

DELEGATION GENERALE  
A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE  
Comité d'action concertée "EAU"

# DONNÉES SUR L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DES NAPPES SOUTERRAINES

Etude documentaire

par

J. ARCHAMBAULT\*, J. BIZE\*, J. MARGAT\*\*

(\*BURGEAP, \*\*B.R.G.M.)



BUREAU DE GEOLOGIE APPLIQUEE  
ET D'HYDROLOGIE SOUTERRAINE  
(BURGEAP)  
45, rue Perronet - 92-Neuilly-sur-Seine

BUREAU DE RECHERCHES  
GEOLOGIQUES ET MINIERES  
74, rue de la Fédération - 75-Paris 15<sup>ème</sup>  
Tél. 783 94-00

DIRECTION DU SERVICE GEOLOGIQUE  
ET DES LABORATOIRES

Département d'Hydrogéologie  
45 - Orléans-La Source  
B.P. 818 - Tél. 87-04-69

**B.R.G.M. 68 SGL 020 HYD**  
**BURGEAP R. 466**

Janvier 1968

## RESUME.

En quoi consiste l'alimentation artificielle des nappes d'eau souterraines et quels objectifs peut-on assigner à cette opération ? Comment pratique-t-on cette alimentation artificielle des nappes (techniques et dispositifs d'injection, et maintien de l'efficacité des installations) ?

L'analyse des différentes expériences françaises et étrangères et l'examen des installations correspondantes nous ont paru la voie la meilleure pour répondre à cette série de questions.

Il découle de cette étude que si les problèmes théoriques de l'injection artificielle d'eau dans une nappe sont le plus souvent surmontés, il n'en est pas de même des problèmes pratiques. Leur résolution est le plus souvent l'aboutissement de longs tâtonnements qui procèdent pour la plupart du plus grand empirisme. L'étude hydrogéologique détaillée des sites d'injection et du cadre hydrogéologique dans lequel se place une alimentation artificielle de nappe permet dans les deux domaines, théorique et pratique, de gagner un temps considérable (Israël).

---

La diffusion de ce rapport est assurée par le  
Département d'hydrogéologie  
du B.R.G.M.

Direction du Service Géologique et des Laboratoires  
B.P. 818 ORLEANS - La Source -45-

L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE  
DES NAPPES SOUTERRAINES

- INTRODUCTION

- CHAPITRE I      L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE ET LE PROBLEME DE L'EAU .  
CRITERES D'UTILISATION

- CHAPITRE II      DESCRIPTION DE QUELQUES REALISATIONS

- Barcelone (Espagne)
- Leyde (Hollande)
- Croissy (France)
- Israël
- Manhattan Beach (Californie)
- Karlskoga (Suède)
- Donzère-Mondragon (France)

- CHAPITRE III      CONDITIONS HYDROLOGIQUES, HYDROGEOLOGIQUES ET HYDRO-  
DYNAMIQUES DE L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE

1. - CONDITIONS HYDROLOGIQUES
2. - CONDITIONS HYDROGEOLOGIQUES
3. - CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

- CHAPITRE IV      LES DISPOSITIFS D'INJECTION

1. - LES DISPOSITIFS DE SURFACE N'ATTEIGNANT PAS OU NE PENE-  
TRANT PAS LA NAPPE

1.1. Les bassins

- 1.1.1. Description
- 1.1.2. Débit d'infiltration
- 1.1.3. Les lois de l'écoulement
- 1.1.4. Infiltration et épuration

1.2. Les autres dispositifs de surface

2. - LES DISPOSITIFS PROFONDS, PONCTUELS, PENETRANT DANS  
LA NAPPE ; FORAGES ET PUIITS

- 2.1. Débit d'injection. Colmatage
- 2.2. Décolmatage par pompage
- 2.3. Types de puits ou de forages spéciaux
  - Arkansas
  - Durance
  - Barcelone

3. - LES "DRAINS" D'INJECTION

- CHAPITRE V

LE COLMATAGE DES OUVRAGES ET LE PRETRAITEMENT DE L'EAU

1. - LE COLMATAGE

1.1. Le colmatage des bassins

1.1.1. Origines

1.1.2. Un exemple de colmatage

1.1.3. Moyens de lutte

1.2. Le colmatage des forages

1.2.1. Origines

1.2.2. Exemples de colmatage

-Donzère-Mondragon

-Israël

-Grand - Prairie (Arkansas)

1.2.3. Mécanismes du colmatage

1.2.4. Moyens de lutte

2. - LE PRETRAITEMENT

2.1. Cas des bassins

2.2. Cas des forages

- CONCLUSIONS

- ANNEXES

ANNEXE I

FICHES DE REALISATIONS TYPIQUES

ANNEXE II

ESSAI DE CLARIFICATION TERMINOLOGIQUE

ANNEXE III

BIBLIOGRAPHIE

## INTRODUCTION

Le Comité d'action concertée "EAU" de la Délégation à la recherche scientifique et technique (D.G.R.S.T) a décidé en 1965 de consacrer l'une de ses "actions" au problème de l'alimentation artificielle des nappes. Cette étude a été confiée, au début de 1966, par contrat d'une durée de trois ans, au BURGEAP (Bureau d'études de géologie appliquée et d'hydrologie souterraine) et au B.R.G.M. (Bureau de recherches géologiques et minières) agissant conjointement. Les responsables scientifiques de l'opération sont : J. ARCHAMBAULT et J. MARGAT.

En raison de l'importance de cette question, il nous a semblé qu'un exposé sommaire des données générales recueillies au cours de la première phase de cette étude était de nature à intéresser un certain nombre de services et d'organismes chargés d'études et d'interventions dans le domaine de l'eau.

Nous remercions vivement M. ESCANDE, Président du Comité Eau de la D.G.R.S.T., d'avoir bien voulu autoriser la diffusion du présent rapport.

Le premier obstacle auquel nous nous sommes heurtés a été celui de la terminologie. Comme toutes les sciences jeunes, l'hydrogéologie a un vocabulaire souvent imprécis et fluctuant. Dans le cas de l'alimentation artificielle, les termes employés sont particulièrement mal définis, voire saugrenus, comme la dénomination de "raveinement" que certains auteurs emploient parfois.

Par "alimentation artificielle" nous désignerons le processus consistant à introduire volontairement dans une formation perméable souterraine une certaine quantité d'eau, au moyen d'un dispositif quelconque (bassin, canal, puits, forage, etc...)

Le terme de "réalimentation", souvent utilisé, doit, à notre sens, être réservé pour désigner le processus par lequel une alimentation supplémentaire tend à compenser un déséquilibre généralement créé par l'intervention de l'homme (par exemple : pompages intensifs dans les plaines alluviales entraînant dans la nappe un afflux d'eau de la rivière contigüe, etc...)

Pour plus de précisions, on trouvera en annexe une note indiquant les termes relatifs à l'alimentation artificielle que nous jugeons devoir être conservés et le sens dans lequel ils devraient être utilisés.

Il ne saurait être question, au stade actuel de notre étude et dans le cadre de ce rapport, de tenter fut-ce l'ébauche d'un "traité" d'alimentation artificielle. Notre propos est d'ouvrir le dossier que nous avons constitué et d'essayer d'en dégager les lignes directrices à l'usage des hydrogéologues, comme de tous ceux qui, s'intéressant aux eaux souterraines, ont quelques connaissances de base en ce domaine, et en essayant de clarifier au maximum un sujet dont beaucoup parlent, sans saisir bien souvent ni les limites, ni les difficultés particulières de cette forme d'action sur l'eau souterraine.

En fait, c'est essentiellement sous l'angle de l'hydrogéologie que la question de l'alimentation artificielle sera abordée ici : certains de ses aspects, pourtant importants, par exemple les données économiques (prix de revient de l'injection, prix de vente de l'eau, rentabilité finale de l'opération) ne seront pas traités.

Ce n'est pas par hasard que la D.G.R.S.T. a confié cette étude à des spécialistes de l'eau souterraine : c'est bien en effet en fonction des caractéristiques du gisement aquifère dans lequel le stockage souterrain est réalisé que doit logiquement, être abordée une telle étude, ce sont d'elles que tout dépend au départ.

Ce qui n'empêche pas du reste que la quasi-totalité des opérations d'alimentation artificielle aient été conçues et réalisées par des gens plus ou moins étrangers à cette discipline, et paraissent le plus souvent le fruit du simple empirisme. Ceci explique que la plupart des publications relatives à l'alimentation artificielle ne donnent que des renseignements très sommaires sur le gisement souterrain dans lequel l'eau est stockée.

Nous situerons d'abord dans le présent article (Chapitre I) l'alimentation artificielle dans le cadre du problème général de l'eau, tel qu'il se pose à l'heure actuelle, et indiquerons les objectifs qu'il paraît possible de lui assigner. Pour rendre plus concret la suite de notre exposé, le chapitre II sera consacré à la description sommaire de quelques réalisations particulièrement importantes ou typiques. Nous essaierons ensuite de dégager, dans le chapitre III, les données hydrogéologiques et hydrodynamiques qui conditionnent l'alimentation artificielle, le chapitre IV traitant des différentes techniques d'injection et le chapitre V des difficultés principales que rencontre leur mise en oeuvre.

En annexe ont été rassemblés : des fiches de réalisations typiques, un essai de terminologie, et une bibliographie sélective.

## CHAPITRE I

### L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE ET LE PROBLEME DE L'EAU

#### CRITERES D'UTILISATION

L'importance vitale du problème de l'eau dans le monde entier, son acuité (1) et son urgence dans les pays tempérés eux-mêmes, sont désormais connus de nombreuses personnes, et non plus seulement de quelques initiés.

Lorsque l'on compare les ressources en eau offertes par les nappes souterraines et celles que constituent les cours d'eau de surface (fussent-ils temporaires, comme c'est le cas en pays aride), deux constatations essentielles viennent à l'esprit :

a) les débits d'écoulement (2) sont en général sans commune mesure un débit souterrain, relativement localisé, de l'ordre du mètre-cube/seconde est en France assez exceptionnel ; le débit moyen des grands fleuves français et de leurs principaux affluents dépasse par contre souvent, et de beaucoup, 1 00 m<sup>3</sup>/sec.

b) en saison pluvieuse, d'énormes quantités d'eau sont véhiculées par les fleuves et déversées dans la mer sans aucun profit pour personne. Le débit de la Loire à Gien, en extrême étiage, dépasse à peine 10 m<sup>3</sup>/sec. En très forte crue, il est de près de 10 000 m<sup>3</sup>/sec., soit mille fois plus.

Or certaines formations perméables du sous-sol constituent parfois un réservoir de capacité considérable, réservoir libre en permanence (terrains perméables non saturés) ou temporaire (étiage des nappes en saison sèche, nappes libres ou captives rabattues par une exploitation intensive).

Les responsables de la "gestion" des ressources en eau du territoire sont donc conduits à s'interroger sur les possibilités d'emmagasiner dans le sous-sol une partie de l'eau excédentaire des fleuves ou rivières, pour la réutiliser

---

(1) Cf. "L'EAU", ouvrage publié au printemps 1967 par I. CHERET aux Editions du Seuil.

(2) Les débits et non les volumes d'eau "statique" ; dans le cas de certaines nappes souterraines épaisses et très étendues, ces derniers peuvent être très considérables.

ultérieurement en période de pointe de consommation, les terrains non saturés jouant un rôle régulateur analogue, (toutes proportions gardées), à celui de l'accumulation par un barrage implanté sur un cours d'eau.

1) C'est donc sur le plan de la régularisation des ressources en eau que l'alimentation artificielle paraît à première vue séduisante, et c'est la justification initiale de l'étude que la D.G.R.S.T. a pris l'initiative de faire exécuter, tout en présentant bien au départ que stocker de l'eau dans le sous-sol n'est pas aussi simple que barrer une rivière.

L'alimentation artificielle peut d'ailleurs avoir d'autres objectifs, parfois assortis d'avantages évidents :

2) On sait que la pollution croissante des cours d'eau est un des aspects essentiels, le plus grave dans l'immédiat, du problème de l'eau.

En fait, l'utilisation pour l'alimentation humaine des eaux de surface, même lorsqu'elles sont extrêmement polluées, reste possible en règle générale, grâce aux progrès réalisés dans la technique de l'épuration des eaux ; on ne saurait pour autant conclure que l'opération soit, dans tous les cas, éminemment recommandable, et il est de fait qu'elle n'est pas recommandée par les organismes qui ont à statuer en la matière.

Or le cheminement de l'eau dans le sous-sol, surtout lorsqu'il s'agit de terrains à perméabilité d'interstices (sables, graviers), se traduit, en raison de l'extrême lenteur du trajet et à la faveur de processus plus ou moins bien connus, par une épuration bactériologique très efficace.

L'épuration chimique, c'est-à-dire la disparition des substances nocives dissoutes, est plus aléatoire. Mais les échanges d'ions dans le sol d'une part, la dégradation des produits peu stables (en raison même de la lenteur du cheminement) d'autre part, peuvent dans certains cas amener une amélioration de

la qualité de l'eau injectée. On peut penser qu'un long trajet souterrain n'est pas sans effet sur quelques uns au moins de ces produits de synthèse (détergents, herbicides, insecticides, etc...) de plus en plus employés, dont l'inocuité pour l'organisme humain est bien loin d'être démontrée et sur lesquels l'épuration habituelle des eaux de rivière n'agit pratiquement pas.

D'une manière plus générale, disons que l'alimentation artificielle permet de réaliser une épuration naturelle des eaux, épuration bien plus efficace que la filtration artificielle, qu'il s'agisse de la filtration dite "lente", ou, à fortiori, de la filtration dite "rapide", de plus en plus employée parce qu'elle permet, notamment, de réduire beaucoup la superficie des installations d'épuration.

3) L'alimentation artificielle peut avoir pour objet de reconstituer des nappes déprimées, soit par certains grands travaux (canaux de fuite d'usines hydroélectriques, Donzère-Mondragon, par exemple, etc...), soit par une exploitation intensive (nappes très fortement déprimées, pompages en bordure du littoral, d'estuaires, ou de lagunes ayant provoqué un envahissement d'eau salée ou saumâtre : on peut artificiellement créer, par injection, une véritable barrière hydraulique, etc...)

4) La remise en pression d'une nappe captive, en vue de restaurer les niveaux piézométriques fortement déprimés par l'exploitation (nappe des "sables verts" du Bassin de Paris, par exemple), est une variante du cas précédent : l'effet piézométrique, et non l'effet volumétrique, étant ici seul recherché.

5) L'alimentation artificielle peut permettre dans certains cas particuliers, le transfert de l'élévation de niveau ou le transport de l'eau soit qu'il s'agisse (paragraphe 4 ci-dessus) de remettre en pression une nappe captive, et de rendre ainsi réalisable, à une distance plus ou moins grande du point d'injection un prélèvement déterminé, soit qu'il y ait effectivement transport, par cheminement plus ou moins rapide de l'eau (transmissivité et pente hydraulique élevées) d'une zone à l'autre de la structure aquifère.

6) Le stockage souterrain peut être employé à des fins de régulation thermique : l'eau du sous-sol a une température pratiquement constante, alors que celle des rivières varie parfois beaucoup avec les saisons.

7) Le stockage souterrain de résidus consiste à injecter dans des structures profondes fermées (anticlinaux, dômes de sel après création d'une cavité par dissolution, etc...), et de l'étanchéité desquelles on s'est assuré, de l'eau chargée de substances nocives et dont l'évacuation en surface pose des problèmes ardu : substances toxiques, eaux très fortement polluées, effluents radioactifs, etc... Cette opération n'est pas, à proprement parler une alimentation artificielle, puisqu'il s'agit de liquides très différents des eaux de nappe et non réutilisables. Mais à quelques points particuliers près, elle est extrêmement comparable, et elle met en oeuvre les mêmes techniques de base.

On pourrait ajouter que, dès l'antiquité, et sans doute sans le savoir, comme M. JOURDAIN faisait de la prose, les responsables de certains aménagements agricoles pratiquaient l'alimentation artificielle. En Tunisie par exemple, au temps de l'occupation romaine (les photographies aériennes le prouvent), des superficies considérables étaient couvertes de terrasses, maintenant délabrées et presque partout masquées par le maquis ou la forêt. Les eaux de ruissellement, au lieu d'éroder et de détruire les terres arables, étaient judicieusement utilisées pour la culture, et de ce fait s'infiltraient en proportion importante. On a découvert des canalisations romaines, avec niveau d'eau attesté par l'entartrement des parois, au pied de collines où ne subsiste plus actuellement le moindre suintement : n'étant plus alimentée par l'épandage des crues, la nappe est tarie.

## CHAPITRE II

### DESCRIPTION DE QUELQUES REALISATIONS .

#### BARCELONE (Espagne)

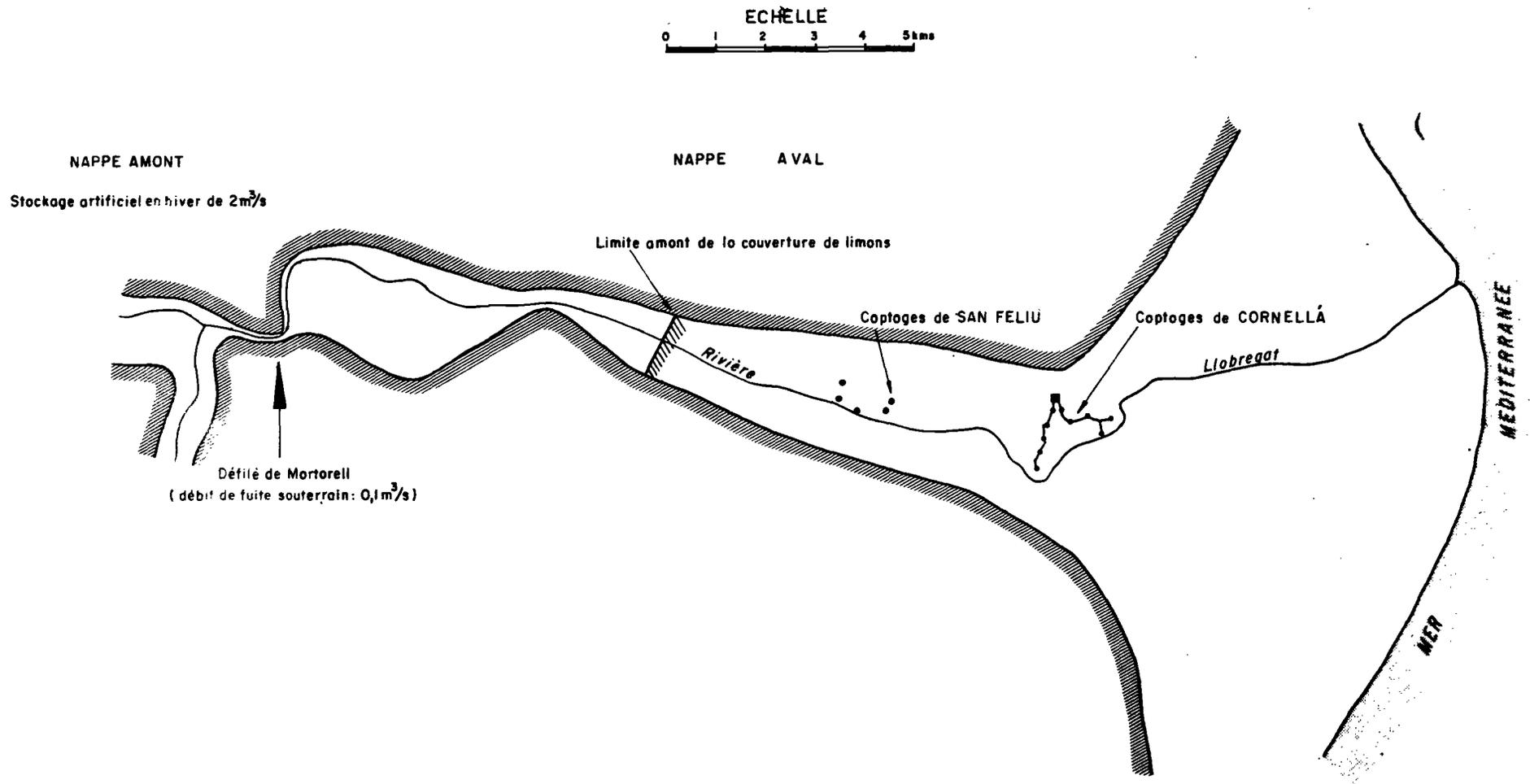
Les besoins en eau de cette agglomération très importante sont couverts par le rio Llobregat (52) , dont le bassin versant, d'une superficie de 4 000 km<sup>2</sup> environ, s'étend sur une partie des Pyrénées et est de ce fait abondamment alimenté.

La basse vallée du Llobregat, à 25 km de l'embouchure, est divisée en deux tronçons distincts par le défilé de Martorell (figure 1), où la largeur de la plaine alluviale n'est que de 200 mètres. Les alluvions formées de cailloutis très perméables, sont, à l'aval de Martorell, recouvertes par une couche de limon sur presque toute leur superficie. Dans cette même zone, leur épaisseur est de 15 à 30 mètres et s'accroît sans doute notablement à proximité immédiate de la mer.

Chargée de l'alimentation en eau de l'agglomération, la "Sociedad General de Aguas de Barcelona" a commencé par exploiter la nappe alluviale à l'aval de Martorell. Les ressources correspondantes s'avérant insuffisantes, une usine traitant l'eau du Llobregat a été mise en service en 1955. La capacité initiale de l'usine était de 3,3 m<sup>3</sup>/s (chiffre sans doute fixé d'après le débit de la rivière en étiage, débit d'ailleurs soutenu par un barrage de régularisation sur un affluent du Llobregat). Lors de l'été exceptionnellement sec de 1958, des niveaux piézométriques extrêmement affaissés ont été enregistrés à l'aval de Martorell. Par contre les cotes de la nappe se sont maintenues pratiquement inchangées à l'amont du défilé.

Faisant suite à ces observations, des études très détaillées ont montré que le tronçon amont constitue un réservoir aux propriétés exceptionnelles. On a constaté en outre que le débit souterrain traversant le défilé ne dépassait jamais 0,1 m<sup>3</sup>/s. D'autre part, les échanges entre la nappe et la rivière

Fig.1- Schéma de la basse vallée du Llobregat (Barcelone)



paraissent négligeables (probablement à cause de l'épaisseur des limons superficiels).

Depuis 1959 un débit de 2 m<sup>3</sup>/s est injecté en hiver dans la nappe amont au moyen de 3 puits à drains rayonnants. Le volume total injecté (dont la valeur exacte n'est pas précisée) est repris en été, au moyen des mêmes puits semble-t-il. Il est rejeté dans le Llobregat -qui sert ainsi de conduite- jusqu'à la station de traitement dont la capacité a été portée de 3,3 à 5,3 m<sup>3</sup>/s.

#### LEYDE (Pays-Bas)

La nappe des dunes de Leyde, est essentiellement alimentée par les pluies d'hiver. En été la demande d'eau croit au moment même où la nappe a naturellement tendance à s'affaisser par écoulement au pied des dunes (73)

L'opération d'alimentation artificielle a pour but d'augmenter les ressources disponibles en saison sèche. Elle consiste à récupérer les eaux de drainage naturel dans des fossés aménagés spécialement à cet effet au pied des dunes et à les réinjecter au sommet par l'intermédiaire de bassins ou de puits peu profonds.

La distance entre les ouvrages d'injection et les forages de reprise est déterminée de façon à laisser séjourner l'eau infiltrée un certain temps dans le terrain (environ 2 mois) sans que les "fuites" vers les exutoires naturels soient considérables. Une partie de l'eau consommée en été a donc presque accompli deux cycles souterrains. L'injection s'étend sur 4 mois, les volumes mis en jeu s'élèvent environ à un million de m<sup>3</sup>.

#### CROISSY (France, Yvelines)

A Croissy, dans la vallée de la Seine, à l'aval de Paris (11 km de la porte de St Cloud à vol d'oiseau, 35 km par la vallée de la Seine), des captages à gros débit exploitent une série aquifère constituée par la nappe de la craie, surmontée par la nappe des alluvions modernes, cette dernière

en liaison hydraulique avec le fleuve (45) (46).

Lors des étiages accentués, l'eau de la Seine est dans ce secteur composée pour moitié d'eau d'égoût brute. Son utilisation directe pour l'alimentation humaine pose de ce fait des problèmes ardu, d'autant que des rejets industriels nombreux et plus ou moins nocifs se mêlent aux effluents urbains. L'accroissement du débit exploité, en provoquant l'infiltration massive d'eau de Seine, a eu pour résultat qu'à certaines périodes l'eau s'est révélée de très mauvaise qualité (goût accentué).

Une crue du fleuve ayant inopinément provoqué l'inondation d'une ancienne sablière, on a immédiatement enregistré, en même temps qu'une remontée appréciable du niveau de la nappe, une nette amélioration de la qualité de l'eau. Les conséquences de ce phénomène purement accidentel ont amené l'exploitant des captages (Société Lyonnaise des Eaux), à réaliser, à partir de 1959, l'alimentation artificielle de la nappe.

L'eau utilisée à cet effet est pompée en Seine, tant que la pollution ne dépasse pas un certain seuil (seuil atteint ou dépassé en général de Juillet à Septembre), puis elle est traitée de manière à être rendue parfaitement limpide. Elle est ensuite déversée dans des bassins creusés dans les alluvions, et ses qualités continuent de s'améliorer considérablement dans ces bassins par les seuls processus d'autoépuration. La filtration lente à travers les terrains affine l'épuration et c'est une eau d'excellente qualité qui parvient maintenant aux forages, dont le niveau dynamique, qui ne cessait de s'affaisser, est par ailleurs redevenu parfaitement acceptable.

Au cours de l'année 1965, plus de 11 millions de m<sup>3</sup> d'eau de Seine ont été injectés dans la nappe de Croissy. Il est prévu de porter par la suite ce volume à 20 millions de m<sup>3</sup> par an.

Plusieurs aspects de l'alimentation artificielle sont en jeu à Croissy :

- reconstitution de réserves
- régularisation et augmentation des ressources disponibles par une utilisation combinée des eaux superficielles et souterraines

- conservation de la qualité des eaux souterraines
- régularisation thermique.

## ISRAEL

Les ressources en eaux souterraines d'Israël proviennent en quasi totalité de deux importantes formations aquifères : les grès et sables plio-pléistocènes de la plaine côtière et les dolomies et calcaires karstiques du Cénomanién-Turonien.

Une des principales disponibilités en eau superficielle, le lac de Tibériade, alimenté par le haut Jourdain, bien que quelque peu excentré par rapport au territoire, est par l'importance et la régularité de ses ressources (7 m<sup>3</sup>/s) d'un intérêt national. Mais l'amenée de l'eau vers les régions sèches du Sud pose un difficile problème.

Pour cette adduction à grande distance d'un débit dont les pointes sont accusées (la demande est considérable en période d'irrigation), l'organisme d'ingénieurs-conseils TAHAL a imaginé un système (l'Israël National Water Carrier) qui comporte à la fois des conduites et des réservoirs dont certains sont souterrains.

Dans ce système, le Cénomanién-Turonien, qui affleure sur de grandes superficies et occupe une position médiane, joue et doit jouer plus encore à l'avenir, un rôle de relais. On conçoit que le stockage en terrains karstiques d'eaux injectées l'hiver et reprises l'été de la même année, sinon même de l'année suivante, nécessitait une connaissance très poussée de la formation : le Cénomanién-Turonien d'Israël a été l'objet, avant de réaliser son alimentation artificielle, d'études hydrogéologiques préliminaires qu'on peut citer en exemple. La fiche 1 de l'annexe I résume trois articles (34), (35), (55) traitant cette question.

L'alimentation artificielle en Israël (pratiquée depuis 1956, mais surtout développée depuis 1962) ne se résume pas à la réalisation de stockages d'attente. L'article sur la plaine côtière (1) illustre la variété des objectifs poursuivis et des techniques d'injection utilisées.

MANHATTAN BEACH (U.S.A., Californie)

Une nappe côtière, épaisse de plusieurs dizaines de mètres, a pour gisement des graviers sableux recouverts par une couche d'argile qui la maintient captive (voir fiche 2 en annexe I).

Sous l'effet d'une exploitation intensive, le niveau de la nappe a été rabattu au-dessous du niveau de la mer, avec en certains endroits une dénivelée de plus de 15 mètres. Comme il était prévisible, l'eau de mer a envahi la nappe et s'est substituée à l'eau douce sur 600 m à partir du rivage. Au delà l'eau salée a progressé de 450 m en formant un biseau.

En 1953 le "Los Angeles County Flood Control District" a pris des mesures afin de repousser l'invasion saline. A titre expérimental 8 premiers puits d'injection ont été mis en place à 600 m de la côte. L'eau servant à l'injection est pompée dans la rivière Colorado et subit un traitement partiel.

Des essais préliminaires, sur un puits, avaient paru démontrer qu'un espacement de 150 m au maximum entre les puits permettait de réaliser une barrière d'eau douce continue. En fait, on a constaté que les "bulbes" d'eau douce de chaque puits se rejoignaient à leur sommet mais restaient toujours séparés à la base de la couche aquifère, ménageant des "chenaux" salins par lesquels l'eau de mer continuait à migrer vers l'intérieur des terres. L'importance du phénomène était accrue du fait d'irrégularités, imprévues, du substratum.

Cette réalisation fait l'objet d'une étude dans "Advance in Hydroscience" (65) dont la conclusion est que le procédé ne peut être parfaitement efficace qu'à la condition de connaître parfaitement le contexte hydrogéologique et de prendre de forts coefficients de sécurité.

KARLSKOGA (Suède)

Karlskoga (fiche 3 en annexe I) est l'une des trente installations d'alimentation artificielle dont la Suède s'est pourvue depuis 1897(38).

Les ressources en eau souterraines du pays sont extrêmement limitées et on est amené à faire largement appel aux eaux de surface. Pour des raisons économiques et dans le but essentiel de régularisation thermique des eaux superficielles, la filtration naturelle au travers d'alluvions fluvio-glaciaires de l'eau des rivières ou des lacs est préférée à leur traitement direct. Après un traitement qui consiste généralement en une filtration rapide, l'eau est amenée dans des bassins d'infiltration dont le fond est toujours situé très haut au-dessus du niveau de la nappe (5 à 6 mètres en moyenne, 25 m au maximum). De cette façon l'eau percole à travers un grand volume de terrain non saturé où les matières organiques s'oxydent. Lorsque la teneur en matières organiques devient trop forte, on utilise l'infiltration intermittente pour permettre au terrain de se recharger en air et d'avoir ainsi une efficacité accrue (le mécanisme de l'épuration des eaux dans lesquelles au cours de la filtration a d'ailleurs fait l'objet d'études très fouillées (39).)

Après un trajet souterrain de quelques centaines de mètres, l'eau est récupérée par pompage (avec un appoint d'eau de nappe dans une proportion de 5 à 10 %) et distribuée, dans la majorité des cas, sans aucun autre traitement.

#### DONZERE-MONDRAGON (France)

L'aménagement de DONZERE-MONDRAGON, le premier et l'un des plus importants maillons de l'équipement total du Rhône, à l'aval de Lyon, a dû être réalisé de toute urgence par la Compagnie Nationale du Rhône au lendemain de la deuxième guerre mondiale, à une époque où la pénurie d'énergie était cruciale. Il n'a de ce fait été précédé que d'études rapides et sommaires.

Le canal de fuite de cet aménagement entaille les alluvions du Rhône jusqu'à leur substratum imperméable, sur 6,5 kilomètres de longueur (30). La plaine alluviale est recouverte par une couche continue de limons très peu perméables sous lesquels la nappe des graviers sous-jacents se trouvait en charge à l'origine. Par suite de l'ascension capillaire, la teneur en eau

des limons se maintenait à un taux élevé, et jouait de ce fait un rôle agricole non négligeable.

L'exécution du canal de fuite eut pour effet de provoquer un rabattement considérable des niveaux piézométriques de la nappe, sans parler d'autres conséquences facheuses : assèchement des terrains de culture, tarissement des puits domestiques, etc...

Pour pallier ces inconvénients et afin de "recoller" la nappe aux limons, la C.N.R a été amenée à réinjecter de l'eau du Rhône dans la nappe alluviale au moyen de forages d'injection répartis tout au long du canal de fuite (voir fiche 4 de l'Annexe I).

### CHAPITRE III

#### CONDITIONS HYDROLOGIQUES, HYDROGEOLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES DE L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE .

Nous avons souligné ci-dessus l'absence, très fréquente sinon quasi générale, de références hydrogéologiques et hydrologiques dans les publications traitant de l'alimentation artificielle.

C'est bien pourtant à partir des caractéristiques de l'eau de surface à injecter d'une part, de celles du réservoir souterrain d'autre part, qu'on peut déterminer si l'alimentation artificielle est susceptible d'obtenir l'un ou l'autre des résultats énumérés au chapitre 1er. Le principe de telles discriminations est à la vérité souvent fort complexe, car les interférences sont nombreuses et variées entre les différents facteurs hydrologiques et hydrogéologiques à prendre en considération.

Notre propos est de nous en tenir ici aux points essentiels, dans le but, nous l'avons souligné déjà, d'orienter ceux que les perspectives offertes par l'alimentation artificielle peuvent, à un titre ou à un autre, intéresser.

#### 1. - CONDITIONS HYDROLOGIQUES

1.1. On ne peut, de toute évidence, injecter de l'eau dans le sous-sol que si on dispose des ressources, et donc d'abord des débits, nécessaires.

Même dans les pays dotés, comme la France, d'un réseau hydrographique dense et assez uniformément réparti, ce n'est pas partout le cas ; en particulier quand le substratum est formé de calcaires, karstiques ou non (Causses, ceinture jurassique du bassin de Paris, craie, etc...)

Si on n'a pas à proximité l'eau nécessaire on peut, bien sûr, la transporter par des conduites. Mais l'opération peut dès lors perdre tout intérêt économique. Sans parler du fait que dans les zones à forte densité urbaine et industrielle (dont les nappes, souvent surexploitées, sont précisément de celles qu'on serait tenté de restaurer en priorité grâce à l'alimentation artificielle), de telles adductions sont de plus en plus difficilement réalisables.

1.2. Cette eau doit être de qualité acceptable.

Il est souhaitable qu'elle soit, sinon pure, du moins peu polluée, (et en tous cas exempte de substances toxiques), si on doit l'utiliser ultérieurement pour l'alimentation humaine.

Mais il faut, aussi et d'abord, qu'elle ne contienne que très peu ou pas du tout de matières en suspension lorsqu'on se propose de l'injecter brute, sauf, dans une certaine mesure, en cas d'injection dans des milieux à très forte perméabilité comme les karsts. Lors des essais d'alimentation artificielle exécutée par E. D. F. dans la plaine de la Durance, l'eau de la rivière n'était injectée dans les puits qu'à certaines périodes de débit stabilisé, et les expériences étaient interrompues assez fréquemment, les crues même minimales entraînant l'apparition d'un débit solide notable, d'où risque de colmatage.

D'une manière générale, les eaux de fonte des neiges, celles des massifs calcaires et des terrains cristallins, et en fait la plupart des eaux de surface en période d'étiage présentent souvent les qualités requises. Mais, surtout si le bassin versant comporte des terrains argileux, la moindre crue peut rendre l'eau inutilisable à l'état brut. Or c'est précisément l'eau des fortes ou moyennes crues qu'il serait intéressant d'utiliser, en raison des volumes importants qu'elle représente et parce que cette eau est la plupart du temps inutilisée.

1.3. Reste la possibilité de traiter l'eau avant son injection soit totalement, soit en se bornant à un traitement sommaire (floculation suivie d'une infiltration rapide). Dans l'état actuel des techniques d'épuration, il n'est guère d'eau, fut-ce l'eau brute d'égoût, qui ne puisse être rendue parfaitement potable (sauf le cas de certains déversements industriels nocifs). Mais les sujétions économiques risquent fort d'abaisser beaucoup l'intérêt de l'opération. Tout au plus pourra-t-on, pour des raisons d'hygiène, et parce que son coût est plus élevé, épurer l'eau destinée à la consommation humaine (Croissy), mais non celle d'une nappe destinée à l'irrigation ou à l'industrie.

## 2. - CONDITIONS HYDROGEOLOGIQUES

Les caractéristiques à prendre en compte concernant le réservoir souterrain à alimenter sont un peu plus complexes que les conditions relatives aux eaux de surface à injecter. C'est ce qui explique que certains non-spécialistes aient parfois, concernant les possibilités d'alimentation artificielle des nappes, des idées un peu trop simplistes, ou exagérément optimistes.

### 2.1. Notons d'abord la relative rareté des formations non saturés.

2.1.1. Les pays tempérés comportent en général peu de réservoirs perméables non saturés disponibles : la répartition assez régulière des pluies au cours de l'année, la faible valeur moyenne de l'évapotranspiration ont pour résultat que la saturation des formations du sous-sol susceptibles d'emmagasiner de l'eau s'effectue aisément, autrement dit que dans beaucoup de régions la profondeur des surfaces des nappes est relativement faible (elle excède rarement plusieurs dizaines de mètres).

De fait, les terrains à perméabilité d'interstices et à circulation lente (sables, graviers, grès, etc...) permettent rarement le stockage souterrain de volumes d'eau

supplémentaires importants. Il n'en est pas de même, par contre, de beaucoup de plateaux et massifs calcaires, (nous le verrons plus loin) où l'on se heurte à des difficultés particulières.

L'exemple des nappes des plaines alluviales "vives", (c'est-à-dire en liaison hydraulique avec le cours d'eau) des grands fleuves français doit, notamment, être souligné. On constate en effet que leur niveau piézométrique reste le plus souvent assez ou très proche du sol, à l'exception du secteur voisin de la rivière, où la nappe se trouve rabattue aux périodes d'étiage du cours d'eau. Mais le volume des vides libérés par ce rabattement est en réalité fort peu important. D'autre part cet abaissement se produit à une saison où on ne dispose pas de débit utilisable. De surcroît, l'eau qu'on pourrait injecter dans les alluvions serait rapidement drainée par le fleuve tout proche et ne pourrait donc être durablement stockée.

2.1.2. En zone aride par contre, les horizons non saturés sont nombreux, souvent très épais, et constituent de ce fait des réservoirs de grande capacité. Nous pourrions en citer beaucoup, à la bordure Sud du Sahara par exemple.

D'autres réservoirs, en pays aride ou sub-aride, proviennent de la surexploitation des nappes dans les régions d'irrigation intensive (Sud de l'Espagne, Grèce), surexploitation qui s'est traduite par la mise hors d'eau de formations étendues et puissantes.

Malheureusement, on dispose rarement dans ces régions d'eaux de surface utilisables pour l'alimentation artificielle. Quand elles existent, il s'agit bien souvent de crues rarissimes, soudaines et très violentes, et par là même difficiles à utiliser;

et qui charrient d'ailleurs un débit solide important, d'où des risques de colmatage généralement insurmontables.

Pour en revenir aux régions tempérées comme la France, il convient de souligner les possibilités de certaines formations alluviales anciennes, déposées à une période plus ou moins reculée du Quaternaire (ou au Tertiaire récent) par des fleuves ou rivières qui ont par la suite emprunté un autre lit. La plaine de la Crau par exemple. Ou, mieux encore, entre Romans et Valence, des alluvions de l'ancienne Isère, qui se jetait jadis dans le Rhône au droit de Valence : elle comporte une tranche d'alluvions sèche, épaisse, étendue et très perméable. Mais les réservoirs souterrains d'une importance comparable sont fort peu nombreux.

Il faudrait aussi parler des nappes des secteurs fortement urbanisés ou industrialisés. Leur exploitation intensive se traduit souvent par une dépression accentuée et étendue (nappe de la Craie du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, ou de la basse vallée de la Seine par exemple) : les nappes surexploitées ouvrent des perspectives très larges, car le nombre comme l'importance de ces surexploitations s'accroissent sans cesse.

Mais ce déséquilibre se trouve parfois (1) corrigé ou atténué sans que l'homme ait à intervenir. Ainsi de "l'entonnoir" que les industries installées à l'aval immédiat de Rouen ont creusé dans la nappe de la craie, et dont la profondeur atteint ou dépasse par endroits la cote -15 NGF. Le pompage continu par les forages de ce secteur d'un débit global de plusieurs mètres cube/seconde a pour corollaire l'infiltration d'un débit de même ordre d'eau de Seine, réalimentant la nappe sous l'influence de la dépression ainsi créée. L'exploitation massive de la nappe de la craie a

---

(1) le cas mis à part des nappes captives, dont nous avons parlé par ailleurs.

provoqué la mise en service d'une station naturelle (et donc gratuite) d'épuration, qui filtre l'eau, l'épure et régularise sa température. Le traitement artificiel de ce même débit serait sans doute moins parfait, sans effet thermique, et, surtout, extrêmement onéreux.

- 2.2. La "transmissivité" ( $H \times K$ ) de la formation souterraine à alimenter doit être favorable : épaisseur ( $H$ ) importante, coefficient de perméabilité DARCY ( $K$ ) élevé. Si la couche aquifère est mince, le réservoir, même étendu, se révélera inutilisable. Si la perméabilité est trop faible (couches poreuses peu perméables : craie non fissurée par exemple) l'opération nécessitera un dispositif d'injection trop important pour s'avérer rentable.
- 2.3. L'alimentation artificielle nécessite enfin, pour être efficace, que l'augmentation de réserve de la nappe qu'elle détermine soit conservée pendant un laps de temps suffisant, compatible avec le délai désiré de reprise d'eau.

Il est essentiel de bien comprendre, à ce sujet, que le maintien de l'élévation de niveau ou de pression de la nappe importe plus que la conservation de la masse d'eau injectée elle-même : celle-ci pourrait séjourner dans le terrain assez longtemps, alors que son introduction aurait cependant provoqué une "onde" se propageant rapidement jusqu'aux limites d'émergence de la nappe, déterminant un accroissement du débit sortant à ces limites en ce cas l'effet de l'alimentation artificielle ne serait pas atteint.

Il ne suffit donc pas de considérer la vitesse moyenne de cheminement de l'eau, fonction dans les roches à perméabilité d'interstices de la perméabilité (horizontale)  $K$  et de la pente hydraulique  $i$  ( $V = Ki$ ). Ces vitesses sont en effet assez faibles dans

la plupart des nappes de sables ou de graviers alluvionnaires en France (pour des  $K$  de l'ordre de  $10^{-3}$  m/s, et des pentes de 0,5 à 2 p.1000 le plus souvent) : elles sont en général comprises entre 0,5 et 2 m/jours.

En fait, il faut tenir compte aussi de l'emmagasinement de la roche aquifère ( $S$ ) qui commande, avec la transmissivité, la propagation des différences de pression dans une nappe. Si le rapport de la transmissivité sur l'emmagasinement ( $T/S$ , c'est-à-dire la "diffusivité"), est grand, l'effet d'une recharge sur le débit des écoulements aux émergences peut être trop rapide.

Pour qu'un réservoir ne se "vide pas à mesure" qu'on le remplirait, il faut des conditions favorables qui dépendent non seulement des caractéristiques de la roche aquifère, mais aussi de l'étendue de la nappe (qui permet de choisir des points d'injection assez loin des limites lorsqu'on veut provoquer un effet durable), et enfin de la nature de ces limites, de leurs conditions hydrauliques. Cette notion de "conditions aux limites" est fondamentale dans tous les cas d'alimentation artificielle, autant que lorsqu'il s'agit de captages d'eau souterraine.

En terrain calcaire karstifié, les conditions sont évidemment particulières. Dans les massifs très accidentés, c'est la forte dénivelée jointe à la forte diffusivité qui provoque l'évacuation, rapide ou même quasi-immédiate, des eaux d'infiltration. Mais en plaine, ou sous les grands plateaux, la pente hydraulique des réseaux aquifères karstiques peut être très faible ou presque nulle. Pourtant lorsque le karst est très développé, avec des chenaux largement ouverts, la vidange peut ici encore être très rapide surtout en raison de la forte diffusivité du milieu aquifère. C'est donc dans le cas de massifs calcaires de très grande dimension qu'un stockage d'une durée appréciable pourra être envisagé.

Mais, dira-t-on, pourquoi ne pas boucher l'exutoire normal (souvent ponctuel) de tel ou tel réseau karstique ? A première vue cela peut paraître relativement facile. Ce l'est moins lorsqu'on connaît le processus de formation (per descensum) de la plupart des karsts au cours des périodes géologiques, et la complexité extrême des réseaux qui en ont résulté. On peut sans risque d'erreur affirmer que, dans la majorité des cas, de nouvelles émergences (à proximité de l'ancienne source, ou en un point quelconque du massif) se substitueraient à la source obturée, sans que, pour autant, soit accru considérablement le volume de vides disponibles.

Ces considérations restrictives demandent pourtant à être nuancées. On constate souvent en effet en terrain calcaire, même typiquement karstique, la coexistence de deux types bien distincts de circulation : l'un correspondant aux classiques "rivières souterraines", l'autre conforme à la loi de DARCY. On pourrait citer l'exemple d'un massif calcaire de Grèce qui alimente des sources sous-marines ponctuelles à très gros débit, mais dont la perméabilité moyenne correspond à un coefficient de perméabilité  $K$  de l'ordre de  $10^{-4}$  m/sec. (C'est approximativement la perméabilité des sables de Fontainebleau, ou de sables de dune) là où la nappe est exploitée (par de très nombreux puits et forages). Nous citerons telle source de la craie de la basse vallée

de la Seine, qui se gonfle et se trouble 24 ou 48 heures après un gros orage, mais qui n'en manifeste pas moins une crue durable et parfaitement identifiable quelque onze mois après les périodes de pluies abondantes.

Il semble donc que les massifs calcaires, en dépit de certaines contre-indications évidentes, puissent offrir des perspectives intéressantes à l'alimentation artificielle. Mais les données du problème sont souvent fort complexes (l'hydrologie souterraine des terrains karstiques est l'un des chapitres les plus difficiles et les plus riches en surprises de l'hydrogéologie), et des investigations préalables approfondies sont nécessaires pour déterminer si une opération d'alimentation artificielle peut être envisagée dans de tels terrains.

### 3. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES.

Les écoulements souterrains en injection, comme en pompage, constituent un vaste domaine de l'hydraulique des milieux poreux : nous nous bornerons ici à une présentation rapide des phénomènes mis en jeu et des difficultés que l'on peut rencontrer lors de l'étude des projets.

#### 3.1. Schéma de l'écoulement de l'eau injectée et transmission des pressions

Le modèle schématique à parois vitrées ci-dessous permet de bien saisir les phénomènes de l'alimentation artificielle (54) : l'eau injectée, individualisée par coloration, est miscible à l'eau du gisement.

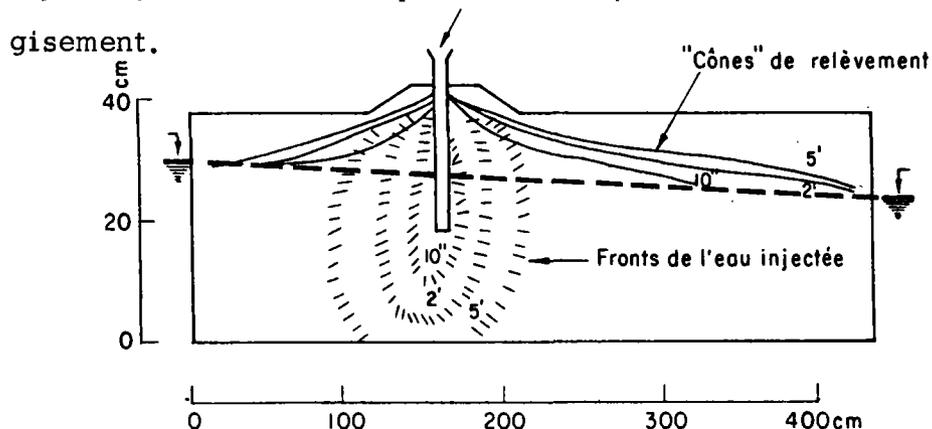


Fig. 2

La surcharge au centre d'injection crée un champ de vitesse qui s'étend à tout le volume de la nappe (au moins théoriquement car en fait il s'évanouit graduellement lorsqu'on s'éloigne du centre d'injection). Sous l'effet de ce champ de vitesse, la surface libre se déplace et la nappe réagit en un point donné bien avant que l'eau injectée n'ait pu l'atteindre (voir les positions successives de la surface libre et du front de l'eau injectée).

On observe par ailleurs que l'eau injectée déplace l'eau du gisement et qu'elle constitue une masse bien individualisée.

L'étude de l'écoulement de la masse d'eau injectée et celle de l'évolution des niveaux de la nappe constituent deux chapitres distincts de l'hydraulique de l'injection.

### 3.2. Forme et mouvement de la masse d'eau injectée.

L'écoulement à la sortie du puits d'injection est essentiellement radial, mais par la suite, si la nappe est en mouvement, il est influencé par la direction et l'intensité de l'écoulement naturel.

La fig. 3 montre schématiquement la forme de la masse d'eau dans le cas d'un puits traversant une couche aquifère homogène et isotrope, dans laquelle existe initialement une nappe captive à écoulement permanent (34).

L'eau d'injection s'étale plus facilement, et donc bien plus loin, à l'aval qu'à l'amont et sur les cotés. La masse d'eau est caractérisée par sa forme et son mouvement. On peut distinguer deux types de propagation : l'une par "étalement", que la nappe soit initialement au repos ou en écoulement, et l'autre que l'on peut appeler par "glissement", spécifique des nappes en mouvement.

**Fig.3 - Forme de la masse d'eau injectée (nappe captive) et zone de dispersion entre l'eau injectée et l'eau du gisement**

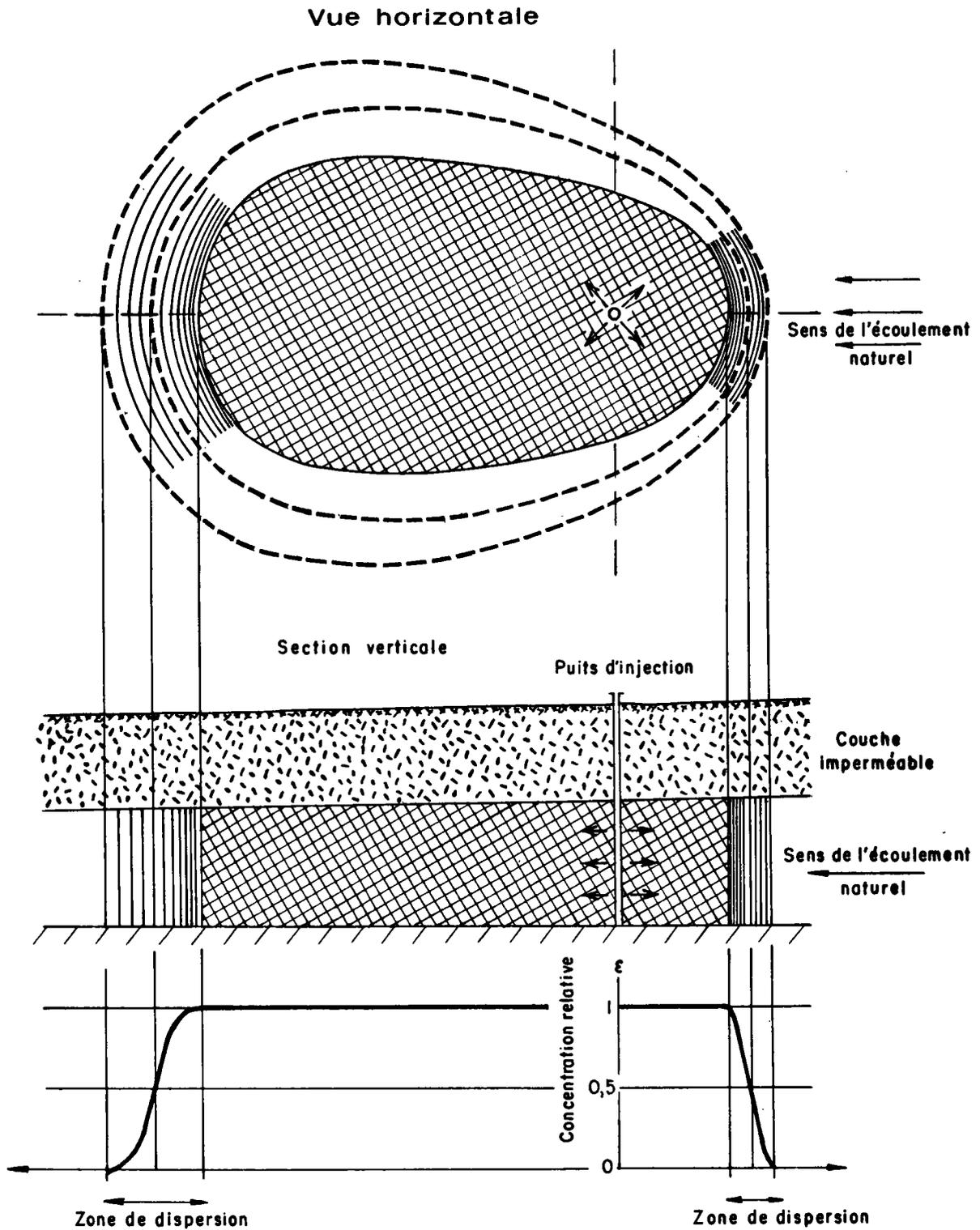
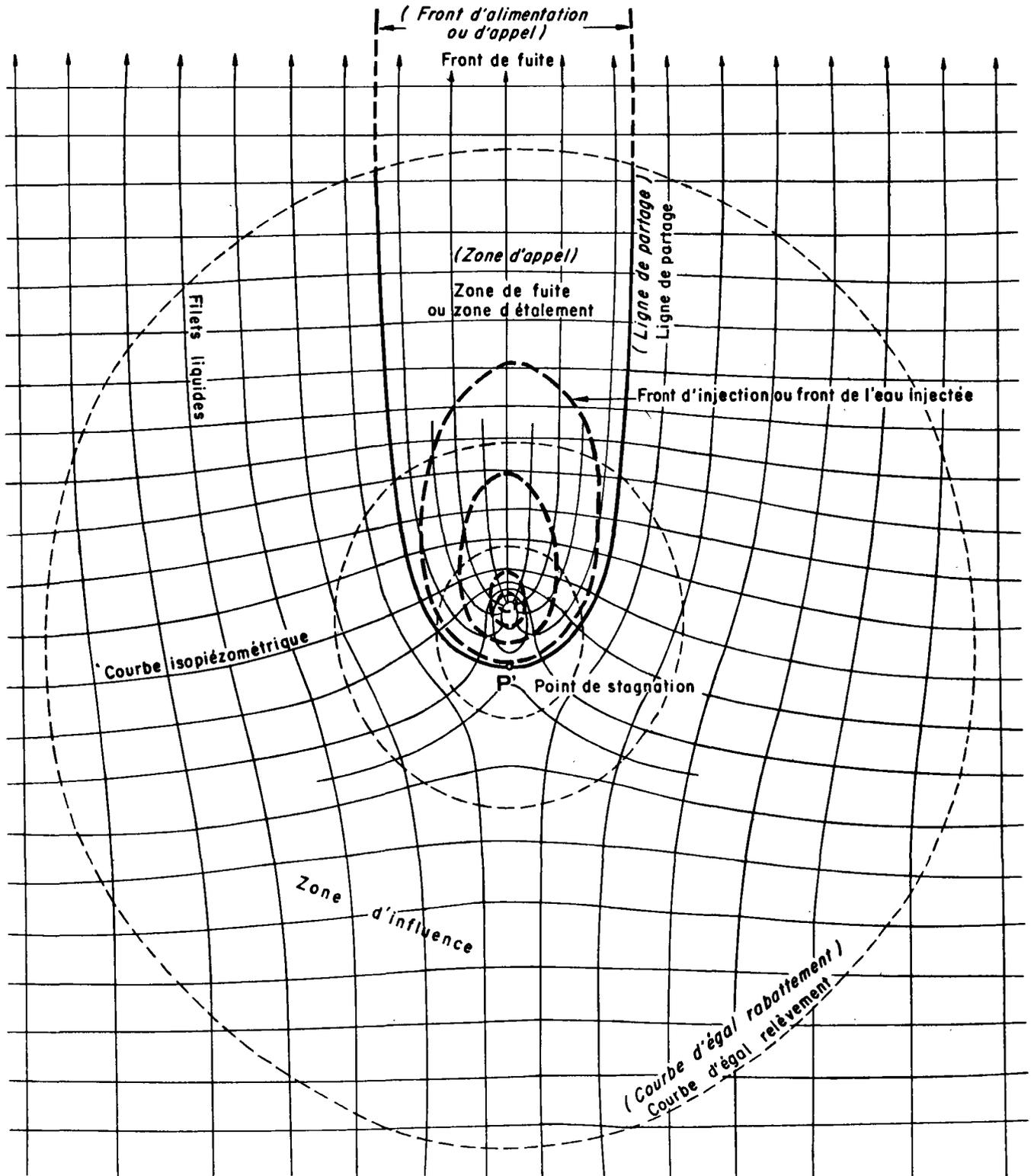


Fig.4 \_ Plan schématique d'un cône de relèvement et des fronts d'injection dans une nappe en écoulement à surface initialement plane (régime permanent)



l'injection d'un débit Q est régi par la même loi d'évolution que pour l'exhaure de ce même débit. L'équation représentative des deux phénomènes est la même, aux changements près suivants :

<u>Pompage</u>	<u>Injection</u>
-Débit + Q (constant)	-Débit - Q (constant)
-Rabatement s	-Relèvement : h = - s
-Coefficient d'emmagasinement S	-Coefficient de remplissage : R

Notons que la réversibilité S/R n'est absolue que pour les nappes captives, S (ou R) étant en effet défini par des grandeurs de l'élasticité.

Dans le cas de nappes libres S, tel qu'il est défini habituellement, n'atteint une valeur constante qu'au bout d'un certain temps ; cette valeur limite est fonction du rabattement et n'est égale à la porosité effective que si le rabattement est important (64). On conçoit que le passage de S à R doive s'effectuer avec beaucoup de précautions, surtout si S est déduit d'un essai de pompage relativement bref comme c'est souvent le cas : lors des expériences d'alimentation artificielle de la nappe alluviale de la Durance réalisées en 1953 (32), la comparaison entre les volumes injectés et les volumes du terrain rempli a montré que le coefficient de remplissage progressait de 4 à 14 % au cours des essais (la porosité effective est donc supérieure sinon égale à 14%).

### 3.3.2. Injection à charge constante dans un puits.

L'injection à charge constante doit être considérée comme le cas général de l'alimentation artificielle. En effet, ou bien l'injection a débuté à débit constant mais l'élévation du

niveau dynamique dans le puits, qui a lieu lors du régime transitoire, est limitée lorsqu'elle atteint le niveau du sol (\*) (Durance), ou bien, afin d'injecter le débit maximal, la charge disponible est délibérément mobilisée dès le départ en totalité.

Dans ce cas la loi d'évolution de la nappe n'est pas connue et il n'existe pour le moment aucune formule permettant d'évaluer exactement les relèvements. L'équation de JACOB-LOHMAN (37 bis) (essai à rabattement ou à relèvement constant dans le puits) fournit seulement la possibilité de calculer la variation, décroissante, du débit.

En pratique, on est donc obligé de se ramener au cas de l'injection par paliers de débit constant et à utiliser le principe de superposition des écoulements.

### 3.3.3. Injection dans un bassin.

Pour des raisons évidentes : limitation des déblais, possibilité de nettoyage à sec, les bassins possèdent la particularité d'être "suspendus" au-dessus de la nappe. La distance entre le fond du bassin et la nappe peut même parfois atteindre une vingtaine de mètres.

L'hydraulique des bassins d'alimentation, incluant le problème complexe de l'écoulement en terrain non saturé, n'a pas fait l'objet de formulation mathématique complète.

---

(\*) sauf si l'on injecte sous pression, ce qui n'est possible que si la formation perméable dans laquelle on injecte est surmontée d'une couche imperméable.

CHAPITRE IV  
LES DISPOSITIFS D'INJECTION

Les dispositifs d'injection les plus courants se divisent en deux catégories : les dispositifs de surface, (par exemple les bassins) et les dispositifs profonds (puits ou forages). Le "drain" d'injection est utilisé plus rarement.

1.- LES DISPOSITIFS DE SURFACE, N'ATTEIGNANT PAS OU NE PENETRANT PAS DANS LA NAPPE.

Eaux stagnantes : bassins, fossés

Eaux courantes : canaux, zones d'épandage

Quel que soit le dispositif, une bonne capacité d'infiltration des tranches superficielles du terrain est nécessaire. Il est notamment indispensable qu'une couche de faible perméabilité ne s'intercale pas entre la nappe et le fond de l'ouvrage ; c'est dire que leur emploi est réservé aux nappes libres.

L'un des avantages de ces dispositifs est, par rapport aux puits et aux forages, leur facilité d'entretien. Il est en effet possible d'avoir accès aux parties de l'ouvrage qui se colmatent. Dans la plupart des cas la profondeur de l'excavation est délibérément limitée afin de pouvoir effectuer un nettoyage à sec, même en période de hauts niveaux de la nappe.

Une certaine distance séparant le fond de l'ouvrage du niveau de la nappe avant alimentation artificielle, l'examen du problème de l'infiltration dans ces dispositifs revient donc à aborder la question complexe de l'écoulement en terrain non saturé, avec toutes les conséquences que cette donnée comporte en ce qui concerne la prévision du débit théorique d'infiltration (\*). L'examen de la bibliographie internationale montre ainsi

---

\*) Dans le cas des bassins destinés au rejet des eaux de pluie, à fonctionnement intermittent (et dont la technique relève de l'alimentation artificielle), la question se pose avec acuité.

que les volumes à mettre en jeu, le dimensionnement des ouvrages, etc... ont toujours été déterminés par tâtonnement.

Les bassins dans lesquels l'eau effectue un séjour relativement long avant de s'infiltrer et où par conséquent des réactions biochimiques ont le temps de s'opérer, offrent l'avantage de permettre l'épuration en même temps que l'injection.

Les dispositifs de surface nécessitent des aires d'aménagements étendues, c'est d'ailleurs un des obstacles majeurs à leur mise en oeuvre.

### 1.1. Les bassins

#### 1.1.1. Description

C'est le type le plus répandu. Leur superficie varie entre une fraction d'hectare et 10 hectares, rarement plus. Les berges qui peuvent être verticales avec parement en béton ou en bois (Suède) sont le plus souvent inclinées et généralement revêtues d'un perré afin d'atténuer les effets de l'érosion due au battillage. L'épaisseur d'eau va de quelques décimètres (Dortmund) à 6 mètres (Suède). Suivant les cas, le bassin peut donc jouer ou non un rôle de volant régulateur.

Dans la plupart des cas, le fond des bassins est tapissé d'une couche épaisse en moyenne de 0,15 à 1 m, de sable dont les grains ont un diamètre efficace souvent de 0,2 à 0,3 mm. Le rôle de cette couche est d'assurer une épuration mécanique et biochimique. Elle fait écran entre l'eau du bassin et le terrain, dont le colmatage doit être à tout prix évité.

#### 1.1.2. Débit d'infiltration

Le débit d'infiltration est donné dans la bibliographie en hauteur d'eau par unité de temps : cette unité de débit risque de faire illusion, elle incite à penser en effet que

le débit serait proportionnel à la superficie du bassin. Or des études réalisées à Peoria dans l'Illinois (59) ont montré que dans ce cas 75 % de l'infiltration se ferait par les berges (le bassin, de 12 x 20 m avec des talus à 2/1 est creusé dans des alluvions constituées de sables et de graviers). Cette proportion dépend naturellement de la profondeur du bassin.

En moyenne la vitesse d'infiltration dans un bassin se situe entre 1 mètre par jour (Croissy) et 5 mètres par jour (Dortmund).

A Des-Moines dans l'Iowa (15) la vitesse la plus faible a été enregistrée, soit 0,45 m/jour. Mais elle surprend par son importance quand on sait que les bassins alimentent une nappe libre circulant dans des alluvions perméables surmontées par des limons argileux. Entre le fond des bassins et la base des limons l'épaisseur est de 2 à 5 m. On comprend que l'installation soit constituée de 15 bassins, d'une superficie totale de 25 hectares ; le débit total moyen infiltré s'élève à plus de 100 000 m<sup>3</sup>/jour.

### 1.1.3. Les lois de l'écoulement

Le fait qu'il existe, d'une façon transitoire au début de l'infiltration, ou permanente ( ), une zone non saturée sous le bassin, signifie que l'écoulement n'est pas régi par les lois, écrites sous leur forme habituelle, de l'hydrodynamique : l'équation de continuité et la loi de Darcy. De ce fait la notion de charge peut être trompeuse P.R. PHILIP (50) montre qu'à terme le débit d'infiltration d'un bassin (en dehors de tout colmatage) est indépendant

---

(\*) A Croissy, pour un certain niveau initial de la nappe, il semble que la saturation n'ait lieu qu'au bout de plusieurs semaines de fonctionnement. En Suède, où la distance entre le bassin et la nappe peut dépasser 15 m, il n'y aurait jamais saturation.

de l'épaisseur d'eau. BAUMANN (65) affirme que l'épaisseur d'eau optimale serait d'environ 1,20 m. Pour des valeurs plus faibles la charge ne serait pas suffisante ; au-delà, l'augmentation de charge provoquerait un compactage des couches superficielles du terrain et de ce fait une baisse de débit.

En fait l'étude de ces problèmes est trop peu avancée pour que l'on puisse en tirer des indications pratiques valables. On en est réduit simplement à se demander si les bassins actuels sont bien dimensionnés. La question n'est pas sans intérêt, étant donné que dans chaque cas des milliers de m<sup>3</sup> de déblais sont en jeu.

Divers procédés sont utilisés pour favoriser l'infiltration. La plupart se résument à la lutte contre le colmatage, que nous étudierons ultérieurement. Plus directement lié à la présence d'une zone non saturée c'est l'emploi de puits de décharge destinés à faciliter le départ de l'air inclus dans le terrain (65).

#### 1.1.4. Infiltration et épuration

Mais les exemples suédois déjà cités le montrent, la présence d'air dans les terrains sous les bassins peut être recherchée afin d'oxyder les matières organiques de l'eau injectée. Ceci illustre la contradiction entre les exigences d'une meilleure infiltration d'une part, d'une meilleure épuration d'autre part. Le fait est d'ailleurs assez général, ainsi, à Croissy, l'oxygène produit par l'action chlorophyllienne du plancton est utilisé par les bactéries qui vont dégrader les déchets. Mais l'oxygène (dont la teneur-pointes de 30 mg/litre-est d'ailleurs accrue par l'installation d'une

cascade à l'entrée de l'eau dans le bassin) provoque la précipitation des carbonates, lesquels ont un effet colmatant.

La mise en oeuvre d'un bassin dans lequel les deux fonctions d'infiltration et d'épuration sont recherchées présente donc généralement le caractère d'un compromis. Toutefois une société de Dortmund (La Dortmunder Stadtwerke A.G.) a effectué sur ses bassins d'alimentation les études probablement les plus poussées à l'heure actuelle en ce domaine, et ces études ont conduit à la mise au point des procédés originaux permettant d'augmenter le débit d'infiltration comme le degré d'épuration (27) (28).

#### 1.2. Les autres dispositifs de surface

Ce sont les dispositifs à eaux courantes. Les canaux utilisés pour l'alimentation artificielle sont surtout des canaux d'irrigation, comme c'est le cas dans la vallée de San Joaquin en Californie (74).

L'alimentation artificielle par simple dérivation de cours d'eau n'est pour ainsi dire pas pratiquée, le danger d'érosion est en effet trop grand.

L'épandage contrôlé, dont on a notamment quelques exemples en Israël ne nécessite pas un investissement initial élevé, mais il exige par contre un entretien constant (72).

## 2. - LES DISPOSITIFS PROFONDS, PONCTUELS, PENETRANT DANS LA NAPPE : FORAGE ET PUIITS.

L'injection par forage présente divers intérêts :

- la perméabilité horizontale des terrains est souvent beaucoup plus élevée que leur perméabilité verticale.
- Seuls ces dispositifs permettent d'alimenter une formation surmontée par des couches peu perméables.
- L'injection sous pression est possible.
- Enfin, la mise en oeuvre de forages ou de puits ne nécessite pas d'aires d'aménagement étendues.

Comme pour les dispositifs de surface le colmatage est l'inconvénient majeur. Mais alors que pour ceux-ci le retour aux conditions initiales n'est en grande partie qu'une question de moyens, le décolmatage des forages est une opération toujours aléatoire du fait de l'impossibilité d'accéder aux parties actives de l'ouvrage.

### 2.1. Débit d'injection

Le débit spécifique d'injection est, même en dehors de tout colmatage, presque toujours inférieur au débit spécifique de pompage. Cette différence est dû probablement au fait que l'auto-développement n'a pas, comme en pompage, la possibilité de se réaliser.

C'est dire que les résultats déduits d'essais de pompage doivent être utilisés avec précaution pour la prévision des débits d'injection. Il faut tenir compte notamment des conditions de température (de l'eau de la nappe et de l'eau d'alimentation) dont l'influence est particulièrement sensible sur la viscosité et par conséquent sur la perméabilité.

Les forts écarts de température des eaux superficielles provoquent d'importantes variations du taux d'infiltration. A titre d'exemple, on peut citer les expériences réalisées dans l'Arkansas (57) au cours desquelles le débit spécifique d'injection est tombé

de 21,5 à 15 m<sup>3</sup>/h/m lorsque la température de l'eau d'alimentation passait de 19 à 6° C.

Mais c'est le colmatage qui est le principal facteur d'instabilité et de limitation du débit. Bien que ses origines et son mécanisme soient relativement bien connus (voir chapitre suivant), l'intensité de ses effets est dans chaque cas précis, pratiquement imprévisible.

La lutte contre le colmatage comporte des traitements préventifs (prétraitement de l'eau d'alimentation et aménagements divers, que nous verrons ultérieurement) et curatifs.

## 2.2. Décolmatage par pompages.

Ces derniers sont basés sur le principe du nettoyage hydraulique des filtres : ils consistent à inverser le sens du courant par pompage dans le puits d'injection. L'opération doit être réalisée de telle manière qu'à aucun moment l'air, une des principales causes de colmatage, ne pénètre dans le massif filtrant et le terrain. Les systèmes à air comprimé ne seront donc pas utilisés ; ils donnent toujours de mauvais résultats et vont même parfois jusqu'à provoquer un sur-colmatage (30) (60) et la hauteur crépinée sera calculée en sorte que la crépine ne se trouve jamais dénoyée en pompage (57).

## 2.3. Types de puits ou de forages spéciaux

Dans la plupart des cas les puits d'injection sont identiques dans leur conception aux puits de pompage. Toutefois certaines réalisations font exception.

### Arkansas

Citons tout d'abord l'expérience, négative, réalisée dans l'Arkansas (57) qui consistait à utiliser comme matériau du massif filtrant, non des graviers, mais un sable de filtre rapide (la dimen-

sion des graviers du terrain est comprise entre 0,25 et 0,5 mm) ; ceci dans le but de limiter l'extension de la zone colmatée dans le pourtour de la crépine. Les essais ont montré que l'objectif recherché était effectivement atteint mais que le décolmatage s'avérait extrêmement difficile.

### Durance

Le schéma ci-dessous représente un des types de puits utilisés pour l'alimentation artificielle de la nappe alluviale de la Durance (23).

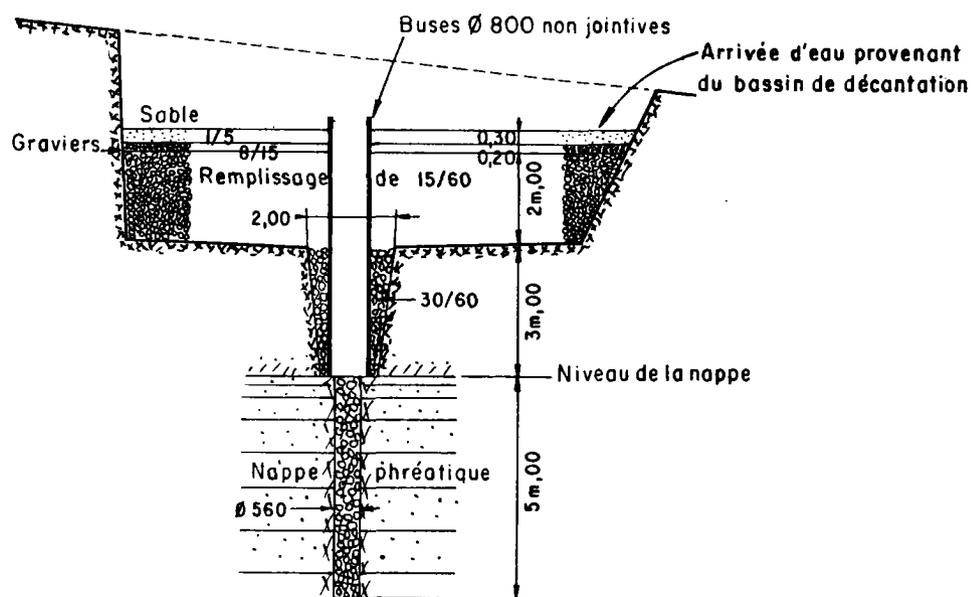


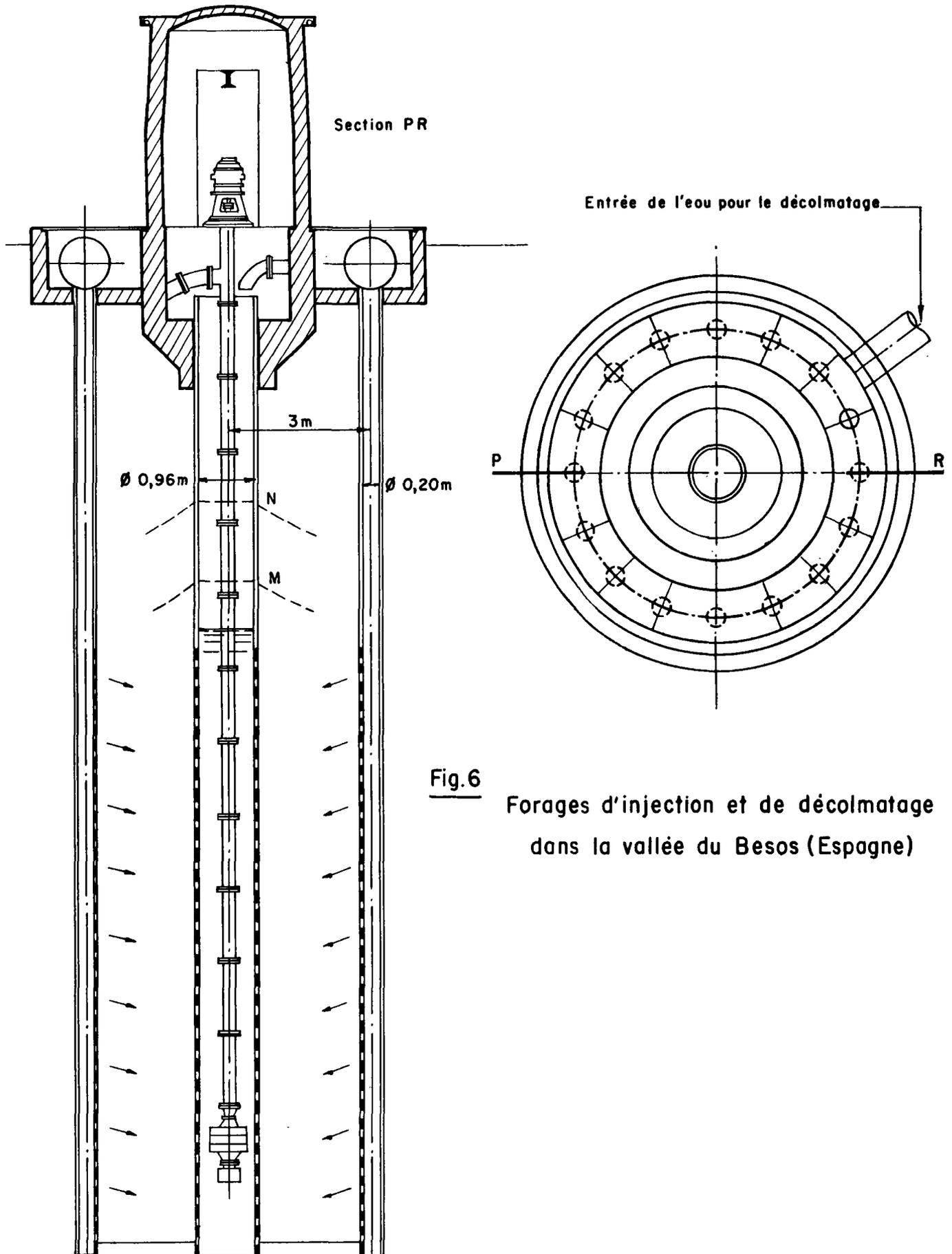
Fig. 5

Ce dispositif répond au souci évident de pouvoir accéder aux parties de l'ouvrage qui se colmatent. Aussi la couche de sable en surface arrête les impuretés qui pourraient colmater la partie active de l'ouvrage ; sa régénération est effectuée à des intervalles de temps qui varient selon la qualité des eaux d'alimentation. Il semble que le procédé ait donné de bons résultats mais son efficacité à long terme n'a pu être vérifiée, les installations n'ont en effet fonctionné que sur une période de temps limitée.

### Barcelone

Le dispositif d'injection utilisé dans les alluvions de la vallée du Besos près de Barcelone (52), consiste en un puits central d'injection (profondeur 25 m, capacité d'infiltration 80 l/s) entouré de 16 forages en petit diamètre destinés au décolmatage (voir fig. 6). Lorsque le débit d'injection dans le puits central a diminué et atteint une valeur critique (le niveau dynamique passe de M à N), on arrête l'injection. Un pompage est alors réalisé dans ce puits pendant que l'on injecte 70 l/s d'une eau limpide, prélevée sur la nappe, d'abord dans 8 forages périphériques puis dans 8 autres. L'opération est terminée lorsque l'eau extraite est claire, ce qui demande environ 15 minutes. Cette opération est réalisée quotidiennement, et donne semble-t-il les meilleurs résultats, depuis 1952, date de réalisation de l'ouvrage.

L'aménagement original et relativement complexe de ce dispositif permet de réduire le prétraitement à une seule chloration après passage de l'eau à travers une grille rotative. La charge en matières solides des eaux du Besos n'est pas précisée mais elle est probablement importante.



**Fig.6**

Forages d'injection et de décolmatage  
dans la vallée du Besos (Espagne)

### 3.- LES "DRAINS" D'INJECTION

Il ne sont utilisés, semble-t-il, qu'à Wiesbaden et Francfort. Le drain de Francfort long de 3 km, est utilisé pour alimenter artificiellement la nappe des sables quaternaires, avec de l'eau prélevée dans le Main, prétraitée et rendue parfaitement limpide.

Le niveau moyen de la nappe s'établit à 12 m sous le sol et l'axe du drain, dont le diamètre est de 2m, est placé environ à 8 m au-dessus de la nappe. L'ouvrage permet d'infiltrer 30 000 m<sup>3</sup>/j (soit 10 m<sup>3</sup>/j par mètre linéaire) dans cette formation sableuse très perméable.

## CHAPITRE V

### LE COLMATAGE DES OUVRAGES ET LE PRETRAITEMENT DE L'EAU

#### 1.- LE COLMATAGE

Le colmatage constitue une donnée constante et le problème majeur de l'alimentation artificielle :

- le colmatage fait baisser le taux d'infiltration parfois dans des proportions considérables
- il rend indispensables un entretien et des aménagements coûteux
- il rend extrêmement hasardeux la prévision des débits à terme.

Ses origines et son mécanisme sont sensiblement différents suivant le type de dispositif, aussi les cas des bassins et des forages doivent être examinés séparément.

#### 1.1. Le colmatage des bassins

##### 1.1.1. Origines

Les causes de colmatage des bassins sont dues principalement :

- aux qualités de l'eau d'injection : sédiments organiques ou inorganiques en suspension;
- aux proliférations dans le bassin : micro-organismes, algues;
- aux produits de réactions chimiques qui ont lieu dans l'eau du bassin, comme par exemple la précipitation de carbonates à Croissy, et d'une manière générale tous les produits d'oxydation;
- enfin aux réactions de l'eau d'alimentation avec le terrain : dispersion et gonflement de particules argileuses etc...

### 1.1.2. Un exemple de colmatage

Les bassins de Péoria, dans l'Illinois (56) sont creusés dans des alluvions de sable et de graviers ; leur fond était tout d'abord tapissé d'une couche de sable de diamètre efficace 0,3-0,4 m, épaisse d'environ 0,15 m.

Le débit d'infiltration est tombé d'environ 50 % en 3 jours, pour tendre vers zéro quelques jours après. Cette chute de débit était due à la présence d'algues, dont l'action a été stoppée grâce au traitement de l'eau par le sulfate de cuivre.

Après nettoyage de la couche de sable le taux d'infiltration est revenu à sa valeur initiale mais en 3 mois le débit a diminué de 60 % du fait d'un colmatage par les matières solides en suspension dans l'eau d'alimentation.

Les bassins ont dû être nettoyés 9 fois durant la première année, et l'on a constaté que le colmatage n'intéressait que les 5 cm supérieurs de la couche de sable.

Après 3 ans de fonctionnement dans les mêmes conditions de colmatage et d'entretien, le sable a été remplacé par des graviers de dimension comprise entre 2,5 et 8 mm. Au bout de 3 ans, sans entretien, le débit n'avait pas varié dans un bassin, mais avait baissé de 30 % dans un autre. Le renouvellement des graviers a permis de retrouver à peu de choses près le débit initial.

Au terme d'une nouvelle période de 3 ans, toujours sans entretien, le débit était tombé à la moitié de sa valeur initiale. Le procédé semblait donc avoir donné des résultats satisfaisants, mais après renouvellement des graviers aucune amélioration du débit n'est apparue : on a pu constater que les sédiments colmatants avaient imprégné les couches de terrain naturel sous-jacents aux graviers.

### 1.1.3. Moyens de lutte

L'exemple qui précède illustre bien l'importance du phénomène et le caractère pratiquement irrémédiable qu'il peut prendre lorsque le colmatage atteint le terrain. Les procédés qui visent à restituer à celui-ci ses capacités naturelles d'infiltration, comme le foisonnement au rateau ou à la charue, etc... ont une efficacité discutable ; par ailleurs le déblaiement pur et simple des couches de terrain naturel sous le bassin n'est qu'un pis-aller.

On cherchera donc toujours à éviter le colmatage du terrain. Les moyens utilisés consistent soit à prétraiter l'eau d'alimentation soit à disposer au fond du bassin une couche de sable filtrante (les deux procédés ne s'excluent d'ailleurs pas).

Dans le cas des couches filtrantes, leur entretien nécessite, si l'installation fonctionne en continu, la construction de bassins de réserve permettant un nettoyage par permutation (Dortmund).

On conçoit que lorsque le colmatage est extrêmement rapide (quelques semaines), le nombre des bassins de réserve doit être relativement élevé. Dans ces conditions il est essentiel d'essayer de prolonger la durée d'activité des couches filtrantes (\*), comme a cherché à le faire la Dortmunder Stadtwerke (27) (28).

---

(\*) d'autant que l'enlèvement des centimètres superficiels fait perdre à la couche de sable ses facultés épuratrices.

## 1.2. Le colmatage des forages

Le problème est plus grave que pour les bassins, en effet :

- les causes de colmatage sont plus nombreuses,
- il est impossible d'accéder aux parties actives des ouvrages, le nettoyage est donc difficile.

### 1.2.1. Origines

Le colmatage provient :

- directement des substances en suspension dans l'eau d'alimentation,
- des conséquences de la réaction de l'eau d'alimentation avec l'eau de la nappe,
- des conséquences de la réaction de l'eau d'alimentation avec le terrain.

### 1.2.2. Exemples de colmatage

-Donzère-Mondragon (30)(voir fiche 4) :

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

-Leyde : des essais d'injection ont été réalisés dans les dunes de Leyde, avec une eau de surface importée. Au bout d'un temps, qui n'est pas précisé (73), le débit s'est pratiquement annulé. Le colmatage était dû à la présence d'air dans l'eau d'alimentation, ce qui provoquait la formation d'oxydes de fer. On a pu constater que le fer s'était déposé dans un rayon de un mètre autour de la crépine.

-Israël : l'entraînement d'air dans l'eau d'alimentation est l'une des principales causes de colmatage.

L'exemple suivant illustre l'importance du phénomène d'entraînement.

Il s'agit d'un essai d'injection dans les dolomies et calcaires du Cénomanién-Turonien d'Israël (58), contenant à cet endroit, des "poches" karstiques de plusieurs mètres. La coupe des terrains est donnée dans le schéma ci-dessous.

Dès l'arrêt de l'injection, de l'air a jailli du puits ; la pression du jet a augmenté progressivement pour atteindre environ une atmosphère une minute après l'arrêt, ce qui a d'ailleurs entraîné la ruine de l'ouvrage (par explosion).

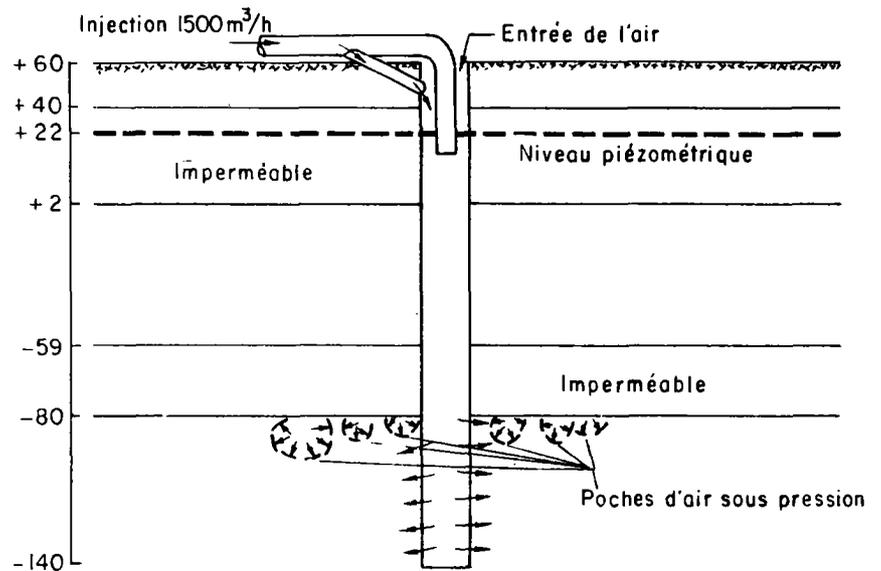


Fig. 7

-Grand Prairie (Arkansas) : 23 essais d'injection, réalisés dans des conditions différentes, ont été entrepris sur des puits conçus pour l'alimentation de la nappe de graviers sableux de Grand Prairie (57). Sur la conduite d'aménée d'eau aux puits était montée une vanne permettant soit d'éviter de contrôler l'entraînement de l'air.

Tout d'abord, et afin d'isoler parfaitement le phénomène de colmatage par l'air, de l'eau de la nappe a été réinjectée (vanne ouverte) au cours d'un essai qui a duré 5 jours : le débit spécifique, initialement de 15,5 m<sup>3</sup>/h/m est tombé à 5,2m<sup>3</sup>/h/m.

Par la suite, de l'eau de rivière, prétraitée, a été utilisée. Au bout de quelques heures les débits spécifiques initiaux et finaux étaient (en m<sup>3</sup>/h/m) :

-vanne fermée	19,2 - 18,5
-vanne ouverte	20 - 8,9

De même il a été possible de jouer sur la turbidité de l'eau d'alimentation : la perte de débit est passée de 3% à 40 % quand la turbidité était augmentée de 5 à 20 p. p. m.

Les autres essais ont porté sur l'influence de la température et de certains adjuvants destinés à éviter surtout la formation de carbonate de calcium et d'oxyde de fer.

### 1.2.3. Mécanismes du colmatage.

Ils peuvent être classés en trois groupes :

#### a) mécaniques :

- matières solides en suspension dans l'eau d'alimentation,
- entraînement d'air et libération de gaz dissous. Les bulles d'air dans le terrain s'opposent au passage de l'eau comme de véritables grains solides.

b) biologique :

- prolifération de micro-organismes en masses plus ou moins gélatineuses sur les dépôts de matières organiques ou inorganiques transportées par l'eau d'injection et concentrées dans la zone crépinée,
- production, due à l'activité bactériologique, de substances chimiques provoquant notamment la précipitation de sels métalliques.

c) chimique :

- gonflement des argiles par échange d'ions,
- précipitation de sels métalliques ou alcalino-terreux.

1.2.4. Moyens de lutte

Le prétraitement de l'eau permet d'éliminer les causes de colmatage ou du moins d'en atténuer les effets.

Mais le colmatage dû à l'air entraîné reste un cas particulier qui nécessite des précautions spéciales (34) (58) (60).

L'arrivée en chute libre de l'eau injectée dans le forage, les turbulences, doivent être évitées. Dans ce but l'eau est introduite dans l'ouvrage par l'intermédiaire d'un tube plongeant sous le niveau dynamique. Des pertes de charges suffisantes sont créées soit par un dimensionnement approprié du tube, soit en le munissant, à la base, d'une valve à contre-pression, soit encore en fermant son extrémité, la partie inférieure étant crépinée, etc...

2.- LE PRETRAITEMENT

Décantation, filtration, chloration, oxygénation, sulfatation, absorption sur charbon actif, etc... tels sont les traitements que l'on peut faire subir à l'eau d'alimentation avant son injection. La liste en est impres-

sionnante, mais il est rare d'y avoir recours dans leur totalité.

### 2.1. Cas des bassins

En général, dans le cas des dispositifs de surface, le prétraitement est extrêmement réduit (Dortmund : bassins de décantation uniquement) ou encore inexistant (Suède, Peoria, Des Moines). On compte en effet sur l'épuration par filtration à travers la couche de sable disposée sur le fond des ouvrages et le terrain. Le colmatage est combattu par un entretien constant des installations.

Lorsque les propriétés d'épuration du terrain sont médiocres en regard de la pollution de l'eau d'alimentation, un traitement relativement important est nécessaire : c'est le cas à Croissy où l'eau injectée dans la craie sénonienne est prélevée en Seine, à l'aval de Paris. Seuls les moyens de stérilisation ne sont pas employés afin de laisser libre cours à l'auto-épuration de l'eau dans les bassins.

### 2.2. Cas des forages

Le problème se présente différemment pour les forages. Lorsque le prétraitement est inexistant ou réduit à sa plus simple expression, la durée d'activité des ouvrages est limitée (Donzère-Mondragon) ou doit être prolongée par la mise en oeuvre d'un dispositif original du type de celui de Barcelone, sans doute efficace mais dont l'universalité reste à prouver.

Les forages d'Israël, alimentés en eau quasi-brute, et décolmatés par pompage, donnent pour le moment de bons résultats; toutefois, de l'avis même des utilisateurs, on s'attend d'ici quelques années à des dégâts irrémédiables (34). Cette dernière publication indique que le colmatage biologique est un phénomène très répandu ; il a lieu, même lorsqu'on injecte des eaux claires

de lacs, peu chargées en sédiments et en matières organiques (turbidité 2-6 p.p.m) et prétraitées par chloration : dès lors on peut se demander si, dans la perspective d'un fonctionnement à long terme des forages, la règle n'est pas d'injecter des eaux parfaitement limpides .

## CONCLUSIONS

C'est sur le plan des idées générales, des lignes de force, d'une sorte d'orientation préliminaire, que le présent article a voulu se situer. Il y avait, nous semble-t-il, sinon à "démystifier" l'alimentation artificielle, du moins à montrer la diversité de ses applications, à indiquer ses limites, et à souligner la complexité des problèmes techniques qu'elle pose souvent.

Dans bien des cas pourtant, fort divers d'ailleurs, l'alimentation artificielle permet d'atteindre l'un ou l'autre ou plusieurs des objectifs que nous avons énumérés au chapitre Ier ; il n'est pour s'en convaincre que de passer en revue les réalisations rapportées ici. Elle mérite donc bien l'intérêt qu'on lui témoigne.

Mais l'alimentation artificielle est subordonnée à la présence simultanée d'un certain nombre de conditions. Encore que ce n'ait pas toujours été le cas dans le passé, une exacte connaissance des facteurs en jeu doit être acquise au départ (et cela suppose en général des études approfondies), si l'on désire éviter de graves déboires lors de l'exécution.

Une première approche montrera du reste souvent que, si séduisant que puisse paraître tel avant-projet, l'opération se heurterait pour une raison ou une autre, à une quasi-impossibilité. L'alimentation artificielle n'est pas une panacée, et l'on doit se garder de tout engouement excessif à son endroit. Il y a une quinzaine d'années, la technique dite du "barrage" souterrain" connut une vogue considérable. Mais on constata assez vite qu'elle n'était réalisable, et à fortiori rentable, que dans un nombre très limité de cas. Toutes proportions gardées, car ses applications sont beaucoup plus nombreuses, variées et dignes d'intérêt, tout esprit de système concernant l'alimentation artificielle conduirait aux mêmes désillusions.

On aura noté que, quel que soit le nombre des réalisations étrangères relatées, c'est surtout sur les données propres à la France que l'accent a été mis. Sans méconnaître le caractère de recherche fondamentale de cette mission, il apparaît que le dépouillement des publications et l'interprétation des réalisations du monde entier doivent servir à éclairer tous ceux qui, chargés à un titre ou à un autre de gérer les ressources en eau de notre pays, pourraient être amenés à dresser tel ou tel projet.

Une des lacunes -parmi d'autres sans doute- du présent article, concerne les aspects économiques de l'alimentation artificielle, qui n'ont pas été abordés. Mais si l'étude a été confiée par la D.G.R.S.T. à des spécialistes de l'hydrogéologie, (donc à priori ne se voulant pas compétents dans les autres disciplines), c'est bien parce que la recherche doit d'abord être menée, nous l'avons déjà souligné, à partir des données relatives au réservoir souterrain, dont tout dépend.

Au demeurant, et dans le cas particulier de notre pays, surtout, qui pourrait affirmer que les mois et les années à venir ne modifieront pas radicalement les facteurs économiques de l'alimentation artificielle des nappes ? L'évolution du problème de l'eau en France, au cours des dix années écoulées a été une véritable révolution : elle n'était, comme telle, guère prévisible. Voici venu le temps où, dans un nombre considérable de cas, l'eau souterraine cesse d'être "res nullius", et ne pourra plus être prélevée que moyennant redevance. Cela signifie, croyons-nous, que, si les aspects techniques de l'alimentation artificielle demeurent, ses critères économiques, tels qu'on pourrait être tentés de les définir actuellement, risqueraient à très bref délai, de perdre une bonne part de leur signification.

ANNEXE IFICHE 1 - LE CENOMANIEN - TURONIEN D'ISRAEL

(34) (35) (55)

GEOLOGIE

Le Cénomancien-Turonien d'Israël est constitué de dolomies et de calcaires karstiques, contenant des intercalations de craie et d'argile.

La planche I fournit des indications sur l'étendue de la formation (au moins celle du secteur étudié), les pendages, l'épaisseur, etc... La direction de l'axe anticlinal est SSW-NNE. Les limites nord et ouest sont imperméables.

LA NAPPE

La nappe est captive ou libre suivant les secteurs. La circulation de la nappe s'effectue à la faveur de fissures et de chenaux de dissolution, mais l'ensemble de la formation réagit comme si elle était homogène.

La transmissivité (T) est comprise entre  $1 \cdot 10^{-1}$  et  $2,3 \text{ m}^2/\text{s}$  (à cette dernière valeur par exemple correspond, pour une épaisseur  $H = 500 \text{ m}$ , une perméabilité de  $4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .) Le coefficient d'emmagasinement est, en nappe captive, de  $1 \cdot 10^{-3}$ , en nappe libre, de  $3 \cdot 10^{-2}$  à  $10^{-1}$ .

L'alimentation naturelle moyenne théorique est évaluée (sur les  $3\,500 \text{ km}^2$  du secteur étudié) à 317 millions de  $\text{m}^3/\text{an}$ .

La nappe possède deux exutoires (voir fig.8) :

Nom des sources	Altitude au-dessus de la mer	Débit moyen annuel en millions de $\text{m}^3$
Yarkon	16,5 m	220
Tanninim	2 à 3,5 m	100

Les sources Tanninim sont salées (contamination par l'eau de mer supposée). La salinité de la nappe, de l'ordre de 40 à 200  $\text{mg/l}$  de  $\text{ClNa}$  vers le Nord et l'Est, atteint au Sud 200 à 300  $\text{mg/l}$  (34). Une autre publication (55)

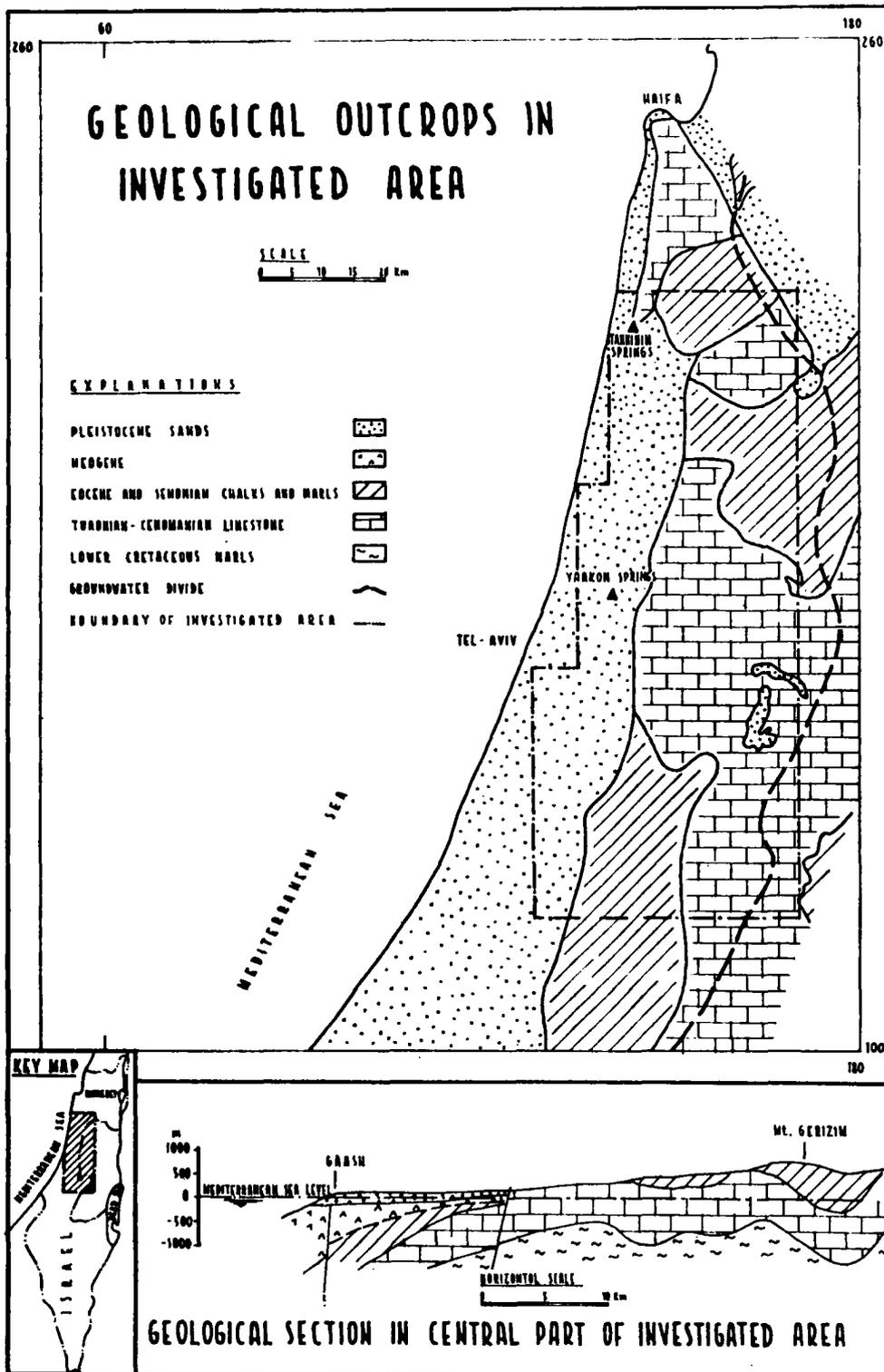


Fig. 8 - CARTE GEOLOGIQUE ET COUPE

indique que les teneurs en ions chlore dans les compartiments inférieurs et supérieurs de la formation aquifère sont respectivement de 50-100 mg/l et de 250-400 mg/l.

#### EXPLOITATION PASSEE

La quasi totalité des forages est située sur une ligne nord-sud passant approximativement par les sources au Yarkon. Au cours de la période récente le débit d'exploitation s'est élevé à près de 300 millions de m<sup>3</sup> par an ; le débit des exutoires a progressivement diminué jusqu'à provoquer un tarissement total aux sources du Yarkon.

#### UTILISATION DU CENOMANIEN-TURONIEN COMME RESERVOIR

Les objectifs sont les suivants :

- assurer l'approvisionnement local
- constituer un stockage de relais pour l'" Israël National Water Carrier",

étant entendu que le niveau de la nappe doit rester inférieur à une valeur h max. (voir fig. 9) pour limiter les pertes par les exutoires, et supérieure à une valeur h minimale, afin de conserver un certain débit aux sources Tanninim.

Les besoins locaux s'élèvent à 280 millions de m<sup>3</sup> par an, le débit à fournir au système régional de conduites à 200 millions de m<sup>3</sup> (fig.9 : courbes du haut). Les courbes du bas résultent d'une étude effectuée à l'aide d'un simulateur (modèle résistance-capacité).

Elles montrent que si, en toute saison, le niveau de la nappe restait très élevé (cas théorique) il serait possible à la fois de satisfaire les besoins locaux et de fournir au système de conduite le débit demandé ; pour des niveaux moyens seul l'approvisionnement local serait possible ; enfin, pour de très bas niveaux cet approvisionnement serait limité.

Elles indiquent en outre que l'alimentation artificielle n'est possible que lorsque le niveau de la nappe est extrêmement bas (cotes inférieures à 12 m) et que le volume annuel d'injection ne peut dépasser 150 millions de m<sup>3</sup>.

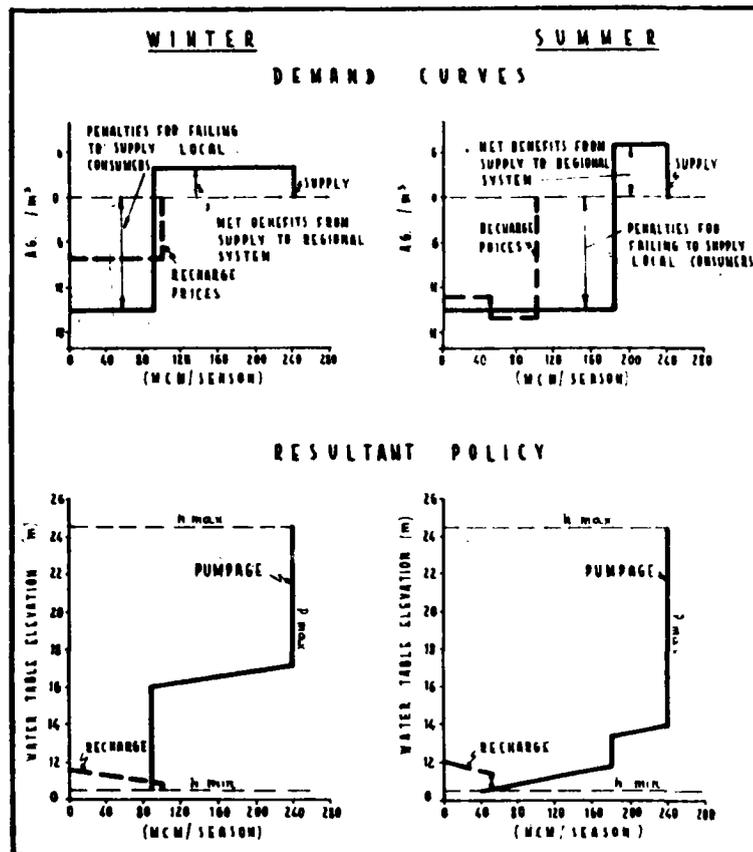


Fig. 9 - DIRECTIVES OPERATIONNELLES DETERMINEES PAR UN SIMULATEUR

A l'heure actuelle l'altitude moyenne du niveau de la nappe s'établit au début de l'été à + 18,5 m; aussi est-il prévu de construire de nouveaux puits et d'intensifier le pompage afin d'accroître le rabattement.

---

FICHE 2 - MANHATTAN BEACH, U.S.A., CALIFORNIE-(65)-

LOCALISATION

Près de Los Angeles. Zone d'essai en face de Manhattan Beach et Hermosa Beach.

MAITRE D'OEUVRE

Los Angeles County Flood Control District

DATE DE REALISATION

1953 (Zone d'essai)

BUT RECHERCHE

Repousser l'invasion du biseau salé

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE (voir fig. 10).

Dans la zone d'essai : graviers sableux de plus de 70 m d'épaisseur sous des sables de dunes et une couche d'argile d'une dizaine de mètres, maintenant la nappe captive. Altitude de la surface piézométrique de la nappe: -40 m environ sous le niveau de la mer.

Sous l'effet de pompages intensifs (voir la piézométrie sur la fig.10), l'eau de mer a envahi la couche aquifère et complètement remplacé l'eau douce sur 600 m à partir du rivage. Au-delà l'eau salée a progressé de 450 m, formant un biseau.

CONTEXTE TECHNIQUE ET TECHNOLOGIQUE

-source d'alimentation : Colorado River

-prétraitement : chloration

-dispositif d'alimentation : dans une première phase 8 puits d'injection ont été mis en service (cf. fig. 11)

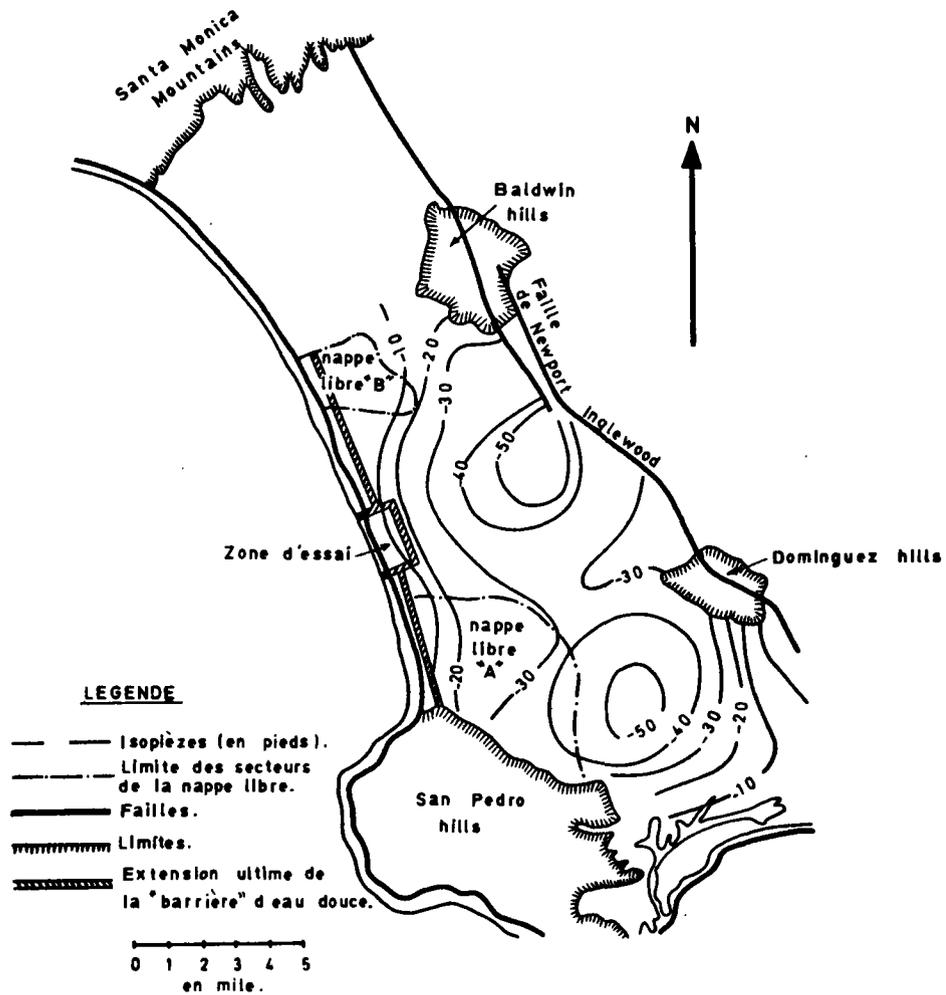


Fig. 10

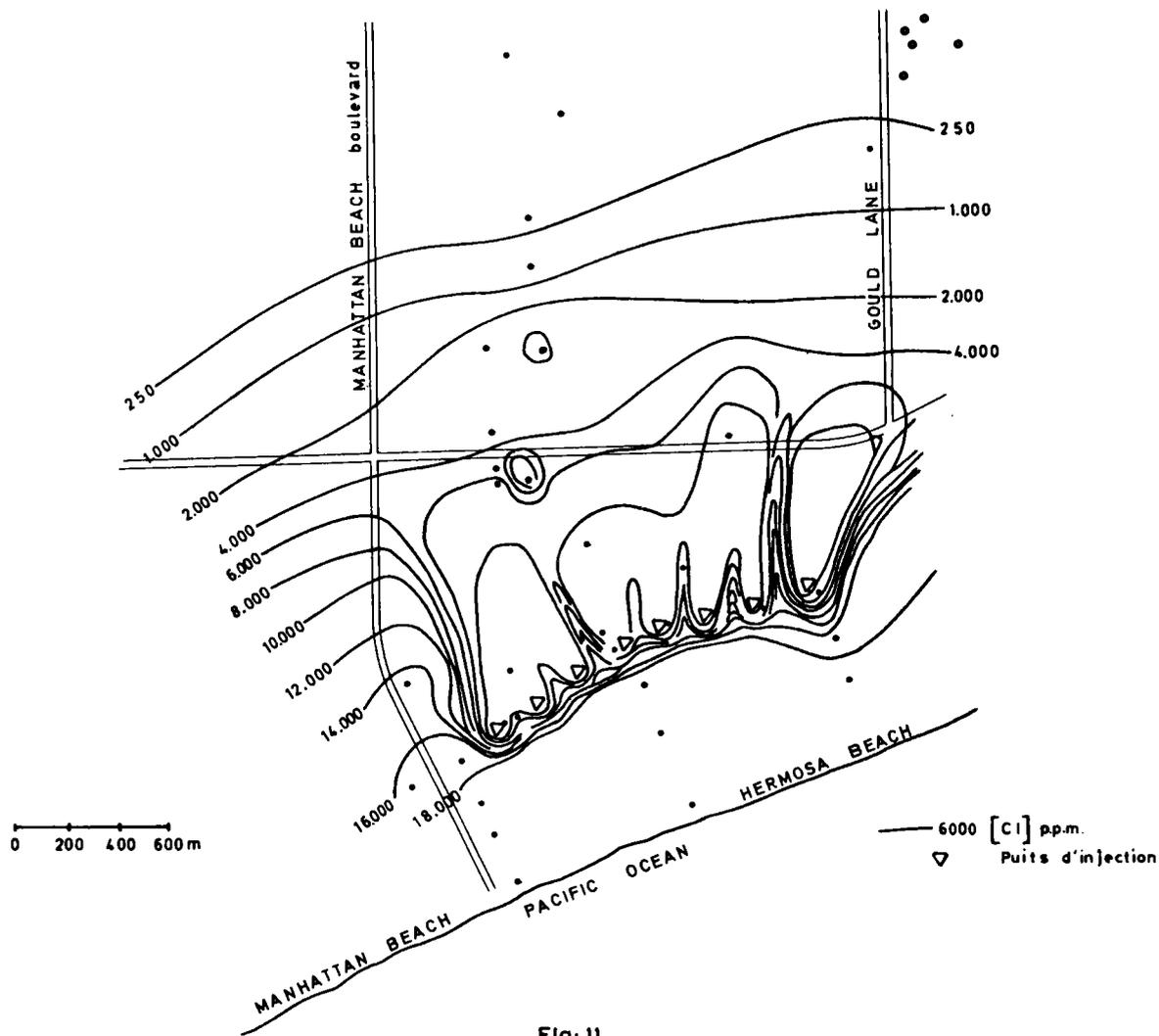


Fig: 11

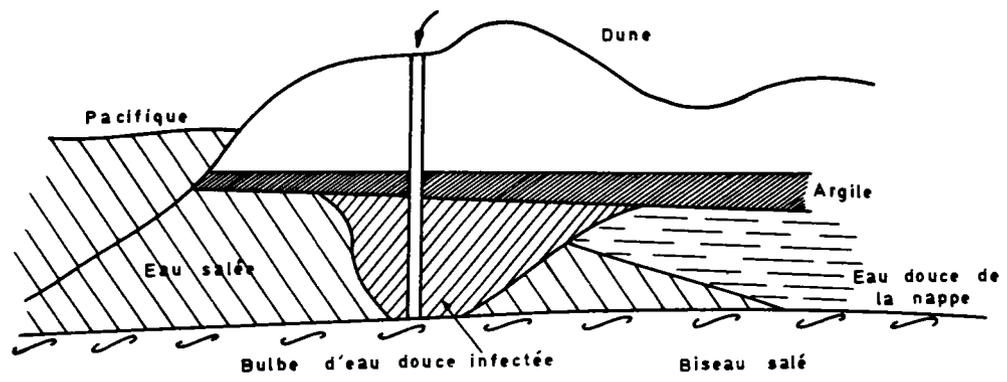


Fig: 12

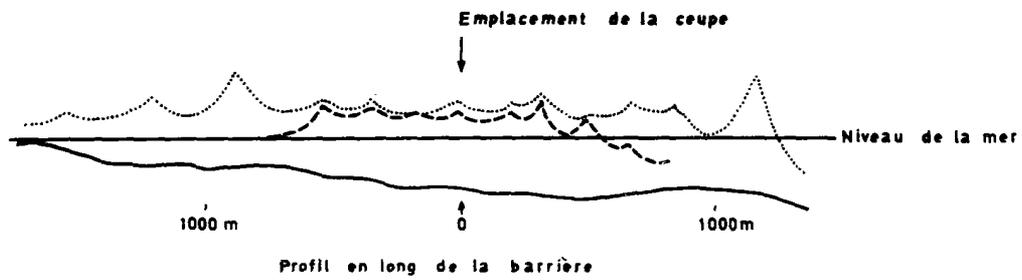


Fig: 13

Niveaux piézométriques

- ..... le 2.3.61
- le 24.6.54
- le 12.2.53

Echelle.

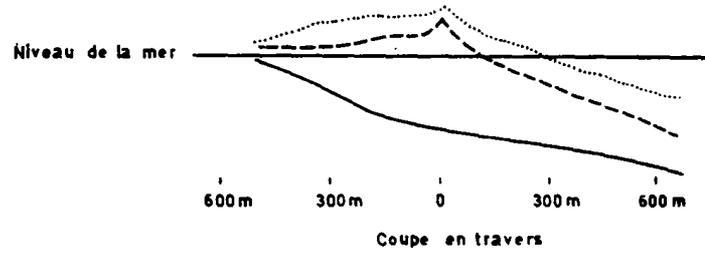
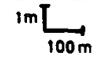


Fig: 14

-entretien : décolmatage par pistonage

-volume injecté : non précisé.

### RESULTATS DE LA PERIODE D'ESSAI

Des essais préliminaires sur 1 puits avaient montré qu'un espacement maximal de 150 m entre les puits permettait de constituer une barrière d'eau douce continue. Huit puits ont été mis en place, suivant ce principe, à 600 m du rivage. Après 16 mois de fonctionnement le "bulbe" d'eau douce s'était étendu de 60 m vers la mer, là où son diamètre est maximal, c'est-à-dire juste au-dessous de la couche d'argile (cf. fig. 12).

A sa base, le bulbe (que l'on peut grossièrement comparer à un tronc de cône renversé) ne s'étendait pratiquement pas vers la mer. Les bulbes s'étaient rejoints à leur sommet, mais étaient toujours séparés à la base de la couche aquifère.

La figure 11 donne des courbes d'isochlorure le 24.6.54 soit après 16 mois de fonctionnement. Durant les 8 premiers mois le niveau de la barrière est restée inférieur à celui de la mer pour s'établir en fin de période à la cote moyenne de + 1,2 m. On constate qu'entre 7 des 8 puits en service, l'eau de mer continue de s'introduire vers l'intérieur des terres.

Depuis le 24 Juin 1954 la barrière a été prolongée vers le Nord et le Sud pour atteindre au total une longueur de 2,5 km (cf. fig. 13 et 14). La charge d'eau douce a été augmentée afin d'accroître son efficacité (cf. fig. 13 et 14).

---

### FICHE 3 - KARLSKOGA (Suède) (38)

LOCALISATION : KARLSKOGA (38)

MAITRE D'OEUVRE

Non précisé. (Le projet a été étudié par le bureau d'ingénieur-conseil WATTENBYGGNADSBYRAN (VBB), de Stockholm.

DATE DE REALISATION : 1946

BUT RECHERCHE

Epuration des eaux de surface

CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'injection est réalisée dans des alluvions très perméables de sables et de graviers déposés par des torrents sous-glaciaires. Perméabilité (horizontale ?) de l'ordre de  $1.10^{-3}$  à  $1.10^{-2}$  m/s.

CONTEXTE TECHNIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Source d'alimentation : la rivière Tünsalver

Prétraitement : passage sur filtre rapide

Volume infiltré : environ 15 000 m<sup>3</sup>/j en continu

Dispositif d'alimentation : 4 bassins de 625 m<sup>2</sup>. Parements verticaux en béton. Le fond des bassins est tapissé d'une couche de sable, épaisseur

1m, diamètre efficace 0,2 à 0,3 mm.

Le bassin est situé le plus haut possible au-dessus de la nappe (voir fig.15).

Distance verticale entre le fond du bassin et la nappe : 12 m.

Vitesse théorique d'infiltration : 7m/j.

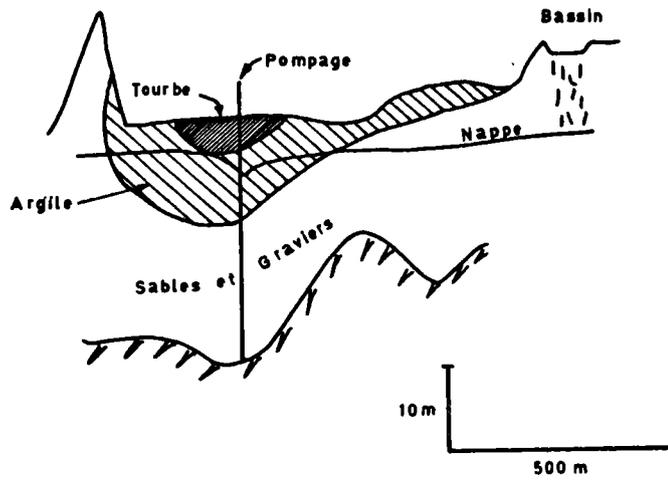


Fig: 15

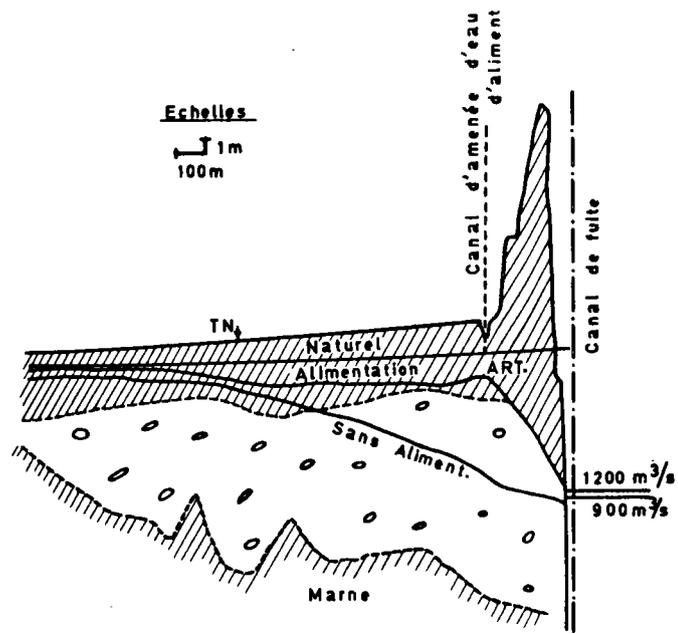


Fig: 16

Amélioration de la qualité de l'eau

	Température 0°C	Turbidité ppm	Mn/0 <sub>4</sub> K	Dureté Ca0 ppm	Fe ppm	Coli 100 cm3	Gélatine 20° , 1 cm3
Prise en rivière	0 - 19	25	31	10	0,37	23	200
Après fil- tration rapide	0 - 19	23	29	-	-	0	130
Après pompage	4 - 7	< 5	7	46	0,10	8	0

(Le débit de pompage est de 20 000 m<sup>3</sup>/j : 6 000 m<sup>3</sup> proviennent de la nappe).

Traitement après pompage : aucun

FICHE 4 - DONZERE-MONDRAGON (France) (30)

LOCALISATION :

Donzère-Mondragon

MAITRE D'OEUVRE

Compagnie nationale du Rhône

DATE DE REALISATION

1952

BUT

Maintien de la nappe sur les deux rives du canal de fuite dont la réalisation a provoqué un rabattement des niveaux piézométriques . La nappe doit "coller" aux limons (cf. fig.16)

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE (voir schéma)

Kh moyen des alluvions :  $2.10^{-3}$  m/s. Débit estimé de la nappe dans les conditions naturelles : 50 l/s par km de front.

## CONTEXTE TECHNIQUE ET TECHNOLOGIQUE

### Source d'alimentation

Eaux du Rhône. Charge en matières solides : 50 mg/l en dehors des périodes de crues.

Prétraitement : aucun (en 1 an, 1 tonne de matières solides est introduite dans le terrain par km de front).

Débit injecté : 8,5 m<sup>3</sup>/s

Dispositif d'alimentation : des fosses de 100 m<sup>2</sup> traversant les limons ont permis un débit d'infiltration de 30 à 250 l/s (0,3 à 2,5 l/s par km<sup>2</sup>), l'épaisseur d'eau étant de 7 à 8 m.

On utilise surtout des forages de 300 mm de diamètre, avec gaine filtrante en graviers 10/30 épaisse de 130 mm. Débit : 80 l/s en moyenne.

La totalité du dispositif comporte :

- en rive droite, sur 6,5 km : 121 fosses ou forages absorbant 4,5 m<sup>3</sup>/s
- en rive gauche, sur 5 km : 112 fosses ou forages absorbant 4 m<sup>3</sup>/s

### Entretien :

Des tentatives de décolmatage à l'émulseur à l'air comprimé n'ont pas donné de bons résultats. La situation aurait même empiré par l'utilisation de ce procédé.

Durée de vie des forages : 8 ans en moyenne

CONTEXTE ECONOMIQUE

400 000 F/an soit : entretien 260 000 F  
renouvellement de 15 forages par an  
140 000 F

L'influence de l'injection s'étend sur 1 200 ha répartis sur les  
deux rives. D'où charge annuelle par ha : 330 F.

---

## ANNEXE II

### ESSAI DE CLARIFICATION TERMINOLOGIQUE (1)

Recharge, alimentation, réalimentation, suralimentation, raveinement, renforcement, enrichissement, assortis ou non des qualificatifs "artificiel", tels sont entre autres les termes employés dans la littérature. Lesquels convient-il de garder en usage ?

Il y a lieu tout d'abord de distinguer la cause, les effets et le but de l'injection.

#### a) la cause

C'est l'homme qui intervient, et ceci justifie semble-t-il le choix d'un terme général.

#### b) les effets

Ils ne varient pas fondamentalement selon que l'homme intervient ou non, et comportent deux aspects essentiels, étroitement liés :  
-piézométrique d'une part (élévation de pression, de charge hydraulique)  
-volumétrique de l'autre (accroissement de réserve).

#### c) les buts

Ils sont affaire d'appréciation de la part des utilisateurs. La terminologie ne devrait donc pas s'en préoccuper.

#### Choix d'un terme général

L'expression "alimentation artificielle" paraît la meilleure parce qu'ayant une acception non restrictive, non sujette à confusion, et aussi parce qu'elle montre qu'il s'agit d'une intervention autre que celle de la nature même :

-alimentation artificielle: action de l'homme consistant à apporter de l'eau à un réservoir aquifère souterrain.

Cette expression paraît valable quels que puissent être le procédé utilisé et les buts poursuivis.

---

(1) voir en outre chapitre III figure 4, pour les termes : front de fuite (ou d'étalement), front d'injection (ou de l'eau injectée), cône de relèvement.

Choix de termes en fonction des effets (ou des résultats)

a) effet piézométrique

Le terme "recharge" présente le grand avantage d'être le plus précis à cet égard.

Recharge (artificielle): accroissement de pression provoquée par une alimentation (artificielle).

La recharge se définit normalement en hauteur d'eau. Elle peut également être exprimée en vitesse si on la rapporte au temps.

b) effet volumétrique

Aucun terme courant ne désigne spécifiquement cet effet. Mais à partir du moment où l'on adopte un terme pour l'effet piézométrique, l'effet volumétrique en appelle un autre.

Justification plus importante encore : la nécessité d'éviter l'utilisation du "coefficient d'emmagasinement" en alimentation artificielle. En effet, la teneur en eau résiduelle d'un terrain n'est pas la même en tout point d'une verticale et dans le cas d'une nappe libre la variation de l'"emmagasinement" peut être différente suivant le sens d'évolution des niveaux piézométriques. (cf. au chapitre III, le paragraphe "loi d'évolution de la nappe sous l'effet d'une injection").

Des trois termes possibles : emmagasinement, emplissage et remplissage (et dont le premier prête à confusion : il appartient à la terminologie du pompage), c'est "remplissage" (en anglais :replenishment) qui nous paraît préférable pour désigner l'effet volumétrique. Cet effet pourrait donc être défini par le nombre sans dimension suivant :

R, coefficient de remplissage :

Volume d'eau emmagasiné par un prisme vertical de la nappe, de section unité, pour une élévation unité du niveau piézométrique.

Examen des termes anciennement utilisés

-Le terme de suralimentation semble devoir être écarté, parce que trop général, même en précisant qu'il désignerait normalement un phénomène non pas naturel mais dû à l'intervention humaine, que son effet sur la nappe soit recherché ou non. Certaines nappes sont, par exemple, suralimentées par l'irrigation. En outre le terme suralimentation est aussi utilisé parfois par certains auteurs pour désigner des apports supplémentaires naturels à une nappe (par une limite d'alimentation).

-Réalimentation appartient plutôt à la terminologie du pompage. Il désigne le processus par lequel une alimentation supplémentaire tend à compenser un déséquilibre produit par l'intervention de l'homme. C'est ce qu'on appelle plus précisément la "réalimentation induite" (induced recharge des auteurs américains).

-Renforcement, raveinement sont des termes obscurs à proscrire.

-----

ANNEXE III

BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE

1. ABERBACH S.H.,  
SELLINGER A., 1967  
Review of artificial groundwater recharge  
in the coastal plain of Israël  
Bull. AIHS - Mars 1967
2. ACHTEN A., 1947  
Un exemple de réalisation récente avec  
réalimentation artificielle de la nappe  
Techn. Sanitaire et Municip. Vol 42, 1947.
3. AMBROGGI R., HAZAN R.,  
MOULLARD L., SABARLY F. (1960)  
Drainage par injection à l'aide de forages  
absorbants. Périmètre d'irrigation de la  
plaine des Doukkalas (Maroc).  
Soc. Hydrot. Fr. VIe journées de l'Hydrau-  
lique Nancy, 1960
4. ARCHAMBAULT J.,  
MARGAT J., 1967  
L'alimentation artificielle des nappes en  
France.  
Symp. Haïfa AIHS pub. n°72
5. BEAR J., LEVIN O., 1967  
The optimal yield of an aquifer  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72
6. BEAR J., JACOB M., (1965)  
On the movement of water bodies injected  
into aquifers  
Journal of Hydrology - Vol. III n° 1
7. BEREND J.E., 1967  
An analytical approach of the clogging  
effect of suspended matter  
Bull. AIHS - Juin 1967
9. BIEMOND C., 1960  
Les eaux d'Amsterdam  
Tech. et Sc. Municip. n° 331, 1960
10. BOOT U.S. - LTALKO -  
FALOVSKY AA., 1967  
Electromodelling as an effective method of  
prognosticating resources of underground  
water during their replenishment  
Symp. Haïfa. Bull. AIHS pub. n° 72

11. BOUWER H., 1967  
Field measurement of saturated hydraulic conductivity in initially unsaturated soil  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72
12. BRASHEARS M.L. 1941  
Ground water temperature on Long Island, N.Y. as affected by recharge of warm water  
Economic Geology vol. XXXVI - Déc. 1941 n° 8
13. BRASHEARS M.L. 1946  
Artificial recharge of ground-water on Long Island, N.Y.,  
Economic geology vol. XXI Août 1946 n° 5
14. BRASHEARS M.L., 1953  
Recharging ground water reservoirs with well and basins  
Mining Enfin. - Oct. 1953
15. BUCHAN S., 1954  
Artificial replenishment of aquifers
16. BURAS N., 1967  
Systems engineering and aquifer management  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72
17. CASATI A., 1961  
Les ouvrages de réalimentation de la nappe de la Hard à Muttentz (Bâle)  
Techn. et Sciences Municip. Déc. 1961
18. CASTANY G., 1967  
Structures hydrogéologiques et régularisation des ressources en eau  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72
19. CHARMONNAN S., CARTENS M.R., MAY G.D., 1967  
A fresh water canal as a barrier to salt water intrusion  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72
20. COHEN P., DURFOR C.N., 1967  
Artificial recharge experiments utilizing renovated sewage plants effluents.  
A feasibility study at Bay-park, New-York  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72

21. DEGALLIER R., 1966  
Note sur l'alimentation artificielle des nappes  
souterraines  
Comité Inter-Africain d'Etudes hydrauliques  
(C.I.E.H.)
22. DEUTSCH M., 1967  
Artificial recharge by induced inter-aquifer  
leakage  
Symp. Haïfa - A.I.H.S. pub. n° 72
23. DUCELLE A., GUELTON M.,  
MULLER-FEUGA R., 1954  
Exemple d'alimentation artificielle de la  
nappe d'un bassin alluvial de 5 000 hectares  
en Basse-Durance  
Com. Intern. Irrig. Drainage 2è congrès  
Alger 1954
24. ENSLIN J.F., 1961  
Artificial recharge of ground-water with spe-  
cial reference to the Union of South Africa  
Conf. Inter. Africaine sur l'Hydrogéologie  
Nairobi 1961
25. FALOVSKY A.A., 1967  
The present of the study of the problems of  
ground water "enrichment" in the Ukrainian  
S.S.R.  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72
26. FAZOLD A., BIRO Z., TAKACS S.,  
SCHIEFNER K., 1967  
Investigation on water quality at artificial  
recharge of ground water  
Symp. Haïfa - A.I.H.S. pub. n° 72
27. Dr. FRANCK W.H., 1967  
Alimentation intermittente des filtres à sable  
destinés à l'enrichissement artificiel des  
eaux souterraines  
Bull. A.I.H.S. Juin 1967
28. Dr. FRANCK W.H., 1967  
Recherches récentes sur la recharge des  
eaux souterraines par des filtres à sable  
opérant lentement  
Bull. A.I.H.S. Juin 1967
29. FRANCKEL R.J. 1967  
Economics of artificial recharge for municipal  
water supply  
Symp. Haïfa A.I.H.S. pub. n° 72

30. GARRAUD J., 1965 Conditions d'exploitation du dispositif de réalimentation de la nappe le long du canal de fuite de Donzère-Mondragon  
Société Hydrologique Française. Vol.I, 1965
31. GLAZUNOV I.S., 1967 Artificial formation of fresh ground water lenses by means of wells  
Symp. Haïfa AIHS pub. n° 72
32. GUELTON H., MULLER-FEUGA R., RUBY P., 1957 Alimentation artificielle de la nappe alluviale de la Basse-Durance  
Comité International Irrigation et Drainage 3è Congrès San Francisco 1957
33. GUELTON M., MULLER-FEUGA R., RUBY P., 1965 Alimentation artificielle des alluvions de la Basse-Durance  
Mém. et Trav. de la Soc. Hydrot. Fr. Vol.1 1965
34. HARPAZ Y., 1965 Field experiments in recharge and mixing through wells  
Tahal, Water Planning for Israël LTD. Techn. Rapport n° 17 - Mars 1965
35. HARPAZ Y., SCHWARZ J., 1967 Operating a limestone aquifer as a reservoir for a water supply system  
Bull. A I H S Mars 1967
36. HAZAN R. 1961 Nappes de Berrechid et de Charf-el-Akab. Mécanismes d'alimentation et d'évaluation des ressources en eaux souterraines. Recharge artificielle  
A I H S Colloque d'Athènes 1961
37. HUISMAN L., 1967 Artificial recharge for public water supplies in urbanized regions  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
- 37<sup>bis</sup> JACOB C.E., LOHMAN SW., 1952 Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extension aquifer AM. Geophys. Union. Trans V. 33 n° 4
38. JANSÁ OVE. 1952 Communication (pp. 160-191)  
A I D E Paris 1952
39. JANSÁ O.V.E., 1954 Artificial ground-water supplies of Sweden  
A I H S Rome 1954

40. JOHNSON T.A. PEETERS H.U. 1967 Regional integration of surface and ground water resources  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
41. JOHNSON A.I. SNIEGOCKI R.T., 1967 Comparaison of laboraty and field analyses of aquifer and well characteristics at an artificial recharge well site  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
42. KARPOFF R., 1961 Réalimentation du bassin de Charf-el-Akab à Tanger  
L'eau, Déc. 1961
43. LAVERTY F.B. 1946 Cornlating flood control and water supply, Los Angeles coastal plain  
Am. Soc. Civil Engin. Trans., V.111, pp.1127 1158
- 43<sup>bis</sup> LEMOINE J., 1962 Les ressources aquifères du bassin d'Akjoujt et des bassins avoisinants  
Archives MICUMA Rapport BURGEAP R.308
44. MAASLAND D.E.L., BITTINGER M.W. 1967 Drainage of a saline water aquifer recharged by fresh water  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
45. MASSOULIE G., 1961 Réalimentation de la nappe de Croissy  
L'Eau - Mai 1961
46. MASSOULIE G., 1966 Réalimentation de la nappe de Croissy.  
Techniques et Sciences Municipales. Nov. 1966
47. MERCADO A., 1966 Recharge and mixing experiments in the Haïfa bay field  
Tahal, water Planning for Israël L T D Techn. report n° 18 - Avril 1966
48. MERCADO A, 1967 The spreading pattern of injected water in a permeability stratified aquifer  
Sump. Haïfa A I H S pub. n° 72
49. MOTTS W.S., CUSHMAN R.L., 1964 An appraisal of the possibilities of artificial recharge to ground water supplies in part of the Roswell basin, New Mexico  
U S G S Water supply Paper 1785
50. PHILIP J.R., 1958 The theory of infiltration  
Soils Sciences 83 à 85, 1957 à 1958

51. REBHUN M. et HAUSER V.L. Clarification of turbid water with polyelectrolytes for recharge through wells  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
52. RODES L.T. 1965 Réalimentation de los aquiferos subterraneos en los vallés de los rios Llobregat y Besos  
Soc. General de Aguas de Barcelona
53. SERBANESCU L., ROMAN Z., 1967 L'alimentation artificielle des nappes aquifères à l'aide de bassins d'infiltration  
Studii de hidrogeologie T.V. Bucarest 1967 p.115-120
54. SCHNEEBELLI G. 1954 Etudes des facteurs qui déterminent le comportement d'une nappe phréatique lors d'une réalimentation  
A I H S Rome 1954 t.2
55. SCHNEIDER R., 1967 Geologic and hydrologic factors related to artificial recharge of the carbonate-rock aquifer system of central Israël  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
56. SMITH H.F., 1967 Artificial recharge and its potential in Illinois  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
57. SNIEGOCKI R.T., ENGLER K., BAYLEY, F.H., REED J.E., 1963 - 1965 Artificial recharge of ground-water. Grand-Prairie Région, Arkansas)  
U S G S Papers série 1615 1963 à 1965
- 1615 A. Studies of artificial recharge in the Grand Prairie Region, Arkansas Environment and history
- 1615 B. Hydrogeology of a part of the Grand Prairie Region, Arkansas
- 1615 C. Equipement and controls used in studies of artificial recharge in the Grand Prairie Region Arkansas
- 1615 D. Principles of siphons with respect to the artificial recharge studies in the Grand Prairie Region, Arkansas
- 1615 E. Geochemical aspects of artificial recharge in the Grand Prairie Region, Arkansas
- 1615 F. Problems in artificial recharge through wells in the Grand Prairie Region, Arkansas
- 1615 G. Testing procedures and results of studies of artificial recharge in the Grand Prairie Region, Arkansas.

58. STERNAUR., 1967 Artificial recharge of water through wells. Experiences and techniques  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
59. SUTTER M., 1954 High rate artificial ground-water recharge at Peoria, Illinois U S A  
A I H S Rome 1954
60. TASK GROUP 2440 R, 1965 Experiences with injection wells for artificial Ground water recharge  
Journ. Am. Wat. Works Ass. Vol. 57, n° 5, Mai 1965
61. TASK GROUP 2440 R. 1967 Artificial ground-water recharge.  
Task group report. Journ. of Am. waterwoks Ass. Vol. 59 n° 1 Janvier 1967
62. TIEMER K. 1967 Sur le problème de l'emmagasinement souterrain des eaux superficielles par infiltration artificielle dans des zones de rabattement  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
63. TIXERONT J., DANIEL J.M. Alimentation et suralimentation des nappes souterraines  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
64. VACHAUD G., 1967 Etude de la valeur du coefficient d'emmagasinement des nappes à surface libre, considérant l'écoulement dans la zone non saturée  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
65. VAN T CHOW (Ed.) 1965 Advances in hydro-science  
Vol. II 1965
66. VENHUISEN KD., 1967 The storage capacity in the dune-water catchment aera of Amsterdam and its effect on the water quality  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
67. VIBERT A., 1965 Un aspect essentiel de la réalimentation artificielle des nappes  
L'Eau Mai 1965
68. WARNER D.L. DOTY L.F. Chemical reaction between recharge water and aquifer water  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72

69. WEGENSTEIN M., 1954 La recharge des nappes souterraines au moyen de puits centraux et galeries d'alimentation horizontales  
A I H S Rome 1954
70. WIENER A., 1967 The role of advanced techniques of ground-water management in Israël water supply system  
Bull. A I H S Juin 1967
71. ZAJICEK V., 1967 Hydrological documentation for the exploitation of reservoirs in impermeable solid rock for the purpose of artificial infiltration  
Symp. Haïfa A I H S pub. n° 72
72. ZAOUI J., 1965 Le problème de l'alimentation artificielle des nappes : puits d'injection , intervention des modèles mathématiques.  
S H F Vol. I, 1965
73. X..... 1952 Replenishment of ground-water in the catchment area of the Leyden dune-water company  
A.I.D.E. Paris 1952
74. DAVIS etc..... 1964 Use of ground-water reservoirs of storage of surface water in the San Joaquin Valley (Californie)  
U S G S Water Supply Paper 1618.