

THÈSE

présentée pour l'obtention du Diplôme

de

Docteur-Ingénieur

à

l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI

et à

l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

par

Pascal IRIS



n° 8725

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA VALORISATION
ÉNERGÉTIQUE DES AQUIFÈRES PEU PROFONDS
EXPÉRIENCE DE STOCKAGE THERMIQUE
EN NAPPE PHRÉATIQUE

Soutenue le 19 Septembre 1980

devant le jury composé de :

R. LETOLLE

Président

J. GOGUEL

Rapporteur

M. COMBARNOUS

Examineur

J.-P. MARIE

Examineur

G. de MARSILY

Examineur

S. P. NEUMAN

Examineur

TABLE DES MATIÈRES

	page
NOMENCLATURE	
AVANT-PROPOS	1
<u>CHAPITRE 1: CADRE GENERAL DE LA RECHERCHE</u>	2
1.1 - INTRODUCTION	2
1.2 - SITUATION GENERALE DE LA RECHERCHE	3
1.2.a - Aspect théorique	3
1.2.b - Aspect expérimental	4
1.2.c - Bilan	6
1.3 - OBJET DE L'ETUDE: INTERPRETATION DE L'EXPERIENCE DE STOCKAGE THERMIQUE DE CAMPUGET	8
<u>CHAPITRE 2: APPROCHE THEORIQUE DES TRANSFERTS THERMIQUES EN NAPPE</u> .	11
2.1 - RAPPEL D'HYDRAULIQUE SOUTERRAINE: LA LOI DE DARCY	11
2.2 - LES MECANISMES PHYSIQUES DE TRANSFERT THERMIQUE	12
2.2.a - La convection	12
2.2.b - Conduction thermique et dispersion cinématique: diffusion thermique	13
2.2.c - Effet de densité et convection naturelle	16
2.3 - FORMULATION MATHEMATIQUE GENERALE	17
2.4 - EQUATIONS ET PARAMETRES ADIMENSIONNELS	19
2.4.a - Dispersion cinématique, conduction latérale: nombre de Péclet	19
2.4.b - Echange avec les épontes supposées infinies: paramètre Λ	22
2.4.c - Effet de densité: nombre de Rayleigh, rapport de forme A, rapport d'anisotropie de perméabilité .	23
2.4.d - Echanges thermiques avec l'atmosphère par conduction à travers l'éponte supérieure d'épaisseur finie: paramètre ε	26
2.4.e - Déplacement sous l'effet de l'entraînement natu- rel: paramètre δ	26
2.4.f - Synthèse	27
2.5 - MODELISATION NUMERIQUE	28
2.5.a - Méthode numérique	28
2.5.b - Dispersion numérique et stabilité des calculs ..	30
2.5.c - Les programmes	31

	page
<u>CHAPITRE 3: CONDITIONS EXPERIMENTALES</u>	32
3.1 - LES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE - FONCTIONNEMENT PENDANT LE STOCKAGE	32
3.2 - LA NAPPE	34
3.3 - IMPLANTATION DU STOCKAGE - LES FORAGES	38
3.4 - DISPOSITIF DE MESURE	40
<u>CHAPITRE 4: RECONNAISSANCE DU MILIEU</u>	43
4.1 - RECONNAISSANCE STRATIGRAPHIQUE	44
4.2 - TRANSMISSIVITE, EMMAGASINEMENT, PERMEABILITES VERTICALE ET HORIZONTALE	48
4.3 - VITESSE D'ECOULEMENT'	49
4.4 - CONDUCTIVITE THERMIQUE ET EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE SUS-JACENTE	50
4.4.a - Epaisseur	50
4.4.b - Conductivité thermique	50
4.5 - TABLEAU RECAPITULATIF DES PARAMETRES MESURES	52
<u>CHAPITRE 5: DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE - LES OBSERVATIONS</u> ...	53
5.1 - PLANNING DE L'EXPERIENCE ET BILAN THERMIQUE	53
5.2 - OBSERVATION DE LA TEMPERATURE DANS LE TERRAIN	55
5.2.a - Phase 1: le'stockage	55
5.2.b - Phase 2: l'attente	60
5.2.c - Phases 3, 4 et 5: déstockage	64
5.3 - SYNTHESE DES OBSERVATIONS	66
<u>CHAPITRE 6: VALIDITE DES MESURES</u>	67
6.1 - HOMOGENEISATION BRUTALE DES PROFILS A L'ARRET DE L'INJECTION	68
6.2 - ECHANGES PRIVILEGIES AVEC L'ATMOSPHERE AU VOISINA- GE IMMEDIAT DES PUIITS D'OBSERVATION	70
6.3 - PERCOLATION VERTICALE AU VOISINAGE IMMEDIAT DU PUIITS DE POMPAGE	71
6.4 - REMARQUES SUR LA MESURE	72
<u>CHAPITRE 7: INTERPRETATION DE L'EXPERIENCE</u>	73
7.1 - PARAMETRES ADIMENSIONNELS DU STOCKAGE	73
7.2 - INFLUENCE DE L'EFFET DE DENSITE	77
7.2.a - Méthode de calcul et validation du modèle	77
7.2.b - Principe des simulations; cas de Campuget	79

	page
7.3 - INFLUENCE DE L'ECOULEMENT LOCAL DE LA NAPPE	83
7.3.a - Les abaqes	83
7.3.b - Etude numérique sur modèle plan monostrate ..	84
7.4 - CALAGE DU TENSEUR DE DISPERSION CINEMATIQUE INTRIN- SEQUE α	87
7.4.a - Le modèle radial multistrata avec épontes ...	87
7.4.b - Choix des puits de calage	89
7.4.c - Calage du coefficient de dispersion intrin- sèque α	90
7.5 - VALIDATION DU CALAGE	92
7.6 - QUANTIFICATION DES PERTES THERMIQUES	96
7.7 - ETUDE DE L'INFLUENCE DU CONFINEMENT DE LA NAPPE	100
<u>CHAPITRE 8: LE COEFFICIENT DE DISPERSION ET LES EXPERIENCES DE STOCKAGE THERMIQUE</u>	101
8.1 - REMARQUES GENERALES	103
8.2 - CALAGE DES ESSAIS THERMIQUES DE NOISY-LE-GRAND ET NEUILLY-SUR-SEINE	104
8.2.a - Noisy-le-Grand - Nappe de l'Albien	104
8.2.b - Neuilly-sur-Seine - Nappe de l'Eocène moyen	106
8.3 - SYNTHESE DES INTERPRETATIONS	107
8.4 - TEST D'INFLUENCE AU PARAMETRE α_L	108
8.5 - CONCLUSION	109
<u>CHAPITRE 9: CONCLUSIONS</u>	110
9.1 - RECAPITULATIF DE L'ETUDE	110
9.2 - BILAN DE L'INTERPRETATION MATHEMATIQUE	111
9.3 - BILAN DE L'EXPERIMENTATION	112
<u>CHAPITRE 10: PERSPECTIVES - LA VALORISATION ENERGETIQUE DES NAPPES PEU PROFONDES</u>	114
10.1 - LE STOCKAGE THERMIQUE	114
10.2 - UTILISATION DE LA CHALEUR NATURELLE DES NAPPES PAR POMPE A CHALEUR	118
<u>LISTE DES ANNEXES</u>	
ANNEXE 1: SCHEMA DETAILLE DE L'INSTALLATION	A-1-1
ANNEXE 2: ESSAI DE POMPAGE - INTERPRETATION SELON LA METHODE DE NEUMAN	A-2-1
ANNEXE 3: ASPECT BACTERIOLOGIQUE ET CHIMIQUE - LE COLMATAGE	A-3-1
ANNEXE 4: COMPARAISON DU MODELE A UNE SOLUTION ANALYTIQUE- DISPERSION NUMERIQUE	A-4-1
	A-5-1

	page
ANNEXE 5: MAILLAGE DU MODELE RADIAL (RADIM)	A-5-1
ANNEXE 6: BILAN THERMIQUE DU SOL - CONDITIONS AUX LIMITES	A-6-1
ANNEXE 7: LA POMPE A CHALEUR - PRINCIPE GENERAL	A-7-1
ANNEXE 8: RESULTATS DES SIMULATIONS D'INTERPRETATION	A-8-1
ANNEXE 9: ISOTHERMES CALCULES PAR LE MODELE DE SIMULA- TION	A-9-1
ANNEXE 10: TESTS DE SENSIBILITE AUX PARAMETRES	A-10-1

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 1

CADRE GÉNÉRAL DE LA RECHERCHE

1.1 - INTRODUCTION

Parmi l'ensemble des problèmes technologiques posés à la société contemporaine, celui du stockage de l'énergie est l'un des plus mal résolus.

Pour stocker la chaleur, on peut concevoir l'utilisation de la chaleur sensible des corps (l'eau par exemple) ou leur chaleur latente de changement de phase; si l'on s'intéresse au stockage de longue durée dans l'esprit de l'appliquer au chauffage des locaux, on se heurte alors rapidement à des problèmes de coût et de volume. D'où l'idée de stocker dans les milieux naturels: les nappes souterraines représentent des accumulateurs thermiques potentiels facilement accessibles et largement répandus sur le territoire national. L'eau chaude, "vecteur" de la chaleur, peut être injectée, puis repompée par l'intermédiaire de forages et jouer ainsi le rôle de fluide caloporteur, la matrice poreuse souterraine constituant le réservoir thermique.

En dehors des problèmes technologiques posés par un dispositif de cette nature, il se pose la question des performances du stockage: des échanges thermiques vont avoir lieu entre la nappe elle-même et les terrains sus et sous-jacents, des pertes par diffusion de la chaleur dans le milieu aquifère vont se produire, l'écoulement naturel de l'eau dans la matrice poreuse va entraîner un déplacement du stock chaud, il est à craindre une ségrégation thermique verticale dans la nappe sous l'effet de la variation de densité de l'eau avec la température, etc....

Tous ces phénomènes risquent d'altérer le rendement d'opérations de stockage thermique, et il apparaît nécessaire de les étudier en détail.

En dehors de leur capacité à accumuler artificiellement et localement de l'énergie, les nappes souterraines sont caractérisées par leur température, en général constante, qui résulte d'un emmagasinement naturel de chaleur sous les actions conjuguées du rayonnement solaire, de l'infiltration des précipitations et du gradient géothermique; elles représentent, par conséquent, une source froide particulièrement bien adaptée à l'usage des pompes à chaleur.

La méthode d'exploitation recommandée consiste à pomper l'eau dans la nappe, en extraire les calories et la réinjecter refroidie à bonne distance.

Comment calculer l'écartement entre les puits, quel est le risque d'un retour important d'eau froide au puits de production, peut-on garantir la ressource énergétique au voisinage, quelle est la densité maximale d'exploitation d'une ressource ? Autant de questions qui nécessitent encore une fois une bonne connaissance des phénomènes hydrauliques et thermiques au sein des nappes.

La présente recherche a pour objet d'étudier ces mécanismes de transfert thermique à partir d'un cas réel dans le but de contribuer à la connaissance des possibilités d'utilisation énergétique des nappes peu profondes.

1.2 - SITUATION GENERALE DE LA RECHERCHE

1.2.a - Aspect théorique

Les transferts de chaleur en milieu poreux ont été, dans un premier temps, l'objet d'études théoriques; les équations aux dérivées partielles (cf. Chap. 2), qui permettent de les exprimer mathématiquement, ont été tout d'abord intégrées analytiquement dans des cas simples. On peut citer les travaux d'Ogata et Banks (1961), Lauwerier (1955), Advonine et Rubinstein (1964), Gringarten et Sauty (1975), Clouet d'Orval et Ledoux (1975) qui ont calculé des expressions analytiques

solution des équations, sous différentes hypothèses restrictives. Les conditions d'application de ces solutions ont été étudiées en détail en 1977 par M.L. Noyer. Par la suite, les équations ont été intégrées numériquement généralement par les méthodes dites des différences finies ou des éléments finis, basées sur une représentation discrète de l'espace et du temps et qui permettent de calculer des solutions au problème du transfert de la chaleur dans des cas complexes, sous des hypothèses beaucoup plus larges. D'une façon générale, seuls ces outils numériques sont adaptés à la simulation de cas réels, les solutions analytiques permettant de contrôler leur validité dans des exemples simplifiés.

1.2.b - Aspect expérimental

Parallèlement à cela, des expériences de terrain ont été réalisées, la plupart du temps sous la forme d'une injection d'eau chaude en forage et d'une récupération après un temps d'attente plus ou moins long par le même ouvrage (stockage par puits unique). L'objectif est d'une part d'observer qualitativement les phénomènes, et d'autre part, dans certains cas, de comparer les mesures de terrain avec les résultats de calculs numériques.

Les premières expériences sont de petite taille:

- en 1974, B. Mathey (Université de Neuchâtel) réalise un stockage au lieu-dit "Le colombier Robinson" portant sur 500 m³ stockés à 50°C dans une nappe phréatique superficielle. Après un temps d'attente de 4 mois, 16.000 m³ sont repompés. La chaleur récupérée est très dégradée, l'auteur l'explique par un déplacement significatif lié aux vitesses naturelles d'écoulement dans la nappe et des pertes thermiques par conduction aux limites du stock. Une stratification thermique par effet de densité est également observée.

- En 1975, Werner et Kley créent dans une nappe superficielle, à Kreyfeld(RFA) une perturbation chaude et observent son développement dans le terrain. Aucune récupération des calories n'est effectuée. Les auteurs n'observent pas de stratification thermique, mais une dégradation progressive du stock par conduction thermique dans le milieu froid.

- En 1976-1977, différentes opérations de stockage sont réalisées au lieu-dit Bonnaud, dans le Jura, par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), le Bureau de Géologie Appliquée (BURGEAP), le Centre d'Informatique Géologique (CIG) de l'Ecole des Mines de Paris, en liaison avec le Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (CENG). La nappe est captive, confinée par 4 m d'argile et épaisse de 3 m. La première expérience significative porte sur 1400 m³ d'eau à 40°C stockés en 20 jours dans la nappe à 12°C. Un volume double est repompé après 4 mois d'attente; l'énergie récupérée est encore une fois fortement dégradée, la température moyenne de restitution valant environ 16°C. L'expérience est interprétée mathématiquement à l'aide d'un modèle numérique simulant un domaine aquifère homogène à symétrie cylindrique. Les phénomènes dominants sont les échanges thermiques avec la surface du sol (en raison de la très faible profondeur de la nappe) et la diffusion de la chaleur du fait d'hétérogénéités* dans le milieu. La nécessité de faire des hypothèses sur certains paramètres physiques du milieu rend difficile le calage du modèle sur les mesures de terrain (E. Ledoux, M. Clouet d'Orval, 1977).

En 1977, sur le même site, une succession de cinq cycles consécutifs de stockage-déstockage de courte durée (12 jours chacun) est mise en oeuvre, chaque cycle portant sur un volume de 500 m³ à 40°C. Le calage du modèle effectué sur les courbes de température de l'eau repompée donne de bons résultats; les auteurs (Sauty et al., 1978) confirment l'importance des pertes thermiques par circulation préférentielle dans les hétérogénéités du milieu (effet de dispersion cinématique) et montrent que le paramètre permettant de traduire ce phénomène dans la formulation mathématique des transferts de chaleur croît avec l'échelle de l'hétérogénéité prise en compte dans le modèle homogène et augmente avec le rayon thermique du stock (cf. Chap. 2.2.b).

D'une façon générale, ces expériences à petite échelle ont des performances médiocres, la chaleur récupérée étant fortement dégradée.

En 1977, aux Etats-Unis (Alabama), une première expérimentation de stockage à plus grande échelle est réalisée en nappe captive plus profonde. L'expérience a lieu sur le site de Mobile, sous la responsabilité de l'Université d'Auburn (F.J. Molz, J.C. Warman, 1978). Elle porte

* Le milieu naturel n'est pas homogène et se compose de strates plus ou moins perméables, de lentilles d'argile que l'on convient d'appeler des "hétérogénéités" dont la présence a pour effet de "dispenser" les filets d'eau, et contribue par conséquent à la diffusion de la chaleur dans le milieu.

sur l'injection de 7500 m³ d'eau chaude provenant d'une rivière voisine dans un horizon sableux de 20 m d'épaisseur (profondeur du toit de la nappe : 40 m). La présence de particules fines dans l'eau injectée provoque le colmatage du puits d'injection, imposant une mise en pression qui entraîne la rupture du toit argileux et l'injection d'une partie de l'eau dans un aquifère sus-jacent. L'expérience est, par conséquent, difficile à interpréter (Papadopoulos, 1978).

En 1978, une seconde injection a lieu, l'eau chaude provenant de cette nappe supérieure. Les problèmes de colmatage sont en partie résolus. (cf. Annexe 3). 55000 m³ à 55°C sont injectés en 80 jours dans la nappe à 20°C; après un temps d'attente de 40 jours, le même volume est repompé en 50 jours; la température de repompage chute progressivement de 55°C à 33°C, 65 % de la chaleur stockée est récupérée (la température de référence est la température initiale de la nappe, soit 20°C).

Cette première expérience à grande échelle, concluante quant à ses résultats, a été interprétée par l'Université de Berkeley à l'aide d'un modèle radial selon la méthode des différences fines intégrées (Narashiman et al., 1976). Les auteurs (C.F. Tsang, 1980) ont obtenu de bons résultats, la dispersion cinématique apparaît comme négligeable contrairement à l'effet de densité pris en compte dans le modèle.

1.2.c - Bilan

En ce qui concerne la faisabilité du stockage thermique par puits unique, ces travaux permettent de tirer des conclusions d'ordre général:

Tout d'abord, il apparaît qu'en dessous d'une certaine taille, un stockage en nappe a peu de chances de conduire à des performances satisfaisantes. Il est significatif que les seules performances convenables soient obtenues dans le cas de l'expérience où la nappe est la plus épaisse et le volume stocké le plus important.

D'autre part, il semble que les nappes très superficielles soient soumises à des échanges thermiques importants avec l'atmosphère; un recouvrement minimal est donc souhaitable. On devra, par conséquent, s'orienter vers des nappes suffisamment profondes et des volumes de stockage importants.

En ce qui concerne la connaissance des mécanismes de transfert thermique en milieu aquifère, les choses sont moins simples; les auteurs ne semblent pas d'accord sur les mécanismes prépondérants: certains accordent de l'importance aux phénomènes de conduction et dispersion cinématique dans le milieu, d'autres insistent sur la ségrégation thermique verticale liée à l'effet de variation de densité de l'eau avec la température.

Les propriétés du milieu souterrain étant différentes d'un cas à un autre, il est évident que des phénomènes observables à un endroit dans des conditions données ne le sont pas forcément ailleurs. Il faut cependant noter que ces différentes conclusions reposent uniquement sur l'observation des températures dans le milieu qui ne permet pas, à elle seule, de comprendre la nature des mécanismes: ainsi, par exemple, la montée de la chaleur au sommet d'une nappe peut être interprétée soit comme le résultat d'un effet de variation de densité avec la température, soit comme le fait de la présence d'un horizon plus perméable à ce niveau. En l'absence de reconnaissance de la répartition verticale des perméabilités, il est difficile de savoir.

Qu'en est-il de la comparaison des modèles et des mesures de terrain? Là aussi, des incertitudes demeurent: comme nous le verrons par la suite, la prise en compte de l'ensemble des phénomènes intervenant dans les transferts thermiques en nappe nécessite la mise en oeuvre d'outils informatiques très lourds. Comme les expériences l'ont montré, et sans rentrer dans le détail, on peut citer la conduction thermique, la dispersion cinématique, l'effet de densité, l'effet d'écoulement naturel, l'effet d'écoulement forcé sous l'action du pompage ou de l'injection, etc.... Ces effets nécessitent en toute rigueur une représentation mathématique tridimensionnelle de l'espace pratiquement impossible à mettre en oeuvre dans des essais de calage (ajustements successifs du modèle sur la réalité).

Pour des raisons pratiques, le numéricien est donc souvent amené à faire des simplifications et des hypothèses sur les effets thermo-hydrauliques prépondérants du problème étudié. Ainsi, par exemple, les modèles à symétrie cylindrique utilisés pour interpréter les expériences d'Auburn et de Bonnaud ne prennent pas en compte l'écoulement naturel de la nappe.

Par ailleurs, dans le cas de Bonnaud, l'effet de densité est négligé alors qu'il est pris en compte dans le cas d'Auburn (avec une hypothèse a priori sur l'anisotropie de perméabilité).

Dans le cas d'Auburn, la dispersion cinématique liée à des circulations préférentielles dans le milieu n'est pas prise en compte, contrairement à Bonnaud où elle est prépondérante.

Dans ces conditions, le calage du modèle revient à valider une interprétation possible des phénomènes. Mais il n'est pas sûr que cette interprétation soit unique, et d'autres hypothèses sur les mécanismes prépondérants auraient pu conduire à des résultats équivalents. En l'absence de contrôle expérimental et quantifié des hypothèses formulées, il est à notre avis difficile de conclure.

En conséquence, il nous paraît nécessaire, au stade actuel, de comparer modèle théorique et résultats de terrain en réduisant autant que faire se peut le champ des hypothèses non vérifiées a priori. Cette démarche, basée sur une reconnaissance préalable du milieu, est de nature à mieux comprendre les phénomènes observés et devrait permettre de valider (ou non) les modèles numériques de simulation.

Tel est l'objectif de ce travail qui porte sur l'étude d'un cas réel de stockage thermique en nappe et son interprétation mathématique.

1.3 - OBJET DE L'ETUDE: INTERPRETATION DE L'EXPERIENCE DE STOCKAGE THERMIQUE DE CAMPUGET

Dans le cadre du programme de recherche "Energie solaire et

habitat", le Plan Construction confiait, en Janvier 1977, à ARMINES, Ecole des Mines de Paris, en association avec Electricité de France, le soin de conduire une expérience pilote de stockage intersaisonnier en nappe phréatique.

L'objectif de cette recherche expérimentale était triple:

- 1) réaliser in situ et à échelle significative un stockage thermique saisonnier en nappe phréatique peu profonde;
- 2) interpréter les résultats sur modèle numérique et en tirer des conclusions sur la validité des outils numériques de simulation et la valeur des paramètres thermohydrauliques, caractéristiques des nappes (ainsi que la façon de les mesurer);
- 3) valoriser un stock expérimental dans le cadre d'une installation de chauffage agricole adapté et en tirer des enseignements pour l'appliquer au chauffage domestique avec énergie solaire.

Cette étude expérimentale s'est déroulée de Juillet 1977 (début du stockage) à Mars 1978 (fin du déstockage) au lieu-dit Campuget (Gard), dans le cadre d'une installation de chauffage de serres, capable de produire l'été des calories bon marché destinées au stock, et d'utiliser l'hiver les calories déstockées.

Le site considéré a été retenu en raison essentiellement de la présence de ces installations qui permettaient de réaliser le stockage sans que l'expérience ait à supporter des coûts d'investissement trop élevés.

La nappe phréatique, peu profonde, présente sur le site était peu utilisée, en écoulement assez lent et a priori adaptée aux exigences de l'expérience.

20.000 m³ d'eau ont été injectés et en partie récupérés.

L'évolution du stock a été suivie par des mesures de température effectuées régulièrement dans des forages d'observation répartis sur le domaine d'étude; la nappe a été l'objet d'une reconnaissance hydrogéologique approfondie.

Le présent travail concerne les points 1 et 2, à savoir la partie hydrogéologique de l'étude et les développements qui lui ont été donnés. Le point 3 concernant la valorisation du stockage dans le cadre du système de chauffage des serres n'est pas traité, et figure dans le rapport final de l'étude Plan Construction (P. Iris, 1979).

Nous aborderons successivement:

- l'approche mathématique et numérique du problème du stockage thermique en nappe;
- la description des conditions expérimentales, avec la reconnaissance hydrogéologique du milieu, puis l'observation qualitative du stockage;
- l'interprétation numérique avec la justification des hypothèses prises en compte dans la simulation de l'expérience.

Des remarques d'ordre général seront faites en dernier lieu sur la valorisation énergétique des aquifères peu profonds.

•
°
° °

CHAPITRE 9 CONCLUSIONS

9.1 - RECAPITULATIF DE L'ETUDE

L'étude présentée avait comme objectif essentiel d'analyser la validité des modèles numériques de simulation des transferts de chaleur en nappe à partir d'un cas réel.

Un stockage de chaleur sous forme d'une injection de 20.000 m³ d'eau à 33°C a été réalisé dans une nappe phréatique superficielle à 14°C l'été 1977. La chaleur a été partiellement récupérée l'hiver suivant et utilisée pour chauffer une installation agricole de serres chaudes présente sur le site. Globalement, 18,5% de la chaleur ainsi stockée ont été récupérés (sur la base de la température de référence de la nappe).

L'expérience a été l'objet d'une campagne de mesures portant sur les températures dans le terrain à l'aide d'un dispositif approprié de sondes thermiques dans des forages de contrôle de petits diamètres répartis sur l'ensemble du domaine de stockage. Les températures d'injection et de pompage ainsi que les débits ont été également mesurés.

L'ensemble des paramètres hydrauliques et thermiques caractéristiques du site ont été mesurés in situ: transmissivité, stratification verticale et anisotropie de perméabilité, épaisseur utile, épaisseur et conductivité thermique de la zone sus-jacente à la nappe. Le seul paramètre inconnu était le coefficient de dispersion thermique intrinsèque longitudinal α_L , qui caractérise l'effet de mélange se produisant dans le milieu sous l'effet de circulations préférentielles par les hétérogénéités locales

(contournement de lentilles argileuses, circulation privilégiée dans des strates plus conductrices, etc....).

L'interprétation de l'expérience a été effectuée essentiellement à l'aide d'un modèle radial multistraté avec éponges, après contrôle des hypothèses restrictives contenues (absence d'effet d'écoulement naturel, absence de ségrégation thermique verticale sous l'effet de variation de densité avec la température).

9.2 - BILAN DE L'INTERPRETATION MATHEMATIQUE

Il a tout d'abord été confirmé l'absence d'effet de densité par une étude numérique du phénomène. Dans les conditions de l'expérience, cet effet est négligeable et intervient pour moins de 1% dans son bilan thermique global (il est à noter toutefois que la validation précise du modèle utilisé nécessite la mise en place d'un essai en laboratoire qui n'a pas été réalisé dans cette étude).

Le léger gradient d'écoulement local (vitesse de Darcy de 5 cm par jour) a une influence non négligeable mais suffisamment faible pour autoriser l'utilisation d'un modèle radial multistraté avec éponges pour expliquer les mécanismes prépondérants de transferts thermiques intervenus pendant l'expérience.

Ce modèle a permis de caler en phase de stockage sur les mesures thermiques verticales dans le terrain (logs) un coefficient de dispersion thermique intrinsèque longitudinal de 3 m.

La simulation générale de l'expérience et la comparaison entre la courbe des températures de repompage calculée par le modèle avec ce paramètre et la courbe des températures réelles mesurées a conduit à un ajustement très satisfaisant, une fois prise en compte l'influence de l'écoulement local dans la nappe qui avait été quantifié au préalable à l'aide d'un modèle plan monostrate.

Dans cette mesure, compte tenu de la démarche suivie, de la justification de l'ensemble des hypothèses faites et de la bonne connaissance des paramètres thermiques et hydrauliques du milieu, nous avons ainsi la confirmation de la validité de la représentation mathématique et numérique utilisée pour simuler les transferts thermiques dans la nappe.

Ce résultat est important, ces outils pouvant permettre à l'avenir de prévoir le comportement et de déterminer la faisabilité d'un stockage avant sa réalisation.

Dans ce domaine, la principale inconnue est le paramètre de dispersion α_L qui dépend de l'échelle de l'expérience simulée, et dont le calage sur cinq expériences d'échelle décimétrique a montré qu'il était d'un ordre de grandeur métrique comparable.

Il est souhaitable de poursuivre l'interprétation d'essais in situ pour progresser dans l'estimation de ce paramètre.

9.3 - BILAN DE L'EXPERIMENTATION

D'une façon globale, la valeur assez basse du taux de récupération saisonnière de la chaleur stockée (moins de 20%) provient essentiellement du faible confinement supérieur de la nappe l'année de l'expérience. En effet, en raison des précipitations exceptionnelles en 1977-78 (excédent de 70% par rapport aux années moyennes) et du "gonflement" de la nappe, la zone la séparant de la surface du sol était très peu épaisse (2 m) et très conductrice sur le plan thermique parce que très chargée en eau. Dans ces conditions, d'importants échanges par conduction ont eu lieu avec l'atmosphère, ce qui a largement contribué à la dégradation thermique du stockage.

Différentes simulations d'interprétation ont permis de quantifier l'influence relative de chacune des sources de pertes thermiques, causes du faible taux de récupération obtenu:

- les plus significatives sont les pertes par conduction dans les épontes et dispersion thermique cinématique dans la nappe, qui représentent 44% de la chaleur non récupérée; elles auraient tendance à diminuer en valeur relative avec le volume du stockage et l'épaisseur de la nappe (6 m utiles à Campuget);

- du même ordre de grandeur viennent ensuite les fuites thermiques vers l'atmosphère (41%) dues au très faible confinement de la nappe l'année de l'expérience. A plus forte profondeur, ce facteur devient négligeable, comme le montre la simulation d'un stockage avec des paramètres analogues à ceux de l'expérience réelle, mais avec un recouvrement de 10 m (au lieu de 2 m), et qui conduit à un taux de récupération calculé proche de 60% au bout de la 3ème année.

- enfin, on note la relative sensibilité du stockage à l'écoulement naturel de la nappe: pour des vitesses de Darcy de 5 cm/j à Campuget (et malgré le recentrage du puits de repompage dans le sens du gradient d'écoulement), ce phénomène permet d'expliquer environ 8% de la chaleur perdue.

En conclusion, il apparaît que le stockage thermique de longue durée en nappe souterraine est un procédé performant dans des conditions hydrogéologiques adaptées et pour des volumes suffisants.

On s'orientera vers des nappes suffisamment profondes (> 15 m) et épaisses (≥ 10 m) où les gradients locaux d'écoulement seront faibles (ou réduits par des moyens artificiels).

Les résultats de l'expérience montre que le procédé est sans doute moins généralisable que ce que l'on pouvait espérer initialement, les aquifères semi-profonds (Sparnacien, Albien en région parisienne par exemple) convenant mieux que les nappes phréatiques superficielles. D'une façon générale, les outils numériques développés pour cette étude sont de nature à caractériser les sites appropriés et la faisabilité du stockage dans un cas donné après reconnaissance précise des caractéristiques hydrogéologiques locales.