BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

EXPLOITATION THERMIQUE DES AQUIFÈRES PEU PROFONDS

MANUEL DE PRÉPARATION DES PRÉ-ÉTUDES DE FAISABILITÉ TECHNIQUE

B.R.G.M.
10 OCT 1982
BIBLIOTHEQUE

Sous-Direction ÉNERGIE
Mission Hydrogéologie Energétique

Sous-Direction AMÉNAGEMENT
Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

82 SGN 023 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

EXPLOITATION THERMIQUE DES AQUIFÈRES PEU PROFONDS

MANUEL DE PRÉPARATION DES PRÉ-ÉTUDES DE FAISABILITÉ TECHNIQUE

par

J.Y. AUSSEUR et J.P. SAUTY

B.R.G.M.
18.OCT.1982
BIBLIOTHÈQUE

Sous-Direction ÉNERGIE
Mission Hydrogéologie Energétique
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex
Tél.: (38) 63.80.01

Sous-Direction AMÉNAGEMENT
Département EAU
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex
Tél.: (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

82 SGN 023 EAU

Août 1982

Réalisation : Département des Arts Graphiques

R E S U M E

Les principaux dispositifs d'exploitation thermique des aquifères superficiels sont envisagés : exploitation directe des nappes à leur température naturelle par puits unique avec rejet dans les réseaux de surface, ou par doublet de type géothermique ; ou bien exploitation avec recharge thermique artificielle : stockage de chaleur par puits unique, exploitations par doublet à balayage ou bien par doublet à puits chaud et puits froid.

Les calculs du fonctionnement thermique en subsurface ont été simplifiés au maximum par la présentation de formules ou d'abaques d'utilisation aisée, adaptés à chaque mode de fonctionnement. Ceux-ci permettent une première évaluation des avant-projets et la détection rapide de ceux qui sont susceptibles de satisfaire aux critères de faisabilité compte-tenu des conditions géologiques, des ressources et des besoins locaux.

Enfin le problème de la faisabilité économique est abordé, ainsi que l'examen des différentes étapes qu'il est souhaitable d'aborder avant de passer à la conception fine du projet définitif. De plus, une annexe a été jointe qui présente l'application à neuf cas types d'exploitation d'aquifères superficiels par doublets de forage.

Ce travail a été réalisé partiellement dans le cadre d'une étude confiée par l'Institut d'Aménagement et de l'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France, et partiellement dans celui des travaux méthodologiques du Service Géologique National dans le domaine de l'Hydrogéologie Energétique.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION AUX DIFFERENTS SYSTEMES D'EXPLOITATION THERMIQUE DES AQUIFERES 1
1.1. Généralités 1
1.2. Géothermie très basse énergie 1
1.3. Stockage de chaleur sensible 2
1.4. Avantage de l'exploitation thermique des aquifères 2
1.5. Systèmes envisages 3

2. LE DISPOSITIF A PUITS UNIQUE 8
2.1. Le puits unique sans stockage 8
2.1.1. Rabattements induits 8
2.1.2. Nappes superficielles 9
2.1.3. Nappes plus profondes 10
2.2. Stockage par puits unique 11
2.2.1. Injectabilité 11
2.2.2. Alimentation en eau 13
2.2.3. Pertes thermiques par diffusion 14
2.2.4. Pertes thermiques dues à l'écoulement de la nappe 16
2.2.5. Influences conjuguées de la diffusion et de l'écoulement 18

3. POMPES A CHALEUR SUR DOUBLET EN NAPPE SUPERFICIELLE (GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE) 20
3.1. Notations adoptées 23
3.1.1. Influence de captages voisins 24
3.1.2. Exemple de calcul d'un début fictif continu 24
3.2. Ecoulement de nappe négligeable ($V_D \neq 0$) 25
3.2.1. Détermination du temps de percée 25
3.2.2. Evolution thermique au puits de production 26
3.2.3. Exemple de doublet sur une nappe sans écoulement régional 29

3.3. Ecoulement de nappe non négligeable ($V_D \neq 0$) 30
3.3.1. Détermination du temps de percée 32
3.3.2. Calcul du taux de recyclage 32
3.3.3. Variation thermique au puits de production 34
3.3.4. Exemple de doublet sur une nappe soumise à un écoulement régional 36

4. LE SYSTEME DU DOUBLET A BALAYAGE 38
4.1. Principe du doublet à balayage 38
4.2. Ecoulement de nappe négligeable 42
4.2.1. Volume maximal, écartement minimal des puits 42
4.2.2. Température moyenne 42
4.2.3. Exemple de doublet à balayage sur une nappe sans écoulement régional 43
4.3. Ecoulement de nappe non négligeable ($V_D \neq 0$) 43
4.3.1. Volume maximal, écartement minimal des puits 43
4.3.2. Taux de recyclage 44
4.3.3. Exemple de doublet à balayage dans une nappe à écoulement régional 44

5. LE SYSTEME DU DOUBLET A PUITS CHAUD ET PUITS FROID 46
5.1. Principe du doublet à puits chaud et puits froid 46
5.2. Ecoulement de nappe négligeable ($V_D \# 0$) 49
5.2.1. Volume maximal, écartement minimal entre puits 49
5.2.2. Dimensions minimales 50
5.2.3. Evolution des températures en phase de production 50
5.3. Ecoulement de nappe non négligeable ($V_D \neq 0$) 52
5.3.1. Volume maximal, écartement minimal entre puits 52
5.3.2. Pertes thermiques dues à l'écoulement de la nappe 53
5.3.3. Influences conjuguées de la diffusion et de l'écoulement 56
5.4. Conditions pour la faisabilité d'un projet "puits chaud - puits froid" 56
5.5. Exemple de doublet à puits chaud et puits froid 57

6. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME D'EXPLOITATION 60
6.1. Rassemblement des données de base 60
6.1.1. Evaluation des besoins et ressources énergétiques 60
6.1.2. Caractéristiques du réservoir 60
6.1.3. Fiche de renseignements à fournir 61
6.1.4. Eléments économiques 61
6.2. Choix du système 63
6.2.1. Evaluation technique 63
6.2.2. Evaluation économique 66
6.3. Passage au projet définitif 67
6.3.1. Mesures à effectuer 67
6.3.2. Simulations thermiques 68
6.3.3. Optimisation économique 69

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	PAC sur nappe, puits unique : rejet en surface	6
Figure 1.2	PAC sur nappe, doublet : réinjection par second puits	6
Figure 1.3	Stockage par puits unique	6
Figure 1.4	Doublet à balayage	7
Figure 1.5	Doublet à puits chaud et puits froid	7
Figure 1.6	Stockage en nappe mobile entre parois étanches	8
Figure 2.1	Stockage par puits unique	12
Figure 2.2	Evolution des températures à la production d'un stockage par puits unique dans une nappe en écoulement	19
Figure 3.1	Exploitation d'énergie géothermique avec doublet	21
Figure 3.2	Doublet en l'absence d'écoulement régional	22
Figure 3.3	Vitesse locale de la nappe avant implantation du doublet	24
Figure 3.4	Evolution des températures au forage de production d'un doublet hydrothermique	28
Figure 3.5	Différents schémas d'écoulement, en fonction de : $Q_R = \frac{2Q}{hDV_D}$	31
Figure 3.6	Influence de l'écoulement régional sur t_p en fonction de Q_R et α	33

Figure 3.7	Taux de recyclage I en fonction de Q_R et α	35
Figure 4.1	Doublet à balayage - Température à la production en fonction du rapport (temps de percée / durée d'un cycle)	39
Figure 4.2	Doublet à balayage - Exemple de position des fronts thermiques après 2,5 cycles pour un temps de percée égal à 1,7 périodes	40
Figure 5.1	Principe du doublet "puits chaud - puits froid"	47
Figure 5.2	Evolution des températures à la production pour des cycles symétriques avec Pe = 10, Λ = 10	51
Figure 5.3	Distance minimale entre les puits, en fonction de V_D et de Q_R pour α = 180°	54
Figure 5.4	Distance minimale entre les puits, en fonction de V_D et Q_R pour α = 90°	55
Figure 5.5	Estimation des températures de l'eau extraite du puits chaud dans l'exemple de fonctionnement avec injection à température constante	59
Figure 6.1	Bordereau de renseignements techniques	62
Figure 6.2	Choix du système d'exploitation	64

TABLE DES SYMBOLES

Symbole	Signification	Dimensions (et unités)
D	Distance entre les forages d'un doublet	L (m)
d_R	Déplacement réduit d'un stock d'eau chaude $d_R = d_{th}/R_{th}$	0 (m)
d_{th}	Déplacement d'un front thermique en écoulement uniforme $d_{th} = (\gamma_F/\gamma_A)\ V_D\ t_i$	L (m)
E	Energie stockée	$ML^2\ T^{-2}$ (J)
e	Epaisseur de l'éponte supérieure (profondeur du toit de la nappe sous le sol)	L (m)
f_η	Facteur de réduction de l'efficacité thermique d'un stockage	0
$f(Q_R, \alpha)$	Facteur correctif du temps de percée d'un doublet en fonction de la vitesse d'écartement régional	0
h	Epaisseur de l'aquifère	L (m)
I	Taux de recyclage d'un doublet (fraction des eaux réinjectées qui parviennent au puits d'exhaure)	0
K	Perméabilité	$L\ T^{-1}$ (m/s)

P	Puissance de l'installation	$ML^2 T^{-3}$ (W)
Pe	Nombre de Péclet (flux convectif/flux conductif horizontal dans l'aquifère) .Puits unique $Pe = (\gamma_F/\lambda_A)\ (Q/2\pi h)$ .Doublet $Pe = (\gamma_F/\lambda_A)\ (Q\ /\pi h)$	0
Q	Débit (volumique) imposé dans un forage	$L^3\ T^{-1}$ (m3/s)
Q_R	Débit réduit (proportionnel au rapport : flux induit par un doublet sur flux résultant de l'écoulement régional) ; $Q_R = 2Q/(hDV_D)$	0
R_{th}	Rayon thermique d'un stockage axisymétrique $R_{th} = \sqrt{(\gamma_F/\gamma_A)\ (Qt/\pi h)}$	L (m)
r	Distance à l'axe de symétrie (coordonnées cylindriques)	L (m)
S	Coefficient d'emmagasinement	0
s	Rabattement	L (m)
T	Transmissivité : $T = Kh$	$L^2\ T^{-1}$ (m2/s)
t	Temps	T (m)
t_i	Durée de la phase d'injection	T (m)
t_p	Date de percée (recyclage thermique d'un doublet) : $t_p = (\pi/3)(\gamma_A/\gamma_F)(D^2h/Q)$	T (m)
t_R	Temps réduit : .Puits unique $t_R = t/t_i = (\gamma_F/\gamma_A)(Q/\pi R_{th}^2 h)t$ .Doublet $t_R = t/t_p = (3/\pi)(\gamma_F/\gamma_A)(Q/D^2h)t$	 0 0
V_D	Vitesse de Darcy induite par l'écoulement régional	$L\ T^{-1}$ (m/s)

V'_D	Vitesse de Darcy locale (écoulement régional + influence des forages voisins)	$L\ T^{-1}$ (m/s)
v	Volume d'eau	L^3 (m3)
v_C	Volume du stock chaud (doublet "puits chaud - puits froid")	L^3 (m3)
v_F	Volume du stock froid (doublet "puits chaud - puits froid")	L^3 (m3)
v_P	Volume d'eau exploité par un doublet au moment de la percée $v_P = (\pi/6)\ (\gamma_A/\gamma_F)\ D^2h$	L^3 (m3)
α	Angle entre la vitesse régionale de la nappe, et la droite joignant les deux puits d'un doublet	0
β_i	Angle que fait la droite joignant le centre du doublet au puits voisin P_i avec l'écoulement régional	0
γ_A	Capacité calorifique de l'aquifère	$M\ L^{-1}\ T^{-2}\ K^{-1}$ (J/m3, °C)
γ_E	Capacité calorifique des épontes	$M\ L^{-1}\ T^{-2}\ K^{-1}$ (J/m3, °C)
γ_F	Capacité calorifique de la phase fluide	$M\ L^{-1}\ T^{-2}\ K^{-1}$ (J/m3, °C)
$\Delta\theta$	Ecart de température exploité (θ eau pompée - θ eau injectée)	K (°C)
$\delta = d_R$ ε	Epaisseur réduite de l'éponte supérieure $\varepsilon = e/\sqrt{(\lambda_E/\gamma_E)t_i}$	0
θ	Température	K (°C)
θ_i	Température à l'injection	K (°C)

θ_R	Température réduite $\theta_R = (\theta-\theta_o)/(\theta_i-\theta_o)$	0
θ_S	Température de l'eau produite par un doublet en régime thermique stabilisé	K (°C)
θ_o	Température initiale du réservoir	K (°C)
Λ	Paramètre adimensionnel caractéristique des échanges réservoir-épontes .Puits unique $\Lambda = (\gamma_F\ \gamma_A/\lambda_E\ \gamma_E)(Qh/\pi R_{th}^2)$ $\Lambda = (\gamma_A^2/\lambda_E\ \gamma_E)(h^2/t_i)$ .Doublet $\Lambda = (\gamma_F\ \gamma_A/\lambda_E\ \gamma_E)(Qh/D^2)$	0
λ_A	Conductivité thermique de l'aquifère	$M\ L\ T^{-3}\ K^{-1}$ (W/m, s)
λ_E	Conductivité thermique des épontes	$M\ L\ T^{-3}\ K^{-1}$ (W/m, s)
ω	Porosité cinématique	0

1. INTRODUCTION AUX DIFFERENTS SYSTEMES D'EXPLOITATION THERMIQUE DES AQUIFERES

1.1. Généralités

Le présent document traite de l'exploitation de l'eau des nappes superficielles (entre 10 et 100 m de profondeur sous le sol), comme source froide ou chaude de pompes à chaleur (P.A.C.). Il est limité aux aspects d'ingénierie du réservoir : prévision de l'impact de l'installation sur les pressions et températures des eaux souterraines, interaction avec les ouvrages voisins éventuels et évolution des températures de l'eau extraite au puits de production.

L'accent est mis sur ce dernier point qui conditionne la durée de vie de l'installation. Son traitement synthétise les résultats de huit années de recherches et d'applications diverses, concrétisées par différentes publications référencées dans la bibliographie en annexe. Ces théories conçues et vérifiées pour l'exploitation des milieux poreux ne peuvent être appliquées aux milieux fissurés qu'avec précaution (en particulier, ces milieux doivent être finement divisés). Pour réaliser un document d'exploitation aisée, un certain nombre d'abaques ont été mis au point dans le cadre de la présente étude ; ils permettent une évaluation approchée mais rapide des avant-projets. Le passage à la définition du projet final est abordé au dernier chapitre.

1.2. Géothermie très basse énergie

Compte-tenu de la basse température des nappes superficielles (12-15°C), les calories destinées au chauffage sont extraites par PAC des eaux prélevées par un forage. Le même principe est appliqué en sens inverse pour la climatisation. A la sortie des échangeurs, l'eau est évacuée dans les réseaux de surface ou bien réinjectée dans l'aquifère d'origine à l'aide d'un second forage. Dans le premier cas, une dépression se propage dans l'aquifère et la ressource en eau, généralement de bonne qualité, est gaspillée ; dans le second, une perturbation thermique se développe autour du forage d'injection, et peut atteindre le puits d'exhaure.

1.3. Stockage de chaleur sensible

Lorsque la nappe exploitée n'est pas le siège d'un écoulement régional trop élevé, il est possible d'accroître l'écart thermique exploitable grâce à l'injection préalable d'eau chaude (ou froide, pour la climatisation), dans les périodes de production excédentaire. C'est ainsi que l'héliogéothermie, par stockage dans le sol des calories solaires permet le chauffage en périodes de faible ensoleillement. L'investissement plus élevé (dispositif de captation, d'injection, puis de reprise des calories), doit alors être amorti par une meilleure efficacité du chauffage. Le cas particulier d'une exploitation mixte pour le chauffage et la climatisation avec couplage de deux stocks chaud et froid, permet de rentabiliser au maximum l'installation.

1.4. Avantages de l'exploitation thermique des aquifères

Dans les deux cas (géothermie très basse énergie et stockage de chaleur), l'eau est utilisée comme fluide caloporteur. L'exploitation de l'énergie qu'elle contient sous forme de "chaleur sensible" (c'est-à-dire sans changement de phase, l'eau restant à l'état liquide), bénéficie de propriétés thermiques favorables :

- pour le transfert "rapide" de la chaleur entre le réservoir et la surface, grâce à la forte capacité calorifique de l'eau (transfert rapide par rapport aux échangeurs enterrés -tubes ou radiateurs- fonctionnant par conduction),
- par la stabilité naturelle de la température des eaux souterraines,
- la réinjection des eaux exploitées permet d'extraire l'ensemble des calories contenues dans la matrice solide et le liquide (et non pas seulement la chaleur de celui-ci).

Les conditions d'extraction sont aussi, généralement, bonnes :

- la faible profondeur de la ressource conduit à des investissements initiaux beaucoup plus légers que ceux de la géothermie classique,
- les perméabilités, généralements élevées dans les nappes superficielles, permettent l'extraction de l'eau avec des rabattements nettement plus faibles que pour les aquifères profonds.

*
* *

1.5. Systèmes envisagés

Parmi les différents modes d'exploitation thermique des eaux d'un aquifère, nous distinguerons les dispositifs suivants :

A. PRELEVEMENT PAR PUITS UNIQUE (Fig. 1.1). L'eau de la nappe prélevée à sa température naturelle, est rejetée dans un réseau de surface après extraction de ses calories (ou frigories). Le dispositif, particulièrement économique sous l'angle des investissements, peut se révéler très onéreux à l'exploitation du fait des taxations auxquelles sont fréquemment assujettis de tels rejets. Par ailleurs, il contribue à l'épuisement de la ressource en eau souterraine, si celle-ci est insuffisamment renouvellée.

B. DOUBLET DE FORAGES SANS REGENERATION, NI STOCKAGE (Fig. 1.2). L'eau est réinjectée dans un second forage, après exploitation de ses propriétés thermiques. Ceci n'est possible qu'en l'absence de recyclage important des eaux réinjectées jusqu'au puits de production :
- soit parce que les deux ouvrages sont suffisamment éloignés pour que le recyclage ne se produise qu'une fois l'installation rentabilisée (cas des forages géothermiques),
- soit parce que l'écoulement régional est assez puissant pour entraîner par advection les eaux froides (ou chaudes) réinjectées, hors de portée du puits de production.

C. STOCKAGE PAR PUITS UNIQUE (FIG. 1.3). Le niveau énergétique d'exploitation d'un forage en saison froide est amélioré par l'injection préalable d'eau chaude en période d'énergie excédentaire (calories solaires ou d'origine industrielle : par exemple, récupérées à partir d'usines d'incinération d'ordures). Le même principe est mis en oeuvre aux Etats-Unis pour stocker, dans un but de climatisation, les frigories provenant de la fonte des neiges.

D. DOUBLET A BALAYAGE (Fig. 1.4). En période d'énergie excédentaire, ou à bon marché, les forages du doublet sont mis en action, sans inversion des débits par rapport au fonctionnement pour le chauffage, mais l'eau pompée est alors réinjectée à une température supérieure à celle du prélèvement. Des ondes alternativement chaudes et froides balayent la nappe, au rythme de deux (une de chaque type) par cycle d'exploitation. Le mélange des eaux au puits de production (temps de transfert variables suivant les filets de courant), joint à l'inertie thermique du milieu, atténue très sensiblement les fluctuations de température, si bien que ce système peut difficilement être envisagé comme méthode de stockage. Par contre, il est parfaitement adapté au maintien d'une température moyenne dans le réservoir (régénération de son niveau énergétique) ; la ressource thermique est ainsi maintenue. Un doublet de ce type a été réalisé à Strasbourg, un autre a été projeté à Blois.

E. DOUBLET DE STOCKAGE A PUITS CHAUD ET PUITS FROID (Fig. 1.5). Une zone chaude et une zone froide sont respectivement constituées autour de chacun des deux ouvrages. Ceux-ci font alternativement l'objet d'injections et de pompages suivant les phases d'exploitation. La disjonction des deux stocks permet de mieux protéger leur contenu énergétique ; ce système est particulièrement adapté au stockage, si l'écoulement de la nappe est suffisamment faible. Le chauffage et la climatisation des bâtiments de l'intersyndicale C.G.T. à Montreuil-sous-Bois sont couplés par un stockage double en aquifère reposant sur ce principe.

D'une façon générale, les systèmes à doublet permettent d'éviter certains inconvénients majeurs inhérents aux systèmes de stockage par puits unique :

- l'alimentation en eau est assurée par l'eau du même aquifère ; seules des différences minimes de qualité physico-chimique peuvent apparaître comme conséquence des variations de température (risques de colmatage limités),
- l'évacuation des rejets en phase d'exploitation est également résolue,
- la ressource en eau est maintenue ; les écarts de pression sont immédiatement stabilisés et confinés au voisinage immédiat des ouvrages.

F. EXPLOITATION PAR PUITS MULTIPLES. Certaines installations nécessitant de gros débits peuvent faire appel à des batteries de forages de production et de réinjection. Si les sommes des débits pompés et injectés sont équilibrées, le principe de fonctionnement est similaire à celui des doublets (projet CEA-SNEA à Plaisir, pour lequel le stockage froid périphérique est en réalité tiède, dans le but de limiter les déperditions par conduction dans l'aquifère). L'exploitation d'une nappe par plusieurs puits d'extraction, mais sans réinjection est généralement désignée sous le vocable de dispositif à "puits uniques".

G. DISPOSITIFS PARTICULIERS. Quelques dispositifs particuliers, destinés à l'exploitation des nappes à fort écoulement, sont également à l'étude. Ils ne seront cités ici que pour mémoire.

* **Doublet vertical.** L'exploitation par PAC d'une nappe épaisse à faible perméabilité verticale, et siège d'un écoulement relativement puissant (cas de la nappe du Rhin à Strasbourg), autorise la mise en oeuvre de deux puits forés sur une même verticale, mais exploitant la nappe à des profondeurs différentes. Le doublet, d'emprise minimale, peut être mis en place à partir d'une cour d'immeuble.

* **Stockage entre parois étanches.** L'entraînement du stock par advection peut être évité par la création d'une enceinte étanche à l'aide de parois moulées. Ce dispositif actuellement à l'étude par le B.R.G.M. et SOLETANCHE devrait apporter une solution au stockage dans les aquifères affectés par des écoulements.

* **Exploitation par triplet.** Ce dispositif composé de trois forages alignés dans la direction de l'écoulement régional de la nappe, permet d'améliorer le chauffage par PAC, lorsqu'une recharge thermique est mise en oeuvre pour maintenir le potentiel énergétique de la nappe : l'eau est toujours extraite par le puits central, mais réinjectée par le forage aval en hiver (eau froide), par le forage amont en période d'injection de chaleur.

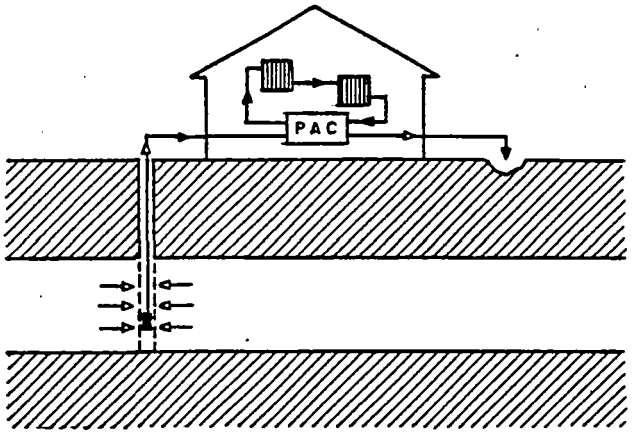


Fig.1-1. Pac sur nappe, puits unique, rejet en surface

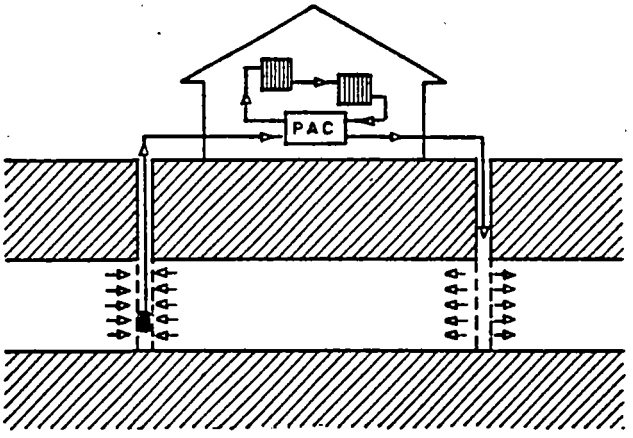


Fig.1-2. Pac sur nappe doublet; réinjection par second puits

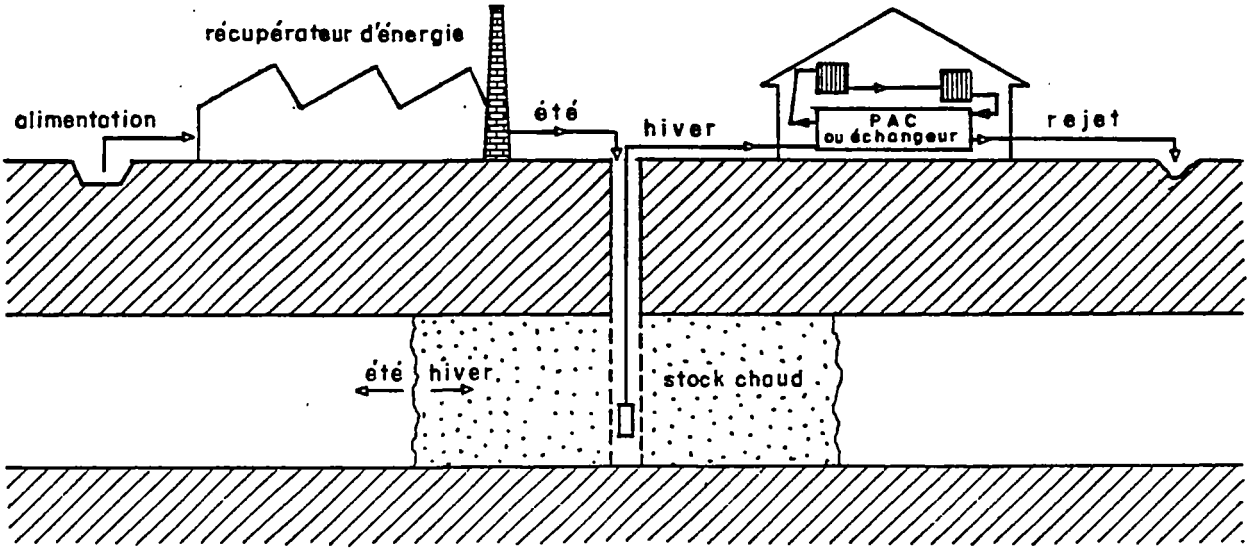


Fig.1-3. Stockage par puits unique

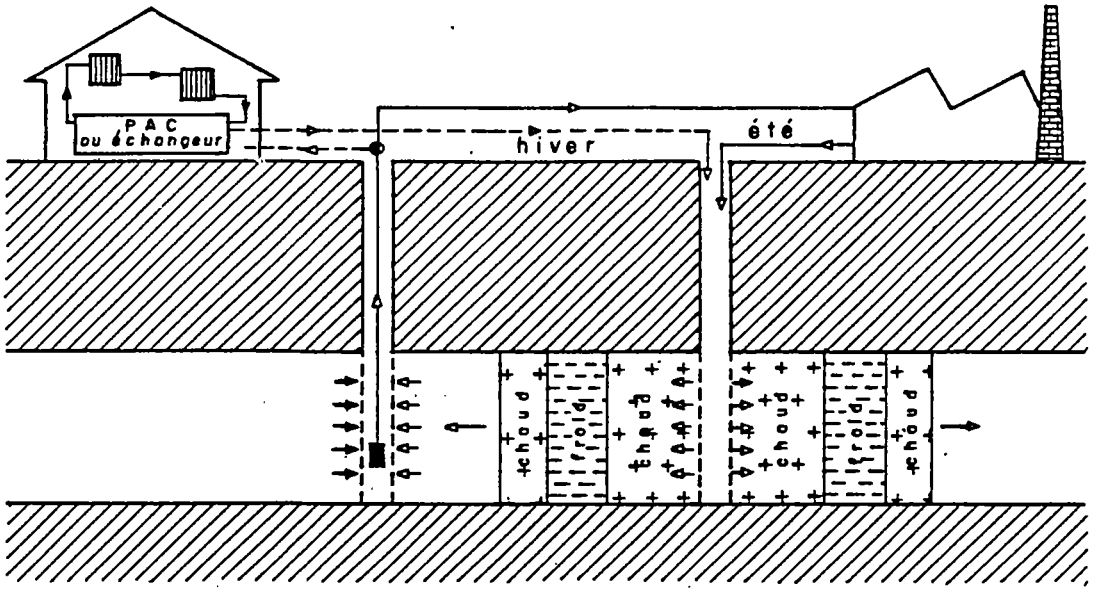


Fig. 1-4. Doublet à balayage

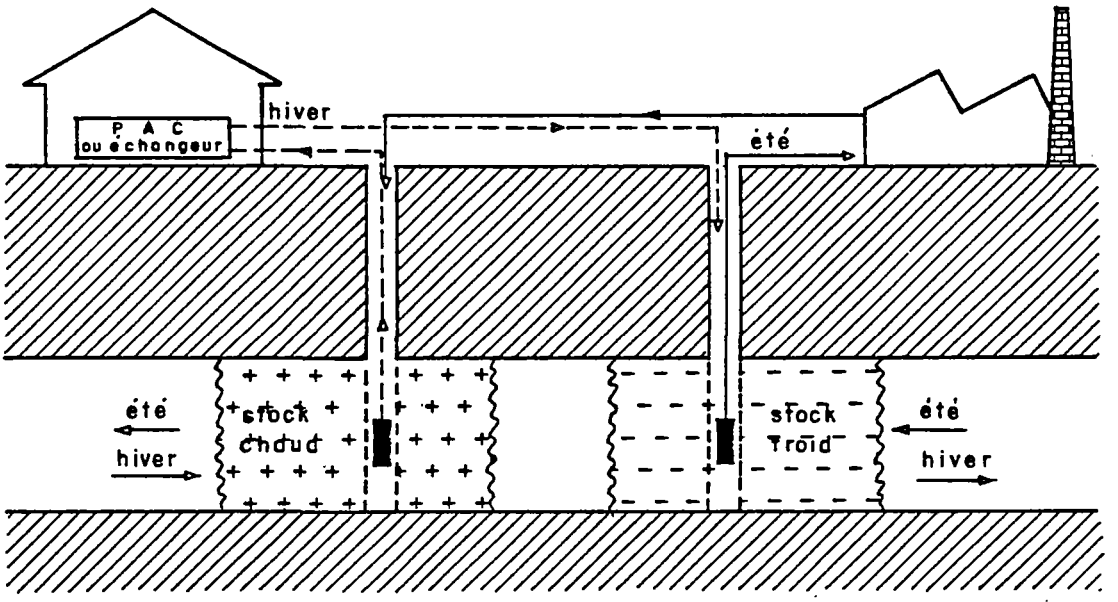


Fig. 1-5. Doublet à puits chaud et puits froid

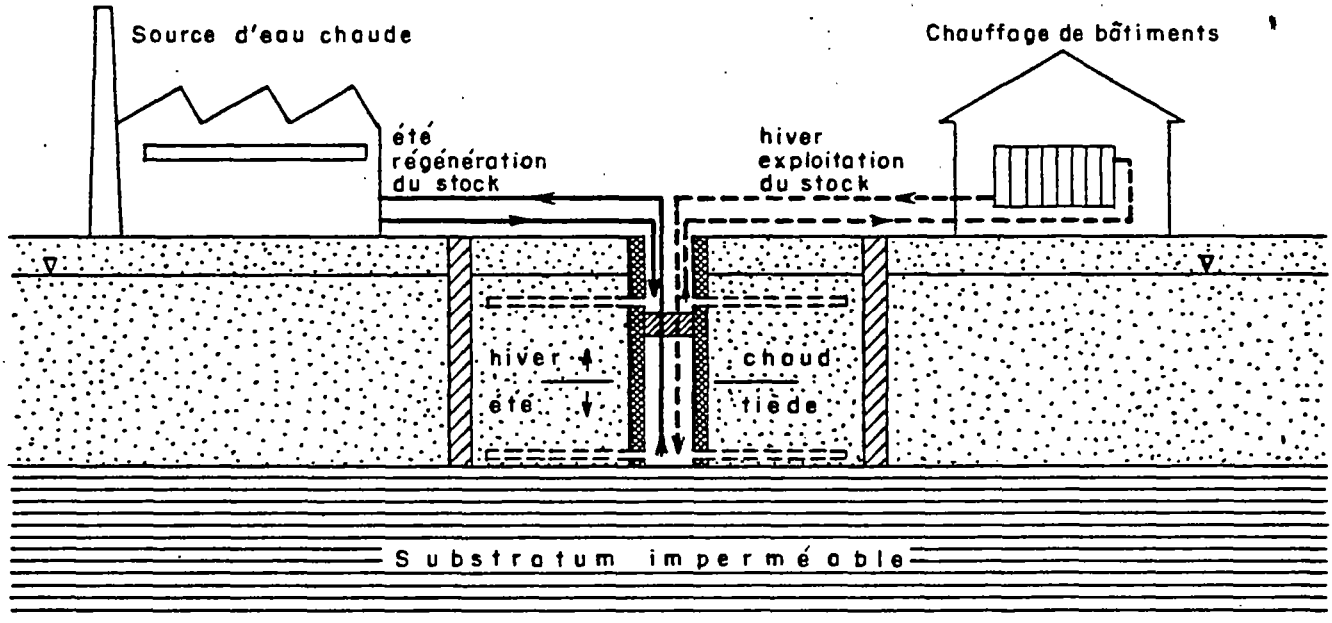


Figure 1.6 - Stockage en nappe mobile entre parois étanches

2. LE DISPOSITIF A PUITS UNIQUE.

Parmi les systèmes d'exploitation thermique des aquifères, le dispositif à puits unique (fig. 1.1) est le plus simple à réaliser puisqu'il nécessite la foration d'un seul ouvrage, exploité en pompage ou alternativement en injection puis repompage pour une opération de stockage (fig. 1.3). Ce choix peut être imposé par des raisons économiques pour des installations de petite importance (quelques m3/h). Sans réinjection, il n'est possible sur une longue période que si la réalimentation du réservoir ou ses réserves sont importantes.

2.1. Le puits unique sans stockage

Ce dispositif est mis en oeuvre pour utiliser l'eau de la nappe comme source chaude ou froide d'une pompe à chaleur. Les problèmes posés par un tel système sont :

- évacuation des eaux exploitées,
- baisse de la pression de l'eau souterraine,
- taxation par les agences financières de bassin du volume d'eau prélevé et éventuellement de son rejet dans un réseau de surface.

2.1.1. Rabattements induits

L'influence d'une exploitation sans recharge a été étudiée, depuis longtemps, par les pétroliers et les hydrogéologues. Elle se traduit par une formule, dite de Jacob, donnant le rabattement (chute de pression exprimée en mètres d'eau), en fonction des caractéristiques du réservoir, du débit et de la durée d'exploitation (cf. par exemple KRUSEMAN et al., 1973).

$$s = \frac{2{,}30\ Q}{4\pi K h} \log \left(\frac{2{,}25\ K h}{r^2 S}\ t \right) \qquad (2.1)$$

avec une erreur inférieure à 5 %, dès que : $\frac{r^2 S}{4Kht} < 1$

avec s rabattement en m,

Q débit fictif continu (c'est-à-dire débit constant équivalent) en m3/s

K perméabilité en m s^{-1}

h épaisseur en m

S coefficient d'emmagasinement, sans dimension

r distance considérée, en m

t durée de l'exploitation en secondes

log logarithme décimal.

N.B. * Il existe des formules plus précises, valables quelles que soient la distance et la durée de pompage, mais pour l'obtention d'un ordre de grandeur dans les présentes conditions, cette approximation logarithmique est nettement suffisante.

* En cas de superposition d'influence de plusieurs forages, les rabattements, évalués pour chacun par la formule (2.1), sont additifs.

2.1.2. Nappes superficielles

Les nappes superficielles sont généralement liées à des zones à potentiel peu influencé par les pompages dans la nappe (recharges par rivières, plans d'eau...) ; de plus, s'il s'agit de nappes libres -pour lesquelles le niveau piézométrique se trouve à l'intérieur de la zone perméable au contraire des nappes captives-, le coefficient d'emmagasinement est élevé (de l'ordre de 10^{-2} ou même 10^{-1}). On peut donc s'attendre à des rabattements modérés pour peu que la perméabilité ne soit pas trop faible.

A titre d'exemple, pour les valeurs suivantes des paramètres de l'aquifère : h = 10 m, K = 10^{-3} m s^{-1}, S = 10^{-1}, une exploitation à fort débit (120 m3 h^{-1}) crée les rabattements suivants :

	r = 1 m	r = 100 m	r = 1 km
t = 1 h	1,8		
t = 1 j	2,6		
t = 1 mois	3,5	1,1	
t = 1 an	4,2	1,7	0,5

TABLEAU I - Exemple de rabattement (m), en nappe superficielle.
T = 10^{-2} m2 S^{-1} ; S = 0,1 ; Q = 120 m3 h^{-1}

On retiendra l'ordre de grandeur de quelques mètres, voire de la dizaine de mètres pour les rabattements.

2.1.3. Nappes plus profondes.

Les nappes plus profondes sont généralement captives, avec des réalimentations lointaines (affleurements) ou diffuses, mais lentes (drainance). Il en résulte des rabattements beaucoup plus importants.

Si l'on prend les caractéristiques du réservoir du Dogger du Bassin Parisien (exploité pour la géothermie) : $K = 5.10^{-6}$ m/s, h = 50 m, $S = 5.10^{-5}$, l'ordre de grandeur du débit d'exploitation par doublet a été choisi de $Q = 120\ m^3/h = 3,3\ 10^{-2}\ m^3/s$; l'évolution des rabattements se comporte de la façon indiquée par le tableau suivant :

	r = 1 m	r = 100 m	r = 1 km	r = 10 km
t = 1 heure	111 m	15 m		
t = 1 jour	145 m	48 m		
t = 1 mois	180 m	84 m	35 m	
t = 1 an	206 m	110 m	61 m	13 m
t = 10 ans	230 m	134 m	86 m	37 m
t = 20 ans	238 m	141 m	93 m	44 m
t = 100 ans	255 m	158 m	110 m	61 m

TABLEAU II - Exemple de rabattements (m) en nappe profonde
$T = 2,5\ 10^{-4}\ m^2\ s^{-1}$; $S = 5.10^{-5}$; $Q = 120\ m^3\ h^{-1}$

L'influence d'un puits unique en nappe captive se mesure donc en dizaines de mètres ; elle dépasse même la centaine de mètres, si les conditions d'extraction autorisent de tels rabattements. L'influence est rapidement sensible à grande distance : chute de pression supérieure à 1 bar (rabattement de 10 m d'eau) à 10 km, dès la fin de la première année d'exploitation.

En l'absence de zone à potentiel fixe, après 20 années de fonctionnement (durée de vie normale pour un doublet géothermique), la chute de pression est, dans l'exemple cité, de l'ordre de 9 bars à 1 km, 4 bars à 10 km.

2.2. Stockage par puits unique

Dans les périodes où il est possible d'obtenir de l'eau chaude à bon marché, voire gratuitement, celle-ci est injectée par un forage dans le réservoir aquifère ; le même puits sert ultérieurement à la récupération de cette eau, en période de besoins élevés.

Ce mode d'exploitation rencontre les difficultés énumérées au paragraphe précédent :

- évacuation des eaux par un réseau de surface, après exploitation de leurs calories (ou frigories),
- rabattements en phase d'extraction ; à ceci près, que même dans une nappe non réalimentée, la ressource en eau sera globalement maintenue sur un cycle complet, si les volumes prélevés ne sont pas sensiblement supérieurs aux volumes injectés.

Cependant, d'autres problèmes viennent se greffer lorsque l'on veut opérer en "mode stockage" : risques de colmatage, alimentation en eau à injecter, pertes thermiques par diffusion et advection.

2.2.1. Injectabilité

En phase de charge du stock, le choix de l'origine de l'eau à injecter est assez délicat puisque celle-ci risque de réduire l'injectabilité du forage.

Le colmatage se traduit par une diminution de la perméabilité au voisinage immédiat de l'ouvrage, y inférant des pertes de charges importantes très localisées. Les causes en sont multiples, et liées à la qualité des eaux injectées :

- risque de dépôt des substances fines, lors de l'injection d'eaux limoneuses, par exemple ;
- précipitation de sels si ces eaux sont en déséquilibre chimique vis à vis du réservoir ;
- développement de bactéries, favorisé par des températures de l'ordre de 30°C à 40°C ;

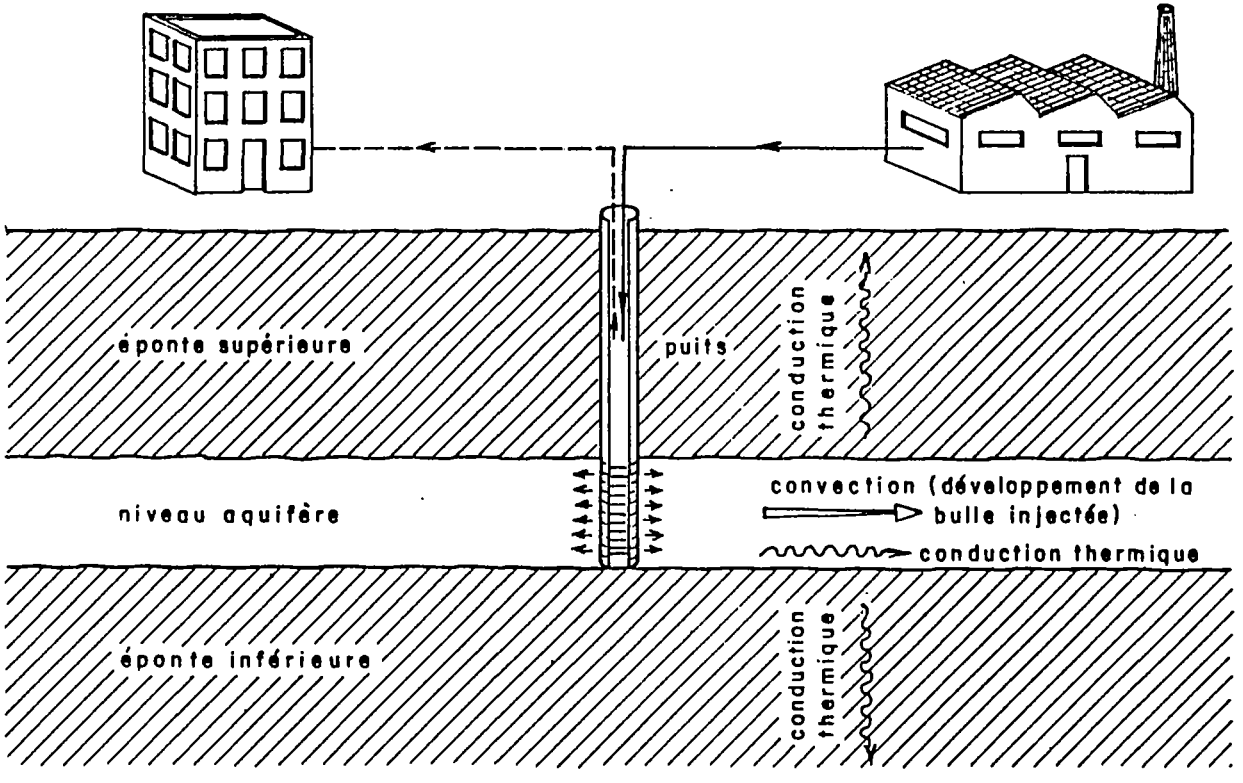


Figure 2.1 - Stockage par puits unique

- obturation de certains pores par désaturation d'air dissous, avec création d'un voile non saturé en eau, peu perméable.

Ce dernier phénomène est une explication plausible à une constatation ancienne, mais dont les causes ne sont pas encore totalement élucidées : il est courant d'être contraint d'appliquer des surcharges d'injection 3 fois supérieures aux rabattements nécessaires pour faire circuler un même débit en injection ou en pompage, par un ouvrage donné, même en l'absence de tout colmatage. Ce rapport peut atteindre un facteur 10 ou plus dans certains cas. L'exploitation d'une nappe libre peut toutefois limiter ce phénomène, car la surcharge locale entraîne une augmentation de la transmissivité (produit perméabilité x épaisseur en eau), par accroissement du second facteur ; au contraire, les rabattements en phase d'extraction ont tendance à dénoyer le réservoir au voisinage des puits, d'où une diminution locale et temporaire de la transmissivité.

Plusieurs dispositions peuvent être prises pour améliorer l'injectabilité de l'ouvrage :

- décolmatage par interruptions périodiques de l'injection avec inversion du débit de l'ouvrage pendant de courtes durées (back washing),
- réalisation de massifs filtrants largement dimensionnés autour de la zone crépinée,
- traitement des eaux avant injection.

2.2.2. Alimentation en eau.

La qualité de l'eau injectée doit donc être examinée avec soin, pour assurer la pérénnité de l'installation.

La solution idéale consiste à prélever l'eau à injecter par un second ouvrage crépiné dans le même aquifère, en évitant soigneusement toute cause de pollution, ou même simplement d'aération dans le circuit qui joint les deux forages. Toutefois, il s'agit là d'un dispositif par doublet, qui sera étudié aux chapitres suivants.

Lors de l'étude de faisabilité d'un projet de stockage d'eau chaude par puits unique, le coût d'acquisition de l'eau et éventuellement de son traitement, devront être pris en compte.

2.2.3. Pertes thermiques par diffusion.

Si les problèmes hydrodynamiques sont réglés, la possibilité de pomper et d'injecter les débits désirés étant vérifiée , il convient de se préoccuper de l'efficacité thermique du stockage, que l'on peut caractériser par le taux de restitution R des calories injectées (R = rapport : calories récupérées/calories injectées), et le niveau de température auquel celles-ci sont récupérées.

L'étude du comportement thermique d'un stockage par puits unique en fonction des différents paramètres physiques du réservoir et conditions d'exploitation a été réalisée de façon systématique, en ce qui concerne les stockages en nappe profonde, dans le cadre d'une action complémentaire coordonnée confiée au B.R.G.M. par la D.G.R.S.T. et pour les nappes superficielles, dans le cadre d'une étude pour le Plan Construction.

Il a été montré, qu'en l'absence d'écoulement important de la nappe, le niveau thermique de l'eau repompée en phase de production ne dépend que de trois paramètres sans dimension :

- $Pe = (\gamma_F/\lambda_A)\ (Q/2\ \pi\ h)$, caractérisant le rapport (convection/diffusion) dans l'aquifère,
- $\Lambda = (\gamma_F/\lambda_E)\ (\gamma_A/\gamma_E)\ (Q\ h/\pi\ R^2_{th})$, proportionnel au rapport (convection aquifère/diffusion épontes),
- $\varepsilon = e\ /\ \sqrt{(\lambda_E/\gamma_E)t_i}$, épaisseur réduite de l'éponte supérieure (épaisseur/profondeur de pénétration de l'onde diffusive),

avec γ capacité calorifique, et λ conductivité thermique, affectés des indices : A pour aquifère (matrice solide + eau), E pour épontes et F pour fluide.

Le symbole R_{th} désigne le rayon de la zone cylindrique chaude créée autour du forage d'injection. Ce paramètre est évalué en négligeant les phénomènes de diffusion (modèle piston) ; il peut être aisément retrouvé

N.B. La signification des différents paramètres physiques est donnée dans la table des symboles située en tête.

en écrivant l'équilibre du bilan énergétique dans l'hypothèse -vérifiée en milieu poreux- d'un équilibre quasi-instantané entre les températures de la matrice solide et de celle de l'eau injectée :

$$\gamma_F \, v \, (\theta_i - \theta_o) = \gamma_A \, \pi R^2_{th} \, h \, (\theta_i - \theta_o) \qquad (2.2)$$

d'où

$$R_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_F}{\gamma_A} \, \frac{v}{\pi h}} \qquad (2.3)$$

avec v volume d'eau injecté

Pour les valeurs de capacité calorifique les plus courantes ($\gamma_A \# 2{,}5^{10^6} J/m^3$, K) :

$$R_{th} \# \sqrt{0{,}53 \; v/h} \qquad (2.4)$$

Des abaques permettent de prévoir l'évolution de la température de l'eau récupérée en phase de déstockage, pour toute une gamme de valeur des paramètres Pe, Λ, ε (cf exemple, figure 14, chapitre 5) : la température de l'eau restituée initialement proche de la température d'injection, décroît ensuite progressivement. Cependant, chaque cycle présente une amélioration par rapport au précédent ; en effet, les pertes thermiques antérieures constituent, autour du stock, un coussin tiède protecteur (diminution des gradients thermiques). Les écarts des températures de production entre deux cycles successifs sont toutefois décroissants et on s'achemine progressivement vers un régime cyclique stabilisé.

N.B. Ce régime cyclique stabilisé peut être approché très rapidement (dès le second cycle), à condition de procéder à un préchauffage, par injection initiale d'une quantité de chaleur supplémentaire non récupérée.

Si l'écoulement de la nappe reste faible, on peut atteindre, en régime stabilisé, un taux de restitution théorique de 75 % lorsque Pe $\geqslant$ 10, $\Lambda \geqslant 10$, $\varepsilon \geqslant 4$. Pratiquement, ces conditions sont satisfaites si les dimensions du stock et l'épaisseur de l'éponte supérieure dépasse certaines valeurs minimales. Le seuil est d'autant plus élevé que la durée des cycles est grande.

Le tableau III traduit ces conditions en fonction de l'épaisseur du réservoir et le rayon thermique du stock, pour différentes durées de cycle, ainsi que les valeurs minimales correspondantes des volumes d'eau traités au cours de chaque cycle.

Durée du cycle (jour)	Epaisseur de l'aquifère h (m)	Rayon thermique R_{th} (m)	Epaisseur minimale de l'éponte supérieure e (m)	Volume d'eau minimal (m3)
1	0,6	2,9	0,8	10
7	1,7	7,6	2,2	190
30	3,5	16	4,5	1700
360	12	55	15,8	68000

TABLEAU III - Dimensions minimales d'un stockage conduisant à une efficacité de 75 % à stabilisation ; si l'épaisseur de l'éponte supérieure était réduite de moitié, l'efficacité passerait de 75 % à 66 %.

2.2.4. Pertes thermiques dues à l'écoulement de la nappe

L'écoulement régional fait dériver la bulle chaude hors de portée du puits d'injection pour une forte vitesse de nappe. Si l'écoulement est moins rapide, la bulle est simplement excentrée.

Les nappes superficielles sont le siège d'écoulements dont les vitesses sont très généralement supérieures à celles des nappes profondes ; H. Schoeller (1962) indique pour les nappes circulant dans les aquifères à interstices, avec un gradient moyen voisin de 5×10^{-3}, valeur fréquente dans les nappes superficielles, les valeurs suivantes de la vitesse :

- Loess : 1.8 m/an,
- Sable fin : 0,5 m/an à 140 m/an,
- Sable grossier : 5 m/an à 900 m/an,
- Alluvions graveleuses : 500 m/an à 1000 m/an.

Il est donc capital, lorsque l'on envisage un stockage en nappe superficielle, de réunir les informations permettant d'évaluer la vitesse de la nappe.

Pour un stockage par puits unique comprenant ou non des phases d'attente entre chaque inversion du débit, l'influence de l'écoulement de la nappe sur la température de l'eau produite en phase de déstockage peut être caractérisée par le paramètre adimensionnel (déplacement thermique réduit) :

$$d_R = \frac{d_{th}}{R_{th}} \qquad (2.5)$$

avec d_{th} déplacement du front thermique au cours d'un demi-cycle (durée moyenne τ séparant le début de l'injection du début du repompage, pour des cycles symétriques)

R_{th} rayon thermique du stockage.

Soit, en fonction des paramètres physiques, :

$$d_R = V_D\,\tau\sqrt{\frac{\gamma_F}{\gamma_A}\,\frac{\pi h}{v}} \;\#\; V_D\,\tau\sqrt{5{,}2\,\frac{h}{v}} \qquad (2.6)$$

avec v volume d'eau injecté

V_D vitesse de Darcy de la nappe (flux de l'eau souterraine)

τ durée moyenne d'un demi-cycle.

L'abaque de la figure 2.2 permet de prévoir l'influence de l'écoulement de la nappe sur la température de l'eau récupérée en fonction du paramètre δ, pour des valeurs comprises entre $\delta = 0$ (vitesse de nappe négligeable), et $\delta = 1$ (déplacement de la bulle chaude égal à son rayon).

Les résultats sont tracés en fonction des variables réduites, pour en assurer toute la généralité :

- température réduite : $\theta_R = (\theta-\theta_o) / (\theta_i-\theta_o)$ (2.7)
- temps réduit : t_R = volume repompé/volume injecté (2.8)

ou encore, si les débits sont égaux dans les deux phases :

- temps réduit : t_R = durée du pompage/durée de l'injection (2.9)

A partir de cet abaque, on a pu calculer le facteur f_η de réduction de l'efficacité thermique de référence (pour un volume récupéré égal au volume injecté, et en prenant la température initiale de la nappe comme température de référence) en fonction du déplacement thermique réduit (tableau IV).

Déplacement relatif d_R	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0
Réduction de l'efficacité f_η	1	0.97	0.94	0.87	0.81	0.75	0.69	0.57	0.45

TABLEAU IV - Réduction de l'efficacité thermique de référence - Conséquence de l'écoulement de la nappe.

2.2.5. Influences conjuguées de la diffusion et de l'écoulement

On les évalue par application successive des facteurs de réduction correspondants. Tant que ceux-ci sont faibles, l'approximation reste acceptable. Dans le cas contraire, il sera nécessaire de recourir à des simulations sur modèles mathématiques spécifiques.

Un exemple d'estimation des températures de production, lors de la préparation d'un avant-projet, sera étudié au chapitre V, dans le cadre du fonctionnement d'un doublet à puits chaud-puits froid. En effet, ce dernier dispositif présente des avantages pratiques importants, tout en conservant, dans les cas favorables, un comportement thermique très voisin de celui de deux puits uniques non influencés.

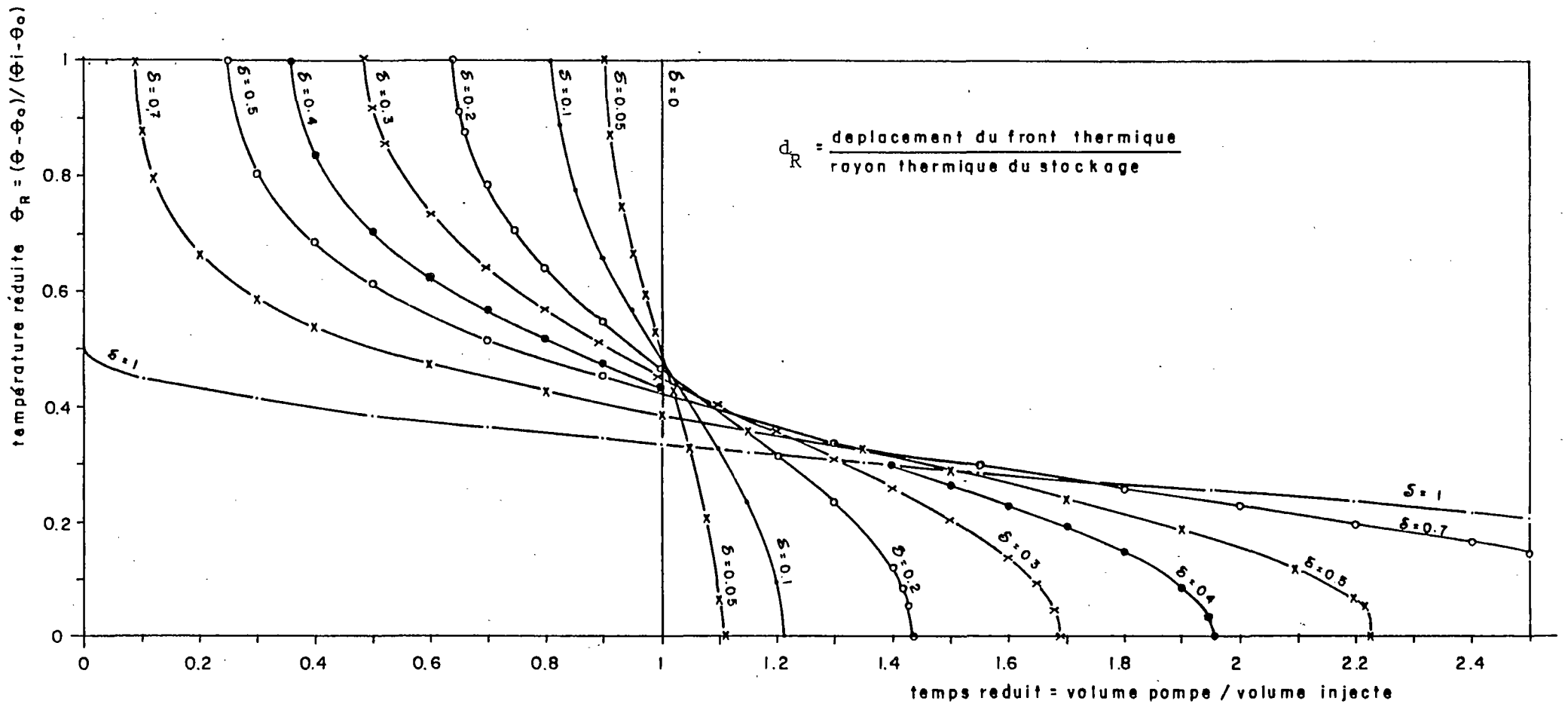


Figure 2.2. - Evolution des températures à la production d'un stockage par puits unique situé dans une nappe en écoulement (en l'absence de pertes sensibles au front -Pe ∞- et aux épontes -Λ ∞-).

3. POMPES A CHALEUR SUR DOUBLET EN NAPPE SUPERFICIELLE (GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE.

Du fait de la taxation des prélèvements en nappe, aussi bien que des rejets dans les réseaux superficiels, il est généralement avantageux de réinjecter les eaux après exploitation de leurs propriétés thermiques. La réinsertion dans l'aquifère d'un débit égal à celui prélevé grâce à un second forage (dispositif du doublet) permet en outre de maintenir le bilan hydraulique de l'aquifère-réservoir et de limiter en intensité et en étendue l'impact de l'exploitation sur les pressions de la nappe.

Le principe de la PAC fonctionnant sur une nappe superficielle, avec réinjection de l'eau, est le même que celui des doublets géothermiques en aquifères profonds (fig. 3.1) ; la différence essentielle réside dans l'écart thermique exploitable, beaucoup plus faible.

L'eau prélevée au puits de production est réinjectée après avoir été refroidie (source froide d'une PAC de chauffage) ou réchauffée (source chaude d'une PAC de climatisation. Les frigories (ou calories) injectées créent une zone froide (ou chaude) d'extension croissante autour du forage d'injection (fig. 3.2). Cette perturbation thermique peut parvenir au forage de production à l'issue d'un temps de fonctionnement (date de percée) plus ou moins long.

En fonction de la vitesse de l'écoulement régional de la nappe, et de l'orientation de l'axe du doublet par rapport à cet écoulement, le recyclage peut être total, partiel ou nul (fig. 3.5). A partir de la date de percée, en cas de recyclage, l'écart thermique exploitable diminue progressivement ; s'il devient inférieur à la limite de rentabilité, l'exploitation du doublet doit être abandonnée. L'occurrence de ce phénomène définit la durée de vie de l'installation.

L'évolution de la température au forage de production dépend d'un certain nombre de facteurs dont l'épaisseur productrice de l'aquifère, le débit exploité, la distance entre forages, la vitesse d'écoulement de la nappe et l'orientation de l'axe du doublet. La *qualité des informations hydrogéologiques* rassemblées au départ, conditionne donc en grande partie la validité des estimations du comportement thermique du réservoir, sur lesquelles le projet sera bâti.

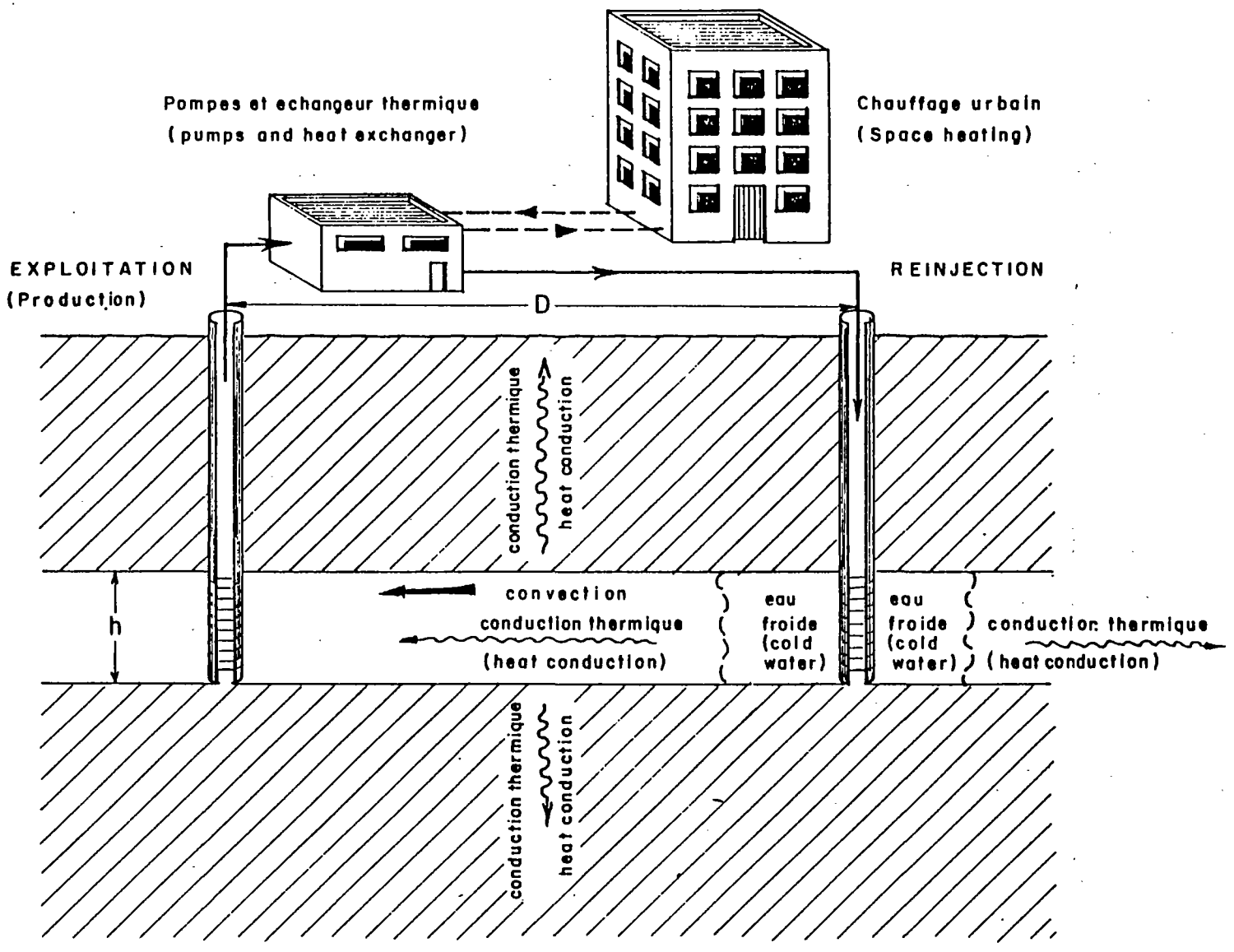


Figure 3.1 - Exploitation d'énergie géothermique avec doublet

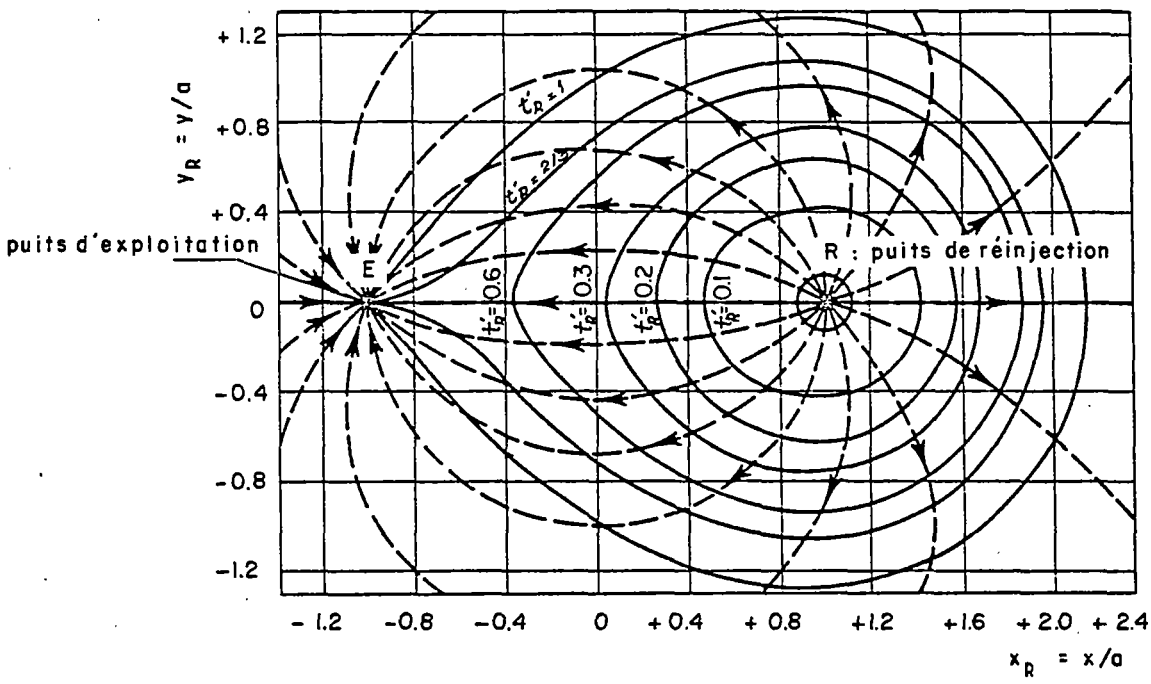


Figure 3.2 - Doublet en l'absence d'écoulement régional : progression du front thermique à partir du puits de réinjection.

Nous présentons dans ce chapitre un certain nombre de formules et d'abaques permettant une première approche simplifiée pour calculer la date de percée, puis l'évolution thermique au forage de production d'un doublet unique implanté dans un réservoir homogène d'extension horizontale infinie et d'épaisseur constante, où la nappe n'a pas d'écoulement régional sensible ; l'exploitation est supposée réalisée en régime hydraulique permanent : des fluctuations de débit de courte durée par rapport au temps de percée, ont peu d'influence sur le comportement global ; il suffit alors de prendre en compte un débit fictif continu conduisant au traitement des mêmes volumes d'eau par cycle. Une méthode de calcul de l'influence d'un écoulement régional sur la date de percée, ainsi que du taux de recyclage à stabilisation, est donnée.

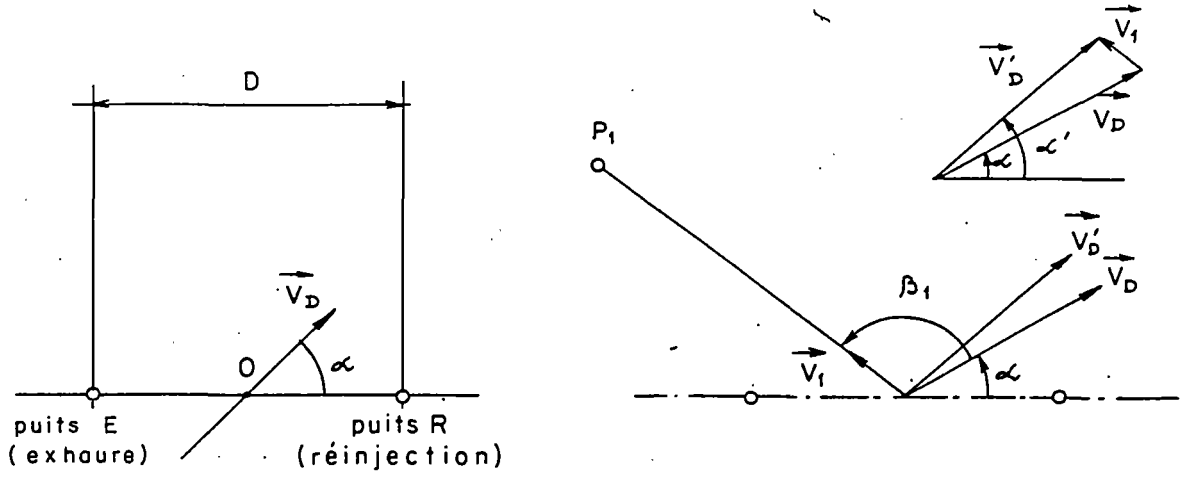
3.1. Notations adoptées.

Les principales notations propres à l'exploitation d'un doublet de ce type, sont les suivantes (cf figures 3.3a et 3.3b) :

V_D (m s^{-1})	Vitesse de Darcy induite par l'écoulement régional $V_D = Ti / h$ (3.1)
V'_D (m s^{-1})	Vitesse locale résultant de l'écoulement régional, corrigée de l'influence de forages voisins
D (m)	Distance entre les deux forages du doublet
α	Angle $(\vec{V}_D, \overrightarrow{ER})$ de la vitesse d'écoulement avec l'axe joignant les forages (extraction → réinjection)
h	Epaisseur productrice de l'aquifère
Q	Débit d'exploitation du doublet,

et, dans le cas où des captages sont exploités à faible distance :

Q_j	Débit du $j^{ème}$ forage (P_j)
d_j	Distance de ce forage au centre du doublet
β_j	Angle que fait le rayon vecteur $\overrightarrow{OP}_j$ avec $\vec{V}_D$



3.3 a - Sans captage voisin

3.3 b - A proximité d'un captage P_1

Figure 3.3 - Vitesse locale de la nappe avant implantation du doublet

3.1.1. Influence de captages voisins

Si la vitesse induite par des captages voisins n'est pas négligeable devant la vitesse régionale de la nappe, on devra prendre en compte une vitesse corrigée ayant pour expression :

$$\vec{V}'_D = \vec{V}_D + \sum_j \vec{V}_j \qquad (3.2)$$

où $\vec{V}_j$, vitesse induite par le forage P_j, est dirigée suivant $\overrightarrow{OP}_j$, et a pour intensité :

$$\left|\vec{V}_j\right| = \frac{Q_j}{2\,\pi\,h\,d_j} \qquad (3.3)$$

3.1.2. Exemples de calcul d'un débit fictif continu

(i) Une installation fonctionnant en moyenne à 30 m3/h, 6 mois par an, a un débit fictif continu de 15 m3/h sur l'année (débit moyen annuel).

(ii) Prenons maintenant une installation devant fournir :

$\overline{P}$ = 500 000 kWh/an (= 57 kW)

avec une puissance de pointe : P_{MAX} = 300 kW, prélevées par un écart thermique moyen de $\Delta\theta$ = 5°C entre l'entrée et la sortie de la PAC.

Le volume d'eau v à traiter annuellement est :

$$v = \frac{\overline{P}}{\gamma \Delta \theta} \qquad (3.4)$$

$$v = \frac{5 \times 10^8 \times 3600}{4,185 \times 10^6 \times 5} = 86\ 000 \text{ m3/an}$$

Il correspond à un débit fictif continu :

$$\overline{Q} = \frac{v}{24 \times 365} = 9,8 \text{ m3/h} \qquad (3.5)$$

Alors que le débit de pointe devrait être :

$$Q_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{\gamma \Delta \theta} \qquad (3.6)$$

$$Q_{MAX} = \frac{3 \times 10^5 \times 3600}{4,185 \times 10^6 \times 5} = 51,6 \text{ m3/h}$$

3.2. Ecoulement de nappe négligeable ($V_D \neq 0$)

Pour négliger l'écoulement régional de la nappe, on pourra prendre comme critère (cf § 3.3.1.) :

$$V_D < Q / (15\ h\ D) \qquad (3.7)$$

3.2.1. Détermination du temps de percée ($V_D \neq 0$)

Le doublet est supposé fonctionner en régime continu (pas d'inversion des débits) ; une perturbation thermique est induite dans l'aquifère par modification de la température de l'eau injectée. Le temps de percée est le temps nécessaire pour que cette perturbation atteigne le puits de production par transfert convectif (entraînement par l'eau en écoulement forcé).

Ce temps caractéristique est fonction de l'épaisseur h du réservoir et des conditions d'exploitation D, Q. Il a pour expression :

$$t_p\ (V_D = 0) = \frac{\pi}{3} \frac{\gamma_A}{\gamma_F} \frac{D^2 h}{Q} \qquad (3.8)$$

Pour la valeur la plus courante de γ_A (γ_A = 2,5 10^6 J m^{-3} K^{-1} # 0,6 thermie m^{-3} K^{-1}) :

$$\boxed{t_p\ (V_D = 0)\ \#\ 0{,}6\ \frac{D^2h}{Q}} \qquad (3.9)$$

N.B. Le temps t_p^m de transfert des particules d'eau (indice m pour transfert de masse) d'un puits à l'autre est sensiblement plus bref :

$$t_p^m = \frac{\pi}{3}\ \omega\ \frac{D^2h}{Q} \qquad (3.10)$$

où ω est la porosité "cinématique" de l'aquifère, très généralement inférieure à 20 %, d'où :

$$t_p^m < 0{,}2\ \frac{D^2h}{Q}\ \#\ t_p\ /\ 3 \qquad (3.11)$$

Ce retard à la propagation d'un front thermique par rapport à celle des particules d'eau est dû à l'absorbtion des frigories (ou calories) injectées par la matrice solide, dans le rapport des capacités calorifiques.

3.2.2. Evolution thermique au puits de production (V_D # 0)

Nous avons construit un abaque (fig. 3.4) qui permet d'évaluer la température réduite θ_R :

$$\theta_R = \frac{\theta - \theta_o}{\theta_i - \theta_o} \qquad (3.12)$$

en fonction du temps réduit t_R :

$$t_R = \frac{t}{t_p}\ \#\ \frac{1{,}7\ Q}{D^2h}\ t \qquad (3.13)$$

A partir de la date de percée (t_R = 1), la température réduite croît progressivement à partir de 0 vers une asymptote θ_R (t_R ∞) = 1. La température réelle croît ou décroît progressivement suivant que l'eau injectée est plus chaude ou plus froide que celle du réservoir, depuis la valeur θ_o vers une asymptote θ (t ∞) = θ_i si la température d'injection est constante.

Schéma piston.

Le schéma le plus pessimiste ne prend en compte que les échanges convectifs dans l'aquifère : courbe repérée par $\Lambda\infty$.

Prise en compte des échanges conductifs avec les épontes.

En fait le rôle capacitif des épontes contribue à absorber une partie de la perturbation thermique ; la variation de température est plus lente, suivant une courbe fonction de la conduction thermique λ_E des épontes et de leur capacité calorifique.

Le paramètre caractéristique est un nombre adimensionnel Λ :

$$\Lambda = \frac{\gamma_F \ \gamma_A}{\lambda_E \ \gamma_E} \frac{Qh}{D^2} \qquad (3,14)$$

Pour les valeurs usuelles des paramètres, avec $\gamma_A \# \gamma_E$ et $\lambda_E \# 2,5 \ W \ m^{-1} \ k^{-1}$,

$$\Lambda \# 1,7 \ . \ 10^6 \ \frac{Qh}{D^2} \qquad (3,15)$$

Les courbes de la figure 3.4 sont calculées pour des épontes d'extension verticale infinie, par rapport à la profondeur de pénétration du front thermique.

En fait ce modèle est encore pessimiste :

a) si l'épaisseur e de l'éponte supérieure est faible : nappe peu profonde :

$$e < 4 \sqrt{\frac{\lambda_E \ t_i}{\gamma_E}} \qquad (3,16)$$

la proximité du sol avec une température peu influencée par la perturbation va contribuer à en amortir les effets.

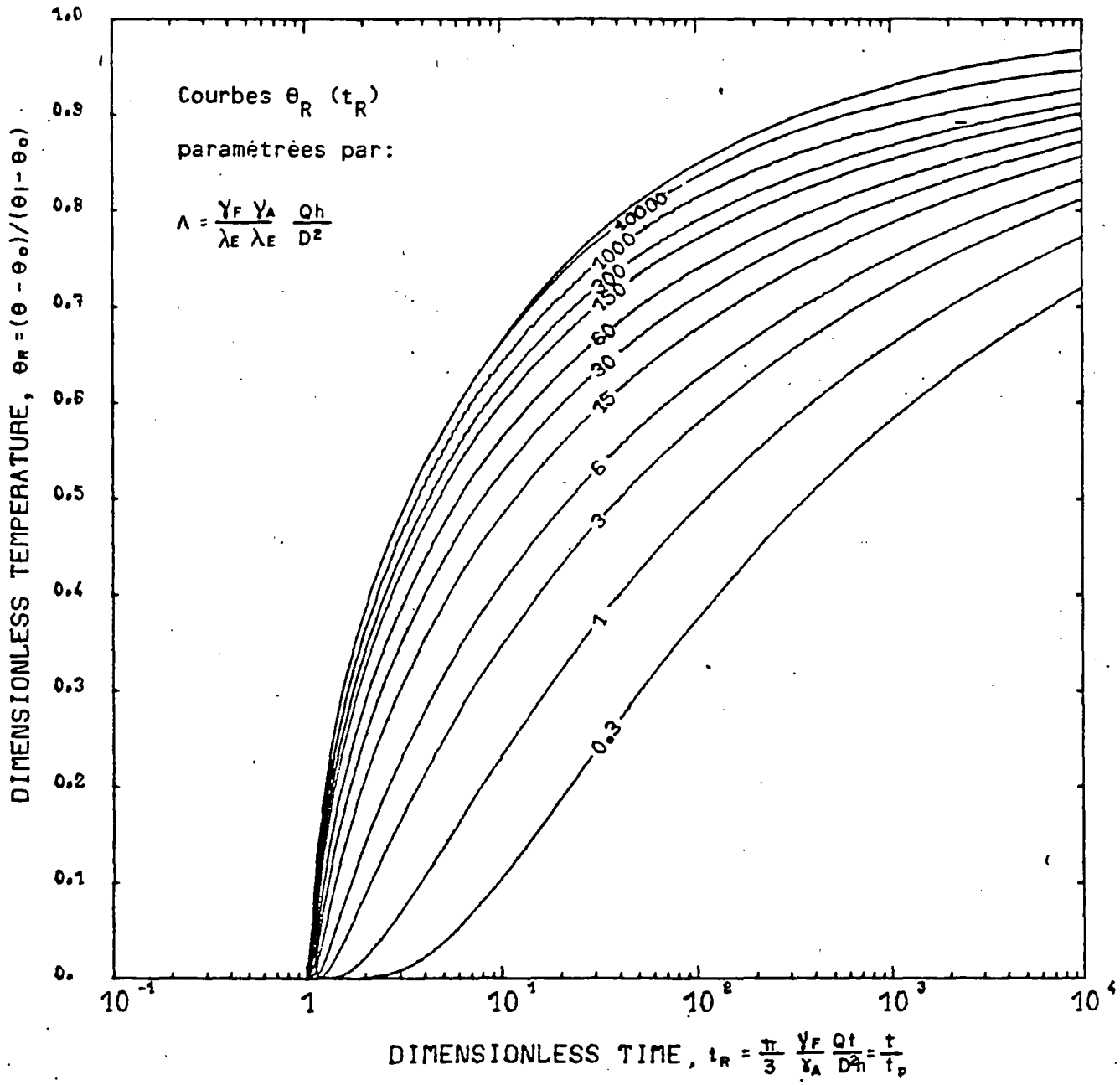


Figure 3.4 - Evolution des températures au forage de production d'un doublet hydrothermique, prenant en compte les échanges avec les épontes (fonctionnement à débit Q et température d'injection θi constants)

b) les hétérogénéités de perméabilité du réservoir induisent une diffusion du front thermique bien supérieure à celle qui résulte de la conduction de la chaleur.

Ces dernières conditions peuvent être prises en compte à l'aide de modèles spécifiques ; toutefois l'abaque de la figure 3.4 fournit une évaluation suffisante au stade de l'avant-projet, et allant dans le sens de la sécurité.

N.B. Le fonctionnement avec des températures d'injection variables dans le temps peut être aisément déduit de cet abaque, par un calcul de convolution. Un cas particulier intéressant est celui du fonctionnement à écart thermique $\Delta\theta$ constant, et qui conduit à une dérive plus rapide des températures dans le réservoir, sans stabilisation asymptotique.

3.2.3. Exemple de doublet sur une nappe sans écoulement régional

Prenons le cas d'une installation fonctionnant en moyenne à 100 m3/h, 8 h par jour et 6 mois par an avec des puits espacés de 200 m, dans une nappe dont l'épaisseur efficace h est 20 m.

. Débit fictif continu (moyenne annuelle)

$$Q = 100 \frac{8}{24} \frac{6}{12} = 16{,}7 \text{ m3/h} = 146\ 000 \text{ m3/an} = 4{,}6\ 10^{-3} \text{ m3/s}$$

. Temps de percée :

$$t_p \# 0{,}6 \times \frac{(200)^2 \cdot 20}{146\ 000} = 3{,}3 \text{ ans}$$

. Chute thermique ultérieure : sans tenir compte de la diffusion thermique dans les épontes (courbe $\Lambda\infty$), après 6,6 années de fonctionnement ($t_R = 2$), l'écart thermique entre température de production θ et température d'injection θ_i a été réduit de 38 % :

$$\theta = \theta_o - 0{,}38\ (\theta_o - \theta_i)$$

. Prise en compte des échanges avec les épontes :

$$\Lambda \approx 1{,}7\ 10^{6}\ \frac{4{,}6\ 10^{-3}\ 20}{(200)^{2}} \approx 4$$

Pour cette valeur de Λ, l'abaque de la figure 3.4 conduit à $\theta_R = 12\ \%$:

$$\theta = \theta_o - 0{,}12\ (\theta_o - \theta_i)$$

. L'injection d'eau à 7°C dans un aquifère initialement à 13°C, conduit donc, après 6,6 années de fonctionnement, à produire une eau à 12,3°C, alors que la température évaluée par le modèle piston ($\Lambda\infty$) a déjà chuté à 10,7°C.

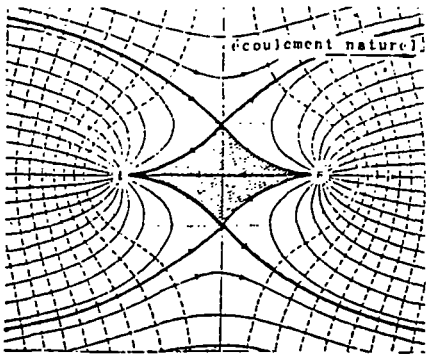
3.3. Ecoulement de nappe non négligeable ($V_D \neq 0$)

L'écoulement régional de la nappe entraîne les frigories (ou calories) injectées par advection. Suivant le rapport des vitesses induites par les débits dans les puits à la vitesse V_D de la nappe, et l'orientation α du doublet, plusieurs cas de figure peuvent se présenter (fig. 3.5) :

- doublet parallèle à l'écoulement ; injection dans le forage situé en amont (fig. 3.5 d) : le recyclage est total et accéléré (par rapport au cas $V_D = 0$) ;
- doublet parallèle à l'écoulement ; injection dans le forage situé en aval : le recyclage est partiel (fig. 3.5 a) ou nul (fig. 3.5 e) ;
- écoulement par le travers du doublet ; le recyclage est partiel (fig. 3.5 c) ou nul (fig. 3.5 b, 3.5 f, 3.5 g).

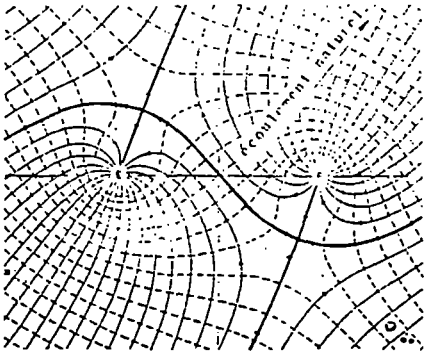
En fait la configuration de l'écoulement global peut être entièrement définie par l'angle α et par le débit réduit Q_R, paramètre adimensionnel d'expression :

$$Q_R = \frac{2\ Q}{h\ D\ V_D} \qquad (3{,}17)$$



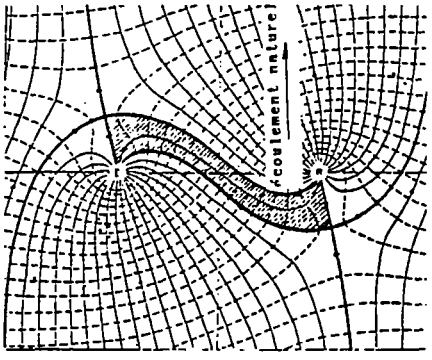
$\frac{2Q}{hDV_D} = 4$; $\alpha = 0$

3.5 a Recyclage partiel (4,4%)



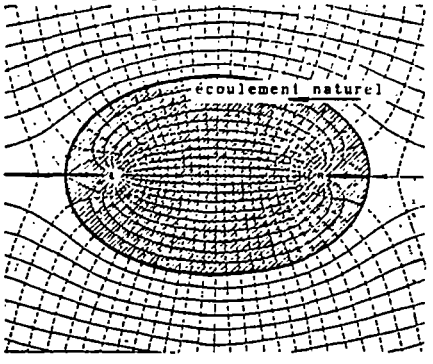
$\frac{2Q}{hDV_D} = 4$; Arcos $\frac{2}{\pi}$ # 50°46

3.5 b Recyclage nul



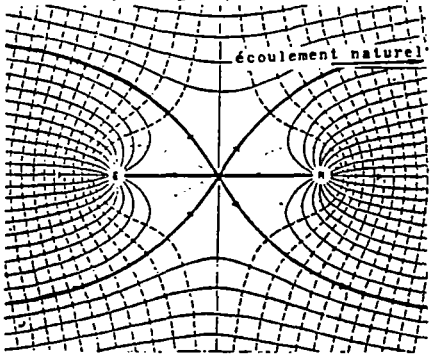
$\frac{2Q}{hDV_D} = 4$; $\alpha = 90°$

3.5 c Recyclage partiel (9%)



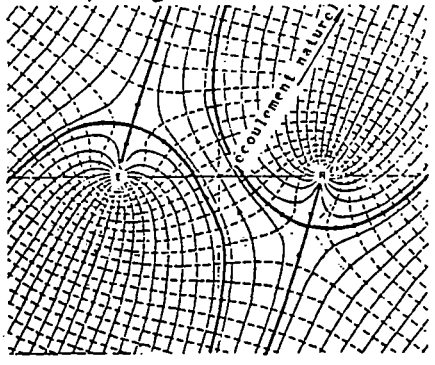
$\frac{2Q}{hDV_D} = 4$; $\alpha = 180°$

3.5 d Recyclage total



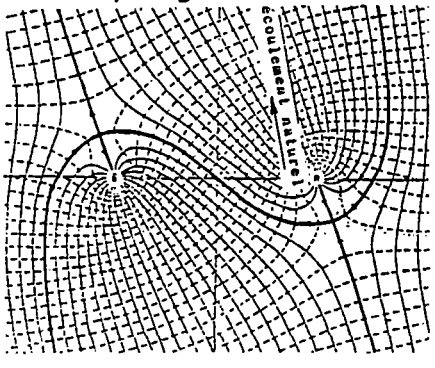
$\frac{2Q}{hDV_D} = \Pi$; $\alpha = 0$

3.5 e Recyclage nul



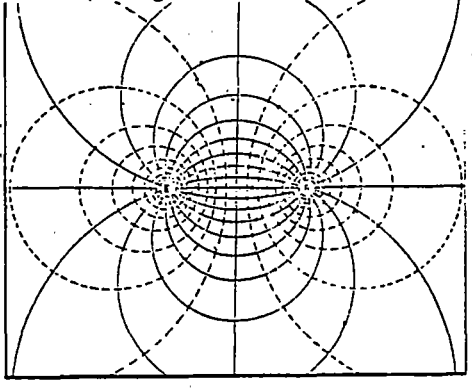
$\frac{2Q}{hDV_D} = \Pi$; $\alpha = 60°$

3.5 f Recyclage nul



$\frac{2Q}{hDV_D} = \Pi$; α # 101°

3.5 g Recyclage nul



$\frac{2Q}{hDV_D} = \infty$

3.5 h Recyclage total

Figure 3.5 - Différents schémas d'écoulement en fonction de $Q_R = \frac{2Q}{hDV_D}$
E= puits de production (Extraction)
R= puits d'injection (Recharge)

Toutefois le calcul du temps de percée, et de l'évolution ultérieure des températures au puits de production n'est pas aisé ; il requiert la mise en oeuvre de modèles mathématiques. Pour faciliter la tâche du projeteur, nous avons réalisé ces calculs pour la gamme pratique des paramètres α et Q_R et établi deux abaques permettant de tirer directement le temps de percée et le taux de recyclage.

Le temps de percée t_p définit le début de la variation des températures de l'eau extraite et le taux de recyclage détermine l'asymptote à la courbe $\theta(t)$.

3.3.1. Détermination du temps de percée ($V_D \neq 0$)

Le temps de percée peut être évalué à partir de t_p ($V_D = 0$) en le multipliant par un facteur correctif $f(Q_R, \alpha)$ directement lisible sur l'abaque de la figure 3.6 :

$$t_p\ (V_D \neq 0) = f\ (Q_r, \alpha)\ .\ t_p\ (V_D = 0) \qquad (3,18)$$

$$t_p\ (V_D \neq 0) \# 0,6\ \frac{D^2 h}{Q}\ f\ (Q_R, \alpha) \qquad (3,19)$$

avec

$$Q_R = \frac{2Q}{h\ D\ V_D} \qquad (3,20)$$

3.3.2. Calcul du taux de recyclage

Sur la totalité du débit réinjecté au forage R, une fraction I parvient au forage d'exploitation E ; I est le taux de recyclage ; le choix du symbole I rappelle le terme anglais : Interflow. Les autres lignes de courant issues de R sont déviées dans la direction de l'écoulement régional.

Le taux de recyclage permet de calculer la tendance asymtotique de l'évolution thermique au forage de production, c'est-à-dire la température θ_S à stabilisation, obtenue lorsque $t \gg t_p$.

L'abaque de la figure 3.7 permet d'obtenir directement I, en fonction de l'angle α et de $Q_R = 2\ Q/(h\ D\ V_D)$.

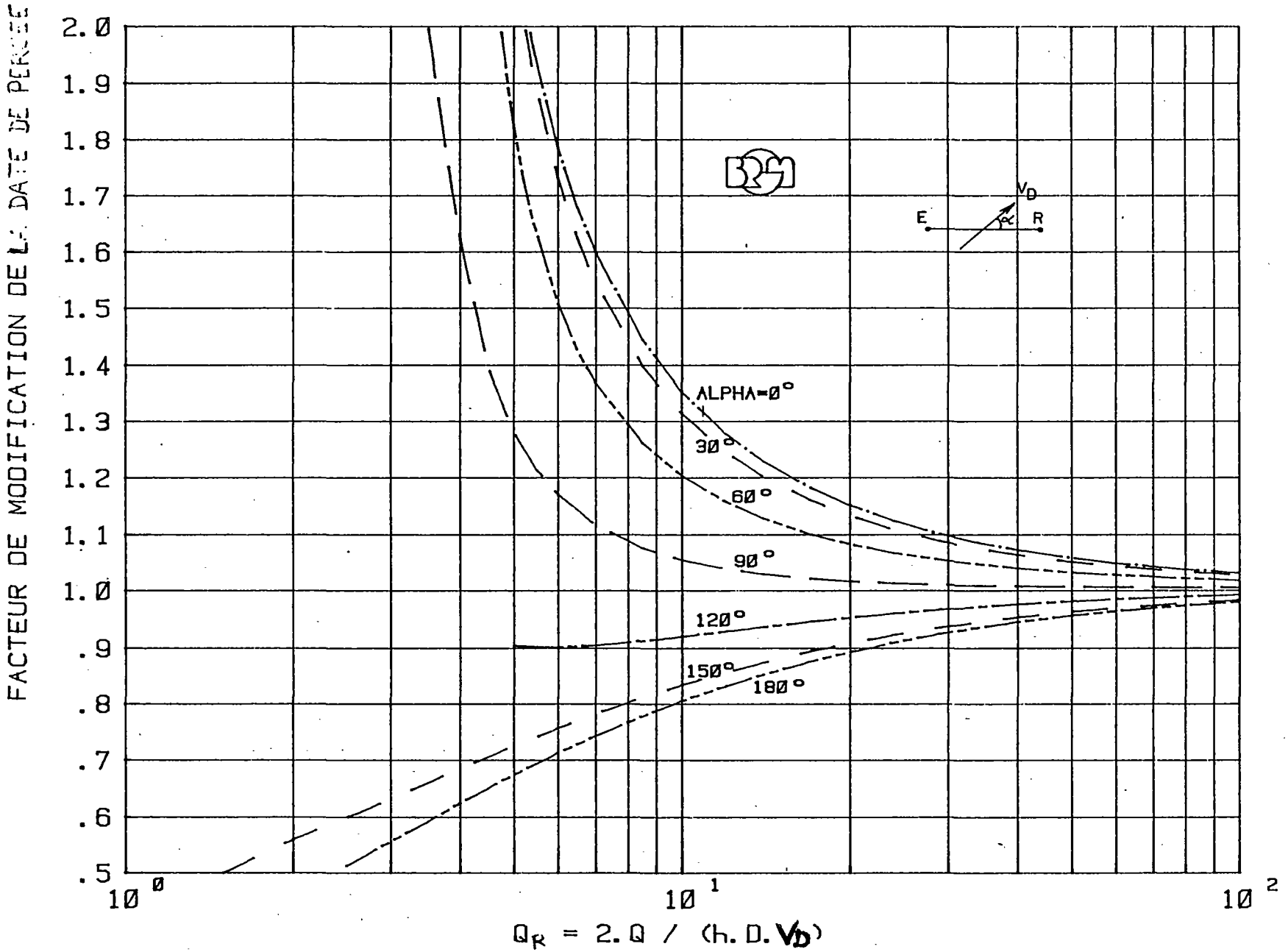


Figure 3.6 - Influence de l'écoulement régional sur la date de percée (en fonction de Q_R et de α).

Température d'injection constante

En régime thermique stabilisé :

$$\boxed{\theta_S = (1 - I)\ \theta_o + I\ \theta_i = \theta_o + I\ (\theta_i - \theta_o)} \qquad (3,21)$$

Compte-tenu de la définition de la température réduite θ_R :

$$I = \frac{\theta_S - \theta_o}{\theta_i - \theta_o} = \theta_R\ (t_R \gg 1) = \theta_{RS} \qquad (3,22)$$

La température réduite θ_R tend donc vers $\theta_{RS} = I$, pour $t \gg t_p$, lorsque le doublet fonctionne à température d'injection constante.

Fonctionnement à écart thermique constant

La plupart des installations de PAC sur eau de nappe sont basées sur un fonctionnement à écart algébrique $\Delta\theta$ constant entre la température de l'eau prélevée et celle de l'eau réinjectée :

$$\theta_I = \theta - \Delta\theta \qquad (3,23)$$

A stabilisation, la température de l'eau vérifie la relation :

$$\theta_S = (1-I)\ \theta_o + I\ (\theta_S - \Delta\theta) \qquad (3,24)$$

d'où

$$\theta_S = \theta_o - \frac{I}{1-I}\ \Delta\theta \qquad (3,25)$$

On remarque qu'en cas de recyclage total (I = 1), la température ne se stabilise pas.

3.3.3. Variation thermique au puits de production

Une fois la perturbation thermique parvenue au puits de production, l'évolution des températures vers θ_S est beaucoup plus rapide pour une vitesse de nappe élevée que dans une nappe immobile, et ce, quelque soit l'angle α de positionnement du doublet.

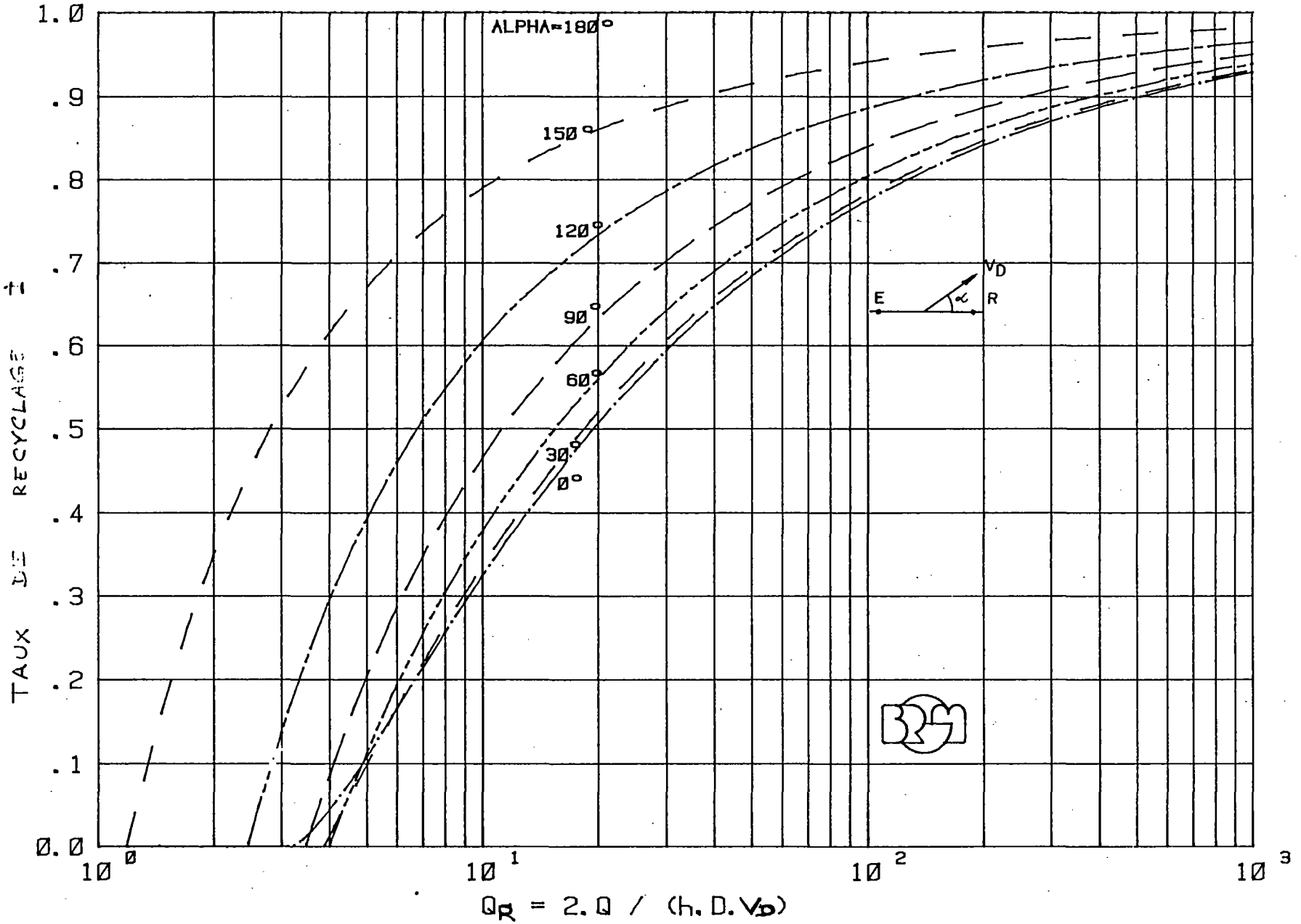


Figure 3.7 - Influence de l'écoulement régional sur le taux de recyclage (en fonction de Q_R et de α)

3.3.4. Exemple de doublet sur une nappe soumise à un écoulement régional

Reprenons l'installation étudiée au paragraphe 3.2.3. : doublet fonctionnant à 100 m3/h, 8 h par jour et 6 mois par an, avec des puits espacés de 200 m, dans une nappe de 20 m d'épaisseur ; l'eau est injectée à 7°C dans un aquifère initialement à 13°C.

On dispose, par ailleurs, des renseignements suivants sur l'aquifère : sa transmissivité T est égale à 6 10^{-3} m2/s, et le gradient hydraulique initial i est de 1 pour mille, d'où la vitesse de Darcy :

$$V_D = \frac{T}{h} i = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} = 9{,}5 \text{ m/an} \qquad (3{,}26)$$

et le débit réduit Q_R :

$$Q_R = \frac{2Q}{h\ D\ V_D} = \frac{2 \cdot 146\ 000}{20 \cdot 200 \cdot 9{,}5} = 7{,}7 \qquad (3{,}27)$$

Implantation parallèle à l'écoulement ; puits de réinjection en aval (α = 0°)

Les abaques des figures 3.6 et 3.7 fournissent respectivement :

- un facteur f égal à 1,53 ; d'où la date de percée :

$$t_p\ (V_D \neq 0) = 1{,}53\ t_p\ (V_D = 0) = 5{,}0 \text{ ans}$$

- un taux de recyclage I égal à 0,24 ; d'où la température à stabilisation :

$$\theta_S = 13 + 0{,}24\ (7 - 13) = 11{,}6°C$$

N.B. Si le doublet fonctionnait avec un écart thermique constant $\Delta\theta$ = 6°C, la température à stabilisation ne serait pas beaucoup plus basse (grâce au faible taux de recyclage) :

$$\theta_S = 13 - \frac{0{,}24}{0{,}76}\ 6 = 11{,}1°C$$

Implantation parallèle à l'écoulement ; puits de réinjection en amont (α = 180°)

Des abaques des figures 3.6 et 3.7, on tire f = 0,76 et I = 1 ; d'où la date de percée :

$$t_p\ (V_D \neq 0) = 0{,}76\ t_p\ (V_D = 0) = 2{,}5 \text{ ans}$$

N.B. Le recyclage étant total (I = 1), une exploitation à écart thermique constant, conduirait à une dérive continue des températures, à une vitesse plus rapide qu'en l'absence d'écoulement de nappe, car le volume d'aquifère exploité est limité (cf fig. 3.5 d).

4. LE SYSTEME DU DOUBLET A BALAYAGE

Aux chapitres 4 et 5, nous abordons une mise en oeuvre des doublets différente en son principe de celle de la géothermie très basse énergie étudiée au chapitre 3. Ici, le doublet est exploité avec réinjection de l'eau à une température alternativement plus élevée puis plus basse que celle de l'eau d'exhaure. Ces systèmes sont utilisés, soit pour coupler des stockages d'eau chaude et d'eau froide, soit plus simplement pour régénérer la température du réservoir et maintenir son potentiel énergétique. On parle, dans ce dernier cas, de géothermie artificielle (mode le plus courant : injection estivale d'eau chaude dans un aquifère exploité pour le chauffage hivernal).

4.1. Principe du doublet à balayage

Les deux forages reçoivent des affectations hydrauliques fixes : l'un d'eux est destiné à l'exhaure de l'eau de la nappe, le second à la réinjection des eaux après réchauffement (période chaude : injection d'énergie d'origine extérieure ou calories extraites par climatisation), ou après refroidissement (période froide : injection de frigories ou retour d'une installation de chauffage).

Des ondes successivement chaudes et froides se suivent donc au sein de l'aquifère, du puits de réinjection vers le puits de pompage. Après une durée de fonctionnement égale au temps de percée, la première onde thermique atteint le forage de production dont la température va osciller par la suite (fig. 4.1), les ondes froides et chaudes se succèdent à raison de deux par cycle d'exploitation. La valeur moyenne stabilisée de la température sur un cycle, résultera du bilan énergétique entre injections chaude et froide, du taux de recyclage et d'éventuelles influences extérieures (par exemple : proximité du sol dont la température est imposée par des phénomènes indépendants du stockage).

L'amplitude des oscillations est étroitement liée au temps de percée, et varie en sens inverse de celui-ci (fig. 4.1). Notons également que cette amplitude reste relativement faible, même dans le cas où la date de percée est la plus rapprochée. La disparité des temps de transit des ondes thermiques, suivant la configuration du tube de courant par laquelle elles

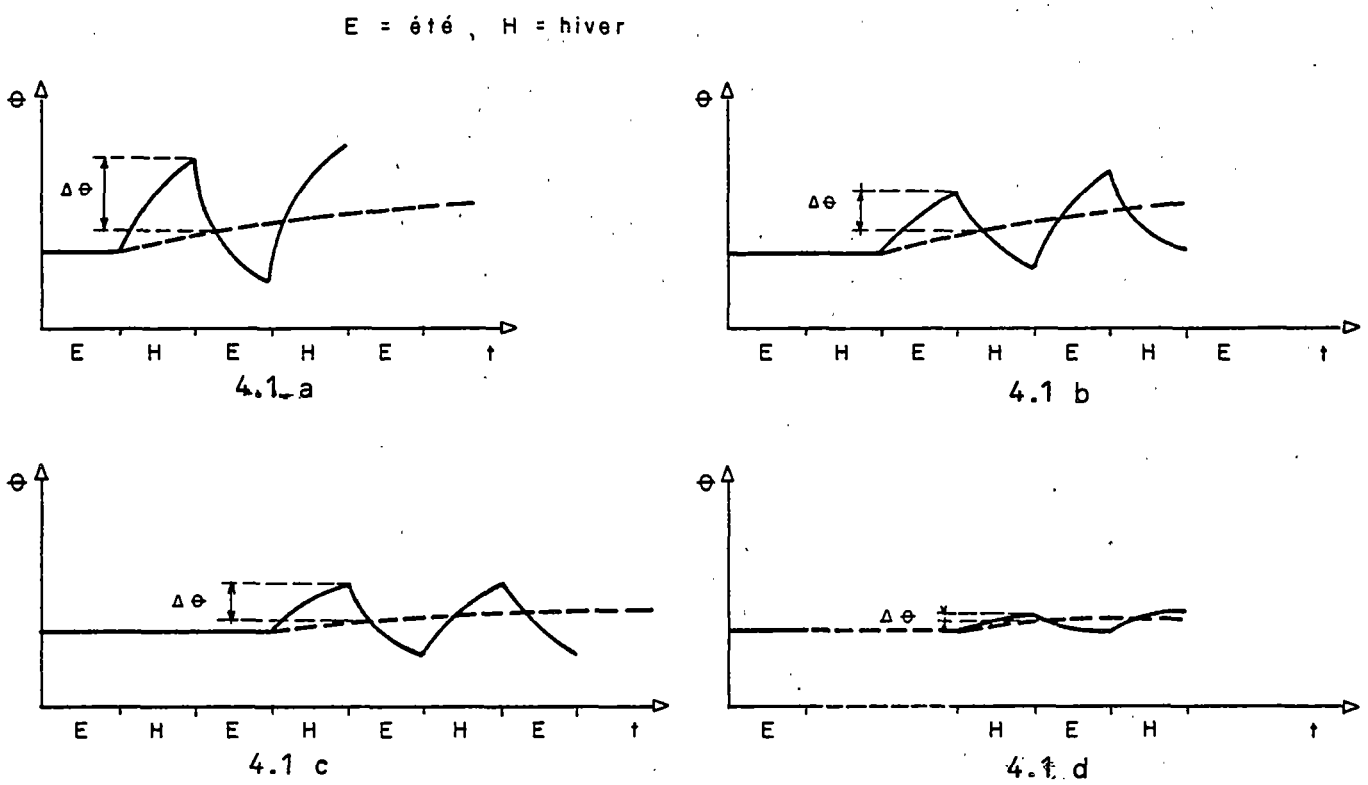


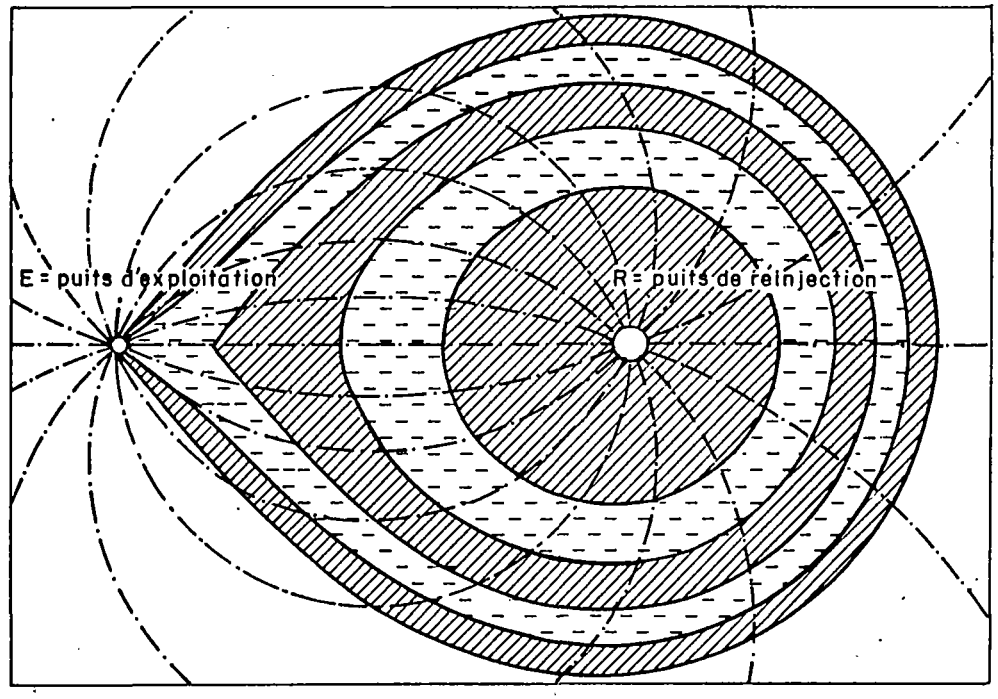
Figure 4.1 - Doublet à balayage - Températures à la production en fonction du rapport (temps de percée/durée d'un cycle)

a) Exploitation en phase ; temps de percée minimal = 1/2 période

b) Exploitation en opposition de phase ; temps de percée = 1 période

c) exploitation en phase ; temps de percée = 1,5 périodes

d) Oscillations amorties ; temps de percée > 3 périodes



chaud froid température initiale

Figure 4.2 - Doublet à balayage. Exemple de position des fronts thermiques après 2,5 cycles pour un temps de percée égal à 1,7 périodes.

sont véhiculées, conduit en effet à une lente variation de la température de l'eau pompée : celle-ci résulte du mélange d'eaux chaudes et froides injectées au cours des différentes phases des cycles précédents, avec des eaux initialement en place (fig. 4.2).

C'est ainsi que, même dans le cas le plus favorable -temps de percée égal à une demi-période (fig. 4.1 a)- et en négligeant les pertes diffusives (écoulement piston), le taux de récupération des calories injectées reste inférieur à 30 %. L'écart de température entre l'eau produite et l'eau en place, maximal à la fin de la période de chauffe, ne représente que 40 % de l'écart à l'injection (θ_r = 0,4), même dans l'hypothèse d'un écoulement piston. La prise en compte des pertes diffusives fait chuter le taux de récupération à 20 % environ.

Le dispositif du doublet à balayage ne doit donc pas être compris comme un système de stockage. De plus, il n'est généralement pas possible d'assurer la concordance entre les fluctuations de température au puits de pompage avec celles des besoins : en effet, les paramètres des transferts thermiques dans l'aquifère sont trop mal connus pour évaluer avec précision les volumes d'eau à traiter au cours de chaque cycle pour assurer une bonne synchronisation. D'ailleurs, quand bien même cette connaissance serait acquise, il serait très difficile de respecter à quelques pour cent près les consignes d'exploitation cycle par cycle.

C'est donc l'aspect de régénération thermique assurant la pérennité de la ressource qui est généralement recherché par l'exploitation d'un doublet à balayage. On évite alors les fluctuations thermiques trop importantes puisque l'on aurait du mal à les maintenir en phase avec les besoins : l'installation est dimensionnée de sorte que la percée du front thermique ne survienne qu'après une durée d'exploitation au moins égale à 1,5 cycles (fig. 4.1 c et 4.1 d).

4.2. Ecoulement de nappe négligeable

4.2.1. Volume maximal, écartement minimal des puits

Pour que la percée ne survienne pas avant la fin du troisième demi-cycle, pour un écartement imposé entre les forages, le volume traité au cours d'un cycle complet (somme des volumes froid et chaud, v_F et v_C), ne doit pas dépasser $Qt_p/1,5$) :

$$v_F + v_C < \frac{2\pi}{9} \frac{\gamma_A}{\gamma_F} D^2 h \# 0,4\ D^2 h \qquad (4,1)$$

Inversement, si le volume $(v_F + v_C)$ est fixé, la distance entre forages doit dépasser une valeur seuil :

$$D > \sqrt{\frac{9}{2\pi} \frac{\gamma_F}{\gamma_A} \frac{v_F + v_C}{h}} \# \sqrt{\frac{v_F + v_C}{0,4\ h}} \qquad (4,2)$$

4.2.2. Température moyenne

Au cours de la phase d'exploitation consécutive à la percée, les températures oscillent autour d'une valeur moyenne (courbes en tireté des figure 4.1 a à 4.1 d), constante si les quantités de calories E_C et de frigories E_F injectées au cours d'un cycle s'équilibrent ; en croissance ou décroissance suivant le signe de l'excédent ΔE :

$$\Delta E = E_C - E_F \qquad (4,3)$$

Cette courbe des températures moyennes est celle d'un doublet fonctionnant avec un écart thermique $\Delta\theta$, tel que :

$$\Delta\theta = \frac{\Delta E}{\gamma_F\ (v_F + v_C)} \qquad (4,4)$$

où v_C et v_F sont les volumes chauds et froids injectés.

Si les quantités E_F et E_C ne varient pas au cours des cycles successifs, le fonctionnement moyen est celui d'un doublet à écart thermique constant (§ 3.2.2.) : le recyclage étant total, la température du forage

d'exhaure dérive indéfiniment sans stabilisation, sauf si le réservoir se trouve à proximité d'une zone à température imposée : essentiellement, nappe très peu profonde, donc proche du sol.

4.2.3. Exemple de doublet à balayage sur une nappe sans écoulement régional

Considérons à nouveau un doublet installé sur une nappe de 20 m d'épaisseur. Cette fois l'exploitation est la suivante :

- débit 30 m3/h durant 6 mois d'hiver avec un écart $\Delta\theta_F = -7°C$,
- débit 20 m3/h durant 5 mois d'été, avec un écart $\Delta\theta_C = +15°C$.

Pour que le recyclage ne se produise qu'après 1,5 période, la distance D doit vérifier :

$$D > \sqrt{\frac{V_F + V_C}{0,4\ h}} = \sqrt{\frac{30 \times 24 \times 180 + 20 \times 24 \times 150}{0,4 \times 20}} \qquad (4,5)$$

$$D > 159\ m$$

La température moyenne évolue suivant un fonctionnement au débit constant :

$$\overline{Q} = \frac{30 \times 6 + 20 \times 5}{12} = 23,3\ m3/h$$

et avec un écart thermique constant :

$$\overline{\Delta\theta} = \frac{30 \times 6 \times (-7) + 20 \times 5 \times 15}{23,3 \times 12} = 0,86°C$$

4.3. Ecoulement de nappe non négligeable ($V_D \neq 0$)

4.3.1. Volume maximal, écartement minimal des puits

Le temps de percée étant modifié d'un facteur f par l'écoulement de la nappe (§ 3.3.1.), le volume traité en un cycle ne doit pas dépasser :

$$V_F + V_C < 0,4\ D^2 h\ .\ f\ (Q_R,\ \alpha) \qquad (4,6)$$

où $Q_R = \frac{2\overline{Q}}{h\ D\ V_D}$ est calculé avec le débit fictif continu moyen sur l'année :

$$\overline{Q} = \frac{v_F + v_C}{12 \text{ mois}} \qquad (4,7)$$

la fonction $f\ (Q_R,\ \alpha)$ est donnée par l'abaque de la figure 3.6.

Inversement, pour un volume total $v_F + v_C$ imposé, la distance entre forages doit dépasser une valeur seuil :

$$D > \sqrt{2,4\ \frac{v_F + v_C}{h\ .\ f(Q_R,\ \alpha)}} \qquad (4,8)$$

4.3.2. Taux de recyclage

Le taux de recyclage I est obtenu en fonction de Q_R et de α à l'aide de l'abaque de la figure 3.7.

Fonctionnement à écart thermique constant : la température moyenne $\overline{\theta}$ de l'eau prélevée au forage d'exhaure se stabilise à la valeur (§ 3.3.2.) :

$$\overline{\theta_S} = \theta_o + \frac{I}{I-1}\Delta\theta = \theta_o + \frac{I}{I-1}\ \frac{\Delta E}{\gamma_F\ (v_F + v_C)} \qquad (4,9)$$

(avec ΔE, somme algébrique des quantités de chaleur injectées en été et en hiver).

4.3.3. Exemple de doublet à balayage dans une nappe à écoulement régional

Reprenons le doublet du § 4.2.3. :

- $\overline{Q}$ = 30 m3/h durant 6 mois, avec $\Delta\theta_F$ = - 7°C,
- $\overline{Q}$ = 20 m3/h durant 5 mois, avec $\Delta\theta_C$ = + 15°C.

Implantation dans la nappe du § 3.3.4. : initialement à 13°C, avec 20 m d'épaisseur et soumise à une vitesse (de Darcy) de $3\ .\ 10^{-7}$ m/s.

Cherchons la distance D minimale et la température moyenne à stabilisation pour un doublet implanté parallèlement à l'écoulement régional avec réinjection dans le puits aval (α = 0°). Le temps de percée et le

taux de recyclage dépendant de D, nous ferons plusieurs hypothèses sur D afin d'en trouver la valeur limite.

Ces essais sont récapitulés dans le tableau suivant :

D	$Q_R = \frac{2\,Q}{h\,D\,V_D} \# \frac{2160}{D}$	$t_{p(V_D=0)} = 0{,}6\,\frac{D^2 h}{Q}$ $\# 7{,}14 \cdot 10^{-4}\,D^2$	facteur f	date de percée t_p	taux de recyclage I
50	43,2	1,8 mois	1,07	1,9 mois	0,67
100	21,6	7,1 mois	1,14	8,1 mois	0,53
200	10,8	28,6 mois	1,32	38 mois	0,35
150	14,4	16,1 mois	1,22	20 mois	0,42
140	15,4	14,0 mois	1,21	16,9 mois	0,43
144	15,0	14,8 mois	1,215	18,0 mois	0,43

Donc D > 144 m, pour que t_p > 18 mois, ; quant à la température moyenne à stabilisation, elle vaut :

$$\overline{\theta}_S = \theta_o + \frac{I}{I-1}\,\Delta\theta = 13 + \frac{0{,}43}{0{,}57}\,0{,}86 = 13{,}6°C$$

5. LE SYSTEME DU DOUBLET A PUITS CHAUD ET PUITS FROID

5.1. Principe du doublet à puits chaud et puits froid

Dans le cas d'une exploitation mixte intersaisonnière (chauffage l'hiver ; climatisation, capteurs solaires, refroidissements industriels, etc..., l'été), l'un des forages est destiné à l'injection des calories durant la belle saison, puis à leur restitution en hiver (puits chaud). Symétriquement, le second forage produit en été les frigories emmagasinées l'hiver au retour des installations de chauffage (puits froid) (fig. 5.1).

Le principe de fonctionnement est, bien entendu, le même si la durée du cycle n'est pas annuelle, ou si le dispositif n'est exploité que pour l'un des deux aspects (chauffage ou climatisation seul), avec régénération de la température du réservoir pendant l'autre saison.

Il découle de ce mode de fonctionnement que les vitesses de l'eau au sein du réservoir géologique, changent de signe à l'issue de chaque demi-cycle. Par opposition au système à balayage, les fronts thermiques chaud et froid demeurent chacun dans une zone circonscrite autour du forage correspondant avec un mouvement oscillant périodique.

Du point de vue de l'efficacité thermique, ce dispositif présente un double avantage :

1. Les zones chaude et froide sont disjointes si bien que le milieu géologique environnant chaque puits s'échauffe (respectivement se refroidit) progressivement ; une fraction de l'énergie transmise aux épontes constitue un acquit partiellement récupérable qui contribue à relever le niveau énergétique des eaux de production en fin de période de pompage. Les gradients et, partant, les pertes thermiques diminuent au fur et à mesure que se déroulent les cycles d'exploitation.
2. Les calories (ou frigories) sont automatiquement récupérées après une durée valant en moyenne un demi-cycle puisque la reprise est immédiate après inversion des débits

Les pertes diffusives sont donc plus faibles dans un système à puits chaud-puits froid, que dans un dispositif à balayage, par réduction de la durée et de la surface des échanges.

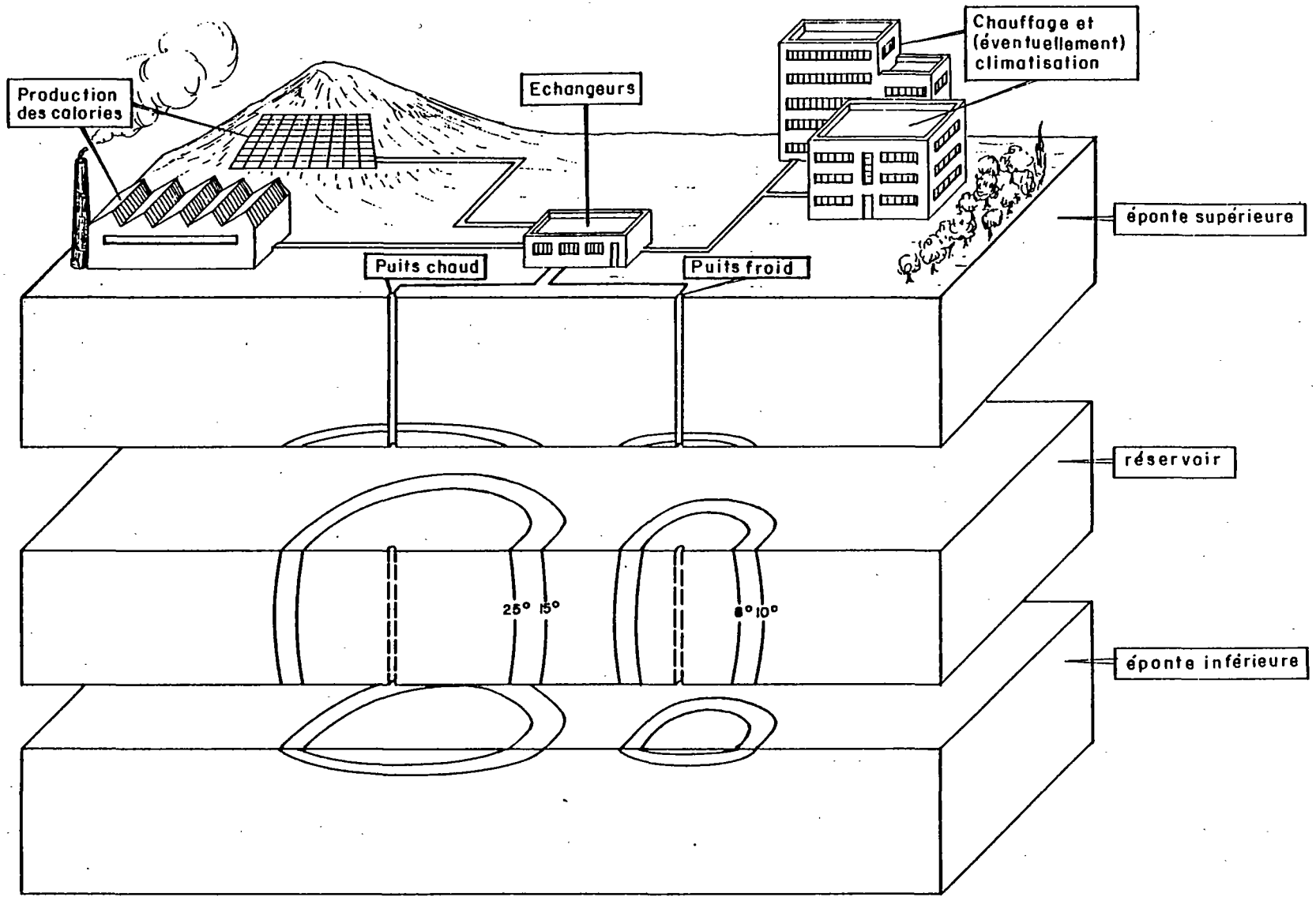


Figure 5.1 - Principe du doublet "puits froid - puits chaud"

L'inversion périodique des débits présente l'avantage de décolmater les puits (toutefois un décolmatage par cycle n'est pas toujours suffisant).

En contre-partie, le doublet à puits chaud et froid nécessite le respect de consignes assez strictes : les volumes alternativement traités ainsi que les quantités d'énergie prélevée par le chauffage et la climatisation doivent être équilibrés, sinon individuellement sur chaque cycle du moins en moyenne sur plusieurs cycles consécutifs.

N.B. Toutefois ces contraintes ont l'avantage d'être bien définies a priori, contrairement au réglage du temps de percée d'un doublet à balayage qui nécessite le traitement par demi-cycle d'un volume dont la valeur est mal connue au début de l'exploitation (dans le cas où l'on ne vise pas à la simple régénération de la nappe).

Equilibre des volumes. Cette mesure est nécessaire pour éviter un envahissement progressif de l'aquifère (et recyclage) par le stock dont la production est excédentaire. Mais la progression du front d'un cycle à l'autre est forcément lente, puisqu'elle est uniquement causée par ce volume résiduel. Un équilibre moyen sur plusieurs cycles suffit alors, car le temps de percée correspondant au traitement en continu du volume excédentaire est généralement plusieurs fois supérieur à la durée d'un cycle. Un déséquilibre du bilan hydraulique est donc acceptable sur quelques cycles à condition d'être rattrapé au cours des cycles suivants.

Equilibre des quantités d'énergie. Un déséquilibre entre les quantités d'énergie respectivement exploitées en chauffage et climatisation conduit irrémédiablement les niveaux thermiques des deux stocks, à évoluer dans le sens de la production en surplus, jusqu'à atteindre des températures au-delà desquelles le système n'est plus exploitable. Seule, la proximité d'une zone à température indépendante du stockage (sol, si la nappe est à faible profondeur) permettra d'atteindre un nouvel équilibre par la fourniture des calories (ou frigories) manquantes, une fois cette limite atteinte par l'onde thermique.

Cette évolution des températures, consécutive à un déséquilibre énergétique, est également présente lors d'une exploitation par balayage, mais son effet est alors fortement ralenti (courbes en tireté de la figure 4.1).

Les conditions d'équilibre volumique et énergétique étant satisfaites, la première saison de fonctionnement va créer une dissymétrie initiale : mais du fait des échanges diffusifs, les courbes thermiques de production d'eau chaude et d'eau froide vont rapidement (quelques cycles), s'établir de façon symétrique par rapport à la température initiale de la nappe.

*

* *

Des calculs comparatifs réalisés dans le cadre de l'étude citée pour le Plan Construction ont permis de démontrer que le comportement thermique du système est voisin de celui de deux puits uniques sans interférence réciproque, à condition que la distance entre les deux ouvrages soit suffisante pour que les zones chaude et froide restent disjointes ; les températures de l'eau extraite en phase de production sont alors voisines de celles obtenues pour le fonctionnement de deux puits uniques, sans influences réciproques.

Cette condition, qui revient à imposer un temps de percée au moins égal à la durée d'un cycle (un an), définit la distance minimale à respecter entre ouvrages pour un volume de stock donné. Quant à la prévision des températures, elle est directement déduite des résultats obtenus pour le puits unique (chapitre 2).

5.2. Ecoulement de nappe négligeable ($V_D \# 0$)

5.2.1. Volume maximal, écartement minimal entre puits

Afin d'éviter le recouvrement des zones occupées par les deux stocks, et pour un écartement D imposé entre les forages, le volume traité au cours de chaque demi-cycle ($v_F = v_C = v$) ne doit pas dépasser $Q\ t_p/2$:

$$v = v_F = v_C < \frac{\pi}{6} \frac{\gamma_A}{\gamma_F} D^2 h \# 0{,}3\ D^2 h \qquad (5,1)$$

Inversement, si les volumes sont fixés, la distance entre forages doit dépasser une valeur seuil :

$$D > \sqrt{\frac{6}{\pi}\frac{\gamma_F}{\gamma_A}\frac{v}{h}} \# \sqrt{\frac{v}{0,3\ h}} \qquad (5,2)$$

5.2.2. Dimensions minimales

Les résultats obtenus pour un stockage par puits unique étant applicables, le taux de restitution de la chaleur sensible stockée peut atteindre 75 % pour un cycle stabilisé à condition que l'épaisseur du réservoir, l'épaisseur de sa couverture (éponte supérieure) et le rayon thermique du stockage, soient supérieurs aux dimensions minimales consignées dans le tableau I du § 2.2.3. On peut en déduire le volume minimal de l'eau à injecter dans chaque stock, et corrélativement la distance minimale entre les forages.

Pour une exploitation intersaisonnière (cycles de 12 mois) :

(i)	épaisseur efficace de l'aquifère	$h > 12$ m	(5,3)
(ii)	épaisseur de l'éponte	$e > 16$ m	(5,4)
(iii)	rayon thermique de chaque stock	$R_{th} > 55$ m	(5,5)
(iv)	volume d'eau injectée	$v_F = v_C > 68000$ m3	(5,6)
(v)	distance entre forages (pour h = 12 m)	$D > 140$ m	(5,7)

5.2.3. Evolution des températures en phase de production

Si l'ensemble des conditions énoncées ci-dessus (§ 5.2.1. et 5.2.2.) sont satisfaites, et en l'absence d'écoulement régional sensible de la nappe, les températures de l'eau produite peuvent être calculées à partir de l'abaque de la figure 5.2, qui fournit l'évolution de la température réduite :

$$\theta_R = \frac{\theta - \theta_o}{\theta_i - \theta_o} \qquad (5,8)$$

en fonction du volume récupéré réduit :

$$v_R = v / v_i \qquad (5,9)$$

(où v_i est le volume injecté), au cours des 7 premiers cycles d'exploitation.

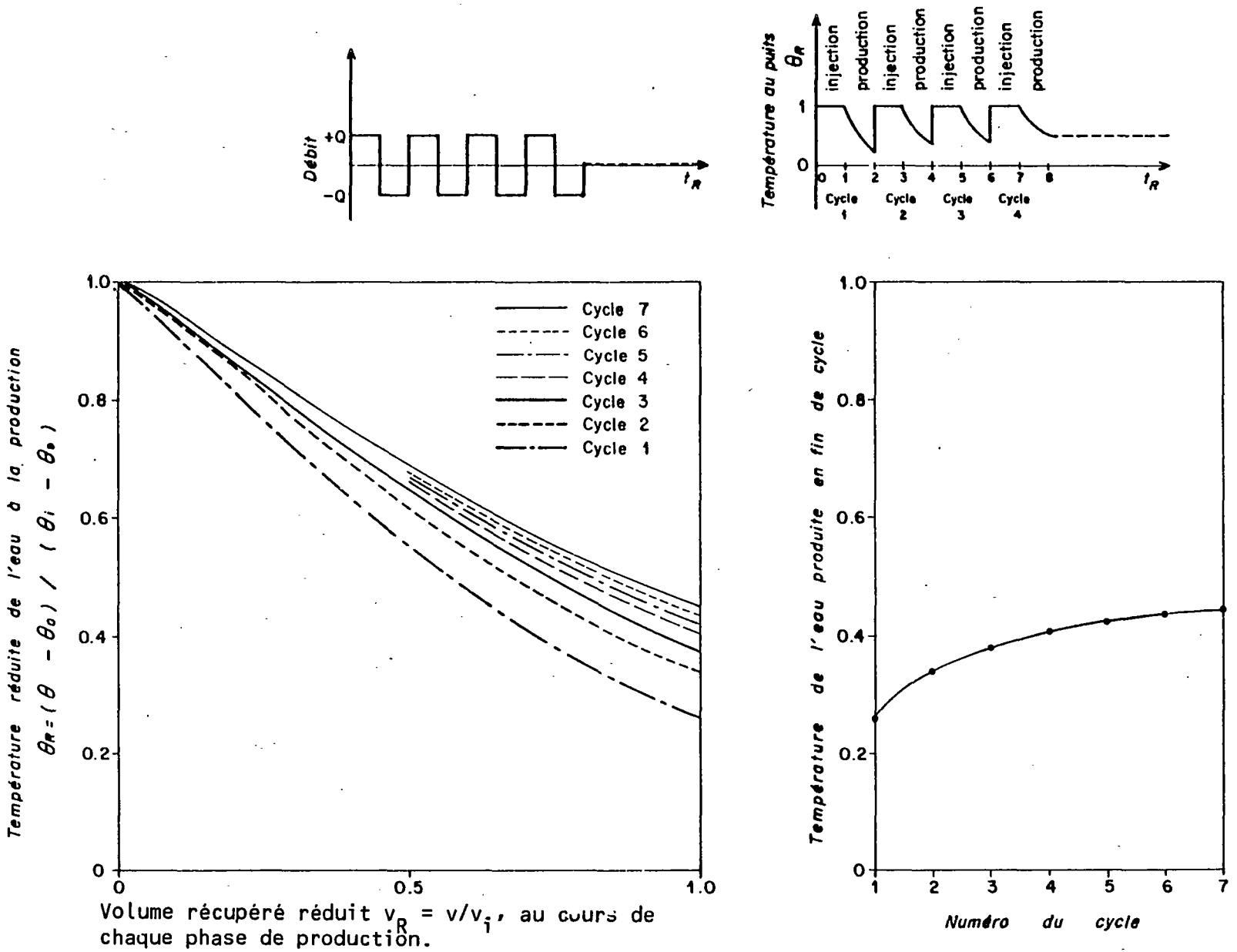


Figure 5.2 - Stockage cyclique par puits unique - Evolution des températures à la production (Pe = 10, Λ = 10)

Cet abaque est établi pour le cas limite (Pe = 10, Λ = 10), avec un débit de fonctionnement constant sans phase d'attente, l'échelle des abscisses correspond alors au temps réduit $t_R = t/t_i$.

En cas d'exploitation à débit variable, on peut, en première approximation, utiliser le même abaque en remplaçant l'échelle des temps par une échelle des volumes d'eau récupérés au cours des phases de production successives.

Lorsque les cycles se stabilisent (les températures du coussin tiède formé par les pertes thermiques dans le milieu géologique environnant parviennent à équilibre), la température réduite de l'eau en sortie de stock varie à peu près linéairement de 1 à 0,5. Le taux de restitution de l'énergie injectée (quantité de chaleur récupérée/quantité de chaleur injectée) et alors de l'ordre de 0,75 (il s'agit d'un taux de référence avec des quantités de chaleur évaluées en prenant la température initiale du réservoir pour référence).

Si les dimensions du stock sont sensiblement différentes de celles du cas limite (Pe $\neq$ 10, $\Lambda \neq$ 10), d'autres abaques sont disponibles (Sauty, 1981) pour des couples de Pe et Λ prenant les valeurs 1, 10 et 100, entre lesquelles on peut interpoler.

Si les dimensions sont supérieures, le rendement est amélioré ; inversement, il peut être très réduit si l'épaisseur ou le rayon du stock sont notoirement faibles.

5.3. Ecoulement de nappe non négligeable ($V_D \neq 0$)

5.3.1. Volume maximal, écartement minimal entre puits

Afin d'éviter le recouvrement des zones chaude et froide :

- si l'écartement des forages D est fixé, les volumes ne doivent pas dépasser $Q\ t_p/2$:

$$v = v_F = v_C < 0{,}3\ D^2 h\ f(Q_R,\ \alpha) \qquad (5,10)$$

- si les volumes traités par cycle sont imposés, la distance entre forages doit dépasser le seuil :

$$D > \sqrt{\frac{v}{0,3\ h\ f\ (Q_R,\ \alpha)}} \qquad (5,11)$$

où la fonction f est donnée par l'abaque de la figure 3.6,

- les débits étant inversés à l'issue de chaque demi-cycle, l'angle α prend alternativement les valeurs : α_1 et $180° - \alpha_1$; le calcul de D sera effectué avec la valeur la plus défavorable :

$$90° \leqslant \alpha \leqslant 180° \qquad (5,12)$$

pour laquelle la fonction f est inférieure à l'unité,

- les abaques des figures 5.3 et 5.4 donnent directement la distance minimale D en fonction de la vitesse de nappe V_D (en m/an) et du rapport Q/h (en m3/h,m), sans passer par la variable adimensionnelle Q_R, pour deux cas particuliers :
  .doublet parallèle à l'écoulement (α = 180°),
  .doublet perpendiculaire à l'écoulement (α = 90°).

5.3.2. Pertes thermiques dues à l'écoulement de la nappe.

L'écoulement de la nappe fait dériver les stocks chaud et froid, si bien qu'en phase de repompage, les stocks ne sont plus centrés sur les forages. Si les conditions minimales de distances entre forages sont respectées, on peut en première approximation appliquer les résultats du paragraphe 2.2.4. relatif au puits unique : les températures de l'eau extraite chutent plus ou moins rapidement suivant une loi qui dépend du déplacement relatif d_R :

$$d_R = V_D\ \tau\ \sqrt{5,2\ h/v} \qquad (5,13)$$

cette influence peut être calculée à l'aide de l'abaque de la figure 2.2. Il en résulte une réduction globale du taux de restitution de l'énergie injectée, telle que consignée dans le tableau IV (cf § 2.2.4.).

Les abaques des figures 5.3 et 5.4 donnent directement d_R en fonction de V_D et Q/h dans le cas de cycles de 12 mois.

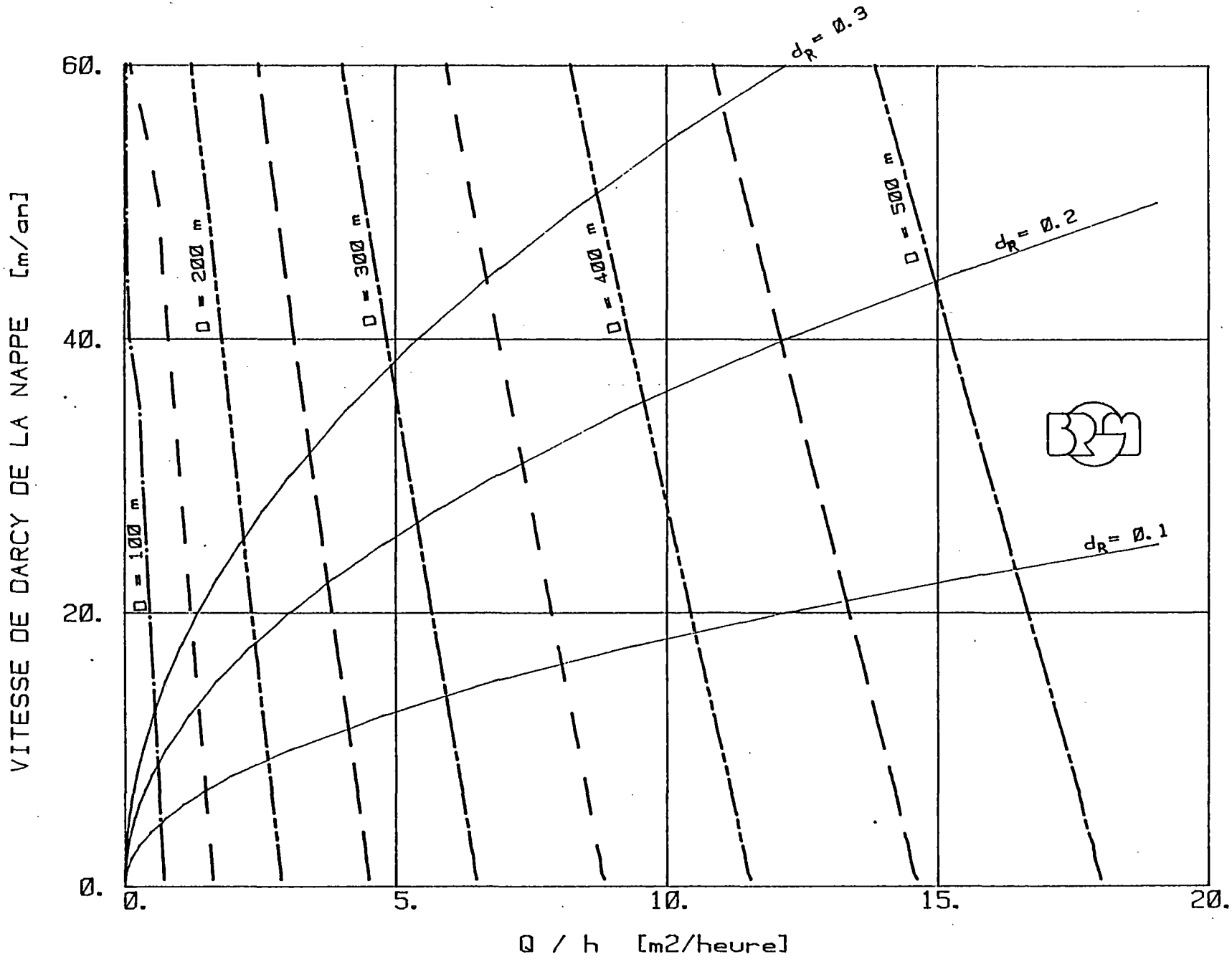


Figure 5.3 - Distance minimale D entre puits, en fonction de la vitesse de Darcy V_D et de Q/h, pour α = 180° (ou 0°)

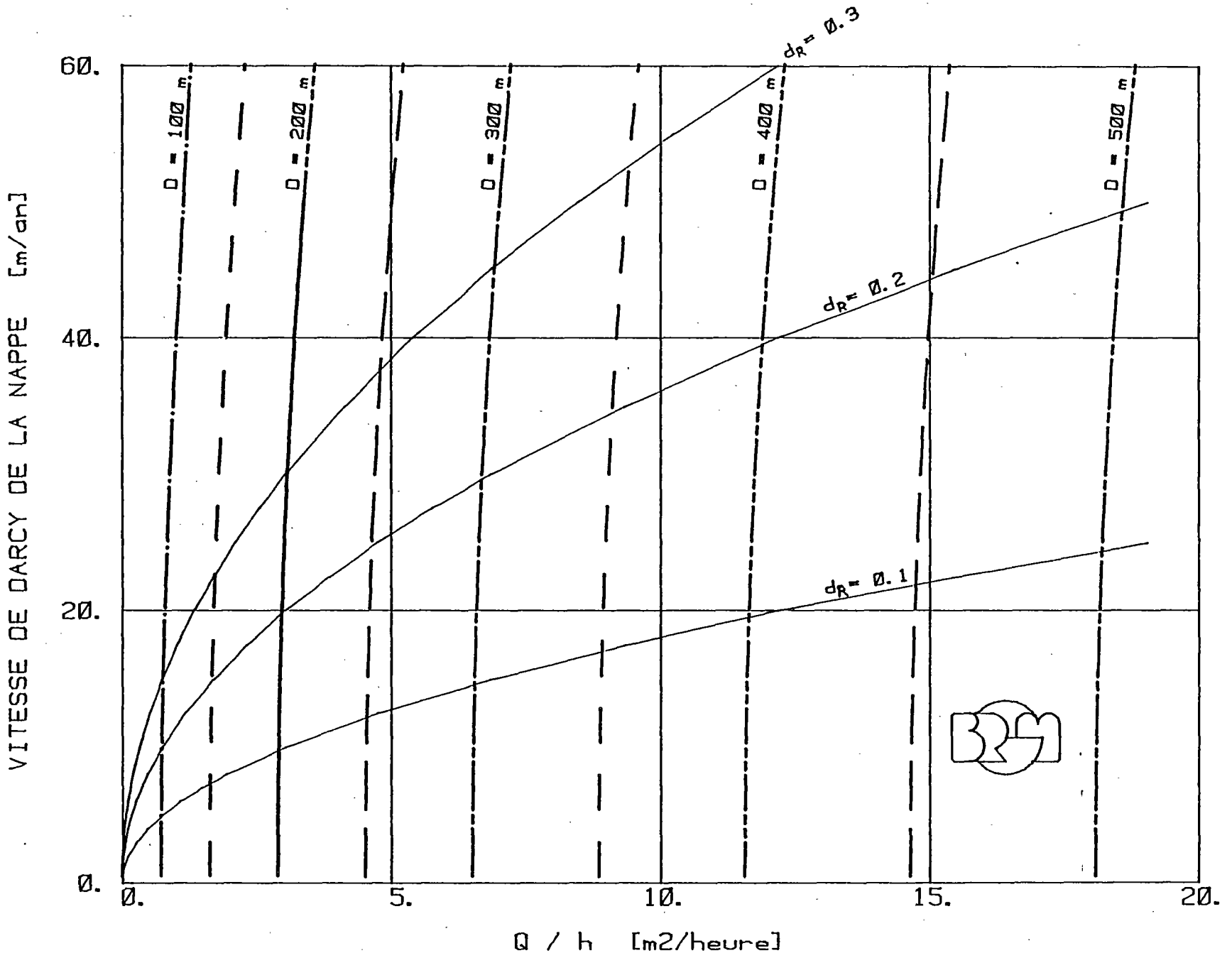


Figure 5.4 - Distance minimale D entre puits, en fonction de la vitesse de Darcy V_D et de Q/h, pour α = 90°

5.3.3. Influences conjuguées de la diffusion et de l'écoulement.

Les conséquences des pertes thermiques dues à la diffusion peuvent, si l'écoulement n'est pas trop élevé ($d_R < 0,3$), être calculées par les méthodes données en l'absence d'écoulement (§ 5.2.) ; l'effet complémentaire des pertes par écoulement sont ensuite superposées.

Pratiquement, on peut évaluer l'évolution de la température réduite :

$$\theta_R = f(t_R) = f_1(t_R)\ f_2(t_R) \qquad (5,14)$$

où $f_1(t_R)$ est la température donnée pour le cycle considéré par l'abaque de la figure 5.2, et $f_2(t_R)$ est la température évaluée pour le paramètre d_R convenable (figure 2.2).

N.B. Si les dimensions h, e et R_{th} sont inférieures aux valeurs critiques rappelées au § 5.2.1., il convient de prendre la fonction f_1 dans l'abaque établi pour les valeurs des paramètres adimensionnels Pe, Λ et ε correspondants (Sauty, 1981).

5.4. Conditions pour la faisabilité d'un projet "puits chaud - puits froid".

Pour envisager un projet de stockage intersaisonnier par système "puits chaud - puits froid", on vérifiera (méthode simplifiée) que le dispositif satisfait simultanément aux conditions suivantes :

- épaisseur efficace de l'aquifère	(1)	$h > 12$ m	(5,15)
- épaisseur de l'éponte supérieure	(2)	$e > 8$ m	(5,16)
(une épaisseur de 16 m peut être considérée comme infinie ; une épaisseur de 8 m réduit le taux de restitution de 10 %),			
- rayon thermique du stockage	(3)	$R_{th} > 55$ m	(5,17)
- volumes injectés	(4)	$v_F = v_C = v$	(5,18)
(v_F : volume d'eau froide,	(5)	$v > 5700 \times h$	(5,19)
v_C : volume d'eau chaude)		(h en m, V en m3)	
	(6)	$v > 14\ V_D^2\ h$	(5,20)
		(V_D en m/an)	

- distance entre forage	(7)	$D > 140$ m	(5,21)
	(8)	$D >$ valeur calculée par abaque fig. 5.3 et 5.4	(5,22)
- écarts thermiques moyens équilibrés (seulement si une dérive des températures n'est pas acceptable)	(9)	$\Delta\theta_C + \Delta\theta_F = 0$	(5,23)

Les conditions (1), (2) et (3) limitent les pertes par diffusion ; la condition (5) est la conséquence directe de (3). La condition (4), respectée en moyenne sur plusieurs cycles, interdit l'excédent systématique de l'un des stocks. La condition (6) limite à 20 % les pertes par advection (écoulement régional de la nappe). Les conditions (7) ou (8) évitent les pertes supplémentaires par chevauchement des zones de stockage chaud et froid.

5.5. Exemple de doublet à puits chaud et puits froid

Reprenons le doublet exploité au § 3.3.4. : un volume de 146 000 m3 d'eau est exploité chaque hiver pour le chauffage avec refroidissement de 6°C avant réinjection dans le réservoir aquifère. La nappe, de 20 m d'épaisseur, a une température naturelle de 13°C ; elle est soumise à un écoulement régional dont la vitesse (de Darcy) est 3.10^{-7} m/s.

Contrairement au fonctionnement de l'exemple précédent, les 146 000 m3 sont repompés chaque été après inversion des débits (pompage l'été dans le puits d'injection hivernale), puis réinjectés après élévation de leur température de 6°C en moyenne (à l'aide de capteurs solaires par exemple), de façon à assurer la recharge thermique du réservoir.

Le rayon thermique du stock est donc :

$$R_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_F}{\gamma_A}\,\frac{V}{\pi h}} = \sqrt{\frac{1}{0,6}\,\frac{146\ 000}{\pi\ 20}} = 62 \text{ m}$$

Sur 6 mois, la dérive du stock thermique sous l'action de l'écou-

lement régional est :

$$d_{th} = \frac{\gamma_F}{\gamma_A} V_D t = \frac{1}{0,6} 3.10^{-7}.86400.365/2 = 8 \text{ m} ;$$

le déplacement réduit ($d_R = d_{th}/R_{th}$) vaut donc 13 %.

Si l'épaisseur de l'éponte supérieure est au moins égale à 16 m, l'ensemble des conditions du paragraphe 5.4. sont satisfaites.

Abstraction faite de l'écoulement régional, l'efficacité thermique de chaque stock dépasse 75 % en régime stabilisé. Les pertes dues à cet écoulement réduisent cette efficacité à environ 68 % par chute thermique supplémentaire en fin de production (cf § 2.2.4. : tableau II et figure 2.2, avec 68 % = 0,75 x 0,91).

Les calculs des températures aux deux puits pour un fonctionnement avec écarts thermiques imposés, nécessite le recours à un modèle mathématique. Celui-ci permettra de déterminer l'évolution vers un régime cyclique stabilisé.

Profitant de l'écoulement de la nappe, on pourra priviligier l'un des deux stocks : l'implantation du doublet parallèlement à l'écoulement régional ($\alpha = 0°$) avec puits chaud situé en amont, conduit à récupérer une partie des pertes de calories sur le puits froid : l'ensemble du système aura tendance à évoluer vers des températures légèrement croissantes si les quantités de calories et de frigories sont équilibrées. En cas d'excédent de la production de froid, on pourra utiliser cette propriété pour se rapprocher d'un bilan énergétique équilibré.

Dans d'autres cas, on désirera conserver la symétrie entre les stocks par une implantation du doublet perpendiculairement à l'écoulement ($\alpha = 90°$). Les pertes en calories et frigories seront donc entraînées vers l'aval de la nappe.

*

* *

Par contre, dans le cas d'un fonctionnement à températures d'injection imposées, avec écoulement transversal, il est possible d'estimer

l'évolution des températures à l'aide des abaques établis pour un stockage par puits unique. L'évolution thermique à stabilisation correspondrait alors approximativement au graphique de la figure 5.5 qui combine les facteurs de dissipation par diffusion (fig. 5.2) et par advection (fig. 2.2).

On notera toutefois que la chute thermique finale a été évaluée de façon pessimiste : en fait, l'exploitation d'un stock excentré (par l'écoulement régional) permet de récupérer une partie des calories dissipées par diffusion horizontale à travers le front.

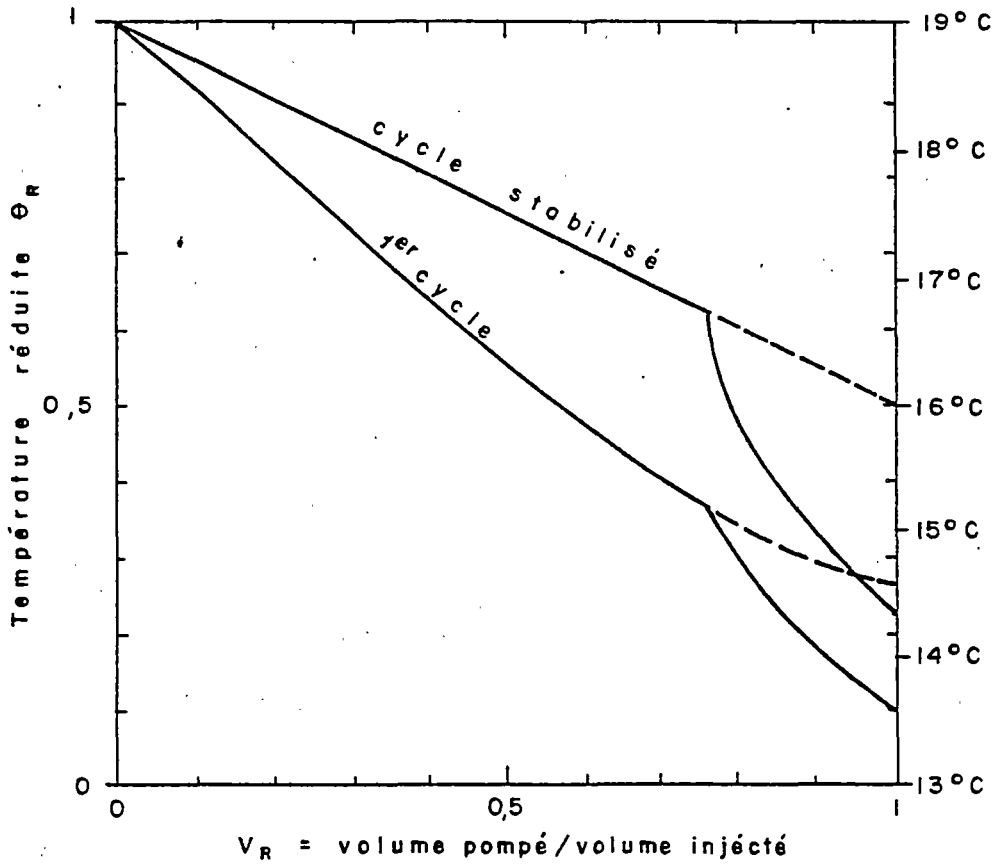


Figure 5.5 - Estimation des températures de l'eau extraite du puits chaud dans l'exemple de fonctionnement avec injection à température constante 19°C

6. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME D'EXPLOITATION

6.1. Rassemblement des données de base

6.1.1. Evaluation des besoins et ressources énergétiques.

Au stade de l'avant-projet, il convient de procéder à une évaluation rapide des besoins énergétiques pour dégager des ordres de grandeur. Par exemple, dans le cas d'une exploitation destinée au chauffage de bâtiments, les données suivantes seront estimées : volume à chauffer, nombre de degrés-jour unifiés compte tenu des conditions climatiques locales, coefficient de déperdition de la chaleur. Bien entendu, si des données plus précises sont disponibles, elles pourront avantageusement être prises en compte.

Si l'on envisage d'exploiter directement la chaleur naturelle de la nappe, l'évaluation de la ressource repose sur la connaissance du débit exploitable par le ou les forages projetés, sans oublier les limitations éventuelles de l'évacuation en surface ou par réinjection (injectabilité du réservoir). Par contre, dans le cas d'un stockage, les ressources énergétiques proviennent généralement du prélèvement sur des rejets industriels ou de l'acquisition de calories solaires à l'aide de capteurs. On doit vérifier quelle portion des besoins (majorés par les pertes du stockage) est susceptible d'être couverte par ces ressources.

Les quantités d'énergie à extraire (et éventuellement à stocker) sont traduites en terme de débits d'exploitation (moyen et de pointe), et d'écart thermique entre température de l'eau produite, et température du rejet. Les contraintes sur les températures extrêmes admissibles doivent également être définies.

6.1.2. Caractéristiques du réservoir

Nous avons tâché d'établir une liste des différents paramètres caractéristiques du réservoir, hiérarchisée en fonction de leur influence sur le comportement thermique :

1. Productivité des ouvrages (et injectabilité en cas de réinjection),
2. Intensité et direction de l'écoulement régional (piézométrie et perméabilité),

3. Epaisseur productive et homogénéité du réservoir (facteurs très importants pour un dispositif de stockage),
4. Qualité des eaux (en vue notamment des risques de colmatage et de corrosion),
5. Température naturelle de la nappe,
6. Epaisseur de l'éponte supérieure (profondeur du toit de la nappe sous le sol),
7. Profondeur du niveau piézométrique de la nappe.

6.1.3. Fiche des renseignements à fournir.

La figure 6.1 présente un bordereau de renseignements à fournir pour l'évaluation rapide d'un projet.

6.1.4. Eléments économiques.

Le choix entre différents projets dont la faisabilité technique apparaît possible, repose sur des considérations économiques : investissements, frais d'exploitation, économie d'énergie, temps de retour de l'investissement.

Il convient donc d'estimer l'ordre de grandeur des différentes dépenses occasionnées par l'installation :

* **Investissements :**
  .forage(s) : déplacement, installation et immobilisation du matériel ; foration, équipement, tests et essais ;
  .pompe(s) d'exhaure et éventuellement d'injection ;
  .surcoût de l'équipement de surface : échangeur(s), pompe(s) à chaleur, réseau, ballons de stockage éventuels en surface ;
  .en cas de stockage en nappe : branchement sur une source d'énergie industrielle, installation de capteurs solaires.

INTITULE DU PROJET .....

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ... m2/s
- Pente piézométrique : i = ... m/m
- Epaisseur efficace : h = ... m
- Température initiale : θ = ... °C
- Qualité de l'eau :

FORAGES VOISINS

P U I T S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h				
Distance au centre du doublet en m				
Angle β (Orientation/ écoulement)				

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☐ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : ..... m

.Orientation/écoulement, α : ..... degrés

.Débit Q en période de chauffe : m3/h

.Durée de la période de chauffe : ..... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

Figure 6.1 - Bordereau des renseignements techniques

* **Frais d'exploitation :**
  .consommation énergétique des PAC éventuelles,
  .consommation énergétique des pompes hydrauliques et de circulation,
  .entretien : vérifications, entretien, traitement anticorrosion, stimulations périodiques,
  .provisions pour renouvellement de matériel (capteurs solaires, le cas échéant),
  .achat éventuel des calories à stocker.

* **Rentabilisation :** la rentabilisation de l'installation dépendra bien sûr des économies d'énergie précisées par l'étude technique, mais aussi des facteurs économiques tels que conditions de prêts, prévision du coût futur de l'énergie avec ses variations diurnes et saisonnières, qui peuvent être décisifs ; une évaluation de ces éléments est donc indispensable ; en cas de doute plusieurs hypothèses pourront être envisagées.

6.2. Choix du système

6.2.1. Evaluation technique

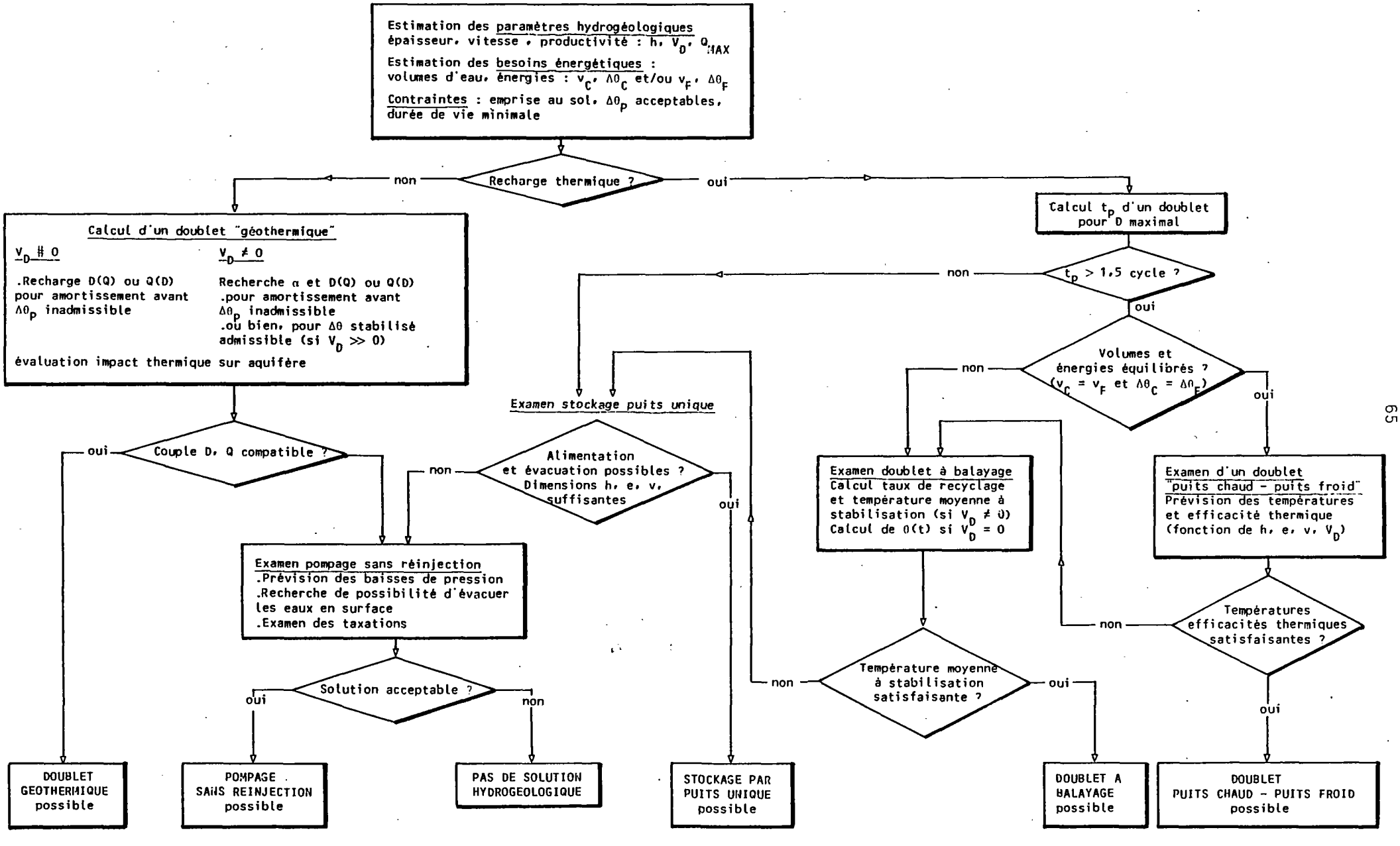
L'évaluation de la faisabilité technique des différents systèmes d'exploitation résulte des méthodes décrites aux chapitres 2 à 5. Le choix technique dépend de leur faisabilité et de leur intérêt relatif. L'organigramme présenté en figure 6.2 tente de synthétiser les différentes phases du choix ; il débouche sur des solutions, hiérarchisées en fonction de leur impact sur la ressource. En cas de recharge thermique, le doublet à puits chaud et puits froid est préféré au doublet à balayage, et le stockage par puits unique vient en dernier. En l'absence de recharge, le doublet est préféré au pompage sans réinjection.

Description de l'organigramme (fig. 6.2).

L'examen technique débute par une collecte des données hydrogéologiques, des besoins énergétiques et des différentes contraintes (fig. 6.1).

La partie gauche de l'organigramme concerne l'exploitation sans recharge thermique.

Fig. 6-2 _ CHOIX DU SYSTEME D'EXPLOITATION



Quand plusieurs solutions sont techniquement possibles, le choix est basé sur les critères suivants :
- économie d'énergie et limitation de l'impact (critère collectivité),
- rentabilité individuelle de l'opération (critère industriel).

Le fonctionnement en doublet est examiné en priorité. Compte-tenu des caractéristiques de la nappe, notamment épaisseur et vitesse, la distance minimale D entre forages est évaluée (équation 3,19) pour permettre une durée de vie suffisante (rentabilisation avant chute thermique par recyclage). Dans le cas d'un écoulement de nappe important, le recyclage partiel se traduit par une évolution vers une température stabilisée qui est éventuellement acceptable (équations 3,21 ou 3,25). Si l'emprise au sol est inférieure à la distance D nécessaire, on pourra au contraire évaluer le débit maximal exploitable.

Si aucun couple (Q, D) n'est acceptable la solution du pompage sans réinjection dans l'aquifère d'origine est envisagée. On doit alors vérifier la possibilité de soutirer ce débit du réservoir, puis de l'évacuer en surface. Il est utile de prévoir l'évolution des pressions dans l'aquifère, et en particulier dans l'ouvrage lui-même (en l'absence de réalimentation hydraulique par une limite voisine, cette évolution est calculée à l'aide de l'équation (2,1) ; la mise en route d'autres forages serait également à prendre en compte). Les conditions locales de taxation sont à examiner.

S'il existe une source d'énergie gratuite ou à bon marché en saison creuse, les solutions avec recharge thermique de la nappe seront examinées en priorité, elles correspondent à la partie droite de l'organigramme.

Compte-tenu du débit nécessaire et de l'emprise au sol, le temps de percée d'un doublet présentant l'écartement maximal admissible entre puits est envisagé. Si cette durée est supérieure au fonctionnement sur 1,5 cycles, un stockage par doublet est envisageable.

Le système du doublet à puits chaud et puits froid sera examiné en priorité, à condition toutefois qu'il soit possible d'équilibrer les volumes exploités en hiver et en été, ainsi que les quantités de calories et de frigories injectées dans chaque stock. Si ces conditions sont vérifiées, on évalue les dimensions des stocks qui doivent satisfaire aux critères minima définis par les équations (5,3) à (5,5). Les éventuels dérives des stocks par advection sont également prise en compte (figure 2.2).

Si l'efficacité du dispositif est insuffisante, ou si l'équilibrage volumique et thermique ne peut être assuré, le système du doublet à balayage est envisagé. Les abaques fournis au chapitre 4 permettent de calculer le taux de recyclage (fig. 3.7) d'où la température moyenne à stabilisation en cas d'écoulement. Si la vitesse régionale peut être négligée, il est même possible de calculer l'évolution des températures par convolution des courbes de la figure 3.4.

Si ces conditions de fonctionnement ne sont pas satisfaisantes, ou si l'emprise au sol est par trop faible, le stockage par puits unique pourra être envisagé à condition qu'une alimentation en eau injectable dans l'aquifère soit possible, ainsi que l'évacuation des eaux en surface au moment de la récupération des calories stockées. On vérifie que les dimensions du stock sont suffisantes pour assurer un taux de restitution élevé de la chaleur injectée (équations (5,3) à (5,5)). Dans le cas contraire, et notamment si l'épaisseur équifère est faible, le stockage intersaisonnier n'est pas possible dans de bonnes conditions.

L'exploitation directe de l'eau de l'aquifère avec évacuation en surface est examinée (cf supra).

6.2.2. Evaluation économique.

Les calculs économiques sont extrêmement simplifiés au stade de l'avant-projet, compte tenu des diverses incertitudes sur l'épaisseur efficace et l'homogénéité de l'aquifère, sur l'écoulement de la nappe et la productivité des ouvrages (les données cartographiées concrétisent des tendances régionales). Par contre une fois achevé et testé le premier forage, et effectuées quelques mesures (au moins de niveau piézométrique) sur les ouvrages voisins, des évaluations beaucoup plus précises seront justifiées.

Les éléments économiques désignés au § 6.1.4., joints à l'évaluation technique (§ 6.2.1.) permettent une estimation des dépenses, ainsi que des économies d'énergie à espérer, pour une configuration donnée.

La recherche d'une optimisation de l'installation doit être un des soucis principaux du projeteur. Bien qu'au stade de la préétude, un recours aux méthodes de la recherche opérationnelle soit hors de proportion avec la qualité des informations utilisables, du moins des calculs comparatifs directs peuvent être effectués sur plusieurs variantes. On peut ainsi se faire une idée de la "sensibilité" de l'économie du projet à quelques paramètres tels que dimension du stock, températures de fonctionnement, stratégie de déstockage (utilisation du stock dès novembre, ou attente jusqu'à janvier, par exemple dans le cas d'un chauffage).

6.3. Passage au projet définitif

6.3.1. Mesures à effectuer

La cartographie fournit une évaluation probable des différents paramètres géologiques utiles (§ 6.1.2.). Un certain nombre de mesures et tests sont souhaitables avant le passage au projet définitif, et ce d'autant plus si la formation risque d'être hétérogène. Pour une exploitation sans stockage, une enquête sur les forages avoisinants et les essais sur le forage peuvent être suffisants. En cas de stockages, un certain nombre de mesures complémentaires sont souhaitables, parmi les suivantes :

* A l'occasion de la foration et de la réception du premier ouvrage de l'installation :
  - coupe géologique,
  - géophysique en forage (diverses diagraphies),
  - mesures des perméabilités et coefficients d'emmagasinement par essai de débit avec observation des niveaux dans le puits et dans un piézomètre latéral ou des forages voisins préexistants,
  - des mesures au micromoulinet effectuées dans le puits en cours de test, préciseront la répartition de zones productives et l'hétérogénéité de la répartition des perméabilités, du moins sur une verticale,
  - un traçage par injection d'un marqueur de l'eau dans un piézomètre latéral, lors de l'essai de débit, apporterait une certitude bien plus grande sur l'épaisseur efficace et l'homogénéité du réservoir (connaissance des paramètre Pe et Λ, influents sur l'efficacité d'un stockage),
  - analyses d'eau, mesure de sa température,
  - mesures in situ des conductivité et diffusivité thermiques.

* Ces différentes mesures pourront être vérifiées par leur répétition sur le(s) ouvrage(s) ultérieur(s) éventuel(s) (cas du doublet). Elles auront d'autant plus d'intérêt que la formation est soupçonnée d'hétérogénéité. Le recours à 2 forages (ou plus) réalisé dans le même aquifère permettra d'effectuer des tests d'injectabilité sans risque majeur de colmatage, par fonctionnement en doublet et non par injection d'eau étrangère à la formation.

* Mesures des niveaux piézométriques dans le nouvel ouvrage et les forages voisins (écoulement de la nappe).

* Dans le cas d'une exploitation par doublet, l'injection d'un traceur lors de la mise en service apportera des renseignements précieux sur l'épaisseur efficace et l'hétérogénéité de la formation à l'échelle même du dispositif. En effet, l'eau se déplaçant en moyenne 3 à 6 fois plus rapidement que les fronts thermiques, le comportement du traceur autorisera une prévision efficace de l'évolution thermique. Cette opération est particulièrement souhaitable pour un stockage par doublet à puits chaud et puits froid, sur lequel on a intérêt à ce que les stocks chaud et froid restent disjoints, ce qui, en l'absence de recours à un traçage chimique, ne serait possible que par mise en place et suivi thermique d'un forage d'observation au centre du dispositif.

6.3.2. Simulations thermiques

Les calculs par abaques, proposés dans le présent manuel, supposent une exploitation simplifiée (débits moyens et écarts thermiques ou températures moyens), et un réservoir homogène ; les écoulements de nappe sont pris en compte de façon d'autant plus approchée qu'ils sont conséquents.

Si ces simplifications se révèlent grossières, compte tenu de l'approfondissement de la connaissance de la géologie locale et de la définition des conditions d'exploitation, l'étude du projet définitif (d'un stockage, notamment) exige le recours à des simulations sur modèles mathématiques bi- ou tri-dimensionnels suivant les cas. Cette nécessité sera accrue si l'économie du projet est voisine des limites de faisabilité, et requiert des évaluations précises. La recherche d'une solution

optimale implique également une simulation relativement précise du fonctionnement thermique de l'ensemble.

Les méthodes numériques pour réaliser ces simulations sur ordinateur sont relativement complexes en ce qui concerne le réservoir, mais elles sont maintenant bien au point. La précision des résultats est essentiellement limitée par celle des paramètres introduits dans le modèle (d'où l'intérêt de la campagne de mesures décrite au paragraphe précédent).

6.3.3. Optimisation économique

Lors de la définition du projet définitif, la connaissance des différents paramètres économiques (investissements, frais de fonctionnement, conditions de prêts, coût de l'énergie), joints à la disposition d'un modèle de simulation thermique, permet de rechercher la conception optimale et une stratégie d'exploitation optimisée, compte tenu des critères économiques que l'on se fixe.

En phase de fonctionnement, le suivi des températures en divers points de l'installation de surface et du stock permet de rechercher une tactique de gestion du stock, optimisée jour par jour, compte tenu notamment des conditions météorologiques rencontrées. La mise en place d'un asservissement de l'exploitation aux températures mesurées par l'intermédiaire d'un micro-ordinateur permettra dans un proche avenir la recherche automatique de cette optimisation (dont l'efficacité sera évidemment tributaire de la qualité du logiciel mis en oeuvre).

BIBLIOGRAPHIE

AUSSEUR (J.Y.), MENJOZ (A.), SAUTY (J.P.) .- Stockage couplé de calories et de frigories en aquifère par doublet de forages .- *J. Hydrol., 56(1982), 175-200*

AUSSEUR (J.Y.), SAUTY (J.P.) .- Exploitation thermique des aquifères peu profonds - Manuel de préparation des préétudes de faisabilité technique .- *Rapport B.R.G.M. n° 82 SGN 023 EAU, Orléans, 1982*

AUSSEUR (J.Y.), MENJOZ (A.), SAUTY (J.P.) .- Stockage d'eau chaude dans une nappe souterraine : système à puits unique et à doublet de forages .- *Annales I.T.B.T.P., série équipement 102, n° 403, 10-19, 1982*

GRINGARTEN (A.C.), SAUTY (J.P.) .- A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow .- *J. Geophys. Res., 80 (35), 4956-4962, 1975*

GRINGARTEN (A.C.), LANDEL (P.A.), MENJOZ (A.), SAUTY (J.P.) .- Stockage longue durée en nappe phréatique de calories à basse température pour l'habitat .- *Rapport B.R.G.M. n° 79 SGN 683 HYD, 1979 - Paris, Plan Construction, 1980*

GROVE (D.B.), BEETEM (W.A.), SOWER (F.B.) .- Fluid travel time between a recharging and discharging well pair in an aquifer having a uniform regional flow field .- *Water Resour. Res., 6(5), 1404, 1970*

IRIS (P.) .- Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des aquifères peu profonds - Expérience de stockage thermique en nappe phréatique .- *Thèse Doct.-Ing., Paris, 1980*

LANDEL (P.A.), SAUTY (J.P.) .- Etude de l'influence des caractéristiques physiques de l'aquifère et des roches encaissantes sur la température de l'eau au puits de production d'un doublet hydrothermique - rapport final .- *Contrat C.C.E. n° 093-76 EGF - Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 045 GTH, Orléans, 1978*

MENJOZ (A.), SAUTY (J.P.) .- Characteristics and effects of geothermal resources exploitation .- *26ème Congrès géologique international, Paris, 1980 - In : Journal of Hydrology, 56(1982), 49-59*

SAUTY (J.P.) .- Du comportement thermique des réservoirs aquifères exploités pour le stockage d'eau chaude ou la géothermie basse enthalpie .- *Thèse d'Etat ès Sc. Phys., Grenoble, Juin 1981*

SAUTY (J.P.), GRINGARTEN (A.C.), MENJOZ (A.), LANDEL (P.A.) .- Sensible energy storage in aquifers - Part I : Theoretical study .- *Water Resour. Res, April 1982*

SAUTY (J.P.), GRINGARTEN (A.C), FABRIS (H.), THIERY (D.), MENJOZ (A.), LANDEL (P.A.) .- Sensible energy storage in aquifers - Part II : Field expériments and comparison with theoretical results .- *Water Resour. Res., April 1982*

A N N E X E

PRE-ETUDE DE FAISABILITE
DE NEUF CAS TYPES D'EXPLOITATION THERMIQUE
D'AQUIFERES SUPERFICIELS PAR DOUBLETS DE FORAGES

INTRODUCTION

Neuf cas réels de pompes à chaleur par forages eau/eau de 0 à 100 m, et un cas théorique projetés ou réalisés dans la région Ile-de-France ont été étudiés, dans le cadre d'une étude pour l'IAURIF (1), avec la collaboration de : D.I.I., E.D.F. et G.D.F. pour la description économique et technique de surface.

Ils peuvent servir d'exercices d'application des différents abaques, et permettent en plus une illustration des conditions techniques et économiques diverses qu'il est possible de rencontrer. Nous reprendrons dans les pages suivantes l'analyse des conditions hydroénergétiques.

Le tableau suivant localise les cas types étudiés et rappelle en particulier, le type de bâtiment étudié et les aquifères concernés. Seul le cas du complexe de la C.G.T. à Montreuil est un exemple mixte chauffage + climatisation par doublet de forages ; les autres exemples ne font intervenir que des doublets pour le chauffage.

Les résultats des préétudes, obtenus à partir des cartes hydrogéologiques et des abaques hydrothermiques sont comparés à ceux fournis par les études de faisabilité réalisés par ailleurs. Un tableau récapitule ces comparaisons. Sur les neuf cas réels traités, il y en a sept pour lesquels les études de préfaisabilité et de faisabilité ont donné les mêmes résultats : à Auffargis, une meilleure appréhension des paramètres hydrodynamiques et en particulier de l'épaisseur efficace de l'aquifère ont permis de valider le projet. Ce n'est qu'après avoir réduit le débit d'exploitation que le projet envisagé à Viry-Chatillon, à partir de forages à l'Yprésien, s'est avéré positif.

---

(1) Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Ile-de-France)

RESULTATS HYDROTHERMIQUES COMPARES (DE MANIERE SIMPLIFIEE) DE LA PREETUDE ET DE L'ETUDE DE FAISABILITE POUR NEUF CAS D'EXPLOITATION D'AQUIFERE PAR DOUBLET POUR POMPE A CHALEUR

	RESULTAT DE LA PREETUDE	RESULTAT DE LA L'ETUDE DE FAISABILITE	REALISATION DES FORAGES POUR PAC AU 1.05.1982
AUFFARGIS	Défavorable	positif	En cours
CHAMPAGNE SUR SEINE	Très favorable	positif	Terminé (2ème phase en cours)
ATHIS MONS	Favorable	Incertain	Projet abandonné
VIRY-CHATILLON (nappe alluviale)	Très favorable	Positif	Terminée
VIRY-CHATILLON (Yprésien)	Défavorable	Positif	Projet abandonné
MONTREUIL	Favorable	Positif	Terminée
CARRIERES SOUS POISSY	Favorable	Non faite	En fonctionnement sans réinjection
FONTENAY TRESIGNY	Favorable	Positif	Sera réalisée prochainement
SAINT MAUR	Défavorable	Non faite	Projet abandonné

CAS ETUDIES

Désignation et situation	Type	Chauffage	Climatisation	Rejet en aquifère	Rejet en surface	Aquifère	Etudes souterrain	Etudes de surface
CAS TYPE								
Serres Clause à Auffargis (78)	Serres (12.000 m²)	x		x		Sables de Fontainebleau	B.R.G.M.	G.D.F.
Usine Jeumont-Schneider à Champagne-sur-Seine (77)	Usine existante	x		plusieurs doublets x		Alluvions	B.R.G.M.	D.I.I.
H.L.M. La Sablière à Athis-Mons (91)	Collectif ancien (logements)	x		x		Alluvions + (Calcaires de Saint-Ouen)	B.R.G.M.	E.D.F.
H.L.M. La Sablière à Viry-Châtillon (91)	Collectif neuf (logements)	x		x		Alluvions ou Yprésien à galets	B.R.G.M.	E.D.F.
Complexe immobilier de la C.G.T. à Montreuil (93)	Bureaux neufs	x	et x	x		Calcaires du Lutétien et Sables de l'Yprésien	B.R.G.M.	E.D.F.
Immeuble à Carrières-sous-Poissy (78)	Collectif ancien (250 logements)	x		x	ou Forage de pompage et rejet dans réseau pluvial	Craie sous Tertiaire	B.R.G.M.	E.D.F.
Institut Médico-pédagogique de Fontenay-Trésigny (77)	Mixte (Ecole (internat) (+ (Hôpital	x		x		Calcaire de Champigny	B.R.G.M.	E.D.F.
Usine du CRAI à Saint-Maur (94)	Usine neuve	x		x		Calcaires du Lutétien et Sables de l'Yprésien	B.R.G.M.	(D.I.I.)
Petit immeuble à Neuilly (92)	Collectif neuf						B.R.G.M.	E.D.F.
CAS D'ECOLE								
Immeuble existant	Collectif (72 logements)	x		x				G.D.F.

SERRES CLAUSE À AUFFARGIS (YVELINES)
DOMAINE DES BRULINS

DONNEES

Par le demandeur

- chauffage par pompe à chaleur eau/eau,
- il y a déjà un forage de 56 m avec filtre Cuau,
- débit moyen annuel à prendre en compte = 107 m^3/h (9 mois à 120 m^3/h, 3 mois à 70 m^3/h),
- $\Delta t = 6°$,
- le domaine s'étend au maximum sur 400 m au Nord du puits existant.

D'après carte pompes à chaleur Ile de France

- nappe à solliciter : Sables de Fontainebleau : nécessité d'une crépine spéciale,
- sol à + 170,
- nappe à 25 m sous le sol → z nappe = + 145 - nappe libre
- direction d'écoulement de la nappe vers le N.E.,
- gradient de la nappe i ≠ 5/1000
- captage A.E.P. de Saint-Benoit à 1.700 m à l'Est exploité à 80 m^3/h pour 15 m de rabattement,
- épaisseur efficace de l'aquifère = 10 m,
- température de la nappe = 12°,
- transmissivité de l'aquifère 10^{-3} à 5.10^{-3} m^3/s,
- débit possible 10 à 50 m^3/h pour 3 m de rabattement (d'après le demandeur, le forage existant a été testé à 120 m^3/h pour 21 m de rabattement),
- l'eau est de bonne qualité.

D'après le plan

- l'écartement maximal pour les deux forages est de 400 m,
- l'axe du doublet est incliné de 45° par rapport à l'écoulement naturel de la nappe.

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...3,0.10^{-3}... m2/s
- Pente piézométrique : i = ...5,0.10^{-3}... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...10..... m
- Température initiale : θ = ...12..... °C
- Qualité de l'eau : bonne

FORAGES VOISINS

P U I T S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h	80			
Distance au centre du doublet en m	1500			
Angle β (Orientation/écoulement)	15°			

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : .....400..... m

.Orientation/écoulement, α : .....45..... degrés

.Débit Q en période de chauffe : ....107..... m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....12..... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ....6... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1)	: V_D = ...55.....	m/an
.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1)	: α = ...47.....	degrés
.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV)	: Q_r = ...8,5.....	(Q débit moyen hivernal)
.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1)	: t_p = ...1,4.....	ans
..Taux de recyclage (cf 3.3.2)	: I = ...31.....	%
.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2)	: θ = ...9,3.....	°C

DISCUSSION ET VARIANTES

Les conditions d'exploitation thermique de la nappe déterminées par le demandeur conduisent à un taux de recyclage important des eaux réinjectées et de ce fait à une température à stabilisation au pompage trop faible pour assurer le bon fonctionnement de l'installation. Compte-tenu des caractéristiques de l'aquifère cartographiées, il faudrait diminuer sensiblement le débit d'exploitation pour assurer la perennité de la ressource.

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

L'étude de faisabilité a conduit à considérer des caractéristiques hydrodynamiques beaucoup plus favorables à une exploitation par doublet que celles prises en compte pour la préétude et permettent donc de modifier favorablement ses conclusions

	Préétude	Etude
T	$2.5\ 10^{-3}$	4.10^{-3}
b	10 m	30 m
i	$5\ 10^{-3}$	$5\ 10^{-3}$

USINE JEUMONT-SCHNEIDER À CHAMPAGNE-SUR-SEINE (SEINE-ET-MARNE)

DONNEES

Par le demandeur

- chauffage par pompe à chaleur eau/eau,
- il y a 3 puits dans l'usine. Le S.3 pompe 70 m^3/h durant 22 h par jour, soit en moyenne sur l'année 63 m^3/h. Les puits S.1 et S.2 doivent pomper l'eau pour les pompes à chaleur à un débit moyen annuel de 50 m^3/h, avec un débit de pointe de 100 m^3/h. L'ouvrage S.1 peut débiter 30 m^3/h, le S.2 70 m^3/h au maximum,
- $\Delta t = 6°$.

D'après carte pompe à chaleur Ile de France

- cote sol ≠ + 50,
- alluvions épaisses de 5 à 8 m sur Calcaire ± marneux du Lutétien,
- cote nappe ≠ + 47 - nappe libre,
- sens écoulement de la nappe vers le N.W. Gradient faible de l'ordre de 1/1.000. Il peut y avoir en plus réalimentation induite par la Seine qui coule à moins de 100 m à l'Ouest des captages existants (présence d'un barrage à l'aval) si les berges du fleuve ne sont pas colmatées,
- présence de fer et manganèse dans l'eau,
- la transmissivité de l'aquifère alluvial doit être comprise entre 5.10^{-3} et 10^{-2} m^2/s,
- température de la nappe voisine de 12°,
- débit possible 50 à 100 m^3/h pour un rabattement de 3 m,
- plus d'autre captage à proximité,
- épaisseur efficace de l'aquifère de l'ordre de 5 m.

D'après le plan joint

- écartement maximal possible entre forages existants et le puits de réinjection à créer soit 130 à 150 m à l'Est, 180 m au Nord,
- les points I.1, I.2 et I.3 correspondent aux emplacements possibles des puits de réinjection.

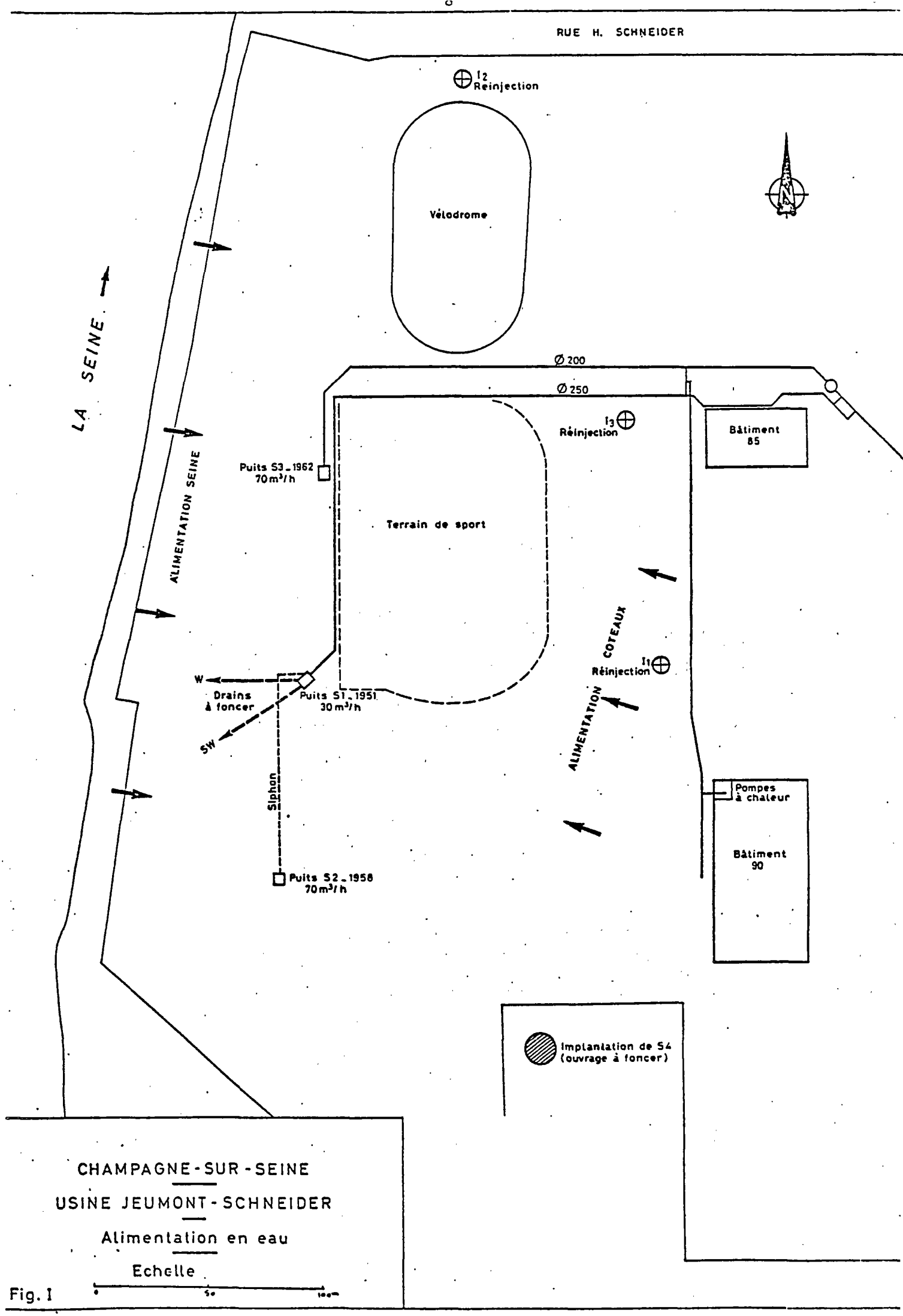

RUE H. SCHNEIDER
I2 Réinjection
Vélodrome
LA SEINE
ALIMENTATION SEINE
Ø 200
Ø 250
I3 Réinjection
Bâtiment 85
Puits S3 - 1962 70 m³/h
Terrain de sport
ALIMENTATION COTEAUX
I1 Réinjection
W
Drains à foncer
Puits S1 - 1951 30 m³/h
SW
Siphon
Pompes à chaleur
Bâtiment 90
Puits S2 - 1958 70 m³/h
Implantation de S4 (ouvrage à foncer)
CHAMPAGNE-SUR-SEINE
USINE JEUMONT-SCHNEIDER
Alimentation en eau
Echelle

Fig. I

Préétude historique

Le dispositif envisagé se situant dans un contexte hydrodynamique tourmenté (axe drainant avec alimentation par les côteaux et par la Seine), il n'est pas possible de présenter ces résultats sous forme de tableaux.

D'ores et déjà, on ne doit pas envisager la réinjection au point I_1 car il y aurait un risque de recyclage rapide, notamment sur S1, si il est confirmé une réalimentation par les côteaux par rapport à S_1. Par contre, en réinjectant en I_3 ou en I_2, aucun risque n'est à craindre, car un recyclage n'est possible que sur le puits de pompage placé en S_3 non exploité par les pompes à chaleur.

H.L.M. S.N.C.F. LA SABLIÈRE À ATHIS-MONS (ESSONNE)

DONNEES

Par le demandeur

- chauffage logements anciens,
- débit moyen annuel à prendre en compte 10 m^3/h. Débit de pointe 35 m^3/h,
- $\Delta t = 6°$.

D'après carte pompe à chaleur Ile de France

- z sol = + 35,
- nappes alluviales + Champigny s.l. $\pm$ marneux à + 30,
- sens d'écoulement des nappes vers l'E.N.E. avec un gradient de 2.10^{-3},
- pas d'autre captage à proximité,
- épaisseur efficace des aquifères : 5 à 10 m,
- température des nappes : 12 à 14°,
- eaux chargées - risque d'incrustation ou de corrosion,
- transmissivité des aquifères : 5.10^{-3} m^2/s à 10^{-3} m^2/s.

D'après la carte de situation de l'immeuble

- l'écartement maximal possible entre les deux forages du doublet est de 180 m,
- l'angle entre l'axe du doublet et le sens d'écoulement des nappes est de l'ordre de 30°.

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...$3,0.10^{-3}$.. m2/s
- Pente piézométrique : i = ..2.10^{-3}..... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...5..... m
- Température initiale : θ = ...12..... °C
- Qualité de l'eau : Eaux chargées, risques d'incrustation ou de corrosion.

FORAGES VOISINS

P U I T S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h				
Distance au centre du doublet en m				
Angle β (Orientation/ écoulement)				

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : .....180. m

.Orientation/écoulement, α : .....30. degrés

.Débit Q en période de chauffe : .....20.. m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....6.. mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ..6..... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1)	: V_D = ...38.... m/an
.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1)	: α = ...30.... degrés
.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV)	: Q_r = ...5.1... (Q débit moyen hivernal)
.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1)	: t_p = ...2.3... ans
.Taux de recyclage (cf 3.3.2)	: I = ...11.... %
.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2)	: θ = ...11.2.. °C

DISCUSSION ET VARIANTES

En écartant les puits du doublet au maximum (D = 180 m) et compte-tenu des caractéristiques hydrogéologiques cartographiées à cet emplacement, un léger recyclage (11 %) est prévisible n'entrainant pas une chute importante de la température des eaux pompées (> 11,2°C).

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

H.L.M. S.N.C.F. LA SABLIÈRE À VIRY-CHÂTILLON (ESSONNE)

DONNEES

Par le demandeur

- chauffage de 86 logements neufs,
- débit nécessaire :
  . 1er cas : pointe 70 m^3/h - moyenne annuelle 17 m^3/h
  . 2ème cas : pointe 40 m^3/h - moyenne annuelle 14,4 m^3/h
- $\Delta t = 6°$.

D'après carte pompe à chaleur Ile de France

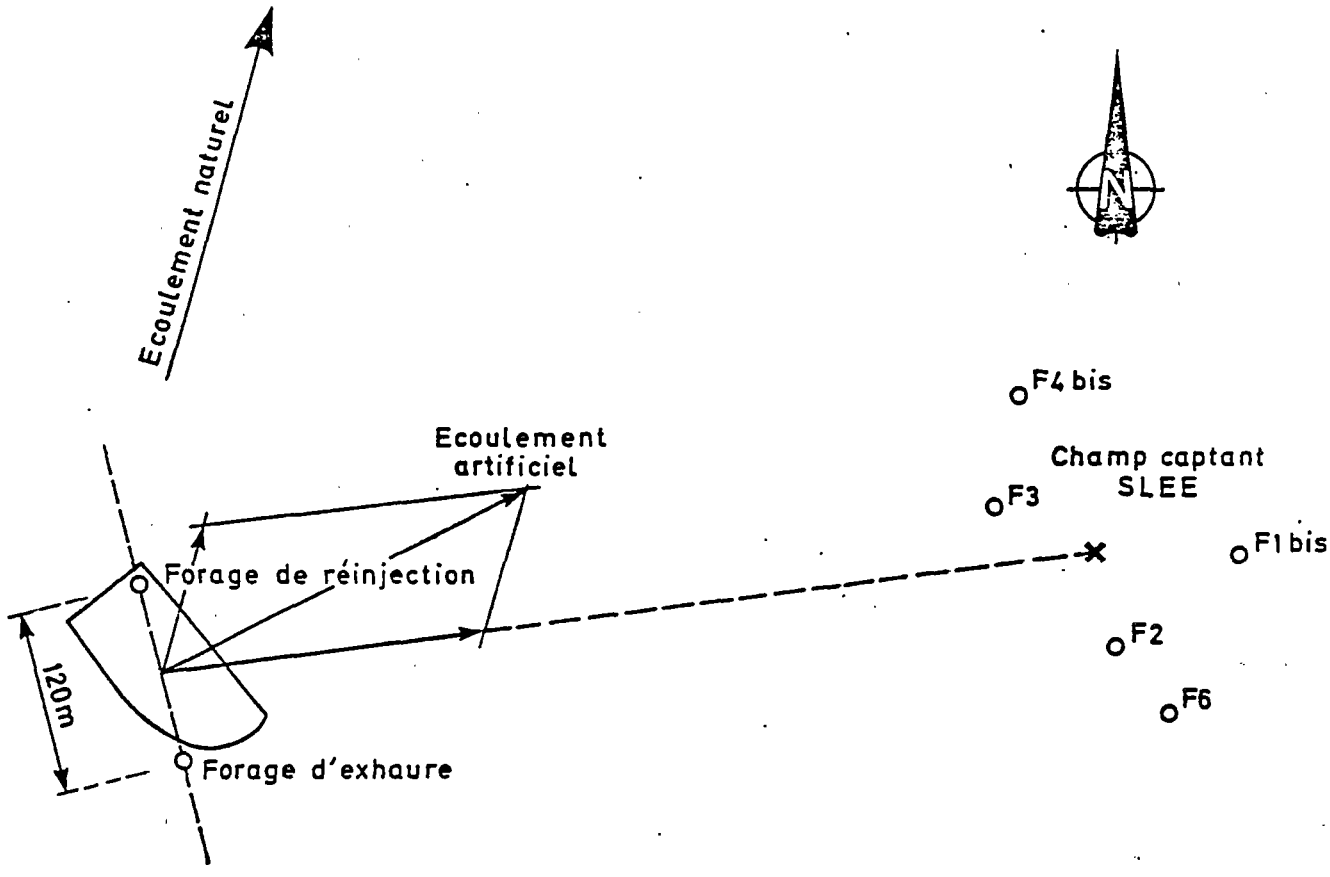
- Soit nappe alluviale superficielle	- Soit nappe profonde de l'Yprésien
z sol ≐	+ 35
Cote nappe + 33	+ 30
Sens d'écoulement naturel de la nappe : N.N.E.	N.N.E.
gradient nappe : 2.10^{-3}	10^{-4} (d'après relevé plus précis que sur la carte, effectué lors de l'étude de faisabilité)
nappe libre	nappe captive
coefficient d'emmagasinement ≠ 10^{-2}	10^{-5}
Transmissivité de l'aquifère ≠ 10^{-2} m^2/s	≠ 10^{-2} m^2/s
Température > 14°	> 14°
Problème d'incrustation ou de corrosion possible	
Profondeur de la basse des alluvions : environ 8 m	Yprésien constitué de galets entre 100 et 120 m de profondeur
Epaisseur efficace de l'aquifère : 5 m	10 m

D'après carte de situation jointe

- écartement maximal des forages du doublet envisagé = 120 m,
- il y a le champ captant de la S.L.E.E. à 600 m à l'Est des H.L.M. Ces captages à l'Yprésien sont exploités à 70 m^3/h en moyenne annuelle
- l'axe du doublet fait un angle de 30° par rapport à l'écoulement naturel de la nappe.

VIRY - CHATILLON
HLM "La Sablière"

Doublet PAC à l'Yprésien



Echelle 1/5 000

NAPPE DE L'YPRESIEN

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...10^{-2}... m2/s
- Pente piézométrique : i = ...10^{-4}... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...10... m
- Température initiale : θ = ...14... °C
- Qualité de l'eau :

FORAGES VOISINS

P U I T S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h	70			
Distance au centre du doublet en m	600			
Angle β (Orientation/écoulement)	60°			

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : .....120.... m

.Orientation/écoulement, α : .....30.... degrés

.Débit Q en période de chauffe : .....34.... m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....6.... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ....6.... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1)	: V_D = ...18..... m/an
.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1)	: α = ...81..... degrés
.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV)	: Q_r = 13,7.... (Q débit moyen annuel) 27,5 (Q débit moyen hivernal)
.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1)	: t_p = ...111 jours. ~~ans~~
.Taux de recyclage (cf 3.3.2)	: I = 52% < I < 67 %
.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2)	: θ = 7,5 < θ_S < 1,8°C

DISCUSSION ET VARIANTES

Compte-tenu des caractéristiques hydrodynamiques cartographiées et des souhaits du demandeur, les conclusions de la préétude sont défavorables à une exploitation par doublet de la nappe de l'Ypresien.

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

A la suite de cette préétude, le débit d'exploitation a été diminué (29 m3/h sur 6 mois) et l'étude de faisabilité a permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques suivants :

	Préétude	Etude
T	10^{-2}	$2.5\ 10^{-2}$
i	10^{-4}	10^{-4}
h	10	20

Ce qui a permis de conclure positivement à la faisabilité du projet ; en effet la température au puits de pompage et à stabilisation est alors égale à 12,3°C (Q_r = 5,7 ; I = 22% ; t_p = 1,85 ans).

NAPPE ALLUVIALE

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...10^{-2}..... m2/s
- Pente piézométrique : i = ...2.10^{-3}..... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...5..... m
- Température initiale : θ = ...14..... °C
- Qualité de l'eau : problème d'incrustation ou de corrosion possible

FORAGES VOISINS

P U I T S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h				
Distance au centre du doublet en m				
Angle β (Orientation/ écoulement)				

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : ....120..... m

.Orientation/écoulement, α : .....30..... degrés

.Débit Q en période de chauffe : .....34..... m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....6..... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : .....6... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1)	: V_D = ...124.....	m/an
.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1)	: α = ...30.....	degrés
.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV)	: Q_r = ...3,9.....	(Q débit moyen hivernal)
.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1)	: t_p = ...1.5.....	ans
.Taux de recyclage (cf 3.3.2)	: I = ...1.....	%
.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2)	: θ = ...13,95....	°C

DISCUSSION ET VARIANTES

Les résultats de la préétude sont très favorables à ce type d'exploitation.

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

Pratiquement aucune modification de l'estimation du comportement hydrothermique de l'aquifère à la suite de l'étude de faisabilité.

COMPLEXE IMMOBILIER INTERSYNDICAL C.G.T. À MONTREUIL (SEINE-SAINT-DENIS)

DONNEES

Par le demandeur

- chauffage et climatisation d'un ensemble de bureaux neufs,
- forages espacés de 180 m (F.1 et F.2 sur le plan joint),
- volume global d'utilisation annuelle en chauffage et climatisation : 212.000 m^3,
- durée d'exploitation :
  - . 7 mois en chauffage (débit moyen QH = 42 m^3/h),
  - . 5 mois en climatisation (débit moyen QE = 59 m^3/h),
  - . débit moyen intersaisonnier de 49 m^3/h,
  - . débit de pointe : 100 m^3/h,
  - . $\Delta t = 7,6°$.

D'après carte pompe à chaleur Ile de France et le plan de situation

- nappe Lutétien-Yprésien - profondeur forage 75 à 100 m. Calcaire sur sable fin → crépine spéciale,
- cote sol + 60,
- profondeur nappe 35 m. Cote nappe ≠ + 25,
- sens d'écoulement de la nappe S.W. - N.E., gradient 3.10^{-3},
- transmissivité ≠ 5.10^{-3},
- nappe captive (10^{-3} à 10^{-4}),
- épaisseur efficace de l'aquifère : 30 m,
- présence d'un captage exploité 7B8 à 250 m en aval-écoulement du F.2 (Cf plan joint), (le débit moyen annuel d'exploitation de cet ouvrage est de 23 m^3/h),
- température de la nappe ≠ 14°,
- eau très chargée. Risque de corrosion ou d'incrustation → crépine spéciale,
- angle entre direction de la nappe et axe du doublet ≠ 25°.

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...5.10^{-3}.... m2/s
- Pente piézométrique : i = ...3.10^{-3}..... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...30..... m
- Température initiale : θ = ...14..... °C
- Qualité de l'eau : Eau très chargée

FORAGES VOISINS

P U I T S	7 B 8	ROUSSEL	HOFFMAN	KODAK
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h	23 m3/h	514	197	104
Distance au centre du doublet en m	250 m	4000	3000	1500
Angle β (Orientation/ écoulement)	-25°	+25	- 90	-130

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☐ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☒ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : .....180... m

.Orientation/écoulement, α : .....25.... degrés

.Débit Q en période de chauffe : .....42.... m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....7.... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ...7,6.. °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : .....59.... m3/h

Durée de la période de charge : .....5.... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ..7,6.. °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

- Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet : V_D = ...23..... m/an
- Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet : α = ...13,2..... degrés
- Paramètre $Q_r = 2Q/(hDV)$ (pour Q = 49 m3/h) : Q_r = ...6,8.....
- Temps de percée thermique (pour Q = 49 m3/h) : t_p = 2,3.ans. pour α = ..13,2°..
  = 1,1.ans. pour α = .193,2°..

On vérifie que le dispositif satisfait simultanément les conditions énoncées au paragraphe 5.4 :

- h	= 30 m	(5,15) vérifiée : h > 12 m
- e	= 25 m	(5,16) vérifiée : e > 6 m
- $v_F = v_C = v$	= 215.000 m3	(5,17), (5,18), (5,19) vérifiées
- $14.V_D^2.h$	= 222.000 m3	(5,20) pratiquement vérifiée

L'abaque (5,3) donne la condition D > 170 m qui traduit que le temps de percée pour un doublet en opposition à l'écoulement (= 193°) doit être supérieur à un an en considérant le débit moyen annuel (49 m3/h). (5,21) et (5,22) sont donc vérifiées en prenant D = 180 m.

La conclusion de la préétude est favorable à une exploitation "puits chaud-puits froid", cependant il est à signaler que l'écoulement de la nappe est à la limite supérieure de ce qui est souhaitable (condition 5,20).

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

L'étude de faisabilité a montré que l'écoulement de la nappe était plus faible (8 m/an au lieu de 23 m/an) que celui précédemment considéré, diminuant ainsi les risques d'entraînement des deux stocks.

Une étude hydrothermique sur modèle numérique nous a permis de préciser les conditions d'exploitation thermique de l'aquifère (efficacité, courbes de température au stockage et au déstockage) nécessaires au maitre d'ouvrage pour décider de l'opération.

LOGEMENTS COLLECTIFS À CARRIÈRES-SOUS-POISSY (YVELINES)

D'APRES CARTES ET ABAQUES DU RAPPORT POMPE A CHALEUR ILE DE FRANCE ET DANS LE CAS OU ON ENVISAGE UN DOUBLET (1)

PREFAISABILITE HYDROGEOLOGIQUE

Données par le demandeur

- distance maximale disponible = 250 m,
- 250 logements en 5 immeubles,
- débit 80 m^3/h durant 3.500 h + 40 m^3/h durant 850 h,
- $\Delta t = 6,5°$.

Données déduites de la carte d'analyse pompe à chaleur Ile de France (Versailles)

- nappe de la craie sous recouvrement quaternaire et tertiaire,
- écoulement de la nappe vers le Sud. Gradient 1/1.000,
- débit entre 50 et 100 m^3/h pour 3 m de rabattement. Moyenne 80 m^3/h,
- transmissivité entre 5.10^{-3} et 10^{-2} m^2/s,
- épaisseur efficace de l'aquifère 10 à 15 m. Moyenne 12 m,
- température 12 à 14°. Moyenne 13°,
- qualité de l'eau : en principe bonne, mais quelques risques d'excès de sulfates, de fer et de carbonates,
- nappe superficielle du Lutétien peut être polluée. Nappe profonde de la craie bien protégée. La craie cesse d'être aquifère au-delà de 30 m d'épaisseur.

---

(1) Dans le projet, il est prévu 2 puits de pompage et un rejet dans le collecteur pluvial. Ce projet est peut-être à revoir, car il y a 2.500 m au Sud de celui-ci un secteur dans lequel la nappe de la craie est surexploitée

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...7,5.10^{-3}.. m2/s
- Pente piézométrique : i = ...10^{-3}.... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...12.... m
- Température initiale : θ = ...13.... °C
- Qualité de l'eau : bonne, mais risques d'excès de sulfate de fer et de carbonates

FORAGES VOISINS

P U I T S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h				
Distance au centre du doublet en m				
Angle β (Orientation/écoulement)				

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : .....250... m

.Orientation/écoulement, α : .....0... degrés

.Débit Q en période de chauffe : .....73.. m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....6... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ....6,5.. °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1)	: V_D = ...20... m/an
.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1)	: α = ...0... degrés
.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV)	: Q_r = ...10,8. (Q débit moyen hivernal)
.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1)	: t_p = ...1,9. ans
.Taux de recyclage (cf 3.3.2)	: I = ...35... %
.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2)	: θ = ...9,5. °C

DISCUSSION ET VARIANTES

En exploitant la distance maximale disponible (D - 250 m), on peut envisager la réinjection dans l'aquifère des eaux refroidies. Il faut cependant attendre les résultats de l'étude hydrogéologique locale pour déclarer faisable une telle opération ; en effet, avec une température de l'eau pompée chutant de 13°C à 9,5°C, on se trouve à la limite de ce qui est acceptable.

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

Néant.

INSTITUT MÉDICO-PÉDAGOGIQUE DE FONTENAY-TRÉSIGNY (SEINE-ET-MARNE)

DONNEES

D'après le demandeur

- chauffage par pompe à chaleur eau/eau. Locaux existants,
- débit moyen annuel du doublet à prendre en compte : 30 m^3/h (6 mois de fonctionnement à 60 m^3/h),
- $\Delta t = 7°$.

D'après carte pompe à chaleur Ile de France

- transmissivité de l'aquifère entre 5.10^{-3} m^2/s et 10^{-2} m^2/s ; moyenne 7.10^{-3} m^2/s,
- épaisseur efficace de l'aquifère H = 10 m,
- gradient naturel de la nappe $i = \frac{10\ m}{6500\ m} = 1,5.10^{-3}$. La nappe s'écoule vers l'Ouest,
- la température de la nappe est comprise entre 10 et 12°,
- l'aquifère à solliciter est constitué par les Calcaires de Champigny,
- il n'y a pas dans le site de risque d'incrustation ou de corrosion,
- la nappe du Champigny est située au voisinage de la cote + 70 à 105 - 70 = + 35 m sous le sol,
- la nappe du Champigny est libre. Son coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 5 %.

D'après carte de situation

- d'après l'emprise de l'Institut, l'écartement maximal du doublet est de 300 m,
- l'angle formé entre la ligne joignant les 2 forages et la direction d'écoulement naturel de la nappe est de 40°,
- il y a un captage A.E.P. à 350 m au Nord de l'Institut ; cet ouvrage est exploité à un débit moyen annuel de 20 m^3/h.

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...$7,5.10^{-3}$... m2/s
- Pente piézométrique : i = ...$1,5.10^{-3}$... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...10..... m
- Température initiale : θ = ...11..... °C
- Qualité de l'eau : bonne

FORAGES VOISINS

P U I T S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h	20			
Distance au centre du doublet en m	350			
Angle β (Orientation/écoulement)	90			

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : ...300..... m

.Orientation/écoulement, α : ....40..... degrés

.Débit Q en période de chauffe : ....60..... m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....6..... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ....7.... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1) : V_D = ...36..... m/an

.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1) : α = ...53..... degrés

.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV) : Q_r = ...48..... (Q débit moyen hivernal)

.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1) : t_p = ...4,3... ans

.Taux de recyclage (cf 3.3.2) : I = ...9..... %

.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2) : θ = ...10,3... °C

DISCUSSION ET VARIANTES

L'opération projetée est donc cohérente. Si l'installation de surface autorise une chute plus importante des températures que celle calculée précédemment (de 11°C à 10,3°C), on peut réduire la distance entre les puits :

- D = 250 m → θ_S = 9,6 °C
- D = 200 m → θ_S = 8,6 °C

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

Malgré des différences notables sur les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, les résultats pour une distance de 300 m entre les puits ont été confirmés à la suite de l'étude de faisabilité

	Préétude	Etude de faisabilité
T	$7.5\ 10^{-3}$	$3.5\ 10^{-3}$
i	$1.5\ 10^{-3}$	$2\ \ 10^{-3}$
h	10 m	20 m

CENTRE D'ACTIVITÉ INDUSTRIEL DE SAINT-MAUR
(VAL DE MARNE)

DONNEES

Par le demandeur

- chauffage par pompe à chaleur eau/eau,
- débit moyen annuel du doublet à prendre en compte : 15 m^3/h (6 mois de fonctionnement à 30 m^3/h),
- $\Delta t = 7°$.

D'après la carte pompe à chaleur Ile de France

- nappe sollicitée Calcaires du Lutétien + Sables fins de l'Yprésien,
- profondeur de la nappe + 40 (sol) - (30) = 10 m
- transmissivité de l'aquifère 10^{-3} m^2/s,
- épaisseur efficace de l'aquifère = 5 m,
- pas de captage existant à moins de 1.000 m du C.R.A.I.,
- gradient de la nappe = 5.10^{-3}. Direction d'écoulement vers l'Ouest,
- température de la nappe $\neq$ 13°,
- risque de problème d'incrustation (fer dans l'eau),
- crépine spéciale au droit des Sables de l'Yprésien.

D'après carte de situation

- écartement des forages du doublet envisagé par le demandeur : 60 m,
- écartement maximal possible : 120 m,
- angle entre la direction d'écoulement naturel de la nappe et ligne joignant les forages du doublet $\neq$ 80°.

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ...10^{-3}..... m2/s
- Pente piézométrique : i = ...5.10^{-3}..... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...5..... m
- Température initiale : θ = ...13..... °C
- Qualité de l'eau :

FORAGES VOISINS

P.U.I T.S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h				
Distance au centre du doublet en m				
Angle β (Orientation/ écoulement)				

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : .....120.... m

.Orientation/écoulement, α : .....80.... degrés

.Débit Q en période de chauffe : .....30.... m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....6.... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ....7.... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1)	: V_D = ...31..... m/an
.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1)	: α = ...80..... degrés
.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV)	: Q_r = ...28..... (Q débit moyen hivernal)
.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1)	: t_p = ...63 jours... ~~xxx~~
.Taux de recyclage (cf 3.3.2)	: I = ...67..... %
.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2)	: θ = -1,2 $\leq \theta_S \leq$ 5,3 °C

DISCUSSION ET VARIANTES

Les résultats de la préétude sont très nettement défavorables à une exploitation par doublet de l'aquifère, telle qu'elle est envisagée par le demandeur, cela étant principalement dûaux faibles épaisseurs efficaces et vitesses d'écoulement de la nappe.

CONFRONTATION AVEC LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE FAISABILITE

Néant.

ETUDE D'UN CAS TYPE D'UTILISATION DE P A C

SUR UNE NAPPE AQUIFERE PEU PROFONDE

CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE (d'après cartographie)

- Transmissivité : T = ..2,5.10^{-3}... m2/s
- Pente piézométrique : i = ...1..10^{-3}... m/m
- Epaisseur efficace : h = ...10..... m
- Température initiale : θ = ...12..... °C
- Qualité de l'eau :

FORAGES VOISINS

P.U.I.T.S	1	2	3	4
Débit moyen annuel d'exploitation en m3/h	150			
Distance au centre du doublet en m	1000			
Angle β (Orientation/écoulement)	60			

CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

- Type

☒ Doublet simple ☐ Doublet balayage ☐ Doublet PC-PF ☐ Puits unique

.Ecartement des puits D : .....100..... m

.Orientation/écoulement, α : .....0.... degrés

.Débit Q en période de chauffe : .....11.... m3/h

.Durée de la période de chauffe : .....6..... mois/an

.Fonctionnement ☐ à température constante, θi : ..... °C

☒ à écart de température constant, Dθ : ....6... °C

- En cas de recharge du stock :

Débit Q en période de charge : m3/h

Durée de la période de charge : ..... mois/an

- Recharge ☐ à température constante, θi : ..... °C

☐ à écart de température constant, Dθ : ..... °C

PREETUDE HYDROTHERMIQUE (d'après manuel)

.Vitesse de la nappe (Darcy) au voisinage du doublet (cf 3.1)	: V_D = ...32.....	m/an
.Orientation de l'écoulement par rapport à l'axe du doublet (cf 3.1)	: α = ...35.....	degrés
.Paramètre, Q_r=2Q/(hDV)	: Q_r = ...3,0....	(Q débit moyen hivernal)
.Temps de percée thermique (cf 3.2.1 et 3.3.1)	: t_p = ...∞.....	ans
.Taux de recyclage (cf 3.3.2)	: I = ...0.....	%
.Température de l'eau pompée à stabilisation (cf 3.3.2.2)	: θ = ...12.....	°C

DISCUSSION ET VARIANTES

En l'absence du forage 1, la vitesse de la nappe serait de 8 m/an (au lieu de 32 m/an) et conduirait alors aux résultats suivants :

Q_R = 12,2 ; t_p = 1,6 ans ; I = 38 % ; θ_S = 8,3°C

La conslusion, si on est assuré d'un fonctionnement permanent du forage n° 1, est favorable à ce dispositif. Par contre, si ce pompage venait à s'arrêter, cela conduirait à un recyclage et à une chute des températures importants au puits de pompage resquant de condamner l'opération.