



association française pour l'étude des eaux  
reconnue d'utilité publique par décret du 4 juillet 1974  
centre national de documentation et d'information sur l'eau

2 1 2 . 2

8 3 A M

**AMELIORATION DE LA RESSOURCE EN EAU**  
**LA REALIMENTATION DES NAPPES**

ETUDE TECHNIQUE DE SYNTHESE

212-2-83AM-6134

**AMELIORATION DE LA RESSOURCE EN EAU**  
**LA REALIMENTATION DES NAPPES**

*Réalisée par F. FJLDJER*

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE  
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
AND SANITATION, IJC  
P.O. Box 90, 2500 LE The Hague  
Tel. (070) 814511 ext. 141/142

RN: 6134  
LO: 212.2 83Am

## S O M M A I R E

---

INTRODUCTION .....	9
 <u>CHAPITRE I : LES EAUX DE RECHARGE</u>	
A - RECHARGE PAR EAUX DE RIVIERE .....	13
1) <i>Remarques préliminaires</i> .....	13
2) <i>Eaux destinées à être infiltrées dans des bassins</i> .....	13
3) <i>Eaux destinées à l'injection</i> .....	15
B - RECHARGE PAR EAUX USEES .....	15
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE .....	19
 <u>CHAPITRE II : HYDROGÉOLOGIE</u>	
A - L'EAU DANS LE SOL .....	23
1) <i>Rappel de notions générales d'hydrogéologie</i> .....	23
2) <i>Répartition de l'eau dans le sol</i> .....	25
3) <i>Bilan d'une nappe</i> .....	27
4) <i>Caractérisation des unités géologiques favorables pour la recharge artificielle de nappe</i> .....	28
B - PHYSIQUE D'UNE OPERATION DE RECHARGE .....	30
1) <i>Cas des bassins d'infiltration</i> .....	30
2) <i>Cas des puits d'injection</i> .....	31
C - METHODES D'INVESTIGATION DES PARAMETRES D'UNE OPERATION DE RECHARGE ARTIFICIELLE .....	32
1) <i>Mesure de la conductivité hydraulique ou perméabilité au sens de Darcy (écoulement saturé)</i> .....	32
2) <i>Mesure de la conductivité hydraulique verticale (écoulement non saturé)</i> .....	32
3) <i>Mesure de la transmissivité et du coefficient d'emménagement</i> .....	32
4) <i>Dimensions et structure de l'aquifère</i> .....	32
5) <i>Etude de l'écoulement</i> .....	33
D - POUVOIR EPURATEUR DU SOL .....	33
1) <i>Rétention des matières en suspension</i> .....	33
2) <i>Rétention des germes pathogènes</i> .....	34
3) <i>Elimination du carbone organique</i> .....	36
4) <i>Rétention des éléments "traces"</i> .....	37
5) <i>Rétention des sels solubles</i> .....	37
6) <i>Rétention de l'azote</i> .....	37

7) Rétention du phosphore .....	38
8) Exemples - Comparaison des systèmes de recharge artificielle (puits d'injection et bassins d'infiltration) .....	38
9) Conclusion .....	39
E - CONCLUSIONS GENERALES .....	41
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE .....	43

### CHAPITRE III : DISPOSITIFS D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE NAPPE SOUTERRAINE

A - DISPOSITIFS D'INFILTRATION .....	49
I - CONDITIONS GENERALES D'UTILISATION .....	49
II - PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT : CAS D'UN BASSIN .....	49
1) Processus complet de l'infiltration provoquée .....	49
2) Apparition d'une couche colmatante à la surface du sol pendant la submersion .....	50
III - LES DISPOSITIFS D'INFILTRATION .....	52
1) Les bassins d'infiltration .....	52
2) Les fossés, les canaux, les fosses .....	57
3) Lits de rivière aménagés .....	57
4) Epandage souterrain par réseau de drains .....	59
5) Puits filtrant .....	60
IV - COLMATAGE DES DISPOSITIFS D'INFILTRATION .....	60
1) Colmatage par désorganisation de la porosité du sol .....	61
2) Colmatage par bouchage des pores du sol .....	61
V - REMEDES CONTRE LE COLMATAGE : GESTION DES DISPOSITIFS D'INFILTRATION .....	64
1) Méthodes permettant de réduire le colmatage .....	64
2) Gestion des dispositifs d'infiltration .....	64
B - DISPOSITIFS D'INJECTION .....	66
I - CONDITIONS GENERALES DE FONCTIONNEMENT .....	66
II - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PUIITS D'INJECTION .....	67
III - LES PUIITS D'INJECTION .....	67
1) Construction .....	67
2) Aménée de l'eau dans le puits .....	69
3) Taux d'injection .....	69
IV - COLMATAGE DES DISPOSITIFS D'INJECTION .....	70
1) Processus mécaniques .....	71
2) Processus chimiques .....	71
3) Processus biologiques .....	71
V - REMEDES CONTRE LE COLMATAGE ET GESTION DES DISPOSITIFS D'INJECTION .....	72
1) Méthodes pour la réduction du colmatage .....	72
2) Gestion des puits d'injection .....	75
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE .....	79

## CHAPITRE IV : DONNÉES ÉCONOMIQUES D'UNE OPÉRATION D'ALIMENTATION

### ARTIFICIELLE DE NAPPE SOUTERRAINE

A - REVENUS APPORTES PAR UNE OPERATION DE RECHARGE .....	83
1) <i>Revenus directs</i> .....	83
2) <i>Revenus indirects</i> .....	83
B - COUTS D'UNE OPERATION D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE NAPPE .....	84
1) <i>Coût des études</i> .....	84
2) <i>Travaux de construction</i> .....	84
3) <i>Fonctionnement et entretien</i> .....	88
4) <i>Coût global</i> .....	88
C - ETUDE DE L'OPPORTUNITE ECONOMIQUE D'UNE OPERATION DE RECHARGE ARTIFICIELLE - COMPARAISON AVEC D'AUTRES METHODES DE MISE EN VALEUR DES RESSOURCES EN EAU .....	92
1) <i>Comparaison entre un bassin d'infiltration et un puits d'injection</i> .....	92
2) <i>Comparaison entre une installation de recharge artificielle et une unité de traitement des eaux</i> .....	92
3) <i>Comparaison entre une installation de recharge artificielle et une adduction d'eau</i> .....	93
4) <i>Comparaison entre le stockage de surface et le stockage souterrain</i> .....	95
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE .....	97

## CHAPITRE V - LES INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE DE

### NAPPE DANS LE MONDE

A - INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF LE STOCKAGE D'EAU .....	105
B - INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF LE SOUTIEN D'UNE NAPPE D'EAU SOUTERRAINE .....	116
C - INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF LA CONSTITUTION D'UNE BARRIERE HYDRAULIQUE CONTRE L'INTRUSION D'EAUX SALEES .....	137
D - INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF L'EPURATION NATURELLE DES EAUX PAR PASSAGE DANS LE SOL .....	154
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE .....	165
CONCLUSION .....	171



## INTRODUCTION





Face aux besoins en eau sans cesse grandissants, le concept de recharge artificielle des nappes souterraines apparaît comme étant un moyen efficace d'établir une meilleure gestion des ressources en eau.

En effet, les objectifs visés par une recharge artificielle de nappe peuvent être multiples :

- restauration d'une nappe surexploitée
- stockage d'eau en vue d'une utilisation ultérieure
- épuration naturelle des eaux usées par le sol
- barrière hydraulique contre la progression des eaux salées, notamment d'origine marine en exploitation côtière
- régularisation thermique des eaux d'un circuit de refroidissement
- stockage d'énergie sous forme d'eau chaude.

Remarque : les deux derniers points, faisant intervenir les capacités thermiques du sol (diffusion, emmagasinement), ne sont pas traités dans cette étude.

En contrecarrant le déficit en eau d'origine souterraine, la recharge artificielle apporte les bénéfices suivants :

- mise en valeur des terres par augmentation des disponibilités en eau (notamment pendant les périodes de sécheresse en pays semi-aride et aride)
- maintien de la vie végétale à la surface du sol en soutenant le niveau de la nappe
- expansion humaine et industrielle de régions jusqu'alors gérées par le manque d'eau.

Les dispositifs de recharge artificielle sont principalement de deux types :

- infiltration dans des bassins ou épandage superficiel : l'eau percole à travers la zone non saturée du sol avant d'atteindre la nappe. Cette technique peut se pratiquer presque sous tous les climats, à condition cependant que celui-ci ne soit pas à pluviométrie trop élevée, et d'autant mieux si le climat est aride ou semi-aride. Par ailleurs, le sol doit avoir certaines caractéristiques que nous préciserons.

L'avantage principal des bassins est de pouvoir recevoir des eaux quasi-brutes : en effet, par passage dans le sol, les eaux de recharge subissent une épuration naturelle pratiquement totale.

- Injection dans des puits : l'eau est directement amenée au niveau de la nappe. Ce procédé est notamment utilisé lorsqu'il existe une couche imperméable entre la surface du sol et la nappe. L'action épuratrice du sol intervenant peu pour les eaux d'injection, le traitement de celles-ci doit être plus élaboré que dans le cas de bassins.

Le choix d'un procédé dépend de plusieurs paramètres dont les principaux sont donc :

- les caractéristiques hydrogéologiques du sol
- la qualité des eaux de recharge et leur compatibilité vis-à-vis des eaux natives du gisement.

.../...

Enfin, la réussite d'une opération de recharge est directement liée au phénomène de colmatage qui tend à freiner l'infiltration de l'eau de recharge dans les bassins ou les puits. Les origines du phénomène de colmatage sont, là aussi, diverses : physiques, chimiques, biologiques. Nous ferons un inventaire des remèdes contre le colmatage mais il faut déjà souligner que chaque opération de recharge est un cas particulier et que seuls des essais à long terme et in situ permettent d'en dégager les paramètres.

---

- CHAPITRE I -

LES EAUX DE RECHARGE

---



Avant d'exposer l'origine des eaux de recharge et les traitements éventuels que l'on doit leur faire subir, il serait utile d'introduire la notion de compatibilité entre les eaux de recharge et les eaux natives du gisement. On peut définir trois domaines de compatibilité, physique, chimique et biologique :

- . compatibilité physique : elle concerne le pH, la teneur en matières en suspension ou MES;
- . compatibilité chimique : elle concerne l'action des gaz dissous, la teneur en MES, en fer, en manganèse, en calcium, en magnésium, en silice ainsi que la dureté de l'eau;
- . compatibilité biologique : elle concerne la présence de pathogènes susceptibles de polluer les eaux souterraines.

Les traitements éventuels des eaux de recharge visent à protéger les eaux du gisement vis-à-vis de toute pollution pouvant entraîner une dégradation irréversible de sa qualité.

## A - RECHARGE PAR EAUX DE RIVIÈRE

### 1) Remarques préliminaires

- a) L'analyse quantitative de la recharge naturelle de la nappe alluviale par la rivière elle-même est essentielle pour pouvoir juger de l'efficacité d'une recharge artificielle. En effet, cette analyse permet de déterminer les débits réellement utiles par la recharge artificielle d'un aquifère donné.
- b) L'analyse qualitative des eaux de rivière permet d'en connaître le degré de pollution ainsi que la teneur en MES. Il faut remarquer que ces deux facteurs peuvent être directement influencés par le régime de la rivière elle-même. Ainsi:
  - . en période d'étiage, la pollution des eaux peut être plus importante qu'à l'ordinaire;
  - . en période de crue, un transport solide important peut apparaître augmentant du même coup la teneur en MES (F 2028).

Les études en vue d'une recharge artificielle par des eaux de rivière doivent donc se faire sur une large plage de valeurs des débits.

La pollution et la teneur en MES jouant un rôle très important vis-à-vis du phénomène de colmatage, le pompage en rivière peut donc être intermittent ou continu suivant les tolérances admises pour la pollution et la teneur en MES des eaux de recharge.

### 2) Eaux destinées à être infiltrées dans des bassins (F 2518, F 3469)

Suivant le degré de pollution et la teneur en MES de la rivière, les eaux peuvent subir les traitements suivants :

.../...

- pré-traitement : dégrillage suivi d'une simple décantation. C'est le cas des oueds et des cours d'eau ne présentant pas de pollution notable.

N.B. : les anciennes sablières se présentent comme étant d'excellents bassins de décantation.

- traitement primaire en station : injection de coagulants, décantation et filtration sur sable pour réduire la teneur en MES et la demande biologique en oxygène des eaux.

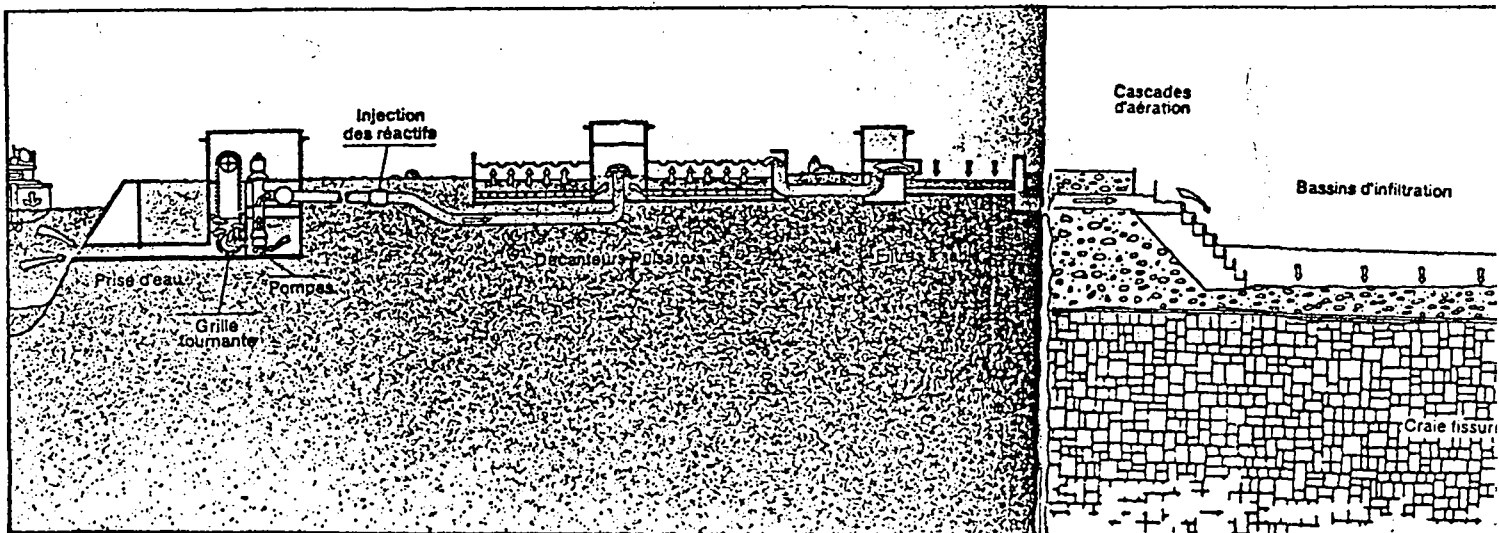
Exemple :

- Croissy. (eau de Seine) - la figure 1 donne un schéma de l'installation (G 3663)
- Moulle (eau de l'Aa) (66/27873, 66/25917, 66/27956)
- Appoigny (eau de l'Yonne) (G 1947).

Remarque : dans le cas d'épandage superficiel des eaux de recharge, on ne procède pas à une stérilisation lors du traitement. En effet, la chloration aurait le grand inconvénient de détruire dans les bassins l'action épuratrice des bactéries diverses qui oxydent et minéralisent les différents produits organiques présents dans les eaux (G 3459).

FIGURE 1

EXEMPLE DE CROISSY



(Extrait du Document G 3663)

### 3) Eaux destinées à l'injection (F 3469, F 2028)

Remarque préliminaire : les eaux d'injection, d'une manière générale, doivent être débarrassées de toute pollution susceptible d'altérer la qualité des eaux du gisement et notamment des matières toxiques non éliminables par filtration naturelle. De plus, les eaux d'injection doivent être chimiquement compatibles avec les eaux du gisement.

En général, en plus d'un traitement primaire classique, les eaux de rivières destinées à l'injection subissent un traitement secondaire plus ou moins élaboré en fonction de leur degré de pollution. Ce traitement vise principalement à désaérer l'eau et à la stériliser avant injection.

Exemples : (F 2028)

- . En Israël (eaux du Lac de Tibériade)
- . En Californie (eaux des torrents de la Sierra Nevada).

### 3 - RECHARGE PAR EAUX USÉES

Le niveau de traitement des eaux usées destinées à la recharge artificielle dépend très largement de l'origine de celles-ci (domestique ou industrielle) et aussi de la nature des terrains de recharge.

Le tableau 1 (extrait de 66/04561) rappelle la nature des pollutions en fonction de l'origine des eaux usées.

Le tableau 2 (G 6501) donne, à titre indicatif, les recommandations du Service de Santé de la Californie pour l'utilisation à des fins de recharge artificielle d'eaux usées.

Le tableau 3 (G 6501) montre par des exemples la diversité des traitements que l'on peut appliquer suivant les paramètres de la recharge.

#### Conclusions

Comme nous l'avons déjà souligné dans l'introduction, chaque opération de recharge doit être traitée comme un cas particulier. Le niveau de traitement requis pour les eaux de recharge en est une preuve. Aussi, seuls des essais in situ et à long terme, associés à l'expérience du professionnel, peuvent définir les traitements nécessaires des eaux de recharge. Cette étape est importante car elle conditionne la rentabilité de l'ensemble de l'opération de recharge, le coût du traitement entrant pour une part importante dans le coût global (F 2028, G 6501).

.../...

TABLEAU 1

<u>Sources d'eaux usées</u>	<u>Types de pollution</u>
- <u>Eaux usées urbaines</u>	
. non traitées	composés organiques et minéraux, matières en suspension, faibles teneurs en métaux lourds et en toxiques. Très forte teneur en DBO. Biodégradable ou non dégradables.
. traitées	composés organiques et minéraux, faibles teneurs en métaux lourds et en toxiques. Substances biodégradables et non dégradables.
. fosses septiques	surtout des matières organiques. Biodégradable.
- <u>Eaux usées industrielles</u>	
. eau de refroidissement	chaleur.
. industries alimentaires	composés organiques et matières en suspension surtout. DBO élevé. Particulièrement biodégradables.
. industrie du papier	composés organiques et minéraux. En partie biodégradable. Quelques matières solides organiques en suspension.
. industrie chimique et traitement des métaux	composés organiques et minéraux y compris des métaux lourds, des toxiques et des substances dangereuses. Selon le procédé certaines substances sont biodégradables.
. industrie du pétrole	composés organiques biodégradables et non biodégradables surtout. Nombreux toxiques et substances dangereuses.
- <u>Irrigation.</u>	déchets organiques et minéraux, substances nutritives, sels de lessivage du sol, substances biodégradables ou non biodégradables, matières en suspension.
- <u>Ruissellement urbain et nettoyage des mers</u>	composés organiques et minéraux, fortes charges en DBO, substances nutritives, pesticides, matières en suspension en partie biodégradables.
- <u>Eau de crues</u>	composés organiques et minéraux, matières en suspension en partie biodégradables. Eminemment variable selon l'utilisation du sol.

(traduction du tableau 1 extrait du Document 66/04561)

.../...



TABLEAU 2

NIVEAUX DE TRAITEMENT RECOMMANDES POUR LES EAUX USEES EPUREES  
UTILISEES A LA RECHARGE DES NAPPES SOUTERRAINES

par épandage superficiel	ou par injection directe
1. Vérification de l'inexistence de décharges d'effluent industriels toxiques dans les eaux usées utilisées	1. Vérification de l'inexistence de décharges d'effluent industriels toxiques dans les eaux usées
2. Oxydation biologique normale (traitement secondaire)	2. Oxydation biologique normale (traitement secondaire)
3. Adsorption sur charbon actif (temps de contact : 30 mn; demande chimique d'oxygène résiduelle : moins de 5 mg/l)	3. Désinfection correcte (chlorination)
4. Epandage avec percolation de l'effluent dans la zone aérobie non saturée du sol non remaniée : - profondeur minimale de la nappe : 3 mètres - une semaine d'épandage alternée avec 2 semaines d'assèchement	4. Coagulation-floculation chimique
5. Dilution par une quantité égale d'eau souterraine naturelle	5. Décantation
6. L'eau de recharge doit rester dans la nappe pendant un an avant d'être extraite	6. Filtration rapide sur sable
7. La qualité de l'eau souterraine doit être régulièrement surveillée	7. Adsorption sur charbon actif
	8. Déminéralisation par osmose inverse
	9. Aération par aspersion pour l'élimination des composés organiques volatils
	10. Dilution par une quantité égale d'eau souterraine naturelle
	11. L'eau de recharge doit rester dans la nappe pendant un an avant d'être extraite
	12. La qualité de l'eau souterraine doit être régulièrement surveillée

(Extrait du Document G 6501)

.../...

TABLEAU 3

PRINCIPALES INSTALLATIONS DE RECHARGES DE NAPPE SOUTERRAINES EN CALIFORNIE  
UTILISANT LES EAUX USEES EPUREES

Nom de la station de récupération d'eaux usées	Procédés de traitement des eaux usées	Méthode de recharge des eaux souterraines	Problème à résoudre	Débit annuel récupéré en millions de m <sup>3</sup>
San José Creek (Whittier)	DP, BA, CF, FR, Ch	Epandage superficiel	Réalimentation de la nappe souterraine	166
Whittier Narrow	DP, BA, CF, FR, Ch	Epandage superficiel	Réalimentation de la nappe souterraine	87
Water Factory 21 (Orange County)	DP*, BA*, CF, FR, AAeA, ACA, OI, Ch	Injection directe	Barrière contre l'infiltration d'eau marine (et réalimentation)	63
Chino Basin (Ontario)	DP, LB	Epandage superficiel	Réalimentation de la nappe souterraine	3,2
Palo Alto	DP, BA, CF, FR, Ch, Ozonisation	Injection directe	Barrière contre l'infiltration d'eaux marines	2,3

Procédés de traitement =

Décantation primaire	DP
Boues activées	BA
Coagulation floculation	CF
Filtration rapide	FR
Lits bactériens	LB
Adoption sur charbon actif	ACA
Chloration	Ch
Aération par aspersion pour l'élimination de l'ammoniaque	AAeA

\* En ce qui concerne la station "Water Factory 21", le traitement primaire et secondaire de l'effluent a lieu préalablement à la station de traitement du Comté d'Orange.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- F 2028 BIZE J., BOURGUET L., LEMOINE J.  
"L'alimentation artificielle des nappes souterraines"  
Ed. Masson & Cie, 1972, 199 pages
- F 2518 HUISMAN L., WOOD W.E.  
"La filtration lente sur sable"  
OMS, Genève, 1975, 133 pages
- F 3469 X ...  
"Health aspects of wastewater recharge"  
Water Information Center, New-York, 1978, 240 pages
- G 2264/Bis X ...  
"La mécanique des fluides et l'environnement - prévision et maîtrise de la qualité de l'eau et de l'air"  
14ème Journées de l'Hydraulique, Paris, Sept. 1976,  
Question 4 : les eaux souterraines, 48 pages
- G 3459 DEVILLERS G.  
"L'alimentation artificielle des nappes souterraines - Exemple de la nappe de Croissy"  
Journées Information Eaux, 1976, 14 pages
- G 3663 X ...  
"Plaquette de présentation de l'installation de recharge artificielle de Croissy"  
S.L.E.E., s.d., 16 pages
- G 6212 X ...  
"Wastewater reuse for groundwater recharge"  
Symposium Office of Water Recycling, Californie, 1980, 345 pages
- G 6230 X ...  
"Possibilités d'épandage des eaux usées urbaines"  
Rapport Agence R.M.C., 1979, 371 pages
- G 6295 BRESSON G.  
"Injection dans le sous-sol des effluents traités à la station d'épuration de la ville de St-Jean-de-Monts"  
Rapport D.D.A. Vendée, 1980, 74 pages
- G 6501 TAKASHI ASANO, GHIRELLI R.  
"Réutilisation des eaux usées pour la recharge des eaux souterraines et l'irrigation agricole"  
Conférence OMS, Alger, 1980, p. 1-15
- G 7220 BIZE J.  
"Recharge artificielle des nappes"  
P.N.U.D., Compte-rendu de mission, Sept.-Oct. 1981, 45 pages

- G 7221 X ...  
"L'aménagement d'infiltration des eaux usées de Port-Leucate"  
Soc. Aménag. Mixte d'Equip. et d'Aménag. de l'Aude, Novembre 1981,  
45 pages
- 66/04561 CALLAHAN J.T.  
"Recycling of fresh water - the management and protection of  
ground water"  
Tiré à part, 16 pages
- 66/16815 SCHMIDT C.J., CLEMENTS E.V., SHELTON S.P.  
"A survey of practices and regulations for reuse of water  
by ground water recharge"  
J.A.W.W.A., 1978, 70, n° 3, p. 140-147
- 66/23044 ASANO T., GHIRELLI R.P., WASSERMANN K.L.  
"Recharge de nappe par eaux usées épurées"  
J.W.P.C.F., 1979, 51, n° 9, 24 pages
- 66/25917 MARTIN F., THEBAULT P.  
"Réalimentation de nappe par de l'eau de rivière traitée"  
Liaison Cortambert, 1980, n° 10, p. 31-36
- 66/27873 MARTIN F., THEBAULT P.  
"Réalimentation de nappe à l'usine de Moulle (Dunkerque)"  
Techniques Eau Assainissement, 1981, n° 409, p. 37-42
- 66/27956 MARTIN F.  
"Flottation et traitement des boues"  
Eau et Industrie, 1981, n° 52, p. 61-65
- CASTANY G.  
"Conditions hydrogéologiques de l'alimentation artificielle  
des nappes d'eau souterraine"  
B.R.G.M., 1970
-

- CHAPITRE II -

HYDROGEOLOGIE



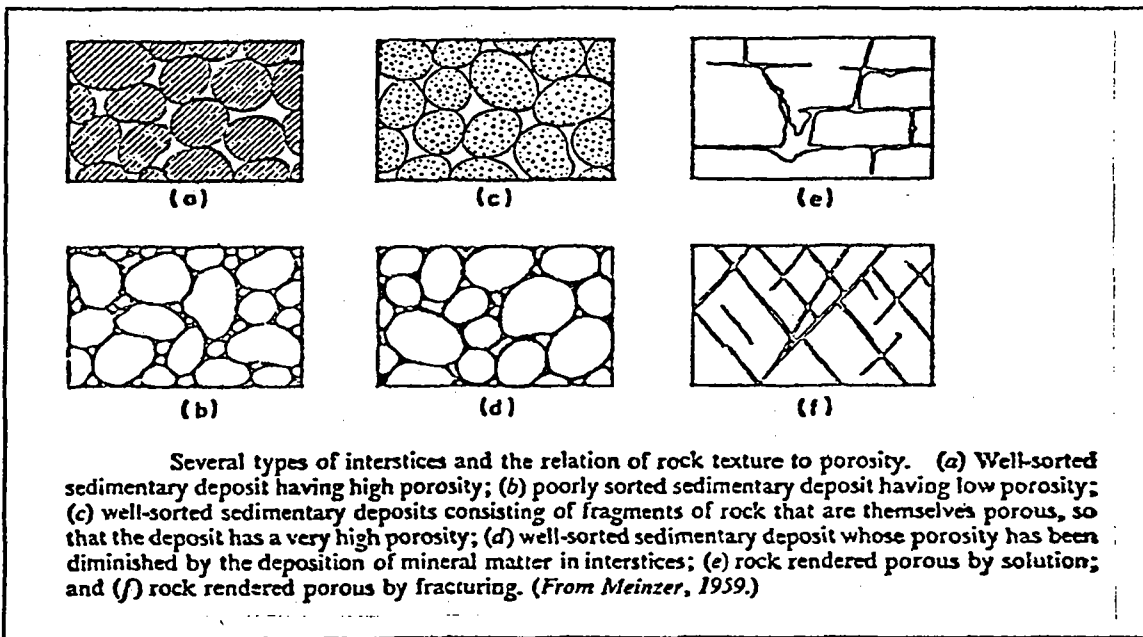
A - L'EAU DANS LE SOL

1) Rappel de notions générales d'hydrogéologie

a) La porosité : la porosité d'une roche est définie par le rapport du volume des vides au volume total de la roche.

La figure 1 montre les divers types d'interstices et leur relation avec la texture du sol.

FIGURE 1



(Extrait du Document F 2045)

TABLEAU 1

REPRESENTATIVE POROSITY RANGES  
FOR SELECTED ROCKS

Le tableau 1 donne la valeur de la porosité pour différentes roches.

<i>Rocks</i>	<i>Porosity, %</i>
Clay	45-55
Sand	35-40
Gravel	30-40
Sand and gravel	20-35
Sandstone	10-20
Shale	1-10
Limestone	1-10

(Extrait du Document F 2045)

TABEAU 2

REPRESENTATIVE SPECIFIC YIELD  
RANGES FOR SELECTED ROCKS

<i>Rocks</i>	<i>Specific yield, %</i>
Clay	1-10
Sand	10-30
Gravel	15-30
Sand and gravel	15-25
Sandstone	5-15
Shale	0.5-5
Limestone	0.5-5

Pour les mêmes roches, le tableau 2 donne la valeur de la porosité efficace définie comme la fraction de la porosité correspondant à la contenance en eau gravitaire.

*(Extrait du Document F 2045)*

b) La perméabilité : la perméabilité est l'aptitude d'une roche à laisser passer l'eau sous l'effet d'un gradient de potentiel.

Le tableau 3 donne la valeur de la perméabilité intrinsèque (ou perméabilité en "petit") pour diverses roches (rappel : 1 darcy =  $0,987 \cdot 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>).

TABEAU 3

PERMEABILITE INTRINSEQUE DE DIVERS TYPES DE FORMATION

<u>Type de formation</u>	<u>Valeur du coefficient en darcys</u>
Roches métamorphiques et plutoniques	Proche de zéro
Roches solides	Proche de zéro
Zones métamorphiques et fortement fracturées	Plusieurs centaines de darcys
Sable à grains de grosseur moyenne	1.000-30.000 millidarcys
Limon (roche)	0,1 millidarcy
Calcaire dense riche en argile	1 millidarcy
Grès de grain moyen	1-500 millidarcy
Brèche calcaire grossière partiellement cimentée	Plusieurs milliers de darcy
Roche calcaire demeurée poreuse	10-500 darcys
Sables alluviaux (plaines littorales)	Moins de 1 darcy
Alluvions d'argile et de limon	Moins de 0,1 darcy
Sables dunaires	5-50 darcys
Loess	$10^{-4}$ - 1 darcy

*(Extrait du Document G 5135/11)*



Remarque : certaines roches denses telles que le calcaire ou le basalte ont une perméabilité "en petit" très faible. Cependant elles constituent d'excellents aquifères lorsqu'elles sont fracturées, leur perméabilité devenant alors importante.

c) La transmissivité : la transmissivité est la grandeur mesurant l'aptitude d'une couche de terrain perméable à transmettre, conduire l'eau.  
La transmissivité est définie comme le produit de la perméabilité par l'épaisseur de la couche aquifère en un point considéré.

d) Le coefficient d'emmagasinement : ce coefficient est défini par le rapport entre la hauteur de la tranche d'eau immédiatement libérable par la roche aquifère sous l'effet d'une dépression et, la hauteur d'abaissement correspondant du niveau piézométrique.

Le darcy est une unité de surface définie par :

$$1 \text{ darcy} = 0,987 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$$
$$= \frac{1 \text{ centipoise } \text{cm}^3/\text{s}}{1 \text{ cm}^2}$$
$$\text{et } 1 \text{ darcy} = \frac{\quad}{1 \text{ atmosphère/cm}}$$

## 2) Répartition de l'eau dans le sol

L'eau infiltrée à la surface du sol circule de haut en bas jusqu'à rencontrer une surface imperméable. Elle constitue alors une nappe d'eau dont le niveau supérieur est appelé niveau piézométrique ou encore surface hydrostatique.

La figure 2 schématise l'état d'équilibre vertical de l'eau dans le sol.

FIGURE 2

### NAPPE PHREATIQUE

(Extrait du Document F 218/9)

La nappe d'eau ainsi définie peut être :

- soit libre ou perchée (notamment en cas de la présence d'une lentille d'argile dans le sol)(voir figure 3);
- soit captive, encore appelée artésienne (voir figure 4).

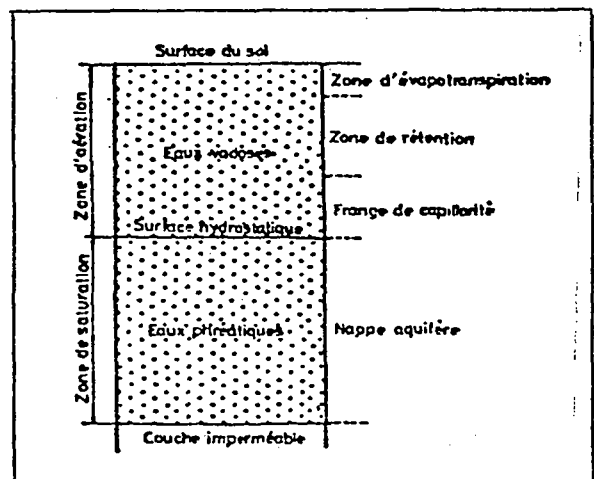
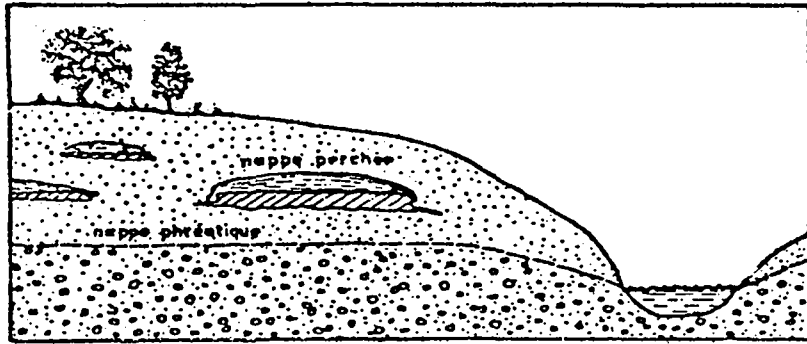


FIGURE 3

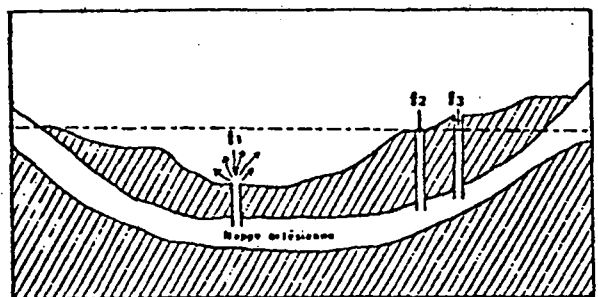
NAPPE LIBRE ET NAPPE PERCHÉE



*(Extrait du Document F 218/9)*

FIGURE 4

FORAGE DANS UNE NAPPE ARTESIENNE

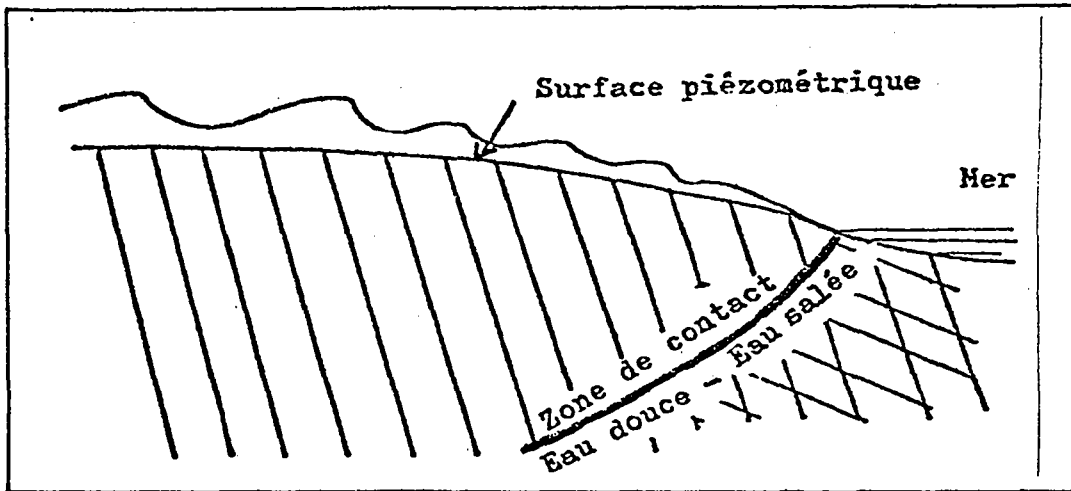


**f1) Eaux jaillissantes. – f2) et f3) Puits à eaux remontantes**  
(en hachures les couches imperméables).

*(Extrait du Document F 2415)*

Remarque : un cas particulier est celui d'une nappe phréatique côtière. L'eau salée étant plus dense que l'eau douce, il se crée un "biseau" d'eau douce comme le montre la figure 5. Par un pompage excessif dans la nappe d'eau douce, on engendre une avancée des eaux salées vers l'intérieur des terres. Cette progression peut entraîner une détérioration irrémédiable de l'aquifère. Une recharge artificielle dans la zone littorale permet de combattre ce phénomène.

FIGURE 5



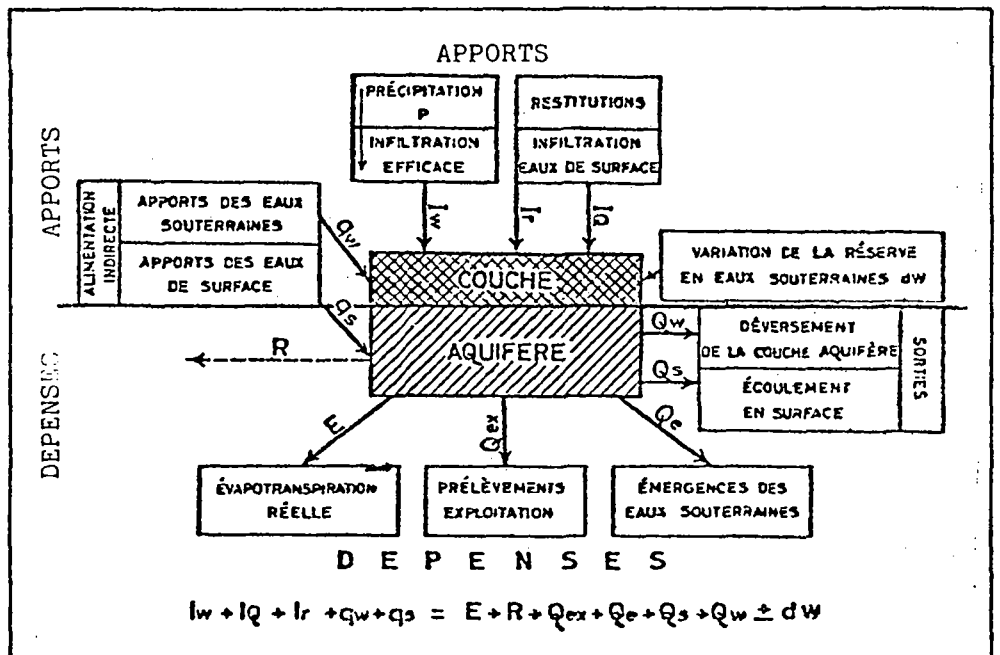
(Extrait du Document G 5134/1)

3) Bilan d'une nappe

Pour pouvoir juger de l'opportunité d'une recharge artificielle, il est important de pouvoir quantifier les "entrées" et les "sorties" d'eau dans la nappe considérée (voir figure 6) sur une période de temps donnée. On peut alors établir le bilan hydrique de la couche aquifère et, suivant l'objectif visé (rééquilibrage de la nappe ou bien stockage) quantifier l'opération de recharge.

FIGURE 6

SCHEMA DES ELEMENTS PRINCIPAUX DU BILAN DE LA COUCHE AQUIFERE



(Extrait du Document B 580)

#### 4) Caractérisation des unités géologiques favorables pour la recharge artificielle de nappe

##### a) Nature des terrains

Les terrains destinés à la recharge artificielle doivent avoir une perméabilité suffisante ( $10^{-2}$  à  $10^{-5}$  m/s). En fait, c'est la valeur de la transmissivité qui intervient et par là la puissance ou encore l'épaisseur de la couche aquifère (F 2028).

Suite à de nombreuses expériences, il apparaît que les formations aquifères favorables pour une recharge artificielle sont : les roches carbonatées karstiques, les basaltes (notamment lorsqu'ils sont fissurés), les sables, les alluvions.

##### b) Dimensions de l'aquifère

Ce sont les limites géologiques et hydrauliques du réservoir que constitue l'aquifère, qui déterminent sa structure. Les nappes sont limitées, nous l'avons vu, dans leur partie inférieure par une couche imperméable de terrain ou encore par un fluide plus dense que l'eau du gisement.

Quand la nappe est libre, c'est la surface hydrostatique qui la limite dans sa partie supérieure.

Quand la nappe est captive, c'est la couche imperméable, ou toit, sous laquelle elle est "emprisonnée" qui constitue sa limite supérieure.

Remarque : lorsque l'aquifère est profond, c'est alors les limites latérales qui, pour des raisons économiques, déterminent les possibilités de stockage de l'aquifère considéré.

La figure 7 donne des exemples de formations aquifères favorables au stockage.

Les structures hydrogéologiques les plus favorables à la mise en oeuvre d'opérations de recharge artificielle sont les massifs de roches carbonatées karstiques ou fissurés, les plaines alluviales, les dunes littorales et les deltas, les bassins hydrogéologiques et enfin les zones où la surface piézométrique est déprimée par surexploitation.

Cependant, on peut faire les remarques suivantes :

- les massifs de roches carbonatées karstiques peuvent, en général, absorber beaucoup d'eau mais, cette eau est rapidement rejetée par des grosses sources. Le stockage d'eau ne pourra donc se faire que dans les parties profondes;
- les plaines alluviales constituent des lieux privilégiés pour la mise en oeuvre de recharge artificielle mais le stockage y est, en général, limité du fait de la position élevée des niveaux d'équilibre piézométrique quand les eaux d'alimentation sont abondantes.

Suivant le climat, les sites de recharge artificielle peuvent être différents, ainsi :

- . en région à climat tempéré et humide, on choisira :
  - les alluvions anciennes
  - les lits fossiles enfouis

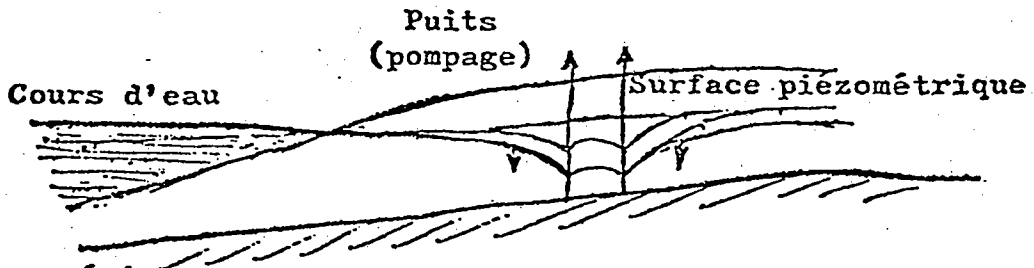
.../...

- les cônes d'éboulis
  - les alluvions interconnectées des vallées principales et de leurs affluents;
- . en région aride on choisira :
- les dépôts alluviaux récents
  - les dunes côtières
  - les zones deltaïques;
- . en région tropicale, des roches qui étaient compactes à l'origine ont pu, sous l'action des agents atmosphériques, être altérées sur une certaine épaisseur (par exemple les granites deviennent des latérites). Si cette couche altérée est suffisamment épaisse, elle constitue alors un terrain favorable à la mise en oeuvre d'une opération de recharge artificielle.

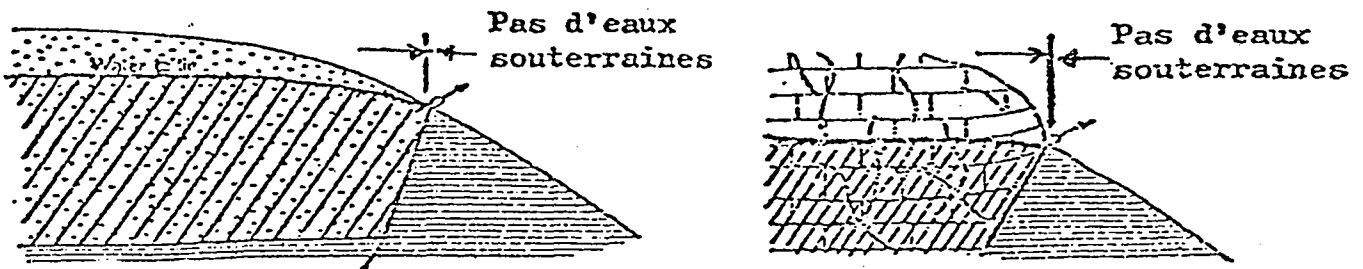
FIGURE 7

EXEMPLES DE COUCHES AQUIFERES AYANT UN POTENTIEL  
D'EMMAGASINEMENT IMPORTANT

**A** Couche libre sans réserve constante mais alimentée par un cours d'eau



**B** Formations massives ayant des sources le long de leurs limites



Aquifères à porosité  
d'interstices

Aquifères karstiques

## B - PHYSIQUE D'UNE OPÉRATION DE RECHARGE

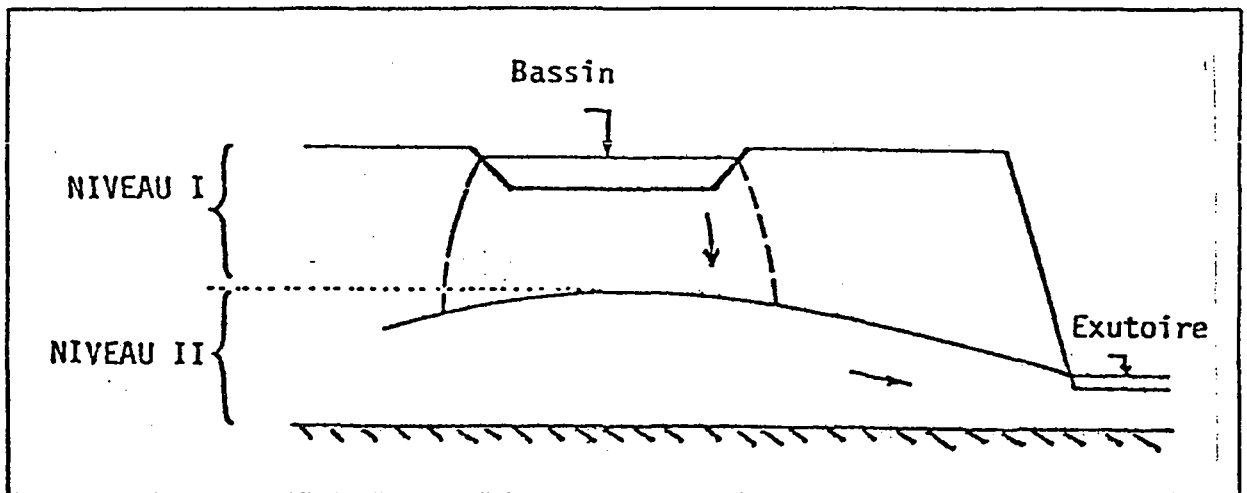
### 1) Cas des bassins d'infiltration (G 5920)

Le système hydraulique que constitue une opération de recharge par bassin se décompose en deux parties distinctes :

- l'infiltration proprement dite à travers la partie non saturée du sol : c'est le domaine des écoulements verticaux (I sur la figure 8);
- le transfert de l'eau dans la zone saturée de l'aquifère : c'est le domaine des écoulements horizontaux (II sur la figure 8).

FIGURE 8

#### EXEMPLE DE DISPOSITIF D'INFILTRATION



*(Extrait du Document G 5920)*

N.B. : si la capacité de transfert de l'aquifère est insuffisante, la nappe se gonfle jusqu'à remonter à la surface stoppant ainsi toute infiltration (G 5920, G 7221).

Pour une recharge artificielle par bassin d'infiltration, les terrains ayant une texture sableuse ou sablo-limoneuse ou encore limono-sableuse conviennent bien. L'infiltration à travers la couche non saturée du terrain jouant un rôle épurateur important, une texture trop grossière n'est pas à recommander : le cheminement est alors trop rapide, empêchant les réactions chimiques et biologiques de se produire complètement (G 6230).

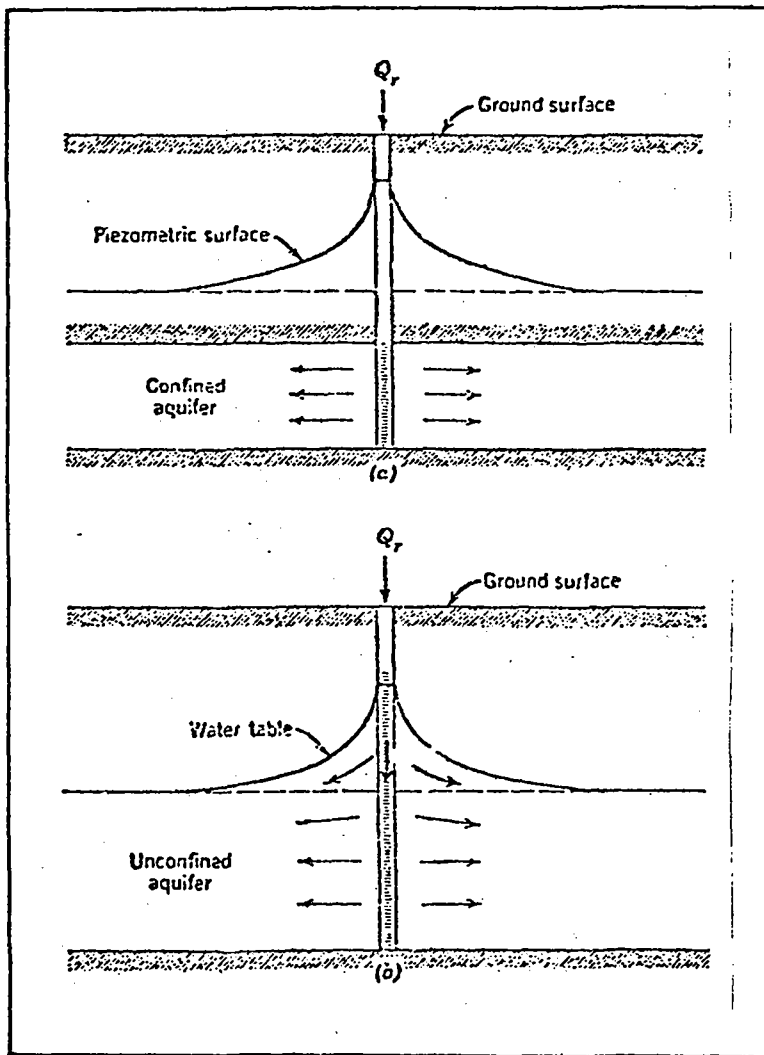
.../...

2) Cas des puits d'injection

Le système hydraulique dans le cas d'une recharge par injection est réduit au transfert du volume d'eau injectée (voir figure 9).

FIGURE 9

RADIAL FLOW FROM RECHARGE WELLS PENETRATING (a) CONFINED  
AND (b) UNCONTINUED AQUIFERS



*(Extrait du Document F 275)*

Les débits d'injection sont limités par les caractéristiques physiques de l'aquifère. En effet, au voisinage du puits, la vitesse d'écoulement des eaux souterraines ne doit pas dépasser la valeur au-delà de laquelle elles provoqueraient une érosion du terrain. Pour les nappes captives, cette érosion peut entraîner l'écroulement du toit (G 5134/1).

.../...

Pour une recharge par injection, les calcaires, notamment lorsqu'ils sont profondément enfouis, sont favorables.

## C - MÉTHODES D'INVESTIGATION DES PARAMÈTRES D'UNE OPÉRATION DE RECHARGE ARTIFICIELLE

(B 580, G 5134/1, 66/19100, G 5191, G 6212).

### 1) Mesure de la conductivité hydraulique ou perméabilité au sens de Darcy (écoulement saturé)

Il s'agit d'une mesure classique qui peut être mise en oeuvre par différentes méthodes :

- a) essai de pompage : l'interprétation des variations du niveau de la nappe en fonction du temps pendant une opération de pompage permet de déduire la valeur de la perméabilité de l'aquifère.
- b) Essais géophysiques : le principe de ces méthodes est d'étudier certaines caractéristiques physiques d'un terrain et de les interpréter afin d'obtenir différents renseignements sur le sol.  
Principalement, on utilise les méthodes géophysiques suivantes :
  - méthode des résistivités : comme son nom l'indique, c'est une méthode électrique destinée à connaître la résistivité des terrains concernés;
  - méthode de sismique-réfraction : cette méthode consiste en le calcul des vitesses de propagation d'ondes de choc dans le sol.
- c) Essais en laboratoire : on mesure directement la perméabilité, sur un échantillon de sol obtenu par carottage à l'aide d'appareils spéciaux (perméamètres par exemple).

### 2) Mesure de la conductivité hydraulique verticale (écoulement non saturé)

Il n'existe pas de méthode parfaite pour calculer ce paramètre. Citons tout de même la méthode de Weeks dont le principe est une étude de la pression de l'air contenu dans la zone non saturée du terrain. Quoique sujette à erreur, cette méthode est, malgré tout, la plus précise actuellement (G 5191, G 6212).

### 3) Mesure de la transmissivité et du coefficient d'emménagement

Ces mesures se déduisent des résultats des essais de pompages (cf. 1a).

### 4) Dimensions et structure de l'aquifère

La mesure de ces différents paramètres peut être mise en oeuvre par des méthodes géophysiques classiques, telles que la méthode des résistivités ou de sismique-

.../...



réfraction, ou encore par des méthodes plus sophistiquées utilisant les propriétés radioactives des constituants du sol; citons, pour mémoire, la méthode d'activation des neutrons et celle de la spectrométrie aux rayons gamma.

### 5) Etude de l'écoulement

Les méthodes d'étude des écoulements souterrains ont longtemps été d'ordre physique avant de devenir, plus récemment, aussi d'ordre numérique grâce au développement de l'informatique.

#### a) Méthodes physiques

- Utilisation de traceurs : les traceurs sont, en fait, des substances polluantes d'origines physique, chimique ou radioactive, que l'on introduit dans les eaux de recharge et qui vont suivre, sans les perturber, les écoulements souterrains. En les suivant, on pourra obtenir des indications sur la direction et le débit des écoulements. Parmi les nombreux traceurs utilisés, on peut citer, à titre d'exemple : la température (66/17781), la levure de boulanger (66/19100), le tritium (66/04550).
- Utilisation de modèles réduits : en respectant des règles de similitude bien précises, on peut construire des modèles réduits d'écoulement souterrain donnant des résultats acceptables (F 2028, G 4944).
- Utilisation de modèles analogiques physiques : le principe de ces méthodes est de remplacer les paramètres de l'écoulement par d'autres paramètres physiques vérifiant des équations analogues aux équations de l'écoulement. On fait alors les mesures nécessaires sur ce modèle et l'on transfère les résultats obtenus au problème réel. Citons, à titre d'exemple, les modèles analogiques électriques qui ont donné de bons résultats (G 2729, F 2045).

#### b) Méthodes numériques

Les progrès de l'informatique permettent aujourd'hui la résolution directe de toutes sortes de problèmes physiques et en particulier les problèmes d'écoulement souterrain (G 4944, G 5134/1, G 2264 bis, F 2045, G 4329, F 3918).

## D - POUVOIR ÉPURATEUR DU SOL

Le passage des eaux de recharge à travers le milieu poreux que constitue le sol déclenche au sein de celui-ci diverses réactions de caractère physique, chimique ou biologique. Ces réactions déterminent la capacité de rétention des contaminants par le sol. Nous ne citerons que quelques cas de rétention.

### 1) Rétention des matières en suspension

Le premier processus qui intervient est la filtration : les particules de dimensions supérieures aux pores du sol sont rapidement stoppées. C'est ensuite

.../...

l'action combinée de l'interception des particules, des forces d'inertie, du phénomène de sédimentation et de diffusion qui assure la rétention des particules les plus fines.

Ces processus entraînent la constitution d'une couche colmatante qui freine le cheminement de l'eau dans le sol.

L'efficacité de l'élimination des matières en suspension croît avec la distance parcourue. De nombreuses études en milieux non fissurés ont montré l'élimination totale de la turbidité après seulement quelques mètres de trajet des eaux dans le sol.

## 2) Rétention des germes pathogènes

Les eaux, notamment les eaux usées d'origine urbaine, contiennent des germes pathogènes que les traitements en station n'éliminent que partiellement. Il est donc important, pour des raisons sanitaires évidentes, d'étudier la rétention des germes pathogènes dans le sol.

Le mécanisme de l'épuration des germes pathogènes par le sol est double :

- tout d'abord, une rétention des germes par filtration ou adsorption dans le sol,
- puis un déperissement.

L'efficacité de l'élimination des germes pathogènes par les sols est fonction de leur survie, de la capacité de rétention du sol.

a) Survie des germes pathogènes : le tableau 4 nous en donne des exemples.

TABLEAU 4

	Survie dans le sol	Source
Entamoeba histolytica	8 jours	DUNLOP (1968)
Oeufs d'Ascaris	6 ans	POUND et CRITES (1973)
Salmonella	9 mois	VAN DONSEL et al (1967)
Coliformes fécaux	6 mois	EDMONDS (1976)
Enterovirus	12 jours	DUNLOP (1968)

(Extrait du Document G 5920)

.../...

b) Capacité de rétention du sol : elle est elle-même fonction, du climat, de la nature du sol, de la nature des microorganismes.

- Climat (G 6212)

- . la température : la survie des pathogènes est grandement prolongée aux basses températures;
- . la pluviométrie : l'humidité du sol favorise la survie des germes pathogènes.

- Nature des sols (G 5920)

- . les terrains fissurés doivent être considérés avec beaucoup de précautions car de nombreuses expériences ont donné des résultats totalement différents;
- . les sols granulaires sont, en général, de bon épurateurs. Cependant, la capacité de rétention des germes pathogènes est liée à l'écoulement au sein du sol. Ainsi la rétention en milieu non saturé est très supérieure à celle en milieu saturé.

- Nature des microorganismes : nous distinguerons les bactéries et les virus.

Le tableau 5 résume les facteurs généraux qui conditionnent le cheminement des virus et des bactéries dans le sol.

TABLEAU 5

FACTORS THAT INFLUENCE THE MOVEMENT OF VIRUSES AND BACTERIA IN SOIL

1.	Rainfall
2.	pH
3.	Soil composition
4.	Flow rate
5.	Soluble organics
6.	Cations
7.	Adsorption characteristics of the virus and bacteria

*(Extrait du Document G 6212)*

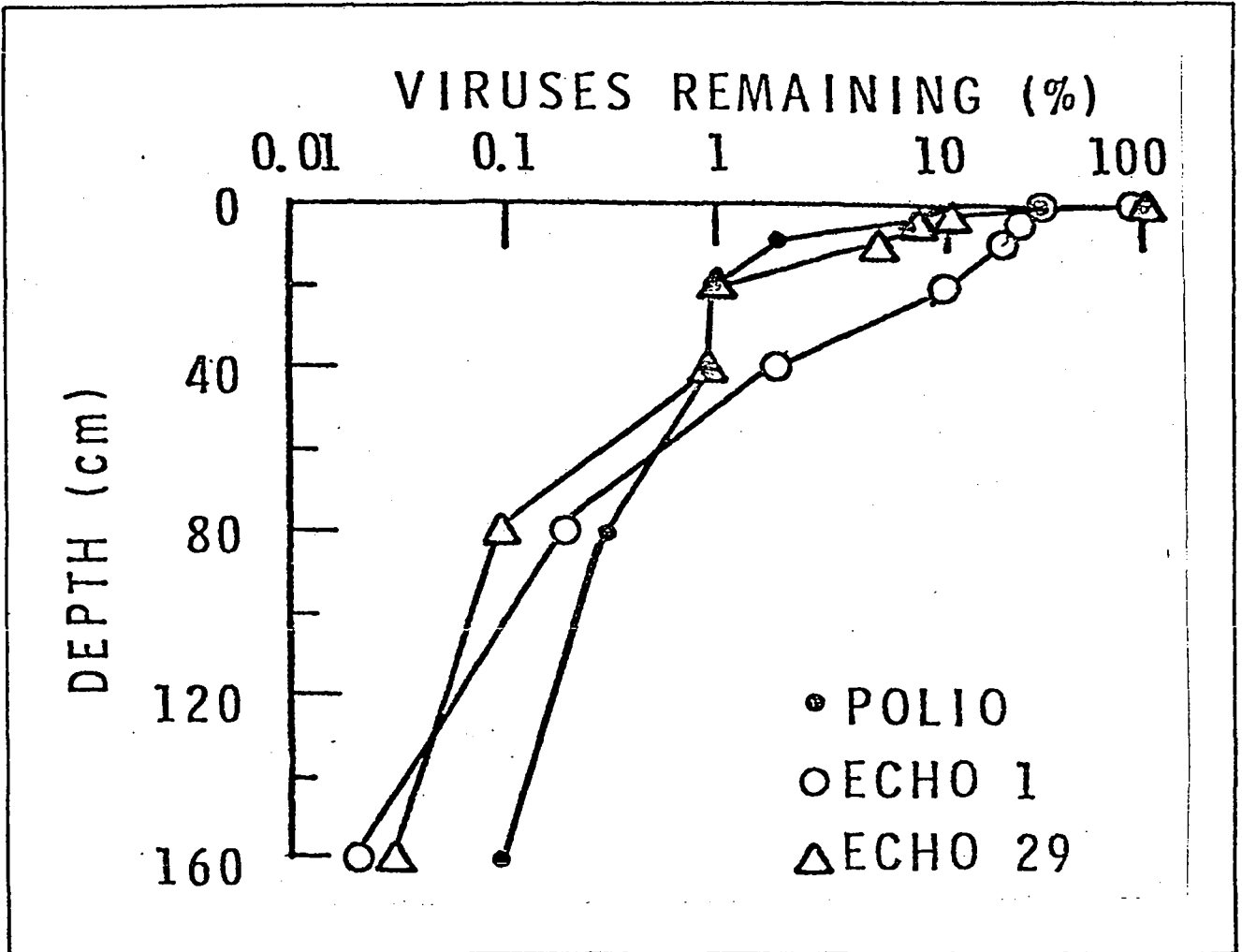
De nombreuses études ont montré que :

- les bactéries sont éliminées par filtration et adsorption dans les premiers décimètres du sol. Leur cheminement vertical (en non saturé) ne dépasse pas 2 à 3 m. Par contre, leur cheminement horizontal (en saturé) peut atteindre 10 m;
- les virus, plus petits, sont éliminés principalement par adsorption dans les premiers centimètres du sol comme le montre la figure 10 pour trois virus différents.

.../...

FIGURE 10

ADSORPTION OF DIFFERENT ENTEROVIRUSES BY A SOIL COLUMN



(Extrait du Document G 6212)

3) Élimination du carbone organique

Sous l'appellation "carbone organique" sont regroupées la DCO (demande chimique en oxygène) et la DBO<sub>5</sub> (demande biologique en oxygène à 5 jours).

L'élimination du carbone organique ne peut se faire qu'en conditions aérobies donc dans la tranche non saturée du sol. Ainsi, les eaux de recharge destinées à l'injection doivent subir une oxydation biologique en station avant injection.

.../...

De nombreuses études ont montré que la DBO d'une eau épurée par passage à travers un sol convenablement aéré est quasiment nulle (G 6230, G 5920).

#### 4) Rétention des éléments "traces"

Ils sont ainsi appelés car leur concentration dans les eaux résiduares est généralement faible. Cette appellation regroupe des éléments tels que les métaux lourds, le bore, le fluor, etc ...

Les éléments "traces" présents dans les eaux de recharge peuvent : soit s'accumuler dans le sol, soit rester dans l'eau épurée (66/19645).

La rétention d'un élément "trace" dépend de sa nature ainsi que de la composition du sol (G 6230). Ainsi, on peut souligner l'importance des argiles dans l'adsorption des éléments "traces" (G 6212). De même la valeur du pH du sol conditionne la solubilité des corps complexes créés et par là leur mobilité (G 5920) :

- en sol calcaire ou crayeux ( $\text{pH} > 8$ ) la grosse majorité des éléments "traces" est immobilisée;
- en sol acide ( $\text{pH} < 7$ ) l'augmentation de la solubilité entraîne une migration des éléments vers la nappe.

On recommande donc d'éviter les sols ayant un pH inférieur à 6,5.

#### 5) Rétention des sels solubles

On a constaté par des expériences in situ que les réactions chimiques portant sur les ions minéraux ordinaires de l'eau (Ca, Mg, Na) s'équilibrent peu de temps après le début de l'alimentation artificielle (G 6501). Cependant, une teneur trop élevée en sodium (Na), par exemple, par rapport au calcium (Ca) et au magnésium (Mg) peut entraîner une dégradation de la structure du sol et ainsi entraver l'infiltration.

Une importante concentration en sels solubles de l'effluent peut se corriger par une dilution, notamment par l'intermédiaire des précipitations (G 6230). En pays aride, une déminéralisation préalable peut s'imposer.

#### 6) Rétention de l'azote

La quantité d'azote total amenée par les effluents de recharge est souvent supérieure à la quantité qui peut être exportée par les cultures. Il faut donc, sous risque de pollution de la nappe, opérer une dénitrification dans le sol. Ceci impose d'apporter à la fois des nitrates et du carbone dans un milieu anaérobie.

La dénitrification maximum est liée à la période de submersion des bassins ainsi qu'à la quantité des effluents infiltrés. Ces deux facteurs dépendent eux-mêmes des paramètres suivants :

- capacité d'échange du sol
- pourcentage d'ammonium échangeable
- teneur en azote de l'effluent

.../...

- taux de diffusion de l'oxygène dans le sol au cours de la dessiccation des bassins
- température.

On a constaté une augmentation exponentielle de l'élimination de l'azote avec une diminution de la charge (G 6230).

En conclusion, on peut simplement dire qu'il est nécessaire d'effectuer de nombreux essais in situ afin de déterminer la périodicité des submersions-disséca-tions optimales donnant une élimination maximale de l'azote total.

### 7) Rétention du phosphore

Comme dans le cas de l'azote, le phosphore amené par les eaux de recharge est très supérieur à la quantité exportable par la végétation.

Le seul mécanisme rentrant en jeu dans l'élimination du phosphore est sa précipi-tation.

Des études ont montré que 90 % du phosphore peut être éliminé après un parcours de 100 m dans le sol. Cependant pour un sol contenant peu de cations et ayant un pH acide, le phosphore est très mobile; il est alors nécessaire d'effectuer sa précipitation préalablement en station avant l'infiltration (G 6230).

L'efficacité de la rétention du phosphore diminue, comme dans le cas de l'azote, avec l'augmentation des doses d'infiltration.

### 8) Exemples - Comparaison des systèmes de recharge artificielle (puits d'injection et bassins d'infiltration)

Les tableaux 6 et 7 résument sur deux cas particuliers de recharge artificielle (l'une par injection, l'autre par infiltration dans un bassin) l'évolution des contaminants par passage de l'eau dans le sol, en fonction de la distance de parcours.

TABLEAU 6

<i>Water Quality of Percolate at Whittier Narrows Test Basin—Concentration, mg/l</i>					
Constituent	Surface	2 ft	4 ft	6 ft	8 ft
<b>Constituents That Did Not Change</b>					
Sodium, Na	152	120	142	140	138
Sulfate, SO <sub>4</sub>	164	160	164	161	168
Chloride, Cl	126	134	131	130	126
pH	8.02	7.69	7.87	7.84	7.78
<b>Constituents That Increased</b>					
Calcium, Ca	60.8	132	127	139	158
Magnesium, Mg	19.9	20.9	19.4	17.9	30.1
Bicarbonate, HCO <sub>3</sub>	385	369	336	395	487
Nitrate, NO <sub>3</sub>	44.0	44.0	104	84.2	88.0
TDS	1 011	994	1 050	1 080	1 200
Hardness, total (as CaCO <sub>3</sub> )	234	411	398	422	520
<b>Constituents That Decreased</b>					
Potassium, K	14.5	13.0	15.4	12.6	5.1
Ammonium, NH <sub>4</sub>	40	0	0	0	0
Phosphate, PO <sub>4</sub>	5.4	0.60	10.0	0.30	0.2
COD	39.3	10.4	9.7	17.0	14.6

\*McMICHAEL, F. C. & MCKEE, J. E. Report of Research on Wastewater Reclamation at Whittier Narrows. Prepared for Resources Agency of California State Wtr. Q.C. Bd., Sacramento, Calif. (Sep. 1965).

TABLEAU 7

<i>Water-Quality Changes at Orange County Coastal Barrier Project Injection Well—mg/l</i>					
Constituent	Injection Water	Native Ground Water	Distance From Injection Well—ft		
			100	245	545
<b>Constituents That Did Not Change</b>					
Chlorides	272	12	295	288	261
Sulfate	430	40	405	445	430
Magnesium	30	7	31	28	32
Boron	1	0.1	1	1	0.8
Nitrate	0.5	0	0.2	0.5	0.5
Odor, threshold odor number†	40	0	40	40	40
Sodium	251	35	239	248	207
<b>Constituents That Increased</b>					
Calcium	98	40	156	164	200
Volatile solids	100	0	65	125	170
Bicarbonates	213	185	317	293	317
Hardness, total	368		517	585	631
TDS	1 220	235	1 330	1 325	1 290
<b>Constituents That Decreased</b>					
Potassium	30	3	22	21	9
Organic nitrogen	1	0	0	1.1	0
Ammonium nitrogen	19	0	13.4	7.7	0.0
Carbon dioxide	69	2	30	30	10
COD	54	0	27	25	22
Color	15	0	13	8	0

\*BAIER, D. C. & WESNER, G. M. Reclaimed Waste Water for Ground Water Recharge. *Wtr. Resources Bull.*, 7:5 (Oct. 1971).  
†TON units

(Extrait du Document 66/03313)

9) Conclusion

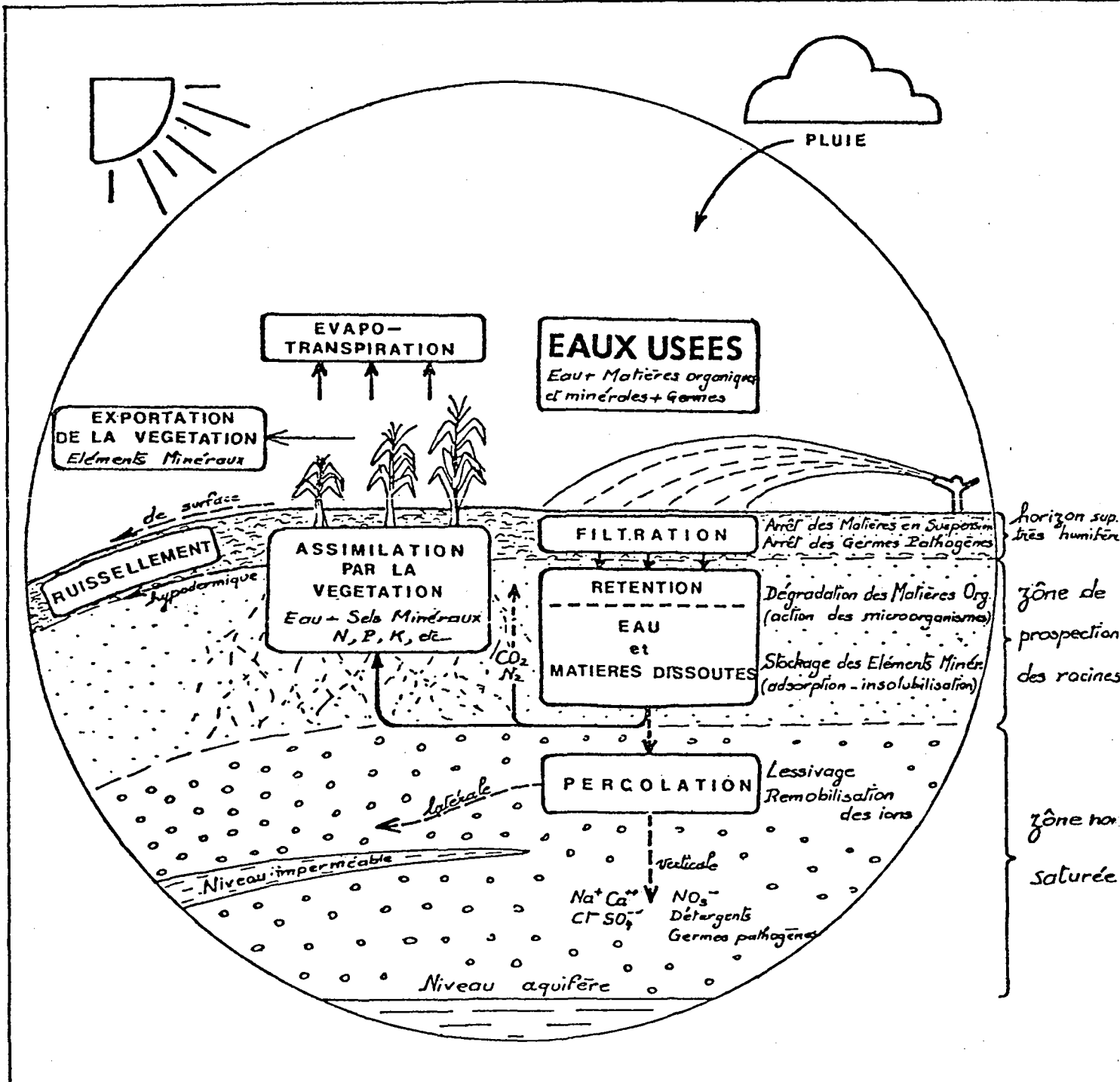
L'épuration des eaux de recharge par les sols granulaires ayant une tranche non saturée est excellente : ils permettent une élimination importante des pollutions organiques phosphorées et bactériologiques ainsi qu'une diminution de 30 à 40% de la pollution azotée (G 7221, Doc. Génie Rural, Déc. 1977, voir page suivante).

La recharge artificielle par des bassins d'infiltration est un moyen d'épuration des eaux en soi.

La recharge artificielle par injection demande des eaux répondant à des critères aussi stricts que ceux d'une eau potable. La recharge par injection demande donc l'installation d'une unité de traitement à part, ce qui peut mettre en balance la rentabilité de l'opération de recharge toute entière.

FIGURE 11

PRESENTATION SCHEMATIQUE DU ROLE EPURATEUR DU SOL



(Extrait du Génie Rural  
Nov.-Déc. 1977)



## E - CONCLUSIONS GÉNÉRALES

D'après ce que nous venons de voir, un sol idéal pour la mise en oeuvre d'une recharge artificielle aurait : (F 3469)

- 1) des taux d'infiltration et de transmission élevés
- 2) au-dessus de lui, un sol sans argile ou autres substances réduisant l'infiltration
- 3) pas d'argiles gonflantes ou contractantes qui créent des fissures en séchant et permettent ainsi à l'eau de circuler rapidement pendant les premières phases de la recharge
- 4) suffisamment d'argiles pour pouvoir adsorber les éléments "traces" et les oligo-éléments, et, pour permettre aux microorganismes du sol de décomposer les éléments organiques
- 5) du carbone pour favoriser une rapide dénitrification et pour supporter une population microbienne active combattant les germes pathogènes, et, enfin, pour favoriser une décomposition rapide des substances organiques introduites.

Il est clair que certaines de ces propositions sont contradictoires. Une opération de recharge artificielle est donc le résultat d'un compromis entre la capacité d'infiltration du sol et sa capacité d'épuration.

---



LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- F 218/9 X ...  
"Livre de l'eau - volume I"  
CEBEDEAU, 1978, 350 pages
- F 275/2 TODD D.K.  
"Groundwater hydrology"  
J. Wiley and Sons Ed., 1980, 546 pages
- F 1605 CASTANY G.  
"Prospection et exploitation des eaux souterraines"  
Dunod Ed., 1968, 740 pages
- F 2028 BIZE J., BOURGUET L., LEMOINE J.  
"L'alimentation artificielle des nappes souterraines"  
Ed. Masson & Cie, 1972, 199 pages
- F 2045 WALTON W.C.  
"Groundwater resource evaluation"  
McGraw-Hill Book Company, 1970, 664 pages
- F 2415 LOUP J.  
"Les eaux terrestres - hydrologie continentale"  
Masson et Cie Ed., 1974, 172 pages
- F 3469 X ...  
"Health aspects of wastewater recharge"  
Water Information Center, New York, 1978, 240 pages
- F 3884 X ...  
"Waste disposal effects on groundwater"  
Miller D.W. Ed., 1980, 512 pages
- F 3918 BEAR J.  
"Hydraulics of groundwater"  
McGraw-Hill Book Company, 1979, 567 pages
- G 2264/Bis X ...  
"La mécanique des fluides et l'environnement - prévision et maîtrise de la qualité de l'eau et de l'air"  
14ème Journées de l'Hydraulique, Paris, Sept. 1976,  
Question 4 : les eaux souterraines, 48 pages
- G 2729 X ...  
"Artificial recharge of the London basin"  
Reading, Water Resources Board, 1973, 38 pages
- G 4329 WOLKER R.E.  
"Numerical modelling of an aquifer system with intermittent recharge"  
Dept. of National Res. Australian Water Res. Council, 1977, 64 pages

- G 4944 KHANJI J.D.  
"Etude de la recharge de nappes à surface libre par infiltration"  
Thèse Université Scient. et Médicale, Grenoble, 1975, 252 pages
- G 5134/1 X ...  
"Emmagasinement souterrain des eaux et recharge artificielle"  
Ressources Naturelles/Série Eau, ONU, n° 2, 1977, 307 pages
- G 5191 BROWN R.F., SIGNOR D.C., WOOD W.W.  
"Artificial groundwater recharge as a water management  
technique on the southern high plains of Texas and New Mexico"  
Texas Depart. of Water Resources, 1978, 32 pages
- G 5920 X ...  
"L'assainissement des régions dépourvues de réseau  
hydrographique et la protection des nappes - tome 1"  
Agence Fin. de Bassin Seine-Normandie, Déc. 1978, 107 pages
- G 6212 X ...  
"Wastewater reuse for groundwater recharge"  
Symposium Office of Water Recycling, Californie, 1980, 345 pages
- G 6230 X ...  
"Possibilités d'épandage des eaux usées urbaines"  
Rapport Agence R.M.C., 1979, 371 pages
- G 6501 TAKASHI ASANO, GHIRELLI R.  
"Réutilisation des eaux usées pour la recharge des eaux  
souterraines et l'irrigation agricole"  
Conférence OMS, Alger, 1980, p. 1-15
- G 7221 X ...  
"L'aménagement d'infiltration des eaux usées de Port-Leucate"  
Soc. Aménag. Mixte d'Equip. et d'Aménag. de l'Aude,  
Novembre 1981, 45 pages
- 66/03313 TOUPS J.M.  
"Water quality and other aspects of groundwater recharge in  
southern California"  
J.A.W.W.A., Mars 1974, p. 149-151
- 66/04550 SMITH D.B.  
"Tritium water tracing"  
Water Treatment and Examination, vol. 22, 1973, p. 250-258
- 66/04561 CALLAHAN J.T.  
"Recycling of fresh water - the management and protection of  
groundwater"  
Tiré à part, 16 pages
- 66/17781 KEYS W.S., BROWN R.F.  
"The use of temperature logs to trace the movement of injected  
water"  
Groundwater, Janv.-Fév. 1978, p. 32-48

66/19100

WOOD W.W., EHRLICH G.G.

"Use of baker's yeast to trace microbial movement in groundwater"

Groundwater, Nov.-Déc. 1978, p. 398-403

66/19645

ROBERTS P.V., McCARTY P.L.

"Direct injection of reclaimed water into an aquifer"

J. Environ. Eng. Div., 1978, 104, p. 933-949

---



- CHAPITRE III -

DISPOSITIFS D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE

---

NAPPE SOUTERRAINE

---





Pour la mise en oeuvre d'une alimentation artificielle de nappe souterraine on distingue, principalement, les dispositifs d'infiltration et les dispositifs d'injection. Ces deux types fondamentaux de dispositifs se différencient, nous allons le voir, aussi bien par leur fonctionnement que par leur technologie et leur gestion.

## A - DISPOSITIFS D'INFILTRATION

### I - CONDITIONS GENERALES D'UTILISATION

Les dispositifs d'infiltration sont utilisés pour alimenter les nappes libres ou surmontées d'une épaisseur de terrain imperméable assez petite pour que l'on puisse la décaper.

Il s'agit essentiellement de bassins d'infiltration, mais aussi de canaux, fossés, fosses, lits de cours d'eau aménagés, zones d'épandage souterrain, puits fil-trants ...

Ce sont en général des dispositifs de surface, exception faite pour les dispositifs d'épandage souterrain par réseau de drains.

### II - PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT : CAS D'UN BASSIN

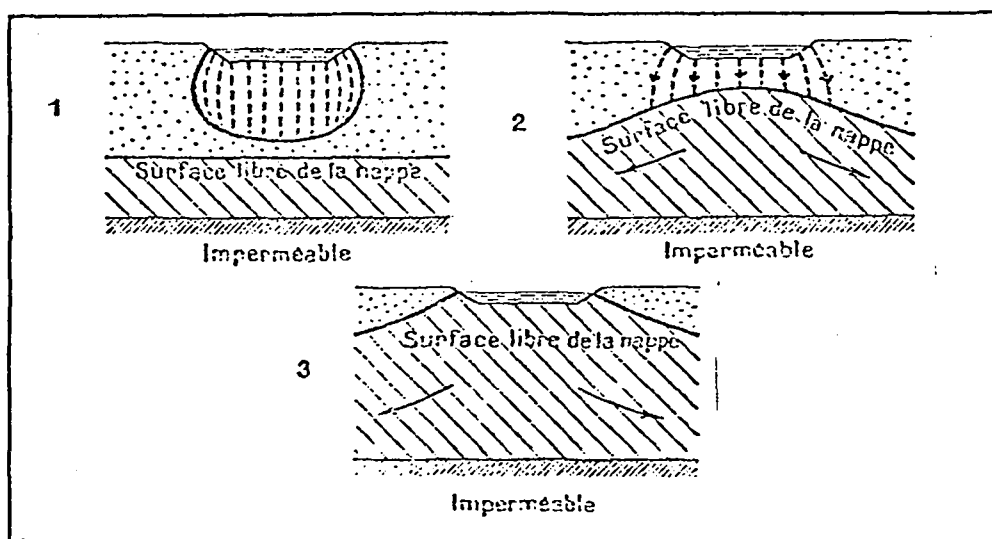
#### 1) Processus complet de l'infiltration provoquée (F 2028)

Plaçons nous dans le cas d'un bassin d'infiltration que l'on remplit.

L'avancée du front humide peut être décomposée en trois phases comme le montre la figure 1.

FIGURE 1

SCHEMA DES TROIS PHASES DE L'INFILTRATION PROVOQUEE



(Extrait du Document F 2028)

.../...

1ère phase : avancée du front humide vers la nappe

2ème phase : écoulement mixte (verticalement en milieu non saturé, horizontalement en milieu saturé)

3ème phase : écoulement en milieu saturé aussi bien verticalement que horizontalement.

2) Apparition d'une couche colmatante à la surface du sol pendant la submersion

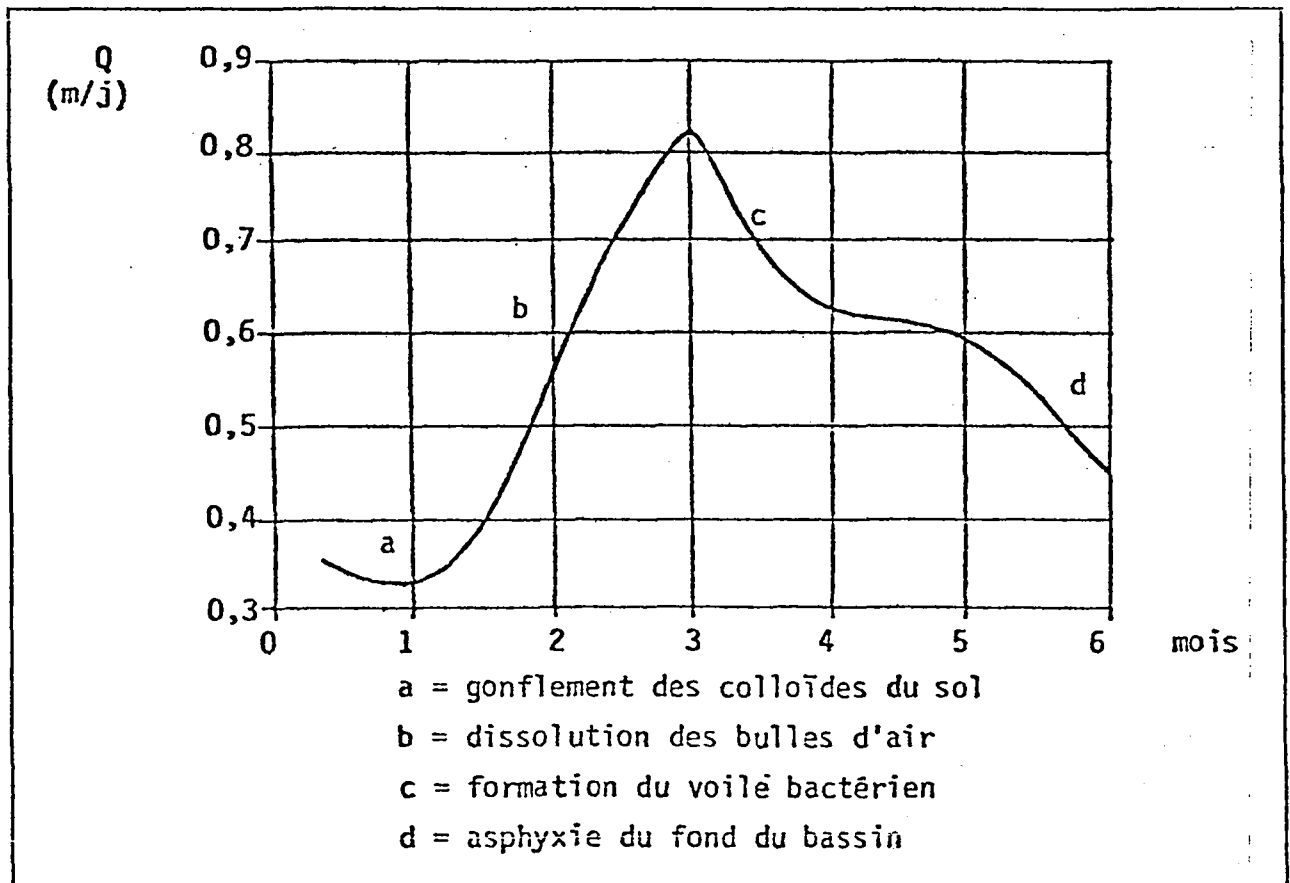
Mis à part le cas où l'on utilise une eau très pure et neutre vis-à-vis des constituants chimiques et biologiques du sol, l'existence dans l'eau de recharge de toutes sortes d'impuretés entraîne au contact de l'eau avec le sol des réactions d'origine physique, chimique et biologique.

Le résultat de ces différentes réactions est l'apparition d'une couche colmatante qui se comporte vis-à-vis de l'infiltration comme une couche peu perméable (partie C sur la figure 2).

FIGURE 2

EVOLUTION DE L'INFILTRATION DANS UN BASSIN EN CAS DE SUBMERSION

PROLONGEE AVEC DES EAUX PEU COLMATANTES



(Extrait du Document G 5920)

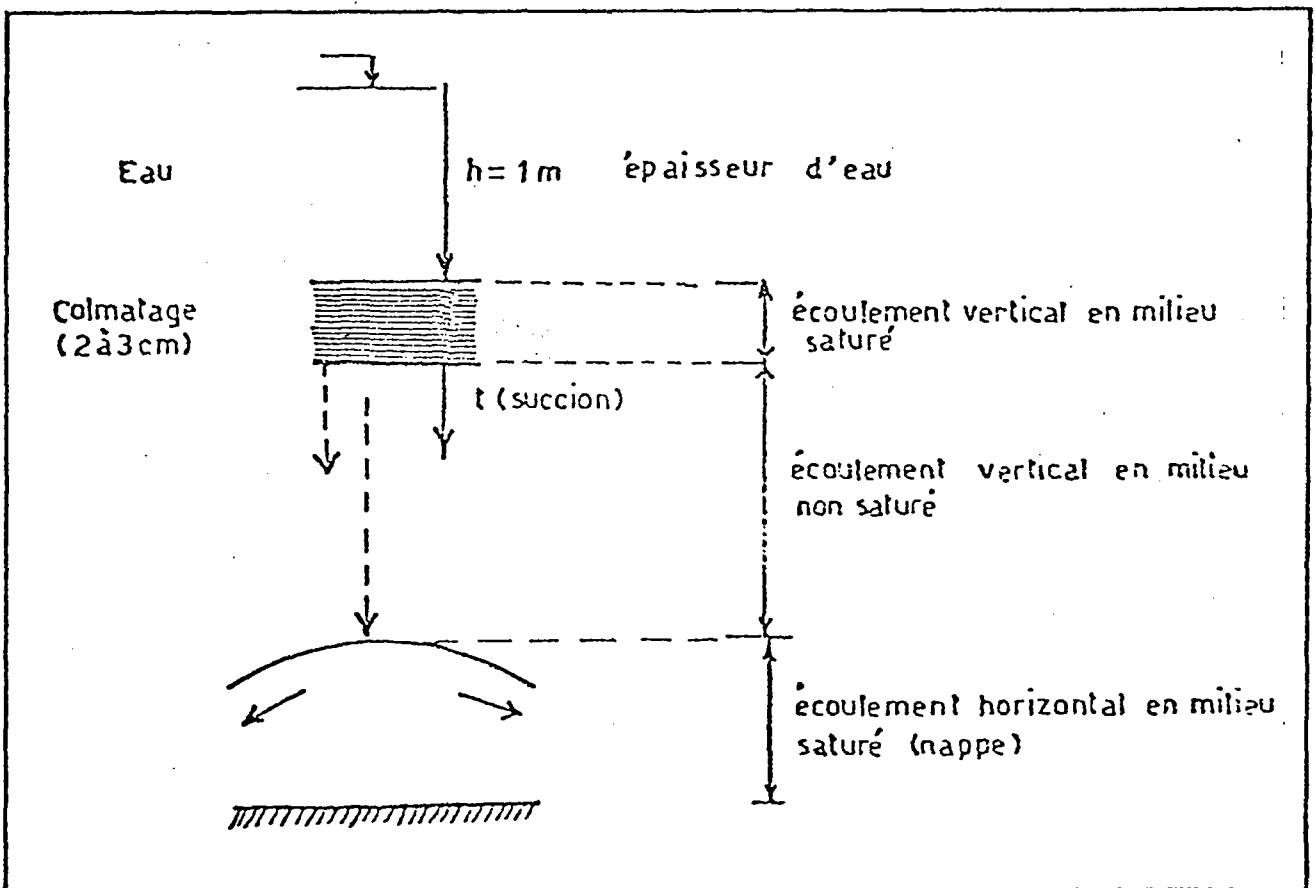
Si l'on se place dans le cas où la profondeur de l'aquifère ainsi que sa transmissivité sont suffisantes, c'est alors l'écoulement mixte (phase n°2 dans le schéma précédent) qui constitue le régime permanent d'écoulement des eaux sous le bassin.

C'est donc l'existence du phénomène de colmatage du fond du bassin qui permet à l'écoulement vertical en milieu non saturé de se poursuivre.

Nous détaillerons le processus de colmatage plus loin. On peut cependant déjà noter en observant la figure 2 que le colmatage évolue avec le temps et peut devenir intolérable vis-à-vis du taux d'infiltration recherché : une vidange du bassin et une rénovation du sol constituant son fond s'imposent alors.

La figure 3 donne une schématisation de l'écoulement de l'eau dans le sol avec existence d'une couche colmatante à la surface.

FIGURE 3



(Extrait du Document G 7220)

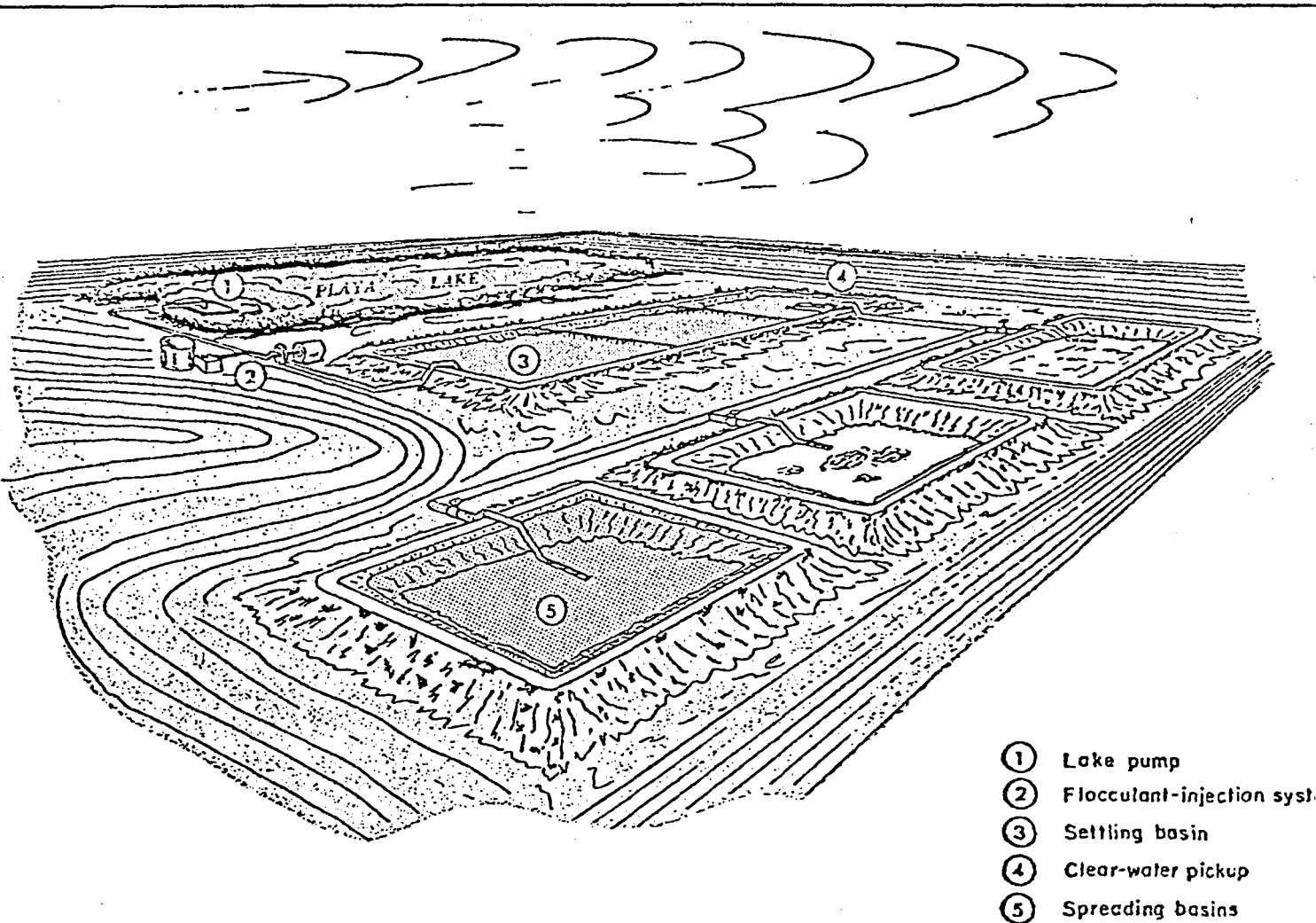
### III - LES DISPOSITIFS D'INFILTRATION

#### 1) Les bassins d'infiltration

a) Principe : il peut s'agir d'une excavation faite dans le sol et pouvant avoir des origines diverses (anciennes carrières par exemple), ou bien d'un ouvrage de génie civil comportant la construction de berges. Le bassin ainsi formé reçoit une certaine quantité d'eau qui, sous l'effet de la charge hydraulique, va pénétrer dans le sol.

La figure 4 donne un schéma d'ensemble d'une installation utilisant des bassins d'infiltration.

FIGURE 4



**Idealized Spreading-Basin Installation With Water-Intake Systems  
(Lake Pump and Clear-Water Pickup),  
Flocculant-Injection System, and Settling Basins**

- b) Forme, dimensions des bassins : la forme des bassins peut être quelconque. Cependant lorsque l'on utilise plusieurs bassins, on cherchera un encombrement au sol minimum.

Le nombre de bassins dépend de la gestion de ceux-ci; nous aborderons ce point plus loin.

Dans la réalisation d'un bassin d'infiltration, ou plus généralement d'un dispositif d'infiltration, une contrainte importante est la distance entre le sol et le niveau de la nappe. On estime qu'une distance de 3 à 5 m est un minimum pour assurer la bonne marche d'un bassin.

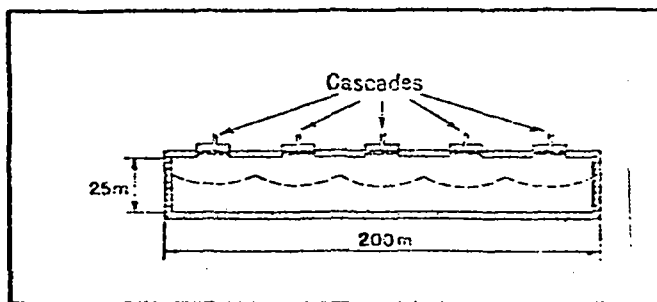
- c) Construction d'un bassin : la construction d'un bassin ne peut se faire que sur des terrains relativement plats. Sa mise en oeuvre peut se faire à l'aide d'un bulldozer ou par des moyens plus simples. Toutefois, en cas d'utilisation d'engins lourds, il faudra prendre garde à ce que leurs passages successifs n'entraînent pas un tassement excessif du sol qui se traduirait par une réduction significative du taux d'infiltration.

Les berges des bassins doivent être rendues imperméables par bétonnage ou dépôt de sédiments très fins; ceci, afin d'éviter toute infiltration horizontale. La pente recommandée pour les berges d'un bassin est de 2 pour 1 : on limite ainsi l'érosion due aux mouvements de l'eau dans le bassin. Enfin, pour faciliter la vidange du bassin, on procède à la création d'un point bas.

- d) Amenée de l'eau : l'amenée de l'eau dans le bassin peut se faire par gravité ou par pompage. Ces dispositifs sont, en général, aussi des dispositifs aérateurs: en favorisant les conditions aérobies dans le bassin, on permet une épuration importante des eaux dans celui-ci.

Cette aération se fait souvent à l'aide d'une ou plusieurs cascades (figure 5).

FIGURE 5



*(Extrait du Document F 2028)*

- e) Revêtement du fond : le revêtement du fond peut être varié : ainsi on distingue les bassins à fond nu, à végétation, à sable.

.../...

- Bassins à fond nu : leur mise en oeuvre est simple car ils sont utilisés tels quels. Cependant ils sont soumis à un colmatage rapide. Pour diminuer l'importance de ce colmatage et pour assurer l'entretien on peut utiliser divers procédés simples tels que le labourage ou l'épandage de paille de blé (Conférence AFEE, Orléans, 1970). La lame d'eau dans ces bassins doit être de quelques décimètres.
- Bassins à végétation : l'effet de la végétation est multiple (G 6230) - perméabilité supplémentaire due aux racines, protection du sol contre les gouttes d'eau lors des périodes pluvieuses, exportation d'éléments minéraux si toutefois la végétation est récoltée (5 % environ). Par ailleurs elle favorise la dénitrification. Cependant la présence de végétation dans le bassin présente certains inconvénients : niveau assez faible d'effluent dans le bassin (au printemps et en été, notamment, quelques centimètres seulement); assèchement périodique du bassin pour permettre la récolte.

Malgré tous ces inconvénients, de nombreuses études ont montré l'intérêt de la végétation dans un bassin. Le bermuda-grass géant, le riz et le souclan-grass paraissent bien s'adapter à ces conditions de vie (G 6230, F 275).

- Bassins à sable : (Conférence AFEE, Orléans, 1970). Le fond du bassin est alors tapissé d'une couche de sable rapportée. Le diamètre efficace du sable est, en général, compris entre 0,2 et 0,3 mm. Cette couche sert de support mécanique et biochimique à l'épuration des eaux. Son épaisseur doit être de l'ordre de 50 cm.

Le sable agissant comme un filtre subit un colmatage progressif et demande donc un entretien périodique : après vidange du bassin, on procède à un remaniement du sable par différents moyens allant du simple grattage, à l'explosif, ou bien on procède à un lavage du sable après ramassage.

L'épaisseur de la lame d'eau, dans un tel bassin, peut varier de quelques décimètres à plusieurs mètres.

f) Taux d'infiltration : d'une manière générale, on peut dire qu'il est imprévisible et que l'on doit procéder à des essais. On dispose de deux types de méthodes pour ces essais (G 5134/1) :

- essais sur toute la zone d'épandage : c'est cette méthode qui donne les résultats les plus sûrs mais sa mise en oeuvre nécessite des dispositions coûteuses : transport de l'eau, acquisition des terrains;
- essais sur des mares d'épandage : cette méthode impose pour être fiable, des essais de longue durée ainsi que la connaissance des renseignements techniques tels que la géologie du sous-sol, la profondeur de la nappe, etc ...

En général, les taux d'infiltration se situent au-dessus de 0,15 - 0,30 m par jour (G 5191).

Le tableau 1, page suivante, donne à titre d'exemple la valeur des taux d'infiltration de bassins réalisés aux U.S.A.

N.B. : du fait du colmatage, le taux d'infiltration évolue avec le temps pendant la submersion. Il convient donc de parler de taux d'infiltration moyen.

.../...

TABLEAU 1

REPRESENTATIVE SPREADING BASIN RECHARGE RATES

Location	Rate, ft/day
Santa Cruz River, Ariz.	1.1-3.8
Los Angeles County, Calif.	2.2-6.2
Madera, Calif.	1.0-4.1
San Gabriel River, Calif.	1.9-5.4
Santa Ana River, Calif.	1.8-9.6
Santa Clara Valley, Calif.	1.4-7.3
Tulare County, Calif.	0.4
Ventura County, Calif.	1.2-1.8
Des Moines, Iowa	1.5
Newton, Mass.	4.3
East Orange, N. J.	0.4
Princeton, N. J.	0.1
Long Island, N. Y.	3.1
Richland, Wash.	7.7

*(Extrait du Document F 275)*

Suivant la nature du revêtement du fond, le taux d'infiltration est variable. Ainsi (F 2028) :

- pour les bassins nus : 0,30 à 1 m par jour
- pour les bassins à végétation : 0,20 à 0,60 m par jour
- pour les bassins à sable : 2 à 5 m par jour.

Des études récentes ont montré que dans le choix du revêtement, la végétation et le sable donnent les meilleurs résultats ( G 6230).

g) Dispositifs de reprise des eaux : trois dispositifs sont utilisés pour récupérer les eaux après leur infiltration dans la couche non saturée du terrain et leur transfert dans l'aquifère :

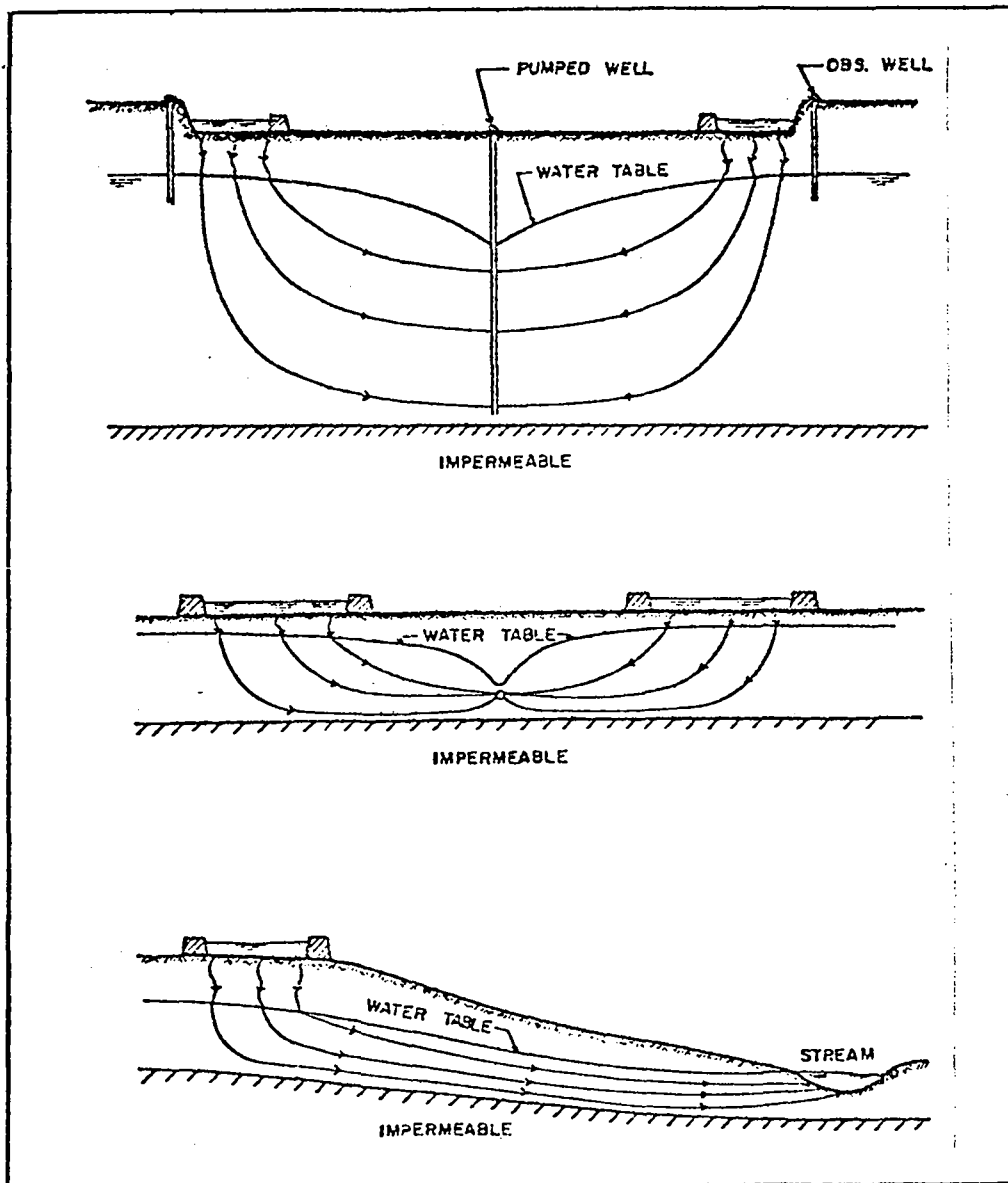
- . les puits de pompage classiques
- . les drains placés dans l'aquifère lui-même
- . les exutoires naturels tels que les sources.

Ces trois dispositifs sont représentés sur la figure 5 bis.

.../...

FIGURE 5 BIS

COLLECTION OF RENOVATED WATER FROM RAPID-INFILTRATION SYSTEMS WITH  
WELLS (TOP), DRAINS (CENTER), OR VIA NATURAL SEEPAGE  
INTO STREAMS (BOTTOM)



(Extrait du Document G 6212)

.../...



## 2) Les fossés, les canaux, les fosses

Ces dispositifs sont assez semblables aux bassins. Néanmoins, on peut faire les remarques suivantes :

- contrairement aux bassins, ces dispositifs utilisent l'infiltration horizontale à travers les berges. Celles-ci sont en général très relevées;
- les fossés, de largeur plus réduite (1 à 4 m) que les bassins, s'adaptent mieux aux variations de relief du terrain car ils peuvent épouser sans difficulté les courbes de niveau;
- les fosses sont caractérisées par une profondeur importante vis-à-vis de ses autres dimensions. La charge hydraulique peut y être importante (plusieurs mètres). Leur utilisation est particulièrement intéressante pour l'infiltration d'eaux brutes : le fond et les bords jouant respectivement le rôle de plage de sédimentation et de filtration.

## 3) Lits de rivière aménagés

a) Principe : le principe de ce dispositif est essentiellement d'amplifier artificiellement l'infiltration naturelle des eaux de rivières dans les terrains alluvionnaires sous-jacents. Pour cela on peut :

- . soit augmenter la surface de contact entre l'eau et le sol : c'est le cas d'un aménagement d'un lit mineur en chômage, ou de l'épandage des crues,
- . soit augmenter la charge hydraulique en différentes zones du lit : c'est le cas avec la construction de diguettes,
- . soit les deux : c'est le cas avec la réalisation d'une retenue.

## b) Les aménagements (G 7220)

- . aménagement d'un lit mineur en chômage en dehors des périodes de crue par creusement au bulldozer par exemple (figure 6);
- . épandage des crues : cette méthode ne peut être mise en oeuvre que dans des régions peu habitées. Sa réalisation ne demande pas de moyens élaborés ni de main d'oeuvre qualifiée (figure 7);
- . construction de diguettes (G 7220) : construites en travers du courant, les diguettes permettent l'augmentation de la charge hydraulique à l'amont de celles-ci (figure 8).

.../...

FIGURE 6

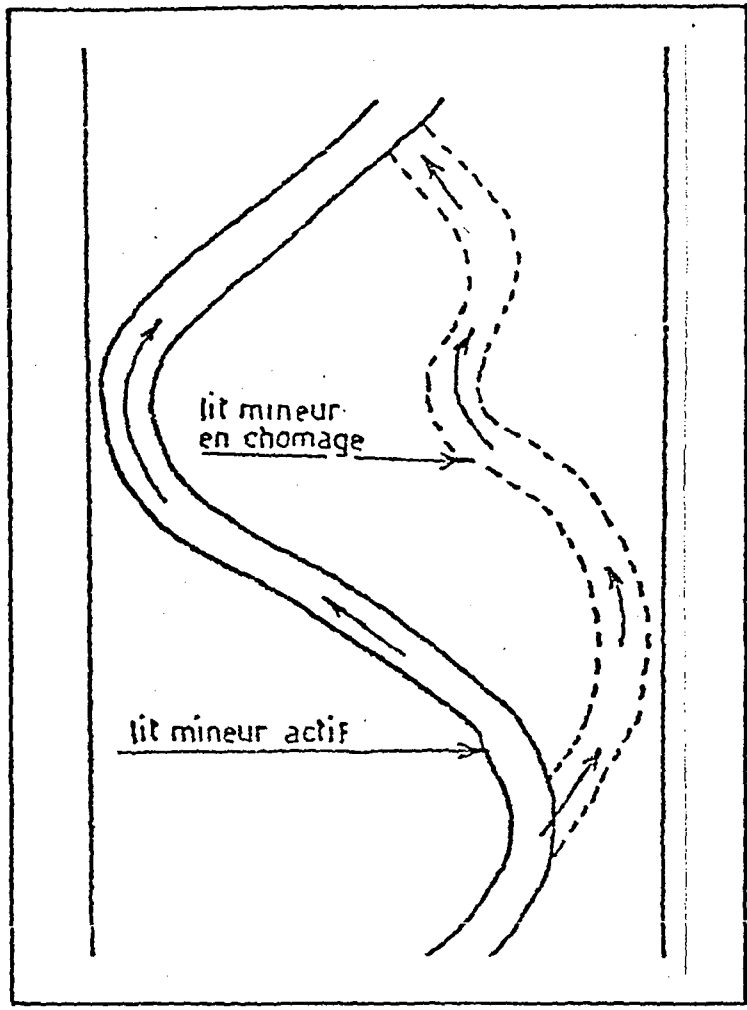


FIGURE 7

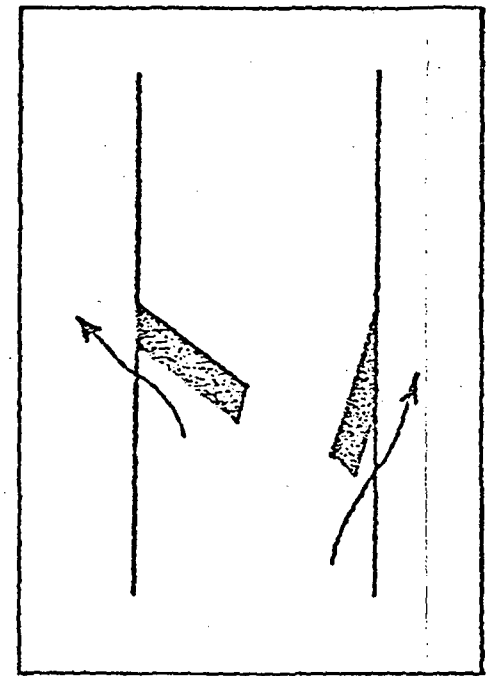
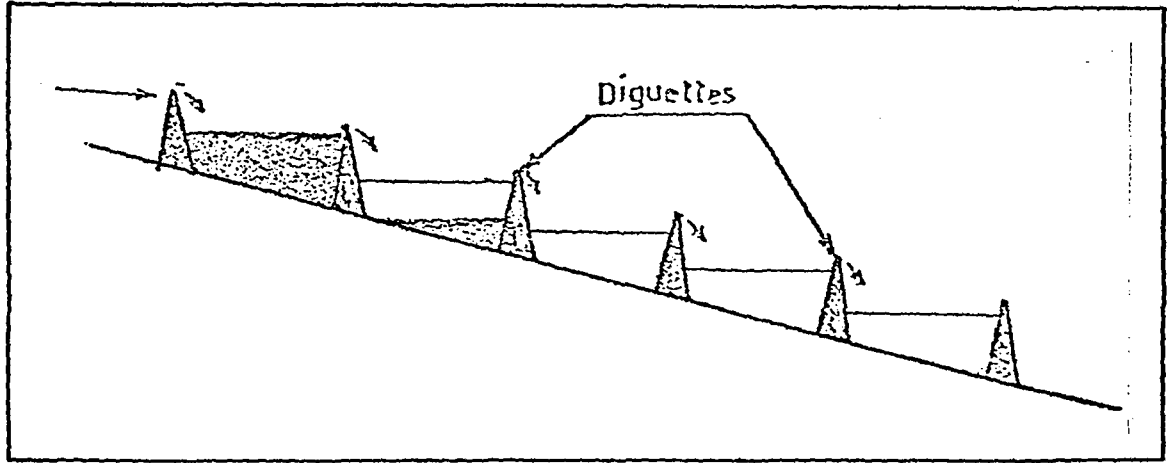


FIGURE 8



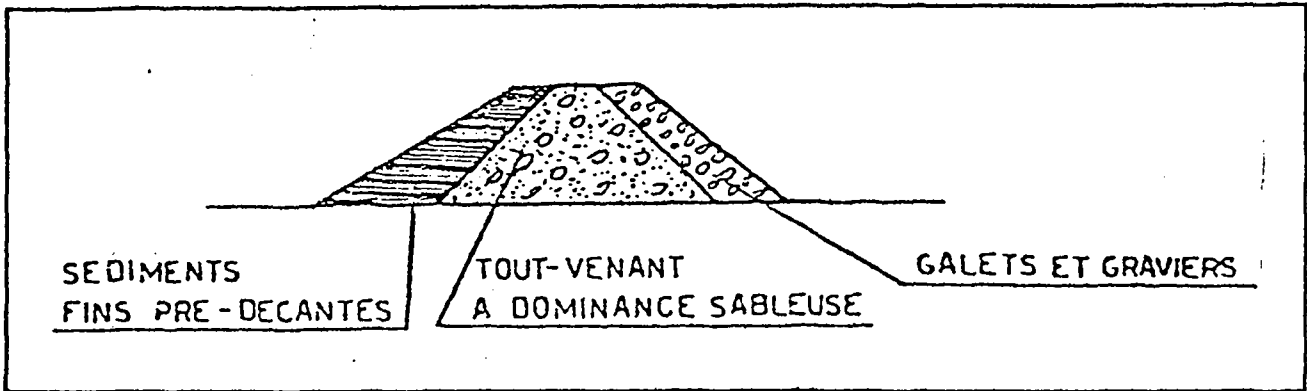
(Extraits du Document G 7220)

.../...

La hauteur des diguettes est de l'ordre de 1,50 m. Pour être économiques, les diguettes doivent être réalisées avec des matériaux locaux et des moyens simples.

La figure 9 donne une coupe d'une diguette.

FIGURE 9



*(Extrait du Document G 7220)*

- c) Construction d'une retenue : sa mise en oeuvre est coûteuse car elle nécessite des études élaborées ainsi que des moyens lourds.

Remarque : la construction de diguettes ou de barrages ne doit pas aggraver les crues ou bien dévier le fleuve de son lit naturel.

#### 4) Épandage souterrain par réseau de drains

Le principe de ce dispositif reste le même que celui d'un bassin mais la plage d'infiltration est alors constituée par un drain perméable enterré dans la partie supérieure du sol.

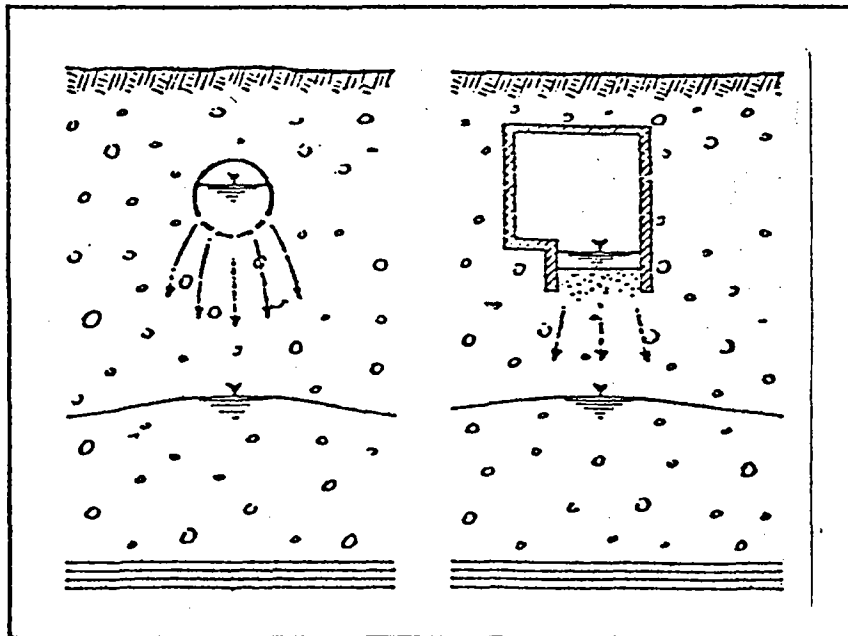
La figure 10 page suivante donne deux exemples de drains fonctionnant en dispositifs d'infiltration.

L'avantage majeur de ce procédé sur les bassins d'infiltration est de laisser les terrains libres en surface pour une autre utilisation (terrain de sports par exemple).

Le principal défaut de ce procédé est d'être un dispositif souterrain donc d'être délicat à entretenir.

.../...

FIGURE 10



*(Extrait du Document 66/08781)*

La figure 11 page suivante donne le plan d'une réalisation d'infiltration par drains.

#### 5) Puits filtrant

Le puits filtrant se différencie du puits d'eau par le fait qu'il n'atteint pas la nappe. C'est un procédé assez peu utilisé.

#### IV - COLMATAGE DES DISPOSITIFS D'INFILTRATION

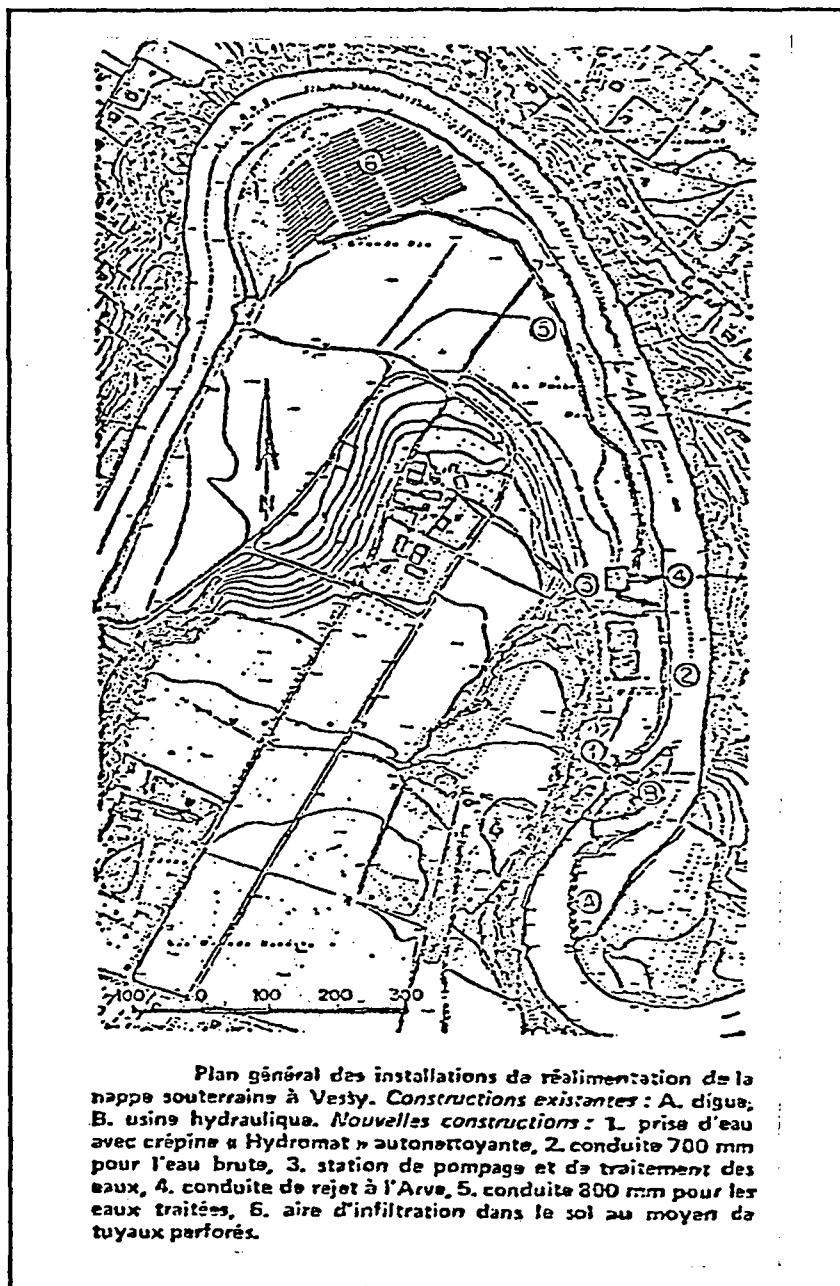
Le colmatage progressif du fond d'un bassin, par exemple, se traduit, comme nous l'avons vu, par une réduction du taux d'infiltration.

Le phénomène de colmatage résulte de la combinaison de deux mécanismes :

- d'une part, désorganisation de la porosité du sol
- d'autre part, bouchage des pores.

.../...

FIGURE 11



1) Colmatage par désorganisation de la porosité du sol

C'est le résultat de divers mécanismes électrochimiques :

- destruction des agrégats par un excès d'ions dispersant les argiles ou bien solubilisation du ciment liant ceux-ci en milieu réducteur
- gonflement important des argiles.

2) Colmatage par bouchage des pores du sol

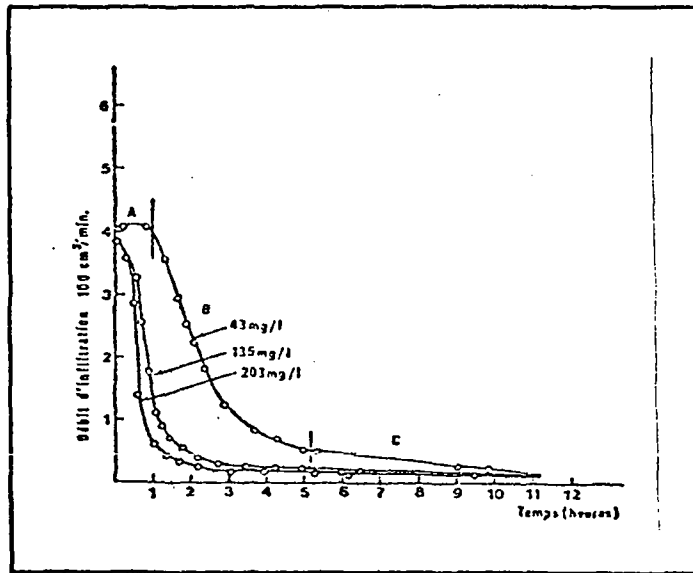
Les origines de cette diminution de la porosité intrinsèque peuvent être diverses (physique, chimique, biologique) ou encore, être dues à la présence d'algues.

.../...

- a) Colmatage d'origine physique : le fond du bassin agit vis-à-vis des matières en suspension (M.E.S.) comme un filtre. L'importance du colmatage d'origine physique est donc fonction de la concentration en MES des effluents (figure 12).

FIGURE 12

INFILTRATION SUR COLONNES DE SABLE - EVOLUTION DU COLMATAGE POUR  
DIFFERENTES CHARGES EN MATIERES EN SUSPENSION



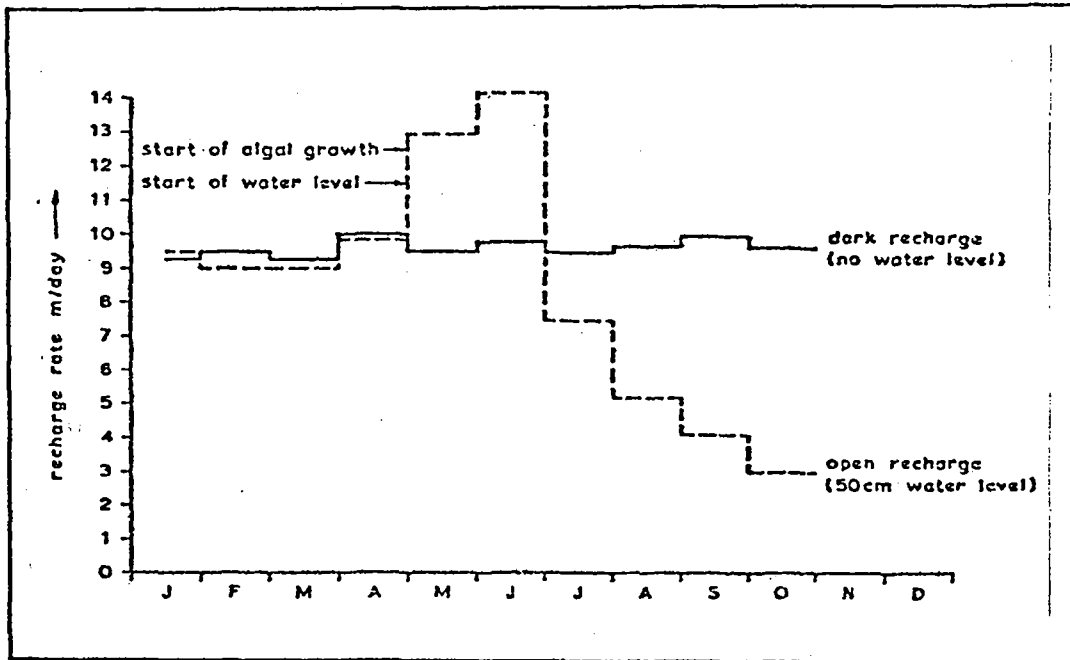
*(Extrait du Document F 2028)*

- b) Colmatage d'origine chimique : il est le résultat de la précipitation des sels contenus dans l'effluent au contact de certains constituants du sol.
- c) Colmatage d'origine biologique : le mécanisme exact du colmatage biologique n'est pas entièrement connu, mais on sait que le rôle des bactéries y est très important (G 5134/1). Ainsi, le développement des bactéries et la production de produits résultant de leur métabolisme peuvent entraîner un colmatage par obstruction des pores du sol.
- d) Colmatage par les algues : la présence d'éléments nutritifs, tels que le phosphore dans les eaux, combinée avec un éclairage suffisant, permet, si toutefois la température est assez élevée, le développement des algues dans le bassin. L'accumulation de celles-ci peut conduire au colmatage de la plage d'infiltration comme le montre la figure 13.

.../...

FIGURE 13

EFFECT OF OPEN RECHARGE ON RECHARGE RATE



(Extrait du Document 66/10709)

La présence d'algues dans un bassin apporte les avantages suivants :

- les feutrages des algues favorisant la filtration de l'eau et la coagulation des particules en suspension,
- la croissance algale prélève des éléments nutritifs dans le milieu et peut également concentrer dans la cellule végétale des substances nocives et en particulier les métaux lourds.

Mais ces algues présentent les inconvénients suivants :

- le dégagement d'odeurs désagréables
- la réduction de la perméabilité des bassins par développement d'un tapis dense à la surface du sol.

En général, le bilan global des actions dues à la présence d'algues est nul ou négatif.

En conclusion, on peut donc dire que le rôle des algues est complexe. Aussi chaque cas étudié sera un cas particulier (66/17223).

.../...

## V - REMEDES CONTRE LE COLMATAGE - GESTION DES DISPOSITIFS D'INFILTRATION

### 1) Méthodes permettant de réduire le colmatage

a) Colmatage par les M.E.S. : on peut le réduire par différentes méthodes :

- décantation de l'effluent ou filtration à travers un massif de graviers
- création d'une couverture végétale dans le fond du bassin
- addition de matières organiques ou de produits chimiques dans la couche supérieure du sol.

b) Colmatage biologique : on peut le réduire, principalement par une javellisation de l'effluent. Mais ceci a l'inconvénient de supprimer l'épuration biologique dans le bassin lui-même.

c) Colmatage par les algues : le contrôle du développement des algues peut se faire:

- par l'emploi d'algicides mais avec un certain danger pour la qualité future des eaux
- par une gestion appropriée des bassins.

### 2) Gestion des dispositifs d'infiltration

Comme nous venons de le voir, on ne peut et on ne veut pas annihiler complètement le phénomène de colmatage. En effet, la tolérance d'un certain colmatage est essentielle pour préserver un écoulement en milieu non saturé sous le bassin. Cet écoulement, répétons-le, joue un rôle déterminant dans l'épuration des eaux de recharge par le sol. Le problème est que le colmatage est un phénomène qui s'amplifie avec le temps jusqu'à devenir inadmissible. Il faut donc que les périodes d'infiltration alternent avec des périodes de dessèchement afin de pouvoir, d'une part, aérer le sol et ainsi permettre à la vie microbienne dans le sol de se reconstituer et, d'autre part, éliminer les dépôts de matières en suspension.

Le dessèchement des bassins permet une récupération totale de la capacité d'infiltration comme le montre la figure 14.

Le problème de gestion des systèmes d'infiltration se résume donc à la détermination du rythme d'alternance entre les périodes de submersion et les périodes de séchage et d'entretien pour que le rendement de l'installation soit optimum.

La période de submersion est définie par l'apparition d'un colmatage inacceptable.

La durée du séchage est fonction du climat et de la saison (cf. figure 14).

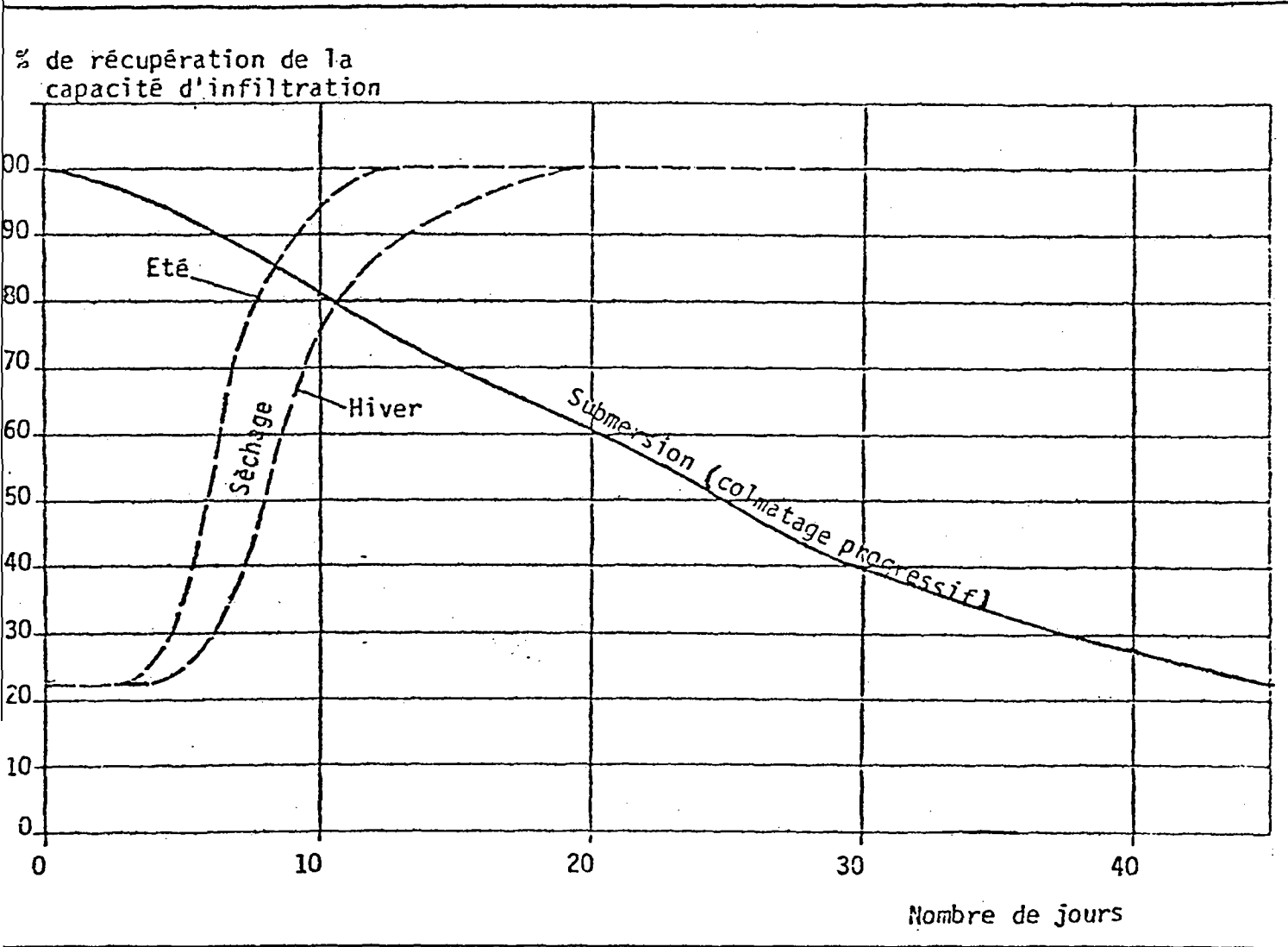
.../...



FIGURE 14

AMENAGEMENT DE PHOENIX

EVOLUTION DE LA CAPACITE D'INFILTRATION EN FONCTION DU COLMATAGE ET TAUX DE RECUPERATION AU COURS DES PERIODES DE CHOMAGE DES BASSINS



(Extrait du Document G 5920)

Examinons divers cas :

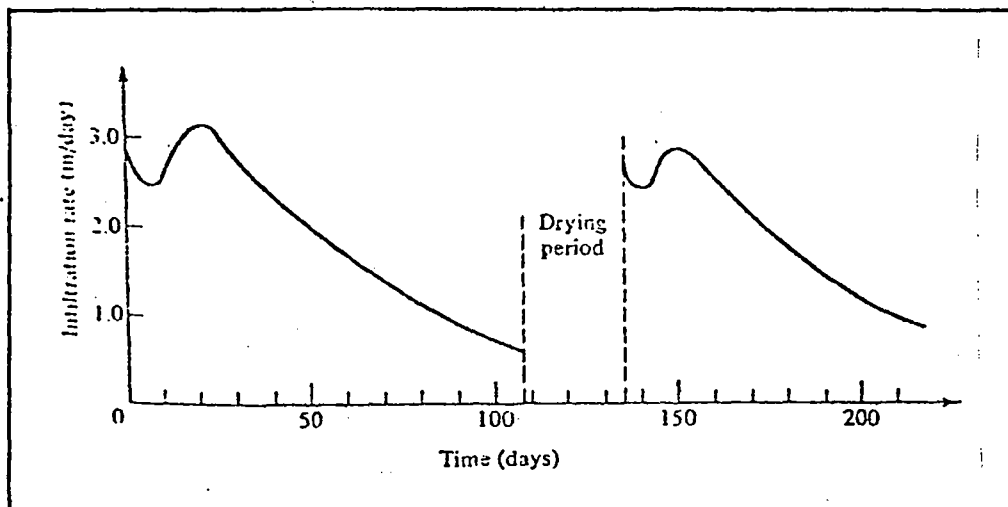
- a) Cas des bassins : la période d'infiltration doit être en principe de moitié par rapport à la période de séchage.

La figure 15 donne un exemple du fonctionnement dans le temps d'un bassin.

.../...

FIGURE 15

EXAMPLE OF VARIATION OF INFILTRATION RATE WITH TIME



(Extrait du Document F 3918)

Dans le cas où l'on veut un fonctionnement en continu de l'installation, il est donc nécessaire de prévoir la construction de trois bassins au moins (en général plus de trois dans les régions à climat humide ou tempéré). Le fonctionnement de ces bassins se fait alors en déphasage.

- b) Cas des aménagements en lit de rivière : la période de submersion est alors conditionnée par le régime d'écoulement du fleuve.

## B - DISPOSITIFS D'INJECTION

Il s'agit principalement des puits d'injection.

### I - CONDITIONS GENERALES DE FONCTIONNEMENT

Les dispositifs d'injection sont utilisés là où les dispositifs d'infiltration sont impossibles ou difficiles à mettre en oeuvre :

- cas où la nappe phréatique est captive (F 3918)
- existence d'une couche d'argile entre le sol et le niveau de la nappe (F 3918)
- cas où le sol est alcalin (F 3969)
- existence de terrains en couches superposées sédimentaires ou alluviaux, ayant

.../...

une conductivité hydraulique horizontale beaucoup plus élevée que la conductivité verticale (G 5134/1)

- nécessité d'un encombrement réduit.

## II - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PUIITS D'INJECTION

Comme nous l'avons vu plus haut, un puits d'injection est un forage "plongeant" dans la nappe. Son principe est donc tout à fait semblable, en première approximation, à celui d'un puits de pompage fonctionnant en sens inverse.

Enfin, contrairement au cas des dispositifs d'infiltration, le colmatage, même léger, n'a aucune fonction épuratrice dans le cas d'un puits d'injection. Il devra donc être évité à tout prix.

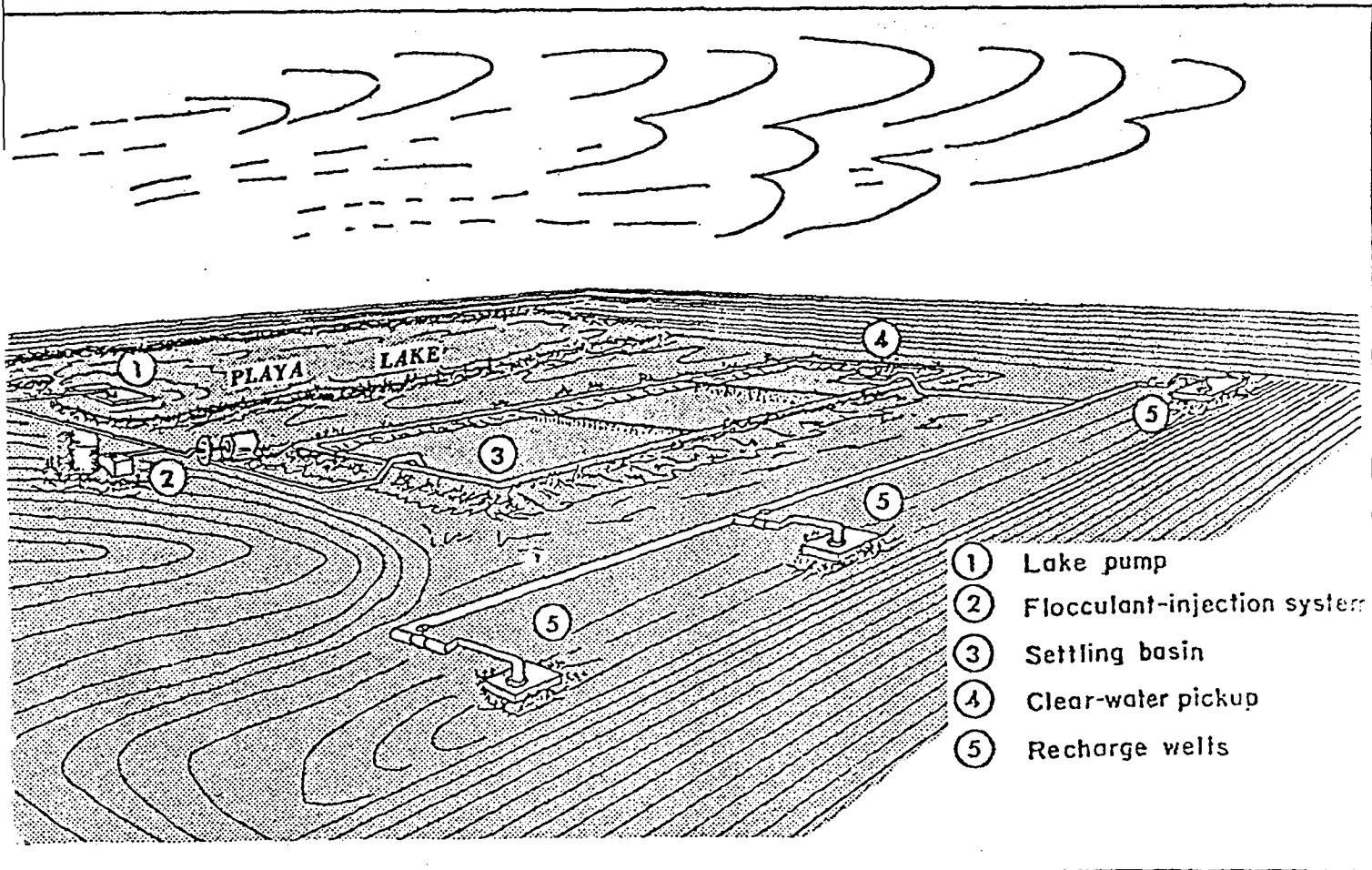
## II - LES PUIITS D'INJECTION

### 1) Construction

Dans leur construction, les puits d'injection sont des forages classiques.

La figure 16 donne le schéma d'une installation complète d'injection.

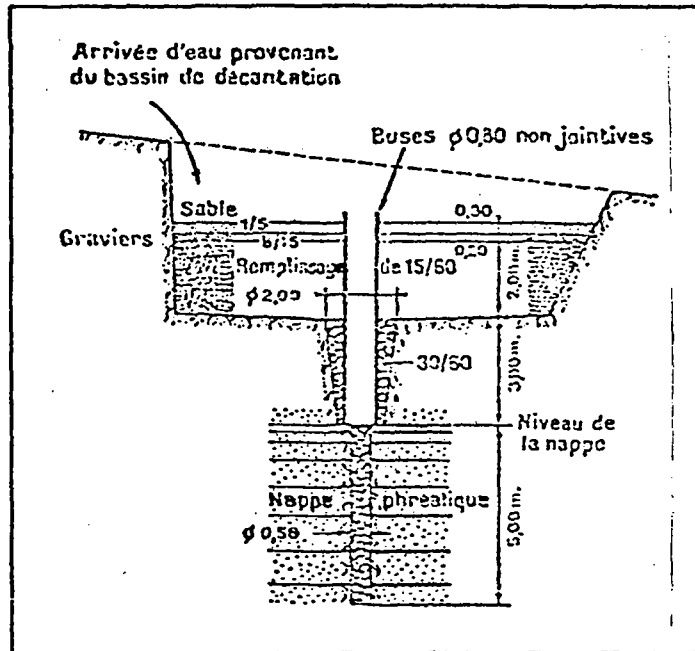
FIGURE 16



La figure 17 montre, sur un exemple, la coupe d'un puits d'injection.

FIGURE 17

PUITS D'INJECTION DE LA VALLEE DE LA DURANCE



(Extrait du Document F 2028)

Pour les puits d'injection, il n'existe pas de dessin optimum mais certaines techniques de construction donnent manifestement de meilleurs résultats que d'autres. Toute technique de construction qui réduit la perméabilité du terrain, comme cela est le cas avec l'invasion des terrains entourant les puits par les boues de forage ou bien, avec l'effondrement des particules fines dans le puits, peut conduire à une perte définitive de perméabilité (G 5191).

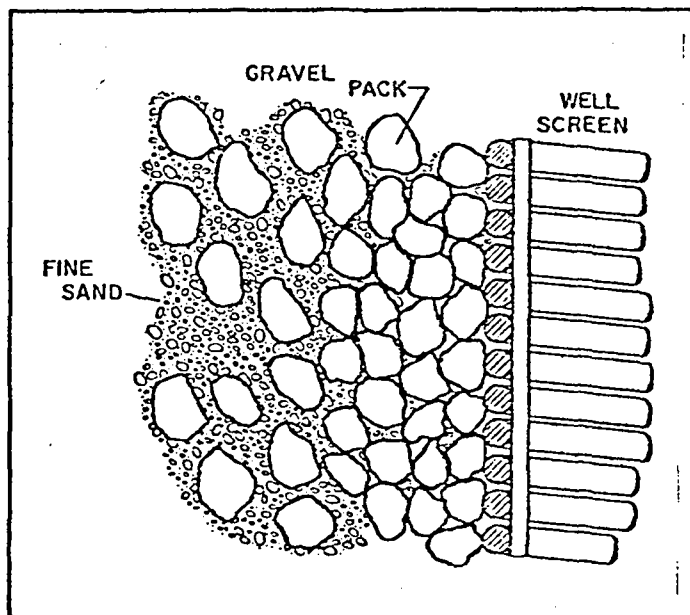
L'envahissement du puits par des particules fines peut être contrecarré par la constitution autour du trou de forage, d'un écran de graviers suffisamment petits pour empêcher la migration des fines particules et, assez gros pour ne pas gêner l'écoulement. La figure 18 donne une coupe de cet écran.

Enfin, la circulation de l'eau dans le puits d'injection doit être étudiée pour ne produire ni érosion, ni effondrement des terrains qui pourrait se traduire par un colmatage du puits par les matériaux fins.

.../...

FIGURE 18

FUNCTION OF A GRAVEL PACK IN RETARDING THE MIGRATION  
OF FINE SAND TO A WELL SCREEN



(Extrait du Document G 5191)

2) Aménée de l'eau dans le puits

L'introduction de l'eau de recharge dans l'aquifère peut se faire sous la pression atmosphérique ou sous une pression plus élevée.

Contrairement au cas des dispositifs d'infiltration, l'air contenu dans l'eau doit être éliminé au maximum. En effet, l'entraînement de bulles d'air ou de gaz dissous joue un rôle capital vis-à-vis du colmatage. Certaines précautions sont à prendre : nous les examinerons plus loin.

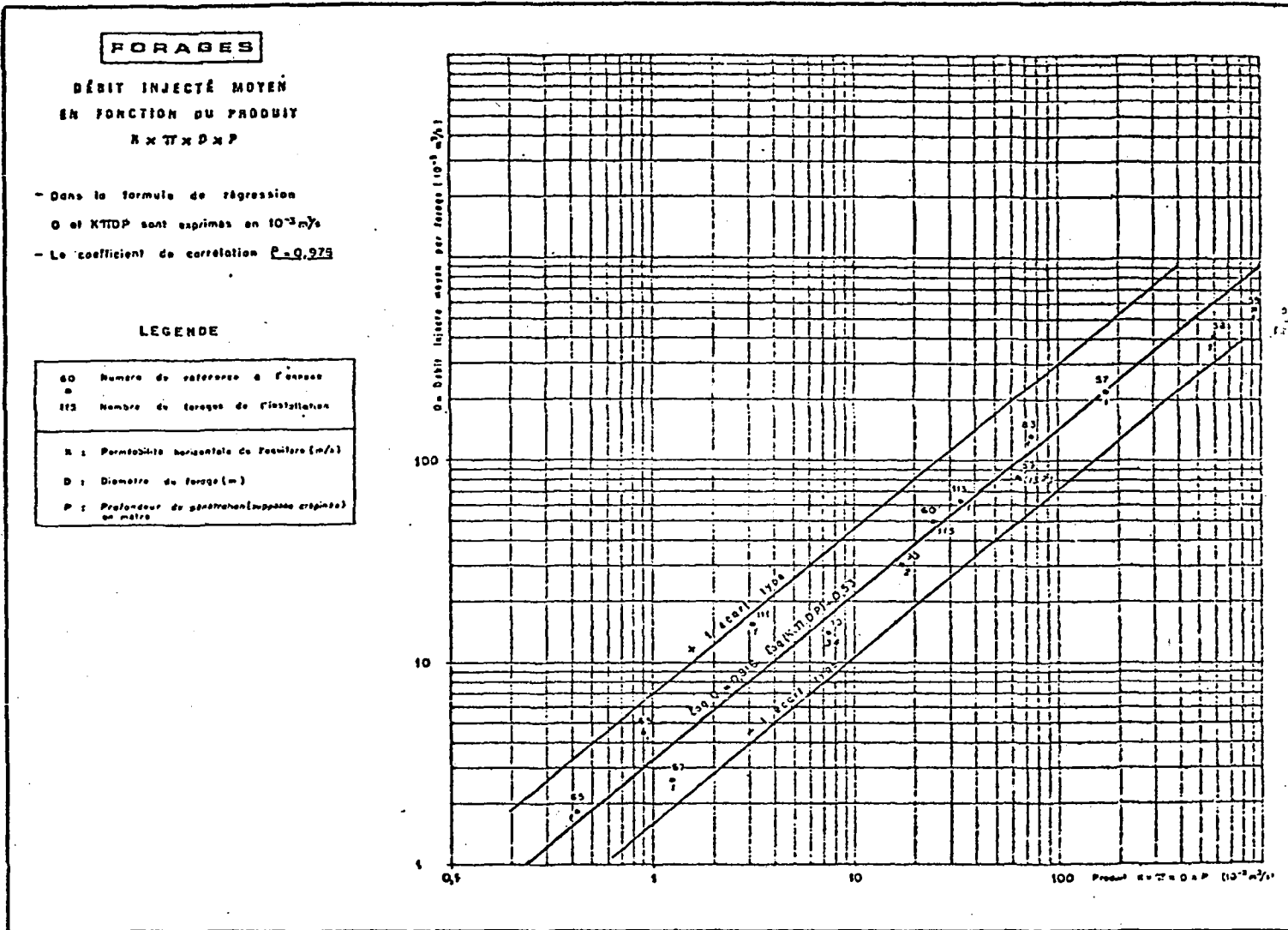
3) Taux d'injection

La prévision du taux d'injection peut se faire à partir d'essais de pompage. Cependant différents facteurs rendent souvent peu fiables les extrapolations à partir de ces essais. En effet, la différence entre une injection et un pompage ne se limite pas à un changement de sens du flux d'eau : des problèmes liés à la présence de MES, d'air, de substances chimiques et organiques interviennent. C'est pourquoi les débits d'injection sont toujours plus faibles que les débits du pompage (F 275).

Une autre méthode de prévision est l'utilisation d'une loi statistique donnée par la figure 19.

.../...

FIGURE 19



(Extrait du Document 66/00637)

Le tableau 2 donne, à titre d'exemple, la valeur du taux d'injection obtenue pour différentes réalisations au U.S.A.

IV - COLMATAGE DES DISPOSITIFS D'INJECTION

Le colmatage des puits d'injection a trois origines principales (F 2028) :

- présence de gaz dissous, d'air et de particules en suspension dans les eaux d'injection,
- réactions entre les eaux d'injection et les eaux du gisement,
- réactions entre les eaux d'injection et certains constituants du sol.

.../...

TABLEAU 2

AVERAGE WELL RECHARGE RATES

Location	Rate, cfs
Fresno, Calif.	0.2-0.9
Los Angeles, Calif.	1.2
Manhattan Beach, Calif.	0.4-1.0
Orange Cove, Calif.	0.7-0.9
San Fernando Valley, Calif.	0.3
Tulare County, Calif.	0.12
Orlando, Fla.	0.2-21
Mud Lake, Idaho	0.2-1.0
Jackson County, Mich.	0.1
Newark, N. J.	0.6
Long Island, N. Y.	0.2-2.2
El Paso, Texas	2.3
Williamsburg, Va.	0.3

(Extrait du Document F 275)

Les processus de colmatage :

Comme dans le cas des dispositifs d'infiltration les processus du colmatage sont d'ordre physique, chimique ou biologique.

1) Processus mécaniques

- dépôt des M.E.S. qui forme un écran imperméable;
- entraînement d'air et libération des gaz dissous. Les bulles de gaz ainsi formées pénètrent dans l'aquifère et en obstruent les pores; ceci entraîne une réduction de la perméabilité. Par ailleurs, un autre phénomène lié à la présence d'air dans les eaux d'injection est à craindre : il s'agit de la formation de poches de gaz sous pression qui par détente lors de l'arrêt de l'injection peut entraîner la destruction complète de l'ouvrage. La fig. 20 illustre ce dernier phénomène sur un exemple.

2) Processus chimiques

- dispersion et gonflement des argiles;
- précipitation de sels métalliques ou alcalino-terreux.

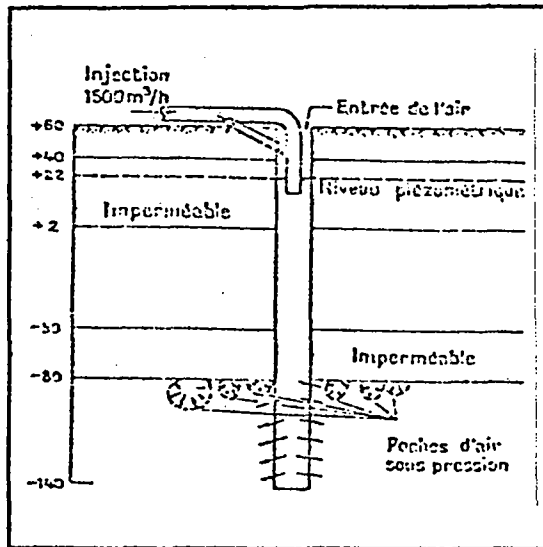
3) Processus biologiques

- prolifération des bactéries;
- production par l'activité microbienne de substances chimiques colmatantes.

.../...

FIGURE 20

PHENOMENE D'ENTRAINEMENT D'AIR AU COURS DE L'INJECTION DANS LES DOLOMIES  
ET CALCAIRES KARSTIQUES D'ISRAEL



(Extrait du Document F 2028)

V - REMEDES CONTRE LE COLMATAGE ET GESTION DES DISPOSITIFS D'INJECTION

1) Méthodes pour la réduction du colmatage

- a) Cas des M.E.S. : la concentration en M.E.S. des eaux d'injection peut être réduite par un traitement préalable comme nous l'avons vu dans la première partie de ce travail.
- b) Cas de l'air et des gaz dissous : un traitement préalable permet une désaération de l'eau d'injection. Par ailleurs, pour éviter l'entraînement d'air, on peut prendre les précautions suivantes :
  - . le tube d'amenée d'eau doit toujours être noyé. Aussi, l'introduction en chute libre est à exclure;
  - . la construction du puits doit être telle que tous ces éléments soient à une pression supérieure à la pression atmosphérique. On évite ainsi tout phénomène de succion le long du puits d'injection. Ce problème peut être résolu en utilisant en pied de forage une valve "antisuccion". La figure 21 donne la coupe d'un tel dispositif.

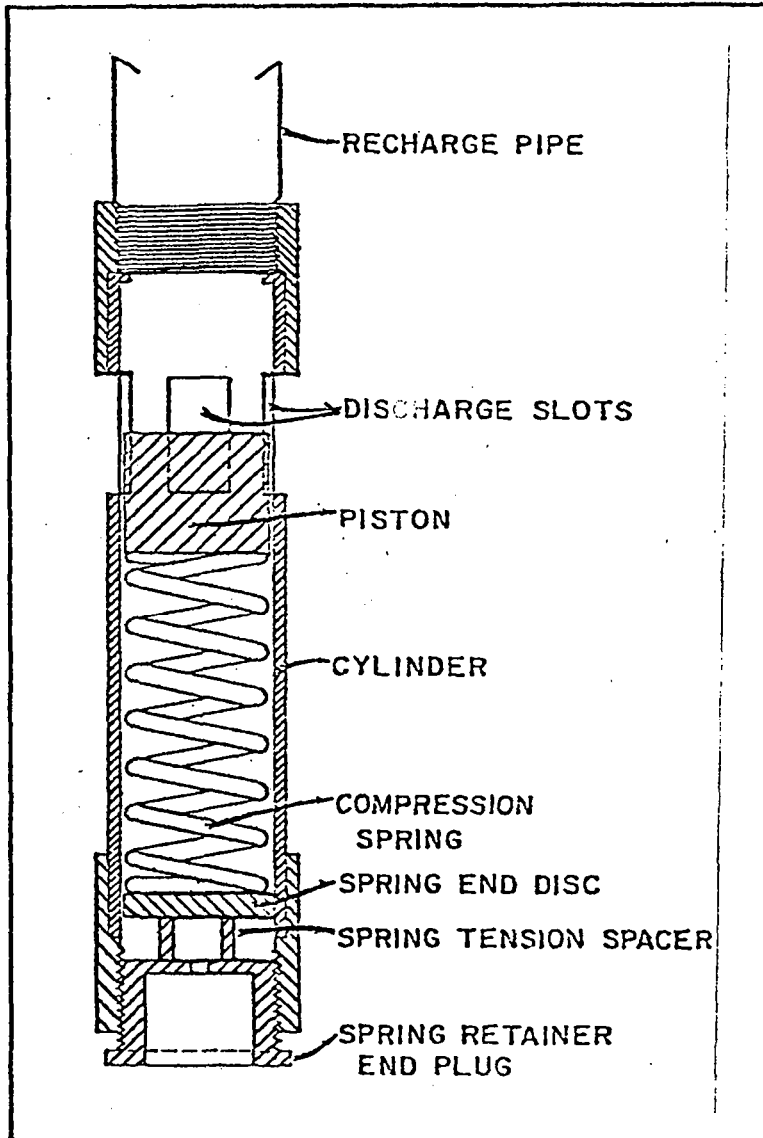
.../...



FIGURE 21

FOOT VALVE USED FOR CONTROLLING RATES OF RECHARGE

THROUGH AN INJECTION WELL



*(Extrait du Document G 5191)*

. les débits doivent être limités : ce contrôle peut se faire en utilisant des tubages, ayant un faible diamètre ou encore, ayant une rugosité suffisante.

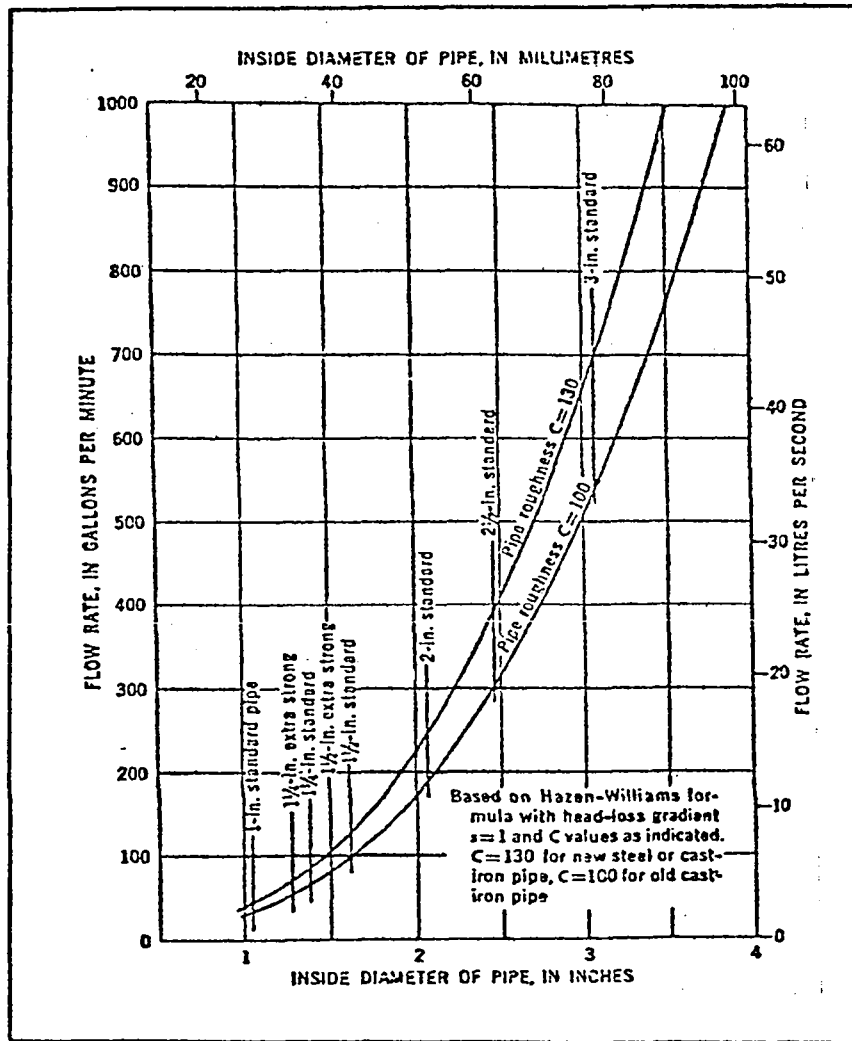
La figure 22 donne :

- . d'une part, l'évolution des débits d'injection avec le diamètre du tubage,
- . d'autre part, l'évolution de ces débits avec la rugosité du tubage.

.../...

FIGURE 22

GRAPH OF FLOW RATES IN SMALL PIPES, WITH UNIT HEAD LOSS  
PER UNIT LENGTH OF PIPE



(Extrait du Document 66/07439)

- c) Cas du colmatage chimique : pour réduire le colmatage chimique lors de l'injection, on peut suivant le cas :
- . effectuer une déminéralisation partielle ou complète lors d'un traitement préalable;
  - . diluer les eaux d'injection avec une eau neutre vis-à-vis du gisement.
- d) Cas du colmatage par les bactéries : une chloration des eaux d'injection permet, en général, de réduire l'effet des bactéries.

.../...

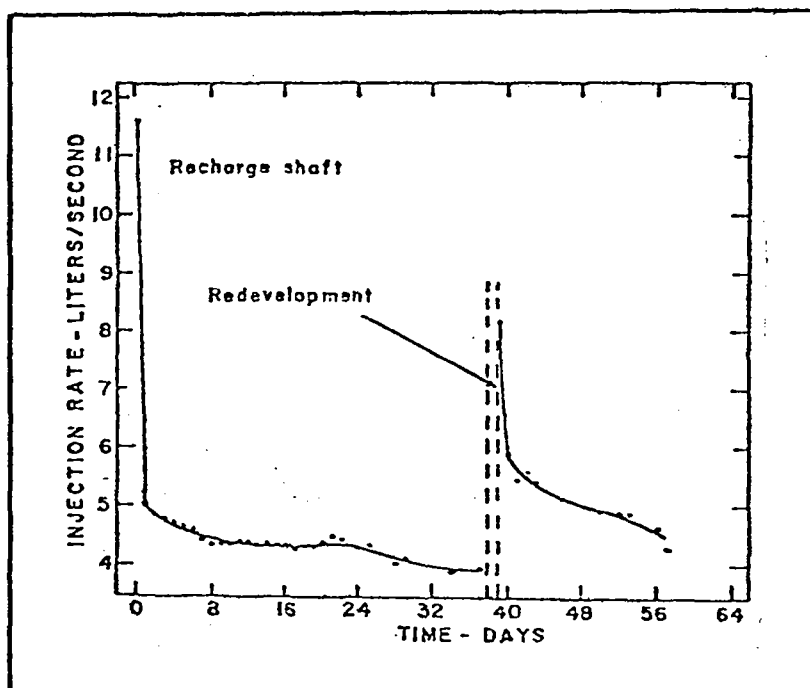
## 2) Gestion des puits d'injection

Comme dans le cas des dispositifs d'infiltration, il apparait, lors d'une recharge artificielle de nappe par injection, un colmatage progressif. Lorsque celui-ci a atteint une valeur inadmissible, on doit procéder à un décolmatage.

La figure 23 montre l'évolution du taux d'injection avec le temps ainsi que la rénovation de ce taux après décolmatage.

FIGURE 23

### INJECTION RATE VERSUS TIME FOR SHAFT



*(Extrait du Document 66/07790)*

La fréquence des décolmatages est extrêmement variable suivant les installations.

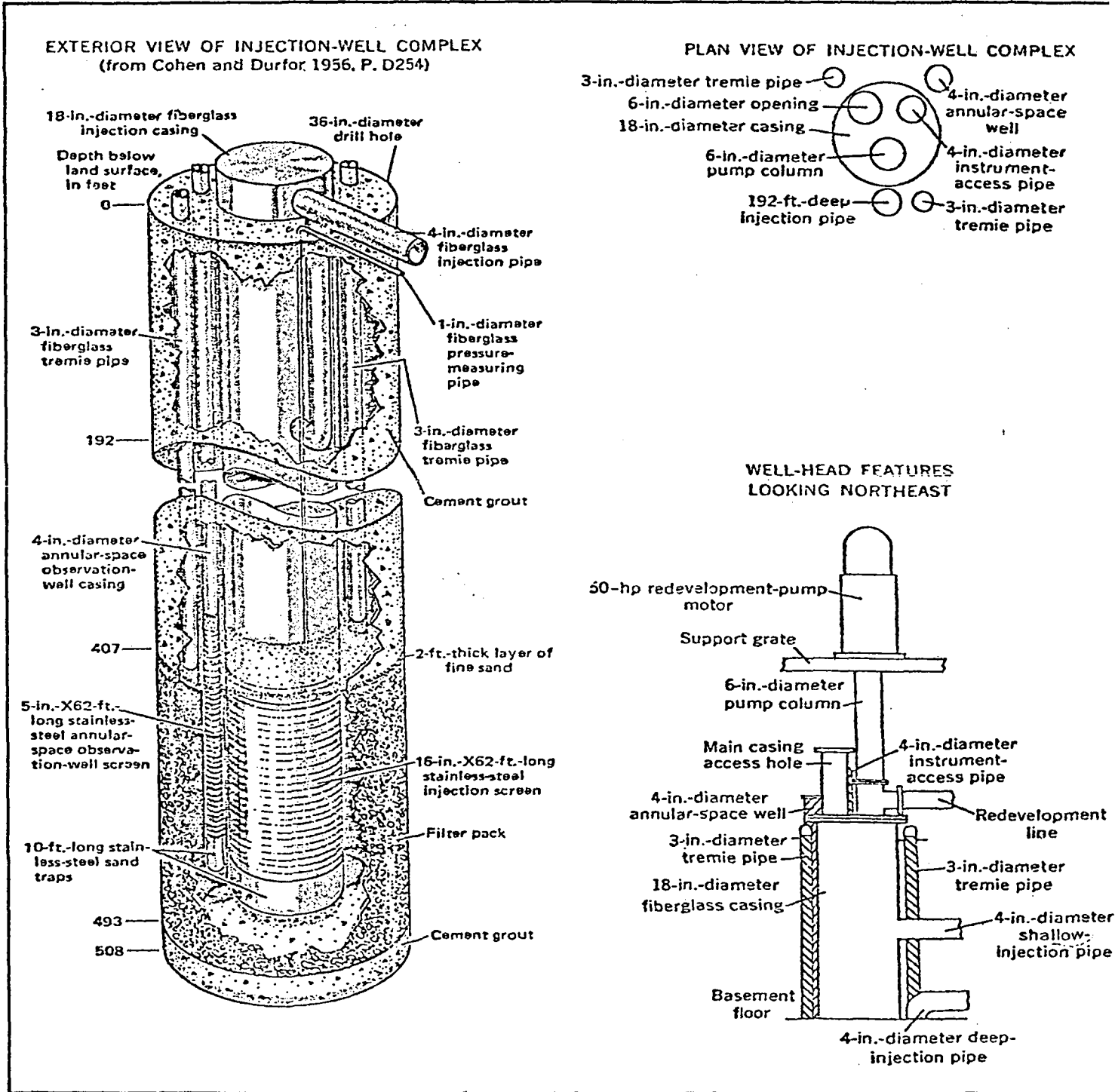
Les procédés de décolmatage les plus employés sont le pistonnage et le repompage; dans ce dernier cas, la pompe de nettoyage est généralement laissée à demeure dans l'ouvrage (66/00637). En effet, le démontage de la pompe est coûteux et délicat. Toutefois, il faut noter que la présence de la pompe induit une résistance hydraulique dans le circuit qui peut réduire d'un tiers la capacité d'écoulement (G 5134/1).

La figure 24 donne les détails d'un puits d'injection où le système de nettoyage est intégré à l'ensemble de l'installation.

.../...

FIGURE 24

SCHEMATIC OF INJECTION - WELL COMPLEX



(Extrait du Document G 1787/4)

.../...

Le résultat du décolmatage des puits est en général une récupération quasi-complète de la capacité d'injection initiale. Mais on peut dire, d'une manière générale, que les ouvrages d'injection sont d'une gestion délicate et que leur durée de vie est imprévisible mais, de toute façon, inférieure à celle des dispositifs d'infiltration.

---



## LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- F 275/2            TODD D.K.  
                  "Groundwater hydrology"  
                  J. Wiley and Sons Ed., 1980, 546 pages
- F 2028            BIZE J., BOURGUET L., LEMOINE J.  
                  "L'alimentation artificielle des nappes souterraines"  
                  Ed. Masson & Cie, 1972, 199 pages
- F 3469            X ...  
                  "Health aspects of wastewater recharge"  
                  Water Information Center, New York, 1978, 240 pages
- F 3918            BEAR J.  
                  "Hydraulics of groundwater"  
                  McGraw-Hill Book Company, 1979, 567 pages
- G 1681/519        SMITH D.G., LINSTEDT K.D., BENNETT E.R.  
                  "Treatment of secondary effluent by infiltration-percolation"  
                  EPA-600/2-79-174, Août 1979, 103 pages
- G 1787/4         KOCK E., GIAIMO A.A., SULANN D.J.  
                  "Design and operation of the artificial-recharge plant at  
                  Bay Park, New York"  
                  U.S. Geological Survey, Washington, s.d.
- G 5134/1         X ...  
                  "Emmagasinement souterrain des eaux et recharge artificielle"  
                  Ressources Naturelles/Série Eau, ONU, n° 2, 1977, 307 pages
- G 5191            BROWN R.F., SIGNOR D.C., WOOD W.W.  
                  "Artificial groundwater recharge as a water management  
                  technique on the southern high plains of Texas and New Mexico"  
                  Texas Depart. of Water Resources, 1978, 32 pages
- G 5920            X ...  
                  "L'assainissement des régions dépourvues de réseau  
                  hydrographique et la protection des nappes - tome 1"  
                  Agence Fin. de Bassin Seine-Normandie, Déc. 1978, 107 pages
- G 6230            X ...  
                  "Possibilités d'épandage des eaux usées urbaines"  
                  Rapport Agence R.M.C., 1979, 371 pages
- G 7220            BIZE J.  
                  "Recharge artificielle des nappes"  
                  P.N.U.D., Compte-rendu de mission, Sept.-Oct. 1981, 45 pages

.../...

- 66/00517 MORAVCOVA V.  
"Clogging of open air artificial recharge reservoirs by heavy overgrowth of algae"  
Wat. Treat. and Exam., 1971, p. 245-252
- 66/00637 BOURGUET L.  
"Inventaire international des aménagements d'alimentation artificielle - dépouillement et synthèse des réponses"  
Hydrologie, n° 3, 1971, 80 pages
- 66/07439 REEDER H.O.  
"Injection-pipe system for artificial recharge"  
Jour. Research U.S. Geol. Survey, vol. 3, n° 4, 1975, p. 501-503
- 66/08781 TRUEB E., BIZE J., HZBERER K.  
"Künstliche Grundwasseranreicherung"  
Gas Wasser Abwasser, 1975, vol. 55, n° 12, p. 805-815
- 66/10709 ZOETEMAN B.C.J., HRUBEC J., BRINKMANN F.J.J.  
"The Veluwe artificial recharge plan water quality aspects"  
JIWES, 30, n° 3, 1976, p. 123-137
- 66/17223 PIERRE J-F.  
"Etude de la végétation algale d'une installation d'alimentation artificielle d'une nappe alluviale de la Moselle"  
Tech. Eau et Assainis., n° 380-381, Août-Sept. 1978, p. 47-52
- 66/19065 BARONI D.  
"La protection des eaux souterraines par la réalimentation artificielle - Cas de la nappe franco-suisse de l'Arve"  
T.S.M. Eau, 74, n° 3, Mars 1979, p. 123-130
- 66/26930 TZIMOPOYLOS C., TOLIKAS P.  
"Technical and theoretical aspects in artificial groundwater recharge"  
ICID Bull., 29, n° 2, 1980, p. 40-44
- 66/28281 OLSON J.V., CRITES R.W., LEVINE P.E.  
"Groundwater quality at rapid infiltration site"  
J. Environ. Eng. Div., 106, 1980, EE5, p. 885-899
-



- CHAPITRE IV -

DONNEES ECONOMIQUES D'UNE OPERATION D'ALIMENTATION

ARTIFICIELLE DE NAPPE SOUTERRAINE



La faisabilité technique (existence de conditions géologiques et hydrogéologiques favorables) d'une opération d'alimentation artificielle ayant été prouvée, il convient, alors, d'en vérifier l'opportunité économique. Pour cela, une analyse minutieuse de tous les facteurs entrant dans la composition d'une part, du revenu et d'autre part, du coût, doit être faite. La comparaison de ces deux derniers points permet de déterminer le bénéfice que peut apporter une telle opération.

La suite du travail consistera alors à comparer le prix de revient de l'opération de recharge avec le prix de revient d'autres méthodes répondant au même objectif (à condition, bien sûr, que ces autres méthodes soient techniquement réalisables). Par exemple :

- choix entre une opération de recharge par bassin d'infiltration ou bien par puits d'injection;
- choix entre une opération de recharge par bassin d'infiltration et une unité de traitement des eaux;
- choix entre une opération de recharge par puits d'injection et la construction d'une adduction d'eau;
- choix entre un stockage en surface et un stockage souterrain.

Nous donnerons un développement de ces différentes comparaisons dans le paragraphe III de cette partie.

## - REVENUS APPORTÉS PAR UNE OPÉRATION DE RECHARGE

Ces revenus peuvent être directs ou indirects.

### 1) Revenus directs

Les revenus directs sont le résultat de la vente des eaux de recharge après passage dans le sol et pompage. Cette vente se fait suivant la tarification en vigueur des eaux. Il faut noter que le prix de l'eau varie suivant l'endroit et dans le temps et que, par conséquent, l'estimation des revenus directs d'une opération de recharge suppose la connaissance à long terme de la politique de tarification de l'eau.

### 2) Revenus indirects

Les revenus indirects sont le résultat de l'impact d'une opération de recharge sur la vie économique d'une région ou d'un Etat. Par exemple :

- si l'objectif de l'opération de recharge est la suppression d'une surexploitation de la nappe, le revenu apporté par une telle opération résultera de la diminution des coûts de pompage mais aussi de l'économie de travaux d'approfondissement des puits;
- si l'objectif de l'opération de recharge est le stockage d'eau pour une utilisation postérieure, le revenu apporté viendra de l'accroissement du revenu agricole ainsi que de l'expansion humaine et industrielle de la région concernée.

.../...

Compte tenu de la multiplicité et de la complexité des paramètres entrant dans la composition du revenu indirect apporté par une opération de recharge, l'estimation de ce revenu est assez difficile.

## B - COÛTS D'UNE OPÉRATION D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE NAPPE

La répartition des coûts se fait en trois étapes :

- coûts des études
- coûts de construction
- coûts de fonctionnement et d'entretien.

### 1) Coûts des études

Les études comprennent (G 5134/1) :

- . les travaux de recherche des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des terrains : les résultats de ces travaux permettent de conclure à la faisabilité technique ou non d'une telle opération. Cette étape conditionne, bien sûr, la suite des opérations;
- . le tracé de cartes;
- . les travaux de conception de l'installation de recharge;
- . la recherche et l'achat des terrains;
- . les procédures juridiques si l'on doit recourir à l'expropriation.

### 2) Travaux de construction

Le détail des différents points intervenant dans le coût d'un bassin d'infiltration et d'un puits d'injection est donné par la figure 1.

La figure 2 représente sur un diagramme le coût de certains éléments de ces deux dispositifs de recharge artificielle. L'année de référence est 1975.

Chaque installation de recharge est, répétons-le, un cas particulier. Aussi, ce sont les conditions locales qui dicteront l'équipement nécessaire : si par exemple, tous les écoulements, à l'intérieur de l'installation, peuvent se faire par gravité, le nombre total de pompes nécessaires sera réduit, ce qui aura pour effet de diminuer le coût global de l'équipement de l'installation (G 5191).

.../...

FIGURE 1

TRAVAUX DE CONSTRUCTION

1. Installations d'épandage

- a) Terrains ou bassins
  - levées ou digues
  - canaux d'amenée
  - canaux d'évacuation
- b) Appareils enregistreurs
- c) Installations de dérivation
- d) Dispositifs de contrôle
- e) Voies d'accès
- f) Clôtures
- g) Abris
- h) Matériel de traitement de l'eau

2. Installations d'injection

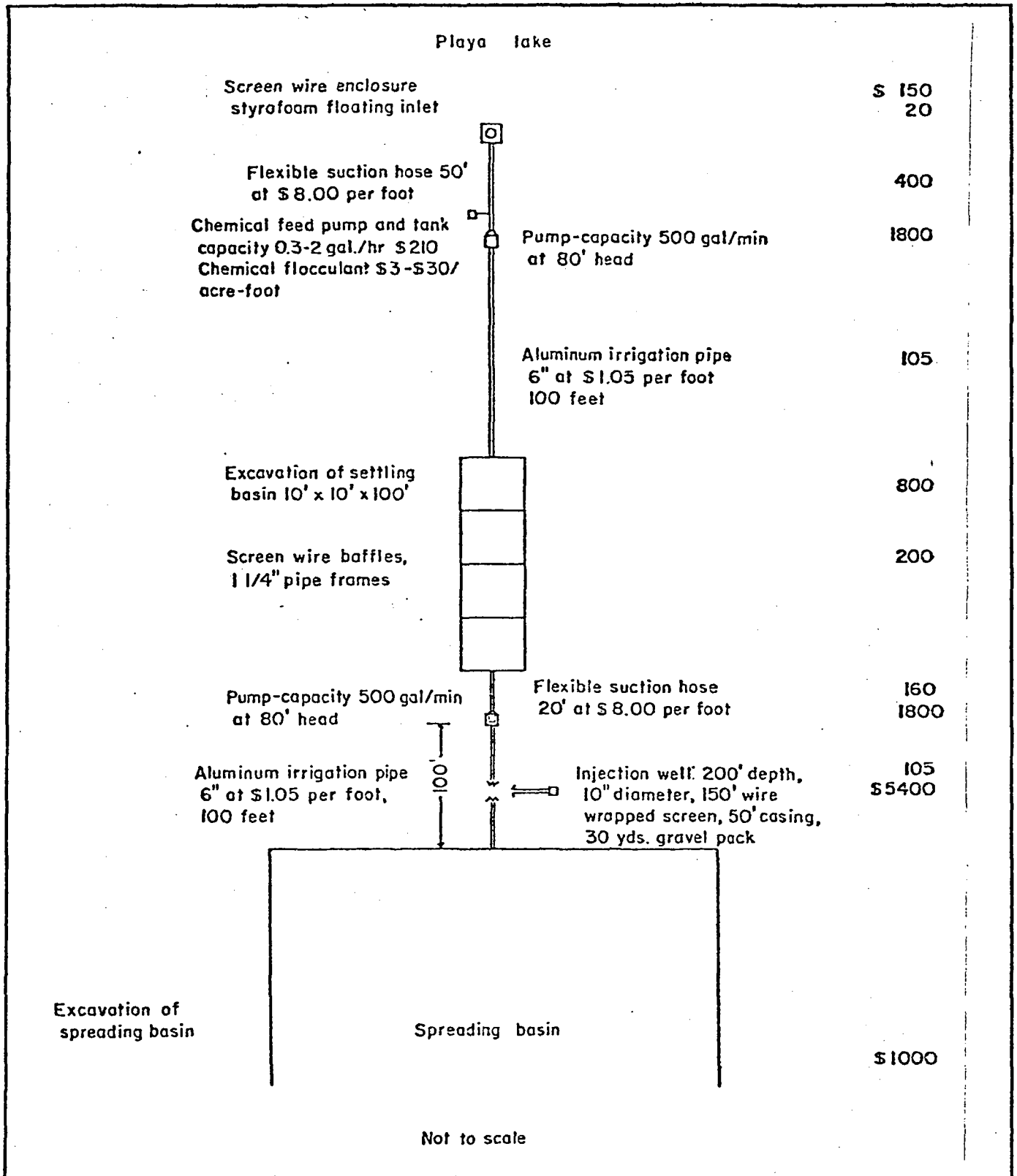
- a) Construction du puits d'injection
  - colonne de tubage
  - compactage du gravier ou de la gravette-filtre
  - injections pour étanchéité
  - packers
  - méthode de forage (rotation avec circulation de boue inversée, rotation normale, battage au câble, autres méthodes)
  - perforations
- b) Puits d'observation
  - tubage
  - massif de gravette-filtre
  - injection pour étanchéité
  - méthode de forage (rotation avec circulation de boue inversée, rotation normale, battage au câble, autres méthodes)
  - travaux d'achèvement (perforation, dispositifs pour l'étude du puits par la méthode du carottage géophysique)
  - installations de contrôle des expériences

- c) Puits d'extraction - mêmes opérations que pour les puits expérimentaux, avec en plus :
  - matériel de pompage
  - énergie (électricité, moteurs à combustion interne)
- d) Installations de contrôle de l'exploitation
  - poste de régulation de la pression
  - compteurs
  - vannes (de fermeture, contrôle, soupape de sécurité, de purge, soupape à vide)
- e) Installations de traitement de l'eau
  - javellisation
  - acidification
  - autres procédés
- f) Conduites
  - matériaux (buses en béton, acier recouvert et doublé de béton, amiante-ciment, matières plastiques)
- g) Bâtiments
- h) Appareillage de contrôle
  - enregistreurs
  - sondeurs
  - échantillonneurs (pompe submersible, échantillonneur aléatoire, pompe élévatoire à air, conductivité électrique).

*(Extrait du Document G 5134/1)*

FIGURE 2

DIAGRAM SHOWING COST FACTORS OF AN ARTIFICIAL-RECHARGE INSTALLATION



(Extrait du Document G 5191)  
 - Année de référence 1975 -

### 3) Fonctionnement et entretien

La figure 3 donne la liste des différents éléments constituant le coût du fonctionnement et d'entretien pour des bassins d'infiltration ou des puits d'injection.

### 4) Coût global

La réunion des coûts précédents détermine le coût global d'une opération de recharge. Ce coût calculé sur une année de fonctionnement et rapporté au volume d'eau annuel ainsi utilisé donne le prix de revient du m<sup>3</sup> d'eau de recharge.

L'examen de plusieurs installations montre que ce prix de revient est variable; néanmoins en utilisant les résultats d'une enquête faite il y a quelques années, on peut définir les valeurs moyennes pour les différents facteurs économiques d'une recharge artificielle. Ainsi le tableau 1 donne la valeur moyenne des investissements nécessaires pour différents dispositifs de recharge.

TABLEAU 1

INVESTISSEMENT EN FRANCS, PAR M3/AN INFILTRE

Prétrait.	Bassins et canaux		Puits ou forages	
	avec	sans	avec	sans
Moyennes	0,362	0,139	0,125	0,052

*(Extrait du Document 66/00637)  
- Année de référence 1971 -*

L'examen du tableau 1 suggère les remarques suivantes :

- le coût moyen des investissements par m<sup>3</sup> et par an semble 2 à 3 fois plus élevé pour les canaux et bassins que pour les puits et les forages d'injection. Cette importante différence dans les investissements s'explique, en grande partie, par la nécessité, dans le cas d'un bassin ou d'un canal d'acheter une importante superficie de terrain. Ainsi, en zones urbaines, l'acquisition des terrains peut représenter jusqu'à 50 % des investissements;
- le coût d'investissement du prétraitement constitue une part importante du coût total d'investissement. Le tableau 2 montre l'incidence d'un prétraitement sur le prix de revient moyen d'un m<sup>3</sup> d'eau (résultats pour les dispositifs d'infiltration seulement).

.../...



FIGURE 3

FONCTIONNEMENT ET ENTRETIEN

1. Installations d'épandage

- a) Nivellement, égalisation des surfaces
- b) Protection contre les orages
- c) Réparation et remplacement des structures
- d) Entretien du matériel
- e) Combustible pour le matériel
- f) Location du matériel
- g) Ponçage et ramassage de la boue
- h) Protection contre les insectes
- i) Lutte contre la végétation parasite
- j) Amélioration de l'apparence esthétique des installations (notamment plantation de rideaux d'arbres et système d'arrosage)
- k) Protection contre les rongeurs
- l) Patrouilles de surveillance
- m) Traitement de l'eau (floculants)
- n) Entretien des pentes
- o) Actes de vandalisme

2. Installations d'injection

- a) Appareillage d'observation et de contrôle
- b) Appareillage pour la mesure du niveau d'eau
- c) Echantillonnage de l'eau
- d) Remise en état des puits et enlèvement des déchets
- e) Traitement de l'eau
  - javellisation
  - acidification
  - autres procédés
- f) Entretien du matériel
- g) Réparation des structures

- h) Combustibles
- i) Location de matériel
- j) Patrouilles de surveillance
- k) Analyses de l'eau
- l) Acte de vandalisme

### 3. Bureaux

- a) Contrôle et surveillance
- b) Administration
- c) Paiement des salaires et rémunération
- d) Frais généraux (bureaux et services locaux)
  - location et services publics
  - téléphone
  - fournitures
  - entretien de l'équipement de bureau
- e) Salaires et traitements
- f) Responsabilité civile (assurances)
- g) Impôts et taxes
- h) Intérêts

*(Extrait du Document G 5134/1)*

TABLEAU 2

INCIDENCE DU PRETRAITEMENT SUR LE PRIX DU M3 D'EAU

	Prix du m <sup>3</sup> en F.F	Incidence du prétraitement	Prix du prétraitement par m <sup>3</sup> (F.F)
Moyennes	0,249	27%	0,0787

(Extrait du Document 66/00637)  
- Année de référence 1971 -

Le coût du prétraitement était donc, en 1971, en moyenne de 8 centimes par m<sup>3</sup>.

Nous avons vu que le prétraitement des eaux d'infiltration retarde l'apparition d'un colmatage inadmissible et donc réduit l'entretien du dispositif concerné. Un calcul rapide montre, cependant, que l'économie ainsi réalisée est loin de venir compenser les dépenses dues au prétraitement de l'eau. On cherchera donc, dans le cas d'un dispositif d'infiltration, à réduire au maximum le prétraitement des eaux de recharge.

La figure 4 donne les résultats de corrélations statistiques établies entre l'investissement nécessaire à la réalisation d'une opération d'alimentation artificielle de nappe et le volume annuel introduit par ce moyen dans l'aquifère.

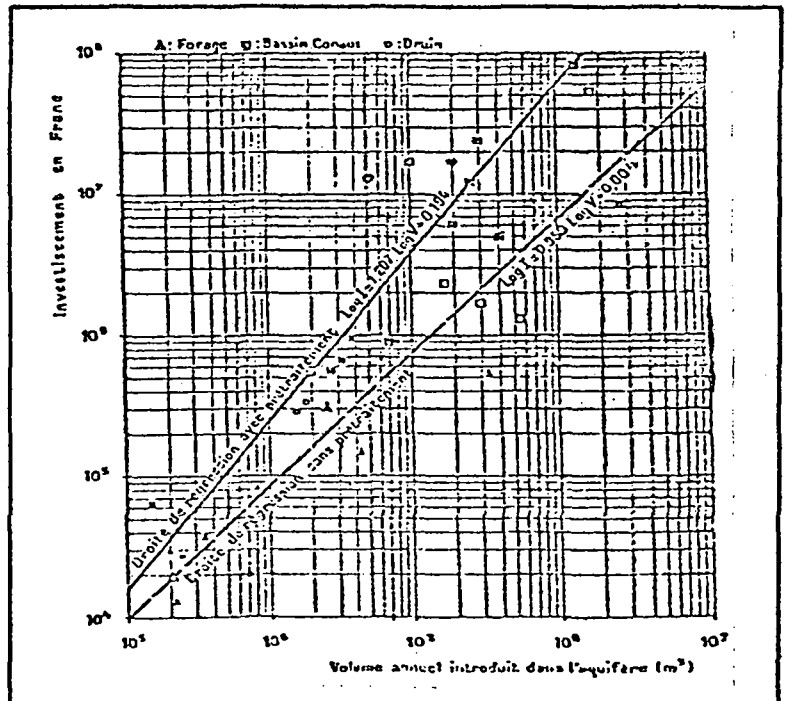
FIGURE 4

INVESTISSEMENT ET VOLUME ANNUEL INTRODUIT DANS L'AQUIFERE

- Dans les équations des droites de régression  
I est exprimé en 10<sup>6</sup> Francs  
V est exprimé en 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/an  
- Les coefficients de corrélation obtenus  
sont de 0,931 et 0,931

LEGENDE

Volume annuel introduit dans l'aquifère	Prétraitement	
	avec	sans
Moynes, moynel	▲ ■ ●	△ □ ○
Pointes, pointe	▲ ■ ●	△ □ ○



(Extrait du Document F 2028)  
- Année de référence 1971 -

Sur la figure précédente, on peut remarquer qu'une installation de recharge a un coût d'investissement qui, en moyenne, croît plus vite que le volume annuel introduit. Pour une installation sans prétraitement, c'est l'inverse.

## C - ÉTUDE DE L'OPPORTUNITÉ ÉCONOMIQUE D'UNE OPÉRATION DE RECHARGE

### ARTIFICIELLE - COMPARAISON AVEC D'AUTRES MÉTHODES DE MISE EN VALEUR

#### DES RESSOURCES EN EAU

L'alimentation artificielle de nappe est une opération rentable pour autant qu'elle soit moins coûteuse que les autres méthodes de mise en valeur des ressources en eau (G 5134/1). Il convient donc, avant de choisir une méthode, d'établir une comparaison de coût avec les autres méthodes (à condition, bien sûr, que celles-ci soient techniquement réalisables).

Nous donnons ci-dessous, quelques cas de comparaisons qui peuvent se présenter:

#### 1) Comparaison entre un bassin d'infiltration et un puits d'injection

Nous avons vu que, à débit annuel fixé, le coût d'investissement moyen dans le cas d'un bassin d'infiltration est 2 à 3 fois plus élevé que dans le cas d'un puits d'injection. Cependant, le prix de revient d'un m<sup>3</sup> d'eau infiltré dans un bassin est, en général, un tant soit peu moins élevé qu'un m<sup>3</sup> d'eau injecté dans un puits. Ceci s'explique par trois faits (66/22466) :

- les coûts de traitement sont réduits dans le cas d'une installation de recharge fonctionnant avec des bassins;
- l'entretien des bassins est beaucoup plus aisé que celui des puits d'injection: les frais d'entretien des bassins sont donc moindres;
- la durée de vie des ouvrages d'injection est, en général, beaucoup plus courte que celle des bassins. Par conséquent, l'amortissement des premiers doit se faire plus rapidement que celui des seconds.

Pour être compétitifs vis-à-vis des bassins d'infiltration, les puits d'injection doivent donc être conçus et gérés de manière rigoureuse. C'est pourquoi, dans bien des cas, on a préféré, malgré leur prix, les bassins aux puits d'injection.

#### 2) Comparaison entre une installation de recharge artificielle et une unité de traitement des eaux

Plaçons nous dans le cas où l'installation de recharge est un bassin. Nous avons vu que, par passage dans le sol, l'eau d'un bassin peut être grandement purifiée. Ce traitement par le sol vient donc concurrencer techniquement le traitement en station.

Examinons alors les éléments de comparaison suivants (56/00836) :

- a) implantation : l'espace nécessaire pour la construction d'une unité de traitement est inférieur à celui nécessaire pour une recharge par bassin;
- b) besoin en eau : dans le cas d'une recharge, les pertes en eau peuvent s'élever à 40 % du volume introduit;

.../...

- c) esthétique : dans un cas comme dans l'autre, les installations paraîtront inesthétiques;
- d) sécurité de l'exploitation : dans le cas d'une recharge par bassin, on doit s'attendre à des variations des débits d'infiltration (colmatage, fluctuations saisonnières agissant sur la viscosité de l'eau). Mais la simplicité des installations avec bassins fait qu'elles sont moins exposées aux pannes. Pour être fiables, les unités de traitement exigent, pour leur part, une gestion et un entretien rigoureux mis en oeuvre par un personnel qualifié;
- e) Possibilité de surcharge : les unités de traitement peuvent supporter jusqu'à 25 % de surcharge. Par contre, la possibilité de surcharge pour les bassins est faible. En effet, les bassins ont des dimensions fixées et, par conséquent, ils ne peuvent recevoir plus d'eau qu'ils peuvent en contenir;
- f) possibilité d'agrandissement : les unités de traitement peuvent être facilement agrandies, ce qui n'est pas le cas pour les bassins;
- g) constitution de l'eau épurée : l'eau reprise après infiltration dans le sol est, à condition de respecter certaines conditions (cf. 2ème partie de cette étude) toujours claire et saine. L'eau traitée pose souvent des problèmes d'odeur, de saveur et de température.

La comparaison économique entre une installation de recharge par bassins et une unité de traitement des eaux a souvent montré, là où les conditions géologiques et hydrogéologiques sont favorables et le prix des terrains pas trop élevé, la rentabilité de cette première méthode de traitement et de régénération des eaux.

### 3) Comparaison entre une installation de recharge artificielle et une adduction d'eau (66/02587)

Plaçons nous dans le cas où l'installation de recharge est un puits d'injection.

Pour ces deux installations, on peut, en première analyse, confondre les frais de production et de pompage. Si par ailleurs on néglige les autres frais d'exploitation, tels que l'entretien, la comparaison économique entre les deux installations est alors ramenée à la comparaison des coûts d'investissement :

- . pour les puits d'injection, les coûts d'investissement sont composés, principalement, du coût du forage et du coût de la station de pompage,
- . pour l'adduction, les coûts d'investissement sont réduits aux coûts de la canalisation et des ouvrages annexes.

La figure 5 donne un exemple chiffré d'une telle comparaison pour l'alimentation d'une agglomération située au-dessus de la nappe souterraine de l'Albien (Région Parisienne).

Le coût d'investissement pour une adduction d'eau étant fonction de la longueur de la canalisation, il apparaît donc qu'il existe une distance optimum au-delà de laquelle une installation de recharge est moins onéreuse qu'une adduction d'eau.

.../...

FIGURE 5

ALIMENTATION A PARTIR DE LA NAPPE DE L'ALBIEN : COMPARAISON AVEC UNE SOLUTION DE TRANSPORT D'EAUX DE SURFACE

exemple:

L'approvisionnement en eau potable d'une agglomération de 25 000 habitants, dont les besoins atteignent en période de pointe 7 000 m<sup>3</sup>/j, peut être assuré :

— soit par une adduction directe, en première élévation, d'eaux de surface, depuis la plus proche usine de traitement ;

— soit par des prélèvements dans l'Albien, effectués sur place, et compensés par l'injection simultanée, au niveau de la même usine, de volumes équivalents.

En première approximation, la comparaison entre ces deux solutions peut être ramenée à la comparaison des investissements correspondants :

— dans le premier cas, à une conduite de 350 mm de diamètre (1) soit environ 0,35 MF/km ;

(1) Coût moyen approximatif, au mètre linéaire en zone semi-urbanisée, y compris regards, ouvrages et toutes sujétions : 350 F.

— dans le second cas, à la réalisation d'un doublet de forages à l'Albien :

Forage d'injection. ....	0,90 MF
Forage de prélèvements. ....	0,90 MF
Génie Civil station de pompage et de déferrisation. ....	0,35 MF
Equipements de pompage. ....	0,15 MF
Equipements de déferrisation. ....	0,15 MF

soit environ.... 2,45 MF

Comparaison des deux solutions.

Compte tenu des hypothèses adoptées, la solution du doublet de forages à l'Albien paraît la plus avantageuse si la longueur de l'adduction directe excède 7 km (2,45/0,35).

(Extrait du Document 66/02587)

- Année de référence 1974 -

Le calcul précédent est une simplification du calcul réel qui, en fait, est plus complexe. En dehors de toute considération économique, une opération de recharge artificielle peut s'imposer là où les ressources naturelles d'alimentation en eau s'avèrent insuffisantes pour satisfaire les besoins. Exemple : dans les îles où les ressources naturelles sont faibles et où le prix du dessalement de l'eau de mer est souvent prohibitif.

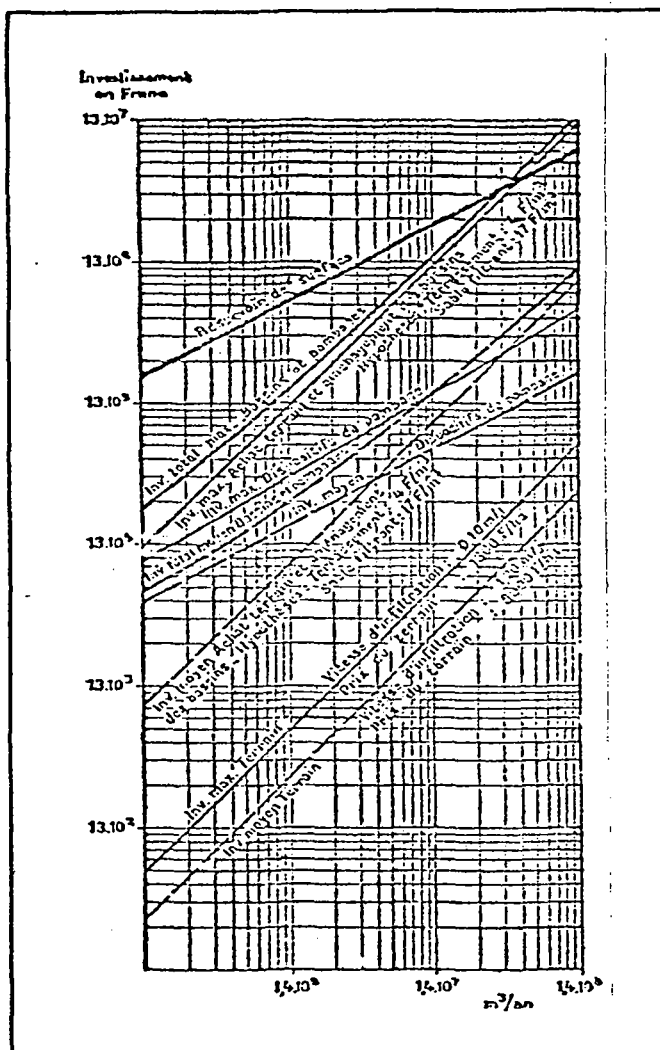
.../...

4) Comparaison entre le stockage de surface et le stockage souterrain

La figure 6 donne les résultats d'une corrélation statistique entre le montant des investissements et le nombre de m<sup>3</sup> d'eau stockés par an pour un réservoir de surface et un réservoir souterrain.

FIGURE 6

COMPARAISON DES COÛTS DES STOCKAGES SUPERFICIEL ET SOUTERRAIN



(Extrait du Document F 2028)  
- Année de référence 1971 -

A partir de la figure précédente, on peut donc déduire que, pour des volumes inférieurs à environ 30 millions de m<sup>3</sup> par an, le stockage souterrain est plus intéressant financièrement que le stockage de surface.

Par ailleurs, le stockage souterrain présente les avantages suivants :

- disponibilité de réserve en cas de catastrophe stoppant les possibilités d'importation d'eau;
  - élimination des pertes par évapotranspiration;
  - pas de problème d'algues et moins de risques de contamination;
  - réduction des risques d'affaissements dus à une baisse du niveau de la nappe;
  - possibilité de traiter et de purifier l'eau par passage dans le sol.
-



## LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- F 2028 BIZE J., BOURGUET L., LEMOINE J.  
"L'alimentation artificielle des nappes souterraines"  
Ed. Masson & Cie, 1972, 199 pages
- G 1681/506 REED S.C., CRITES R.W., THOMAS R.E., HAIS A.B.  
"Cost of land treatment systems"  
EPA-430/9-75-003, Septembre 1979, 135 pages
- G 5134/1 X ...  
"Emmagasinement souterrain des eaux et recharge artificielle"  
Ressources Naturelles/Série Eau, ONU, n° 2, 1977, 307 pages
- G 5191 BROWN R.F., SIGNOR D.C., WOOD W.W.  
"Artificial groundwater recharge as a water management  
technique on the southern high plains of Texas and New Mexico"  
Texas Dept. of Water Resources, 1978, 32 pages
- G 6230 X ...  
"Possibilités d'épandage des eaux usées urbaines"  
Rapport Agence R.M.C., 1979, 371 pages
- 56/00836 GANDENBERGER W.  
"Principes de l'alimentation artificielle des nappes  
souterraines"  
Bull. B.R.G.M., III, Janvier 1968, p.37-50
- 66/00449 SAINT-PE M.A.  
"Alimentation artificielle des nappes"  
Bull. of the Int. Assoc. of Scientific Hydrology,  
XVI, 2, Juin 1971, p. 7-25
- 66/00637 BOURGUET L.  
"Inventaire international des aménagements d'alimentation  
artificielle - dépouillement et synthèse des réponses"  
Hydrologie, n° 3, 1971, 80 pages
- 66/01974 WESNER G.M., CULP R.L.  
"Wastewater reclamation and seawater desalination"  
J.W.P.C.F., vol. 14, n° 10, Octobre 1972, p. 1932-1939
- 66/02587 GIRARDOT P.L., KESTER M.  
"L'esquichage de la nappe albienne en région parisienne"  
T.S.M. L'Eau, Avril 1974, p. 141-152
- 66/10203 WILLIS R.  
"Optimal groundwater quality management : well injection  
of waste waters"  
Water Res. Res., Février 1976, vol. 12, p. 47-53

- 66/13978                   Divers auteurs  
"Les problèmes de l'eau"  
Génie Rural, n° spécial, Nov.-Déc. 1977, n° 11-12, 158 pages
- 66/14931                   BUROS O.K.  
"Wastewater reclamation in St. Croix"  
J.W.P.C.F., 1977, 49, n° 3, p. 429-435
- 66/16816                   BIANCHI W.C., NIGHTINGALE H.I., McCORMICK R.L.  
"A case history to evaluate the performance of  
water-spreading projects"  
J.A.W.W.A.Mars 1978, p. 176-180
- 66/21087                   ARGO D.G.  
"The cost of water reclamation by advanced wastewater  
treatment"  
51st Ann. Conf. W.P.C.F. Anaheim, 1978, 13 pages
- 66/22466                   EDWORTHY K.J.  
"Artificial groundwater recharge and its relevance  
in Britain"  
J.I.W.E.S., 1979, 33, n° 2, p. 151-172
-

- CHAPITRE V -

LES INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE DE

NAPPE DANS LE MONDE

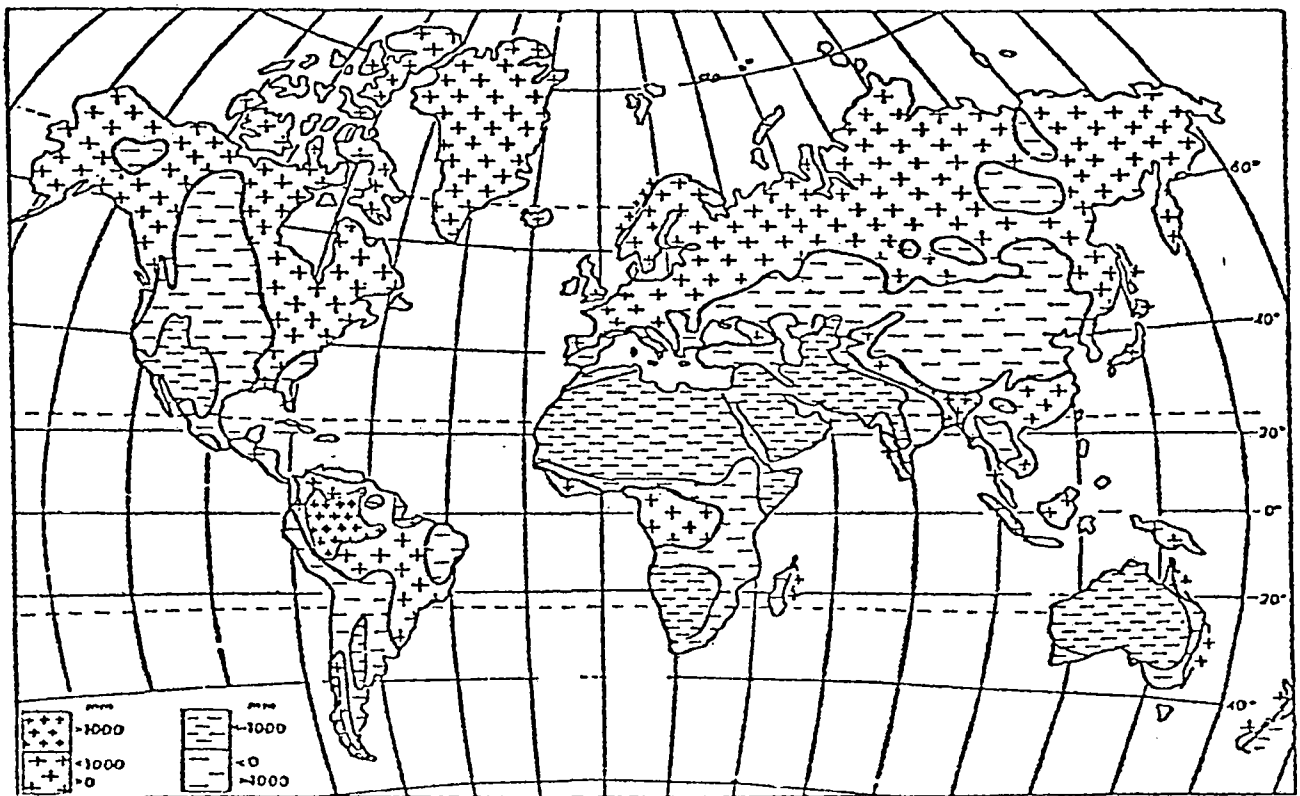


Les réserves d'eaux souterraines constituent une immense ressource. En effet, on estime à 4 millions de km<sup>3</sup> la quantité des eaux souterraines situées entre la surface du sol et la profondeur de 800 m; à titre de comparaison, le volume total des lacs d'eau douce est d'environ 120.000 km<sup>3</sup>.

Cette ressource en eau souterraine est, par ailleurs, omniprésente et peut donc être, mis à part dans quelques régions du globe, exploitée.

Dans de larges régions du monde, les précipitations sont insuffisantes pour pouvoir couvrir les besoins en eau. A titre d'exemple, la figure 1 donne la carte des régions du globe où les précipitations sont insuffisantes vis-à-vis des besoins agricoles.

FIGURE 1



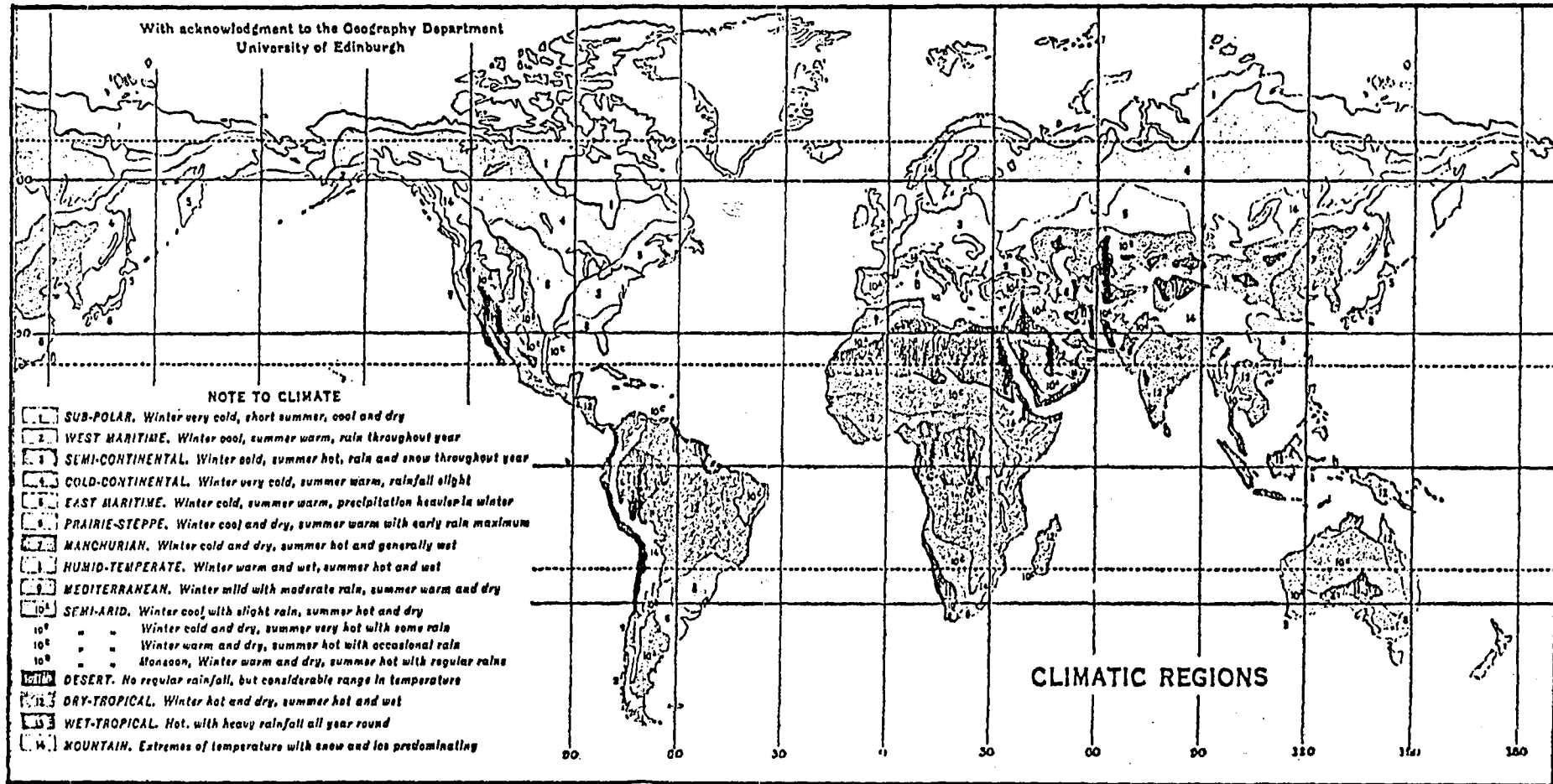
*Water-deficiency (-) and water-surplus (+) zones in the world. A water deficiency exists if precipitation supplies less water than would be needed for well-watered vegetation. In the reverse circumstances there is a water surplus.*

*(Extrait du Document Z 49)*

En comparant la figure 1 avec la figure 2 on peut se rendre compte que les zones où on constate un manque en eau agricole sont, naturellement, les régions arides ou semi-arides mais aussi certaines régions tempérées.

.../...

FIGURE 2



(Extrait du World Atlas by Bartholomew)

Pour situer le rôle de la recharge artificielle dans la gestion globale des ressources en eau, nous allons étudier deux cas :

- cas des zones arides et semi-arides,
- cas des zones tempérées.

### 1) Cas des zones arides et semi-arides

Dans ces régions, l'exploitation des eaux souterraines est souvent la seule solution d'approvisionnement en eau. Aussi, la recharge artificielle vise dans ces régions à augmenter la recharge naturelle lors des rares précipitations afin de limiter les pertes par écoulement de surface ainsi que par évapotranspiration. Il est possible de faire ainsi un stockage d'eau dans le sol.

Il faut tenir compte du fait que la majorité des pays situés dans les zones arides du globe sont le plus souvent des pays en voie de développement donc dans lesquels on doit utiliser une technologie adaptée aux moyens locaux.

Prenons l'exemple de l'Afrique et plus particulièrement les pays du Sahel.

La figure 3 situe les zones arides et semi-arides d'Afrique.

Les pays du Sahel sont situés au nord des déserts du Sahara et du Fezzan, dans des zones extrêmement arides. Parmi ces pays, seules l'Algérie et la Libye disposant de revenus pétroliers ont un niveau d'éducation et d'économie suffisant pour pouvoir mettre en oeuvre des techniques sophistiquées de mise en valeur des ressources en eau et ainsi assurer leur expansion humaine et économique.

### 2) Cas des pays tempérés.

L'augmentation croissante des besoins en eau, combinée avec la détérioration de la qualité des eaux de surface, ont entraîné le développement de l'exploitation des eaux souterraines.

La recharge artificielle permet, dans les régions tempérées :

- d'une part, le soutien et la restauration de nappes surexploitées,
- d'autre part, l'amélioration de la qualité des eaux de surface par passage dans le sol.

Ces deux points visent donc à améliorer, en quantité et en qualité, les eaux consommées.

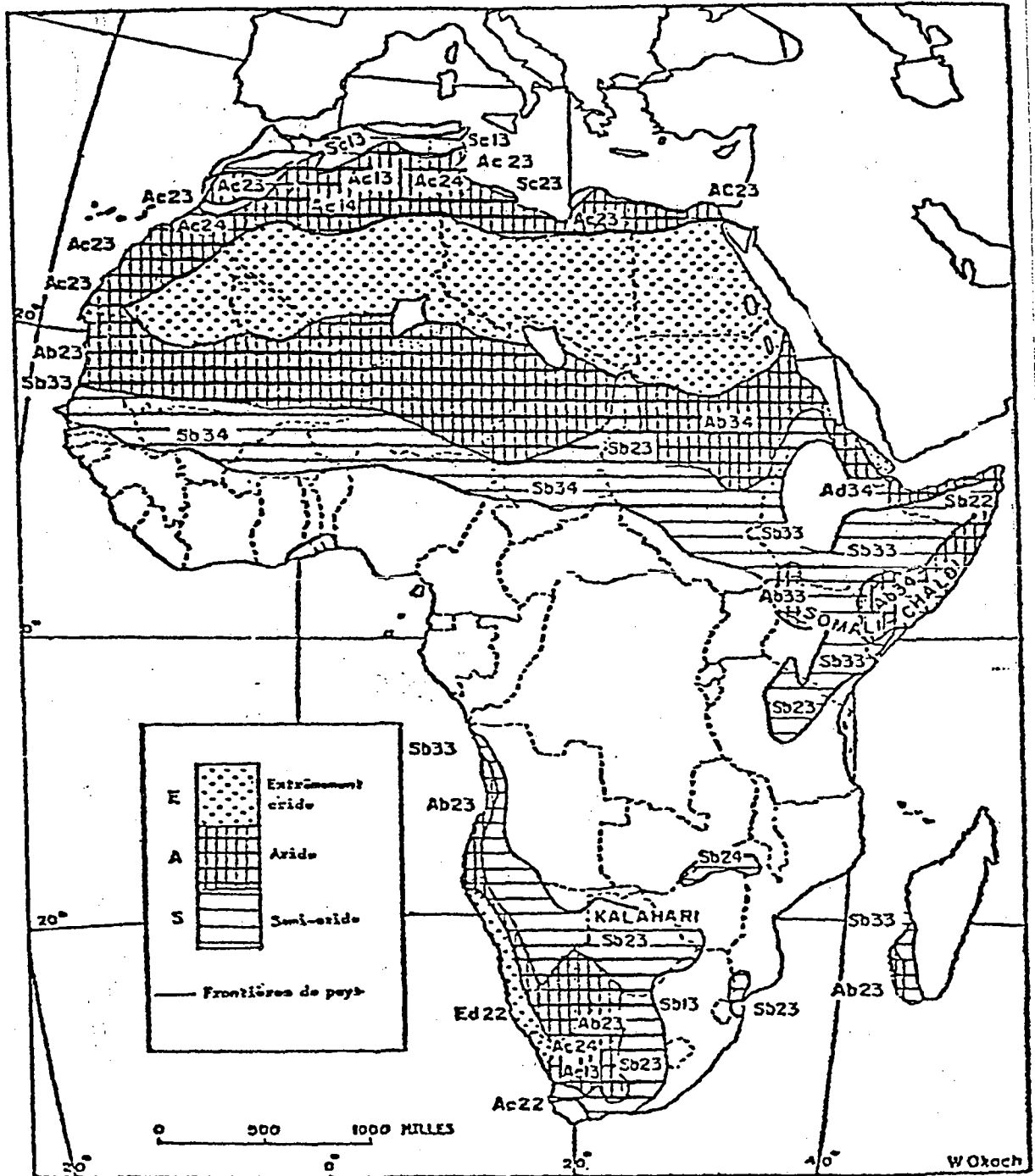
Afin de présenter les différentes réalisations dans le monde, nous allons les classer en fonction de l'objectif principal visé par ces installations.

Principalement, on distingue 4 objectifs :

- I - Stockage d'eau en période humide pour utilisation en période sèche
- I - Soutien et restauration d'une nappe surexploitée
- I - Constitution d'une barrière hydraulique contre l'intrusion d'eaux salées (ce point est souvent une conséquence du point précédent)
- V - Amélioration de la qualité de l'eau par filtration dans le sol.

FIGURE 3

TERRES ARIDES D'AFRIQUE



(Extrait du Document Z 1021)

.../...



INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF

LE STOCKAGE D'EAU

1) Liste des installations

(1) Vallée du Danube, Roumanie - Bulgarie	(G 5134/1)
(2) Vallée de la Lee, Grande-Bretagne	(F 2028)
(3) Camp Peary, U.S.A.	(F 2028)
(4) Vallée de la Prut, Ukraine, U.R.S.S.	(G 5134/1)
(5) Wroclaw, Pologne	(66/09067)
(6) Comté de Los Angeles, U.S.A.	(G 5134/1)
(7) Massif de Zaghouan, Tunisie	(G 5134/1)
(8) Plaine côtière d'Israël	(G 5134/1, F 2028)
(9) Source de Yarkon, Israël	(G 5134/1)
(10) Dan Project, Israël	(G 6230, G 6212)
(11) Vallée de l'Oued Biskra, Algérie	(G 5134/1)
(12) Plaine de Karakoum, Turkménistan, U.R.S.S.	(G 5134/1)
(13) Ahmedabad, Inde	(Z 1331/2c)

2) Le tableau 1 donne la répartition, suivant le climat et le niveau de développement des pays concernés, des installations précédentes.

TABLEAU 1

CLIMAT \ NIVEAU DE DEVELOPPEM.	INDUSTRIALISE	EN VOIE DE DEVELOPPEMENT
TEMPERE	(1) (2) (3) tableau 2	
CONTINENTAL	(4) (5) tableau 3	
MEDITERRANEEN	(6) tableau 4	(7) (8) (9) (10) tableau 6
SEMI-ARIDE		(11) tableau 7
ARIDE	(12) tableau 5	
TROPICAL		(13) tableau 8

3) Les tableaux 2 à 8 donnent pour chaque cas particulier de climat et de niveau de développement quelques caractéristiques des installations correspondantes.

- tableaux 2 à 5 : réalisations en pays industrialisés
- tableaux 6 à 8 : réalisations en pays en voie de développement.

TABEAU 2 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TEMPERE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Roumanie - Bulgarie	Vallée du Danube (voir fig. 4)	R	Vallée alluviale (sables et graviers)	2.10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	bassins		Pré.		
G.Bretagne	Vallée de la Lee	R	Craie (voir fig. 5)		puits		2	12 millions de m <sup>3</sup> /an	
U.S.A.	Camp Peary	R	Lentille d'eau dans eau salée		puits		Pré.	entre 45 et 20 m <sup>3</sup> /h	

Notations :

- R = eau de rivière
- Pré. = prétraitement des eaux
- 2 = traitement secondaire des eaux

FIGURE 4

- VALLEE DU DANUBE - ROUMANIE-BULGARIE

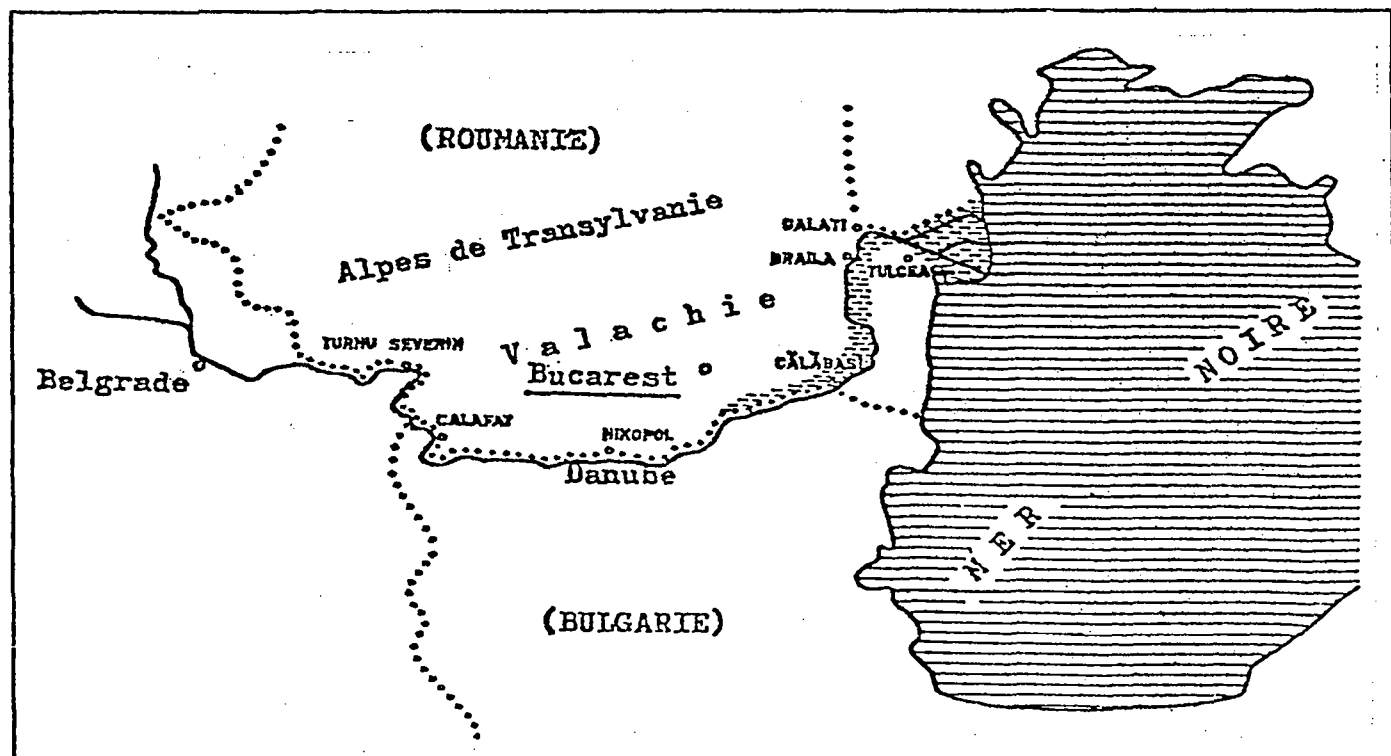
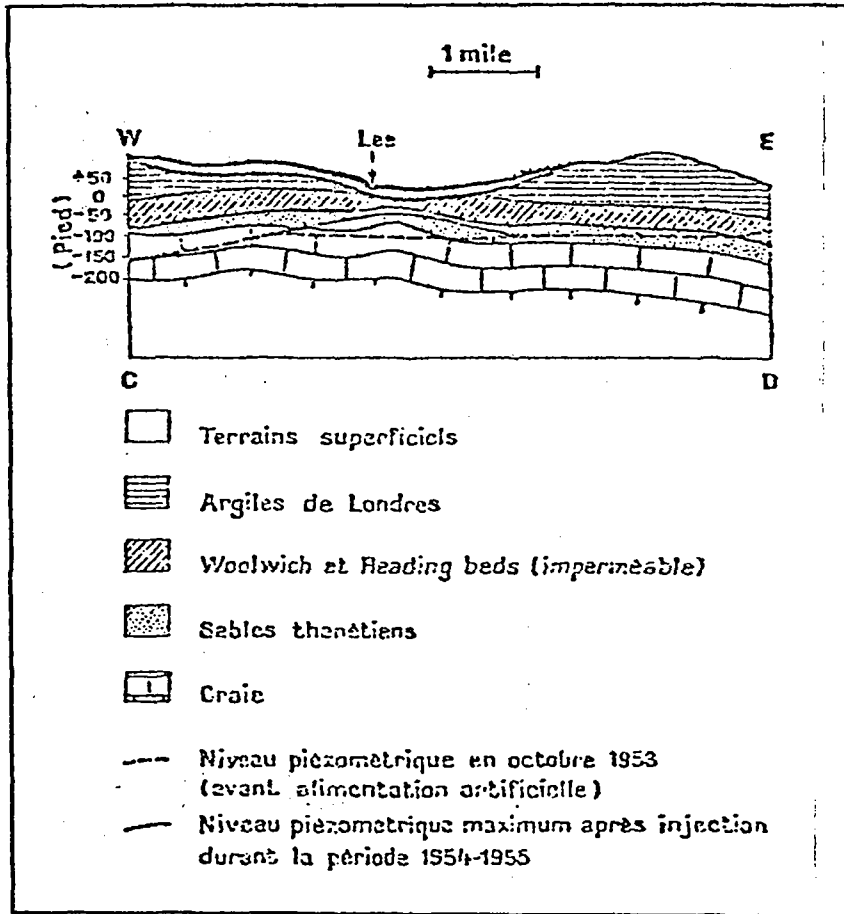


FIGURE 5

VALLEE DE LA LEE - GEOLOGIE-PIEZOMETRIE AVANT ET APRES ALIMENTATION

ARTIFICIELLE DURANT LA PERIODE 1954-1955



(Extrait du Document F 2028)

TABLEAU 3 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT CONTINENTAL

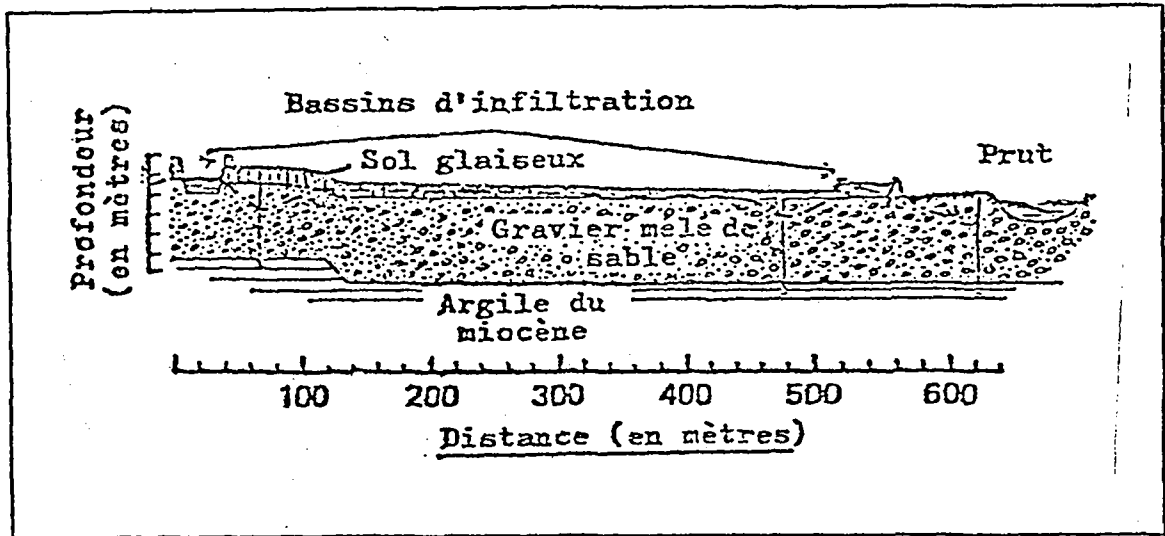
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.R.S.S.	Vallée de la Prut	R	Plaine alluviale (voir fig. 6)		bassins à sable	P	Pré.		
Pologne	Wroclaw	R	Sédiments tertiaires		fossés et étangs	P.C.B.	Pré.	125.000 m <sup>3</sup> /jour	

Notations :

- R = eau de rivière
- P = physique
- C = chimique
- B = biologique
- Pré. = prétraitement des eaux

FIGURE 6

VALLEE DE LA PRUT



(Extrait du Document G 5134/11)

TABLEAU 4 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT MEDITERRANEEN

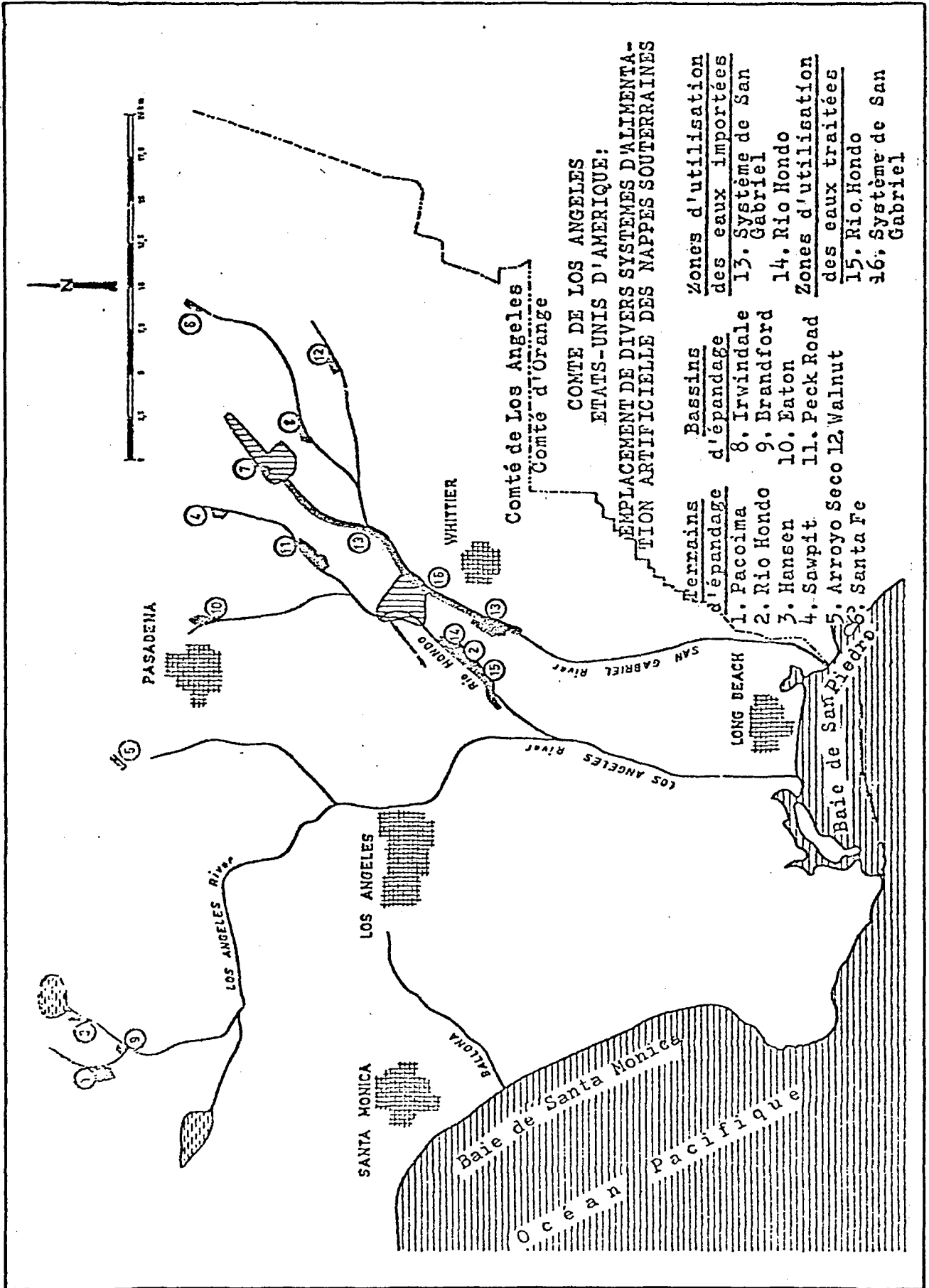
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.S.A.	Comté de Los Angeles (voir fig. 7)	R	Bassins remplis de sédiments mal consolidés	> à $1,2 \cdot 10^9$ m <sup>3</sup>	bassins et terrains d'épandage	P	Pré.	60 m <sup>3</sup> /s	de revient de 4 à 24\$ pour 1000 m <sup>3</sup>

Notations :

R = rivière  
P = physique  
Pré. = prétraitement

.../...

FIGURE 7



(Extrait du Document G 5134/11)

TABLEAU 5 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT ARIDE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.R.S.S.	Plaines de Karakoum	R	Alluvions, formations deltaïques		Puits	P			

Notations :

R = rivière  
P = physique

TABLEAU 6 : REALISATIONS EN PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT A CLIMAT MEDITERRANEEN

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Tunisie	Massif de Zaghouan (voir fig. 8)	R	Calcaires (voir fig. 8)		Petits barrages	P	Pré.	3,2 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	
Israël	Plaine côtière (voir fig. 9)	R	Plaine littorale (voir fig. 9)		Puits	P.B	2	> 10 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	
Israël	Source de Yarkon	R	Roches carbonatées plissées (voir fig. 10)	900.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Puits mixtes	P.B	2	entre 500 et 1000 m <sup>3</sup> /h	de revient 0,015\$ par m <sup>3</sup>
Israël	Dan Projet (Tel Aviv)	U	Dunes de sables		Bassins	P.C.B	2	300.000 m <sup>3</sup> /jour	de revient 0,026\$ par m <sup>3</sup>

Notations :

R = rivière  
U = usée  
P = physique  
C = chimique  
B = biologique  
2 = secondaire

FIGURE 8

MASSIF CALCAIRE DE ZAGHOUAN (Tunisie)

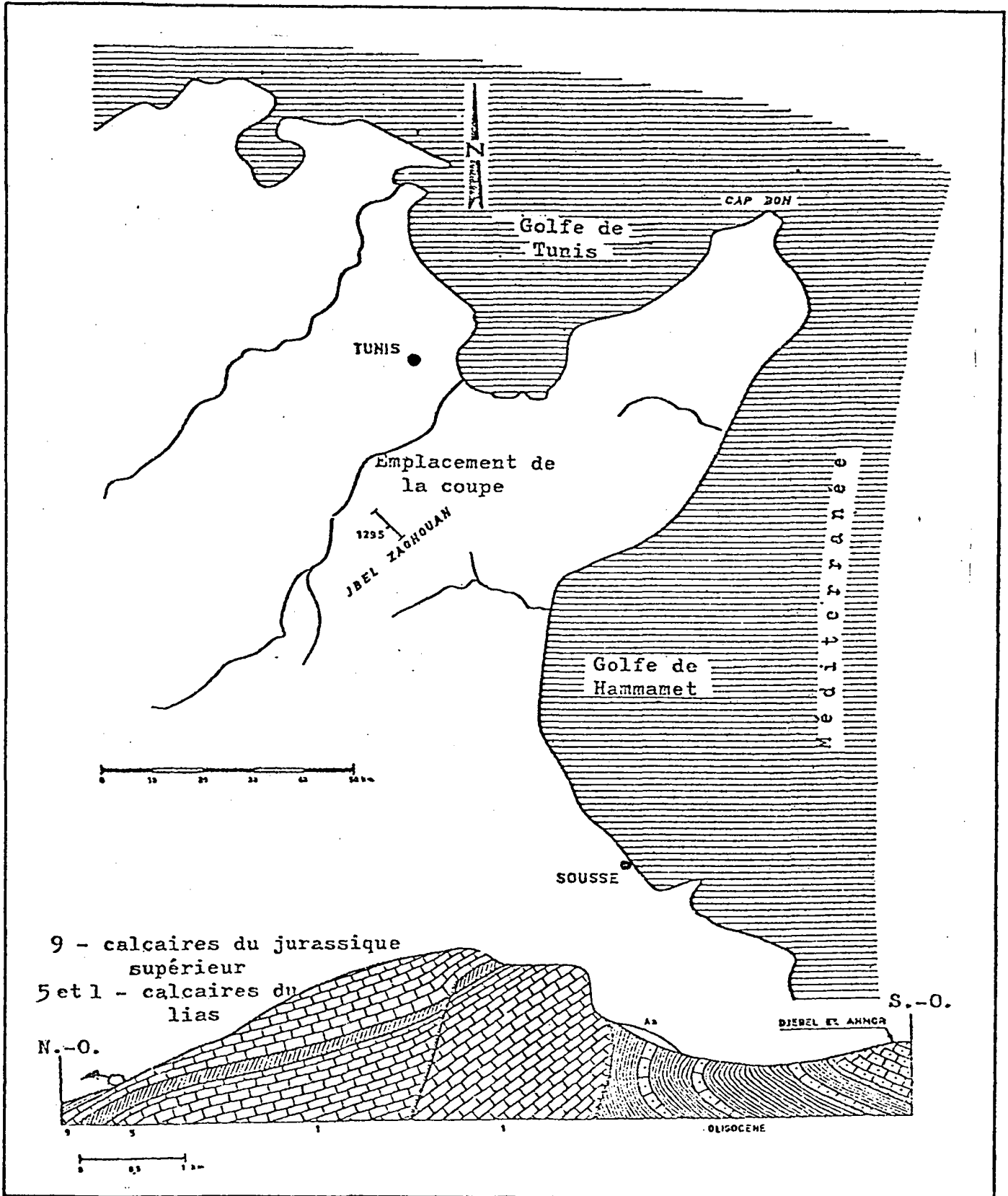
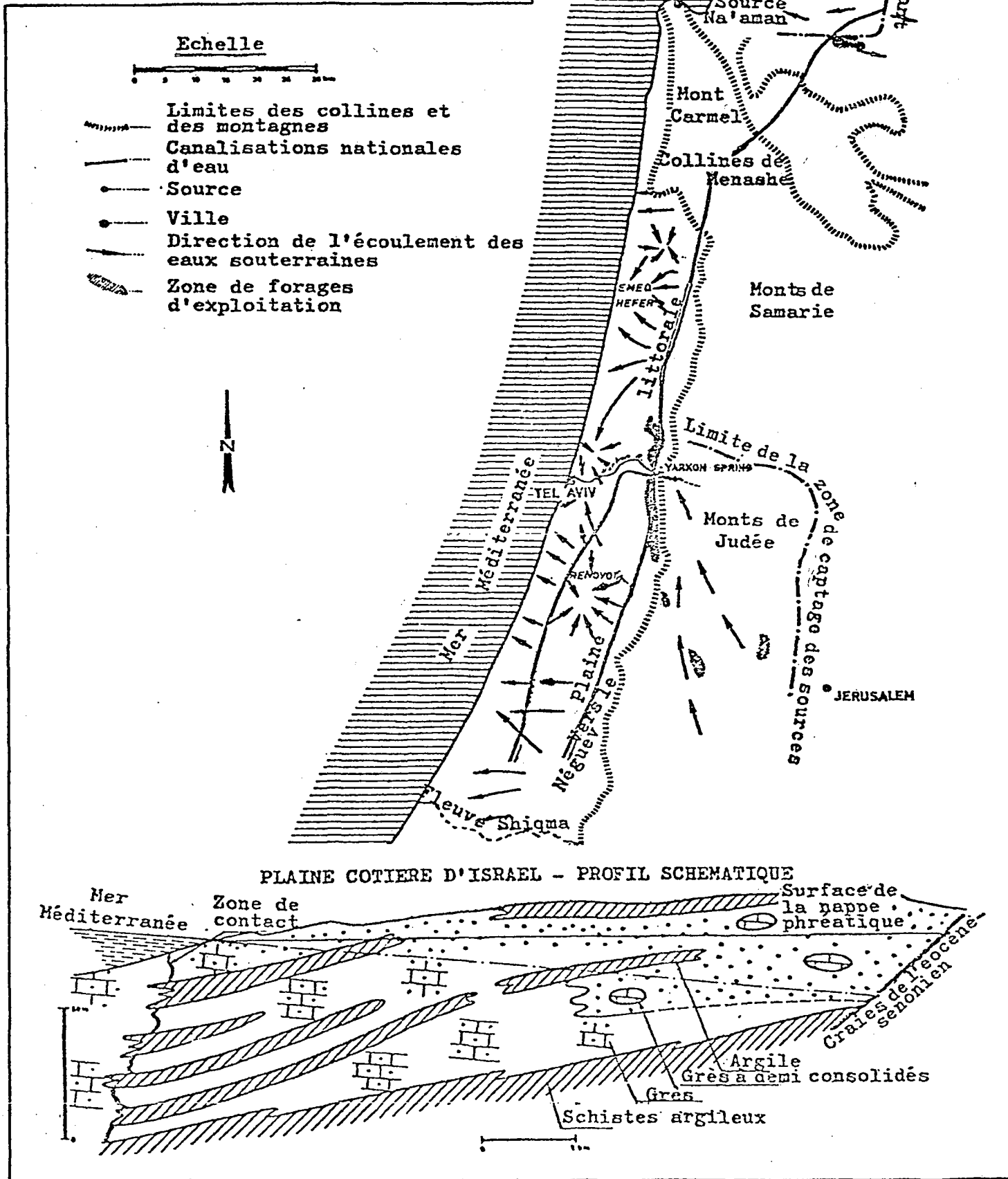


FIGURE 9

FORMATION AQUIFERE DE LA PLAINE COTIERE

ISRAEL

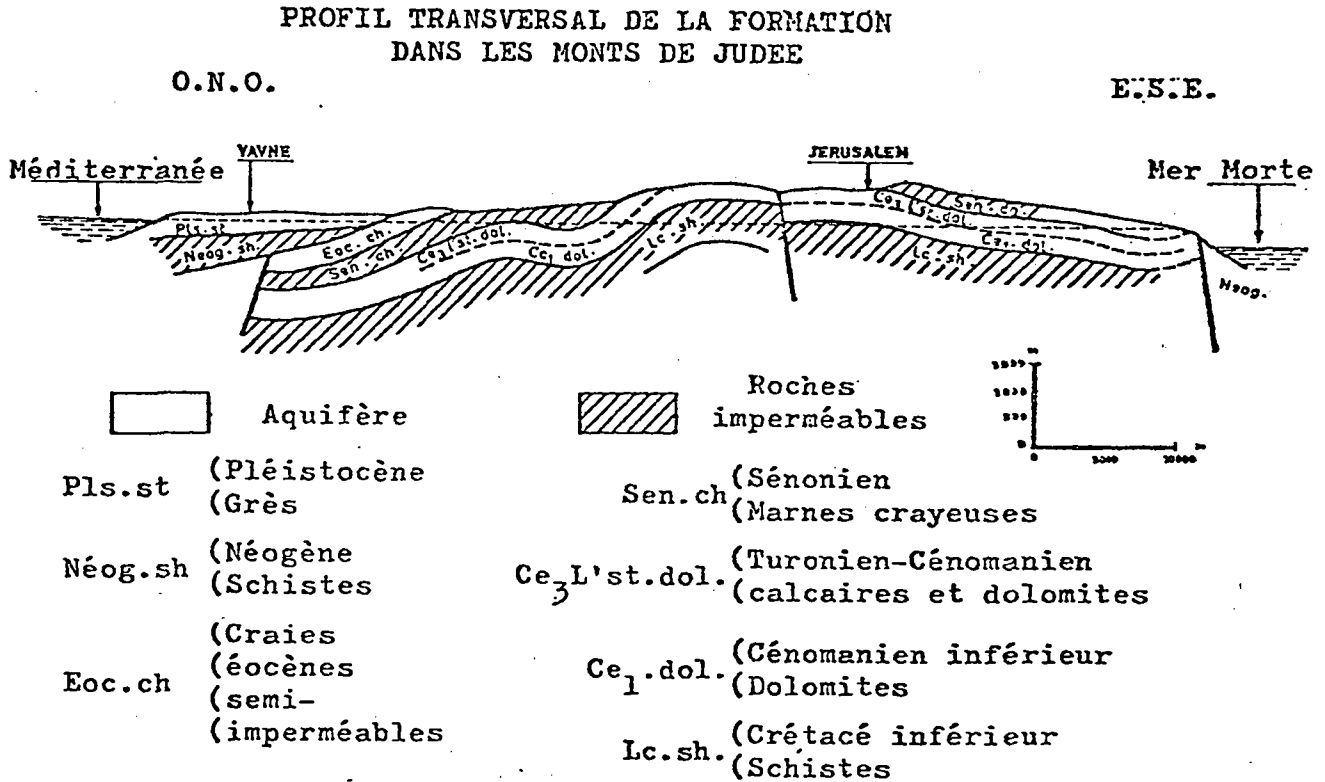


(Extrait du Document G 5134/1)



FIGURÉ 10

SOURCE DE YARKON, ISRAEL



(Extrait du Document G 5134/11)

TABLEAU 7 : REALISATIONS EN PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT A CLIMAT SEMI-ARIDE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Algérie	Vallée de l'oued Biskra (voir fig. 11)	R	dépôts alluviaux	20 à 30 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	aménagements du lit de l'oued	P		5.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	

Notations :

R = eau de rivière  
P = colmatage physique

.../...

FIGURE 11

VALLEE ALLUVIALE DE BISKRA (ALGERIE)

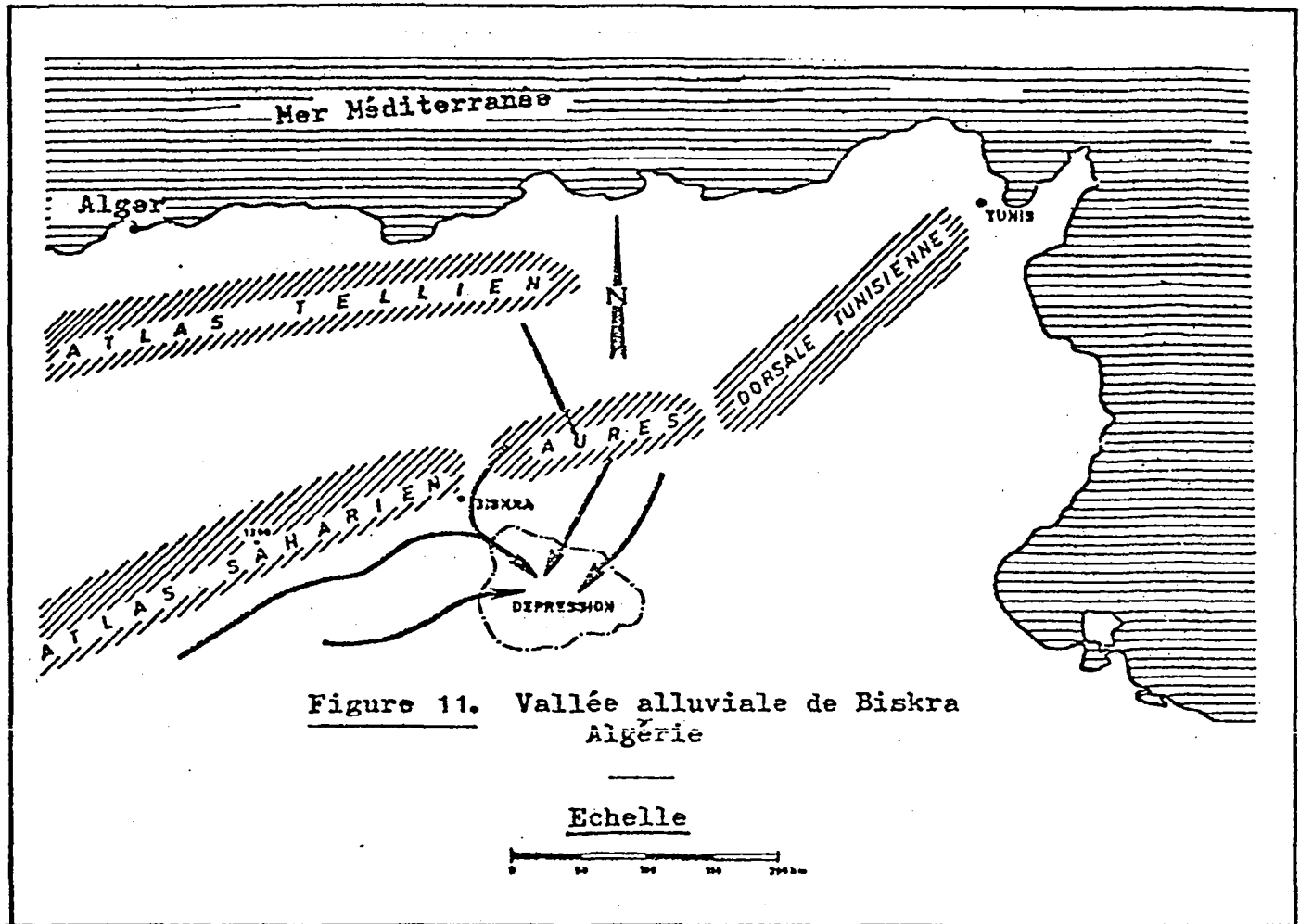


Figure 11. Vallée alluviale de Biskra  
Algérie

Echelle

(Extrait du Document G 5134/11)

TABLEAU 8 : REALISATIONS EN PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT A CLIMAT TROPICAL

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Inde	Ahmedabad	R	sable (voir fig. 12)		puits dans le lit de la rivière (voir fig. 13)	P.B	1	4,5 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /jour	d'investissement faible

Notations :

- R = eau de rivière
- P = colmatage physique
- B = colmatage biologique
- 1 = traitement primaire

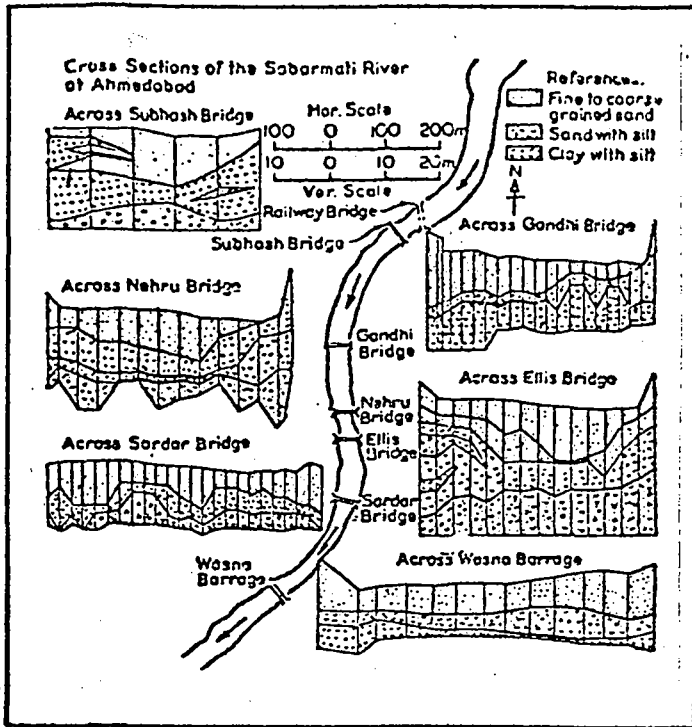
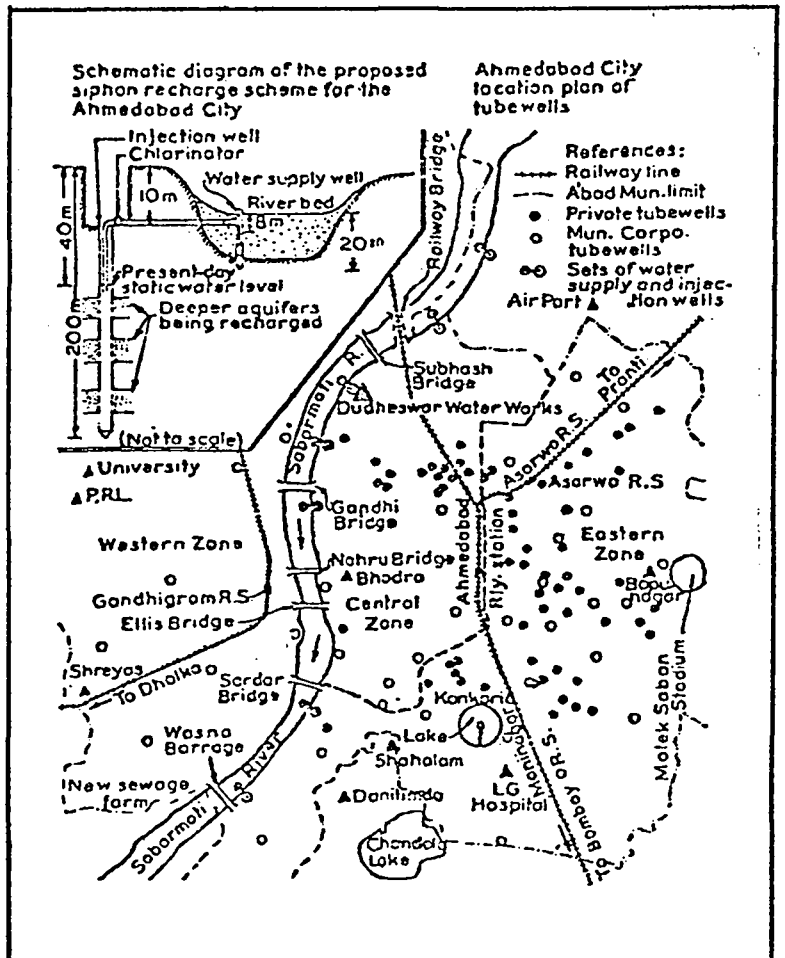


FIGURE 12

Sub-surface section of the Sabarmati River bed at Ahmedabad as seen in boring during the construction of road bridges across the river. Data supplied by Ahmedabad Municipal Corporation and P.W.D., Govt. of Gujarat.

FIGURE 13

Map of Ahmedabad city showing locations of Municipal tubewell stations (open circles) and private tubewells (closed circles). In the inset, a schematic diagram of the suggested injection recharging scheme is shown. Pairs of double circles along the river indicate pairs of water supply and injection wells.



(Extrait du Document Z 1331/2c)

B - INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF LE  
SOUTIEN D'UNE NAPPE D'EAU SOUTERRAINE

1) Liste des installations

(1) Lettonie, U.R.S.S.	(G 5134/1)
(2) Lituanie, U.R.S.S.	(G 5134/1)
(3) Bâle, Suisse	(G 5134/1, F 2028)
(4) Nappe du canton de Genève, Suisse	(66/18945)
(5) Donzère Mondragon, France	(G 5134/1, F 2028)
(6) Appoigny, France	(G 5134/1, F 2028)
(7) La Moulle, France	(66/27873)
(8) Menuma, Japon	(G 5134/1)
(9) Niigata, Japon	(G 5134/1)
(10) Hodogaya, Japon	(G 5134/1)
(11) Wiesbaden, R.F.A.	(G 5134/1)
(12) Dortmund, R.F.A.	(G 5134/1)
(13) Haltern, R.F.A.	(G 5134/1)
(14) Hardham, Grande-Bretagne	(66/22466)
(15) Péoria, U.S.A.	(F 2028)
(16) Vallée de la Durance, France	(G 5134/1, F 2028)
(17) Flushing Meadows, U.S.A.	(G 6230)
(18) Fresno, U.S.A.	(66/16816)
(19) St Croix, Virgin Islands	(66/14931)

2) Le tableau ci-après donne la répartition, suivant le climat et le niveau de développement des pays concernés, des installations précédentes.

N.B. : il est intéressant de remarquer que toutes les installations répertoriées ont eu lieu en pays industrialisés; ce qui est logique car ces pays ont des besoins en eau très importants donc exploitent largement leurs réserves souterraines.

Les installations de recharge artificielle pour le soutien de nappe dans le pays en voie de développement ne sont qu'à l'état du projet qui verront certainement le jour avec l'augmentation des besoins en eau de ces pays.

3) Les tableaux 9 à 13 donnent pour chaque cas de climat et de niveau de développement quelques caractéristiques des installations correspondantes.

.../...

CLIMAT \ NIVEAU DE DEVELOPPEM.	INDUSTRIALISE	EN VOIE DE DEVELOPPEMENT
TEMPERE	(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (tableaux 9 et 9 bis)	
CONTINENTAL	(15) (tableau 10)	
MEDITERRANEEN	(16) (tableau 11)	
SEMI-ARIDE		
ARIDE	(17) (18) (tableau 12)	
TROPICAL	(19) (tableau 13)	

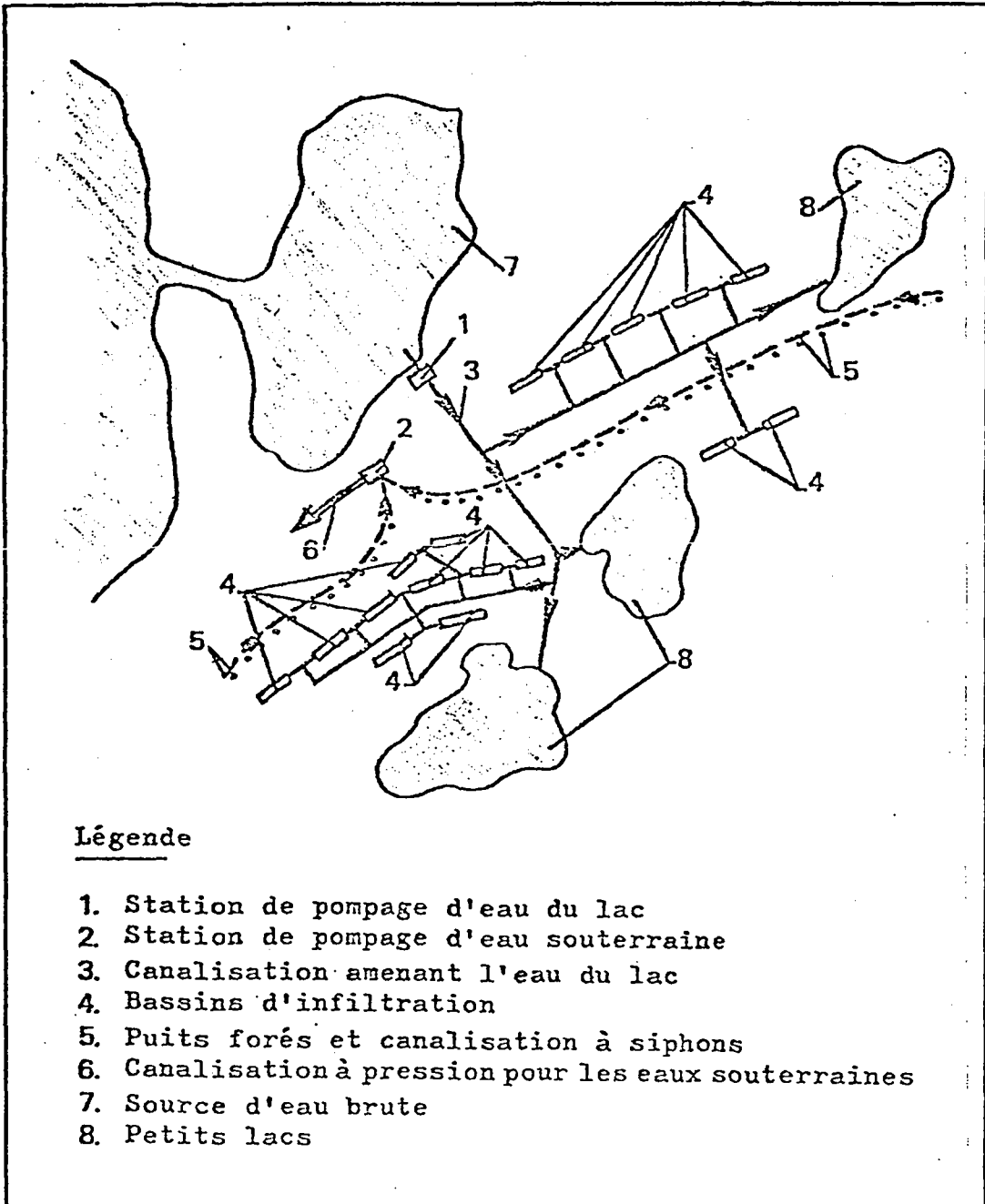
TABLEAU 9 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TEMPERE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.R.S.S.	Lettonie	L	Alluvions et dépôts morainiques		Bassins (voir fig. 14)	P-C	Pré	0,7 à 1,0 m/jour	
U.R.S.S.	Kaunas (Lituanie)	R	Plaine alluviale (voir fig. 15)		Bassins (voir fig. 15)	P	Pré à 1	2,8 à 0,05 m/jour	
Suisse	Bâle	R	Plaine d'alluvions fluvioglaciales (voir fig. 16)		Fossés (voir fig. 17)	P	1	65 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	de revient 0,024\$ par m <sup>3</sup>
Suisse	Canton de Genève (voir fig. 18)	R	Dépôts morainiques	1,8 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Bassins et drains	P	1	13 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	de revient 10 à 14 cent. suisses par m <sup>3</sup>
France	Donzère-Mondragon	R	Alluvions fluviales (voir fig. 19)	105 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Fosses d'injection (voir fig. 20)	P	Pré	8,5 m <sup>3</sup> /s	charges d'expl. 400000F par an
France	Appoigny	R	Alluvions fluviales	180 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Bassins à sable (voir fig. 21)	P	Pré	1000 m <sup>3</sup> /jour	
France	La Moulle (voir fig. 22)	R	Craie fissurée (voir fig. 23)		Bassins à sable (10.000 m <sup>2</sup> )	P	1	6.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	

FIGURE 14

PLAN DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DE BALTEZERS, REPUBLIQUE SOCIALISTE

SOVIETIQUE DE LETTONIE



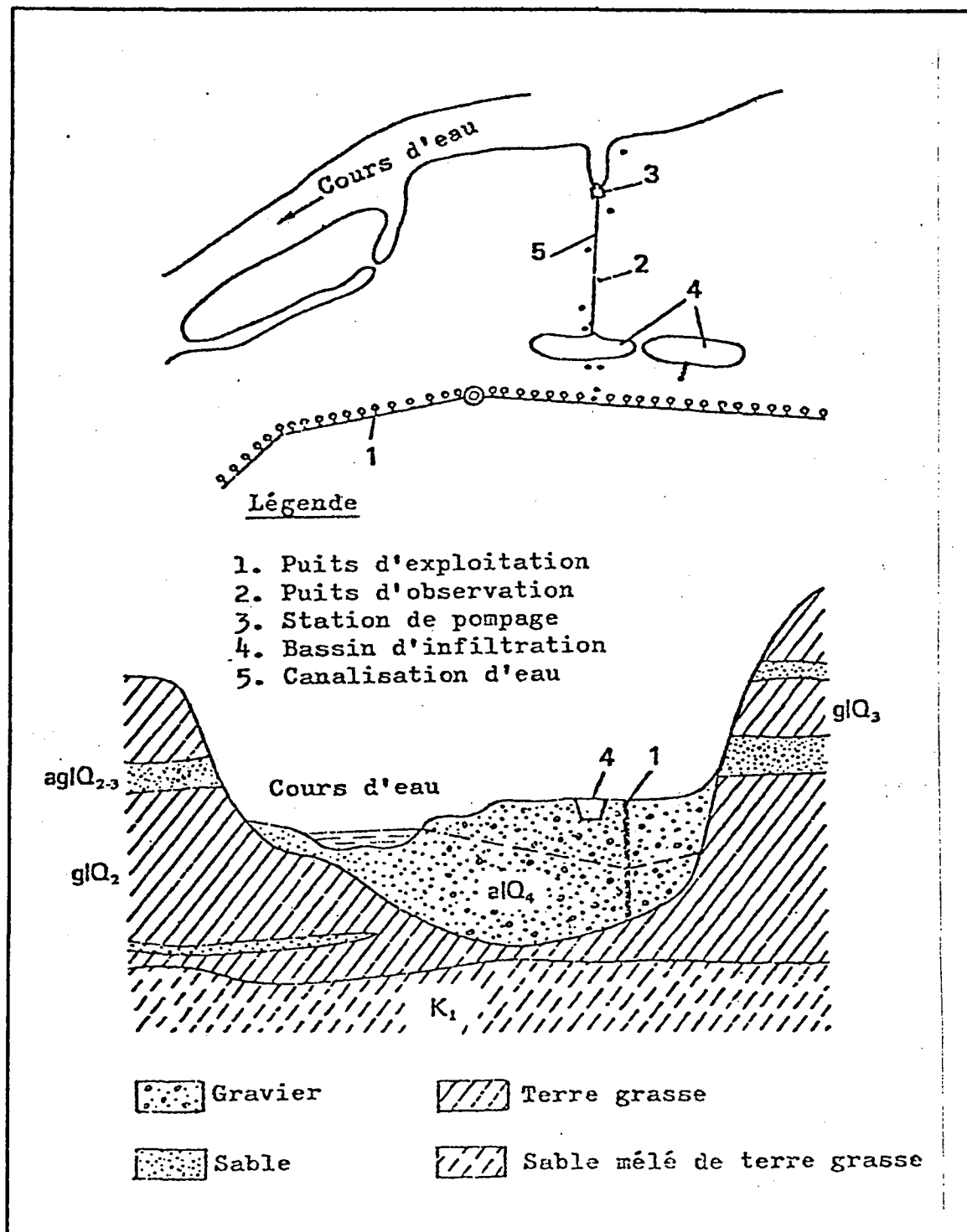
(Extrait du Document G 5134/11)

.../...

FIGURE 15

INSTALLATIONS D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE D'EIGULAI, REPUBLIQUE SOCIALISTE

SOVIETIQUE DE LITUANIE



(Extrait du Document G 5134/1)

.../...

FIGURE 16

COUPE HYDROGEOLOGIQUE DU SITE DE LA HARD (MUTTENZ-BALE)

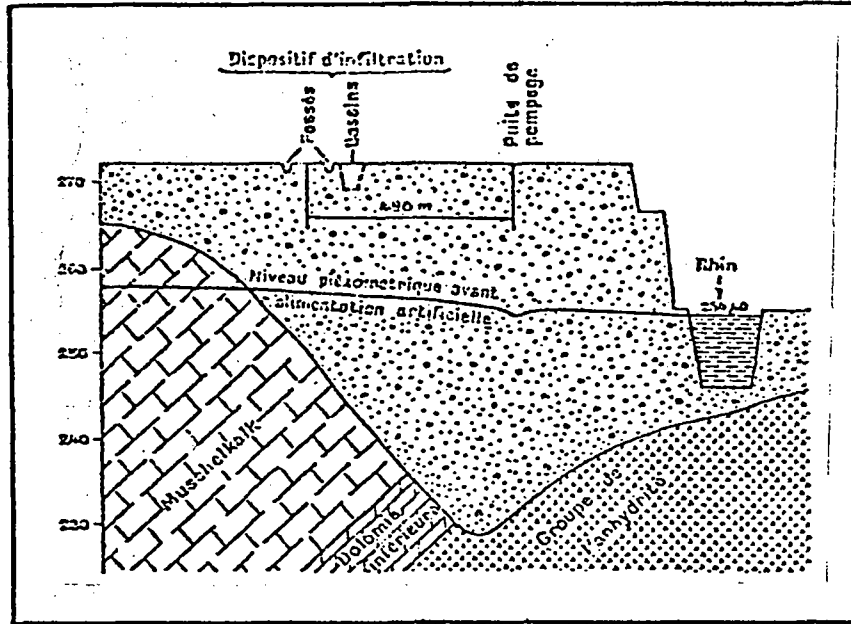
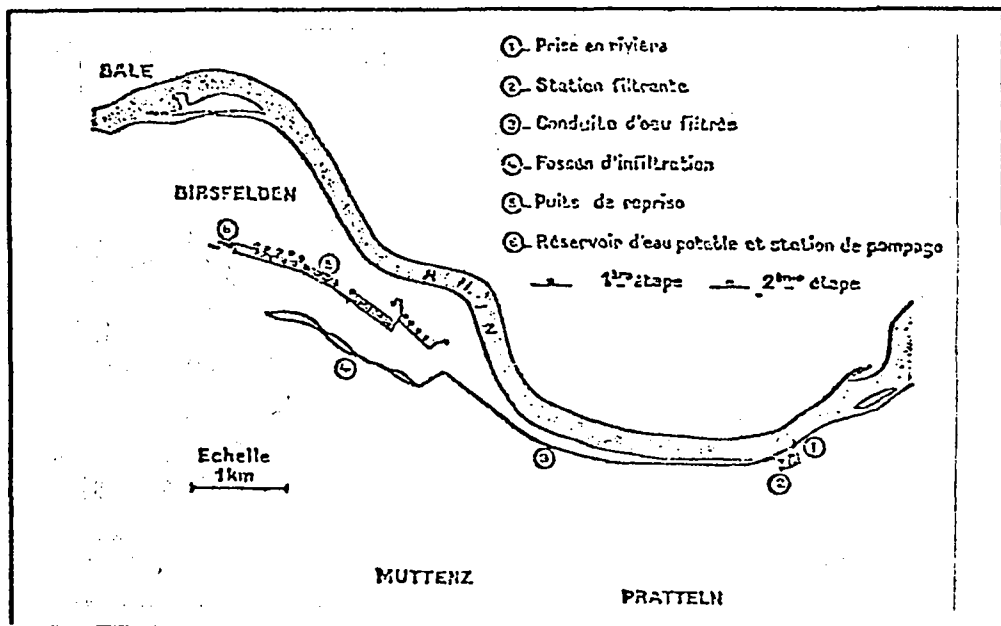


FIGURE 17

PLAN DE L'AMENAGEMENT D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE LA  
NAPPE DE LA HARD (MUTTENZ-BALE)



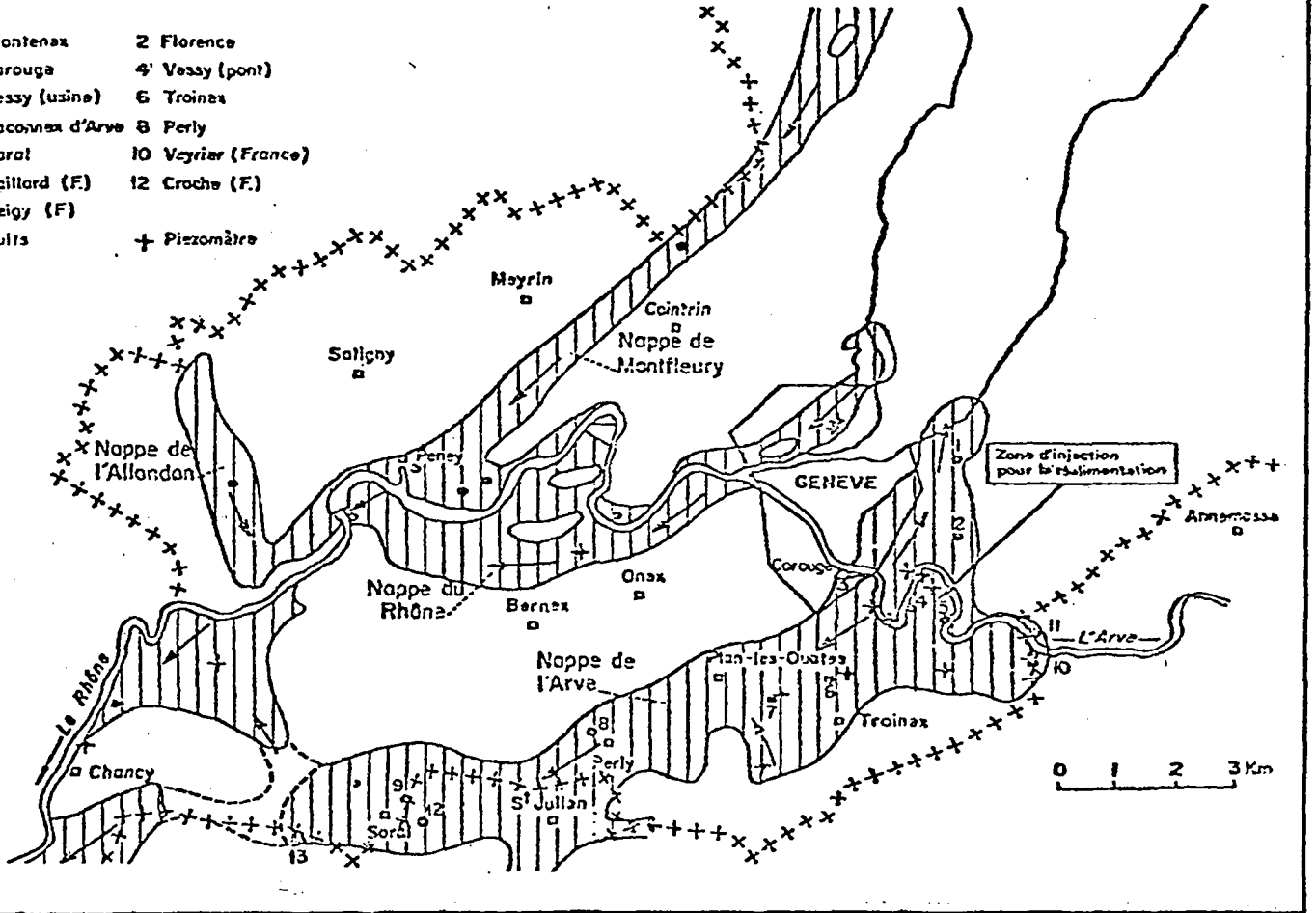
(Extraits du Document F 2028)



FIGURE 18

PLAN DE SITUATION DE LA NAPPE DE L'ARVE ET DES OUVRAGES

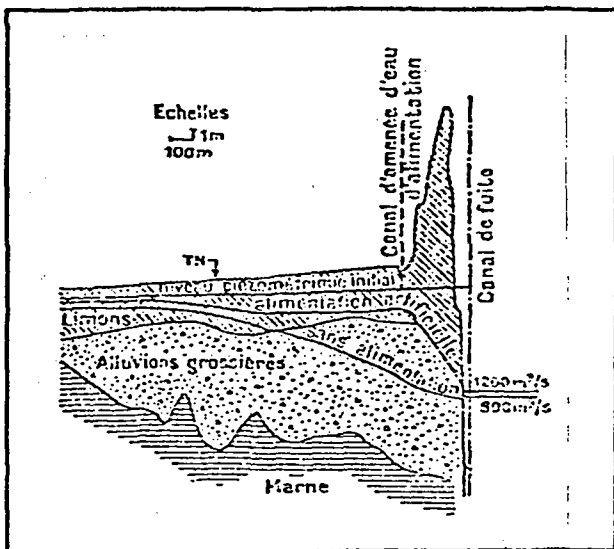
- 1 Frontenax
- 2 Florence
- 3 Carouge
- 4 Vessy (pont)
- 5 Vessy (usine)
- 6 Troinax
- 7 Sacconax d'Arve
- 8 Perly
- 9 Saral
- 10 Veyrier (France)
- 11 Gaillard (F.)
- 12 Croche (F.)
- 13 Veigy (F.)
- Puits
- + Piezomètre



(Extrait du Document 66/18945)

FIGURE 19

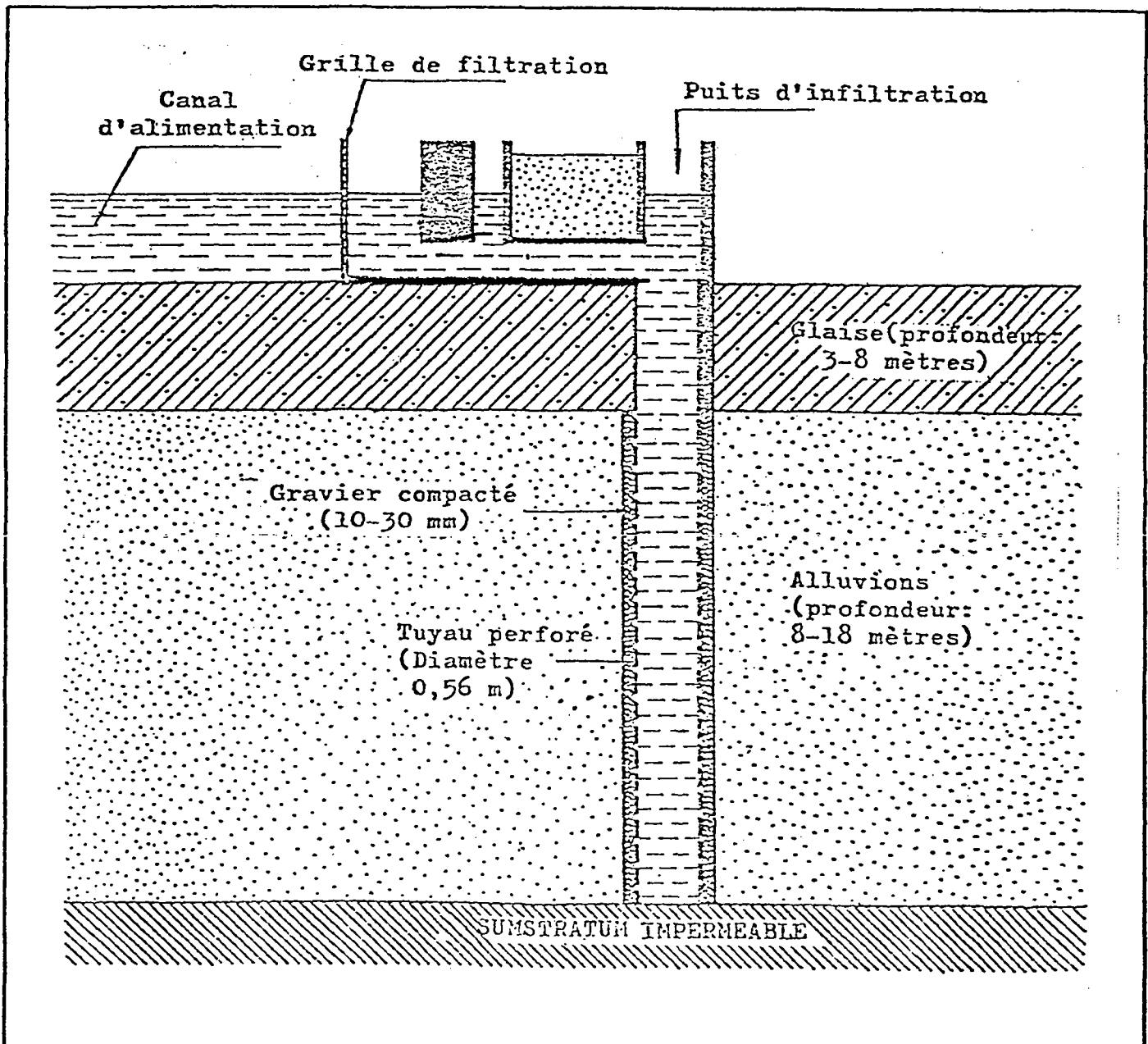
SCHEMA DE L'ALIMENTATION  
ARTIFICIELLE A DONZERE-MONDRAGON



(Extrait du Document F 2028)

FIGURE 20

DISPOSITIF D'INJECTION

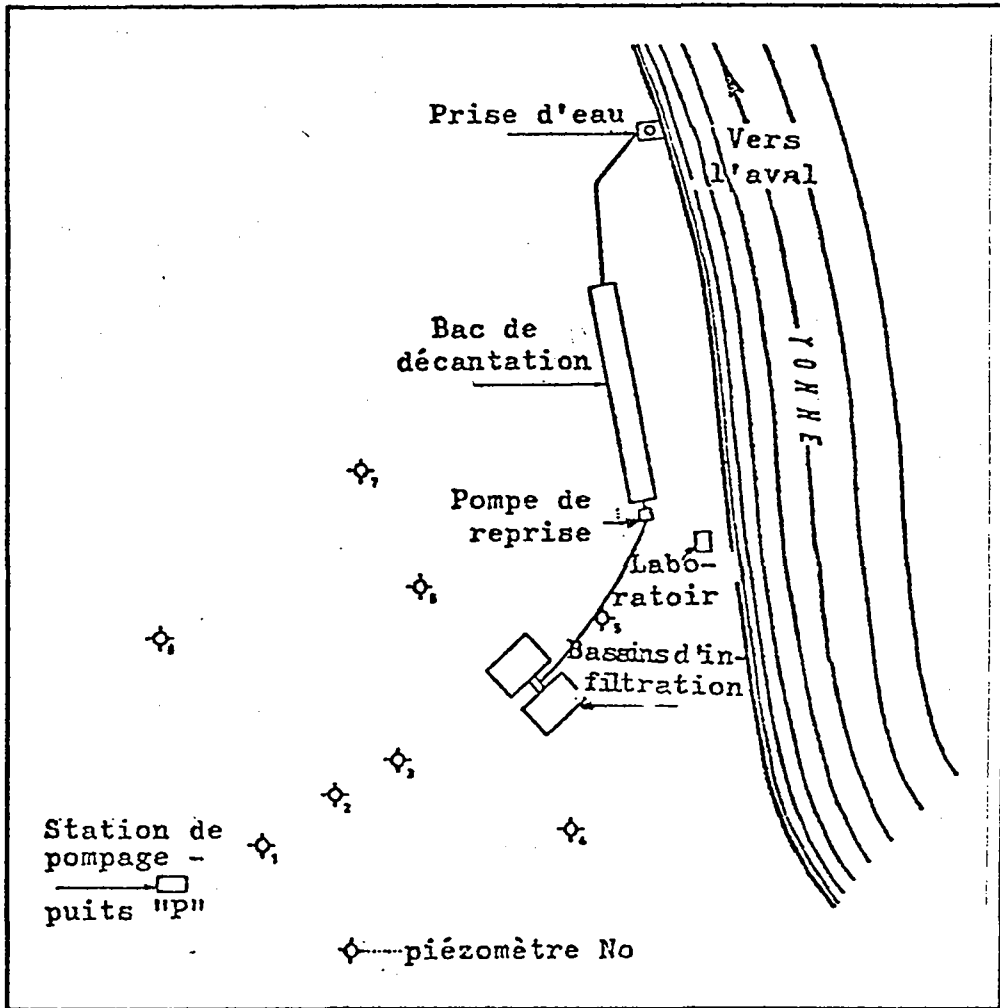


(Extrait du Document G 5134/1)

.../...

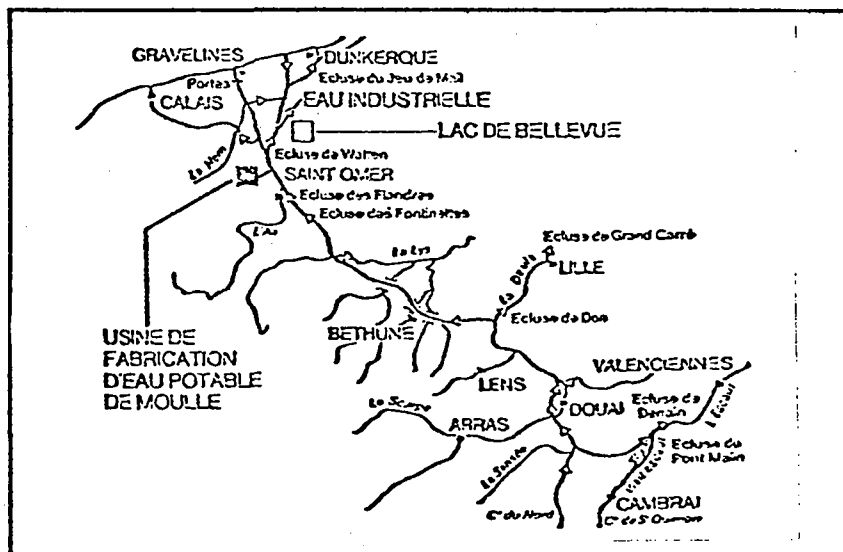
FIGURE 21

NAPPE DE LA VALLEE DE L'YONNE A APOIGNY, FRANCE



(Extrait du Document G 5134/1)

FIGURE 22



(Extrait du Document 66/27873)

FIGURE 23

COUPE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT D'APRES B.R.G.M.

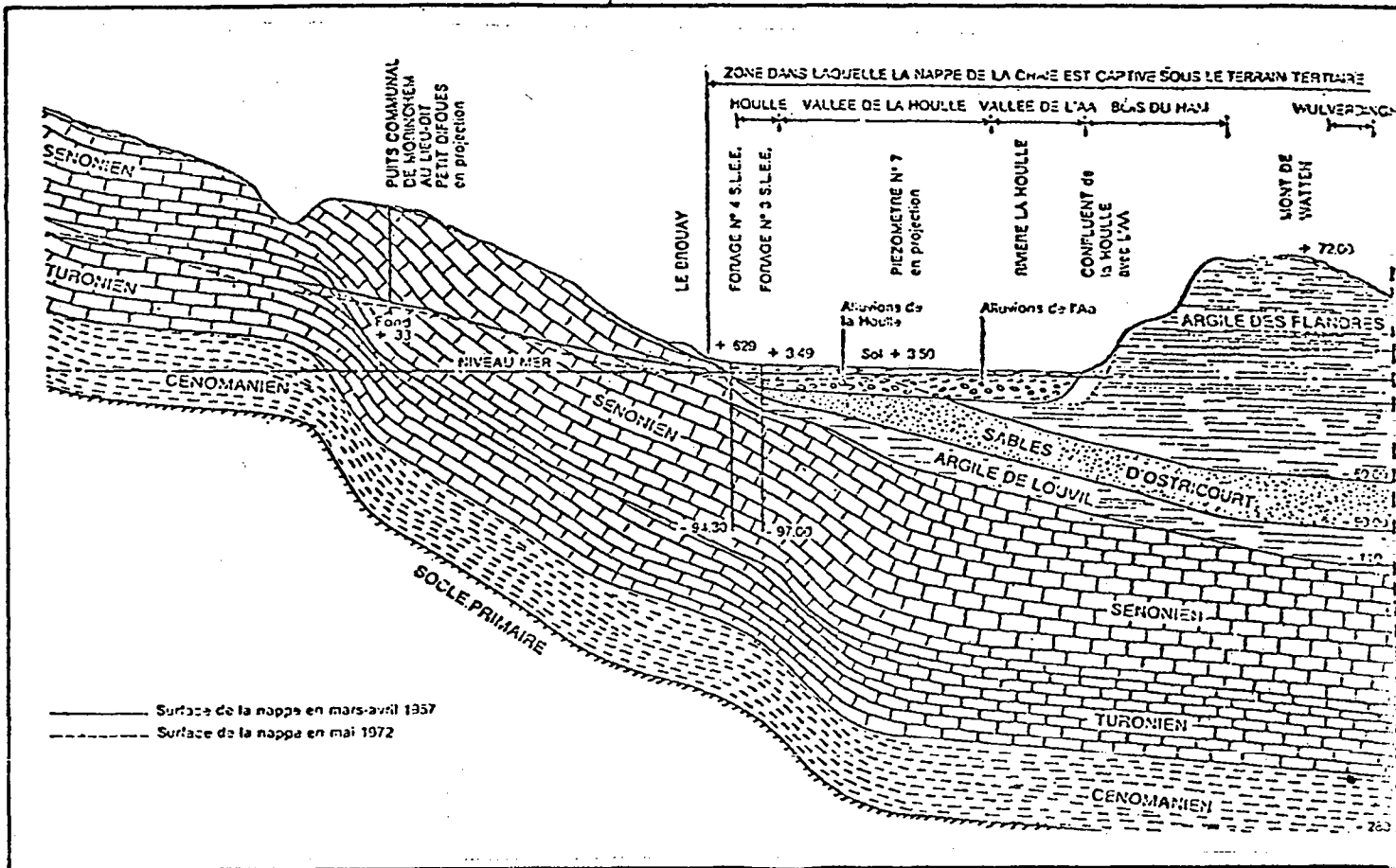


TABLEAU 9 BIS : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TEMPERE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Japon	Menuma (voir fig. 24)	R	Diluvium (voir fig. 24)		Puits d'injection	P-C	2	4.000 m <sup>3</sup> /jour	
Japon	Niigata (voir fig. 25)	R	Diluvium (voir fig. 25)	>120 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Puits d'injection (voir fig. 25)	P-C	2	20.000 m <sup>3</sup> /jour	de revient 0,02 g m <sup>3</sup>
Japon	Hodogaya	U	Diluvium		Puits d'injection (voir fig. 26)	C	2	35 m <sup>3</sup> /h	
R.F.A.	Wiesbaden	R	Alluvions fluviales (voir fig. 27)		Bassins (voir fig. 27)	P-C-B	1	100 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	
R.F.A.	Dortmund	R	Alluvions fluviales (voir fig. 28)		Bassins (voir fig. 28)	P-B	Pré	100 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	de revient entre 0,03 et 0,05 g par m <sup>3</sup>
R.F.A.	Sables de Haltern (voir fig. 29)	L	Sables profonds et alluvions de recouvrement	108 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Bassins (voir fig. 29)		Pré	44 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	
G.B.	Hardham (Sussex)	R	Sable-limoneux		Bassins	P	Pré	25.000 m <sup>3</sup> /jour	

Notations :

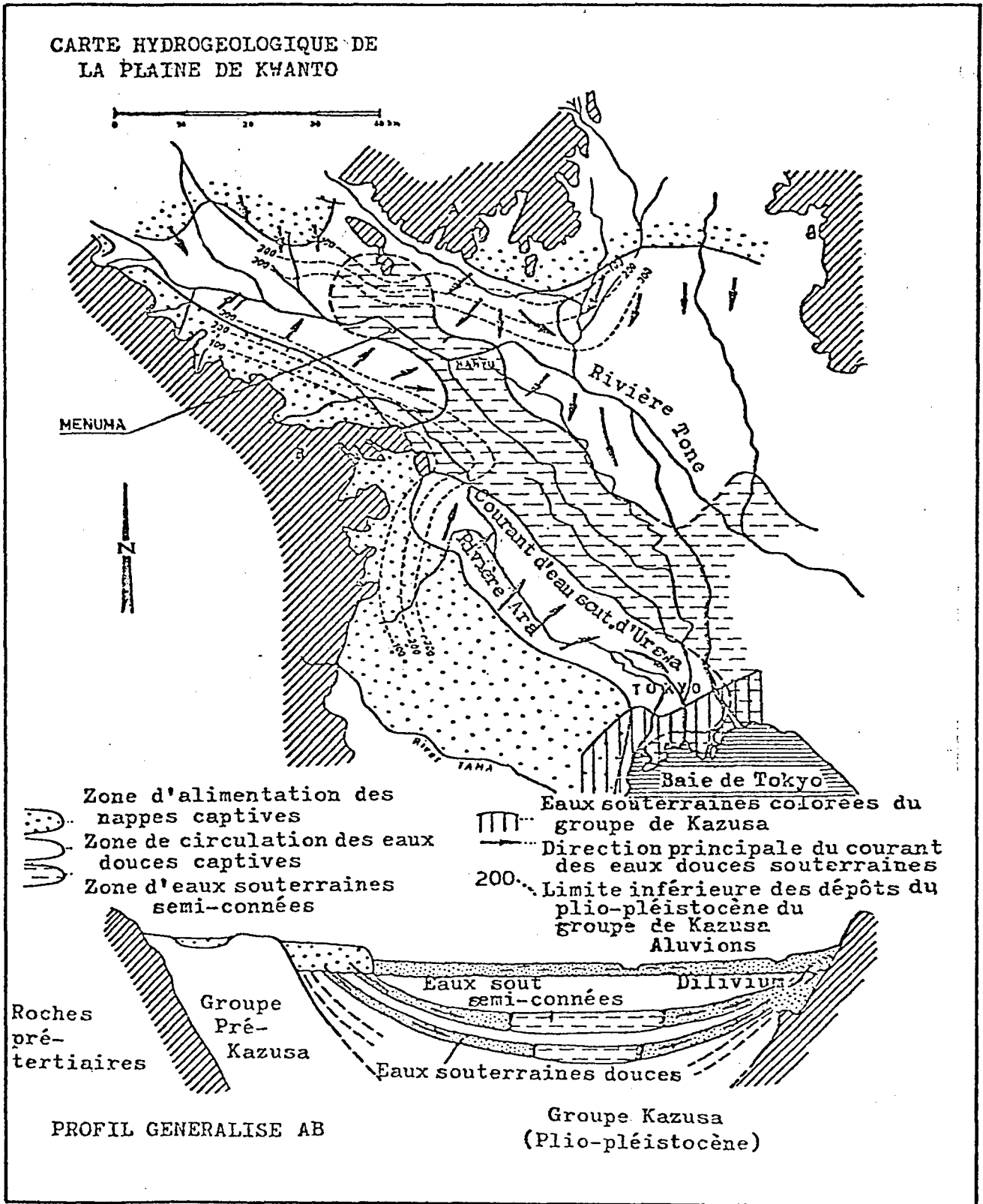
- Eau : R = eau de rivière  
U = eaux usées  
L = eau de lac

- Colmatage : P = colmatage physique  
C = " chimique  
B = " biologique

- Traitement : Pré = prétraitement  
1 = primaire  
2 = secondaire

FIGURE 24

PROJET D'INJECTION DE MENUMA, JAPON

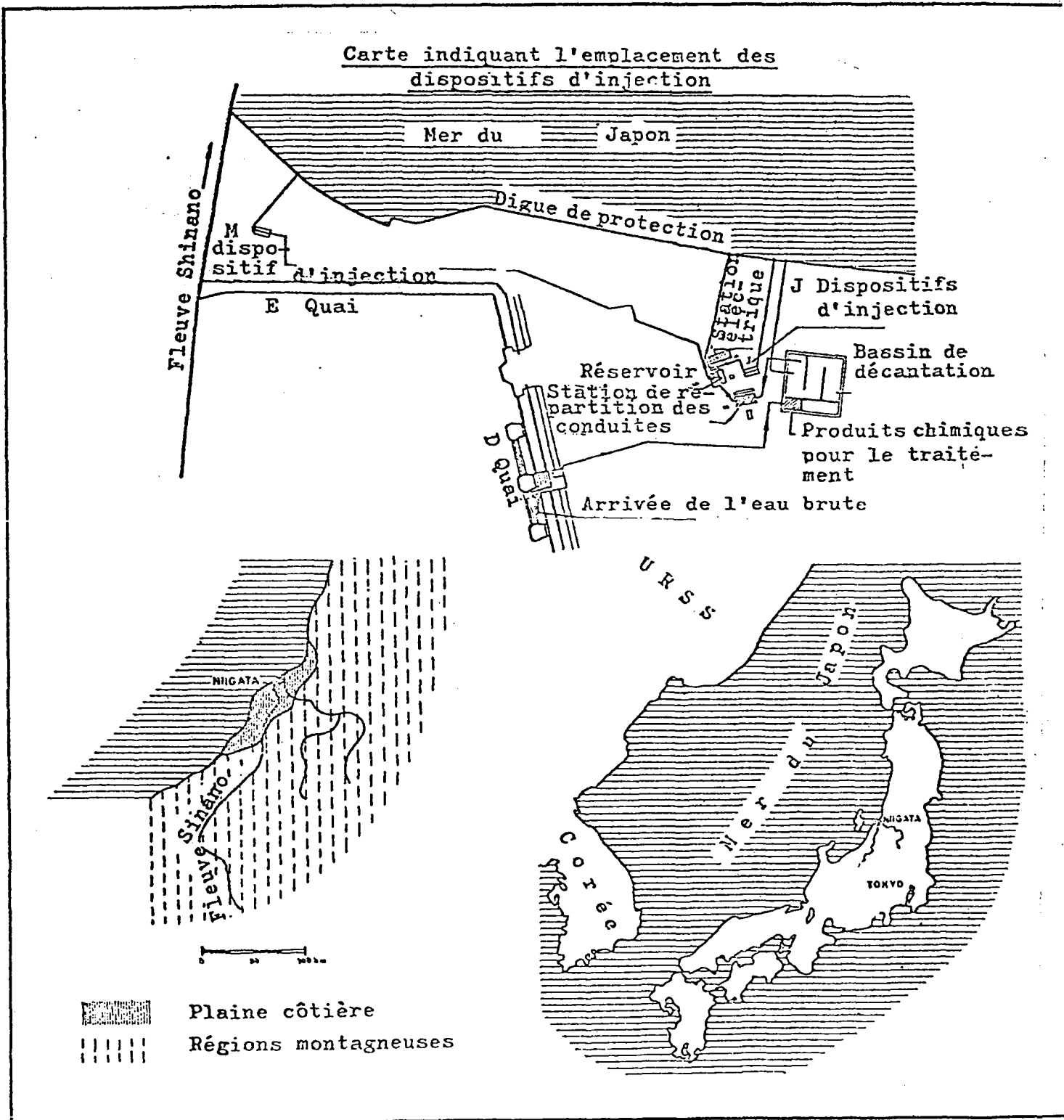


(Extrait du Document G 5134/1)

.../...

FIGURE 25

PROJET D'INJECTION DE NIIGATA - JAPON



(Extrait du Document G 5134/1)

.../...

INSTALLATION D'INJECTION DE HODOGAYA

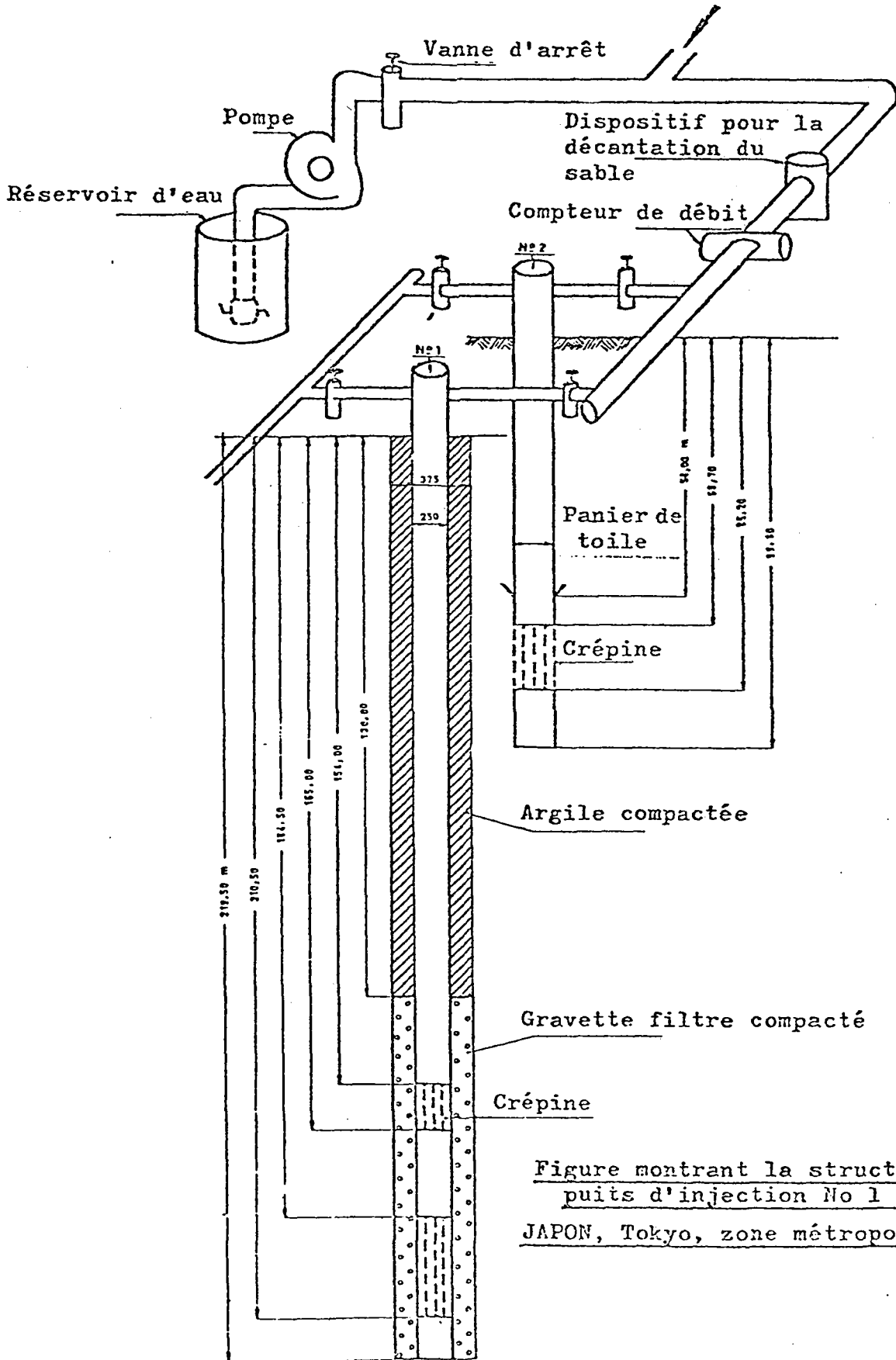


Figure montrant la structure des puits d'injection No 1 et 2  
JAPON, Tokyo, zone métropolitaine

FIGURE 27

POMPAGE D'EAUX SOUTERRAINES ARTIFICIELLES A SCHIRSTEIN, WIESBADEN

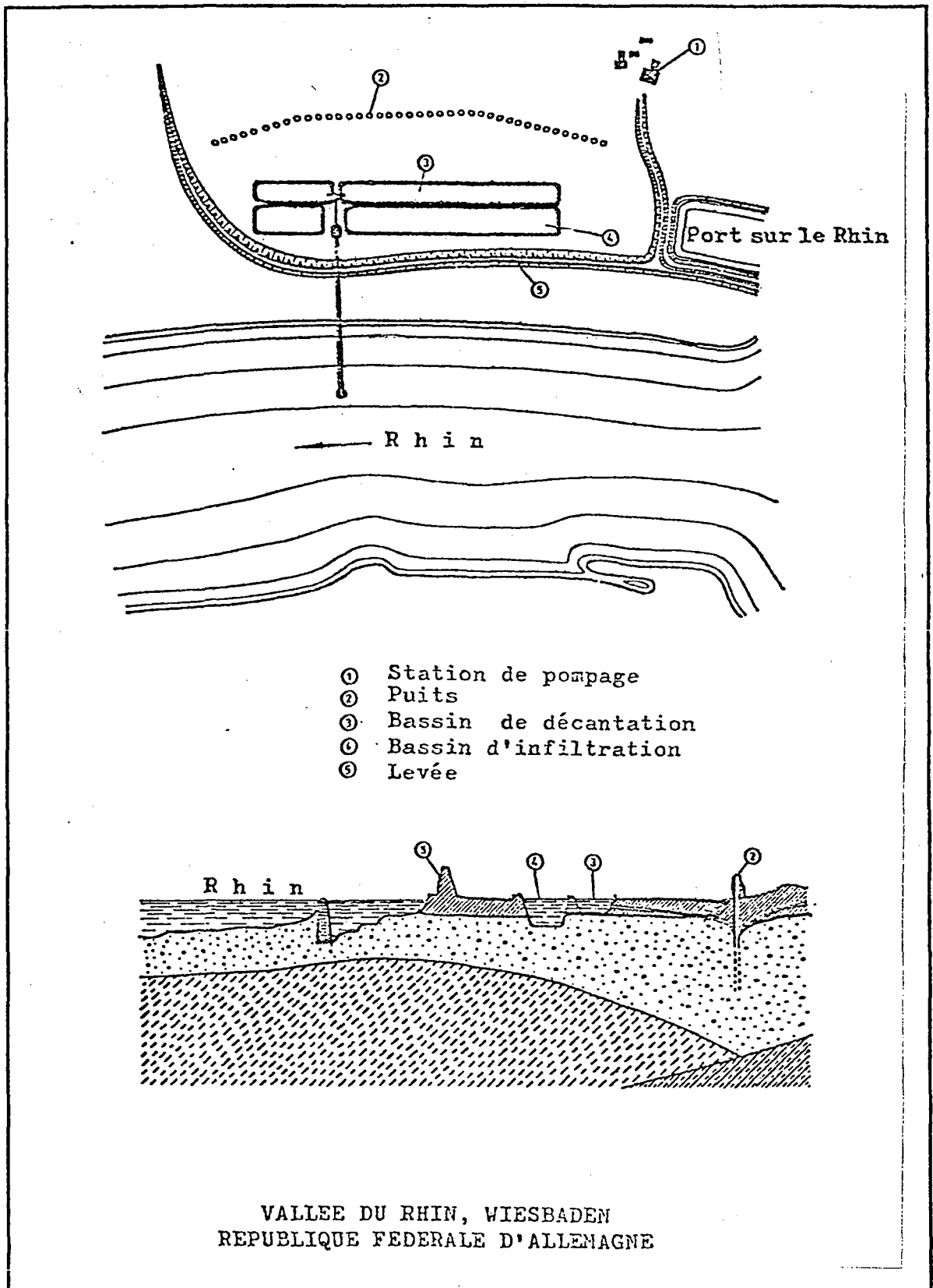
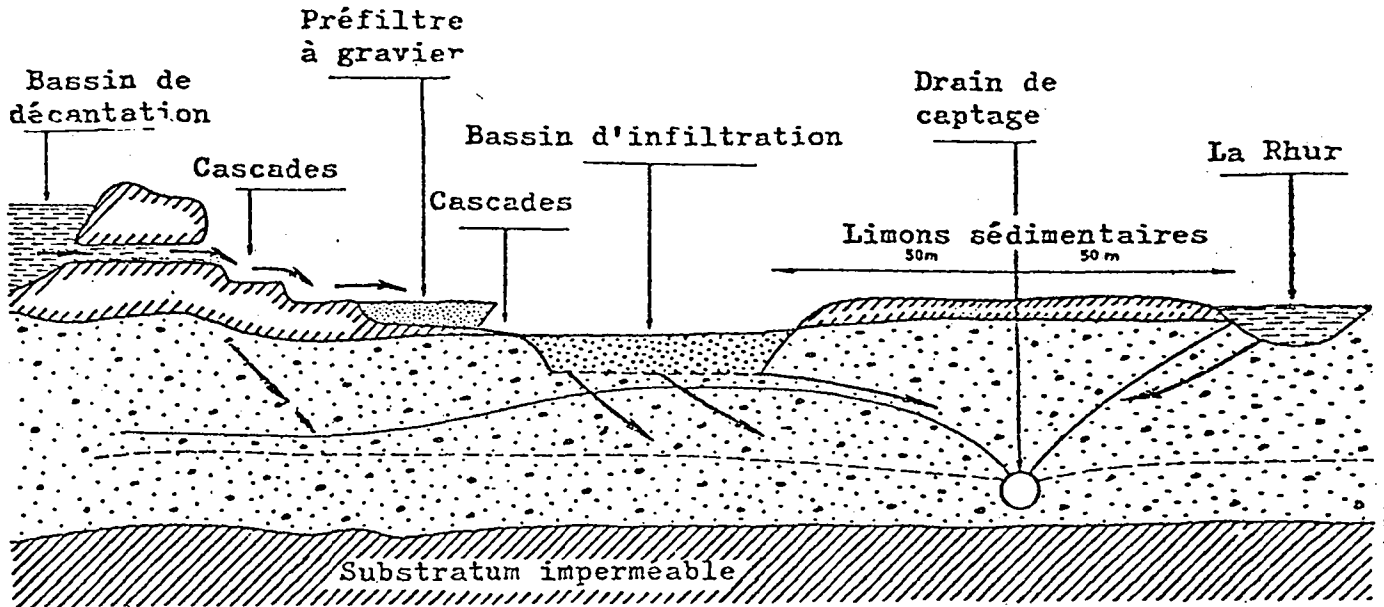


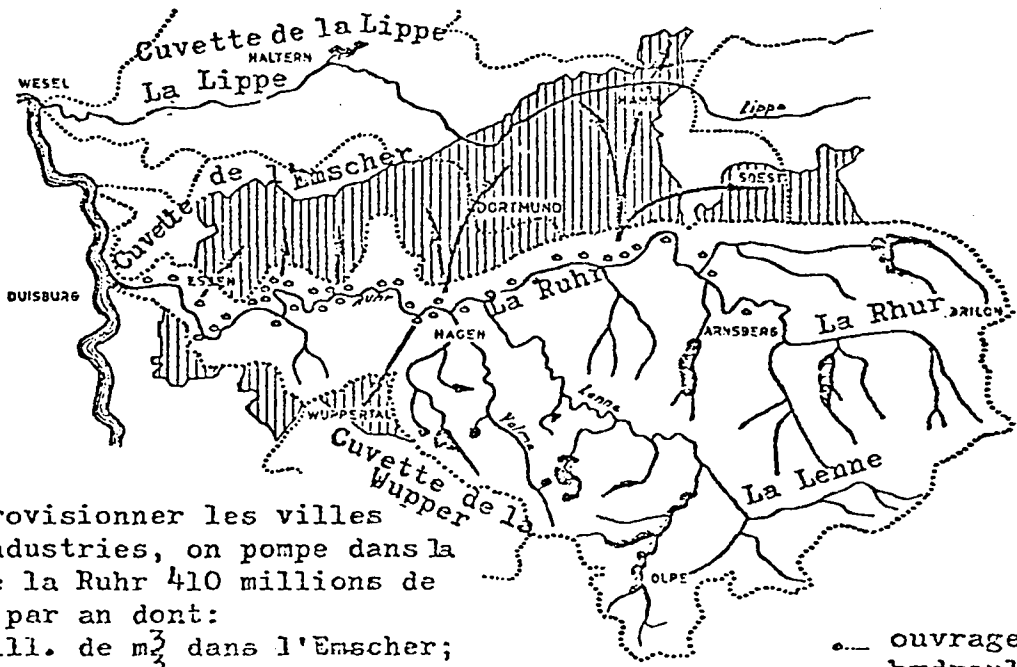


FIGURE 28

INSTALLATIONS D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE DORTMUND



----- Surface de la nappe phréatique, avant l'alimentation artificielle  
 ———— Surface de la nappe phréatique, après l'alimentation artificielle



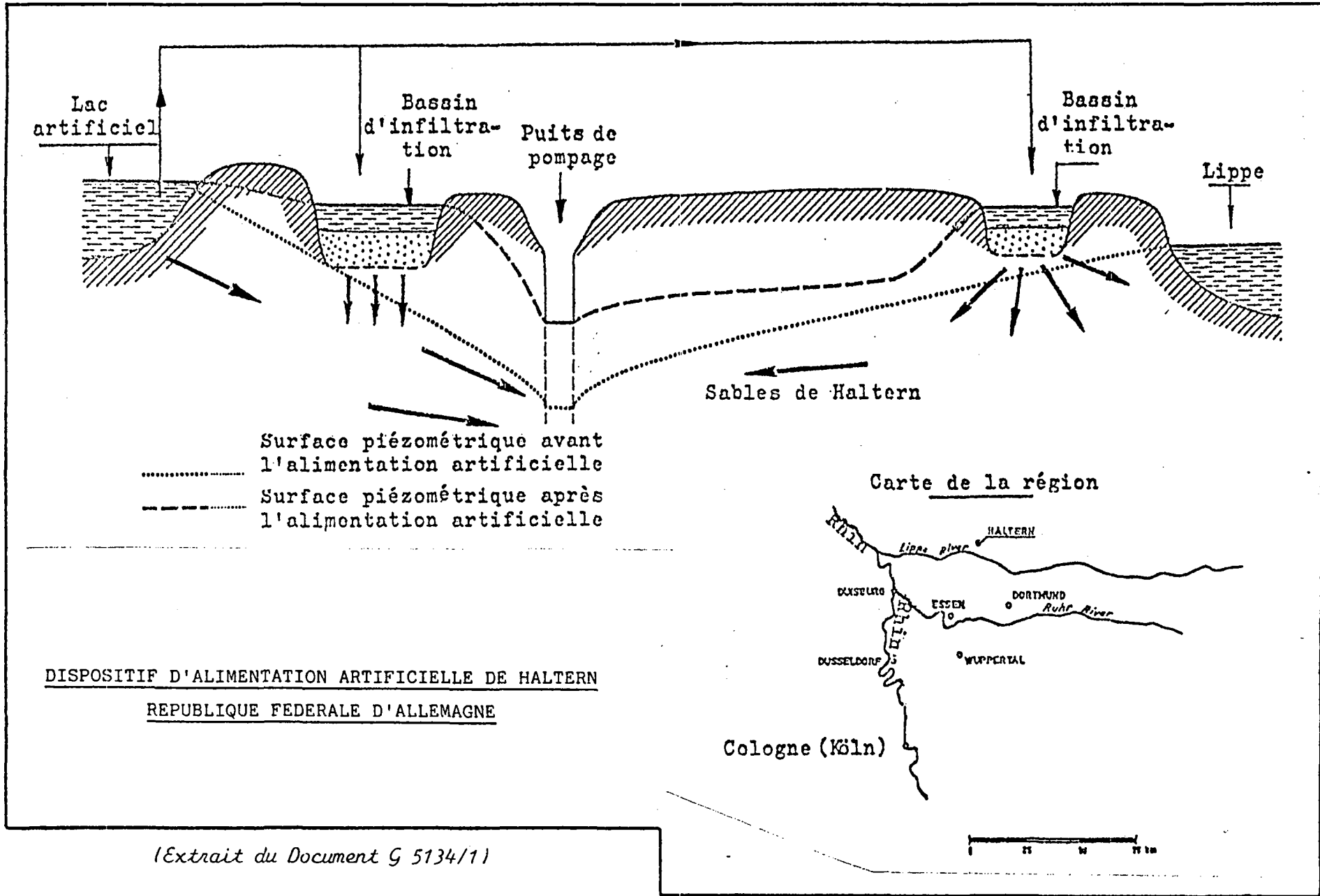
Note

Pour approvisionner les villes et les industries, on pompe dans la vallée de la Ruhr 410 millions de m<sup>3</sup> d'eau par an dont:

320 mill. de m <sup>3</sup>	dans l'Emscher;
82 mill. de m <sup>3</sup>	dans la Lippe;
6 mill. de m <sup>3</sup>	dans la Wupper;
et 2 mill. de m <sup>3</sup>	dans la cuvette d'Ems

--- ouvrages hydrauliques

VALLEE DE LA RÜHR, REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE



(Extrait du Document G 5134/11)

FIGURE 29

TABLEAU 10 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT CONTINENTAL

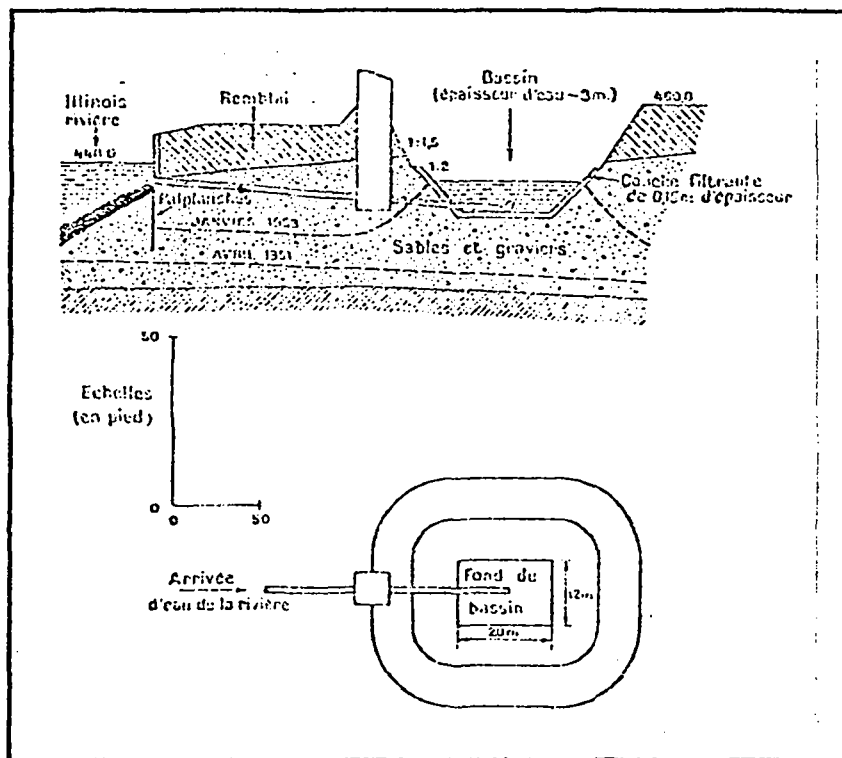
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.S.A.	Péoria (Illinois)	R	sables et graviers (voir fig. 30)		Bassins à sable (voir fig. 30)	A.P	Pré	10.000 m <sup>3</sup> /jour	de re- vient 0,008 FF par m <sup>3</sup>

Notations :

- R = eau de rivière
- P = colmatage physique
- A = colmatage dû aux algues
- Pré = prétraitement

FIGURE 30

PLAN ET COUPE D'UN BASSIN D'INFILTRATION DE PEORIA



(Extrait du Document F 2028)

.../...

TABLEAU 11 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT MEDITERRANEEN

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
France	Vallée de la Durance (voir fig. 31)	R	Alluvions fluviales	> 800 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Puits d'injection (voir fig. 31)	P	1	830 l/s	

Notations :

R = rivière  
P = colmatage physique  
1 = traitement primaire

-----

TABLEAU 12 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT ARIDE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.S.A.	Plushing Meadows	U	Sable grossier et graviers		Bassins (voir fig. 32)	P.B	2	3,5 m <sup>3</sup> /s	de revient 0,0043\$ par m <sup>3</sup>
U.S.A.	Fresno (voir fig. 33)	R	Alluvions récentes d'origine granitique		Bassins	P	Pré	15 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /an	de revient 0,014\$ par m <sup>3</sup>

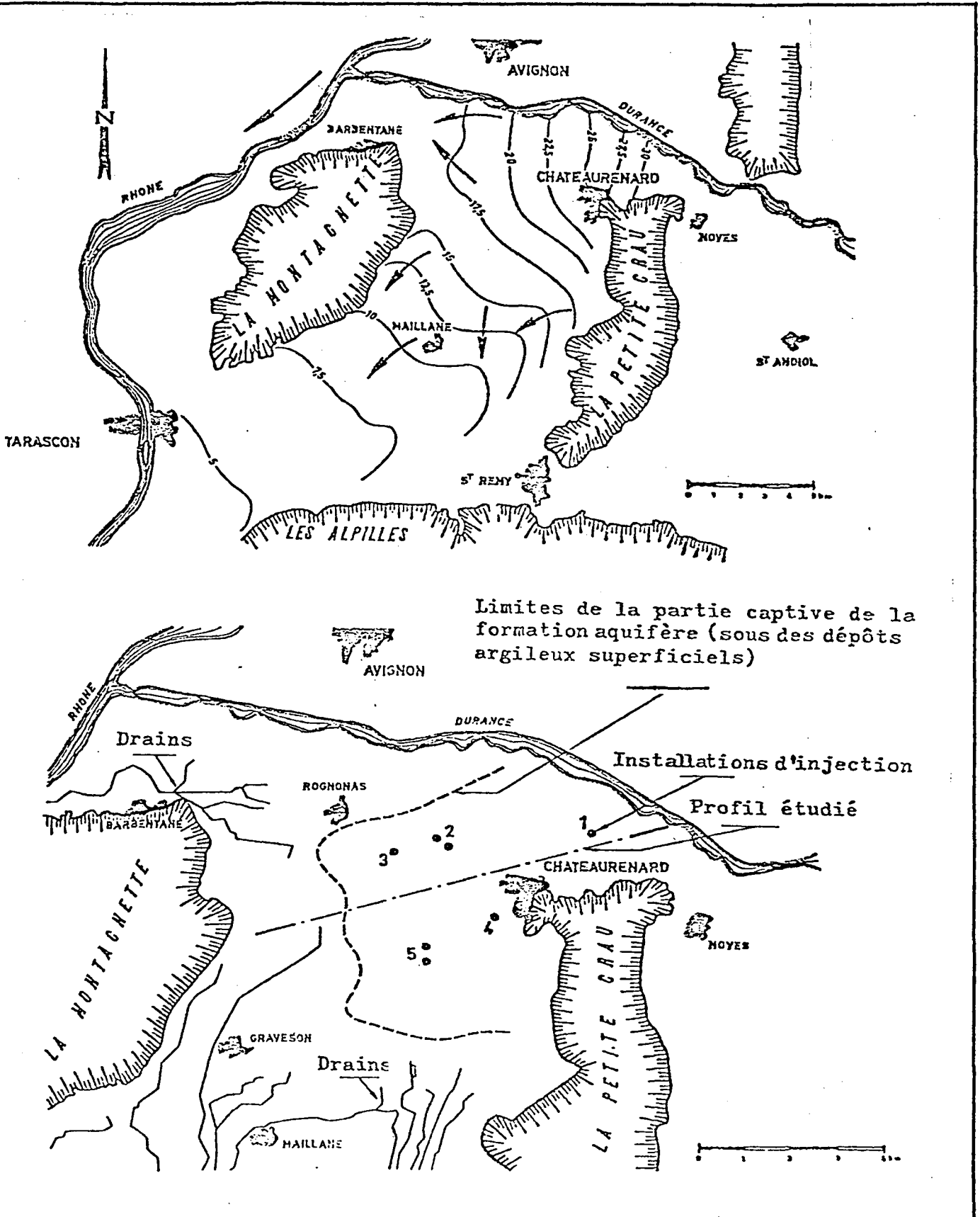
Notations :

R = eau de rivière  
U = eaux usées  
P = colmatage physique  
B = colmatage biologique  
2 = traitement secondaire  
Pré = prétraitement

.../...

FIGURE 31

BASSE VALLEE DE LA DURANCE - FRANCE



(Extrait du Document G 5134/1)

.../...

FIGURE 32 : SCHEMA DU PROJET DE FLUSHING MEADOWS

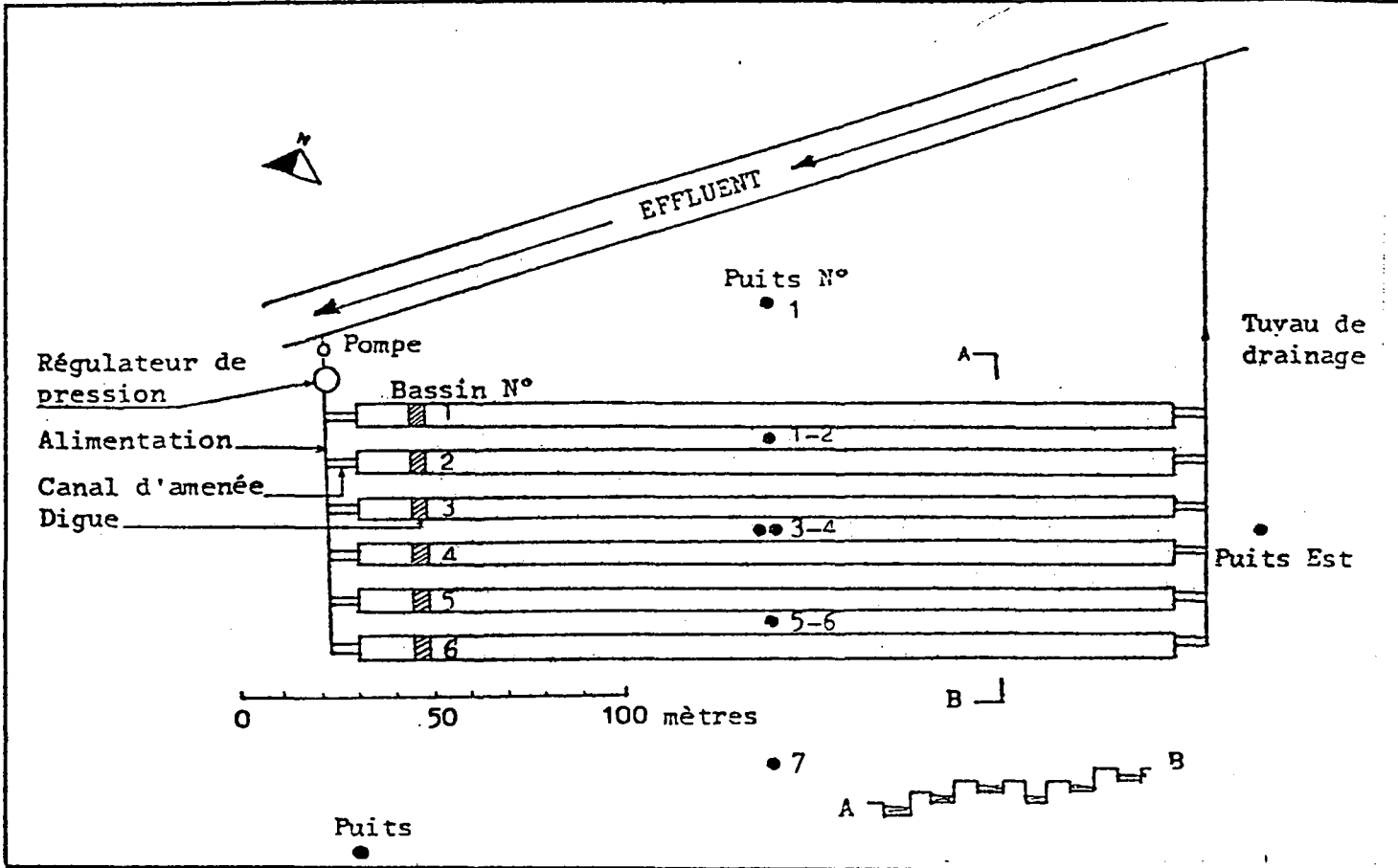
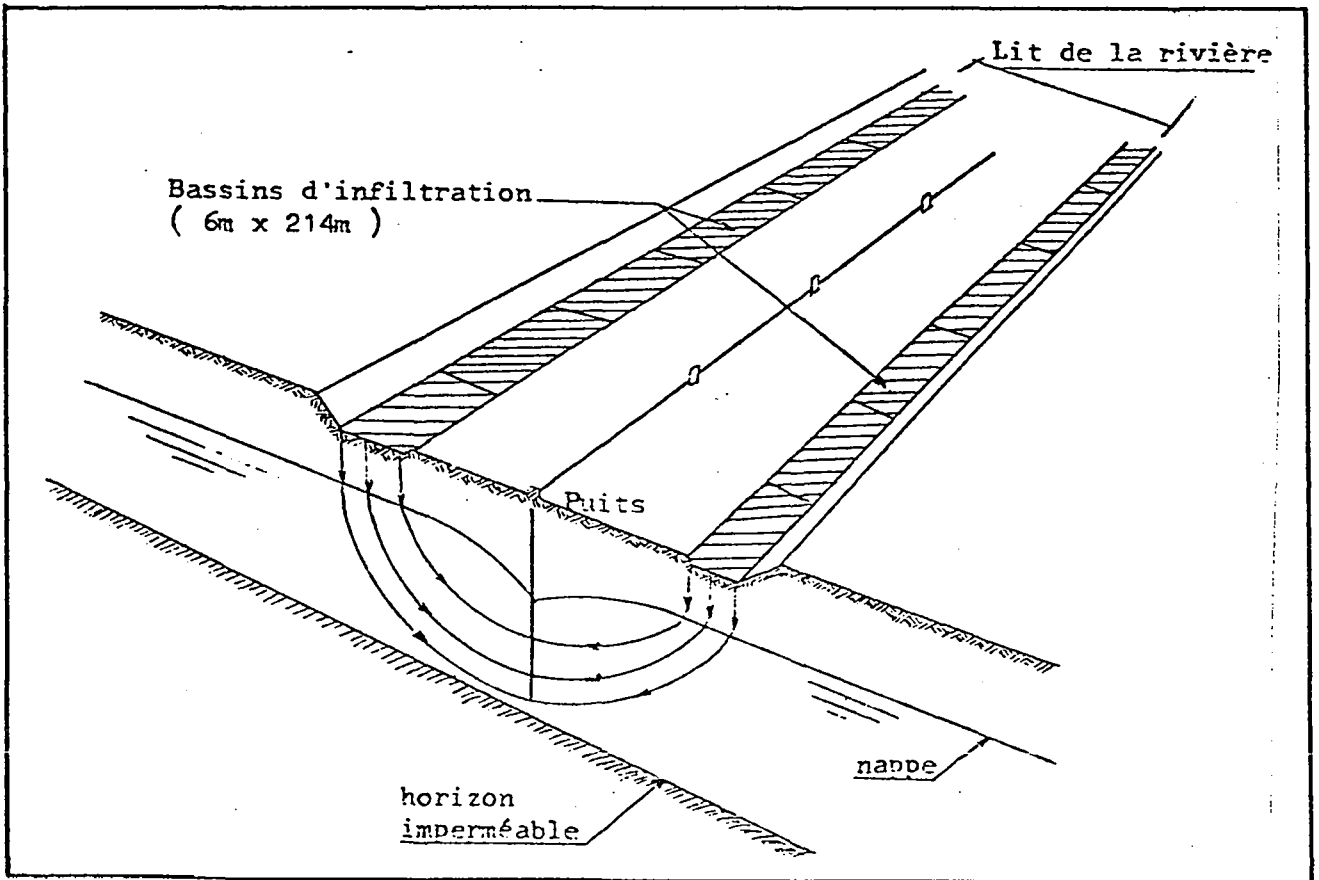


FIGURE 32 BIS : SYSTEME DES BASSINS D'INFILTRATION SUR CHAQUE COTE DU LIT DE LA RIVIERE ET DES PUIITS AU CENTRE POUR POMPER L'EAU REGENEREE

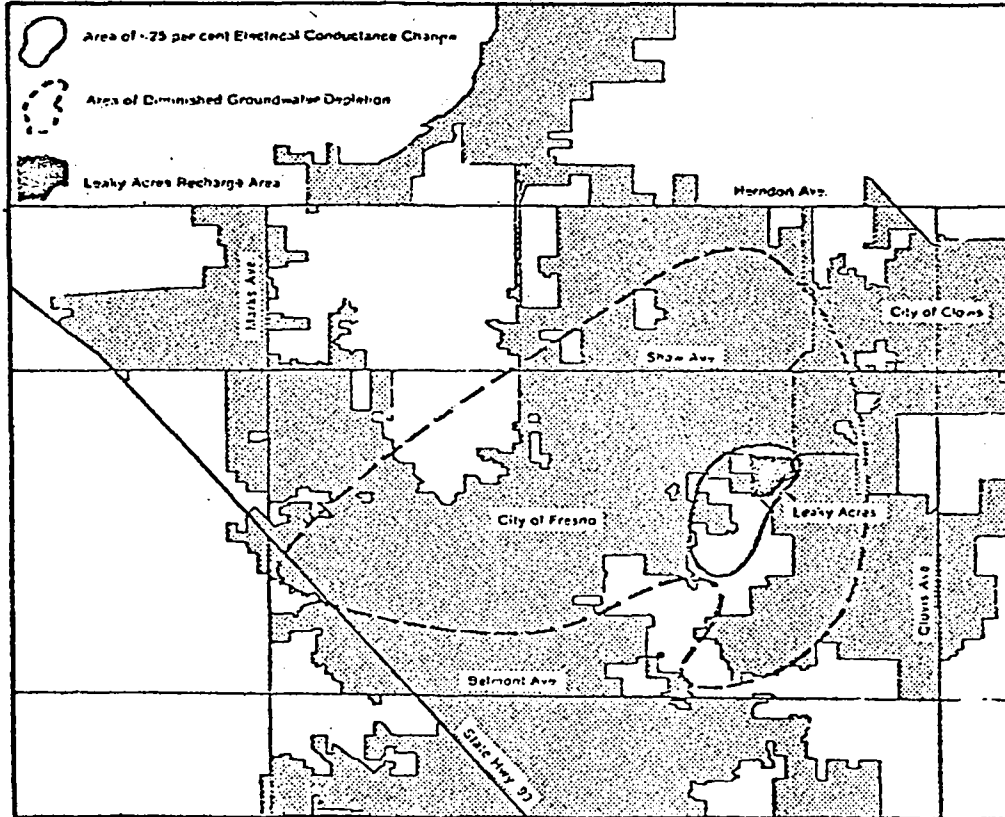


(Extraits du Document G 6230)

.../...

FIGURE 33

ZONAL RESPONSE IN WATER TABLE HYDRAULIC HEAD AND WATER QUALITY  
AROUND THE CITY OF FRESNO, CALIFORNIE



(Extrait du Document 66/16816)

TABLEAU 13 : REALISATION EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TROPICAL

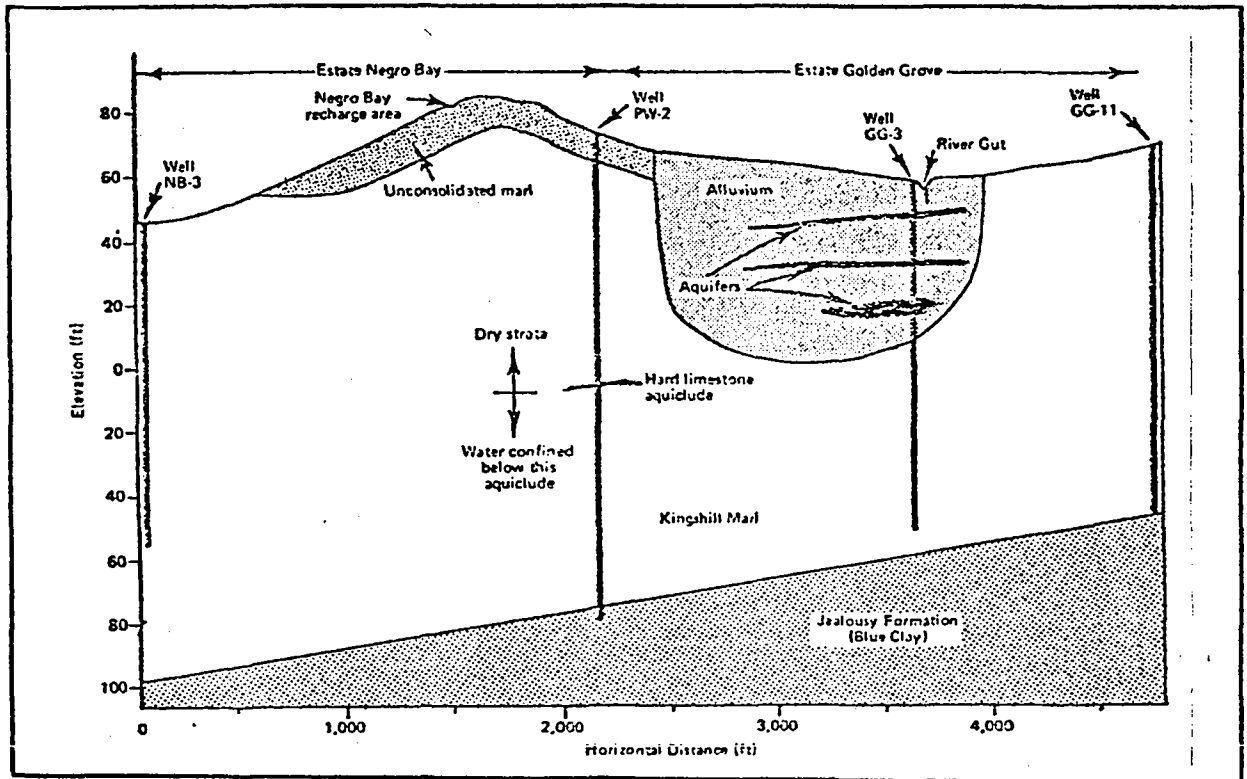
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.S.A.	St Croix (Virgin Island)	U	Alluvions (voir fig. 33 Bis)		Bassins (voir fig. 33 Bis)	P.B	1	38.000 m3/jour	de revient 0,560\$ par m3

Notations :

- U = eaux usées
- P = colmatage physique
- B = colmatage biologique
- 1 = traitement primaire

FIGURE 33 BIS

GEOLOGY OF THE GOLDEN AND NEGRO BAY RECHARGE SITES



*(Extrait du Document 66/14931)*



- INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF LA  
CONSTITUTION D'UNE BARRIÈRE HYDRAULIQUE CONTRE L'INTRUSION  
D'EAUX SALÉES

1) Liste des installations

(1) Long Island, U.S.A.	(F 2028, G 5134/1, G 1787/4)
(2) Zandvoort, Pays-Bas	(F 2028, G 5134/1)
(3) Tokushima, Japon	(G 5134/1)
(4) Water Factory 21, U.S.A.	(G 6212, 56/03546)
(5) Palo Alto, U.S.A.	(G 6212)
(6) Burdekin, Australie	(F 4033/2, G 5134/1)
(7) Kalauoo, Hawaï, U.S.A.	(G 5134/1)
(8) Dashte Naz , Iran	(Ground Water Ja-Fe, 1977)
(9) Tanger, Maroc	(F 2028, G 5134/1, 66/00101)
(10) Telbaulba, Tunisie	(G 6757)
(11) Sebikotane, Sénégal	(G 5134/1, 56/00835)
(12) Bas Togo, Togo	(G 5134/1)

2) Le tableau ci-après donne la répartition des installations précédentes suivant le climat et le niveau de développement des pays concernés.

3) Les tableaux 14 à 19 donnent pour chaque cas particulier de climat et de niveau de développement quelques caractéristiques des installations correspondantes :

. Tableaux 14 à 16 : réalisations en pays industrialisés

. Tableaux 17 à 19 : réalisations en pays en voie de développement.

.../...

CLIMAT \ NIVEAU DE DEVELOPPEM.	INDUSTRIALISE	EN VOIE DE DEVELOPPEMENT
TEMPERE	(1) (2) (3) tableau 14	(8) tableau 17)
CONTINENTAL		
MEDITERRANEEN	(4) (5) tableau 15	(9) (10) tableau 18
SEMI-ARIDE		
ARIDE		
TROPICAL	(6) (7) tableau 16	(11) (12) tableau 19

TABLEAU 14 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TEMPERE

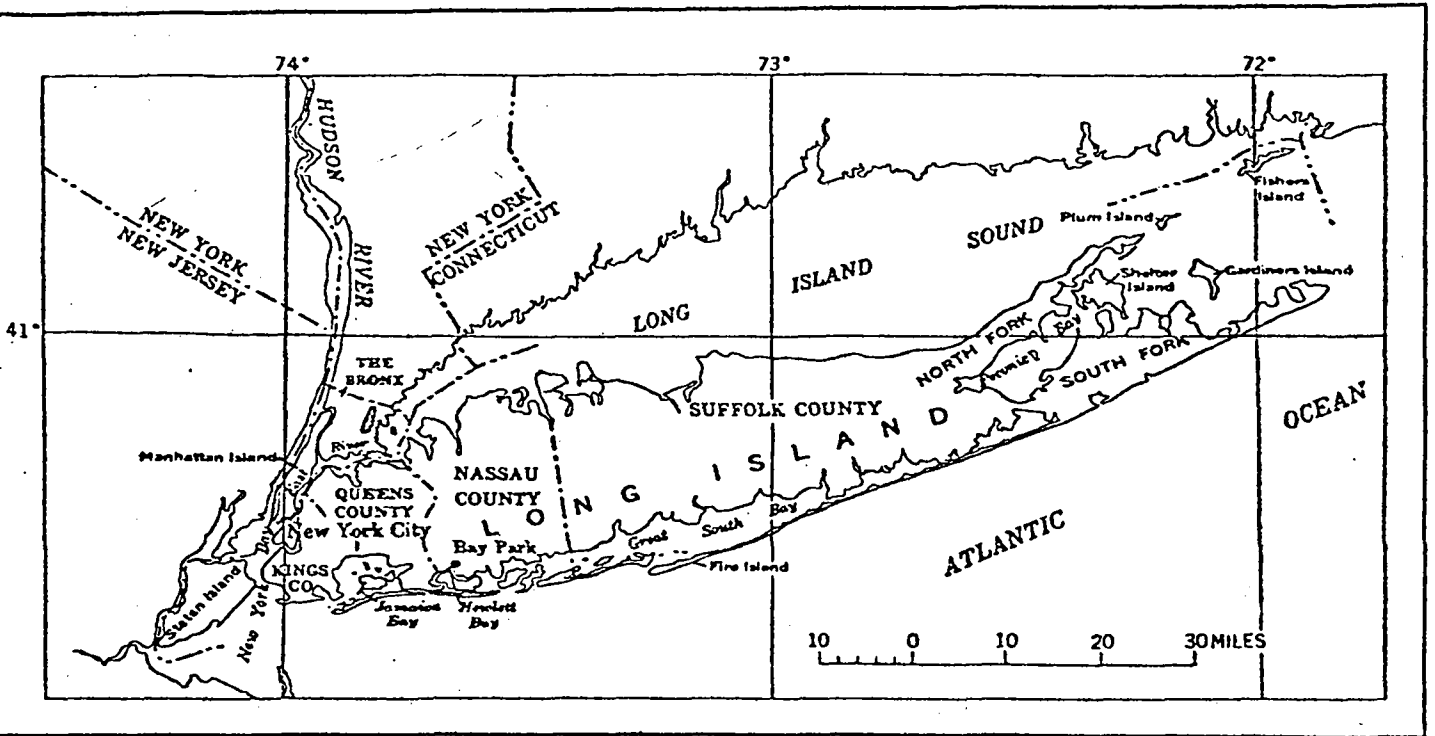
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.S.A.	Bay Park Long Island (voir fig. 34)	U	Sable, argile, sable argileux (voir fig. 35)	$1200 \cdot 10^9$ m <sup>3</sup>	Puits d'injection	P.C.B	3	13 à 25 l/s	
Pays-Bas	Zandvoort	R	Plaine littorale et dune (voir fig. 36)	$4,5 \cdot 10^9$ m <sup>3</sup>	canaux et bassins (voir fig. 36)	P	Pré	$70 \cdot 10^6$ m <sup>3</sup> /an	de revient 0,245 FF/m <sup>3</sup>
Japon	Tokushima (voir fig. 37)	R	Plaine littorale diluvium (voir fig. 37)		Puits d'injection	P	2	20-25 m <sup>3</sup> /heure	

Notations :

- R = eaux de rivière
- U = eaux usées
- P = colmatage physique
- C = colmatage chimique
- B = colmatage biologique
- Pré = prétraitement des eaux
- 2 = traitement secondaire
- 3 = traitement tertiaire

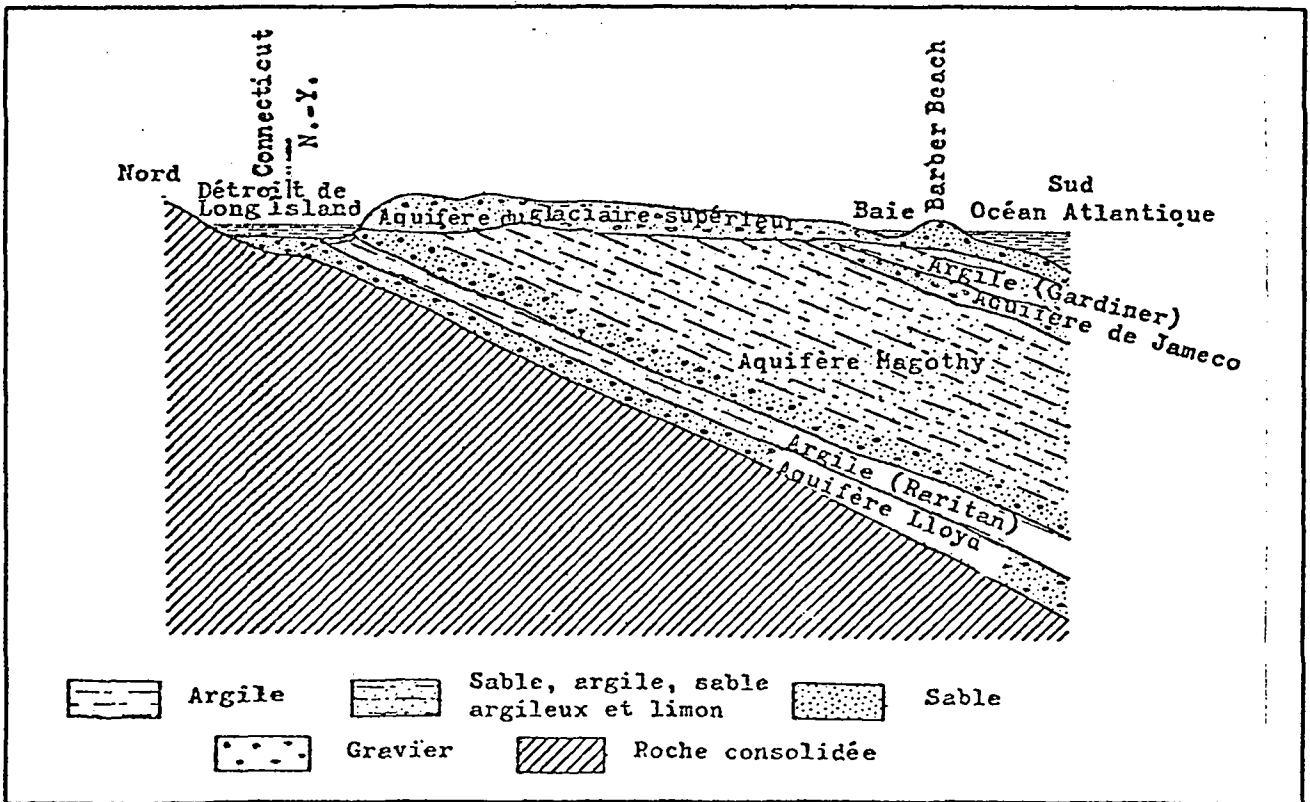
FIGURE 34

LOCATION OF THE BAY ARTIFICIAL-RECHARGE SITE



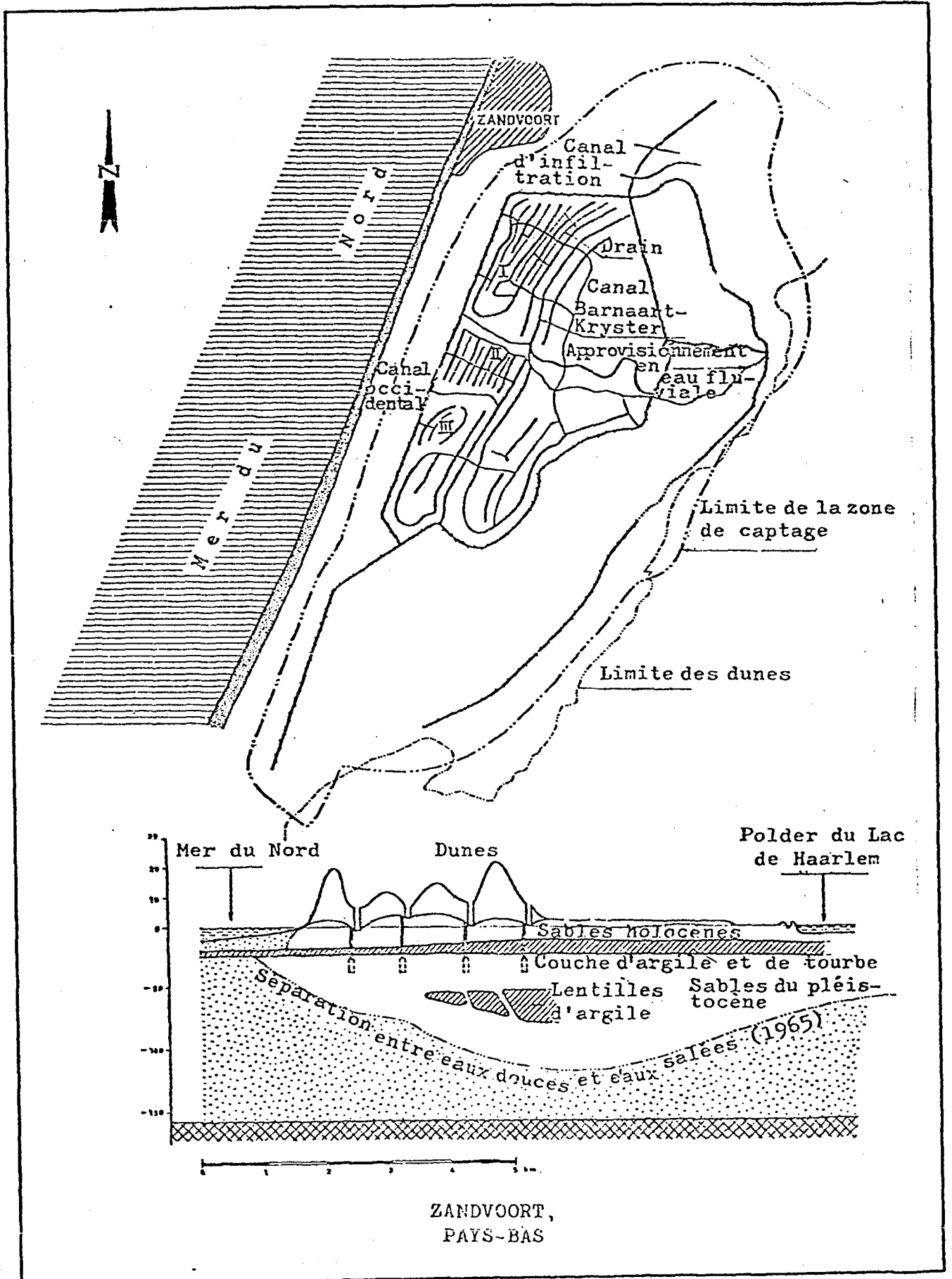
(Extrait du Document G 5211)

FIGURE 35



(Extrait du Document G 5134/1)

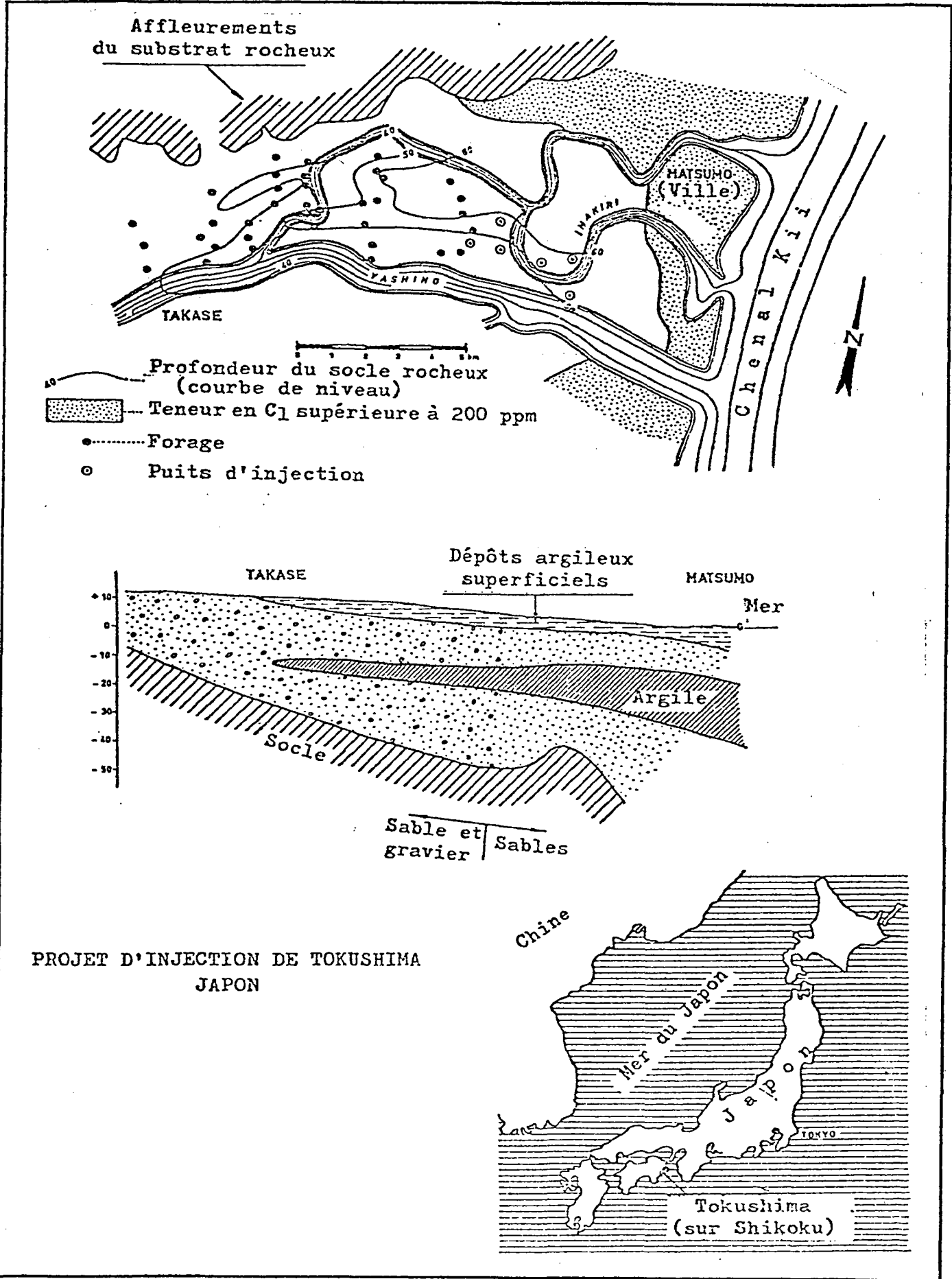
FIGURE 36



(Extrait du Document G 5134/11)

.../...

FIGURE 37

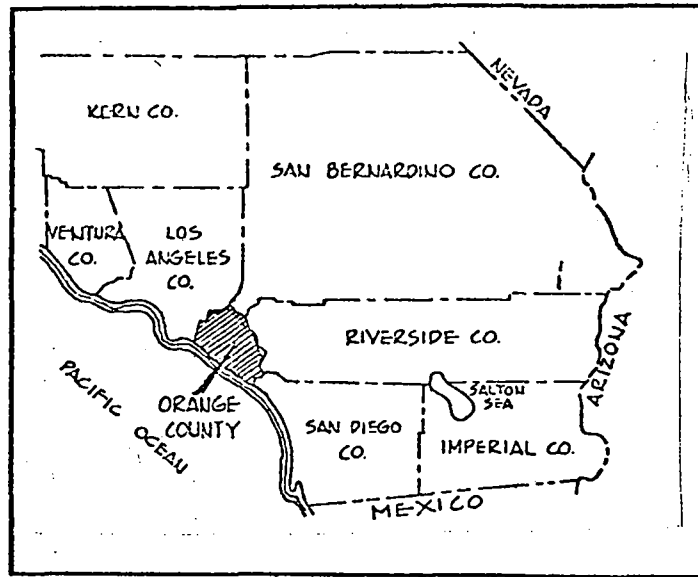


(Extrait du Document G 5134/1)

.../...

FIGURE 38

ORANGE COUNTY, CALIFORNIE



*(Extrait du Document 56/03546)*

TABEAU 15 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT MEDITERRANEEN

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.S.A.	Water Factory 21 Californie (voir fig. 38)	U	Dépôts marins et continentaux mal consolidés		Puits d'injec- tion	P.B	3 (voir fig.39)	0,66 m <sup>3</sup> /s	
U.S.A.	Palo Alto (voir fig. 40)	U	Sables et graviers		Puits d'injec- tion (voir fig.40)	P.B	3	6 l/s	

Notations :

- U = eaux usées
- P = colmatage physique
- B = colmatage biologique
- 3 = traitement tertiaire

.../...

FIGURE 39

FLOW SCHEMATIC AND SAMPLING LOCATIONS FOR WATER FACTORY 21

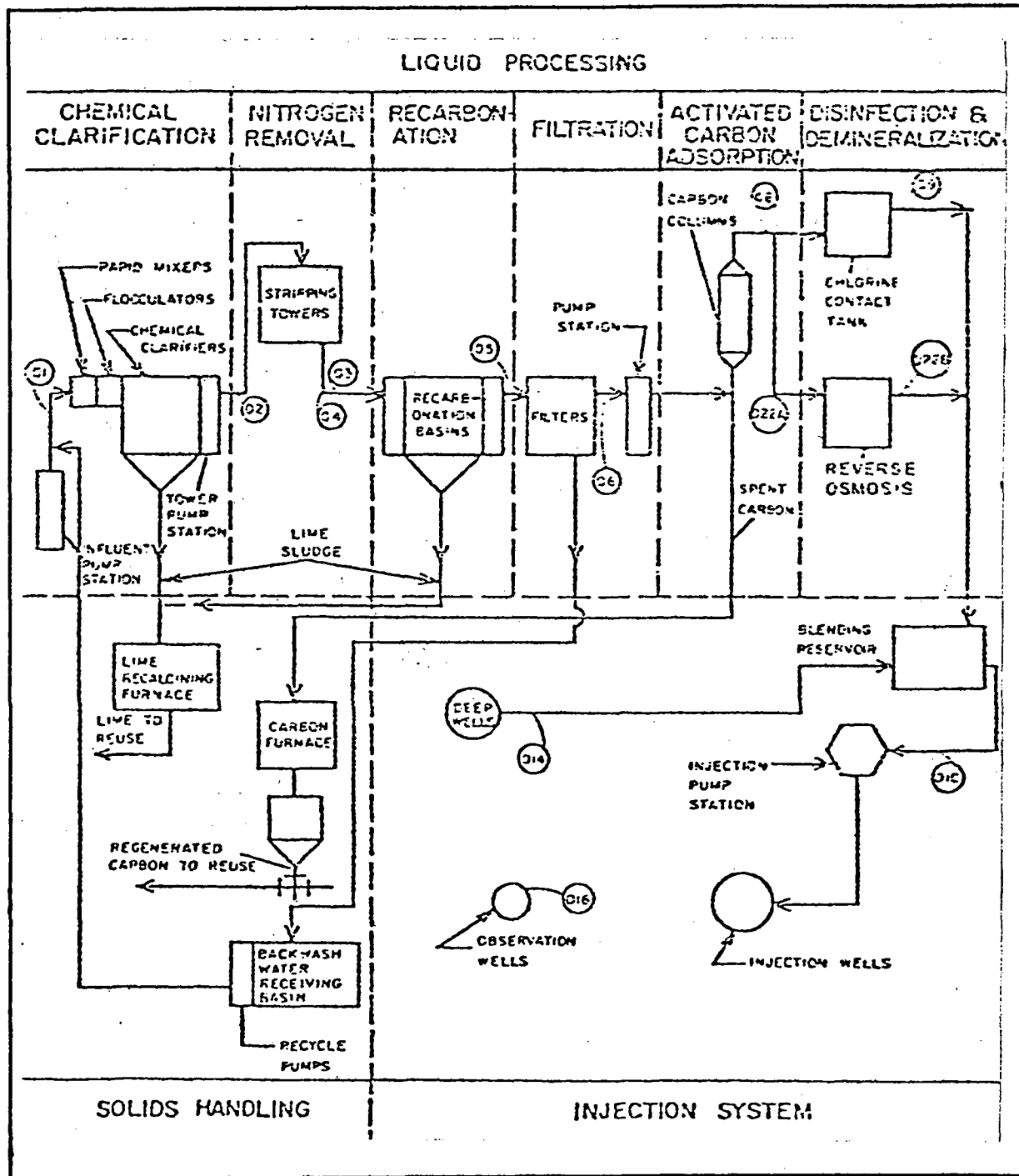
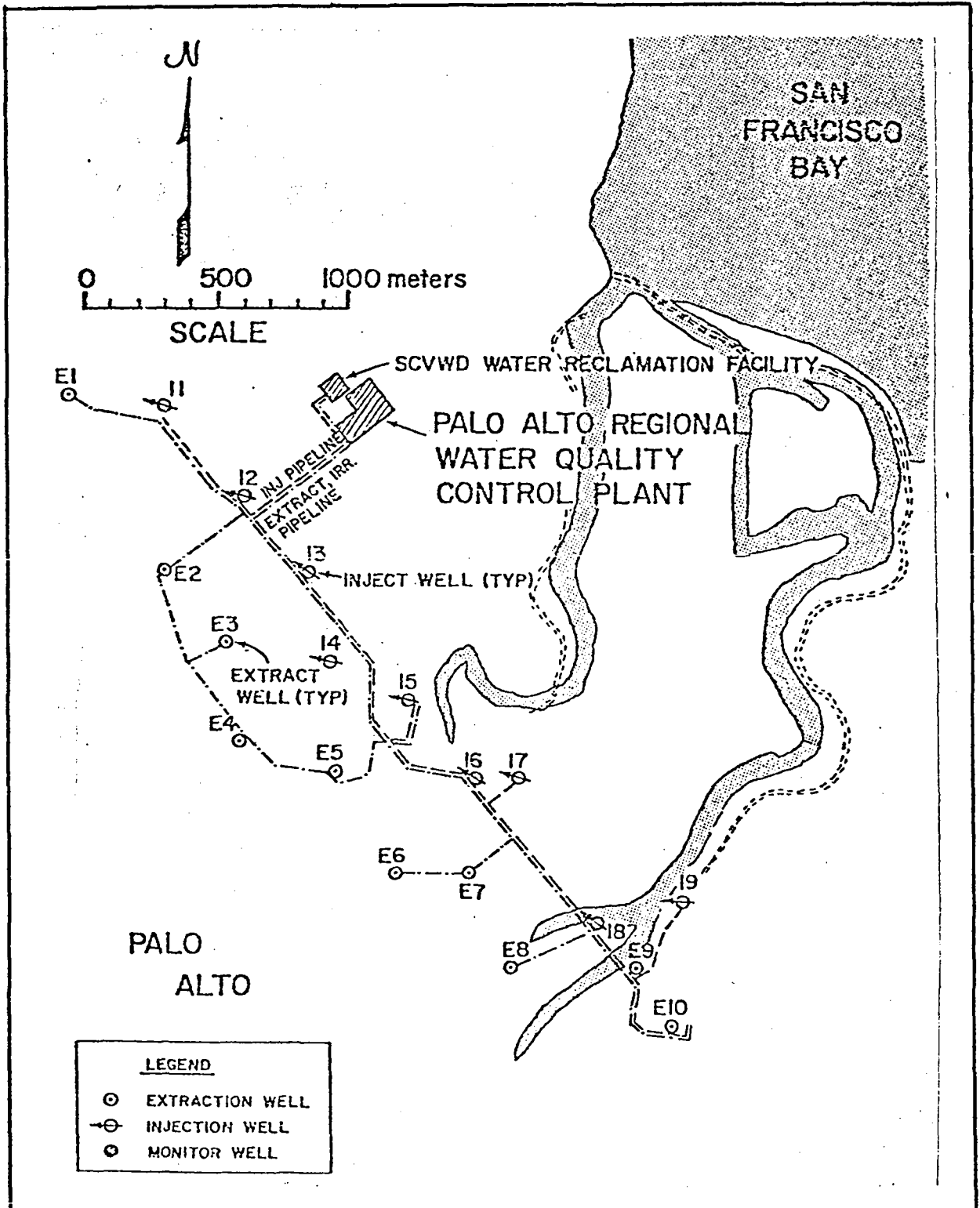


FIGURE 40

PLAN OF GROUNDWATER RECHARGE FACILITY IN THE PALO ALTO, BAYLANDS



(Extrait du Document G 6212)

.../...



TABLEAU 16 : REALISATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TROPICAL

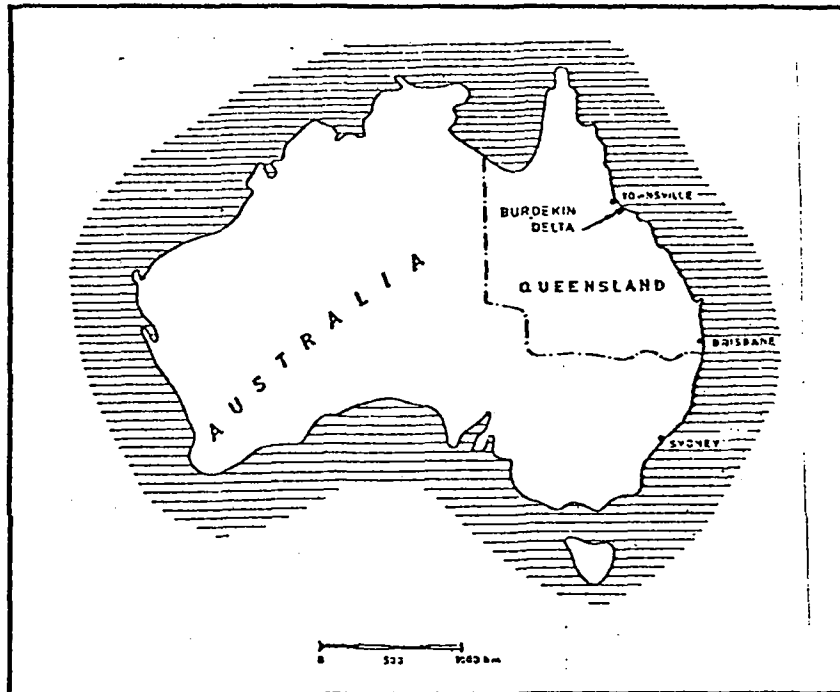
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Australie	Delta du Burdekin (voir fig. 41)	R	Delta avec dépôts alluviaux	345 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Tranchées à sable (voir fig.41 et 42)	P	Pré	40 à 100 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	des in- vestis- sements 2 10 <sup>6</sup> g
U.S.A.	Kalauao, Hawai	R	Cône volcanique (basalte) (voir fig. 43)	4.800 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Retenue d'eau (voir fig.43)	P		120.000 m <sup>3</sup> /jour	

Notations :

- R = eaux de rivière
- P = colmatage physique
- Pré = prétraitement

FIGURE 41

CARTE GENERALE



(Extrait du Document G 5134/1)

.../...

FIGURE 42

LOCALITIES OF RECHARGE TRENCHES IN BURDEKIN DELTA

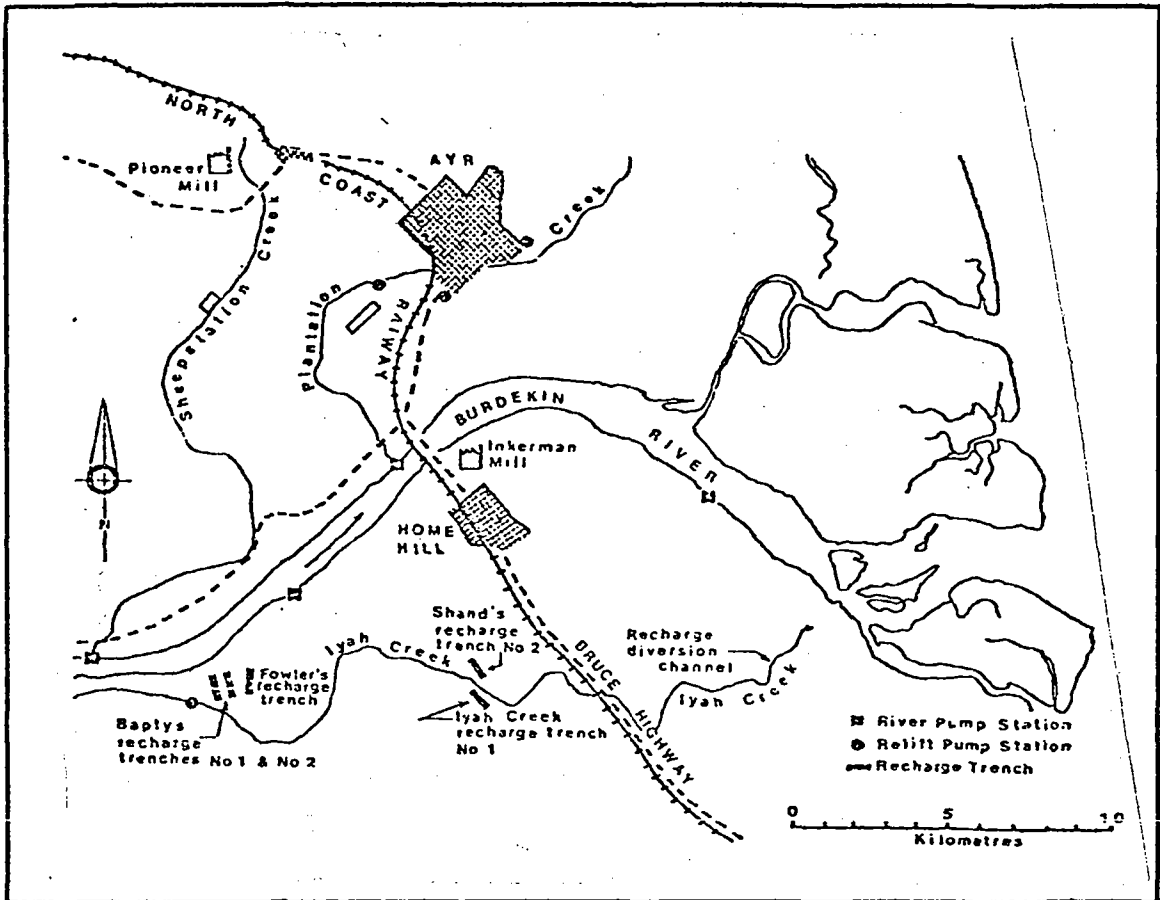
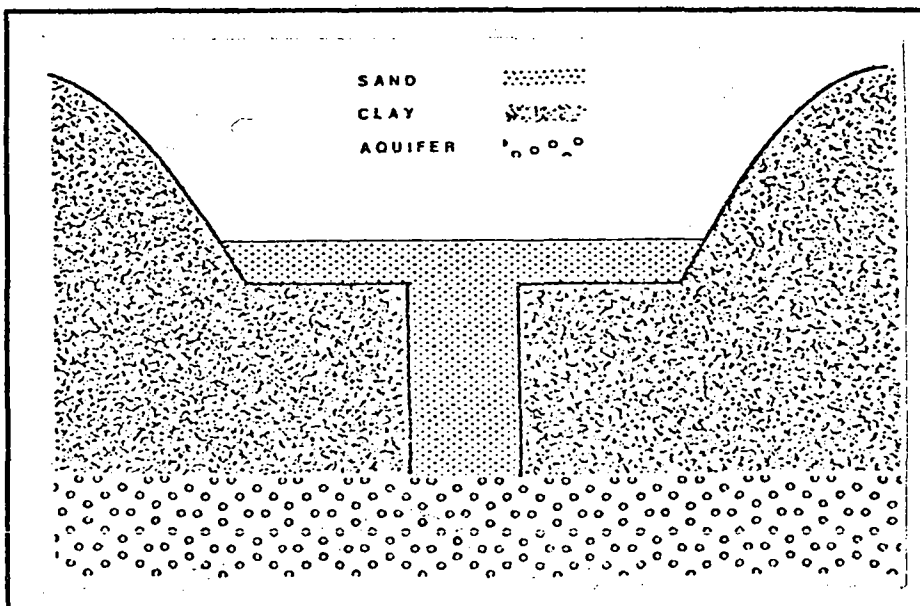


FIGURE 43

TYPICAL CROSS SECTION OF A TRENCH

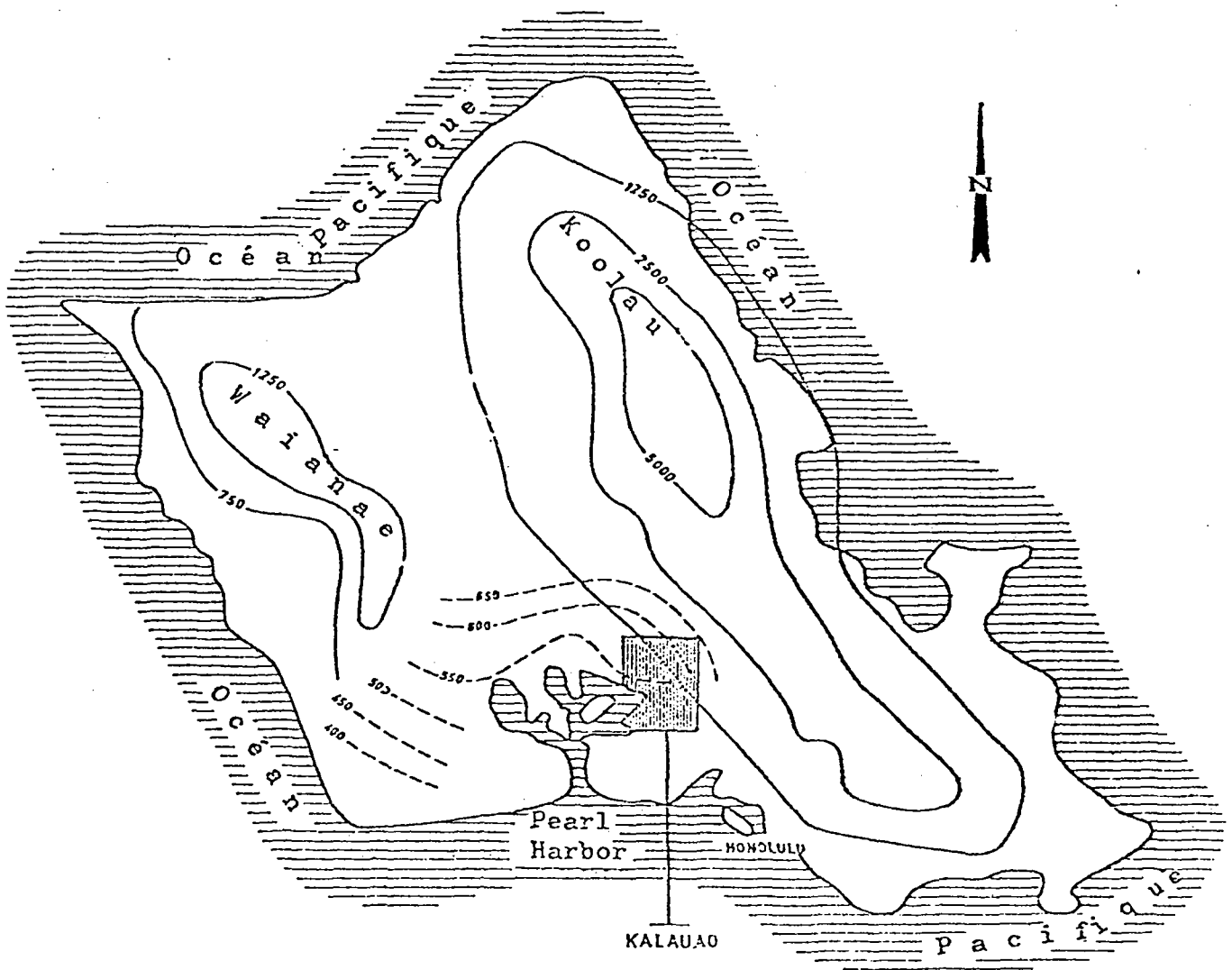
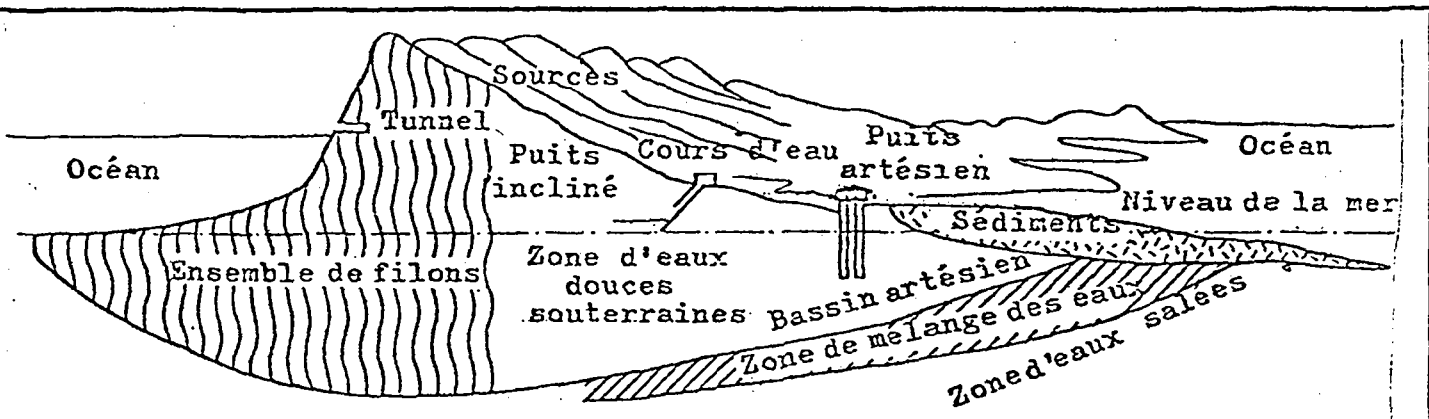


(Extraits du Document F 4033/2)

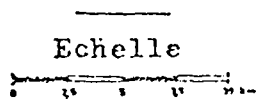
.../...

FIGURE 44

COUPE SCHEMATIQUE MONTRANT LES SOURCES D'EAU DE HONOLULU



Puits de Kalauao, Hawaii  
Etats-Unis d'Amérique



- 2500 — Précipitation (mm)
- - - 650 - - - Lignes de niveau piézométrique (cm)

TABEAU 17 : REALISATIONS EN PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT A CLIMAT TEMPERE

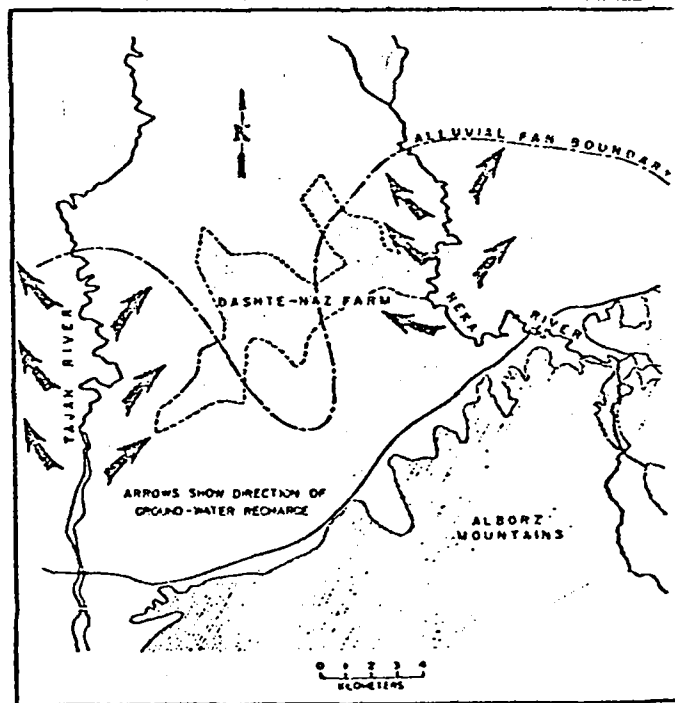
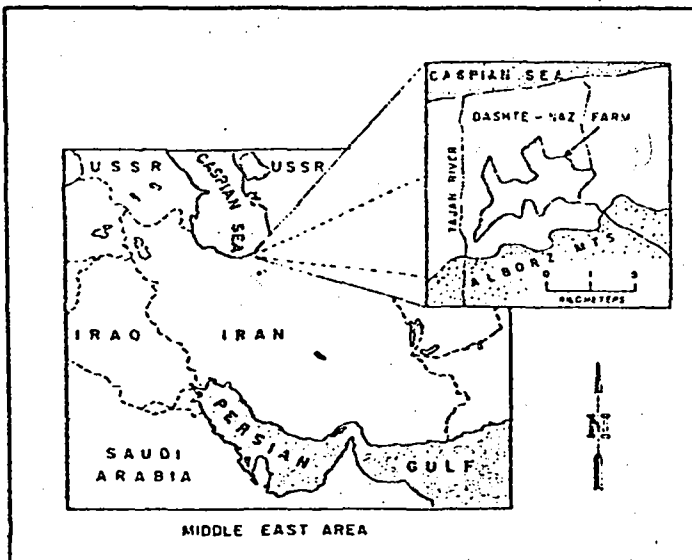
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Iran	Dashte Naz (voir fig. 45)	N	Sables (voir fig. 46)		Puits d'in- jection (voir fig.47)			200 l/s	

Notation :

N = eau de nappe

FIGURE 45

DASHTE-NAZ FARM AREA



*(Extraits de l'article de D.E. Williams paru dans  
Ground Water Ja-Fe 1977)*

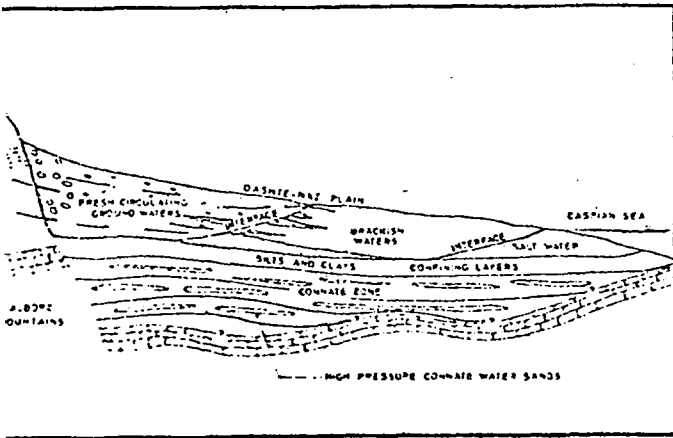
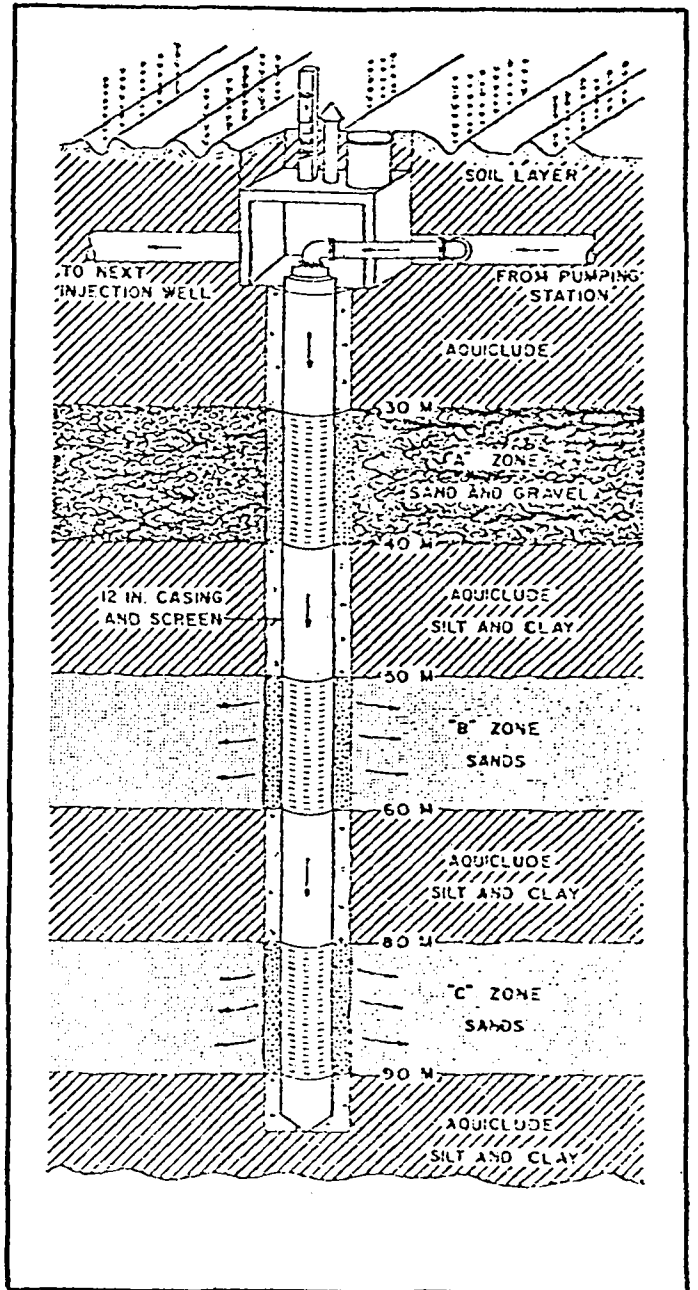
.../...

FIGURE 47

CROSS SECTION OF TYPICAL INJECTION WELL

FIGURE 46

RELATION BETWEEN FRESH AND SALINATED  
AQUIFERS IN DASHTE-NAZ



Extraits de l'article de D.E. Williams  
paru dans Ground Water (Ja-Fé 1977)

# CARTE GEOLOGIQUE DU CHARF-EL-AKAB

Echelle : 0 1 km

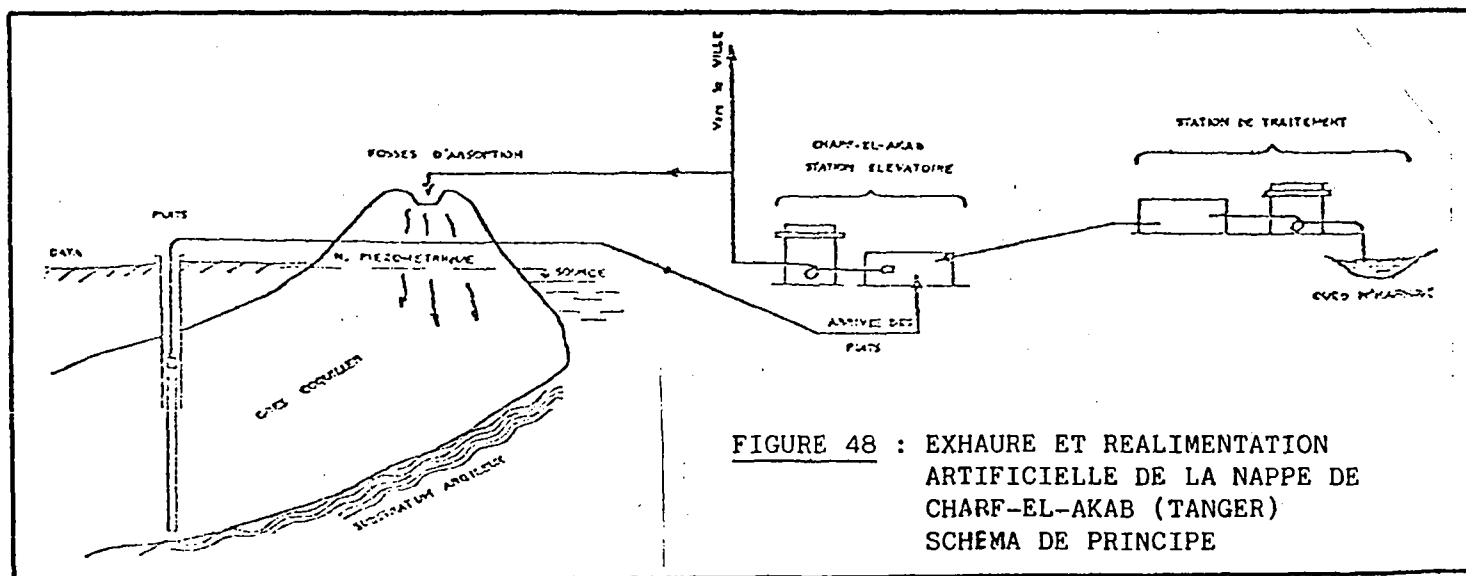
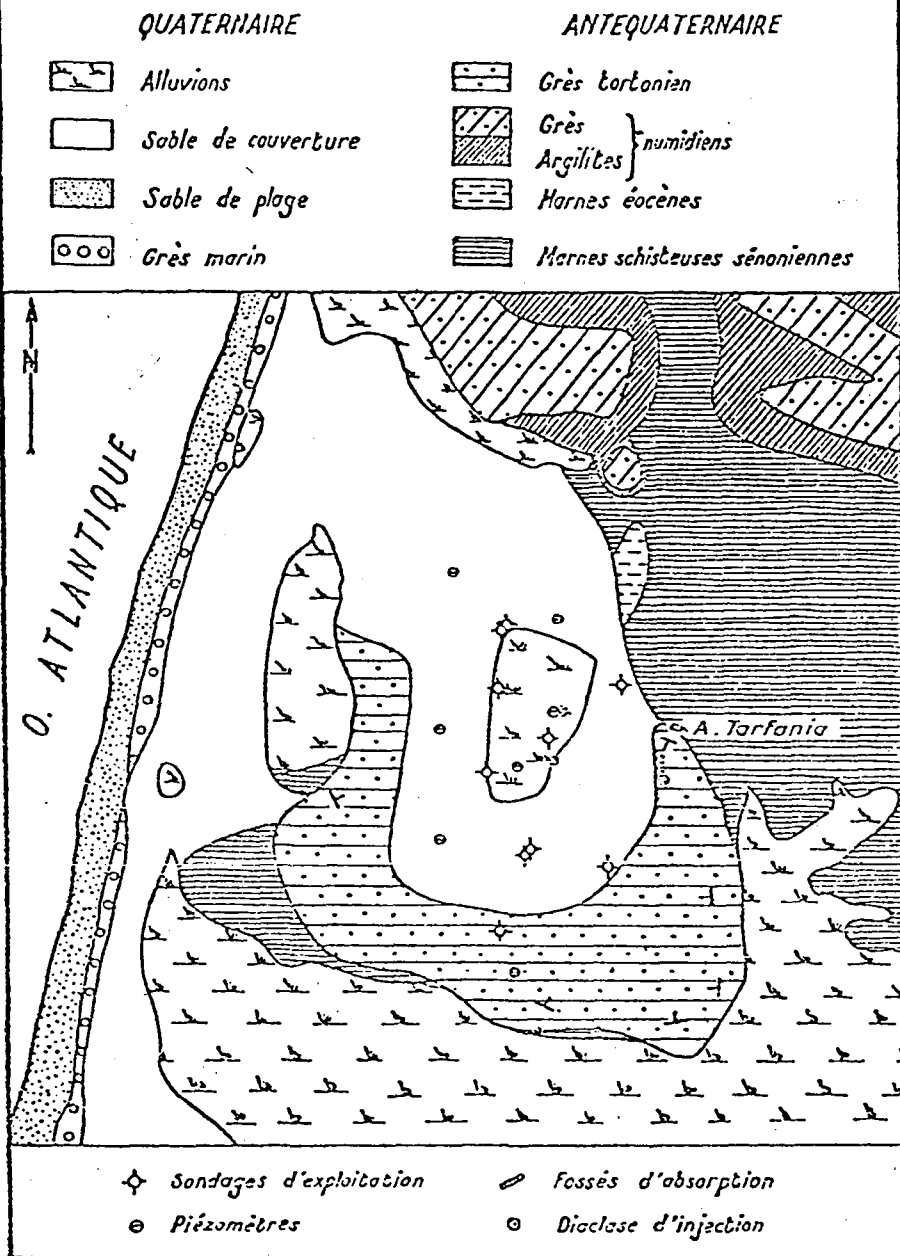


FIGURE 48 : EXHAURE ET REALIMENTATION ARTIFICIELLE DE LA NAPPE DE CHARF-EL-AKAB (TANGER) SCHEMA DE PRINCIPE

TABLEAU 18 : REALISATIONS EN PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT A CLIMAT MEDITERRANEEN

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Maroc	Tanger	R	Cuvette littorale sédimentaire (voir fig. 48)	6 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Fosses d'infiltration (voir fig.48)	P	1	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	
Tunisie	Telboulba	R	Sables fins avec couches d'argile		Puits d'injection	P	1-2	0,5 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	

Notations :

- R = eau de rivière
- P = colmatage physique
- 1 = traitement primaire
- 2 = traitement secondaire

---

TABLEAU 19 : REALISATIONS EN PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT A CLIMAT TROPICAL

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
Sénégal	Sebikotane	R	Roches carbonatées karstiques (voir fig. 49)	60.10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Retenue (voir fig.49)			3,4 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	
Togo	Bassin du Bas Togo	R	Sables dunaires (voir fig. 50)	>14.10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Terrains d'épandage			5,6 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	

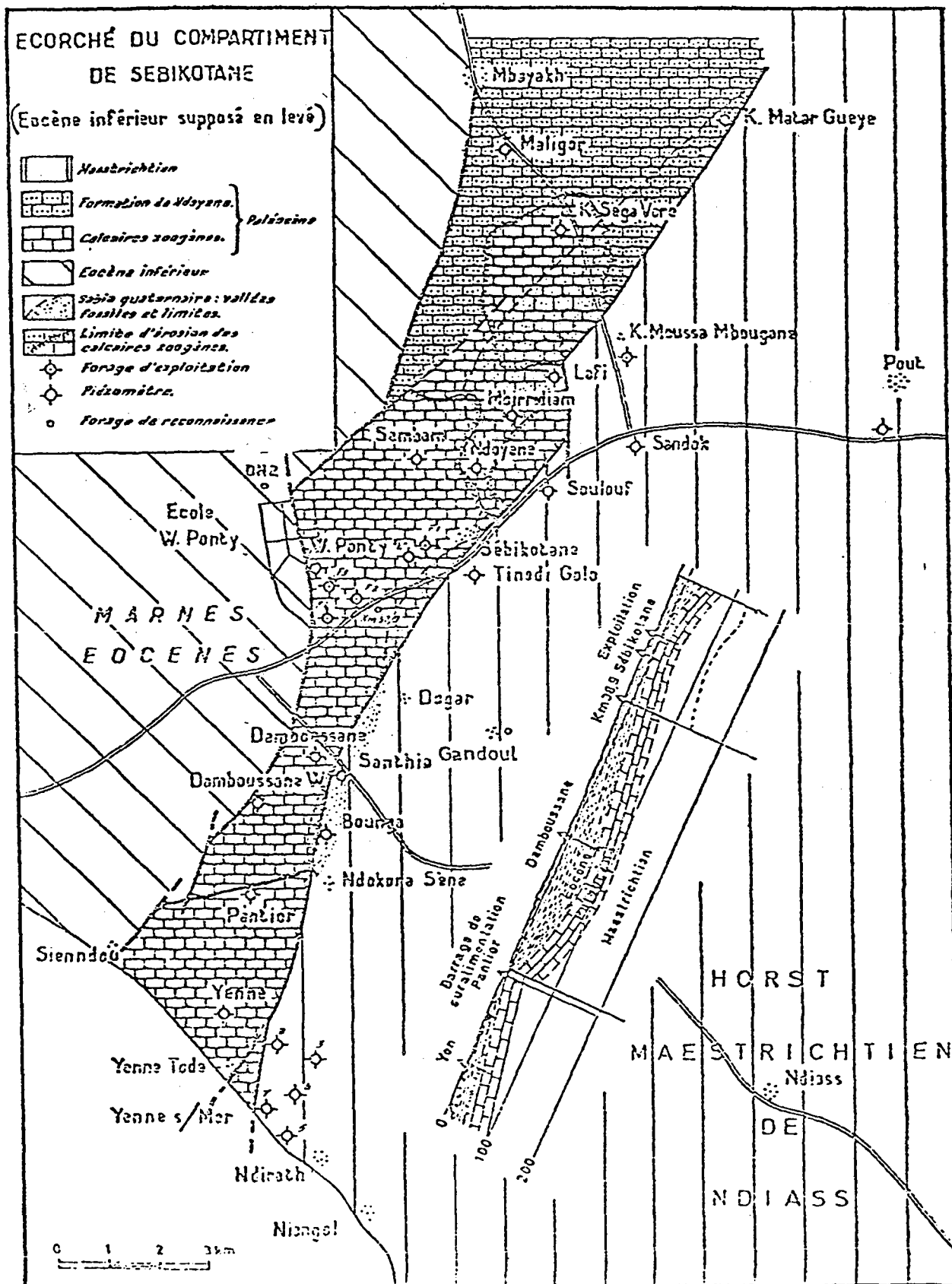
Notation :

- R = Eau de rivière

.../...

FIGURE 49

ECORCHE DU COMPARTIMENT DE SEBIKOTANE

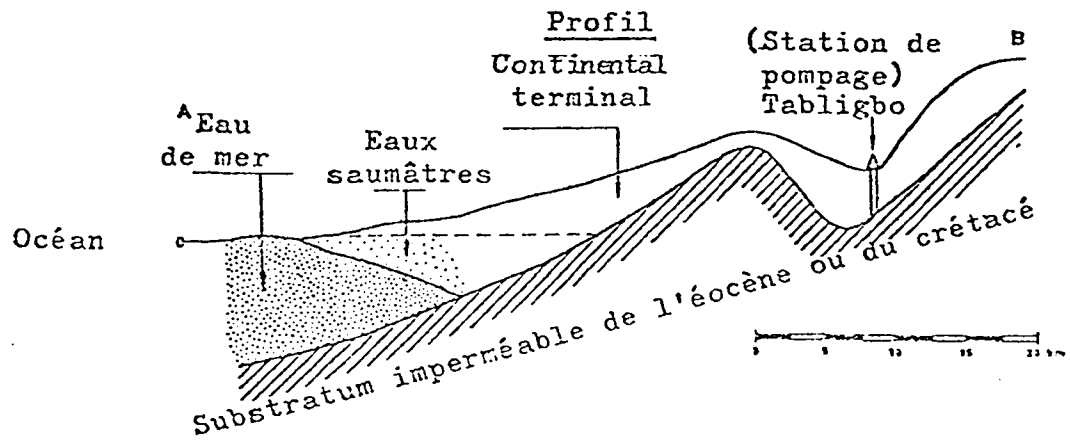
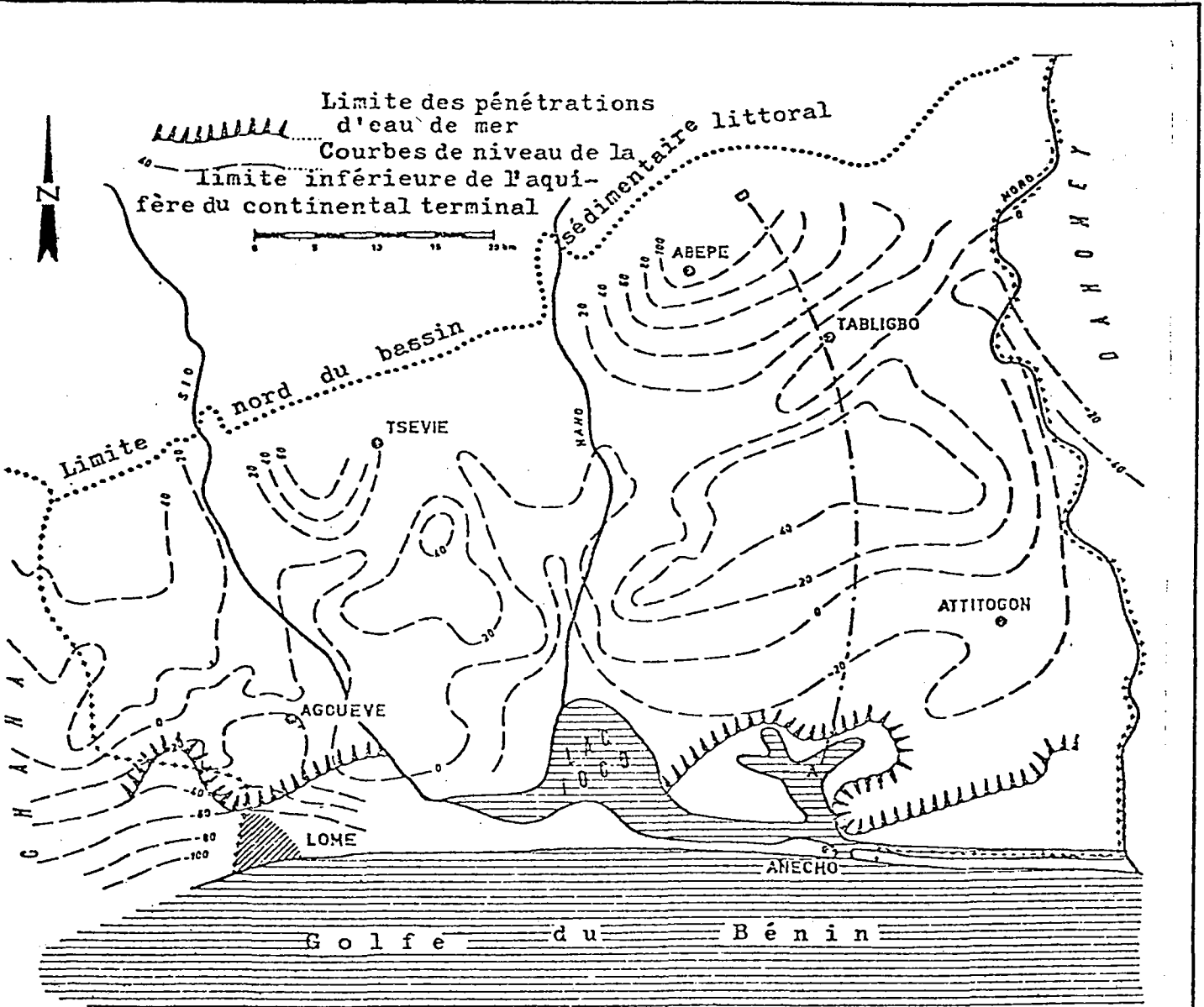


(Extrait du Document 56/00835)



FIGURE 50

PLAINES LITTORALES DU TOGO



(Extrait du Document G 5134/1)

D - INSTALLATIONS DE RECHARGE ARTIFICIELLE AYANT POUR OBJECTIF

L'ÉPURATION NATURELLE DES EAUX PAR PASSAGE DANS LE SOL

1) Liste des installations

(1) Bertrange, France	(G 2264 bis)
(2) Blagnac, France	(G 2264 bis)
(3) Dangé - St Romain, France	(G 2264 bis)
(4) Ginasservis, France	(56/05250)
(5) Nancy, France	(F 2028)
(6) Croissy, France	(G 5134/1, G 3663)
(7) Karlskoga, Suède	(G 5134/1, F 2028)
(8) Göteborg, Suède	(G 5134/1, F 2028)
(9) Port Leucate, France	(G 7221)
(10) Boulder, U.S.A.	(G 1681/519)

2) Le tableau ci-dessous donne la répartition des installations précédentes suivant le climat et le niveau de développement des pays concernés.

CLIMAT \ NIVEAU DE DEVELOPPEM.	INDUSTRIALISE	EN VOIE DE DEVELOPPEMENT
TEMPERE	(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) Tableaux 20 et 20 bis	
CONTINENTAL	(9) Tableau 21	
MEDITERRANEEN		
SEMI-ARIDE	(10) Tableau 22	
ARIDE		
TROPICAL		

N.B. : Toutes les installations répertoriées ont été construites dans des pays industrialisés. Ceci montre bien que face, d'une part, à l'augmentation des besoins en eau et face, d'autre part, à l'importance de la quantité d'eaux usées rejetées, l'alimentation artificielle apparaît comme étant un moyen de gestion bien approprié.

3) Les tableaux 20 à 22 donnent pour chaque cas particulier de climat et de niveau de développement quelques caractéristiques des installations correspondantes.

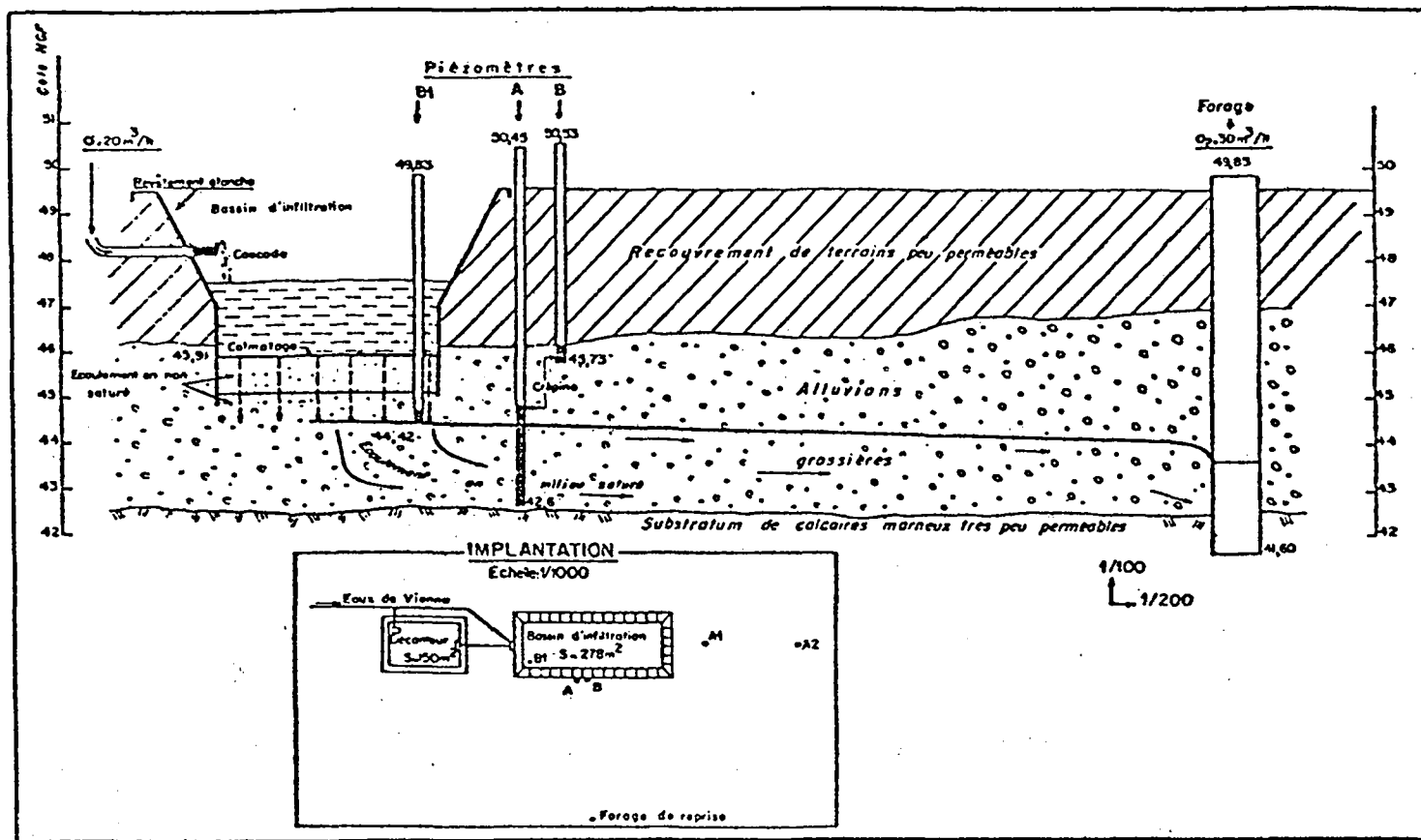
TABLEAU 20 : INSTALLATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TEMPERE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
France	Bertrange	R	Alluvions grossières (sables et graviers)		Bassins à sable (voir fig.51)	P.B	Pré	800 m <sup>3</sup> /jour environ	
France	Blagnac	R	Alluvions grossières (sables et graviers)		Bassins à sable (voir fig.51)	P.B	Pré	800 m <sup>3</sup> /jour environ	
France	Dangé Saint Romain	R	Alluvions grossières (sables et graviers)		Bassins à sable (voir fig.51)	P.B	Pré	800 m <sup>3</sup> /jour environ	
France	Ginasservis (Var)	U	?		Lagune (voir fig.52)	P.B	3	50 m <sup>3</sup> /heure	
France	Nancy	R	Alluvions		Bassins (voir fig.53)	P	Pré	100.000 m <sup>3</sup> /j	
France	Croissy (voir fig. 54)	R	Craie fissurée sous alluvions (voir fig.54)		Bassins (voir fig.55)	P.B	1	30.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	de revient 0,06\$ par m <sup>3</sup>
Suède	Karlskogo (voir fig. 56)	R	Alluvions (sables et graviers) (voir fig. 56)	≈ 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Bassins à sable (voir fig.56)		1	15.000 m <sup>3</sup> /jour	

Notations :

R = eaux de rivière  
 U = eaux usées  
 P = colmatage physique  
 B = colmatage biologique  
 Pré = prétraitement des eaux  
 1 = traitement primaire  
 3 = traitement tertiaire

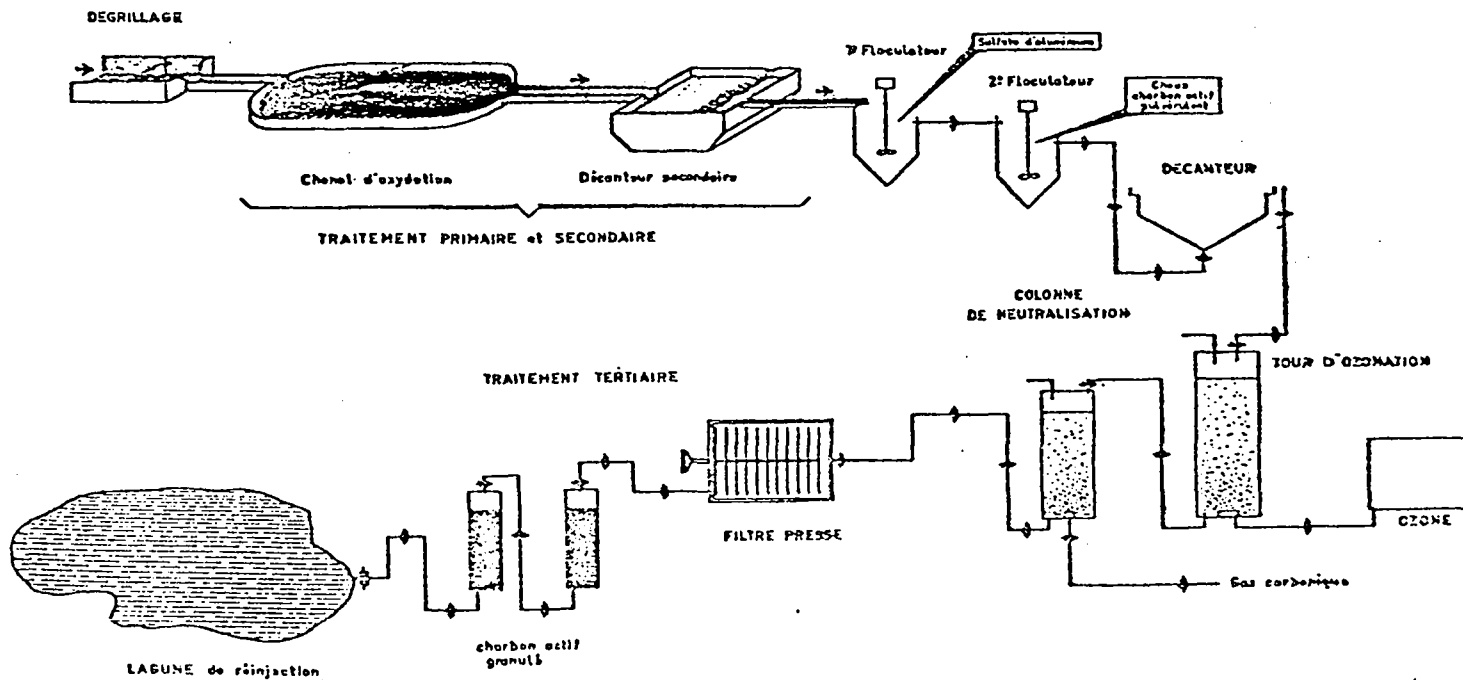
FIGURE 51



(Extrait du Document G 2264 bis)

### Traitement d'épuration des eaux usées urbaines en vue de leur recyclage pour la consommation

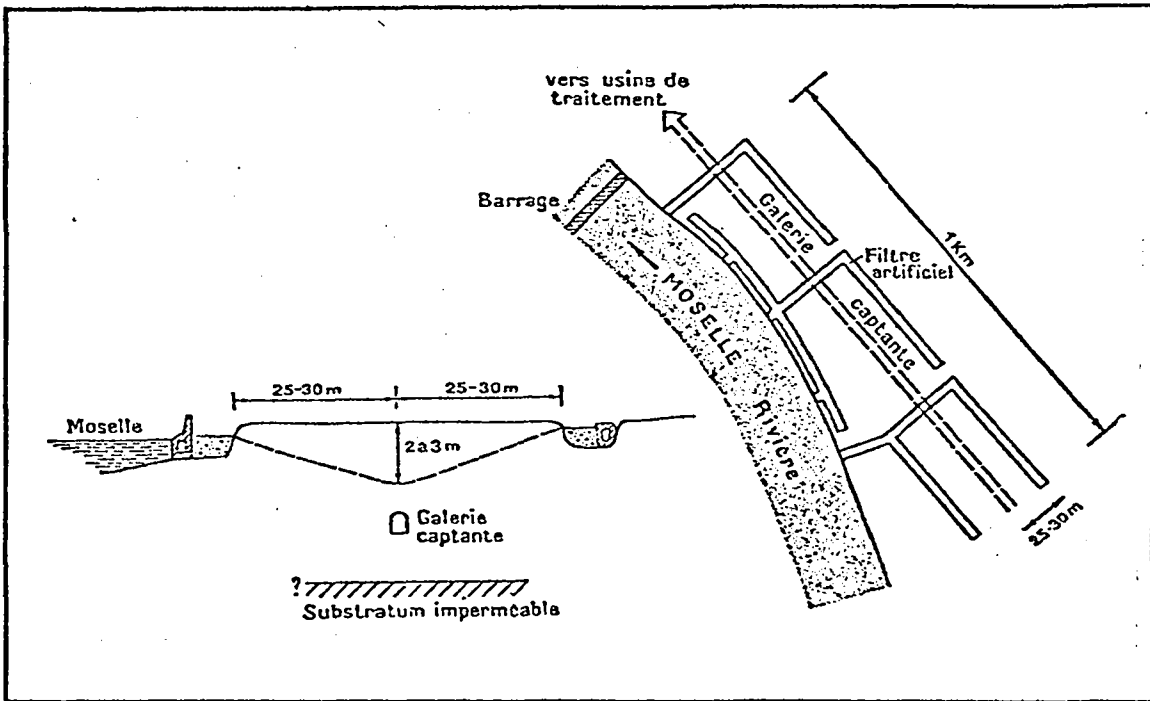
FIG. 52: Schema de principe de l'installation pilote de GINASSERVIS



(Extrait du Document 56/05250)

FIGURE 53

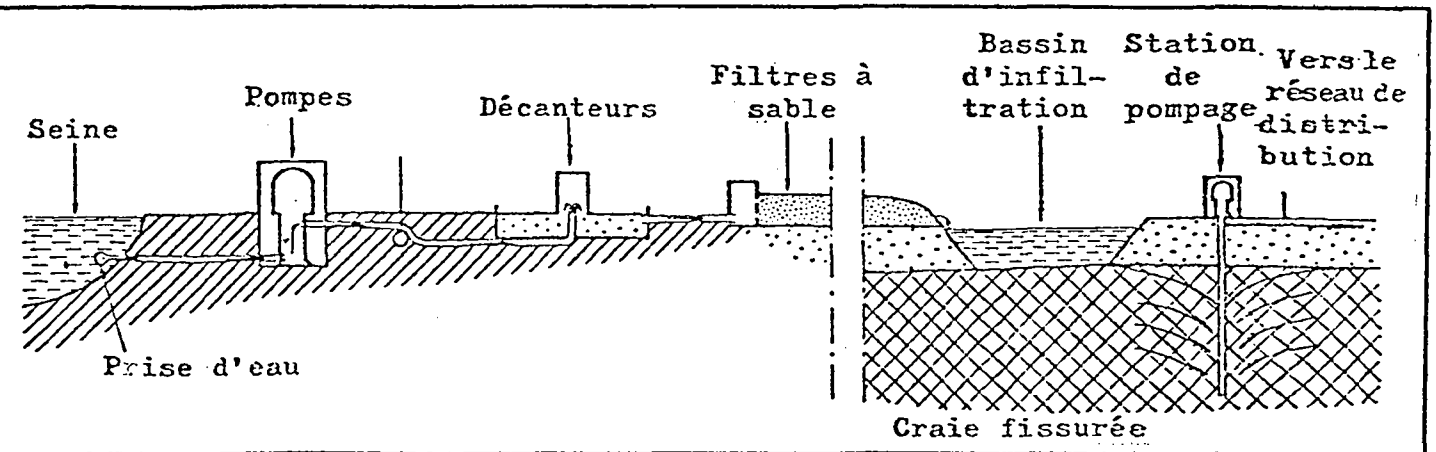
SCHEMAS EN PLAN ET EN COUPE DE L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE LA NAPPE  
DE LA MOSELLE A MESSEIN (NANCY)



*(Extrait du Document F 2028)*

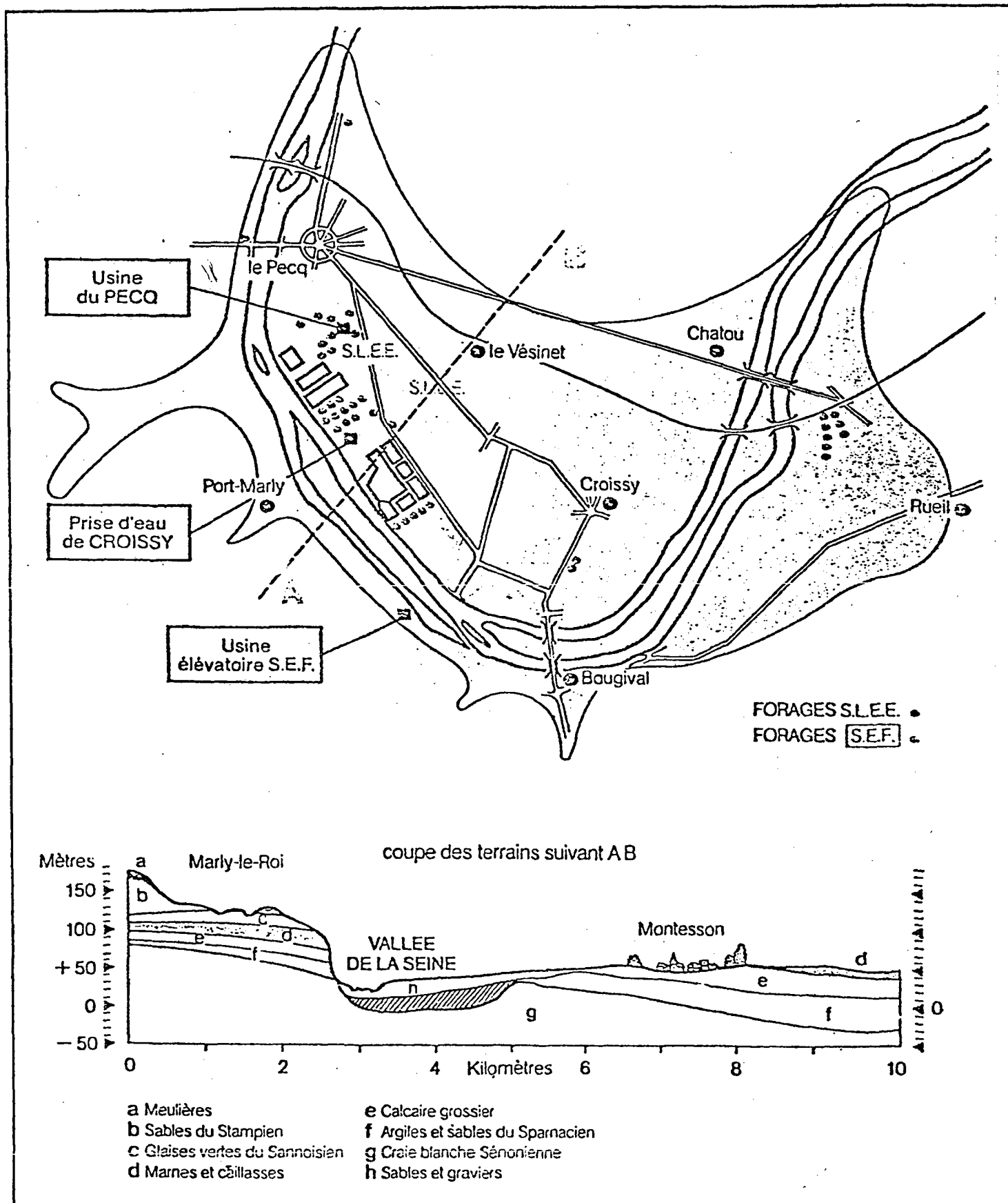
FIGURE 54

NAPPE SOUTERRAINE DE LA VALLEE DE LA SEINE A CROISSY (FRANCE)



*(Extrait du Document G 5134/1)*

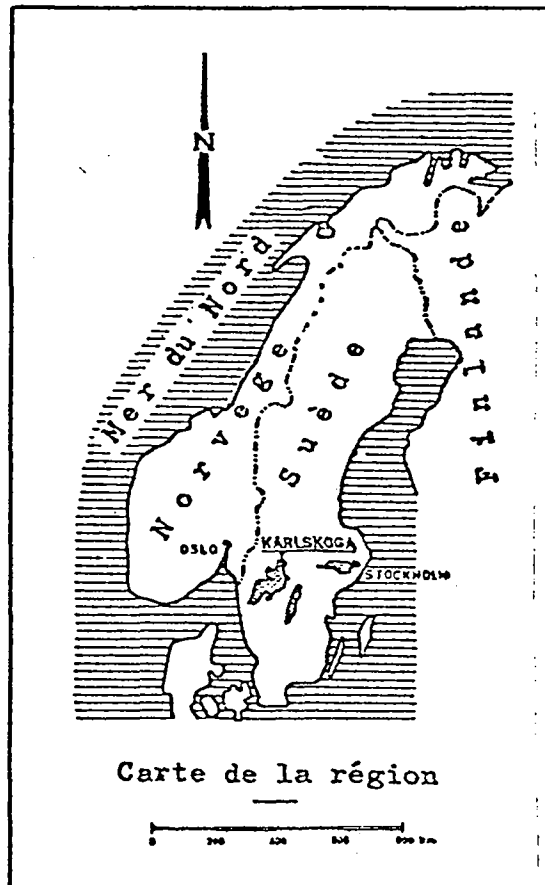
FIGURE 55



(Extrait du Document G 3663)

.../...

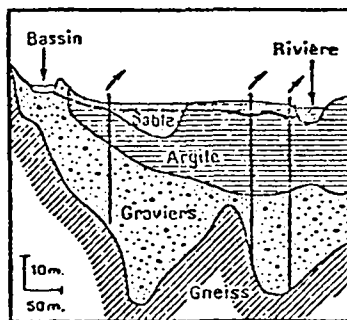
RESERVOIR D'EAU SOUTERRAINE DE KARLSKOGA, SUEDE



*(Extrait du Document G 5134/1)*

FIGURE 56

SCHEMA DE L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE A KARLSKOGA



*(Extrait du Document F 2028)*

.../...

TABEAU 20 BIS : INSTALLATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT TEMPERE

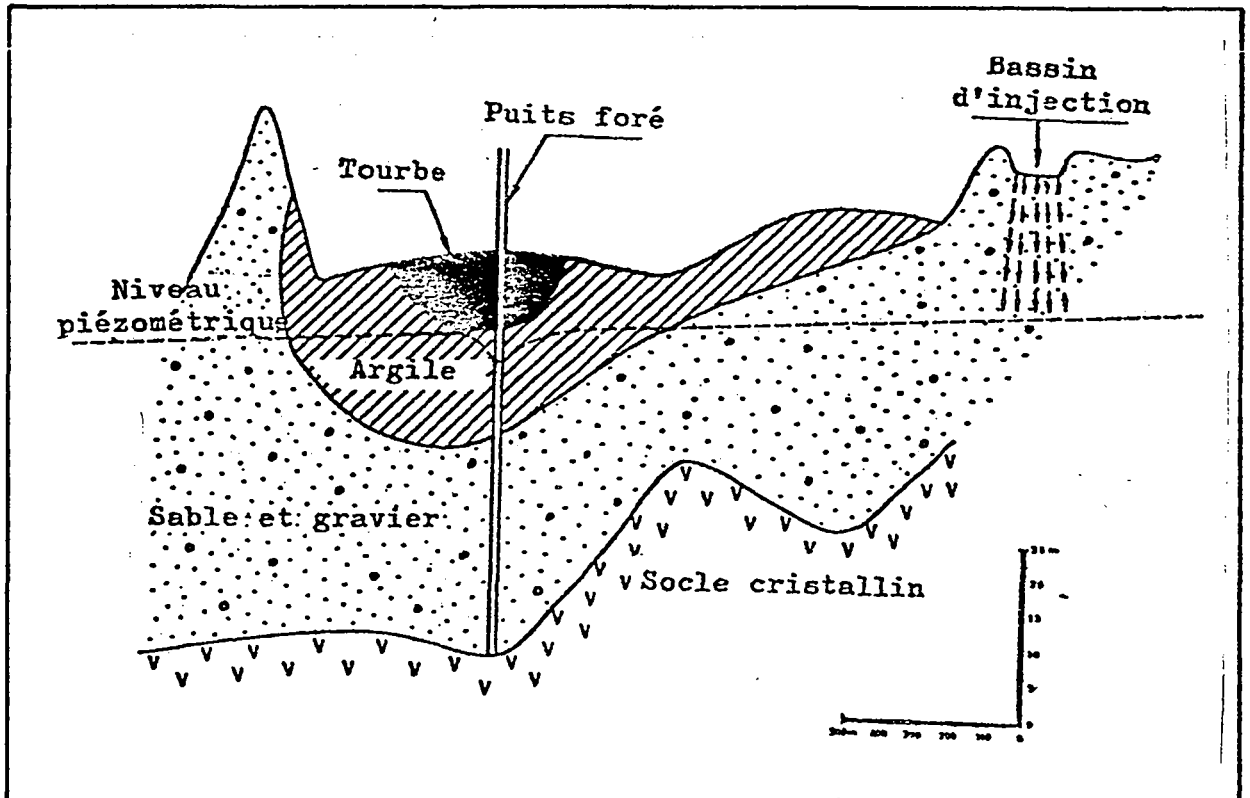
PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PF
Suède	Göteborg	R	Alluvions (sables et graviers) (voir fig. 57)		Bassins (voir fig. 57)		1	12.000 m3/jour	

Notations :

- R = eaux de rivière
- 1 = traitement primaire

FIGURE 57

SCHEMA DE L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE A GOTEBOURG



(Extrait du Document G 5134/1)

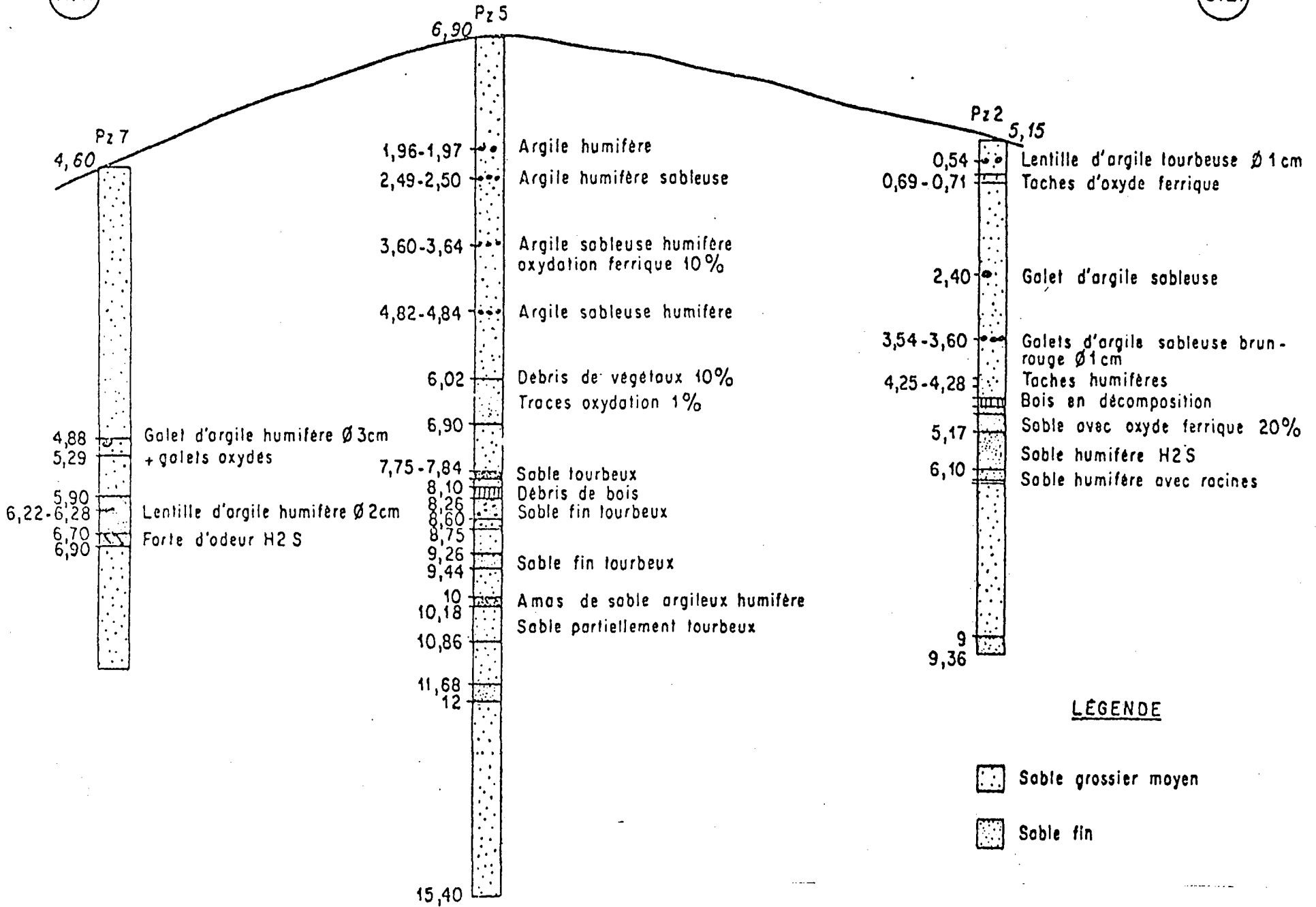
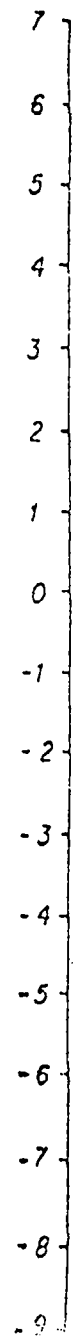


Echelle horizontale: 1/500



Cote NGF

(N.W)

(S.E)



LÉGENDE

-  Sable grossier moyen
-  Sable fin

ETANG DE LEUCATE

FIGURE 59 : PORT LEUCATE

PLAN DE SITUATION DE LA DUNE DE LA CORREGE

Echelle : ~1/15 000

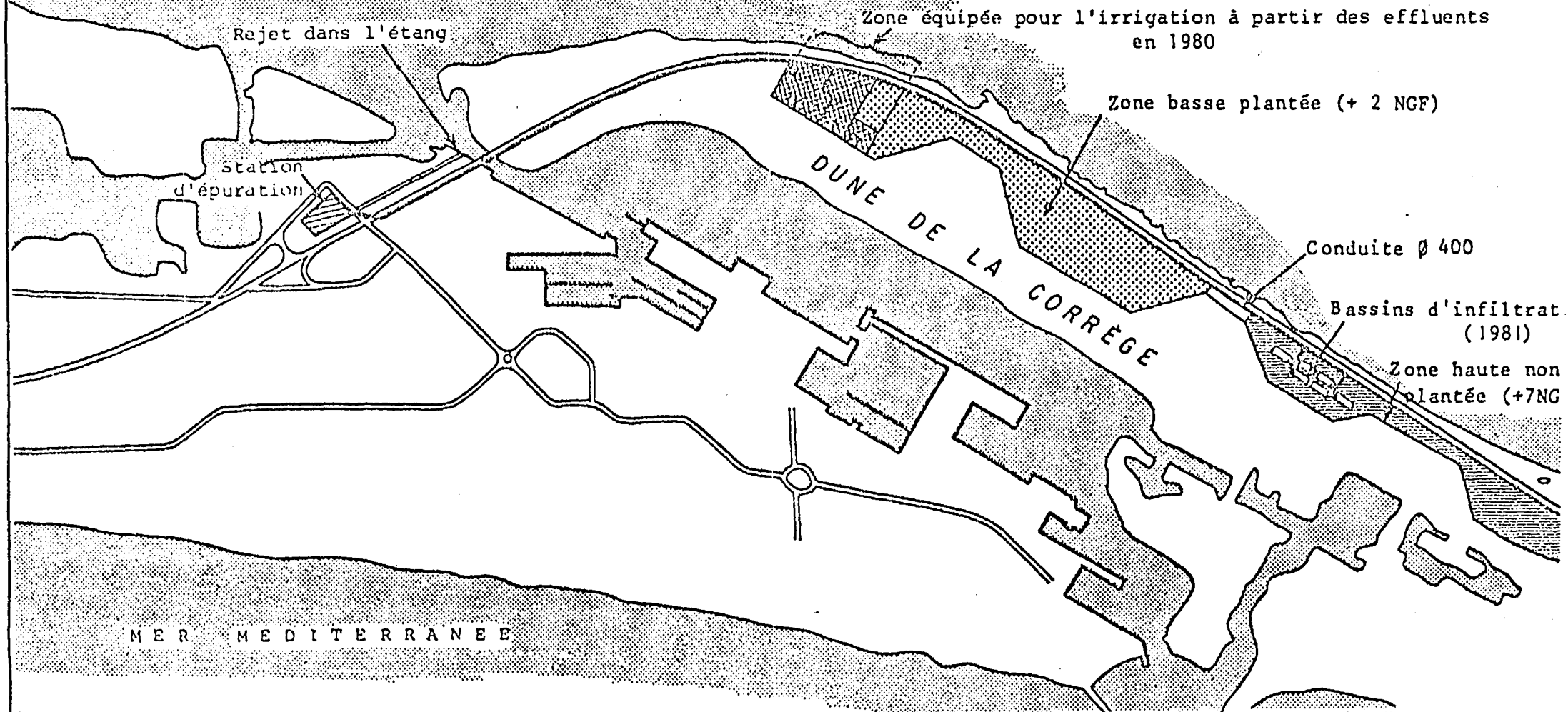
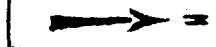


TABLEAU 21 : INSTALLATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT MEDITERRANEEN

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
France	Port Leucate	U	Dunes côtières (voir fig. 58)		Bassins d'in- filtration (voir fig. 59)	P.B	Pré	1.500 m <sup>3</sup> /jour	

Notations :

U = eaux usées  
P = colmatage physique  
B = colmatage biologique  
Pré = prétraitement des eaux

TABLEAU 22 : INSTALLATIONS EN PAYS INDUSTRIALISES A CLIMAT SEMI-ARIDE

PAYS	LOCALISATION	EAU	GEOLOGIE	VOL. AQUI.	DISPOSITIFS	COLMA.	TRAIT.	PERFORMANCES	PRIX
U.S.A.	Boulder (Colorado)	U	Alluvions (sables et graviers)		Bassins d'in- filtration	P.B	2 (fig.60)	entre 50.000 et 200.000 m <sup>3</sup> /an	

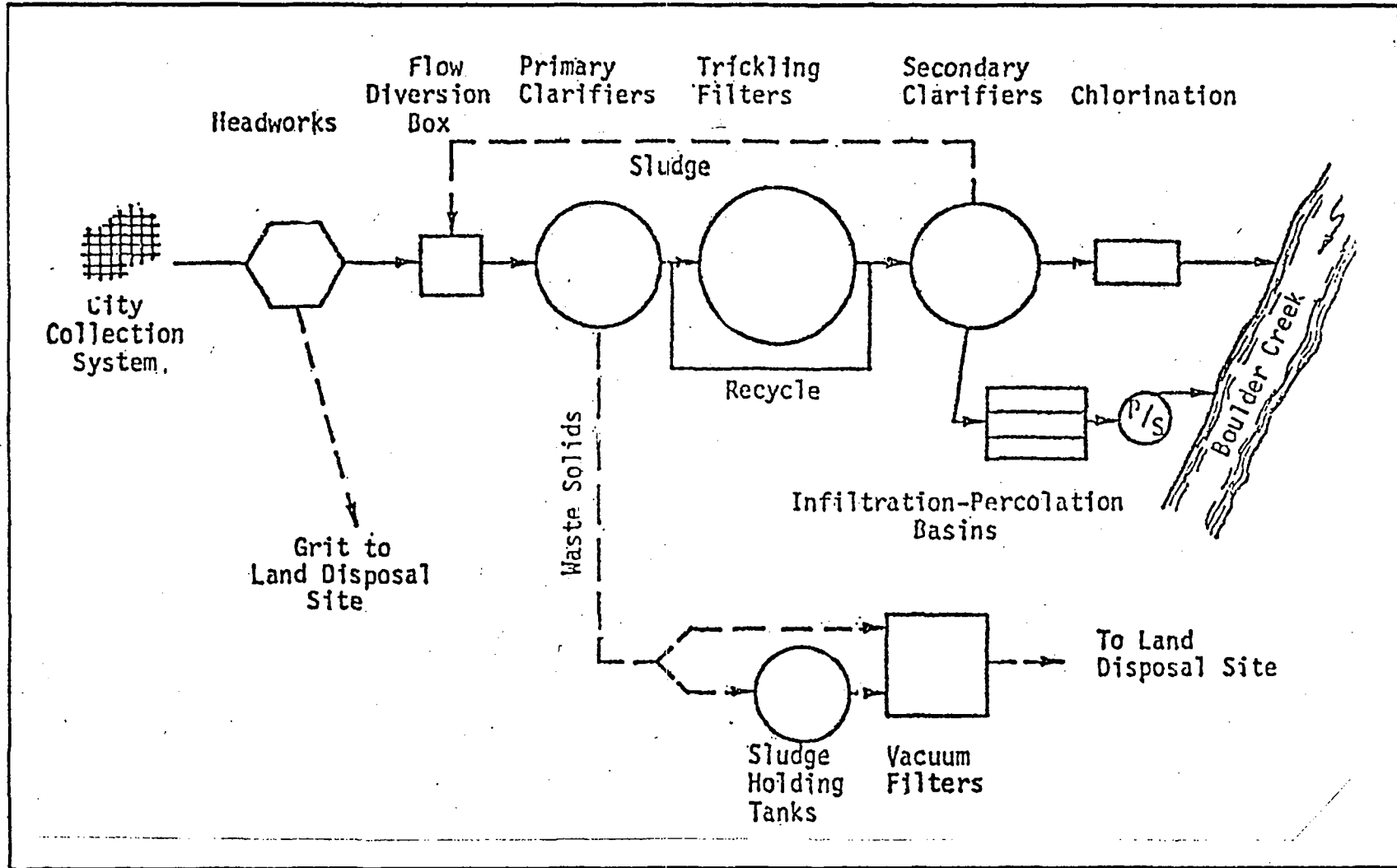
Notations :

U = eaux usées  
P = colmatage physique  
B = colmatage biologique  
2 = traitement secondaire

.../...

FIGURE 60

SCHEMATIC OF BOULDER WASTEWATER TREATMENT PLANT



(Extrait du Document G 1681/519)

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- F 2028 BIZE J., BOURGUET L., LEMOINE J.  
"L'alimentation artificielle des nappes souterraines"  
Ed. Masson et Cie, 1972, 199 pages
- F 3091 FALKENMARK M., LINDH G.  
"Water for a starving world"  
Westview Press Boulder, Colorado, Fév. 1977, 204 pages
- F 4033/2 X ...  
"Proceedings of the groundwater recharge conference - 1980"  
Australian Water Resources Council Conference, Series n° 3, 281 pages
- F 4443 MATHEW K., NEWMAN P.W.G., HO G.E.  
"Groundwater recharge with secondary sewage effluent"  
Australian Water Resources Council, 1982, 167 pages
- F 4452/1 à 4 X ...  
"Artificial groundwater recharge"  
International Symposium - Research results and practical applic.  
Dortmund 1979, Publication 1982, 1500 pages environ
- F 4462 HUISMAN L., OLSTHOORN T.N.  
"Artificial groundwater recharge"  
Pitman Advanced Pub. Program Ed., 1983, 320 pages
- G 1681/519 SMITH D.G., LINSTEDT K.D., BENNETT E.R.  
"Treatment of secondary effluent by infiltration-percolation"  
EPA-600/2-79/174, Août 1979, 103 pages
- G 1787/4 KOCH E., GIAIMO A.A., SULAM D.J.  
"Design and operation of the artificial-recharge plant at  
Bay Park, New York"  
U.S. Dept. of the Interior, Geol. Survey, 1973, 14 pages
- G 2264 Bis X ...  
"La mécanique des fluides et l'environnement - Prévision et  
maîtrise de la qualité de l'eau et de l'air"  
Société Hydrotechnique de France, 14èmes Journées de  
l'Hydraulique, Paris, Sept. 1976, Question 4 : les eaux  
souterraines, 48 pages
- G 3663 X ...  
"Plaquette de présentation de l'installation de recharge  
artificielle de Croissy"  
S.L.E.E., s.d., 16 pages
- G 5134/1 X ...  
"Emmagasinement souterrain des eaux et recharge artificielle"  
Ressources Naturelles/Série Eau, ONU, n°2, 1977, 307 pages

- G 6094 X ...  
"World climate conference"  
Organisation Météorologique Mondiale, Conférence, Février 1977,  
Genève, 791 pages
- G 6212 X ...  
"Wastewater reuse for groundwater recharge"  
Symposium Office of Wat. Recycling, Californie, 1980, 345 pages
- G 6230 X ...  
"Possibilités d'épandage des eaux usées urbaines"  
Rapport Agence R.M.C., 1979, 371 pages
- G 7221 X ...  
"L'aménagement d'infiltration des eaux usées de Port-Leucate"  
Société d'Economie Mixte d'Equip. et d'Aménag. de l'Aude,  
Nov. 1981, 45 pages
- 56/03546 COFER J.R.  
"Orange county water district's Water Factory 21"  
Journ. of the Irrigation and Drainage Div., Déc. 1972, p. 553-567
- 56/05250 ALEXANDRE D.  
"De l'eau potable à partir des eaux usées urbaines"  
Nuisances et Environnement, Oct. 1973, p. 368-374
- 66/00101 MAHI LARAKI M.  
"Réalimentation artificielle de la nappe aquifère de Charf-el-Akab"  
TSM L'Eau, Août-Sept. 1970, p. 355-359
- 66/09067 JASINSKI B.  
"Captages d'eau d'infiltration du réseau de distribution de  
Wroclaw (Pologne)"  
TSM L'Eau, Février 1976, n° 2, p. 88-92
- 66/14931 BURAS O.K.  
"Wastewater reclamation in St Croix"  
J.W.P.C.F., 1977, 49, n° 3, p. 429-435
- 66/16816 BIANCHI W.C., NIGHTINGALE H.I., McCORMICK R.L.  
"A case history to evaluate the performance of Water-Spreading  
projects"  
J.A.W.W.A., Mars 1978, p. 176-180
- 66/18945 CARSAT G.  
"Quelques équipements publics de Genève"  
Equip. Eur., 1978, 2, n° 98, p. 59-67
- 66/22466 EDWORTHY K.J.  
"Artificial groundwater recharge and its relevance in Britain"  
JIWES, 1979, 33, n° 2, p. 151-172
- 66/27873 MARTIN F., THEBAULT P.  
"La flottation à l'usine de Moulle"  
Techniques Eau Ass., 1981, n° 409, p. 37-42
- 66/28231 X ...  
"Water for human needs"  
Ass. Int. Ress. en Eau, Vol. 3, 1975, 413 pages

BARTOLOMEW J.C.

"World Atlas"

Edinburgh, John Bartholomew and Son, 1974, 167 pages

MARTIN A., MOUSSU H.

"Alimentation artificielle de la nappe de Sebikotane (Sénégal)  
par création d'une retenue d'eau"

Bull. B.R.G.M., 1968, n° 1, p. 79-88

WILLIAMS D.E.

"The Dashte-Naz groundwater barrier and recharge project"  
Groundwater, Janvier-Février 1977,

---





CONCLUSION

---

La consommation croissante d'eau dans tous les pays conduit parfois à une surexploitation des ressources naturelles; le manque d'eau dans certains pays en développement et la pollution de l'eau dans les pays industrialisés ont fait que les gestionnaires de l'eau ont étudié toutes les possibilités de conserver l'eau quantitativement et qualitativement.

L'alimentation artificielle des nappes paraît être une solution judicieuse à ces problèmes de ressource en eau.

Tout au long de cette étude, on a mis en évidence les questions techniques et économiques :

- méthodes d'infiltration
- qualité de l'eau à injecter
- colmatage de la zone d'infiltration
- coût des travaux
- coût d'exploitation.

De nombreux exemples pris tant dans les pays développés que dans les pays du tiers monde, aussi bien en climat humide qu'en zone aride ou semi aride, ont permis de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de cette technique. Un bilan économique montre que dans de nombreux cas la réalimentation artificielle des nappes peut être considérée comme un dispositif efficace dans la gestion de l'eau d'un pays.

Cette synthèse montre aussi le soin qu'il faut apporter aux études préalables pour ne pas se heurter à de graves problèmes en cours d'exploitation.

Un autre enseignement tiré de la lecture des documents est le fait que chaque cas est unique, l'étude d'exemples similaires est évidemment importante mais elle ne résoud pas tous les problèmes. Il faut en particulier une étude hydrogéologique sérieuse de la zone.

L'action épuratrice des sols améliore grandement la qualité de l'eau, mais ce n'est pas une sécurité suffisante et, dans le cas de l'utilisation d'une eau infiltrée pour la consommation animale ou humaine, il est nécessaire de procéder à des contrôles et éventuellement à des traitements.

La réalimentation des nappes permet l'augmentation de la quantité d'eau disponible et en améliore souvent la qualité; c'est donc un procédé intéressant pour les zones arides et semi arides car l'évaporation intervient moins que pour un réservoir d'eau à ciel ouvert. Il est aussi avantageux pour les pays développés puisqu'il permet de développer la ressource en eau tout en assurant une certaine épuration des eaux brutes ou usées que l'on infiltre.

---