rythme de 4500 m<sup>3</sup>/j, avait été préconisée suite à cet essai.

#### **4.3.3. Brébières et Corbehem (Pas-de-Calais)**

Ces deux sites, identifiés initialement au même titre que le site de Férin décrit précédemment, semblent ne pas avoir été retenus pour réaliser un test de réalimentation artificielle.

Des données préliminaires ont toutefois été acquises ou calculées pour ces sites, comme la transmissivité ou le coefficient d'emménagement. Des volumes injectables ainsi que des temps d'injection ont été estimés.

### **4.4. STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE DANS LE BASSIN RHONE-MEDITERRANEE-CORSE**

#### **4.4.1. Basse vallée du Var (Alpes-Maritimes)**

A la demande de la DDAF des Alpes Maritimes, le BRGM a réalisé en 1971-72 un essai de réalimentation artificielle dans la partie amont (confluent Var-Estéron) de la nappe alluviale du Var, entre le pont Charles-Albert 1<sup>er</sup> et le nord de la zone industrielle située sur la commune de la Roquette-sur-Var. Cette RAN a eu pour but de servir d'appoint en période estivale, les stations de captage en aval étant suffisantes pour le reste de l'année.

Une première étude, réalisée en 1971, avait conclu à l'intérêt de la RAA dans cette zone, mais l'essai avait été trop court pour permettre de déterminer tous les paramètres indispensables au choix et au dimensionnement des infrastructures. Les informations manquantes étaient essentiellement relatives à la vitesse de colmatage des installations. La transmissivité des alluvions avait été calculée (2,8 à 6,4.10<sup>-1</sup> m<sup>2</sup>/s) et l'indépendance de la nappe vis-à-vis du fleuve du Var avait été démontrée. Cela signifiait que le lit et les berges du fleuve étaient colmatés, l'alimentation de la nappe en était donc précaire et sa vidange rapide.

Entre fin décembre 1971 et fin octobre 1972, un second essai de RAA, de longue durée cette fois (295 jours), a été effectué afin de déterminer la nature exacte des infrastructures à mettre à place. Le dispositif suivant a été mis en œuvre :

- une prise d'eau dans le Var, à 80 m à l'aval du pont de la Manda ;
- une amenée de cette eau jusqu'à un premier bassin de décantation de

50 400 m<sup>2</sup> ;

- un passage dans un second bassin de décantation de 64 500 m<sup>2</sup> ;
- un passage dans un des deux bassins d'infiltration (l'un de 51 000 m<sup>2</sup>, l'autre de 25 200 m<sup>2</sup>).

Au début de l'essai, une tranche de 2,5 m d'eau était infiltrée quotidiennement. A la fin de l'étude, cette tranche d'eau était réduite à 0,6 à 0,9 m d'eau/jour. Cette baisse de l'infiltration a été attribuée au colmatage progressif des infrastructures. Des aménagements ont du être apportés afin de réduire ce phénomène :

- installation d'une nappe de bidim (matériau textile perméable) au fond des bassins d'infiltration qui permet de répartir les charges à infiltrer à l'ensemble du bassin ;
- utilisation des deux bassins d'infiltration à tour de rôle pour ralentir le colmatage, la prolifération d'algues et faciliter l'entretien ;
- agrandissement à prévoir de ces bassins.

Ainsi, 1 m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup> de bassin, contre 2 m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup> nécessaires au gonflement de la nappe, est infiltré. La nappe subit donc tout de même une décrue, c'est pourquoi ce dispositif de RAA est tout à fait adapté à la réalimentation ponctuelle estivale mais ne peut pas servir de ressource principale annuelle. Si la qualité de l'eau de la nappe se dégradait, il faudrait que cette RAA devienne source principale d'eau souterraine, mais il serait alors nécessaire de réétudier le dimensionnement des infrastructures.

L'implémentation effective du projet après 1972 n'est pas connue.

#### **4.4.2. Vaux-sur-Vienne (Vienne)**

La CISE gère – à la date du rapport (1994) – pour le compte du SIAEP du Haut-Chatelleraudais, une station de pompage et de réalimentation sur le territoire de la commune de Vaux-sur-Vienne. L'aquifère capté est constitué des alluvions anciennes de la Vienne, reposant sur le tuffeau blanc du Turonien moyen et la craie blanche du turonien inférieur. Les pompages sont répartis entre la nappe des alluvions et le tuffeau (75% en débit) et la nappe du Cénomaniens (2 forages de 100 m pour 25% de prélèvements en débit).

La station de réalimentation a été créée entre 1975 et 1978, les premiers essais de RAA ayant été conduits en 1975. L'eau utilisée est celle de la Vienne qui subit une décantation avant l'infiltration dans sept bassins d'infiltration.

La production d'eau varie entre 4000 m<sup>3</sup>/j en hiver et 8000 m<sup>3</sup>/j pendant les pointes de consommation en été. Le dispositif de réalimentation fournit seul 2500 m<sup>3</sup>/j en hiver et 6500 m<sup>3</sup>/j en pointe en hiver. Cette estimation a été réalisée sur la base d'analyses chimiques. La perméabilité du site varie entre  $1,9 \cdot 10^{-4}$  et  $2,6 \cdot 10^{-3}$  m/s.

L'étude réalisée par le BRGM en 1994 correspondait à une " étude préalable à la définition des périmètres de protection de la station ".

Deux vues de la station – en plan et en coupe – sont placées en annexe.

#### **4.4.3. Fontagneux (Isère)**

La ville de Grenoble (organisée en régie) est alimentée en eau à partir du champ captant de Rochefort. Les ouvrages sont implantés dans la nappe alluviale du Drac et de la Romanche. Ils présentent une capacité maximale de 137 600 m<sup>3</sup>/j pour une production moyenne de 41 720 m<sup>3</sup>/j.

Le site de Fontagneux (inclus dans le champ captant) dispose d'un système de réalimentation artificielle. Ce dernier joue un rôle de barrière hydraulique contre des pollutions potentielles liées aux activités industrielles du site de Pont de Claix.

#### **4.4.4. Calvi – bassin de la Figarella (Haute-Corse)**

En 1991, l'approvisionnement en eau potable de Calvi se fait à partir d'un champ de captage implanté dans les alluvions de la Figarella. En période d'étiage, soit en période de demande maximale (le débit prélevé passe de 1200 à 6200 m<sup>3</sup>/j), les ouvrages sont affectés par la remontée du biseau salé.

Un projet d'alimentation en eau potable de la Balagne, à partir des réservoirs de Codole, situés dans le bassin versant de Régino, est étudié. En attendant, il a été prévu de subvenir aux besoins de la région calvaise en réalimentant artificiellement, au cours de la période d'exploitation intense, la nappe des alluvions de la Figarella grâce à une amenée d'eau du barrage de Codole.

Les alluvions de la Figarella sont récentes et ont été déposées sur environ 6 km, entre le pont de Suare et l'estuaire. Elles reposent essentiellement sur des granitoïdes et, pour une faible part dans la partie amont, sur les rhyolites du système du Cinto. Ces formations alluvionnaires, ainsi que les zones d'altération des granites, constituent le réservoir aquifère contenant la nappe alluviale de la Figarella, concernée par cette étude de réalimentation artificielle.

Du fait de la faible extension de cette nappe et de la complexité de la géométrie du réservoir, il a été convenu de réaliser un modèle mathématique. Il a été calé en régime permanent sur les conditions de mars 1991, complétées par des conditions estivales. Une simulation du système hydrodynamique a ensuite été réalisée en intégrant une réalimentation artificielle.

Les résultats ont montré qu'un apport de 40 à 50 l/s au droit de la rivière, à environ 500 m en amont du champ de captage, permettrait de maintenir le biseau salé à une cote inférieure à celle de la base des captages.

Le rapport n'indique pas si cette solution provisoire a été retenue, ni si le débit de réinjection préconisé a été suivi.

#### **4.4.5. Autres sites**

Les sites passés en revue ci-après et leur description nous ont été communiqués par l'Agence de l'Eau RMC, le recensement effectué par l'Agence s'inscrivant dans le cadre d'un rapportage européen sur les masses d'eau souterraine.

##### 1) Alluvions de l'Y grenoblois Isère / Drac / Romanche (masse d'eau 6317)

Le dispositif de réalimentation artificielle consiste en canaux infiltrants implantés entre le Drac et les captages de Rochefort. Cette alimentation artificielle a une double fonction : la recharge de la nappe par des eaux de très bonne qualité en provenance du bassin amont du Drac, et une fonction de protection (barrière hydraulique) vis-à-vis de pollutions éventuelles pouvant affecter les eaux du Drac (ou la nappe alluviale rive droite) au droit du champ captant de Rochefort en aval de sites industriels majeurs.

L'alimentation des canaux est évaluée à 1 m<sup>3</sup>/s (droit d'eau Régie des Eaux de Grenoble) et on estime que 2/3 environ de ce débit (0,7 m<sup>3</sup>/s) s'infiltrer vers la nappe, soit environ 22 M de m<sup>3</sup>/an.

## 2) Nappe du Genevois (masse d'eau 6235)

La nappe du Genevois est alimentée naturellement par l'infiltration des eaux de surface ainsi que par l'infiltration à travers le lit de l'Arve. Depuis 1980, elle est également réalimentée artificiellement avec de l'eau de l'Arve traitée à partir d'une station située à Vessy en Suisse (entre 8 et 10 millions de m<sup>3</sup>/an).

## 3) Alluvions de la Saône entre les confluent de l'Ognon et du Doubs - plaine Saône-Doubs et Basse vallée de la Loue (masse d'eau 6320)

La Lyonnaise des eaux exploite pour le compte du Syndicat mixte de Dijon (SMD), l'usine de production d'eau potable de Poncey-lès-Athée et les 105 puits de captage situés à Poncey-lès-Athée et sur l'île de Flammerans.

La réalimentation (captage de Poncey 2) est réalisée par l'intermédiaire de puits qui ont pour objet de renforcer la production de la nappe dans les périodes de basses eaux et de fortes consommations.

Une prise d'eau dans la Saône, rive gauche, alimente le dispositif de réinjection sur PONCEY 2. Une autorisation de pompage dans la Saône est délivrée en 1997 par les Services de Navigation. Le dispositif de pompage comprend 3 pompes de 250 m<sup>3</sup>/h ; le débit de prélèvement est limité à 500 m<sup>3</sup>/h ; il est assuré par le fonctionnement de deux pompes en simultané.

La prise d'eau fonctionne sur une durée limitée à 183 jours par an. Le volume prélevé et dédié à la réalimentation est fixé à 6 570 000 m<sup>3</sup> par convention avec VNF (Voies Navigables de France). L'eau pompée dans la Saône est d'abord filtrée (filtres type Doucet) et alimente ensuite le dispositif de réinjection.

## 4) Alluvions du Rhône du confluent de la Durance jusqu'à Arles et Beaucaire + alluvions du Bas Gardon (masse d'eau 6323)

Des réinjections sont effectuées par EDF en hiver dans le sous-secteur nord à partir de l'eau des canaux agricoles ou de la Durance à titre de compensation des aménagements de la Durance (2 centres de réinjection pour 10 M m<sup>3</sup>/an).

## 5) Alluvions de la Durance aval et moyenne et de ses affluents (masse d'eau 6302)

Outre le retour à la nappe du surplus d'eau utilisé pour l'irrigation et les fuites au niveau des canaux et des rigoles, il existe, sur la Durance aval, un centre de réinjection compensatoire EDF (5 M de m<sup>3</sup>/an).

## 6) Alluvions des fleuves côtiers Gisle et Môle, Argens et Siagne (masse d'eau 6318)

Pour la nappe de l'Argens il existe un site de réinjection en nappe des eaux de l'Argens (0,65 M m<sup>3</sup>/an).

## 7) Alluvions anciennes de la Vistrenque et des Costières (masse d'eau 6101)

Pour atténuer les étiages, pour le captage AEP de Vauvert à Candiac, il existe une réalimentation de l'aquifère à partir de l'eau du canal BRL.

Un projet de réinjection est à l'étude à Manduel pour réduire les concentrations en polluants.

## 8) Calcaires et marnes Muschelkalk plaine de l'Eygoutier (masse d'eau 6205)

Un mélange d'eau fournie par la SCP est injecté dans la nappe superficielle pour faire baisser les teneurs en nitrates de la nappe sur le secteur de la Garde et du Pradet. Le volume infiltré n'est pas connu.

## 4.5. AUTRES STATIONS OU PROJETS DE STATIONS DE RECHARGE D'AQUIFERE EN FRANCE

### 4.5.1. Saint-Quentin (Aisne)

Dans le cadre des projets d'aménagement à long terme du district de Saint-Quentin, il était prévu de conserver la partie du haut bassin de la Somme en zone verte, c'est-à-dire de conserver un débit d'étiage minimum dans la rivière. Or, il était également prévu d'assurer progressivement toute l'alimentation en eau potable future du district à partir de champs captants créés dans cette zone et exploitant la nappe de la craie. Ces deux objectifs étant contradictoires, il a été proposé d'étudier la faisabilité d'une réalimentation temporaire de l'aquifère permettant sa surexploitation pendant une partie de l'année.

Le secteur étudié est développé dans le plateau crayeux situé en rive gauche de la Somme, entre Rouvroy à l'aval et Fonsommes à l'amont. Ce plateau est entaillé par de nombreuses vallées sèches affluentes de la Somme.

Le substratum est constitué par la craie sénonienne, épaisse de plusieurs dizaines de mètres. Des terrains tertiaires sablo-argileux la recouvrent au sommet des buttes, tandis que des limons quaternaires masquent l'ensemble. Dans la vallée de la Somme, les dépôts quaternaires sont constitués d'alluvions argilo-tourbeuses et vasardes.

Le réservoir crayeux renferme une nappe libre, de gradient hydraulique faible (2 ‰). Dans la vallée même de la Somme, la nappe est semi-captive sous les alluvions peu perméables. Dans le secteur étudié, la nappe est très peu exploitée, seuls les forages d'AEP de Rouvroy, Harly et Essigny-le-Petit la captent.

Le but de l'étude menée en 1976 était de localiser les secteurs du réservoir crayeux capables de stocker 7,5 millions de m<sup>3</sup> d'eau et les zones où pourraient être creusés des bassins de réalimentation. Il était prévu que l'eau injectée provienne du bassin de l'Oise, par l'intermédiaire de la rigole du Noirieux.

Dans un premier temps, les cartes du niveau de la nappe en période de hautes eaux, celle des relèvements maximums et celle des volumes utiles de la craie sèche ont permis de constater que seuls 2,5 millions de m<sup>3</sup> d'eau pouvaient être stockés. De ce fait, une seconde zone d'injection a dû être recherchée. Celle-ci a été localisée en rive droite de la Somme, au nord de Remaucourt, permettant de stocker les 5 millions de m<sup>3</sup> complémentaires.

Ensuite, des sondages courts à la tarière et des sondages profonds utilisés en piézomètres (mise en place de limnigraphes) ont été réalisés.

Ces sondages ont montré la grande variabilité de l'épaisseur du recouvrement de la craie, pouvant aller de leur absence sur les flancs de certaines vallées sèches, à plus de 12 m au sommet des buttes où subsistent les sables tertiaires. Les zones d'injection devant se situer sur des points hauts afin d'utiliser le maximum de la craie non saturée, il est apparu que ces injections devaient se faire non pas par des bassins d'infiltration mais plutôt par des forages atteignant la craie saine et fissurée, et la traversant sur plusieurs mètres.

La surveillance piézométrique effectuée devait permettre de calculer la diffusivité moyenne de l'aquifère nécessaire pour évaluer le débit d'injection (valeur non calculée) qui permettrait d'atteindre la réserve escomptée.

La mise en œuvre de cette réalimentation artificielle n'est pas connue.

#### 4.5.2. Brienne-le-Château (Aube)

Après deux années de déficit pluviométrique durant la période de recharge (hivers 1988-89 et 1989-90), les puits du Syndicat Intercommunal d'Adduction d'Eau Potable de Brienne-le-Château manifestent des difficultés à subvenir aux besoins en eau durant l'été 1990. Il est envisagé de réalimenter la nappe des alluvions de l'Aube à partir de l'eau de l'Aube.

Dans cette optique un modèle numérique a été construit (avec ASM), englobant les puits dans la zone alluviale (périmètre de 620 m par 660 m). La perméabilité des alluvions a été estimée à  $1.10^{-2}$  m/s et le coefficient d'emmagasinement à 8%.

Des simulations d'un prélèvement à hauteur de  $1970 \text{ m}^3/\text{j}$  et d'une infiltration de  $2000 \text{ m}^3/\text{j}$  par tranchée ont été effectuées, en faisant varier la durée et la fréquence de l'infiltration.

Un essai d'infiltration a ensuite été effectué le 12 juillet 1990 à l'aide de deux tranchées situées à l'amont des captages (figures 19 et 20). Elles ont infiltré respectivement  $70$  et  $64 \text{ m}^3/\text{h}$  sur une durée non précisée.

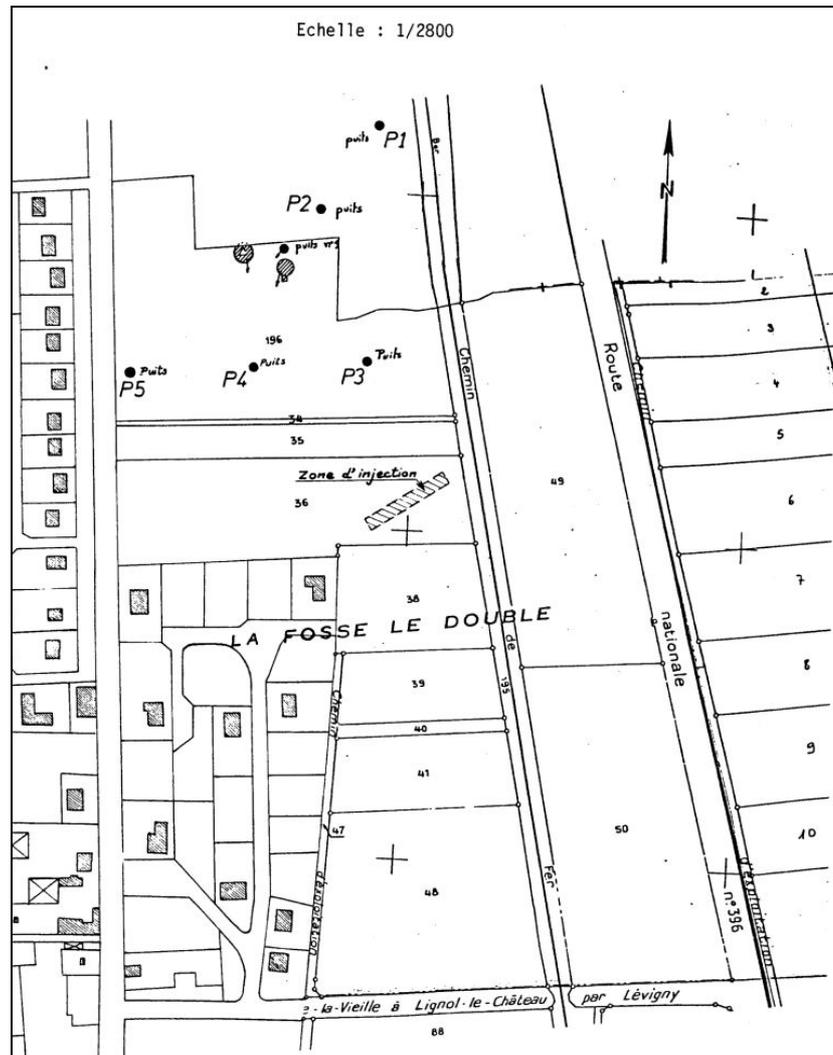


Figure 19 : Localisation de la tranchée d'injection par rapport aux puits de prélèvement

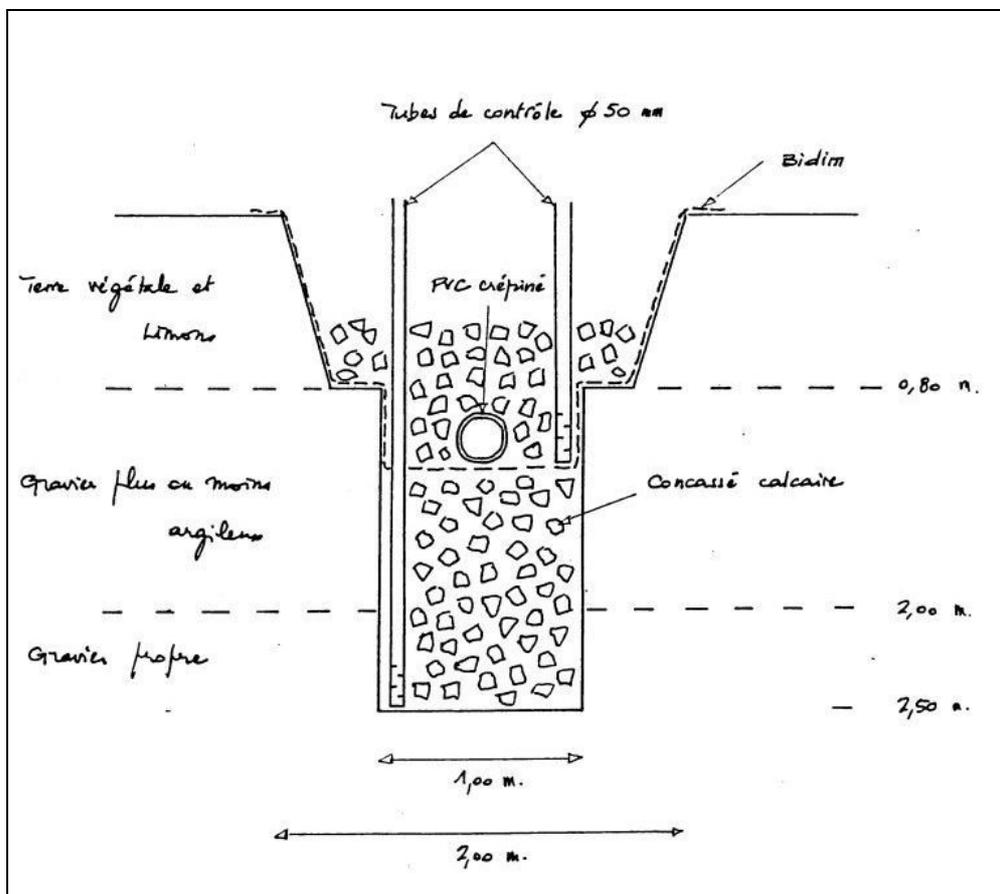


Figure 20 - Coupe schématique d'une tranchée d'injection

En conclusion, il a été préconisé de réaliser deux tranchées d'infiltration de 12 m x 1 m, permettant d'injecter 170 m<sup>3</sup>/h. L'eau infiltrée serait prélevée dans l'Aube.

#### 4.5.3. Le Theil-de-Bretagne (Ille-et-Vilaine)

##### • Réalimentation de nappe de la forêt du Theil

A la date de l'étude (1974), la nappe du bassin sableux tertiaire de la forêt du Theil est exploitée à hauteur de 1,2 à 1,5 million de m<sup>3</sup> par an. Compte tenu des conditions hydrogéologiques locales, une telle quantité représente le maximum de ce que peut fournir la nappe, un déficit pluviométrique risquant de compromettre son exploitation. C'est pourquoi une réalimentation artificielle de la nappe a été envisagée.

Le ruisseau des Chênes de Martigné passe à 200 m de l'extrémité sud-ouest du bassin sableux. Il inonde régulièrement des surfaces non négligeables durant la période hivernale.

Une étude des fluctuations annuelles de son débit et des relevés pluviométriques a laissé penser qu'il était possible de réalimenter la nappe du bassin de la forêt du Theil à partir de ce ruisseau. Les volumes prélevés seraient infiltrés dans la nappe à l'aide de bassins d'infiltration implantés dans une zone située en bordure de forêt, dans les

sables fins du Pliocène. Il a été déterminé qu'un volume de 1 120 000 m<sup>3</sup> d'eau par an pourrait ainsi être infiltré dans la nappe, doublant presque la ressource actuelle.

Le ruisseau et la nappe ayant des profils hydrochimiques très voisins, l'aspect qualitatif ne semble pas poser de difficulté. La contamination de l'eau du ruisseau par des germes pathogènes est palliée par son infiltration dans les sables fins du Pliocène, en conservant une distance suffisante entre les captages et les bassins d'infiltration. Enfin, l'eau de surface pouvant être turbide en période de crue, il a été préconisé d'aménager un bassin de décantation en amont des dispositifs d'infiltration.

La réalimentation de la nappe du bassin du Theil depuis le ruisseau des Chênes de Martigné a donc semblé présenter un intérêt indéniable. Sa réalisation effective n'est pas connue.

#### • **Renforcement des ressources exploitables de la nappe du bassin de la Groussinière**

Le bassin sableux de la Groussinière peut contenir, lorsqu'il est entièrement saturé, 600 000 m<sup>3</sup> d'eau, dont 500 000 m<sup>3</sup> pourraient être mobilisés par le captage existant en 1974, date à laquelle l'étude a été réalisée. Les ressources exploitables, sans risques d'épuiser à plus ou moins long terme les réserves, sont inférieures et ne sont estimées qu'à 200 000 m<sup>3</sup> par an. Il a donc été envisagé de renforcer cette ressource.

Le ruisseau du Pont Guesdon traverse d'ouest en est le bassin sableux, sur environ 500 m. Du fait de la présence d'argile en surface et du colmatage du ruisseau par les forts courants de crue, les communications entre la nappe et le cours d'eau sont très limitées. En conséquence, la majeure partie de l'eau qui transite par le ruisseau du Pont Guesdon traverse le bassin sableux sans pouvoir s'y infiltrer.

Une reconnaissance des argiles superficielles a été effectuée par le biais de 156 sondages à la tarière. Leur épaisseur moyenne est de 1,5 m (de 0,5 à 2,4 m). Il convient de distinguer plusieurs secteurs :

- un secteur amont où les sables sous-jacents sont à une profondeur maximale de 0,5 à 1,5 m, dans une vallée encaissée ;
- un secteur central où les sables sont généralement à une profondeur comprise entre 1,5 et 2 m, dépassant localement 2 m, dans une vallée plus large ;
- un secteur aval où des marnes sont sub-affleurantes et où l'accès est peu aisé du fait de l'aspect marécageux et tourbeux de cette zone.

Il a été envisagé de creuser le lit de la rivière dans la partie amont, en portant la profondeur des travaux à 1,5 m avec un élargissement éventuel de quelques mètres. Dans la partie centrale, la profondeur des travaux devrait être portée à 2 m. Etant donnée la largeur de la vallée dans ce secteur, un bassin servant de réservoir tampon pourrait être aménagé.

En se basant sur une infiltration comprise entre 1 et 5 m<sup>3</sup> par jour et par m<sup>2</sup> de surface infiltrante, le système pourrait absorber de 300 à 1 500 m<sup>3</sup> d'eau pour le secteur amont et de 2 500 à 12 500 m<sup>3</sup> pour le bassin d'infiltration du secteur central, soit un total compris entre 2 800 et 14 000 m<sup>3</sup> par jour (32 à 162 l/s). Il était estimé que la réalisation du projet permettrait d'accroître de 200 000 à 400 000 m<sup>3</sup> par an le volume d'eau exploitable.

Du point de vue de la qualité de l'eau du ruisseau, les remarques émises à propos du ruisseau des Chênes de Martigné peuvent être reprises : l'eau du ruisseau du Pont Guesdon est chimiquement de bonne qualité, mis à part pour l'aspect microbiologique.

La réalisation effective du projet n'est pas connue.

#### 4.5.4. Messein (Meurthe-et-Moselle)

Le Service des Eaux de la ville de Nancy a réalisé en 1875 un captage par galerie drainante dans les alluvions de la Moselle à Messein.

La productivité du captage diminuant peu à peu du fait du colmatage des berges de la rivière, des tranchées ont été creusées parallèlement à la galerie sur une longueur cumulée de 2,5 km (figure 21). Elles ont été remplies de graviers calibrés puis furent alimentées avec des eaux brutes de la Moselle.

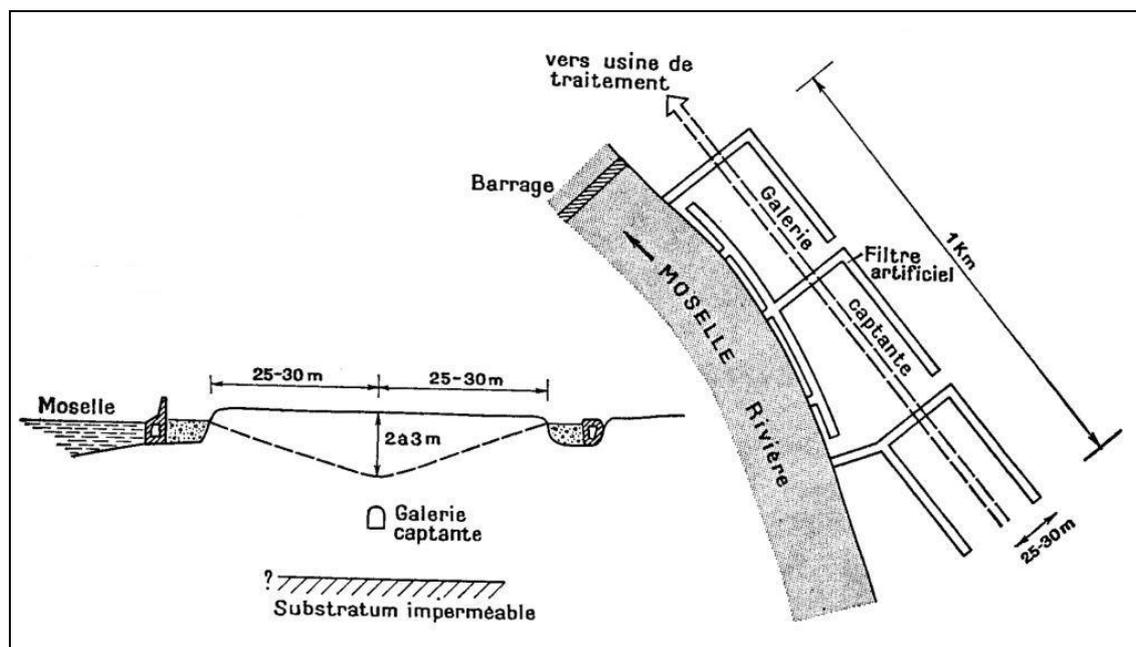


Figure 21 : Schéma en plan et en coupe de l'alimentation artificielle de la nappe de la Moselle à Messein (Nancy)

En 1968, près de 10 000 m<sup>3</sup>/j étaient infiltrés par ce dispositif et captés par le drain. Le gravier filtrant était remplacé tous les 8 à 9 ans. Mise à part la turbidité, la qualité de l'eau infiltrée n'était pas améliorée par la filtration.

L'abandon du dispositif était envisagé en 1970.

#### 4.5.5. Neuville-sur-Moselle (Meurthe-et-Moselle)

L'UDI (Unité de Distribution de l'eau) de « Pulligny-Neuville » est alimentée par deux captages en bordure de la Moselle. L'eau prélevée est infiltrée dans les alluvions de la Moselle par le biais de bassins d'infiltration. Après transit dans l'aquifère, l'eau est ensuite prélevée et distribuée à la population après traitement.

En 2005, un nouveau bassin d'infiltration a été construit (45 m par 15 m pour environ 700 m<sup>2</sup>), ainsi qu'une prise d'eau dans la Moselle.

Le système de réalimentation de l'aquifère était en service en 2006.

#### **4.5.6. Appoigny (Yonne)**

La commune est alimentée par un puits captant la nappe alluviale de l'Yonne. Le colmatage des berges de l'Yonne ayant induit une baisse de la productivité du puits, il a été décidé de mettre en œuvre une RAA afin de rétablir et si possible d'accroître la capacité de l'ouvrage.

Le Ministère de l'Agriculture a confié à la fin des années 1960 au CERAFER (Centre National d'Etudes Techniques et de Recherches Technologiques pour l'Agriculture, les Forêts et l'Équipement Rural) et au BURGEAP des études de faisabilité d'une R.A.N. sur la commune d'Appoigny.

Les alluvions grossières ont une épaisseur de 6 m environ, l'épaisseur mouillée étant de 3 m. La perméabilité horizontale est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s.

En 1968, deux bassins d'infiltration de 200 m<sup>2</sup> précédés d'un bassin de décantation (180 m<sup>2</sup> à la base) ont été mis en service. Ils sont situés à 100 m du puits de captage. L'eau infiltrée était prélevée dans l'Yonne. Le débit d'infiltration moyen était de 6 l/s, pour un débit de point de 40 m<sup>3</sup>/h. Le système de réalimentation est signalé comme fonctionnant de façon continue au moins jusqu'en 1972.

Son état actuel de fonctionnement n'est pas connu.

...



## 5. Critères d'implantation

### 5.1. PRINCIPAUX CRITÈRES

Lorsqu'une réalimentation artificielle est envisagée dans un secteur donné pour atteindre un objectif particulier (baisse d'une charge en polluants de l'eau d'origine, compensation d'une baisse des niveaux, lutte contre une intrusion d'eaux saumâtres, stockage et réutilisation différée de l'eau) de nombreux facteurs doivent être pris en compte dans la conception du dispositif de réalimentation :

- les caractéristiques physiques de l'hydrosystème (eaux souterraines et de surface) qui vont déterminer :
  - d'une part la disponibilité de l'eau à infiltrer (eau de surface ou eau d'une nappe superficielle peu intéressante au plan de la qualité et susceptible d'être injectée dans un aquifère plus profond),
  - d'autre part la capacité de l'aquifère à recevoir l'eau infiltrée ou injectée par forages.
- les caractéristiques physico-chimiques (et biologiques) de l'eau infiltrée et de l'eau du réservoir cible, bien sûr déterminantes dans la faisabilité d'une opération de recharge artificielle. Les caractéristiques physico-chimiques et biologiques de l'eau souterraine et de l'eau introduite doivent être compatibles de façon à éviter les phénomènes non désirés : colmatage (mécanique, chimique, biologique), dégradation de la qualité naturelle de l'eau souterraine, ...  
Une abondante littérature a été consacrée à ces problèmes, notamment dans le cas d'une réalimentation artificielle avec des effluents. On pourra se reporter par exemple à l'ouvrage de M. Detay : "*La gestion active des aquifères*" (1997, Masson).
- des critères économiques, notamment la rentabilité financière du projet : coût de l'investissement (acquisition des terrains, réalisation des bassins, des forages, ...), dépenses de fonctionnement et d'entretien.

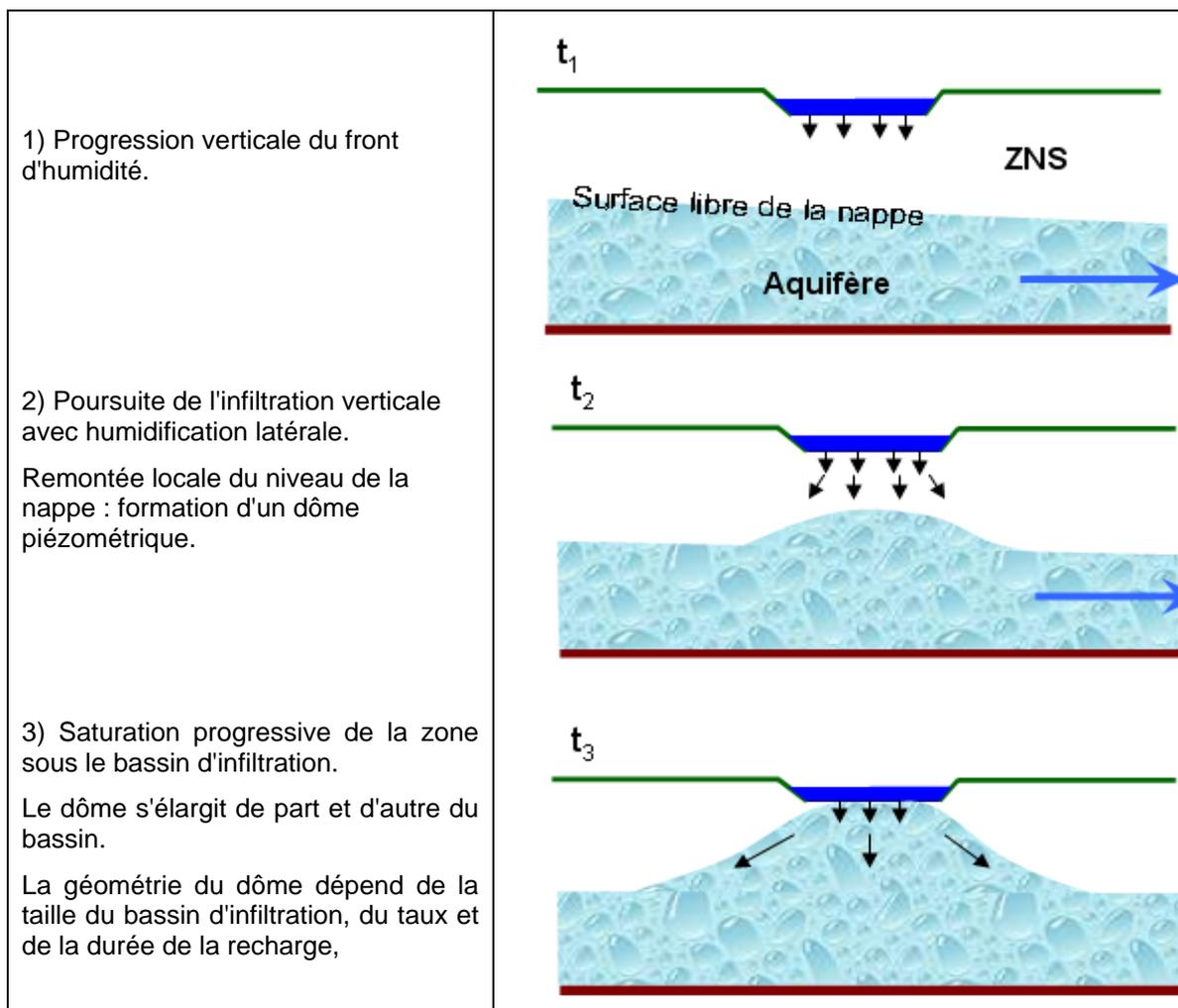
Dans ce qui suit, on se limitera aux seuls critères hydrogéologiques

### 5.2. CRITÈRES HYDROGÉOLOGIQUES

La réussite d'une opération de recharge artificielle dépend largement des conditions hydrogéologiques locales (zone non saturée et aquifère): la zone non saturée doit être en mesure de laisser l'eau s'infiltrer vers la nappe et l'aquifère doit pouvoir stocker l'eau reçue, l'évacuer mais sans trop de "dissipation", ce qui annulerait l'effet de stockage recherché.

### 5.2.1. Zone non saturée (ZNS)

La caractérisation de la ZNS est essentielle dans le cas d'un projet de recharge par les méthodes d'infiltration ("spreading techniques", cf. § 2.1.). Le paramètre essentiel est la conductivité hydraulique de la ZNS, dont dépendra la vitesse de percolation de l'eau infiltrée. Le schéma ci-dessous résume le processus d'infiltration.



L'évolution du dôme piézométrique est sous le contrôle:

- du bassin d'infiltration, lorsque toute la zone sous le bassin est saturée jusqu'à la nappe : l'évolution se fait alors sous potentiel imposé.
- des limites éventuelles de l'aquifère : limites latérales à potentiel imposé ou bien limite de drainage par un cours d'eau : l'eau circule alors sous l'influence du gradient hydraulique qui s'est établi, d'autant plus important que le dôme est élevé.

Des solutions analytiques ont été développées pour simuler l'évolution du dôme piézométrique, plus ou moins complexes suivant la géométrie du bassin et les hypothèses faites. En général, la simulation est faite avec des modèles numériques.

Une synthèse de ces approches est faite dans le document suivant :

*"Guidance for Evaluation of Potential Groundwater Mounding Associated with Cluster and High-Density Wastewater Soil Absorption Systems"* - National Decentralized Water Resources Capacity Development Project –NDWRCDP Project Number WU-HT-02-45 January 2005.

## **5.2.2. Type d'aquifères**

### **5.1.2.1. Aquifères des milieux dits "continus"**

Qu'il s'agisse d'une méthode de recharge par infiltration à partir de la surface ou d'une méthode de recharge directement dans l'aquifère par injection, il faut :

- que l'eau injectée puisse s'écouler dans l'aquifère, ce qui suppose une bonne perméabilité ;
- que l'aquifère offre une capacité de stockage suffisante, condition qui suppose un bon coefficient d'emmagasinement.

Mais il faut aussi que l'augmentation de réserve de la nappe se maintienne pendant un temps suffisant, compatible avec le délai de reprise d'eau souhaité: l'effet de l'injection ne doit pas se propager rapidement jusqu'à une limite d'émergence de la nappe, entraînant une augmentation du débit sortant.

Dans les aquifères de type "continu" (par opposition aux aquifères "discontinus" du socle fracturé par exemple), cette condition dépend du rapport "transmissivité T sur emmagasinement S" (diffusivité de l'aquifère:  $D=T/S$ ) : l'effet de l'injection se dissipera d'autant plus vite que ce rapport sera grand.

En résumé, pour que les conditions de recharge soient bonnes dans les aquifères de type "continu", il faut donc une diffusivité plutôt faible, c'est-à-dire une perméabilité pas trop élevée et un bon coefficient d'emmagasinement.

Ces conditions peuvent être trouvées dans les formations aquifères à porosité d'interstices (formations sableuses, gréseuses, ...) ou à double porosité (d'interstice et de fissures, comme la craie).

### **5.1.2.2. Aquifères karstiques**

Si la recharge artificielle envisagée sous l'angle du stockage temporaire d'eau semble difficile à réaliser en milieu karstique (l'eau injectée pourrait être évacuée trop rapidement par les conduits souterrains), les aquifères karstiques peuvent néanmoins offrir des possibilités intéressantes en matière de "gestion active" d'un hydrosystème (par exemple régularisation d'écoulements).

Un exemple en France, très souvent cité pour illustrer une gestion active, est celui de l'aquifère de la source du Lez, exploité pour l'alimentation en eau de Montpellier depuis 1982. Le réservoir karstique est exploité à partir d'un forage situé à 500 m de la source

et à 75 m de profondeur et une partie du volume pompé est restitué à la source pour soutenir son débit d'étiage.

Une bonne connaissance du domaine karstique ainsi que la compréhension de la dynamique des écoulements sont déterminants pour la réussite d'un projet de gestion active en milieu karstique.

#### 5.1.2.3. Aquifères discontinus de socle

Ce type d'aquifère se prête peu à une réalimentation artificielle: dans la partie fracturée, la capacité de stockage est insuffisante et dans la partie superficielle, l'épaisseur de la frange altérée est en général trop faible. Néanmoins, une réalimentation très locale peut être envisagée (c'est le cas en Inde par exemple où les zones de socle sont largement dominantes).

...

## 6. Conclusions

Ce recensement des sites de recharge artificielle en France, qui n'est certainement pas encore exhaustif (la recherche d'informations étant difficiles pour les petits sites), montre néanmoins que l'objectif recherché est très largement un objectif d'amélioration de la qualité de l'eau et de diminution des coûts de traitement. Dans certains cas, l'apport de l'eau infiltrée permet de compenser la baisse des niveaux de la nappe liée à une exploitation intensive. Parmi ces sites, aucun ne met en œuvre un procédé de réalimentation par forage d'injection et récupération différée (procédé ASR ou ASTR).

Un total de 57 sites de réalimentation "active" ont été décrits, dont 4 sites majeurs (Crépieux–Charmy, Flins-Aubergenville, Croissy-sur-Seine et Houlle-Moulle). La plupart sont situés dans un contexte alluvionnaire ou alluvions-aquifère sous-jacent. Sur le site de Houlle-Moulle, l'eau est infiltrée dans la nappe de la Craie.

Sur ces 57 sites, 49 ont été mis en œuvre ou prévus pour un usage AEP (mais pour 16 d'entre eux, il n'a pas été possible d'obtenir une information sur leur mise en œuvre effective). Pour la finalité AEP, la méthode utilisée est très généralement une méthode par bassins d'infiltration avec décantation ou traitement préalable de l'eau pompée en cours d'eau (parfois en gravières). Le procédé "Bi'eau" appliqué à Flins-Aubergenville repose quant à lui sur l'association de la méthode de réalimentation induite et de la méthode des bassins d'infiltration : l'eau est pompée dans l'aquifère près du cours d'eau puis dirigée vers des bassins d'infiltration.

Concernant la recharge "passive" (par exemple infiltration de l'eau issue des fuites de canaux) soutenant les "étiages" de nombreuses nappes dans le sud-est de la France, l'effet d'économie que l'on pourrait rechercher en réduisant ces fuites pourrait se transformer en effet négatif sur les nappes ainsi réalimentées.

La réalimentation artificielle est donc actuellement utilisée en France en tant que technique possible pour remédier localement à un problème spécifique (par exemple mise à profit des capacités d'épuration du sous-sol pour diminuer une charge en polluants), avec aussi l'avantage de pouvoir compenser dans certains cas une baisse de niveaux.

Dans le cas où l'objectif recherché serait l'accroissement de la ressource souterraine (stockage puis réutilisation différée), la nécessité d'une gestion rationnelle de l'hydrosystème environnant doit s'imposer dans la mesure où l'eau détournée de sa destination normale pour être injectée dans l'aquifère ne doit pas faire défaut à d'autres compartiments de l'hydrosystème. La réalimentation artificielle devra alors être considérée, surtout dans le contexte climatique actuel, comme un instrument d'une gestion globale de la ressource dans un bassin donné.

...

Réalimentation artificielle des aquifères en France  
Une synthèse

## 7. Bibliographie

### Ouvrages généraux

- 1] BIZE.J., LEMOINE.J., BOURGUET L. – 1972 Alimentation artificielle des nappes souterraines. Editions MASSON
- 2] DETAY M. – 1997 - La gestion active des aquifères. Editions MASSON
- 3] Pyne R.D.G. (1995) - Groundwater Recharge and Wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery - Lewis Publishers, CRC Press.

### Colloques

- 4] Recharge systems for protecting and enhancing groundwater resources. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on management of aquifer recharge. ISMAR5 , Berlin, Germany - 11-16 Juin 2005. Publication Unesco, IHP-VI, Series on Groundwater n° 13.
- 5] Gestion active des eaux - Colloque de la SHF, Paris 12-13 Juin 2007. Publication SHF.

### Rapports ou articles de synthèse

- 6] ARCHAMBAULT J., BIZE J., MARGAT J. – 1968 - Alimentation artificielle des nappes souterraines. Bulletin du BRGM 2ème série section III n°1.
- 7] CASTANY G. -1970 – Conditions hydrogéologiques de l'alimentation artificielle des nappes d'eaux souterraines. BRGM 70 SGN088 HYD.
- 8] Central Groundwater Board , Ministry of Water Resources, New Delhi, India – 2000 – Guide on artificial recharge to groundwater.
- 9] DILLON P. – 2005 - Future management of aquifer recharge. Hydrogeology Journal, Vol. 13.
- 10] DILLON P., MOLLOY – 2006 - Developing Aquifer Storage and Recovery (ASR) opportunities in Melbourne. Technical guidance for ASR . Smart Water Fund
- 11] DWAF (Department Water Affairs and Forestry), Republic of South Africa - 2007 - Artificial Recharge Strategy – Version 1.3
- 12] GALE I., NEUMANN I., CALOW R., MOENCH M. – 2002 - The effectiveness of artificial aquifer recharge of groundwater: a review. BGS Report / N° CR/02/108/N
- 13] LEGUERN C., LACHASSAGNE P., NOEL Y., PERSIN F., DE.BUYSSCHER I. – 2003 Dessalement et recharge artificielle : synthèse technico-économique. BRGM/RP-52262-FR
- 14] MARGAT J. -1972 - L'alimentation artificielle des nappes souterraines en France. Aide-mémoire sur les expériences et les réalisations entreprises - BRGM/RR-23119-FR

15] PALOQUE Y. – 1984 - Une ressource nouvelle : les nappes réalimentées.  
Revue de l'Agence Adour-Garonne n°29.

### **Rapports et articles sur les sites de recharge artificielle en France**

16] BEL F. – 1988 - Dossier technico-commercial du procédé de "production d'eau potable par réalimentation de nappe". BRGM/88SGN772MPY

17] BEL F. -1989 - Etude hydrogéologique de la station de réalimentation de nappe de Lavelanet de Comminges (31). BRGM/30008MPY4S89

18] BEL F. – 1991 - Syndicat AEP de Foissac (12). Conception et avant-projet de la station de réalimentation de nappe autour du forage F3. BRGM/91MPY49

19] BEL F. – 1991 - Syndicat AEP de Foissac (12). Diagnostic sur le tarissement des deux forages BRGM et étude de préfaisabilité d'une station de réalimentation.  
BRGM/RR-32500-FR

20] BEL F., CHEVALIER-LEMIRE G. – 1993 - Etude hydrogéologique de la station de réalimentation de la nappe de Calmont (31). BRGM/00073-FR

21] BEL F., DEFER G., DONVILLE B. – 1988 - Incidence de la réalimentation artificielle des nappes souterraines sur la qualité des eaux pour l'aep. phase 2 :résultats des expérimentations sur les stations de Calmont et de Saint-Jory (Haute-Garonne)  
BRGM/88SGN315MPY

22] BEL F., DEFER G., DONVILLE B. – 1988 - Guide pour la conception de stations de réalimentation de nappe. BRGM/88SGN316MPY

23] BEL F. – 1986 - Incidence de la réalimentation artificielle des nappes souterraines sur la qualité des eaux pour l'AEP. Phase 1 : inventaire des stations de réalimentation.  
BRGM/RR-18397-FR

24] BIZE J. – 1972 - Avant-projet d'un aménagement de recharge artificielle de la nappe alluviale de la Garonne à Blagnac. BURGEAP

25] BIZE J., LEMOINE J. – 1971- Perspectives de développement de l'alimentation artificielle des nappes souterraines en France. BRGM/RR-23494-FR

26] BOURBIGOT M., DEMOCRATES Ch., CALMELS R. et BIZE J. – 1985 - Alimentation artificielle de la nappe alluviale de la Garonne pour la production d'eau potable.  
BURGEAP – CGE - Water Supply, vol. 3 – Pergamon Press Ltd. Great Britain.

27] BRGM – 1971 - Recherches hydrogéologiques dans la basse vallée du Var (06). Contribution à l'alimentation en eau des zones littorales et pré-côtières.  
BRGM/71-SGN-141-PRC.

28] BURGEAP – 1986 - Etude de faisabilité et schéma de principe d'une station de traitement par bassin d'infiltration à Lafrançaise – Saint-Maurice, Tarn-et-Garonne.

29] CAOUS J.Y., BELPAUME D., LEGRAND M. – 1976 - Réalimentation et surexploitation saisonnière de la nappe de la craie en amont de Saint-Quentin (Aisne).  
BRGM/RR-22068-FR

- 30] CREMILLE L. – 1972 - Moyen-Escout. étude hydrogéologique des zones de réalimentation de bouchain, Roelux-Mastaing et Avesnes-le-Sec (Nord). BRGM/RR-23038-FR
- 31] CREMILLE L., RAMON S. – 1970 - Méthode de recherche systématique des sites favorables à l'alimentation artificielle des nappes libres. BRGM/RR-23593-FR
- 32] DAVID A., LAPEYRE E., CHATELLARD F., BERTHOUMIEU J.F., SOURISSEAU B., COLLIN J.J. – 1996 - Etude des possibilités de recharge artificielle des nappes alluviales. Application à la nappe alluviale de la Garonne en Lot-et-Garonne. BRGM/RR-39030-FR
- 33] DETAY M., DOUSSAN C., GRENET B. – 1992 - Etude quantitative et qualitative de l'effet de berge - application à la nappe alluviale de Flins-Aubergenville. Société Hydrotechnique de France: XXIIe journées de l'hydraulique
- 34] DETAY M., BERSILLON J.L. – 1996 - La réalimentation artificielle des nappes profondes: faisabilité et conséquences. La Houille Blanche / N°4-1996.
- 35] DROESCH J.P., PANEL R. – 1991 - Syndicat intercommunal d'adduction d'eau potable de Brienne-le-Chateau (Aube). Etude de la recharge artificielle de la nappe en amont des captages. BRGM/RR-32203-FR
- 36] FARAND R., GARNIER J.L., DOMINICI R., JUNCY G. – 1991 - Office d'équipement hydraulique de la Corse alimentation en eau potable de Calvi (Haute Corse). Champ de captage de la Figarella : réalimentation artificielle de la nappe en période d'étiage simulation sur modèle mathématique. BRGM/RR-33247-FR
- 37] GERVAISE C. – 1994 - Etude préalable à la définition des périmètres de protection de la station de réalimentation artificielle de Vaux-sur-Vienne. BRGM/RN-01699-FR
- 38] GERVAISE C., FAY DE LESTRAC H. – 1994 - Etude de faisabilité de recharge artificielle de nappe en aquifère calcaire. BRGM/RN-01297-FR.
- 39] HAEFFNER H., GRANDGUILLAUME J.J., VANRENTERGHEM A. – 2001- La réalimentation des nappes: exemples d'application en France. La Houille Blanche, n° 3-4, 2001.
- 40] HAEFFNER H., GRANDGUILLAUME – 2007- Le procédé Bi'Eau. Une solution innovante pour un traitement in-situ des ressources en eau. Colloque "Gestion active des eaux" Paris, 12-13 Juin 2007 - Publications de la SHF.
- 41] JAUFFRET D. – 2004 - Possibilités de recharge artificielle de la nappe alluviale de la Loire en Saône-et-Loire pour sécuriser l'alimentation en eau potable. Propositions et prescriptions pour la mise en oeuvre de sites de recharge artificielle. BRGM/RP-53087-FR
- 42] KUKLAN S., TALBO H. – 1974 - Alimentation artificielle des nappes des bassins de la forêt du Theil et de la Groussinière (ille-et-vilaine). Etude préliminaire. BRGM/RR-22551-FR
- 43] MARCHAL J.P. – 1992 - Commune d'Argelès-sur-mer, Pyrénées-orientales - Etude hydrogéologique de la réalimentation de la nappe superficielle avec des eaux traitées par la station d'épuration en vue de l'irrigation des espaces verts. BRGM/RR-35207-FR

- 44] PUTALLAZ J. – 1975 - Contribution a l'alimentation en eau potable des zones côtières et pré-côtières. Essai de réalimentation artificielle dans la basse vallée du Var (Alpes-maritimes). Deuxième phase d'essai. BRGM/RR-22384-FR
- 45] RICOUR J., COLLEAU A., THRONION J.C. – 1974 - Douaisis. étude hydrogéologique des zones de réalimentation de Corbehem, Ferin et Brebieres (Nord). BRGM/RR-22717-FR
- 46] RICOUR J., PHILIPPART A. – 1975 - Agence financière de bassin Artois-Picardie. Alimentation artificielle de la nappe de la craie par bassins au sud de Douai. Estimation des paramètres hydrauliques de la craie du Turonien-Sénonien sur le site de Ferin-Dechy par pompage d'essai et injection. BRGM/RR-22483-FR
- 47] RICARD J., CHEVALIER-LEMIRE G., GUILLEMINOT P. – 1993 - Champ captant d'eau souterraine de Capdenac-Gare. Modélisation hydrodynamique du champ captant. Résultats des scénarios d'exploitation des puits et d'injection dans une station de réalimentation. BRGM/RR-37766-FR
- 48] ROCHE J. – 1983 - Lutte contre la pollution par les nitrates : étude hydrogéologique du site de la station de réalimentation de Noé. BRGM/83-MPY-24
- 49] ROCHE J. -1983 - Etude hydrogéologique préliminaire du site de la station de réalimentation de Cintegabelle. BRGM/83-MPY-27
- 50] ROCHE J. – 1983 - Lutte contre les nitrates – Etude hydrogéologique préliminaire du site de réalimentation de Beldou-Saint-Jory. BRGM/83-MPY-28
- 51] ROCHE J. – 1985 - Station de Terraqueuse à Calmont – Compte-rendu de surveillance piézométrique du dispositif de réalimentation de la nappe au 17 juin 1985 - Note BRGM.
- 52] ROCHE J., VANDENBEUSCH M. – 1974 - Syndicat des eaux de la vallée de la Save et des coteaux de Cadours (Haute-Garonne). Etude du renforcement de la productivité du puits de captage par réalimentation artificielle de la nappe alluviale. BRGM/RR-22718-FR
- 53] SOGREAH – 1990 - L'essai de réalimentation de la nappe de l'Ariège d'octobre 1990. SOGREAH 7 0195
- 54] VANDENBEUSH M. et ROCHE J. – 1974 - Etude du site de réalimentation de Grenade pour le syndicat Save-Cadours. BRGM/74-SGN-033-MPY

### **Autres rapports et articles**

- 55] AERTGEERTS R., ANGELAKIS A. – 2003 - State of the art report. Health risks in aquifer recharge using reclaimed water - WHO EUR/03/5041122
- 56] ANGELAKIS A., THAIRS, T., LAZAROVA V., ASANO T. – 2001 - State of the art review. Water reuse in the EU countries: necessity of establishing EU guidelines EUREAU EU2-01-26
- 57] BAUMONT S., CAMARD J-P., LEFRANC A., FRANCONI A. - Réutilisation des eaux usées épurées: risques sanitaires et faisabilité en Ile-de-France. Observatoire Régional de la Santé d'Ile-de-France

- 58] BOUWER H. – 2005 - Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, Vol. 10.
- 59] BRISSAUD F., LESAVRE J. – 1993 - Epuration des eaux usées urbaines par infiltration-percolation: état de l'art et étude de cas. Etude inter-agences n°9
- 60] BROWN C.J., ITANI S., ZHANG M. – 2005 - Aquifer Storage and Recovery: regional study. US Army Corps of engineers.
- 61] COMTE J-P., COLLIN J-J., DAUM J-R., DESPRATS J-F., LOPOUKHINE M. – 1994 - Ressources en eaux souterraines protégées dites "d'ultime recours". Phase 1 Inventaire national. BRGM/RR-38142-FR
- 62] DETAY M., DUMOUTIER N., HAEFFNER H., VIGNIER V. – 1994 - Incidence de la réalimentation artificielle de nappe sur la qualité de la ressource. HYDROTOP 94 - Marseille. Colloque "mieux gérer l'eau"
- 63] DETAY M., HAEFFNER H. – 1996 - The role of artificial recharge in active groundwater management. Water supply, Vol. 15, N° 2, Amsterdam, pp 1-13, 1997
- 64] DILLON P., PAVELIC P., TOZE S., RINCK-PFEIFFER S., MARTIN R., KNAPTON A., PIDSLEY D. – 2005 - Role of aquifer storage in Water Reuse. Integrated concepts in water recycling.
- 65] DUTANG M. – 2005 - La gestion de la qualité des ressources en eau. Le magazine de la chronique scientifique N°5 (Veolia environnement)
- 66] EUSUFF M.M., LANSEY K.E. – 2004 - Optimal operation of artificial groundwater recharge systems considering water quality transformations. Water Resources Management N°18, pp 379-405
- 67] FILDIER F. – 1983 - Amélioration de la ressource en eau : la réalimentation des nappes. A.F.E.E.
- 68] GALE I., DILLON P. – 2005 - Strategies for managed aquifer recharge (MAR) in semi-arid areas. UNESCO IAH-MAR.
- 69] GAU H. S., HSIEH C. Y., LIU C. W. – 2006 - Application of grey correlation method to evaluate potential groundwater recharge sites. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 20.
- 70] GRESKOWIAK J., PROMMER H., MASSMANN G., JOHNSTON C. D., NUTZMANN G., PEKDEGER A. – 2005 - The impact of variably saturated conditions on hydrogeochemical changes during artificial recharge of groundwater. Applied geochemistry Vol. 20 N°7, pp 1409-1426
- 71] LATINOPOULOS, P. - 1986 - Analytical solutions for strip basin recharge to aquifers with Cauchy boundary conditions. Journal of Hydrology, Vol 83, 197–206.
- 72] LE BARS Y., POITRINAL D. - Eaux souterraines et développement durable. Stratégie de gestion et de financement. Documents de travail de l'OIEAU. Atelier 3
- 73] LINDNER W., ENGELHARDT N. – 2006 - Water supply, waste water disposal, biotope and resource protection is disagreement ? - The need for a holistic consideration. IWA Congress and exhibition. Pekin, 10-14, Sept. 2006

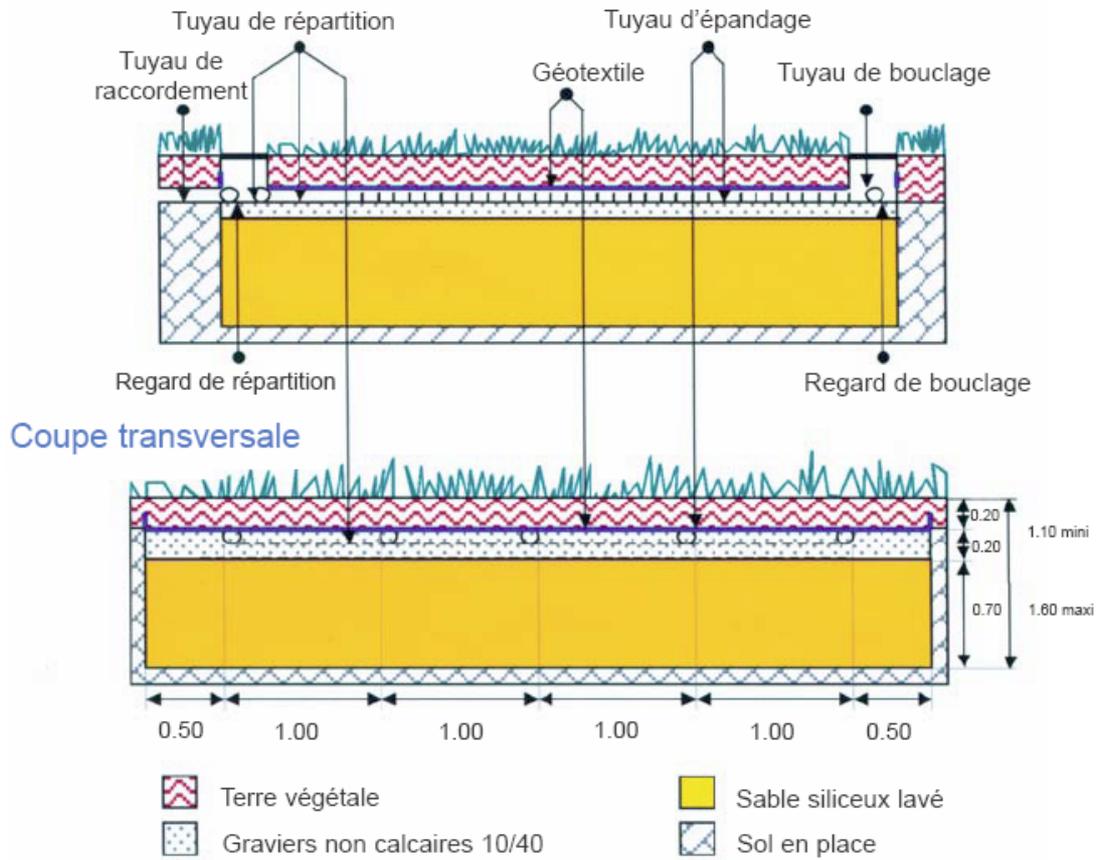
- 74] MANGLIK, A., RAI, S.N. - 1998 - Two-dimensional modelling of water table fluctuations due to time varying recharge from rectangular basin. *Water Resources Management*, Vol.12, 467–475.
- 75] MARINO, M. A.: 1967, Hele-Shaw model study of the growth and decay of groundwater ridges. *Water Resources Management*, Vol. 14, 339–347, 2000.
- 76] MARTINEZ-SANTOS P., MARTINEZ-ALFARO P., MURILLO J. M. – 2005 - A method to estimate the artificial recharge capacity of the Crestatx aquifer (Majorca, Spain). *Environmental Geology* Vol. 47 N°8
- 77] MIQUEL G. – 2003 - Qualité de l'eau et de l'assainissement en France (annexes 85 et 86). Rapport du Sénat n° 215
- 78] MOUREY V., VERNOUX J-F. – 2000 - Les risques pesants sur les eaux souterraines en Île-de-France. *Annales des Mines* Mai 2000.
- 79] MIRACAPILLO C., BARBIERO G. – 2005 - Groundwater artificial recharge: actuality, topics and geographical analysis – *Hydrology days*.
- 80] Poeter E. , McCray J., Thyne G. , Siegrist R. -2005. Guidance for Evaluation of Potential Groundwater Mounding Associated with Cluster and High-Density Wastewater Soil Absorption Systems. Project No. WU-HT-02-45. Prepared for the National Decentralized Water Resources Capacity Development Project, Washington University, St. Louis, MO, by the International Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- 81] PYNE D.G. - 2004 - Aquifer Storage and Recovery: Issues and concepts
- 82] ROUX J-C. et al. – 2006 - Aquifères et eaux souterraines en France - BRGM-AIH éditions
- 83] TUINHOF A., HEEDERIK J.P. – 2002 - Management of aquifer recharge and subsurface storage. NNC-IAH Publications N°4

## **Annexe 1**

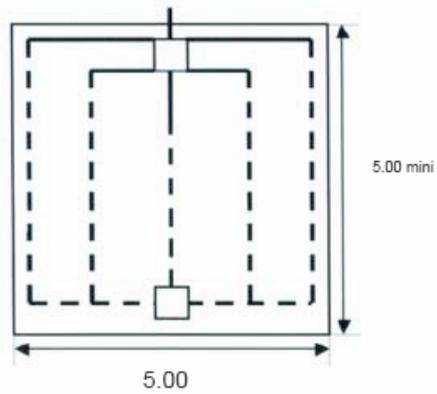
### **Schéma de dispositifs de filtre à sable (plaquettes du Conseil Général de la Charente)**



Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse



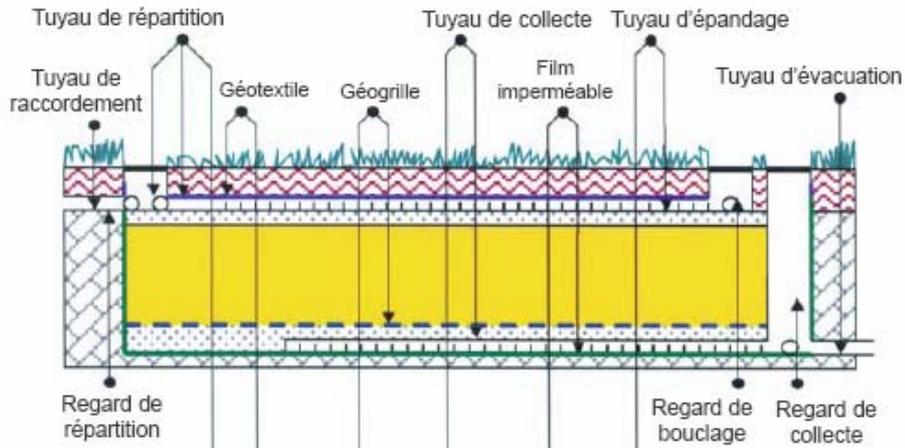
**Vue de dessus**



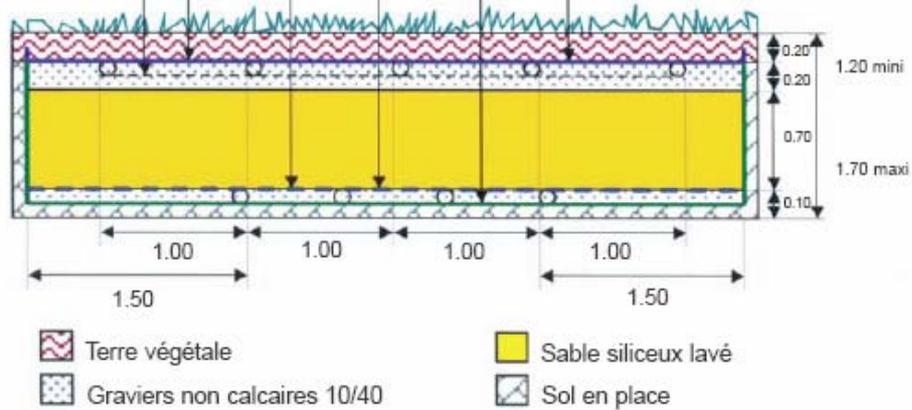
Unité de mesure : le mètre

Schéma d'un filtre à sable vertical non drainé

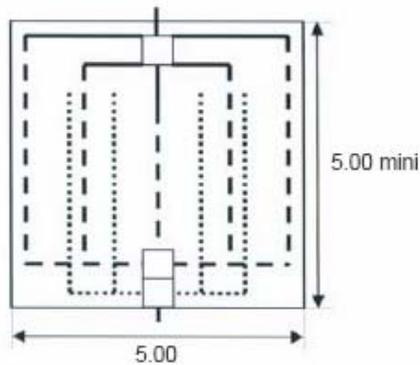
Coupe longitudinale



Coupe transversale



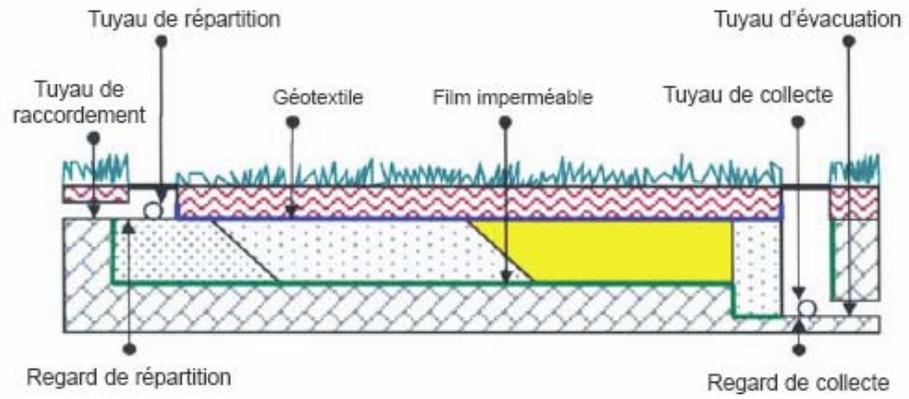
Vue de dessus



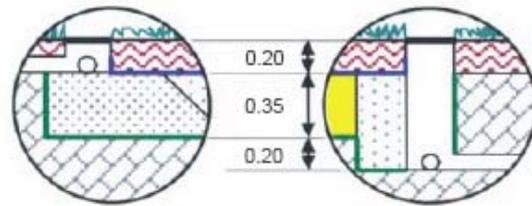
Unité de mesure : le mètre

Schéma d'un filtre à sable vertical drainé

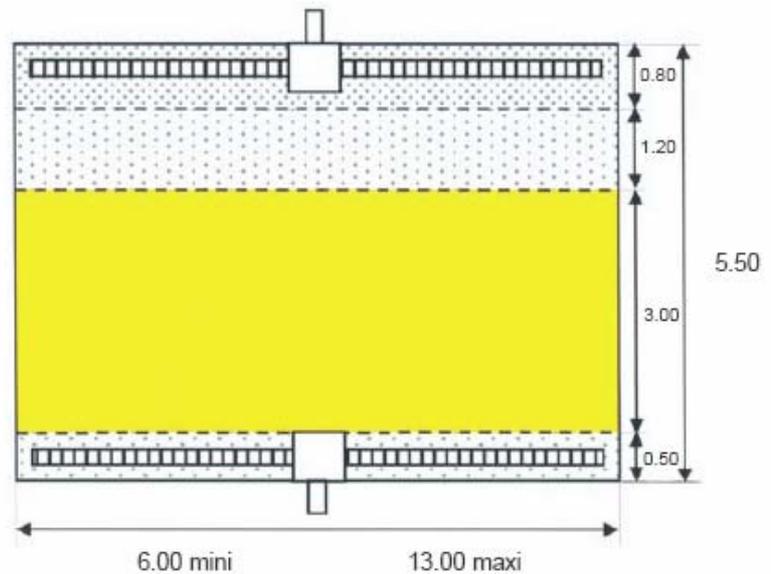
Coupe longitudinale



-  Terre végétale
-  Graviers non calcaires 10/40
-  Graviers non calcaires 6/10
-  Sable siliceux lavé 2/4
-  Sol en place



Vue de dessus



Unité de mesure : le mètre

Schéma d'un filtre à sable horizontal

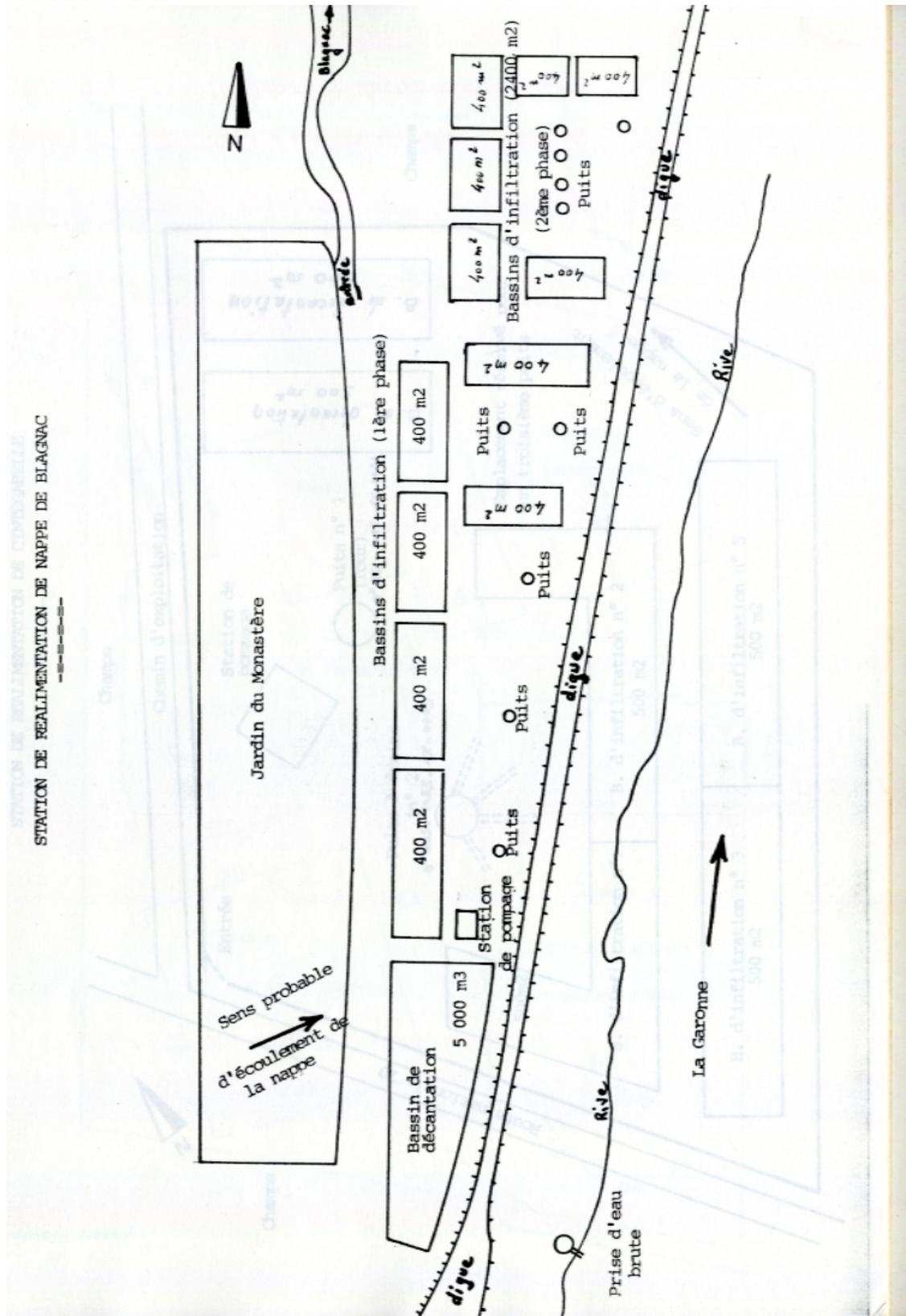


## **Annexe 2**

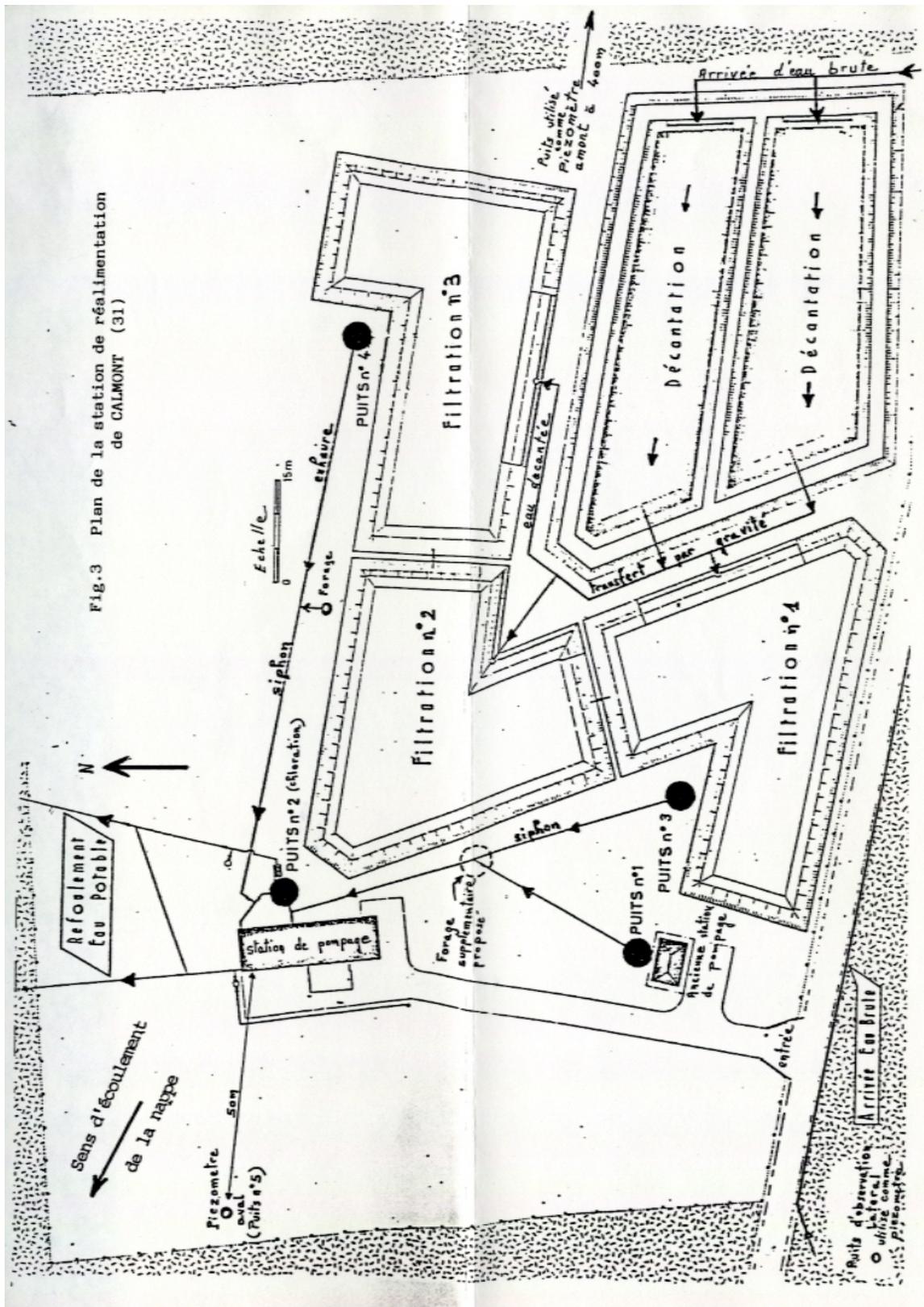
### **Plan des stations de réalimentation du département de la Haute-Garonne et de Lafrançaise (Tarn-et-Garonne)**



Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse





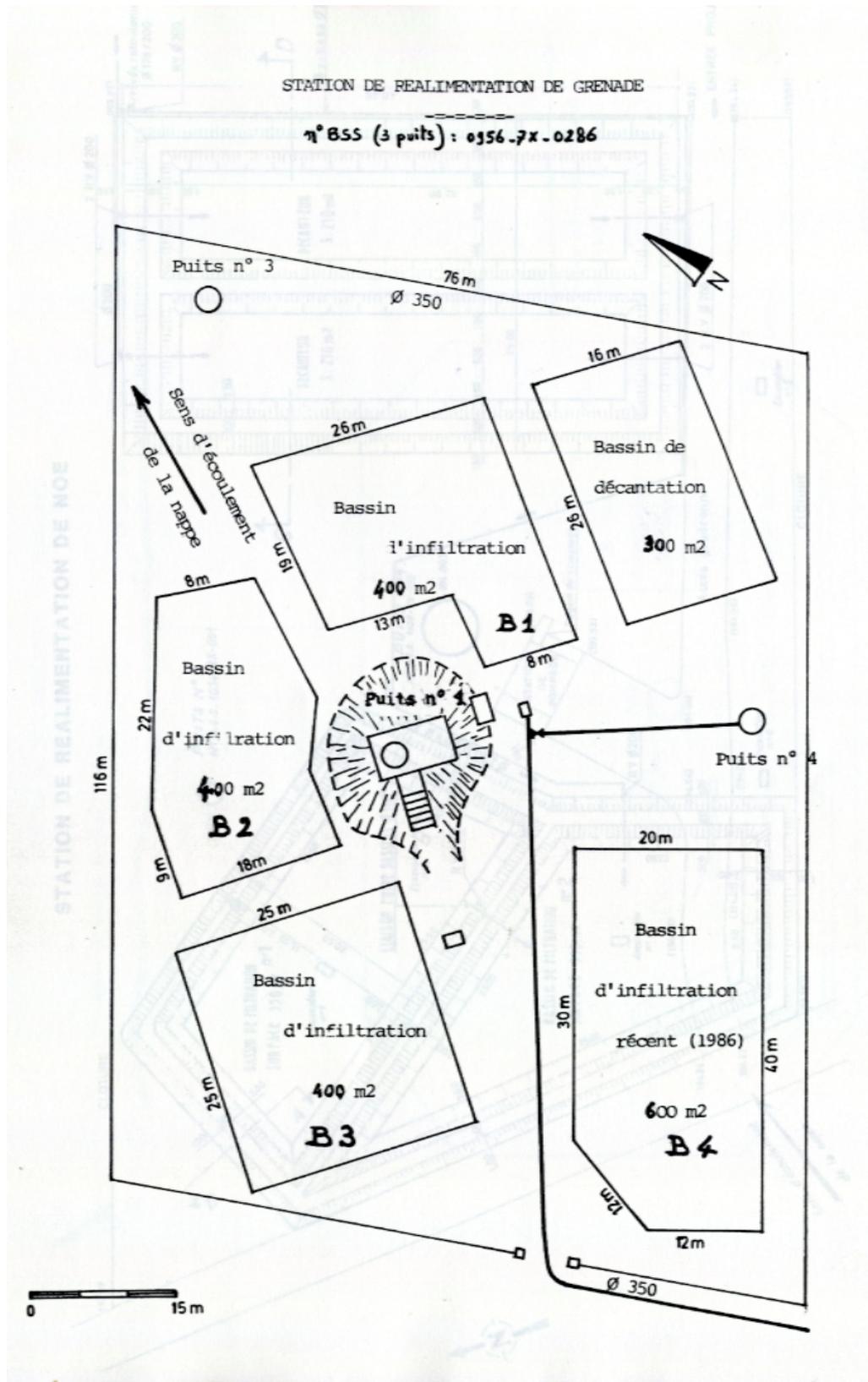








Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse





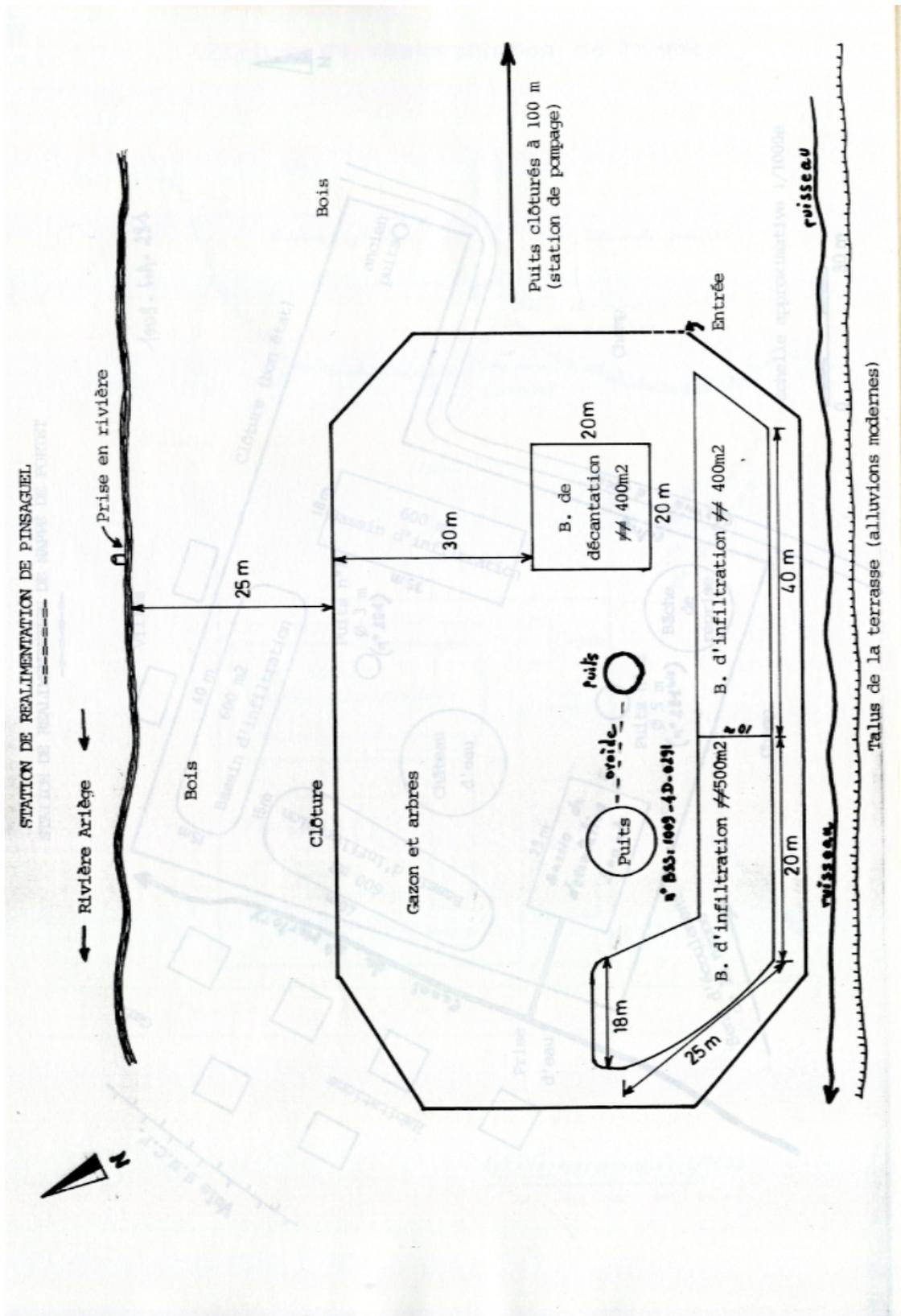






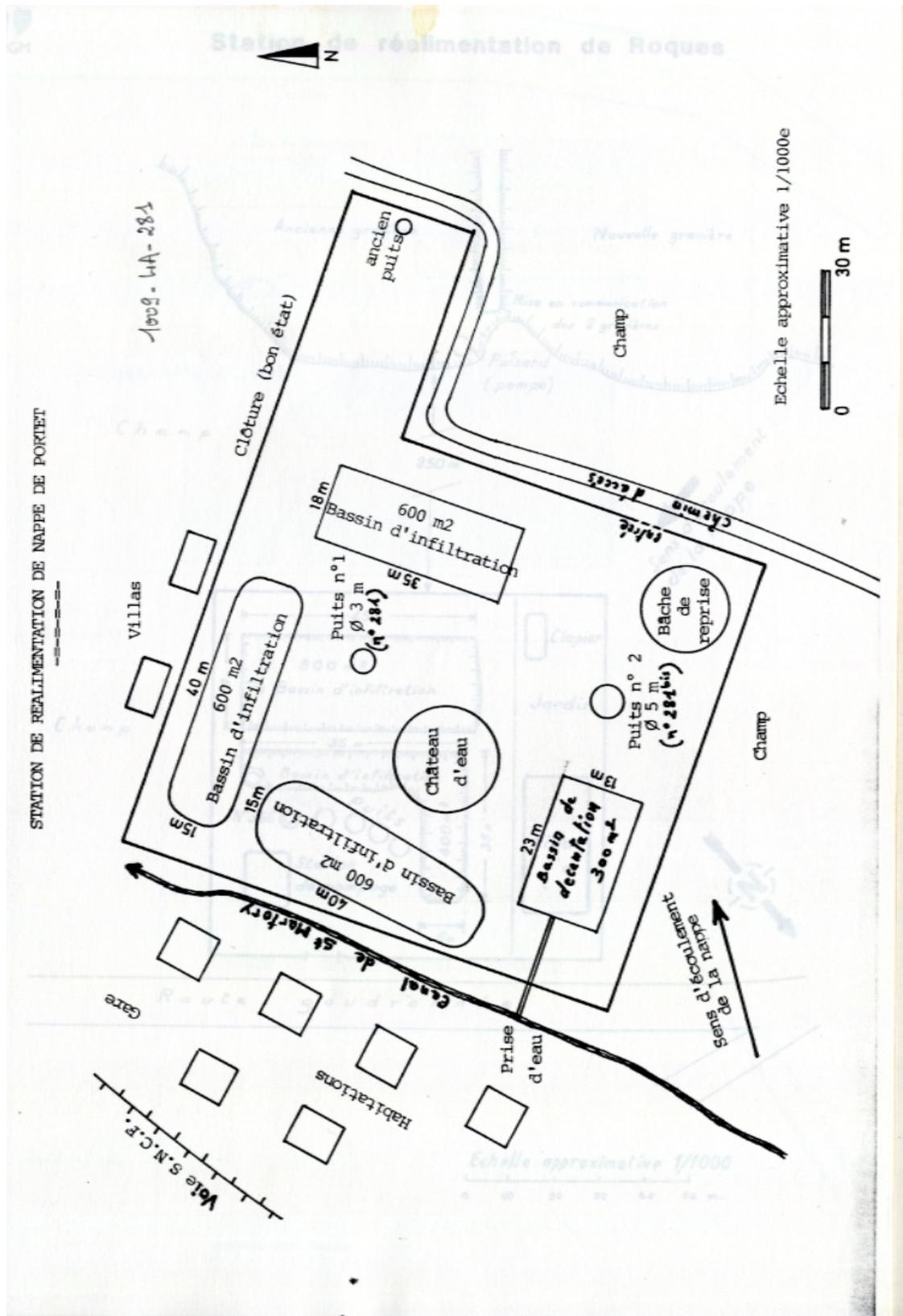


Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse

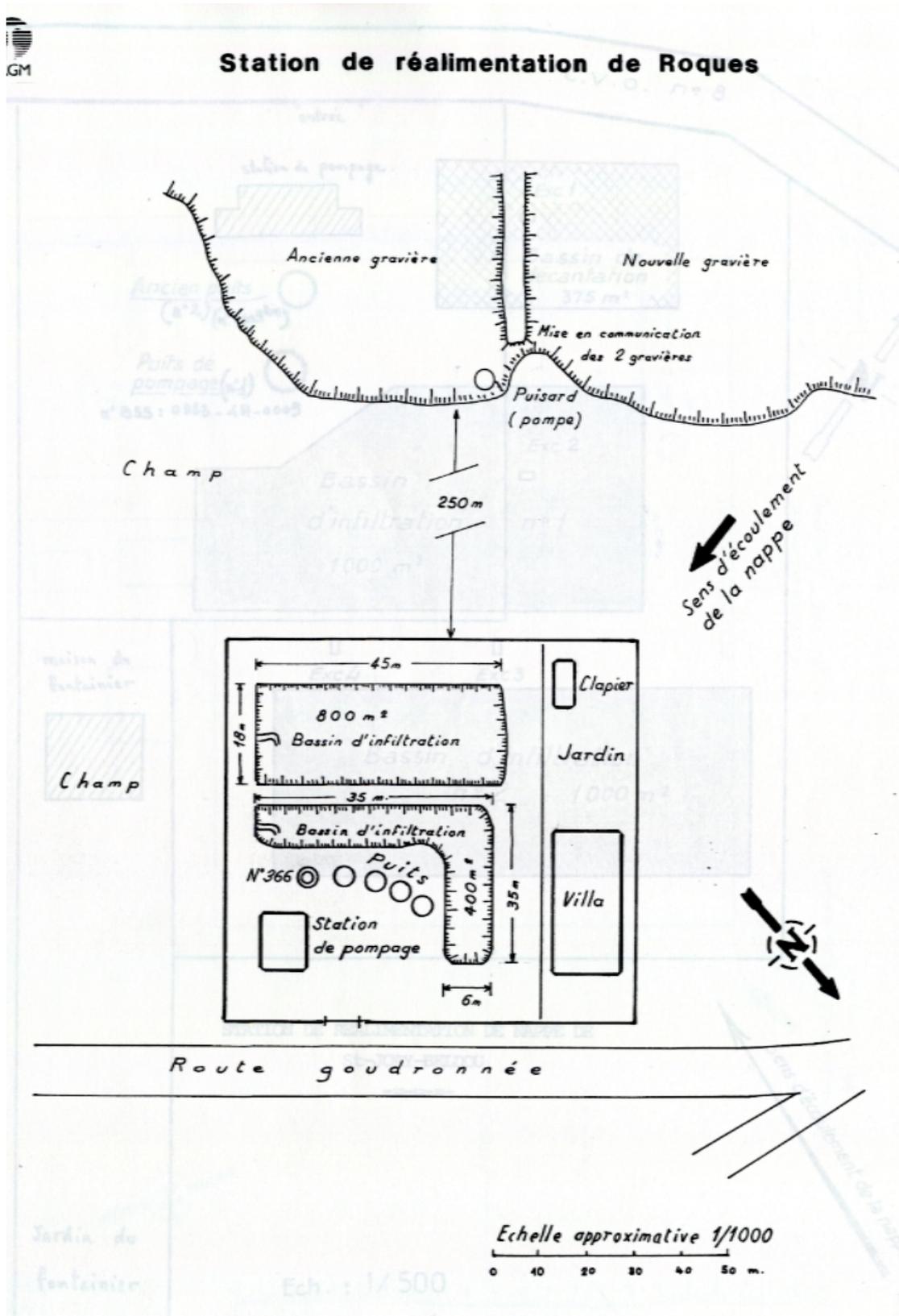




Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse

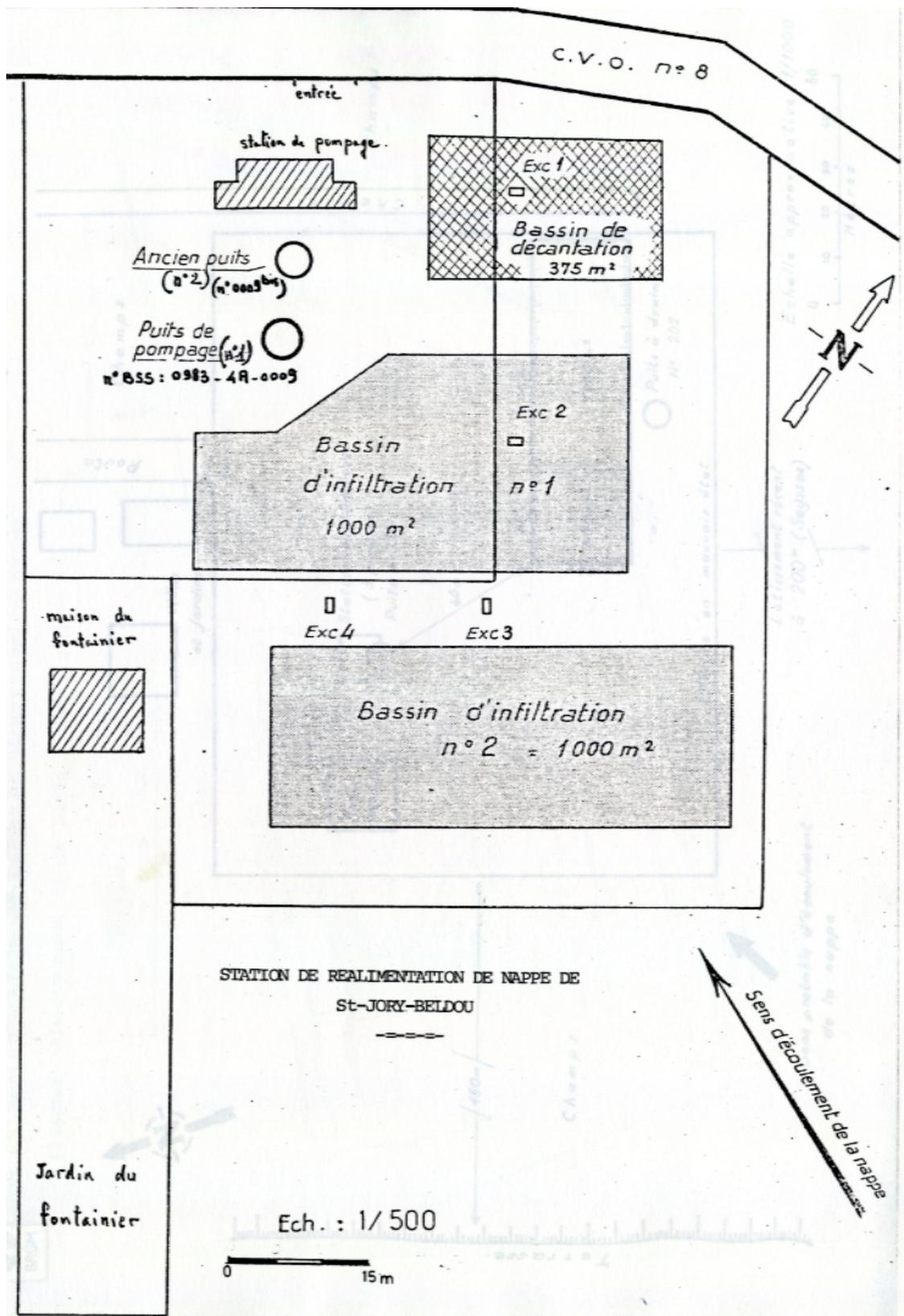








Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse













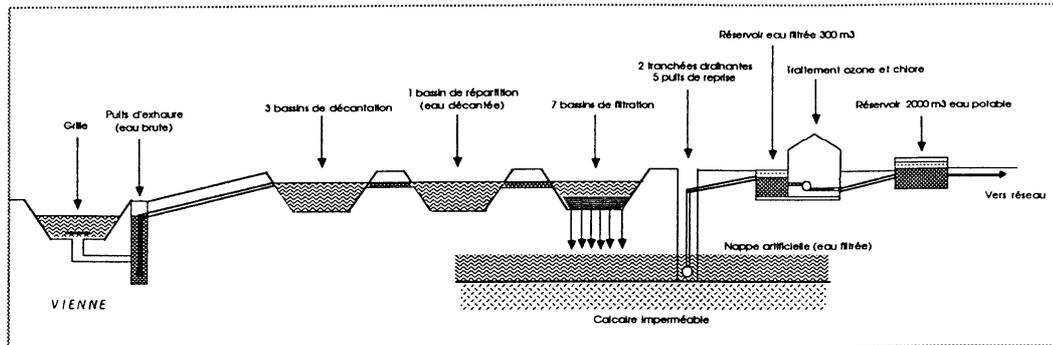
## **Annexe 3**

### **Vues en plan et en coupe de la station de Vaux- sur-Vienne (Vienne)**



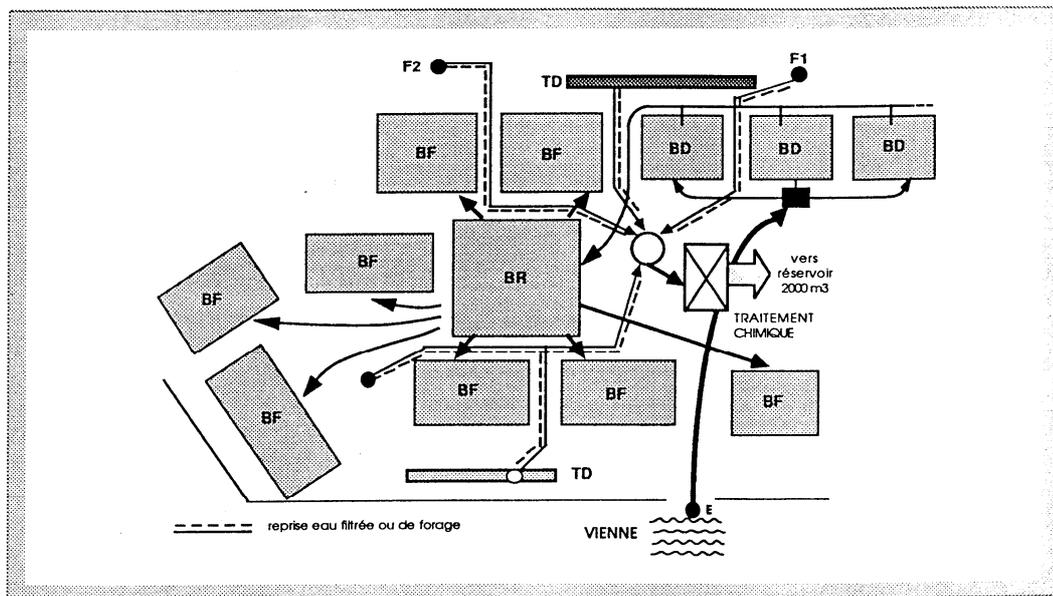
Réalimentation artificielle des aquifères en France.  
Une synthèse

LA STATION DE PRODUCTION DE VAUX SUR VIENNE



LA RESSOURCE

EN EAU PROFONDE - 2 forages au cénomanien  
EN EAU SUPERFICIELLE - La VIENNE



PRINCIPE DE LA REALIMENTATION DE NAPPE

L'eau de la VIENNE est pompée dans un puits d'exhaure E vers 3 bassins où les MES (Matières En Suspension) principales sont décantées BD.

L'eau décantée est conduite gravitairement vers le bassin de répartition BR puis vers 8 bassins de filtrations BF. L'eau traverse 80 cm de sable calibré et descend jusqu'au calcaire imperméable à -10 m de profondeur en constituant une vaste réserve artificielle d'eau filtrée.

On puise alors dans cette nappe par l'intermédiaire de 5 puits de reprise et 2 tranchées drainantes.

L'eau filtrée est ensuite traitée par ozonation et par chloration puis dirigée vers une réserve de 2 000 m³ d'eau potable avant distribution sur le réseau.



## **Annexe 4**

### **Liste des sites et/ou projets de réalimentation identifiés**



Localisation	Département	Aquifère ou Nappe	Type de RAN	Débit moyen infiltré	Mise en service	Statut
Agen	Lot-et-Garonne	Alluvions de la Garonne	étude de faisabilité en 1996: test d'infiltration de 48j dans un fossé	132 000 m3 en 48jours	?	inconnu
Appoigny	Yonne	Alluvions de l'Yonne	bassins d'infiltration (2 en 1968)	500 m3/j	1968	mis en oeuvre
Argelès-sur-Mer	Pyrénées-Orientales	Nappe alluviale quaternaire	STEP. Infiltration percolation ou injection		?	inconnu
Ariège	Ariège	Alluvions de l'Ariège	Infiltration au niveau du lit de la Galage	500 l/s	?	inconnu
Avesnes-le-sec	Nord	Craie sénonienne	bassins d'infiltration		?	inconnu
Blagnac	Haute-Garonne	Alluvions actuelles de la Garonne	12 bassins d'infiltration	10000 m3/j	1974	mis en oeuvre
Brebières	Pas-de-Calais	Craie séno-turonienne			?	inconnu
Brienne-le-Château	Aube	Alluvions de l'Aube	tranchée d'infiltration (pendant l'essai: 2 tranchées)	134 m3/h	essai en 1990	inconnu
Brousse-le-Château	Aveyron	Alluvions du Tarn	Bassins d'infiltration		?	mis en oeuvre
Cailloutis de la Crau	Bouches-du-Rhone	Cailloutis de la Crau (ME 6104)	à partir de l'irrigation gravitaire	117 Mm3 par an		passif
Calmont	Haute-Garonne	Alluvions modernes de l'Ariège	3 bassins d'infiltration	4000 m3/j	1984 - en service	mis en oeuvre
Calvi	Haute-Corse	Nappe alluviale de la Figarella	Injection	40 à 50 l/s (projet)	?	inconnu
Capdenac-Gare	Aveyron	Alluvions du Lot	RAN envisagée (bassin ou puits) mais non réalisée		Non réalisé	mis en oeuvre
Cavaillon	Vaucluse	Alluvions de la Durance	batteries de forages à massif filtrant (14 en 1968)	1 m3/s	1967-68	mis en oeuvre
Chateaurenard	Bouches-du-Rhone	Alluvions de la Durance	batteries de forages à massif filtrant (5 en 1968)	830l/s	1956 (1er essai)	mis en oeuvre
Cintegabelle	Haute-Garonne	Alluvions modernes de l'Ariège	4 bassins d'infiltration	2000 m3/j	1976 - en service	mis en oeuvre
Corbehem	Pas-de-Calais	Craie séno-turonienne			?	inconnu
Corneilla-del-Velcol	Pyrénées-Orientales	multicouche pliocène et alluvions quaternaires du Roussillon (ME 6221)	pertes des canaux d'irrigation et surplus d'irrigation gravitaire			passif
Crépieux-Charmy	Rhône	Alluvions du Rhône	7 bassins d'infiltration	Capacité d'infiltration de 201500 m3/j	Oui	mis en oeuvre
Croissy-sur-Seine	Yvelines	Alluvions de la Seine et craie sénonienne	bassins d'infiltration (5 en 1968)	25 Mm3/an	1959	mis en oeuvre
Ferin	Nord	Craie séno-turonienne	Injection		?	inconnu
Flammerans	Cote d'or	alluvions de la Saone entre les confluents de l'Ognon et du Doubs (ME 6320)	injection par des puits		oui	mis en oeuvre
Flins-sur-Seine	Yvelines	Alluvions de la Seine et craie sénonienne	Bassins d'infiltration	8 Mm3/an	1980	mis en oeuvre
Foissac	Aveyron	Alluvions du Lot	2 bassins d'infiltration	600 m3/j	?	inconnu
Fontagneux	Isère	Alluvions de la Drac et de la Romanche			oui	mis en oeuvre
Gignac	Hérault	alluvions de l'Hérault (ME 6311)	alimentation de la nappe par le canal de Gignac du 15 mars au 15 octobre	1,7 Mm3/mois du 15/05 au 31/05 et du 01/09 au 15/10. 4,8 Mm3/mois durant les trois mois d'été		passif
Grenade	Haute-Garonne	Alluvions actuelles de la Garonne	4 bassins d'infiltration	3000 m3/j	1981	mis en oeuvre
Grisolles	Tarn-et-Garonne	Alluvions de la Garonne	Bassins d'infiltration d'après la carte IGN		en service	mis en oeuvre
Hopital et Puy	Vaucluse	Alluvions de la Durance	forages avec massif filtrant (4 en 1968)	120 l/s (30l/s par forage)	1967-68	mis en oeuvre

Réalimentation artificielle des aquifères en France  
Une synthèse

Houlle	Pas-de-Calais	Craie sénonienne	Bassins d'infiltration	De 0 à 7,2 Mm3 par an selon les pluies efficaces	Oui	mis en oeuvre
La Garde	Var	Calcaires et marnes du Muschelkalk plaine de l'Eygoutier (ME 6205)				mis en oeuvre
La Roquette-sur-Var	Alpes-Maritimes	Alluvions du Var	2 bassins d'infiltration	1 m3/s/m <sup>2</sup>	1971	mis en oeuvre
Lafrançaise	Tarn-et-Garonne	Alluvions modernes du Tarn	4 bassins d'infiltration	4000 m3/j	1987	mis en oeuvre
Lavelanet-de-Comminges	Haute-Garonne	Nappe alluviale	2 bassins d'infiltration	3000 m3/j	?	mis en oeuvre
Le Theil-de-Bretagne	Ille-et-Vilaine	Nappe des sables tertiaires Pliocène	bassins d'infiltration	1 120 000 m3/an	?	inconnu
Le Theil-de-Bretagne	Ille-et-Vilaine	Nappe des sables tertiaires Pliocène	Remise en communication de la nappe avec le cours d'eau (curage et approfondissement)	2800 à 14000 m3/j	?	inconnu
Manduel	Gard	Alluvions anciennes de la Vistrenque et des Costières (ME 6101)				inconnu
Mas-Grenier	Tarn-et-Garonne	Alluvions de la Garonne			en service	mis en oeuvre
Messein	Meurthe-et-Moselle	alluvions de la Moselle	tranchées garnies de graviers filtrants	1.2 m3/s	1875 / Abandonné	mis en oeuvre
Miremont	Haute-Garonne	Alluvions de l'Ariège			en service	mis en oeuvre
Mondragon	Vaucluse	Alluvions de la Durance	fosses et forages à massif filtrant (total > 230)	8.5 m3/s	1951	mis en oeuvre
Neuville-sur-Moselle	Meurthe-et-Moselle	alluvions de la Moselle	bassins d'infiltration		oui	mis en oeuvre
Noe	Haute-Garonne	Alluvions modernes de la Garonne	2 bassins d'infiltration	400 m3/j	1985	mis en oeuvre
Peyrolles-en-Provence	Bouches-du-Rhone	Alluvions de la Durance	batteries de forages à massif filtrant (13 en 1968)	220 l/s	1956 (1er essai)	mis en oeuvre
Pinsaguel	Haute-Garonne	Alluvions actuelles de l'Ariège	2 bassins d'infiltration	1000 m3/j	1978 - en service	mis en oeuvre
Plan-d'Orgon	Bouches-du-Rhone	Alluvions de la Durance	fosse + tranchée + puits comblés de graviers filtrants (5 en 1968)	700 l/s	1953 (1er essai)	mis en oeuvre
Portet-sur-Garonne	Haute-Garonne	Alluvions modernes de la Garonne	3 bassins d'infiltration	1000 m3/j	1978	mis en oeuvre
Réalville	Tarn-et-Garonne	Alluvions de la Lère (affluent en rive droite de l'Aveyron)			en service	mis en oeuvre
Roeulx	Nord	Craie sénonienne	bassins d'infiltration			inconnu
Roques	Haute-Garonne	Alluvions modernes de la Garonne	2 bassins d'infiltration	1200 m3/j	1978	mis en oeuvre
Saint-Jory	Haute-Garonne	Alluvions modernes de la Garonne	2 bassins d'infiltration	2500 m3/j	1984	mis en oeuvre
Saint-Quentin	Aisne	Nappe de la craie sénonienne	Projet d'injection	projet de stockage de 7,5 millions de m3	?	inconnu
Seysse	Haute-Garonne	Alluvions modernes de la Garonne	2 bassins d'infiltration		1976	mis en oeuvre
Vauvert	Gard	alluvions anciennes de la Vistrenque et des Costières				inconnu
Vaux-sur-Vienne	Vienne	Nappe des alluvions anciennes de la Vienne	7 bassins d'infiltration	2500 à 6500 m3/j	1975-1978	mis en oeuvre
Vernet	Haute-Garonne	Alluvions de l'Ariège			en service	mis en oeuvre
Vessy	Suisse	formations fluvioglaciales nappe profonde du genevois (ME 6235)	infiltration des eaux de l'Arve traitées	8 à 10 Mm3 / an	oui	mis en oeuvre
Vidauban?	Var	alluvions des fleuves côtiers Giscle et Môle, Argens et Siagne (ME 6318)	réinjection en nappe	0,65 Mm3/an		mis en oeuvre
Villeneuve-Tolosane	Haute-Garonne	Alluvions modernes de la Garonne	4 bassins d'infiltration		1976	mis en oeuvre
Villeurbanne (Grand Camp)	Rhône	Alluvions du Rhône	tranchée filtrante		1931 / Abandonné	mis en oeuvre

## Annexe 5

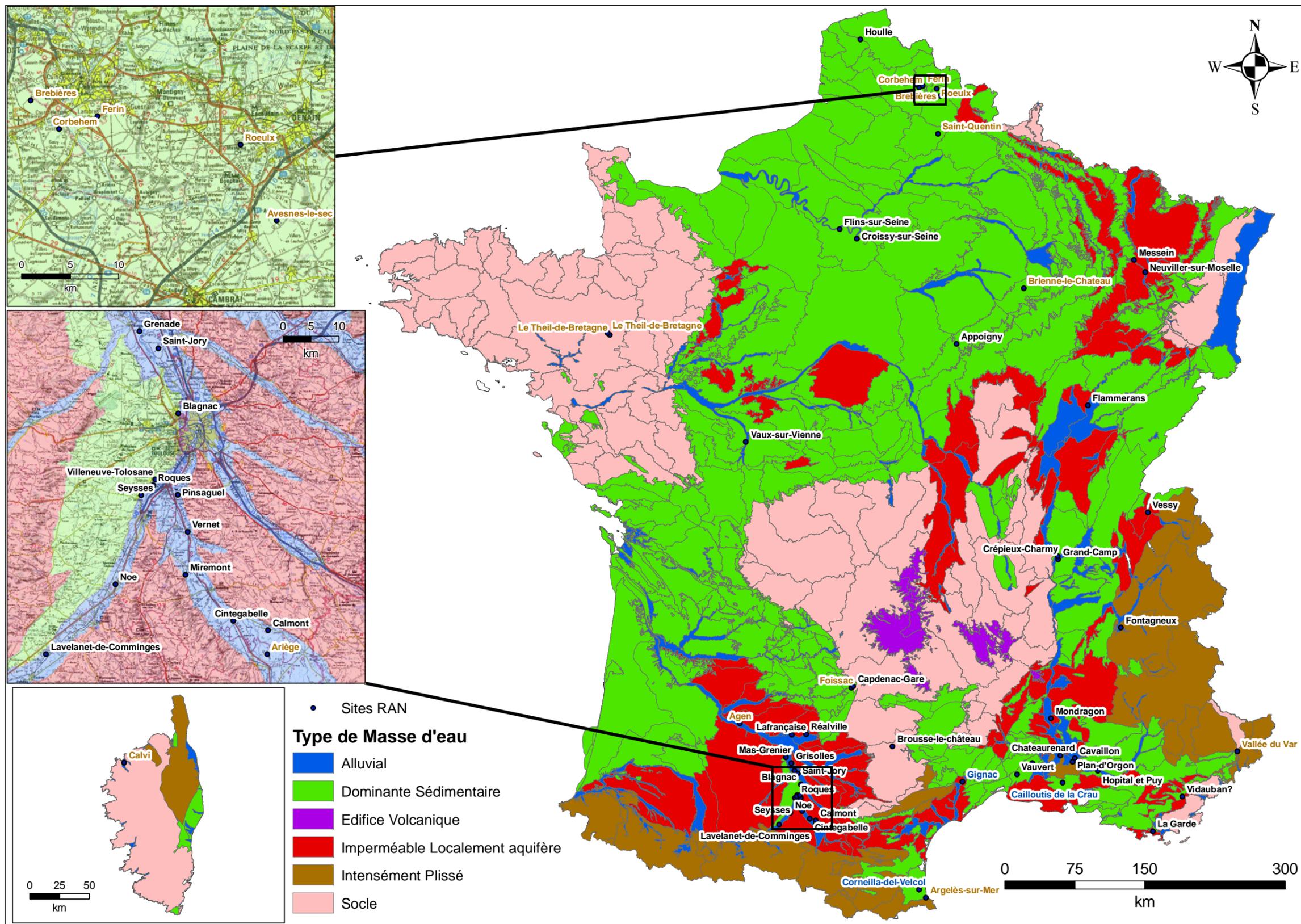
### Carte de localisation des sites et/ou projets de réalimentation artificielle en France

xxxxxxx site opérationnel

xxxxxxx site projeté mais de réalisation non connue

xxxxxxx site avec réalimentation passive (fuites de canaux, irrigation,...)









**Centre scientifique et technique  
Service Eau**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34