

**Problématique environnementale
des pompes à chaleur au Québec**

**Jean Gauthier et Olivier Banton
INRS-Eau, Septembre 1992**

**Problématique environnementale
des pompes à chaleur au Québec**

**Bilan de la situation au Québec,
problématique environnementale
et aspects de la réglementation**

Rapport final

par

Jean Gauthier et Olivier Banton

INRS-Eau, Université du Québec
2800, rue Einstein, CP 7500
Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7

Septembre 1992

Travaux effectués pour le ministère
de l'Environnement du Québec
Direction des Écosystèmes Urbains

Rapport scientifique INRS-Eau No. 358

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
1. INTRODUCTION	1
2. PRINCIPES GÉNÉRAUX	2
2.1 LA POMPE A CHALEUR	2
2.2 LA POMPE GÉOTHERMIQUE	4
2.2.1 Circuit fermé	4
A) Systèmes horizontaux	5
B) Systèmes verticaux	6
2.2.2 Circuit ouvert	7
A) Aspect quantitatif	7
B) Aspect qualitatif	7
2.2.3 Modes de rejet de l'eau des circuits ouverts	8
A) Rejet dans les eaux de surface	8
B) Rejet en bassin	8
C) Rejet dans un puits vertical de large diamètre	9
D) Rejet dans un deuxième puits	10
E) Rejet dans le même puits	12
3. CARACTÉRISTIQUES DES EAUX SOUTERRAINES AU QUÉBEC	13
3.1 DISPONIBILITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE	13
3.2 TEMPÉRATURE	16
3.3 CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES	17

3.3.1	Problèmes d'incrustation	18
A)	Incrustation chimique	18
B)	Incrustation mécanique	19
C)	Incrustation biologique	19
D)	Situation au Québec	19
3.3.2	Problèmes de corrosion	20
A)	Corrosion galvanique	20
B)	Corrosion chimique	21
C)	Situation au Québec	22
4.	SITUATION DES POMPES GÉOTHERMIQUES AU QUÉBEC	24
4.1	OBJECTIFS DE L'ENQUETE	24
4.2	MÉTHODE	24
4.3	RÉSULTATS	25
4.3.1	Nombre d'installations effectuées dans la dernière année (1991)	25
4.3.2	Type d'installation	26
A)	Circuit fermé	26
B)	Circuit ouvert	27
5.	ASPECT ENVIRONNEMENTAL DE L'UTILISATION DES POMPES A CHALEUR	29
5.1	IMPACTS DES SYSTEMES EN CIRCUIT FERMÉ	29
5.2	IMPACTS DES SYSTEMES EN CIRCUIT OUVERT	30
5.2.1	Mode consommation	30
5.2.2	Mode non-consommation	31
5.3	IMPACTS COMMUNS AUX SYSTEMES FERMÉ ET OUVERT	33
5.3.1	Bruit	33
5.3.2	CFC	33

6.	RÉGLEMENTATION	35
6.1	CANADA	35
6.2	ÉTATS-UNIS	38
	6.2.1 Règlements fédéraux	38
	6.2.2 Règlements d'État	39
	6.2.3 Règlements municipaux	40
6.3	FRANCE	41
6.4	GRANDE-BRETAGNE	43
6.5	DANEMARK	43
6.6	SUEDE	45
6.7	SUISSE	45
6.8	RECOMMANDATIONS	47
7.	MODÉLISATION	48
7.1	MODELES DE DESIGN	48
7.2	MODELES GÉOCHIMIQUES	49
	7.2.1 Modèles de spéciation	49
	7.2.2 Modèles de réaction géochimique	49
7.3	MODELES DE TRANSPORT	50
8.	CONCLUSION	52
	BIBLIOGRAPHIE	55
	ANNEXE A LEXIQUE	61
	ANNEXE B QUESTIONNAIRE UTILISÉ POUR L'ENQUETE TÉLÉPHONIQUE ...	62
	ANNEXE C RÉGLEMENTATION AMÉRICAINE ÉTAT PAR ÉTAT	64

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	QUALITÉ REQUISE DE L'EAU	17
TABLEAU 2	NOMBRE D'INSTALLATIONS	25
TABLEAU 3	MODES DE REJET	28
TABLEAU 4	IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT	34
TABLEAU 5	RÉSUMÉ DE LA RÉGLEMENTATION FRANCAISE	42
TABLEAU 6	MODELES GÉOCHIMIQUES	50
TABLEAU 7	MODELES DE TRANSPORT DE CHALEUR	51

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	CYCLE DE BASE D'UNE POMPE A CHALEUR	2
FIGURE 2	CIRCUIT FERMÉ SYSTEMES HORIZONTALS	5
FIGURE 3	CIRCUIT FERMÉ SYSTEMES VERTICAUX	6
FIGURE 5	REJET DANS UN PUIIS DE LARGE DIAMETRE	10
FIGURE 6	REJET DANS UN DEUXIEME PUIIS	12
FIGURE 7	REJET DANS UN MEME PUIIS	12
FIGURE 8	UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES DU QUÉBEC	15
FIGURE 9	TEMPÉRATURE DE L'EAU SOUTERRAINE AU QUÉBEC	16

1. INTRODUCTION

Les besoins énergétiques toujours grandissants de nos sociétés industrielles énergivores de même que les coûts sociaux et environnementaux des sources traditionnelles d'énergies (combustibles fossiles, énergie nucléaire, hydro-électricité) amènent à investir dans des programmes d'économie et de diversification énergétiques. La technologie des pompes à chaleur (thermopompes) s'intègre bien dans ces nouveaux objectifs en matière énergétique et connaît, depuis quelques années, un essor considérable. Spécifiquement, les pompes géothermiques, qui utilisent l'énergie disponible dans le sol et dans l'eau souterraine, sont passées d'environ 500 unités installées à travers le Canada en 1985 à plus de 22 000 actuellement selon la Canadian Earth Energy Association. De ce nombre, 80 % sont installées en Ontario et seulement 10 % au Québec. L'accroissement du nombre d'installations géothermiques comme source d'énergie de remplacement mérite une réflexion sur les impacts environnementaux qu'une large utilisation de cette technologie pourrait entraîner.

Ce document présente les principes généraux qui régissent le fonctionnement des systèmes géothermiques et fait un survol de la qualité générale des eaux souterraines au Québec et de son influence sur les systèmes géothermiques. Ensuite, on présente un état de la situation des pompes géothermiques au Québec suite à une enquête que nous avons réalisée. Également, on retrouve une revue des impacts sur l'environnement liés à l'utilisation des pompes géothermiques suivi d'un résumé de la réglementation existante dans différents pays utilisant ce genre de système. Finalement, la dernière partie du document présente quelques logiciels pouvant être appliqués à ce domaine.

2. PRINCIPES GÉNÉRAUX

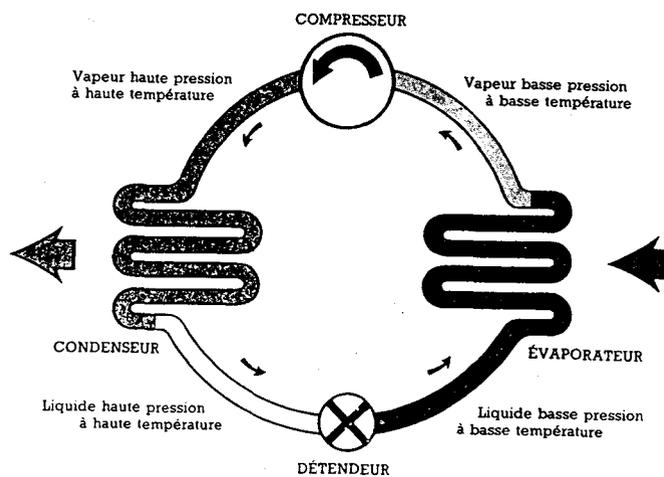
Voici une analyse des principes généraux qui régissent le fonctionnement des pompes à chaleur.

2.1 LA POMPE A CHALEUR

La pompe à chaleur est un appareil électrique qui transfère la chaleur d'un endroit à un autre. Cette technologie est connue depuis longtemps et largement utilisée dans les systèmes de réfrigération. Ces machines sont basées sur le principe de Carnot qui stipule qu'une diminution d'entropie, résultant du transfert de chaleur d'une source froide vers une source chaude, doit être compensée par une augmentation d'entropie au moins égale résultant de la transformation du travail en chaleur (Bauman 1966). Par exemple, un gaz à basse température peut être comprimé par un piston, s'échauffer et transférer sa chaleur au milieu ambiant.

La Figure 1, montrant le cycle de base d'une pompe à chaleur, explique comment le transfert de chaleur s'effectue d'une source froide vers une source chaude à l'aide d'une thermopompe.

-FIGURE 1- CYCLE DE BASE D'UNE POMPE A CHALEUR (Tiré de EMRC 1989)



-Un fluide frigorigène circule en circuit fermé entre deux serpentins. Ce fluide servira de support physique pour le déplacement de la chaleur. Il doit posséder les propriétés suivantes: se transformer facilement de la phase liquide à la phase vapeur à basse température, être non-toxique, ininflammable, non-corrosif et chimiquement stable (NWWA 1983).

-A la sortie du compresseur, le frigorigène est sous forme vapeur à haute pression et haute température.

-La vapeur chaude est entraînée dans un serpentin (le condensateur) et passe sous forme liquide haute pression à haute température. Ce changement de phase est un processus exothermique et implique un transfert d'énergie du fluide frigorigène vers le milieu d'échange.

-Le liquide à haute pression et haute température passe ensuite dans le détendeur. Selon la loi des gaz (loi de Charles), à masse constante, si la pression diminue, alors la température diminue également. Après le détendeur on obtient donc un liquide à basse pression et basse température.

-Le liquide froid est entraîné dans un deuxième serpentin (l'évaporateur). Le fluide frigorigène, ayant un point d'ébullition relativement bas, capte l'énergie provenant du milieu échangeur et passe en phase vapeur. Ce processus est possible tant que la température du milieu échangeur est supérieure au point d'ébullition du liquide frigorigène. Après cette étape, on obtient donc de la vapeur à basse température et basse pression.

-Finalement, la vapeur revient au compresseur où selon la loi des gaz, à masse constante, si la pression augmente, la température augmente

également.

Il est possible d'utiliser un système de pompe à chaleur en mode climatisation ou en mode chauffage. Il suffit d'inverser les milieux d'échange et le sens d'écoulement des liquides. Une thermopompe peut donc régulariser la température d'un édifice pendant toute l'année en chauffant celui-ci l'hiver et en le refroidissant l'été.

2.2 LA POMPE GÉOTHERMIQUE

Le milieu d'échange, d'où la thermopompe extrait la chaleur en hiver et où elle libère la chaleur de la maison en été, peut être multiple. Dans le cas des thermopompes air-air, l'air extérieur agit comme milieu d'échange. Actuellement au Canada, ce type d'appareil est le plus fréquemment utilisé. Pour ce qui est des pompes géothermiques, le milieu d'échange est le sol lui-même ou l'eau souterraine qu'il contient. Dans le premier cas, on parlera de système en circuit fermé, et dans le second de système en circuit ouvert.

2.2.1 Circuit fermé

Ce type de système utilise un fluide caloporteur qui circule sous pression, en circuit fermé, dans un réseau de tubes de plastique installé dans le sol. L'énergie est donc transférée directement du sol au fluide à travers la paroi du tube. Cette technique devrait être utilisée selon Dexheimer (1985), quand la quantité d'eau souterraine est insuffisante, que la qualité de l'eau est inadéquate ou que la réinjection est problématique. Au Québec, le choix du type d'installation ne semble pas basé sur ces critères mais plutôt imposé par les fournisseurs. Certains d'entre eux exigent, en effet, que leurs machines soient systématiquement installées selon un certain mode et ce, peu importe les conditions du milieu.

Le fluide caloporteur utilisé dans la boucle en circuit fermé est une solution antigel qui permet d'abaisser les points de congélation et de fusion du liquide. On utilise généralement une solution diluée de méthanol. A l'occasion, des solutions de chlorures

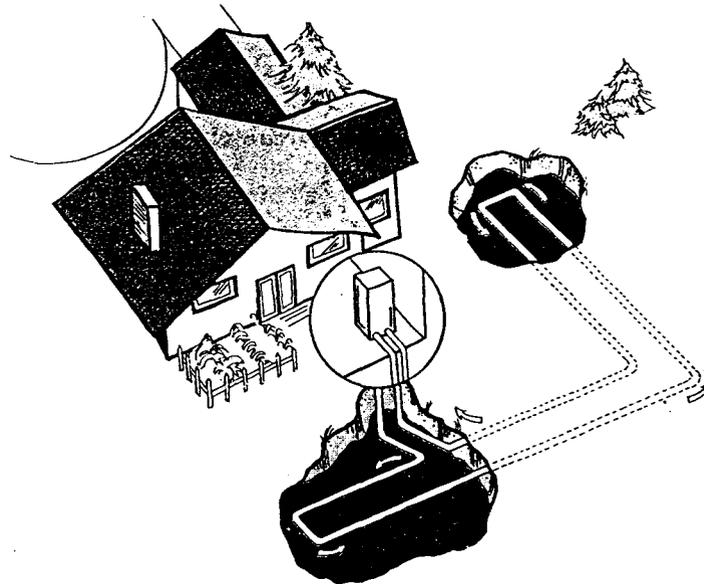
ou d'éthylène-glycol sont employées bien que ce dernier produit soit interdit par certaines autorités.

On distingue deux grands types d'installation en circuit fermé, les systèmes horizontaux et les systèmes verticaux.

A) Systèmes horizontaux

Dans ce genre de système, la tubulure est installée à l'horizontale dans une tranchée creusée dans le sol sous la zone de gel naturelle. En général il faut prévoir de 120 à 180 mètres linéaires (400 à 600 pi) de tubes par tonne de puissance. Une maison moderne bien isolée nécessite une installation d'environ trois tonnes. Selon la norme CSA-C445-M89 (ACNOR 1991), les tubes utilisés doivent être en polyéthylène ou en polybutylène de la série 100 et comporter des joints soudés par fusion thermique. Cette recommandation minimise les risques de fuite du système.

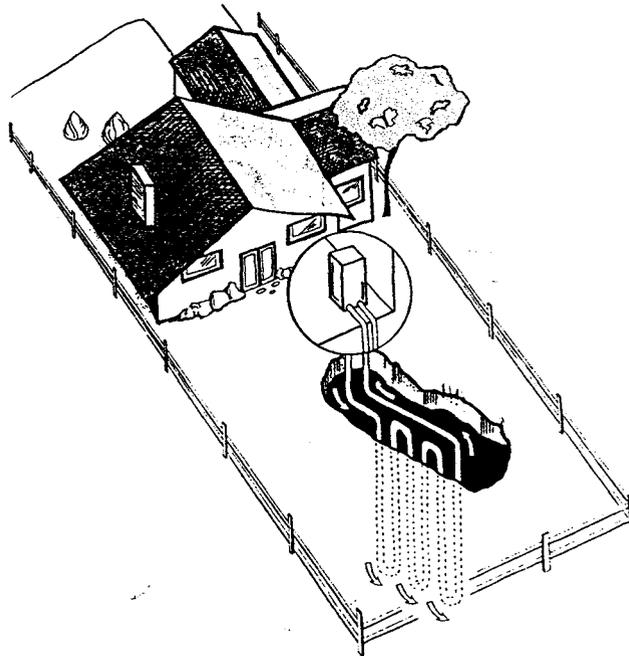
-FIGURE 2- CIRCUIT FERMÉ SYSTEMES HORIZONTAUX (Tiré de EMRC 1989)



B) Systèmes verticaux

Ce genre de système est bien adapté aux installations urbaines car il nécessite peu de surface de terrain. Un tube en forme de U est introduit dans un forage de 150 mm (6 po) de diamètre à des profondeurs variant entre 38 et 54 m (125 et 175 pi) par tonne de puissance. Le forage est ensuite remblayé en utilisant une méthode et un matériau qui optimiseront le transfert thermique entre la boucle et le sol. Évidemment, le dessus du forage doit être bouché pour éviter les risques de contamination par des sources de surface.

-FIGURE 3- CIRCUIT FERMÉ SYSTEMES VERTICAUX (Tiré de EMRC 1989)



Signalons que les installations en circuit fermé sont généralement équipées d'un système de chauffage d'appoint qui prend la relève en cas de besoin (atteinte du point d'équilibre de rentabilité, bris du système, etc.).

2.2.2 Circuit ouvert

Dans les systèmes en circuit ouvert, on utilise directement l'eau souterraine comme fluide caloporteur. La chaleur, provenant principalement du flux interne d'énergie terrestre, permet de garder l'eau souterraine à une température constante pendant toute l'année. L'eau est pompée dans la thermopompe d'où la chaleur en est extraite. L'installation d'un circuit ouvert nécessite cependant de grandes quantités d'eau de bonnes qualités. Au Québec, ces deux facteurs ne sont pas des contraintes majeures à l'installation de ce genre de système puisque dans la majorité des régions il est possible d'obtenir des puits ayant des rendements supérieurs à 10 gpm (0.6 l/s) d'une eau de très bonne qualité (Simard et Des Rosiers 1979).

A) Aspect quantitatif

La quantité d'eau nécessaire au fonctionnement d'une pompe à chaleur en circuit ouvert varie en fonction de la dimension du système, de l'efficacité de la thermopompe, des charges de chauffage et de climatisation à rencontrer et de la température de l'eau souterraine. Au Québec, pour une maison moderne de grosseur moyenne, les besoins de pompage pour l'opération d'une pompe géothermique varient entre 7 et 12 gpm (0.45 et 0.75 l/s). Sur une base annuelle cela représente des quantités d'eau énormes. Regardons l'exemple d'une unité de chauffage ayant une puissance de 3 tonnes (maison moyenne) et nécessitant un débit de 4 gpm/tonne. Selon une étude réalisée aux États-Unis (Dexheimer 1985), on estime que le temps d'opération de la pompe est de 20 min/hr en hiver et de 10 min/hr en été. Suivant ces hypothèses, on arrive à une consommation totalisant 6000 m³ (1,6 million de gallons) annuellement. Ces quantités d'eau entraînent inévitablement des problèmes reliés aux modes de disposition des eaux pompées. Nous aborderons cette problématique un peu plus loin.

B) Aspect qualitatif

Les eaux de mauvaise qualité qui contiennent une forte concentration

en ions dissous (calcium, magnésium et autres solides dissous) ou une forte charge de matières en suspension, sont peu recommandables dans les systèmes de pompe à chaleur. Elles peuvent amener des problèmes d'incrustation. Les eaux agressives, causant à l'opposé des problèmes de corrosion, sont également à éviter.

2.2.3 Modes de rejet de l'eau des circuits ouverts

Dans les systèmes ouverts, l'eau souterraine pompée est rejetée de différentes façons après son utilisation par la pompe à chaleur. On pourrait croire que le mode de rejet d'une eau n'ayant subi qu'une légère baisse de température (4 à 5 °C) et aucune transformation chimique ne présente pas de risque pour l'environnement. Cependant, en raison des grands volumes d'eau en cause, il est essentiel, si on désire conserver l'équilibre du cycle hydrogéologique et la pérennité de la ressource exploitée, de respecter certaines règles. Voici une analyse des différents modes de rejet possibles.

A) Rejet dans les eaux de surface

Les étangs, les lacs et les rivières peuvent être utilisés comme milieu récepteur des eaux de rejet. Cette pratique semble relativement fréquente en milieu rural. On doit cependant s'assurer qu'il n'y aura pas formation de glace dans le tuyau durant l'hiver entraînant un phénomène de reflux dans le tuyau. De plus, en été lorsque les eaux de surface sont autour de 20 °C, l'arrivée d'une eau à 5 °C peut créer un choc thermique et avoir des conséquences néfastes sur le milieu récepteur. En milieu agricole, le rejet en surface peut accroître le problème d'érosion des sols et augmenter la charge de sédiment dans les ruisseaux.

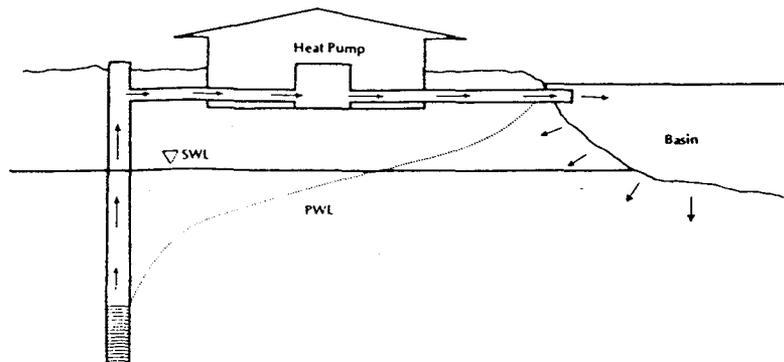
B) Rejet en bassin

Cette méthode peut être utilisée quand les couches supérieures du sol permettent un taux d'infiltration égal au taux de décharge du puits de pompage. Si par exemple le puits de production rejette l'équivalent de 10

gpm sur une période de 10 heures par jour, le bassin devra avoir une capacité de stockage et d'infiltration égale à 6000 gpd. Voici une liste des avantages et désavantages de ce type de rejet:

- Économique lorsque la grosseur du bassin est relativement petite.
- Facile d'entretien.
- Possibilité d'aménagement du bassin.
- Méthode ne rechargeant pas nécessairement l'aquifère en exploitation.
- Perte par évaporation.
- Entretien annuel nécessaire pour conserver un bon fonctionnement du bassin.

-FIGURE 4 - REJET EN BASSIN (Tiré de Smith 1980)

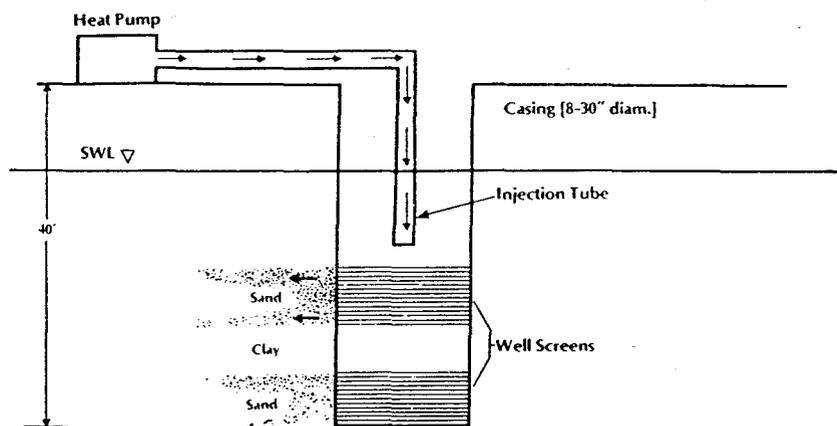


C) Rejet dans un puits vertical de large diamètre

Le rejet dans un puits vertical de large diamètre est très efficace si le dimensionnement est bien fait. Pour ce faire, une bonne connaissance des conditions géologiques est nécessaire. Le grand diamètre du puits agit comme capacité de stockage du système. Les principaux avantages et désavantages de ce type de rejet sont les suivants:

- Accès facile au puits pour les travaux d'entretien.
- Nécessite peu de terrain pour son installation.
- Économique.
- Possède une capacité de stockage généralement suffisante pour une journée d'utilisation du système.
- Ne recharge pas nécessairement l'aquifère exploité.

-FIGURE 5- REJET DANS UN PUIS DE LARGE DIAMETRE
(Tiré de Smith 1980)



D) Rejet dans un deuxième puits

Ce puits à une conception similaire au puits de production et peut même à l'occasion servir de puits de production. Ces puits présentent le grand avantage de retourner l'eau directement dans l'aquifère exploité. La technologie d'infiltration dans un deuxième puits ne semble cependant pas très bien connue par les installateurs de thermopompe et leurs contracteurs, ce qui amène certains problèmes. Voici quelques exemples de ces problèmes:

1) Faible capacité d'injection du puits. Bien que le retour de l'eau s'effectue dans la même formation, il arrive que la capacité du puits d'injection soit insuffisante. A ce moment là, il est recommandé de construire un puits d'injection supplémentaire.

2) Précipitation de certains minéraux. Pour éviter ce genre de problème, garder le système sous pression et éviter les fortes variations de température ($< 12^{\circ}\text{C}$).

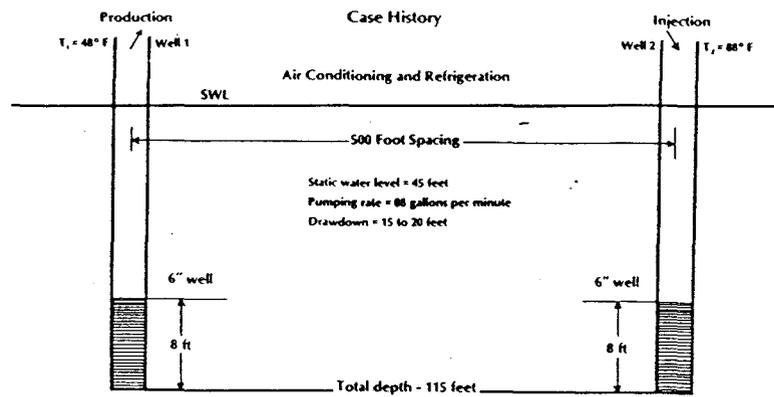
3) Entraînement d'air par le tuyau de rejet. Pour éviter ce problème s'assurer de garder le tuyau de rejet sous le niveau statique du puits.

4) Perte de capacité avec le temps. Cette perte est généralement causée par des particules qui viennent obstruer la crépine. L'incrustation chimique peut également causer ce genre de problème de même que la prolifération bactérienne. Le redéveloppement physique ou chimique du puits selon les méthodes conventionnelles règle habituellement le problème.

5) Interférence des températures entre le puits de production et celui de rejet. Si les puits sont trop près l'un de l'autre, on peut pomper une eau refroidie par le puits de rejet ce qui entraîne une perte d'efficacité du système. Une règle du pouce suggère un espacement de 15 mètres entre les puits pour éviter ce genre de problème. Cependant, selon Gass (1982), aucune règle empirique de ce genre ne devrait être appliquée pour connaître l'espacement nécessaire entre les puits, et chaque situation devrait être étudiée sur la base de ses caractéristiques spécifiques.

-FIGURE 6-

REJET DANS UN DEUXIEME PUIITS (Tiré de Smith 1980)

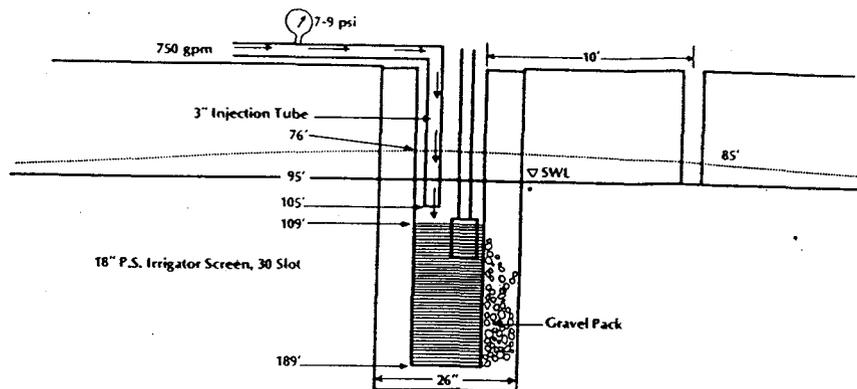


E) Rejet dans le même puits

Cette technique est semblable à celle du rejet dans un deuxième puits et présente sensiblement les mêmes inconvénients. En plus, certains problèmes liés à la distribution des températures autour du puits et aux temps de mélange des eaux devraient être étudiés afin de mieux évaluer l'efficacité de cette technique dans les systèmes de pompe à chaleur.

-FIGURE 7-

REJET DANS UN MEME PUIITS (Tiré de Smith 1980)



3. CARACTÉRISTIQUES DES EAUX SOUTERRAINES AU QUÉBEC

3.1 DISPONIBILITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

Simard et Des Rosiers (1979), divisent les ressources en eaux souterraines du Québec en deux grands groupes soit, les nappes à porosité primaire constituées de sédiments non-consolidés constituant la couverture quaternaire, et les nappes à porosité secondaire constituées d'un réseau de fractures, de fissures et de canaux de dissolution qu'on retrouve au niveau du socle rocheux.

Au Québec, les dépôts quaternaires sont distribués de façon complexe sur le territoire. De plus, la nature des dépôts est très variable d'un endroit à l'autre ce qui rend difficile l'évaluation globale de la disponibilité de l'eau souterraine contenue dans ces formations. Cependant, selon Poulin (1980), la majorité des formations de sable et de gravier ayant au moins un mètre d'épaisseur fournissent des débits supérieurs à 8 gpm.

Les nappes à porosité secondaire sont bien connues au Québec, et c'est principalement à partir de ce type d'aquifère que les utilisateurs d'eaux souterraines satisfont leurs besoins. La Figure 8 montre les différentes unités hydrogéologiques de la roche de fond au Québec telles que définies par Simard et Des Rosier (1979). On y observe trois catégories selon leur degré de perméabilité:

1) Les zones à faible perméabilité offrent généralement des possibilités de débits inférieures à 10 gpm. Elles se retrouvent principalement dans le Bouclier Canadien, dans la partie centrale des Basses-Terres du Saint-Laurent et dans le Bas Saint-Laurent.

2) Les zones à perméabilité modérée se retrouvent principalement dans les Appalaches et permettent l'exploitation de débits de l'ordre de 15 à 20 gpm.

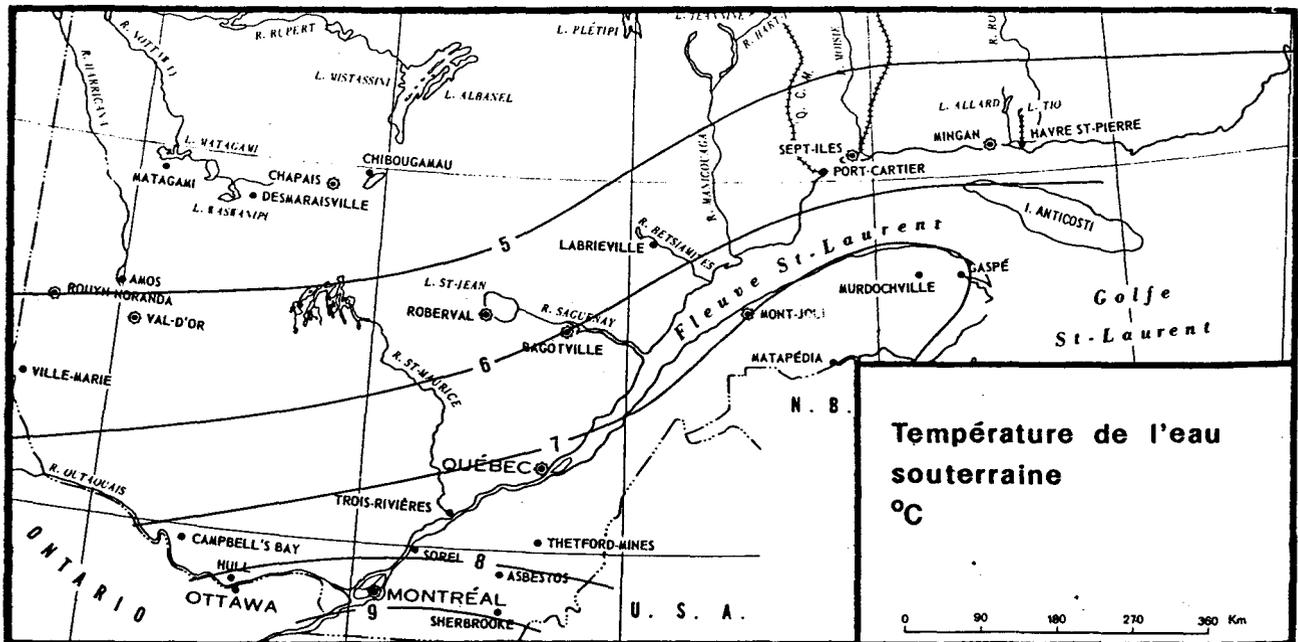
3) Les zones à perméabilité élevée sont concentrées dans la région de Montréal, dans une bande le long du Bouclier Canadien, aux Iles-de-la-Madeleine et sur la côte sud de la Gaspésie et de l'Île-d'Anticosti. Ces zones permettent des débits supérieurs à 30 gpm.

Il est donc possible de trouver, dans toutes les régions du Québec, des aquifères capable de fournir des débits permettant l'installation de pompe géothermique en circuit ouvert. La région de Montréal, particulièrement, présente le meilleur potentiel.

3.2 TEMPÉRATURE

La température de l'eau souterraine conditionne directement l'efficacité du système géothermique. En effet, plus la température est élevée, meilleures sont l'efficacité et la rentabilité de la pompe à chaleur. Selon une étude réalisée pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (Poulin 1980), la température de l'eau souterraine au Québec est de 3°C à 4°C supérieure à la température moyenne de l'air calculée sur une base annuelle. La Figure 9 présente une carte des isothermes de température de l'eau souterraine au Québec. On remarque que la température de l'eau souterraine varie entre 4°C au nord de la province et 10°C dans la région de Montréal.

-FIGURE 9- TEMPÉRATURE DE L'EAU SOUTERRAINE AU QUÉBEC
(Tiré de Simard et Des Rosiers 1979)



3.3 CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

Le cycle hydrologique et les conditions physico-chimiques et géologiques locales influencent grandement la qualité des eaux souterraines. Dans une même région il n'est pas rare d'observer une grande variabilité spatiale de la concentration d'un même élément. Il apparaît donc important de réaliser une analyse chimique de l'eau avant son utilisation. Dans les systèmes de pompe à chaleur, la qualité de l'eau est importante principalement pour minimiser les problèmes d'incrustation et de corrosion des équipements. Le Tableau 1, donne certaines indications sur la qualité requise des eaux en fonction du type d'échangeur utilisé en géothermie.

TABLEAU 1 QUALITÉ REQUISE DE L'EAU

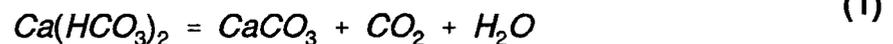
Paramètres	Échangeur en cuivre	Échangeur en cupronickel
Filtre (micron)	< 25	> 25
Chlorure (ppm)	< 300	300 à 600
Alcalinité	80-100	> 100
Ph	7.0 à 9.0	5.0 à 10.0
Sulfure (ppm)	aucun	< 0.1
Ca-Mg (ppm)	< 350	> 350
CO ₂ (ppm)	> 50	50 à 75
solides dissous (ppm)	< 1000	1000 à 1500

3.2.1 Problèmes d'incrustation

Le problème d'incrustation résulte de la précipitation d'ions présents dans l'eau sur différentes composantes métalliques du système. Dans une certaine mesure, l'incrustation peut être nécessaire pour prévenir la corrosion de certaines pièces métalliques, mais une accumulation trop importante diminue l'efficacité de la pompe à chaleur.

A) Incrustation chimique

Elle est principalement causée par la dureté de l'eau. De tous les minéraux présents dans l'eau, le carbonate de calcium (CaCO_3) est celui qui est responsable, presque en totalité, de la dureté de l'eau et des problèmes d'incrustation. L'équilibre minéralogique bicarbonate/carbonate est géré par la relation suivante:



Lorsque la pression de l'eau diminue (rabattement dans le puits par exemple) ou lorsque la température augmente, alors la concentration en CO_2 dissous dans l'eau baisse, entraînant une précipitation du carbonate. Comme l'eau souterraine est généralement sursaturée en CO_2 dissous, ce processus est relativement fréquent en présence de carbonate. Le carbonate de magnésium (MgCO_3), quand il est en très grande concentration (>5000 mg/l), peut devenir incrustant de la même manière (Stumm et Morgan 1981).

De même, les hydroxydes de fer et de manganèse peuvent précipiter et causer des problèmes d'incrustation sous des conditions de faible pH ou s'ils sont exposés à l'atmosphère avant l'utilisation de l'eau par la pompe à chaleur (Driscoll 1989).

Les problèmes que nous venons de décrire ont peu de chance de se produire dans la pompe à chaleur directement puisque l'eau souterraine circule en circuit fermé sans contact avec l'oxygène. Les risques se retrouvent donc principalement au niveau des crépines de la prise d'eau et du puits d'injection.

B) Incrustation mécanique

Elle résulte de l'accumulation de particules fines. Ce genre de problème survient principalement au niveau de la crépine du puits et peut être évité par un développement adéquat du puits.

C) Incrustation biologique

En présence de bactéries spécifiques, certains métaux comme le fer et le manganèse deviennent insolubles et précipitent à la surface de l'échangeur ou de la crépine. Pour ce faire, la quantité de fer dissous doit être entre 0.2 et 14 ppm.

D) Situation au Québec

Au Québec, certaines régions peuvent présenter des conditions favorables au processus d'incrustation. L'étude de Simard et Des Rosiers sur la qualité des eaux souterraines au Québec permet de faire les conclusions suivantes:

-Dureté: La dureté de l'eau est la propriété qui risque de causer le plus de problème aux systèmes géothermiques en circuit ouvert. La valeur moyenne pour les eaux souterraines du Québec est de 117 mg/l. Les plus fortes valeurs de dureté se retrouvent dans la région de Montréal avec une valeur moyenne de 259 mg/l de CaCO_3 et dans celle de l'Abitibi-Témiscamingue avec des valeurs moyennes autour de 200 mg/l de CaCO_3 . On observe que dans une même région, il peut y avoir une grande variabilité spatiale des valeurs de dureté. Par exemple, près de St-

Hyacinthe, dans un rayon de 50 kilomètres, la dureté passe de 175 mg/l de CaCO_3 à plus de 2000 mg/l de CaCO_3 . La variabilité de ce paramètre devrait inciter les installateurs à effectuer systématiquement une analyse chimique de la source d'eau exploitée.

-Fer: Cet élément présente des valeurs élevées dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (0.23 mg/l) et dans le Bouclier Canadien (0.18 mg/l). Le fer sous la forme $\text{Fe}(\text{OH})_3$ est très peu soluble à pH normal. Il y aura donc formation d'un précipité donnant une couleur rougeâtre à l'eau. Pour l'ensemble de la province la concentration moyenne est de 0.08 mg/l, ce qui est inférieur aux valeurs à partir desquelles il y a précipitation.

-Manganèse: En présence de certaines bactéries, le manganèse produit un précipité incrustant. Les concentrations moyennes les plus élevées se retrouvent dans le Bouclier Canadien (0,06 mg/l) et les plus faibles dans les Appalaches (0,024 mg/l). Ponctuellement, la plus grande concentration a été observée dans la région de Rouyn (0,176 mg/l).

3.2.2 Problèmes de corrosion

La corrosion attaque les systèmes de pompe à chaleur de la même façon que tous les autres types de puits. La corrosion résulte principalement des processus suivants:

A) Corrosion galvanique

Tous les métaux ont un potentiel électrocinétique. Si dans les pièces métalliques de l'installation on choisit des métaux ayant une grande différence de potentiel, on créera un champ électrocinétique entre ces métaux favorisant ainsi la corrosion du métal le plus élevé dans la série. Ce genre de problème est facilement évité par un choix judicieux des matériaux constituant le système géothermique.

B) Corrosion chimique

La corrosion chimique est fonction des facteurs du milieu suivants:

-Oxygène: Là où la corrosion se produit, il y a augmentation du processus en présence d'oxygène. Dans les eaux souterraines ce facteur a relativement peu d'importance puisqu'il s'agit généralement d'un milieu pauvre en oxygène dissous.

-Carbone dissous: Dans l'eau cet élément forme l'acide carbonique qui est un acide fort. La corrosion est donc favorisée par la présence de CO_2 dissous, principalement en présence d'oxygène.

-Sulfure d'hydrogène: Ce gaz, formé en milieu réducteur par décomposition de la matière organique, est souvent présent dans les eaux souterraines. Il forme, en présence d'oxygène, l'acide sulfurique qui accélère le processus de corrosion.

-Solides totaux dissous: La présence d'une forte charge en solides dissous augmente la conductivité électrique de la solution, ce qui a pour effet d'augmenter le potentiel corrosif principalement lorsque la valeur en solides totaux dissous dépasse 1000 ppm (Dexheimer 1985).

-Sels minéraux dissous: De la même façon que pour les solides totaux dissous, la présence de sels minéraux dissous augmente la conductivité électrique de la solution et, par le fait même, le processus de corrosion. Les principaux ions présents dans les eaux souterraines sont le calcium, le magnésium, les nitrates, le sodium, les bicarbonates, les chlorures et les sulfates.

-pH: Les conditions qui prévalent à des pH acides favorisent grandement le processus de corrosion. De façon naturelle au Québec les eaux souterraines sont neutres. Cependant, dans certaines régions les activités industrielles peuvent contribuer de façon importante à l'acidification des eaux souterraines. L'exemple des rejets miniers acides dans les régions minières est éloquent.

C) Situation au Québec

Au Québec, certaines régions peuvent présenter des conditions favorables au processus de corrosion. L'étude de Simard et Des Rosiers sur la qualité des eaux souterraines au Québec permet de faire certaines conclusions:

-Conductivité électrique: La valeur de conductivité électrique d'une eau est une indication des concentrations en solides totaux dissous. Au Québec, les eaux les plus conductrices se retrouvent dans les basses terres du Saint-Laurent, plus particulièrement dans la région de Montréal, de Saint-Hyacinthe et de Saint-Jean-D'Iberville, où les moyennes varient entre 750 et 1500 umho/cm avec des valeurs atteignant 23 800 umho/cm. La région du Lac Saint-Jean, ayant été envahie par la mer Laflamme, présente également des eaux avec une très fortes valeurs de conductivité soit tout près de 1000 umho/cm. Les eaux du Bouclier Canadien ont une conductivité moyenne de 500 umho/cm alors que celles des Appalaches sont les moins conductrices avec des valeurs moyennes d'environ 350 umho/cm.

-Chlorures: Les chlorures présentent une forte concentration dans les terrains jadis occupés par la mer. Les Basses-Terres du Saint-Laurent et le Lac Saint-Jean font parties de ces zones. De plus, en bordure du Fleuve Saint-Laurent dans la région de Montmagny et du bas Saint-Laurent, on

observe localement une augmentation des concentrations en chlorures qui pourrait être reliée à des infiltrations d'eau salée vers la nappe phréatique (Pelletier 1991).

La problématique issue de l'utilisation de sel déglacant sur les routes pourrait également causer, de façon ponctuelle, des problèmes de corrosion suite à une augmentation de la concentration en chlorures dans la nappe.

4. SITUATION DES POMPES GÉOTHERMIQUES AU QUÉBEC

L'utilisation de cette technologie est relativement récente au Québec. Le contexte énergétique particulier d'il y a quelques années, avec des coûts à la consommation d'électricité relativement bas, était peu propice au développement de nouvelles sources d'énergie. Il a été démontré par Bowles (1991), que la rentabilité des pompes géothermiques est en effet très fortement liée au prix de l'électricité. Cependant, la situation énergétique ayant changé ces dernières années, nous avons assisté à une augmentation du prix à la consommation de l'électricité et à une multiplication des programmes d'économie d'énergie. Nous croyons donc que les technologies en matière de diversification énergétique telles que les pompes géothermiques sont appelées à connaître un essor considérable dans le futur. Afin de mieux évaluer les impacts de cette technologie sur l'environnement, nous avons réalisé un bilan de la situation des pompes géothermiques au Québec. Ce bilan a été réalisé par le biais d'une enquête téléphonique auprès des fournisseurs et installateurs de thermopompes.

4.1 OBJECTIFS DE L'ENQUETE

Le principal objectif de cette enquête est de faire l'état de la situation des pompes géothermiques au Québec. Il s'agit de connaître combien d'unités sont installées par année, quels types de circuits sont utilisés (ouvert, fermé), les caractéristiques d'installation et d'opération de ces systèmes et quels sont les problèmes rencontrés par les installateurs. Ces données sont essentielles pour faire une analyse des impacts environnementaux des systèmes géothermiques dans le contexte québécois actuel.

4.2 MÉTHODE

L'enquête téléphonique a été réalisée durant le mois de mai 1992 auprès des principaux installateurs et fournisseurs de pompe géothermique des principales régions du Québec. Au total 26 entreprises ont collaboré à la réalisation de cette enquête en répondant au questionnaire. Une copie du questionnaire utilisé se trouve à l'annexe B.

4.3 RÉSULTATS

4.3.1 Nombre d'installations effectuées dans la dernière année (1991)

On observe au Tableau 2 que le nombre total d'installations de pompes géothermiques est d'environ 600 par année. Le nombre effectué en circuit ouvert est à peu près égal à celui en circuit fermé, soit environ 300 unités par année pour chacun des types de système. De plus, on remarque que les régions de Montréal et Québec sont celles où il y a le plus grand nombre d'installations.

Soulignons que les valeurs obtenues constituent une estimation du nombre réel d'installations faites au Québec en 1991. En effet, certains répondants ne savaient pas avec certitude le nombre d'unité qu'ils avaient vendus, et fournissaient une valeur approximative. De plus, pour des raisons qui nous sont inconnues, nous soupçonnons que certains répondants aient surévalué le nombre d'unités réellement installées.

TABLEAU 2 NOMBRE D'INSTALLATIONS

Nom de la région	Nbr. en circuit ouvert	Nbr. en circuit fermé
Outaouais	5	5
Montérégie	35	0
Montréal	223	115
Sherbrooke	0	4
Trois-Rivières	2	22
Québec	50	123
Lac St-Jean	4	3
Total	319	272

4.3.2 Type d'installation

Les deux grands principes d'installation géothermique, soit les systèmes à circuit ouvert et ceux à circuit fermé, sont utilisés à peu près également au Québec. Le fonctionnement de ces systèmes est décrit en détail dans la section 2.2 du présent document. Actuellement, le marché résidentiel constitue la presque totalité des unités vendues et installées. Voici certaines particularités recueillies auprès des installateurs face aux modes d'installation de chacun des systèmes.

A) Circuit fermé

En circuit fermé, les installations dans un puits vertical comptent pour 90% des unités contre 10% seulement pour les installations dans des tranchées horizontales. En fonction des contracteurs et du type de sol, la profondeur des forages pour les installations verticales varie entre 38 mètres (125') par tonne et 54 mètres (175') par tonne. Les installations horizontales nécessitent des tranchées variant entre 123 mètres (400') par tonne et 139 mètres (450') par tonne. Notons qu'une installation résidentielle moyenne requiert au Québec une capacité d'environ 3 tonnes.

Les tuyaux enfouis dans le sol sont en polyéthylène haute densité. Le liquide caloporteur qui circule dans ces tuyaux est généralement une solution de méthanol diluée avec l'eau dans des proportions allant de 25% à 50%. Un seul installateur a mentionné utiliser une solution de glycol diluée à 50 %. Les tuyaux utilisés sont soumis à des essais sous pression pour en vérifier leur étanchéité avant leur mise en place dans le sol. Selon les informations recueillies, aucune fuite ou déversement n'a été rapporté jusqu'à maintenant.

Le remplissage du trou de forage des systèmes verticaux s'effectue avec différents types de matériel. Dans la plupart des cas, les résidus de forage (poudre de roche) sont réintroduits dans le trou. La portion manquante en tête de forage est remplacée par du sable ou par du ciment.

Quelques contracteurs utilisent du ciment ou du sable comme matériel de remplissage sur toute la longueur du forage. Il nous a été mentionné également que dans certains cas aucun remplissage n'était effectué, laissant l'eau remplir le puits et agir comme élément de transfert de chaleur entre le massif et la tubulure. Toutefois, cette dernière pratique ne serait pas recommandable car en cas de gel, la glace formée entraînerait des contraintes anormales sur la tubulure, augmentant ainsi les risques de bris.

Le principal problème qui nous a été rapporté avec ce genre de système est le risque de gel du sol et de formation d'une lentille de glace autour de la tubulure d'échange. Ce type de problème a été observé à plusieurs reprises en raison du mauvais dimensionnement des installations (puits pas assez profond). Cela pourrait également survenir dans le cas où la densité et la proximité entre les installations seraient trop grandes. Cependant, selon les contracteurs, ces problèmes sont choses du passé et les pratiques actuelles, s'inspirant du code CSA, garantissent un fonctionnement efficace sans gel du sol.

B) Circuit ouvert

Pour opérer un système en circuit ouvert il faut s'assurer d'avoir la quantité et la qualité d'eau nécessaires. Pour ce faire, les installateurs se fient à l'expérience des foreurs et puisatiers de la région. En effet, très peu d'entre eux effectuent un essai de pompage et des analyses chimiques pour caractériser l'aquifère exploité. Au Québec, la plupart des installations géothermiques en système ouvert exploitent les aquifères en milieu fracturé.

Comme démontré à la section 2.2.2 de ce document, la quantité d'eau nécessaire au fonctionnement de ce genre de système est élevée. Il existe différents modes de rejet de ces eaux. Le Tableau 3 présente le pourcentage d'utilisation des divers modes de rejet utilisés au Québec.

TABLEAU 3

MODES DE REJET

Eaux de surface	Égout	Puits de rejet
60 %	28 %	12 %

On observe que dans la majorité des cas, les rejets s'effectuent dans le réseau hydrographique de surface (fossé, cours d'eau, lac). Cette façon de faire peut avoir des conséquences importantes sur le cycle hydrogéologique, de même que sur l'équilibre écologique du milieu récepteur.

Bien que la norme CSA-C445-M89 l'interdise, les rejets à l'égout sont très fréquents principalement en milieu urbain. Ces rejets sont effectués indifféremment du type de réseau d'égout en présence (sanitaire, pluvial, combiné). En plus des conséquences sur le cycle hydrogéologique, ce type de rejet surcharge inutilement les stations d'épuration des eaux.

Finalement, la réinjection dans un puits de rejet est utilisée occasionnellement. Quelques tentatives infructueuses (colmatage, débordement du puits) ont amené la majorité des installateurs à ignorer cette méthode alors que d'autres pays l'utilisent systématiquement sans aucun problème. Le savoir faire est donc très important pour réussir la réinjection dans un puits.

5. ASPECT ENVIRONNEMENTAL DE L'UTILISATION DES POMPES A CHALEUR

Dans la recherche de technologies de remplacement, il est primordial de s'assurer que les nouvelles technologies n'amènent pas plus de problèmes qu'elles n'en solutionnent, principalement au niveau environnemental. L'étude de Svensson et al.(1991) fait une analyse comparative entre les impacts associés à la production d'énergie à partir de combustibles fossiles et ceux associés aux pompes géothermiques. Il conclut que dans la majorité des cas, l'utilisation des pompes géothermiques présente moins d'effets négatifs sur l'environnement que les sources traditionnelles de production d'énergie. De plus, l'utilisation d'une thermopompe constitue une économie d'énergie appréciable puisque pour une même charge de chauffage, elle consomme en moyenne 65% moins d'énergie que le système électrique (Bowles 1991). Il existe cependant certains impacts négatifs, notamment au niveau de l'équilibre des aquifères, qui doivent être pris en compte. Voici donc une analyse globale des principaux impacts potentiels associés à l'utilisation des pompes géothermiques.

5.1 IMPACTS DES SYSTEMES EN CIRCUIT FERMÉ

Dans ce type d'installation, les principaux problèmes rencontrés sont reliés premièrement à la possibilité de fuites de liquide caloporteur venant de la boucle enfouie dans le sol, et deuxièmement à la formation d'une lentille de glace autour de la boucle. Le liquide caloporteur utilisé est un mélange de méthanol ou d'éthylène glycol et d'eau. Bien que ces liquides aient une toxicité relativement faible, leur utilisation doit être restreinte, principalement à proximité des sources d'approvisionnement en eau potable. La norme CSA-C445-M89 recommande d'ailleurs de faire les installations en circuit fermé suffisamment éloignées des puits d'eau potable et des installations septiques. Une étude réalisée par la Canadian Earth Energy Association (1989) rapporte qu'au Canada 9% des installations géothermiques en circuit fermé présentent des pertes de liquide dans l'environnement. En Suède également, Svensson et al.(1991) mentionnent plusieurs fuites signalées suite à des bris causés, entre autres, par des mouvements de terrain ou des dommages lors d'excavations. Cependant, les risques de fuite, bien qu'étant réels, ne doivent pas être surestimés. Lors de l'enquête téléphonique, aucune fuite ne fut, en effet,

rapportée par les répondants. Finalement, dans l'éventualité d'une fuite, les quantités potentiellement perdues seront toujours minimales par rapport au potentiel de dilution du milieu.

La formation de lentilles de glace autour de la tubulure a été rapportée à plusieurs reprises, comme risque potentiel associé aux circuits fermés. Ce type de problème est principalement causé par un mauvais dimensionnement des installations créant une charge de chauffage trop forte pour la capacité du sol. La formation de telles lentilles provoque des contraintes anormales sur la tubulure et peut être la cause de fuite du système. De plus, cette baisse de température peut affecter localement la croissance des végétaux et des organismes du sol. La norme CSA-C445-M89 donne certaines spécifications sur l'installation des systèmes en circuit fermé qui devraient enrayer les problèmes reliés au gel du sol.

5.2 IMPACTS DES SYSTEMES EN CIRCUIT OUVERT

Les impacts de ce type de système sont potentiellement plus néfastes pour l'environnement que ceux reliés à l'opération de système en circuit fermé. Les effets appréhendés seront fonction du type de rejet, de la densité d'utilisation et du taux de variation de la température des eaux de rejet. Pour effectuer notre analyse, nous diviserons les systèmes en circuit ouvert selon deux modes d'opération, soit le mode consommation (consumptive use) et le mode non-consommation (nonconsumptive use).

5.2.1 Mode consommation

Ce mode d'opération implique un rejet de l'eau pompée à un endroit qui ne permet pas une recharge directe de l'aquifère exploité. En raison des grandes quantités d'eau nécessaires à l'opération des systèmes en circuit ouvert, cette façon de faire peut entraîner un déficit au niveau de la recharge et un épuisement de la ressource en eaux souterraines. Une telle surexploitation des eaux souterraines va à l'encontre des philosophies de développement durable et de ressource renouvelable que doivent rencontrer les nouvelles technologies en matière énergétique. Comme démontré dans l'enquête téléphonique, environ 90% des systèmes en circuit ouvert installés au Québec

fonctionnent en mode consommation. En n'assurant pas une recharge suffisante de l'aquifère, certains problèmes associés au rabattement du niveau statique peuvent survenir. Par exemple, à proximité d'un puits d'alimentation en eau potable il peut y avoir superposition des cônes de dépression et arrêt de production des puits. En milieu non-consolidé, une baisse du niveau piézométrique peut provoquer une augmentation des contraintes effectives suivie de tassement du sol. Ce genre de problème a été observé au Texas, en Arizona et en Californie (Armitage et al.1980). Également, ce mode d'exploitation peut induire de nouveaux gradients hydrauliques favorisant, en milieu côtier, l'intrusion de lentilles salines telles qu'observées dans la région de Seattle aux États-Unis. Également, ces nouveaux gradients pourraient accélérer la migration de contaminants à proximité de sites d'enfouissement ou d'autres sources de pollution. Soulignons que ces problèmes ne sont pas spécifiques à l'utilisation des pompes à chaleur mais communs à tous les ouvrages de pompage susceptibles d'entraîner une surexploitation des eaux souterraines.

Suivant l'endroit où l'eau est rejetée, le mode consommation présente différents impacts sur le milieu récepteur. Par exemple, le rejet dans le réseau hydrographique de surface provoquera un choc thermique en raison de la différence de température entre l'eau de rejet et celle du milieu particulièrement durant l'été. En milieu agricole, le rejet en surface peut accroître le problème d'érosion des sols et augmenter la charge de sédiments dans les ruisseaux. Les rejets à l'égout causeront des surcharges du réseau et du système d'épuration en plus de le rendre moins efficace suite à l'effet de dilution. Ils pourraient même contribuer aux problèmes de débordement du réseau d'égout en temps de pluie.

5.2.2 Mode non-consommation

Dans ce type de système, les eaux de pompage sont retournées directement dans l'aquifère exploité, à proximité de l'endroit où elles ont été pompées. Habituellement on utilise pour ce faire un puits d'injection. La majorité des problèmes issus du mode consommation, tels que décrits ci-haut, ne sont pas observés en mode non-consommation puisqu'on maintient un équilibre dynamique entre les intrants et les

extrants. Théoriquement, il serait donc possible d'exploiter ce type de système en continu sans observer de baisse dans le niveau statique de l'aquifère. On peut alors, véritablement parler d'énergie renouvelable lorsque le système est opéré en mode non-consommation. Cependant, le rejet d'une eau ayant subi une variation de température de quelques degrés peut avoir un effet sur le bilan thermique de l'aquifère. Les travaux de Gass (1980), Andrews (1978) et Sasman (1971), démontrent cependant qu'il y aurait peu d'impact sur le bilan thermique de l'aquifère dans les régions où il y a une faible densité d'installation. Par contre, dans les zones plus exploitées, la variation de température pourrait être significative. Cette variation, si elle est importante, peut amener des changements dans les équilibres chimiques des eaux souterraines. Les principales réactions qui seront affectées sont les suivantes:

- 1) Les processus d'adsorption-désorption à la surface de la matrice de l'aquifère.
- 2) Les processus de dissolution-précipitation des différents minéraux principalement ceux du système des carbonates.
- 3) Les processus d'oxydation, de réduction et d'hydrolyse de certains métaux.

La précipitation de certains minéraux pourrait venir à inhiber le mouvement de l'eau, rendant inutilisable l'aquifère ou du moins le puits (Bacon 1981). Il serait donc important, principalement pour les zones à forte utilisation de pompes géothermiques opérées en mode non-consommation, de réaliser des études dans le but d'évaluer les impacts réels sur le bilan thermique des aquifères et sur les équilibres chimiques des eaux souterraines. Ces connaissances sont essentielles si l'on désire effectuer une gestion rationnelle de la ressource et éviter les conflits entre les différents utilisateurs.

5.3 IMPACTS COMMUNS AUX SYSTEMES FERMÉ ET OUVERT

Certains problèmes sont reliés directement à l'utilisation de la thermopompe indifféremment du type de système en cause. Il s'agit, principalement, des problèmes associés au bruit et à l'utilisation de CFC dans le fonctionnement interne de la thermopompe.

5.3.1 Bruit

Dans les régions péri-urbaines et les banlieues, les populations sont particulièrement sensibles à la pollution par le bruit. L'installation d'une thermopompe à l'extérieur de la maison peut devenir une source de conflit avec vos voisins et entacher la réputation environnementale de cette technologie. Cependant, comparativement aux pompes à chaleur de type air-air qui doivent être installées à l'extérieur, les pompes géothermiques prennent place à l'intérieur du bâtiment, limitant ainsi les problèmes reliés au bruit.

5.3.2 CFC

Ces dernières années, les risques environnementaux associés à l'utilisation des CFC ont été largement documentés. Comme le fonctionnement interne des pompes à chaleur utilise du Fréon R-22, il contribue aux risques de destruction de la couche d'ozone. Selon Vermeulen (1990), le remplacement prochain des CFC par les HFC et les HCFC devrait réduire à un niveau acceptable, les risques d'impacts sur la couche d'ozone.

TABLEAU 4

IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

IMPACTS	CIRCUIT OUVERT		CIRCUIT FERMÉ
	MODE CONSOMMATION	MODE NON-CONSOMMATION	
Fuite de CFC	oui	oui	oui
Fuite de liquide caloporteur	non	non	Méthanol et Éthylène glycol
Gel du sol	non	non	Possibilité de formation de lentille de glace
Déséquilibre du cycle hydrogéologique	Entraîne un déficit de la recharge de l'aquifère	non	non
Problème de tassement du sol	Augmentation des contraintes effectives due à une baisse du niveau piézométrique	non	non
Changement du gradient hydraulique	oui	oui	non
Choc thermique	Principalement sur les petits cours d'eau et les petits lacs	Changement des constantes d'équilibres des réactions	non
Conflit d'utilisation	Avec des sources d'eau potable ou d'autres PACG si la densité est grande	Idem	Idem
Bruit	oui	oui	oui

6. RÉGLEMENTATION

Bien que l'application de la technologie des pompes géothermiques soit relativement récente au Québec, il semble important d'établir dès maintenant des normes visant son utilisation afin de protéger la ressource et les utilisateurs.

Les principaux défis qui se présentent aux gestionnaires de la ressource en eau souterraine sont la coordination de l'offre et de la demande entre les différents utilisateurs (industrie, agriculture, domestique, énergétique) principalement dans les régions où l'on fait une grande utilisation des eaux souterraines et la protection de l'intégrité des caractéristiques physiques et chimiques de la ressource.

Ce chapitre présente une revue de la réglementation existant dans différents pays exploitant l'énergie géothermique de basse température à l'aide de pompes à chaleur. On apportera également quelques commentaires sur l'établissement d'une réglementation dans le contexte québécois.

6.1 CANADA

Au niveau national, il existe au Canada deux normes établies par l'Association Canadienne de Normalisation (CSA) visant spécifiquement les pompes géothermiques. Il s'agit des normes CAN/CSA-C445-M89 et CAN/CSA-C446-M90. Ces normes énoncent les règles de conception et d'installation des thermopompes utilisant les eaux de surface ou souterraines en circuit ouvert ou fermé comme source froide ou chaude. Voici un résumé de quelques points importants contenus dans ces normes.

-La température minimale de retour de l'antigel dans les boucles en circuit fermé devrait être de -2°C afin de diminuer les risques de formation d'une lentille de glace dans le sol.

-Le système de thermopompe devrait être équipé d'un dispositif de verrouillage du compresseur pour l'isoler de la boucle si la pression intérieure de celle-ci atteint 100%, ce qui pourrait indiquer une surcharge du système.

-L'entrepreneur doit s'assurer que le propriétaire a un accès légal aux ressources terrestre et aquatique convoitées, que les puits d'alimentation fourniront un débit suffisant, que les puits de rejet absorberont les débits de rejet sans déborder et que les ouvrages de captage ne causeront pas de nuisance aux servitudes publiques.

-Ces deux normes CSA donnent plusieurs spécifications réglementant les matériaux qui doivent être utilisés pour l'installation des systèmes géothermiques.

-Les puits doivent être construits de façon à prévenir la contamination des eaux souterraines par les eaux de surface et de façon à éviter le mélange de couches aquifères ayant des qualités d'eau différentes.

-Les systèmes en circuit ouvert ne doivent pas être raccordés au réseau d'aqueduc municipal.

-On ne doit pas raccorder les canalisations des systèmes en circuit ouvert au réseau d'égouts municipaux ou à une fosse septique.

Soulignons qu'en plus de ces normes nationales, chaque province peut adopter des dispositions particulières pour réglementer l'usage des pompes géothermiques. En voici quelques exemples.

QUÉBEC: Il n'existe actuellement au Québec aucune réglementation spécifique concernant l'utilisation de l'énergie du sol et des eaux souterraines à des fins de climatisation et de chauffage.

ONTARIO: L'Ontario est la province où la ressource géothermique est la plus exploitée au Canada. L'implication d'Ontario-Hydro dans ce secteur d'activité n'est certainement pas étrangère à l'essor qu'a connu cette industrie en Ontario.

Actuellement le Ministère de l'Environnement de cette province étudie un projet de réglementation visant spécifiquement l'utilisation de cette source d'énergie. Le ministère est présentement en discussion avec l'industrie et le projet de règlement sera rendu public dans quelques mois.

MANITOBA: L'utilisation de l'eau souterraine pour le chauffage et la climatisation des bâtiments nécessite dans cette province l'obtention d'un permis en vertu du "Water Rights Act". L'émission du permis s'effectue après une analyse individuelle de chaque demande et peut contenir certaines conditions particulières. Voici les lignes directrices servant à l'évaluation des projets:

- La totalité de l'eau pompée au puits de production doit être retournée à l'aquifère exploité par un puits de rejet.
- La température maximale autorisée de l'eau de rejet est de 12.0 °C.
- La température minimale autorisée de l'eau de rejet est de 1.5 °C.
- L'eau de rejet ne doit pas être altérée chimiquement.
- L'installation du puits doit recevoir l'autorisation des autorités.
- Un essai de pompage doit être réalisé et remis aux autorités.
- On doit remettre un résumé des opérations de pompage, un relevé des niveaux statique et dynamique et un relevé des températures des puits de pompage et de rejet à la "Water resources branch".

De plus, il existe des coûts reliés à l'utilisation de l'eau souterraine.

-Mois de 100 000 m³ = \$1.00/1000 m³

-De 100 000 à 500 000 m³ = \$1.25/1000 m³

-Plus de 500 000 m³ = \$1.50/1000 m³

Il a été remarqué que l'implantation de frais reliés à l'utilisation de l'eau souterraine peut devenir une contrainte majeure au développement de cette technologie puisqu'ils représentent des coûts supplémentaires d'utilisation.

6.2 ÉTATS-UNIS

Aux États-Unis, l'utilisation des pompes à chaleur doit respecter la réglementation des trois niveaux de gouvernement soit le fédéral, l'État et le municipal.

6.2.1 Règlements fédéraux

Au niveau fédéral on retrouve deux principaux programmes concernant les eaux souterraines et qui affectent l'utilisation des pompes à chaleur.

1) "The National Pollutant Discharge Elimination System" (NPDES).

Ce programme vise principalement le contrôle de tous les déversements en milieu aquatique en exigeant l'obtention d'un permis de l'État concerné. Un amendement à ce programme affecte particulièrement l'utilisation des pompes à chaleur soit le "Clean Water Act". En effet, cet amendement définit la chaleur comme un polluant et le rejet de chaleur dans le milieu ne doit pas faire augmenter la température du milieu récepteur de plus de quelques degrés. Cette réglementation est appliquée de façon très large et il est plutôt rare que l'émission d'un permis soit refusée. Cependant, si le nombre d'installations continue d'augmenter dans les prochaines années, cette façon de faire sera vraisemblablement révisée par les autorités. Pour les grosses installations (industrielles ou communautaires), l'émission d'un permis exige du promoteur qu'il effectue le suivi des volumes d'eau utilisés et de la variation de la température de l'eau.

2) "The Underground Injection Control Program" (UICP).

Ce programme a pour principal objectif la protection des sources souterraines d'eau potable pour la consommation des populations humaines. Ce programme s'applique à tous les aquifères ou portions d'aquifère servant actuellement de source d'eau potable. De plus, tout aquifère ou portion d'aquifère présentant un certain potentiel de production et ayant moins de 10,000 mg/l de solides totaux dissous, est visé par ce programme.

6.2.2 Règlements d'État

Plusieurs règlements d'État sont susceptibles d'influencer l'utilisation des pompes géothermiques. Ces règlements concernent principalement la construction des puits, les restrictions sur l'utilisation de l'eau et la disposition des effluents. L'annexe C de ce rapport présente un résumé de la réglementation état par état.

Les règles de construction des puits varient grandement d'un état à l'autre. Certains n'ont tout simplement aucune règle alors que d'autres exigent l'obtention d'un permis, la remise d'un rapport de forage et la réalisation d'analyses chimiques de l'eau.

Au niveau des restrictions sur l'utilisation de l'eau, la majorité des états en n'ont pas lorsqu'il s'agit d'une installation domestique. Par contre, certains autres états exigeront l'obtention d'un permis pour tout les types d'installations ou pour ceux qui requièrent un niveau de pompage supérieur à une limite spécifiée.

De la même façon, les exigences sur la disposition des effluents varient grandement entre les états. Certains interdisent tout simplement tous types de rejet dans le sous-sol alors que d'autres n'ont pas de réglementation particulière.

Exemple de la Californie: A titre d'exemple, voici un résumé de la

réglementation de l'État de Californie reconnue pour être relativement restrictive.

Le foreur doit obligatoirement détenir un permis pour pouvoir travailler dans cet état et il doit obtenir une autorisation pour chaque travail de forage. Il doit se conformer à des standards de construction des puits et les puits doivent être à une distance minimale de toutes sources de contamination potentielle. Les eaux de rejet ne doivent pas avoir subi une augmentation de température supérieure à 8°F. Les eaux de rejet ne doivent pas contenir de substances toxiques ou d'autres substances qui pourraient altérer l'intégrité de l'eau souterraine. Une valve permettant l'échantillonnage de l'eau de rejet doit être en place sur les puits de pompage et de rejet.

6.2.3 Règlements municipaux

Plusieurs règlements municipaux influencent l'utilisation des pompes géothermiques. Par exemple, la plupart des municipalités interdisent le forage d'un puits d'alimentation en eau là où un service d'aqueduc existe. Une permission peut cependant être obtenue pour les puits servant aux thermopompes exclusivement. A certains endroits, on exige que le rejet s'effectue obligatoirement dans l'aquifère exploité afin de prévenir les problèmes de rabattement excessif du niveau statique de la nappe.

Soulignons en terminant que la philosophie de la réglementation américaine n'est pas de créer une limitation incontournable au développement des pompes géothermiques mais de garantir la conservation de la ressource.

6.3 FRANCE

Actuellement dans ce pays les pompes géothermiques de petite dimension ne font l'objet d'aucune réglementation particulière. Les plus grosses installations, ayant des forages de plus de 10 mètres et pouvant prélever plus de 8 m³/h, doivent cependant être déclarées aux autorités et sont soumises à différentes règles qui sont résumées dans le Tableau 5.

Le rejet de l'eau utilisée dans les systèmes en circuit ouvert doit faire l'objet d'une autorisation préfectorale avant sa réalisation.

Certains auteurs (Ausseur et Sauty 1985, Collin et al. 1982) estiment que la prolifération des systèmes exploitant l'eau souterraine, associée au manque de réglementation spécifique dans ce domaine, pourrait mener à la surexploitation des aquifères. L'eau souterraine de bonne qualité est une ressource précieuse qui se doit d'être conservée prioritairement pour la consommation en eau potable.

Bien que la réinjection de l'eau dans l'aquifère exploité s'avère une solution intéressante pour conserver la pérennité de la ressource, il persiste un risque de pollution thermique de la nappe. Cette pollution peut intervenir auprès des autres utilisateurs d'eau souterraine implantés dans le voisinage. La réglementation devrait donc envisager le problème de la gestion des nappes sous un double aspect, l'aspect hydraulique et l'aspect thermique. Déjà dans la région parisienne, l'agence de bassin agit dans ce sens et taxe les réinjections thermiques supérieures à 30 °C.

TABLEAU 5 RÉSUMÉ DE LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE
(Tirée de Ausseur et Sauty 1985)

Aspects de la demande	Formalités administratives	Réglementation applicable	Taxes et redevances
1. TRAVAUX - OUVRAGES			
. Travaux souterrains à plus de 10m de profondeur	déclaration	Art. 131 du Code Minier	-
. Zones soumises au décret loi de 1935 (Nord, Pas-de-Calais, Gironde, Territoire de Belfort, Ile-de-France, Moselle, Vosges, Roussillon, Calvados, nappe de la Crau)	autorisation	Décret loi du 8.8.1935	-
. Constructions	permis de construire	Art. L 421-1 du Code de l'Urbanisme	TLE éventuellement
. Recherche et exploitation de gîtes géothermiques à basse température (moins de 150°C)	autorisation de recherche et permis d'exploiter	Art. 98 à 102 du Code Minier	-
. Prélèvements de chaleur souterraine dont la profondeur est inférieure à 100m et le débit calorifique maximal possible inférieur à 200th/h (par rapport à 20°C)	déclaration	Art. 102 du Code Minier et décret n° 78-498 du 28.3.78	-
2. PRELEVEMENTS D'EAU			
2.1. Eaux souterraines			
. Installation permettant un débit de plus de 8m³/h à des fins non domestiques	déclaration au préfet	Décret n° 73-219 du 23.2.79 Arrêté du 8.3.73	Redevances à l'Agence Financière de Bassin (voir notice)
2.2. Redevances à l'Agence Financière de Bassin Pour tous prélèvements	déclaration annuelle	Délibération du Conseil d'Administration	Redevances
3. REJETS			
3.1. Dans le milieu rural			
. Rejets susceptibles d'altérer la qualité de l'eau	autorisation préfectorale	Décret n° 73-218 du 23.2.73	Redevances à l'Agence Financière de Bassin
- dans les eaux de surface			
- dans les eaux souterraines			
* jusqu'à 10m de profondeur	Id	Id	
* au-delà de 10m de profondeur	Id	Id	
. Rejets non susceptibles d'altérer la qualité de l'eau, ou réinjections dans la nappe ayant servi au prélèvement	-	Arrêté du 13.5.75	
3.2. Dans un réseau d'assainissement			
. Réseau d'eaux pluviales ou réseau unitaire seulement	autorisation	Décret n° 67-945 du 24.10.67	voir Collectivité

6.4 GRANDE-BRETAGNE

En Grande-Bretagne il n'y a pas de règlement spécifique à l'utilisation de la ressource géothermique. Il existe donc une certaine incertitude face à ce qui est permis et à ce qu'il ne l'est pas dans ce domaine. En l'absence de loi spécifique, l'exploitation de l'énergie géothermique est soumise à d'autres lois plus générales telles que la "loi sur les autres substances productrices d'énergie", la "loi sur les autres substances minérales" et la "loi sur l'extraction et le rejet des eaux". Voici un résumé des principaux effets de ces lois.

-Il est nécessaire d'obtenir un permis pour exploiter les eaux souterraines.

-Le rejet d'un fluide géothermal refroidi fait l'objet d'un contrôle du gouvernement.

-Le rejet en surface de toute substance nécessite l'obtention d'un permis.

-Il est nécessaire d'obtenir une autorisation de la "British Geological Survey" pour la réalisation de forages.

Notons également qu'il n'existe pas actuellement d'obligation de la part de l'exploitant à retourner les eaux de rejet dans l'aquifère exploité afin de conserver les niveaux piézométriques.

6.5 DANEMARK

L'information que nous avons recueillie de ce pays concerne principalement la réglementation relative à la pollution thermique des eaux souterraines. Avant 1980, il n'y avait pas de règle concernant ce type de pollution. Cependant, le nombre de demandes de permis pour l'installation de pompe à chaleur en circuit ouvert augmentant, une réglementation temporaire fut mise en place en 1980 pour régir principalement les

installations domestiques. Voici l'essentiel de cette réglementation.

-L'injection d'une eau refroidie par un système de pompe à chaleur doit se faire à plus de 300 mètres d'un puits de pompage pour l'eau potable et à plus de 100 mètres d'une autre pompe à chaleur exploitant le même aquifère. Pour les aquifères près de la surface, la règle de 300 mètres passe à 100 mètres.

-Pour des installations multifamiliales, les distances citées ci-haut doivent être multipliées par la racine carrée du nombre d'unités familiales.

-La température d'injection ne doit pas être inférieure à 5 °C.

-Dans une installation domiciliaire on recommande un espacement de 50 mètres entre les puits d'injection et de pompage.

Ces recommandations ont comme objectif d'empêcher le pompage d'une eau ayant subi une baisse de plus de 0.5 °C par rapport à sa température naturel.

Récemment, les points suivants sont venus s'ajouter ou modifier la réglementation existante.

-L'injection d'une eau refroidie ne doit pas être située à moins de 75 mètres d'un puits d'approvisionnement en eau potable.

-L'injection d'une eau refroidie ne doit pas influencer de plus de 0.5 °C la température de toute autre eau pompée à proximité par rapport à la température naturelle des eaux souterraines environnantes.

-La quantité d'énergie retirée d'un aquifère de surface ne doit pas dépasser 4×10^{11} j/an/ha

6.6 SUEDE

La loi Suédoise stipule que le propriétaire d'un terrain possède un titre sur les eaux de surface et souterraines qui sont de passage ou qui résident sur son terrain. Ce titre lui donne le privilège de demander une autorisation pour exploiter cette ressource. Cependant, l'exploitation d'un puits de pompage d'un volume inférieur à 300 m³ par jour ne nécessite aucune autorisation.

Toutes installations prévoyant l'exploitation de plus de 1 MW de puissance à partir de l'eau souterraine ou le stockage de plus de 3000 MWh dans le sol doivent obligatoirement être déclarées aux autorités avant leurs mise en marche.

Selon Aberg et Viak (1983), il y a plusieurs règlements différents qui s'appliquent à l'utilisation de la chaleur du sol comme source d'énergie, ce qui amène une certaine confusion. La situation légale de l'utilisation de l'énergie du sol devrait être éclaircie.

6.7 SUISSE

L'office fédéral de la protection de l'environnement Suisse a publié en avril 1982 des directives sur l'utilisation de la chaleur des eaux et du sol à des fins de climatisation et de chauffage. Ces directives s'ajoutent aux exigences imposées par la législation en vigueur dans ce pays. Voici un résumé des principales règles et recommandations visant l'utilisation de la chaleur des eaux et du sol. L'annexe D de ce document présente les bases juridiques de la constitution fédérale Suisse sur la protection des eaux.

-Tous travaux de prélèvement de chaleur des eaux et du sol doit faire l'objet d'une demande d'autorisation.

-L'analyse de chaque demande est réalisée de façon à favoriser la protection de l'environnement, l'économie d'énergie et l'économie de la ressource en eau souterraine.

-Il est interdit d'introduire dans les eaux des substances susceptibles de polluer. La chaleur peut être considérée comme une source de pollution.

-Dans le cas de système en circuit fermé, un propriétaire foncier qui utilise la chaleur du sol ne peut capter que l'énergie se trouvant directement dans le fond de terrain lui appartenant.

-L'approvisionnement en eau potable à partir d'eaux souterraines à toujours priorité sur l'exploitation de la chaleur à partir de cette même source.

-Il existe dans ce pays une classification des aquifères selon leurs usages potentiels. Ainsi, certains aquifères ne peuvent être utilisés qu'à des fins d'approvisionnement en eau potable alors que d'autres peuvent également servir au prélèvement de chaleur. De plus, les systèmes en circuit fermé sont interdits dans plusieurs zones réservées à l'approvisionnement en eau potable en raison du risque de contamination.

-Il importe de retourner les eaux pompées à l'aquifère exploité de manière à maintenir la capacité des nappes souterraines.

-Les puits de pompage et d'injection doivent être conçus de façon à permettre l'échantillonnage de l'eau.

-Dans le cas de grosse installation, le propriétaire devrait enregistrer les débits de pompage et d'injection de même que la température de l'eau. De plus, il devrait mettre en place un réseau de surveillance de la température et des charges à l'aide de piézomètres.

6.8 RECOMMANDATIONS

Suite à cette revue des règles existantes dans différents pays, voici quelques suggestions qui pourraient être intégrées à une réglementation dans le contexte québécois.

- Exiger la déclaration de tous travaux de forage et de pompage.
- Exiger l'émission d'un certificat d'autorisation pour les travaux de captage qui dépassent un certain débit déterminé.
- Exiger la réalisation d'analyses chimiques aux puits de pompage et de réinjection.
- Rendre obligatoire la réinjection de l'eau pompée dans l'aquifère exploité.
- L'eau réinjectée devrait circuler en circuit fermé entre le puits de pompage et celui d'injection afin d'éviter tout contact avec l'atmosphère qui modifierait les conditions d'équilibre de l'eau.
- Aucun additif (inhibiteur de corrosion, adoucisseur d'eau) ne devrait être ajouté à une eau réinjectée dans l'aquifère.
- Une eau de mauvaise qualité ne devrait jamais être réinjectée dans un aquifère contenant une eau de bonne qualité.
- Le système de pompe à chaleur devrait être installé avec un dispositif d'arrêt automatique en cas de fuite de liquide des conduites de l'échangeur.
- Prévoir un dispositif pour empêcher les reflux de la pompe à chaleur vers le puits de pompage afin d'éviter d'éventuelles contaminations.
- Prévoir un niveau d'exploitation et de réinjection qui empêchera le dénoiement des pompes et qui n'influencera pas les ouvrages de captage avoisinants. Pour ce faire, exiger la réalisation d'essais de pompage et de réinjection.
- Prévoir une distance suffisamment grande entre le puits de pompage et de réinjection de même qu'avec les puits de pompage avoisinant afin de permettre à l'eau injectée de retrouver ses caractéristiques physico-chimiques naturelles.
- Exiger que les puits soient scellés de manière à éviter toute contamination par le ruissellement de surface.
- Interdire le raccordement au réseau d'aqueduc des systèmes en circuit ouvert.

7. MODÉLISATION

Le développement de modèles mathématiques comme outil de gestion dans des domaines appliqués est en progression constante. L'utilisation de ces modèles, couplée à l'expérience de spécialistes du domaine à l'étude, permet de mieux prévoir le comportement d'un système complexe face à certaines modifications du milieu. En géothermie, on distingue trois différents types de modèle en fonction des objectifs visés, soit les modèles de design, les modèles géochimiques et les modèles de transport.

7.1 MODELES DE DESIGN

Ce type de modèle est principalement utilisé par les installateurs afin de déterminer les différentes caractéristiques des composantes du système. Le modèle optimise le choix du mode d'installation en fonction des caractéristiques thermiques du bâtiment, des conditions météorologiques auxquelles il est exposé, et de la nature de la source de chaleur. Ces modèles vont par exemple déterminer l'évolution des besoins de chauffage d'un bâtiment au cours d'une saison et proposer une stratégie d'exploitation.

Un logiciel Français du nom de SOLPAC (Sauty et Ausseur 1985) réalise ce genre de travail. Il peut de plus prédire l'évolution des pressions dans le puits, évaluer le taux de recyclage de la chaleur et prédire l'évolution des températures aux puits et dans le réservoir.

Aux États-Unis, des chercheurs de l'Université d'Oklahoma ont développé un logiciel faisant la conception des systèmes de pompe à chaleur en circuit fermé. Ce logiciel se nomme CLGS (Close Loop Ground Source). Il est principalement utile pour les installateurs de thermopompe puisqu'il calcule la grosseur de l'échangeur de chaleur qui sera nécessaire, les charges de chauffage et de climatisation, les longueurs de forage nécessaires, les baisses de pression et il fait une comparaison du coût avec un autre type d'installation.

En Suède, Eskilson et Claesson de l'Université de Lund, ont développé une série de programme (TFSING, TFMULT, TFSTEP, DIM) servant au dimensionnement des installations.

7.2 MODELES GÉOCHIMIQUES

L'utilisation de ce type de modèle pour prédire les problèmes chimiques associés à l'utilisation de pompes à chaleur peut être très utile dans un processus d'évaluation environnementale. La majorité des modèles dans ce domaine sont basés sur la résolution des équations d'équilibre thermodynamique et indiquent la direction du déplacement de l'équilibre chimique. Ils ne donnent aucune information sur le temps que prendra la réaction à se produire. Ce genre d'outil permet donc de prédire si l'aquifère a tendance à se colmater et s'il y a réaction favorisant la corrosion des équipements de l'installation géothermique.

De façon générale les modèles géochimiques sont divisés en deux grandes familles, soit les modèles de spéciation et ceux de réaction géochimique.

7.2.1 Modèles de spéciation

Les modèles de spéciation utilisent une méthodologie par laquelle la composition chimique de la solution est transformée en terme d'activité des ions libres qui représente la concentration effective d'un soluté. Également, ce type de modèle permet de déterminer la probabilité des différentes réactions qui pourraient survenir. Le Tableau 6 présente une liste de principaux modèles de spéciation.

7.2.2 Modèles de réaction géochimique

Les modèles de réaction géochimique décrivent la réaction chimique résultant du mélange de deux solutions. Cette réaction est décrite en terme de masse d'éléments transférée de la phase solide à la solution ou entre deux phases solides. Les principales applications de ce type de modèle sont la prédiction de l'effet d'un changement de température ou de pression, de l'effet d'un mélange entre l'eau injectée et celle de la formation aquifère, et finalement de l'influence de l'eau injectée sur la solubilité des minéraux de la formation aquifère.

Le Tableau 6 présente une liste des principaux modèles de réaction géochimique.

TABLEAU 6

MODELES GÉOCHIMIQUES

Modèle	Référence	Modèle de spéciation	modèle de réaction
SOLMNEQ	Kharaka et Barnes (1973)	*	
WATEQF	Plummer et al. (1976)	*	
WATEQ2	Ball et al. (1980)	*	
GEOCHEM	Nordstrom et al. (1979)	*	
MINEQL/REDEQL	Nordstrom et al. (1979)	*	*
EQ3	-	*	
WATEGM-SE	Palmer et Cherry (1984)		*
PHREEQE	Parkhurst et al. (1980)		*
PATHI	Helgeson (1969)		*

7.3 MODELES DE TRANSPORT

Les modèles numériques de transport de chaleur sont des outils pour l'analyse des flux de chaleur dans l'aquifère. Ils permettent de prédire le comportement de la source de chaleur à long terme et peuvent aider à définir le schéma d'exploitation et de gestion de l'aquifère. La majorité des modèles utilisent une approche en différences finies ou en éléments finis pour résoudre les différentes équations du transport. Les principales applications de ces modèles sont l'analyse des perturbations thermiques dans l'aquifère, l'analyse des possibilités de stockage d'énergie dans les aquifères et l'évaluation des potentiels d'injection et d'exploitation. Le Tableau 7 présente les principaux modèles de transport de chaleur.

TABLEAU 7

MODELES DE TRANSPORT DE CHALEUR

Modèle	Référence
SUTRA	Voss (1984)
ASM	-
HST	Kipp (1987)
SWIFT-II	-
CFEST	Gupta et al. (1987)

En terminant, mentionnons qu'un groupe de travail sur la modélisation des systèmes géothermiques et le stockage d'énergie s'est réuni aux États-Unis en août 1990 (Drost, 1990). Quatre priorités de recherche y ont été identifiées, soit les besoins de modèles pour les études de faisabilité, pour le dimensionnement et la conception des installations, pour la caractérisation des aquifères, et finalement pour l'analyse de l'efficacité économique. La mise au point de tels modèles amènera une meilleure compréhension de cette technologie et aidera à son développement.

8. CONCLUSION

L'utilisation de la pompe géothermique, comme source d'énergie pour les besoins de chauffage et de climatisation, est une technologie éprouvée depuis plusieurs années. L'Europe, les États-Unis et, plus près de nous, l'Ontario, font déjà une grande utilisation de cette ressource. Plus de 80% des installations géothermiques faites au Canada le sont en Ontario grâce à un programme de subvention du gouvernement ontarien qui favorise la mise en place de ce genre de systèmes. Le Québec possède également les ressources naturelles nécessaires au développement des pompes géothermiques. Particulièrement, la technologie en circuit ouvert pourrait être utilisée avantageusement, puisqu'il est possible, dans presque toutes les régions du Québec, de mettre en opération un puits de pompage qui réponde au besoin quantitatif d'une pompe géothermique. Ces besoins sont évalués, pour une installation domiciliaire moyenne, à environ 12 gpm. De plus, l'excellente qualité des eaux souterraines du Québec permet l'utilisation efficace de ce genre de système, sauf peut-être dans les régions de Montréal et de l'Abitibi-Témiscamingue où l'on trouve localement de fortes valeurs de dureté pouvant amener des problèmes d'incrustation.

Une enquête téléphonique que nous avons réalisée, démontre qu'actuellement il y a environ 600 unités géothermiques installées annuellement au Québec. Nous suspectons cependant que cette estimation surévalue le nombre d'unités réellement installées, puisque certains répondants, étant dans l'impossibilité de nous donner le nombre exact d'installations, fournissaient une estimation peut-être optimiste de leurs activités.

On observe que la moitié des installations au Québec sont réalisées en circuit ouvert, opérées principalement en mode consommation, et que l'autre moitié sont réalisées en circuit fermé, opérées principalement dans des boucles verticales. Il ressort également de cette enquête que le choix du type du système installé (ouvert ou fermé) ne semble pas considérer les caractéristiques propres du site exploité, mais suivre des recommandations imposées par les fournisseurs.

Actuellement, les installations en circuit fermé semblent respecter les normes du code d'installation CSA-C445-M89. Selon les répondants, comparativement à la situation

qui prévalait il y a quelques années, aucune fuite et aucun problème de gel du sol associés aux circuits fermés n'ont été observés sur les nouvelles installations. Par contre, l'enquête révèle que les installations en circuit ouvert présentent plusieurs irrégularités. Le problème majeur est relié au mode de rejet de l'eau après son utilisation par la pompe à chaleur. Dans 90% des cas, les eaux de rejet ne sont pas retournées vers l'aquifère exploité. En raison des grandes quantités d'eau en cause, cette façon de faire peut avoir des conséquences sur l'équilibre du milieu récepteur de même que sur le cycle hydrogéologique et entraîner une surexploitation des aquifères.

La technologie des pompes à chaleur se veut une alternative efficace et écologique pour chauffer et climatiser les bâtiments. Cependant, des installations qui ne respectent pas les règles de l'art, peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement, principalement si la densité d'utilisation est grande. Les principaux problèmes qui peuvent être rencontrés pour les systèmes en circuit fermé sont la fuite de solution d'éthanol ou d'éthylène glycol provenant de la tubulure enfouie dans le sol et la formation de lentille de glace. Dans le cas des circuits ouverts, les problèmes rencontrés sont la surexploitation des aquifères, le tassement des sols, l'inversion des gradients hydrauliques entraînant des problèmes d'intrusion saline ou de contamination, le changement du bilan thermique de l'aquifère et la précipitation de minéraux entraînant le colmatage de l'aquifère. De plus, l'utilisation des CFC dans le fonctionnement interne de la pompe à chaleur contribue au problème de destruction de la couche d'ozone.

La réglementation qui existe dans plusieurs pays est relativement peu contraignante pour l'industrie géothermique. Elle consiste dans la plupart des cas à la simple déclaration des travaux auprès des autorités concernées. Dans le cas des gros projets, on demande souvent l'obtention d'un certificat d'autorisation des travaux. Au Québec, on observe un certain désordre dans le domaine de la géothermie résultant d'un manque de règles et de lignes directrices pour ce secteur d'activité. Dans une perspective de développement de l'utilisation de cette technologie, ce vide pourrait avoir de fâcheuses conséquences tant sur la confiance du public, que sur l'environnement. Il est impératif, pour la protection du public et de l'environnement, que certaines politiques et lignes de conduite soient donc mises en place pour régir ce secteur d'activité.

Finalement, dans le but de mieux comprendre les processus reliés à l'exploitation de l'énergie du sous-sol et afin de permettre une meilleure gestion de la ressource géothermique et des eaux souterraines, plusieurs modèles mathématiques ont été développés ou sont en développement. L'utilisation de ces modèles, couplée à l'expérience de spécialistes dans ce domaine, permettra de mieux comprendre et de prévoir le comportement des systèmes hydrogéologiques face aux modifications du milieu entraînées par l'utilisation des pompes géothermiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ABERG,N. ET A.B.VIAK, 1983, Legal aspect on subsurface heat storage. Proceeding of the International conference on the subsurface heat storage in theory and practice, Stockholm, pp.63-68.
- ACNOR, Association Canadienne de Normalisation, 1991, Norme CSA-C445-M89, Conception et installation des systèmes à thermopompe sol-eau et eau-eau , 34 p.
- ANDREWS,C.B. 1978, The impact of the use of heat pumps on ground-water temperatures. Ground Water, vol.16, no.6, nov.-dec., pp.437-443.
- ARMITAGE,D.M ET COLLABORATEURS, 1980, Ground-water heat humps: An examination of hydrogeologic, environmental, legal, and economic factors affecting their use. NWWA, Ohio, USA, 246 p.
- AUSSEUR, J.Y ET J.P. SAUTY, 1985, L'exploitation des nappes françaises par pompe à chaleur, aspect hydrogéologique, thermique et législatif. Hydrogeology in the service of man, Memoires of th 18th congress of the International Association of Hydrogeologists, Cambridge, pp. 42-58.
- BABOT,Y. 1982, Utilisation thermique de la nappe phréatique d'Alsace. Colloque national en hommage à G.Castany à l'occasion de son jubilé scientifique, B.R.G.M., Orléans, France, pp. 53-62.
- BACON,D. 1981, Environmental implications of widespread use of the ground water geothermal heat pump. Ground Water Heat Pump Journal, vol 2, no.1, pp.16-19.

- BALL,J.W., D.K.NORDSTROM ET E.A.JENNE. 1980, WATEQ2 A computerized chemical model for trace and major element speciation and mineral equilibria of naturel water. USGS Water Resour. Invest. WRI 78-116.
- BAUMAN,R.P. 1966, An introduction to equilibrium thermodynamics. Parry,E.W and H.Taube Editors, Prentice-Hall Inc., New-Jersey, 120 p.
- BOWLES,J.P. 1991, Exploration of the potential for the use of the ground source heat pump in the province of Quebec. Bodeven Inc. Montréal, 15 p.
- C.E.E.A, Canadian Earth Energy Association, 1989, Customer satisfaction with ground source heat pumps. CEA Report 810 U 651, june.
- CLYDE,G.C. ET G.V.MADABHUSHI, 1983, Spacing of wells for heat pump. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.109, No. 3, July.
- COLLIN,J.J., F.JAUDIN, ET M.LE NIR, 1982, Pompes à chaleur sur nappe. Colloque national en hommage à G.Castany à l'occasion de son jubilé scientifique, B.R.G.M., Orléans, France, pp. 201-210.
- DEXHEIMER,R.D. 1985, Water source heat pump handbook. National Water W e l l Association, Ohio, U.S.A, 241 p.
- DRISCOLL,F.G. 1989, Groundwater and wells. 2nd ed. Johnson Filtration System Inc., Minnesota, 1089 p.
- DROST,M.K. 1990, Result from a workshop on research needs for modeling aquifer thermal enrgy storage systems. Prepared for the U.S. Department of Energy. Pacific Northwest Laboratory, Washington, 13 p.

- E.M.R.C, Énergie Mines et Ressources Canada, 1989 révisé en 1990, Le chauffage et le refroidissement à l'aide d'une thermopompe. 40 p.
- GARNISH,J.D. 1986, Geothermal Aquifers. Department of energy R&D programme 1976-1986, England, 109 p.
- GASS,T.E. 1980, Regulatory and environmental implications of ground water heat pumps. Water Well Journal, vol.34, no.6, June, pp.26-28.
- GASS,T.E. 1982, The thermal impact of heat pump operation. Water Well Journal, vol.36, no.3, March, pp.42-43.
- GUPTA,S.K ET AL. 1987, Coupled fluid energy and solute transport (CFEST) model formulation and user's manual. Colombus, OH, U.S.A. 467 p.
- HELGESON,H.C. 1969, Thermodynamics of hydrothermal system at elevated temperatures and pressures. Am.J.Sci. No.267, pp.729-804.
- KAZEMANN,P.E. WALTER,R. ET WHITEHEADP.E. 1980, The spacing of heat pump supply and discharge wells. Ground Water Heat Pump Journal, Summer, pp. 28-31.
- KHARAKA,Y.K. ET I.BARNES, 1973, SOLMNEQ: Solution mineral equilibrium computations. USGS computer contribution, NTIS, PB 215 899, 81 p.
- KIPP,K. 1987, HST3D-A computer code for simulation of heat and solute transport in Three-dimensional ground-water flow systems. USGS,WRI 86-4095,517p.

- MANITOBA RESEARCH COUNCIL, INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTRE, 1988, Groundwater source heat pump. Application demonstration sub-program. Document soumis à Énergie, Mines et Ressources Canada, 51 p.
- McKENZIE, D.I. 1990, Planning for groundwater source heat pumps. *Revue Canadienne des Ressources Hydriques*, Vol. 15, No. 2, pp.142-153.
- MILLER, J. 1985, The legal implication of ground water heat pump use. *GWHPJ*, Spring, pp.29-35.
- NORDSTROM, D.K. ET AL. 1979, Comparison of computerized chemical models for equilibrium calculations in aqueous systems. *ACS Symposium Series*, vol.93, Amer.Chem.Soc. Washington D.C. pp.857-892.
- N.W.W.A, National Water Well Association, 1983, Understanding heat pump, ground water and wells. Editor Kevin B.McCray, Ohio, U.S.A. 39 p.
- PALMER, C.D. ET J.A.CHERRY, 1984, Geochemical reactions associated with low-temperature thermal energy storage in aquifers. *Can.Geotech.J.* Vol.21, pp.475-488.
- PARKHURST, D.L. ET COLLABORATEURS, 1980, PHREEQE A computer code for geochemical calculations. USGS pub. (WRI), Washington D.C. U.S.A. pp.80-96.
- PELLETIER, M. ET COLLABORATEURS, 1991, L'analyse et le traitement de la banque de données géochimiques du Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. Document présenté au Ministère de l'Environnement du Québec par Procéan Inc., Québec, 42 p.

- PENNINO,D.J. 1982, Ground water protection guidelines for users of geothermal heat pumps. OJEH July-August, pp.3-4.
- PLUMMER,L.N. ET AL. 1976, WATEQF- A Fortran IV of WATEQ, A computer program for calculating chemical equilibrium of natural water. USGS Water Resour. Invest. WRI 76-13.
- POULIN,M. 1980, Étude hydrogéologique des ressources en eau souterraine utilisable pour le chauffage par pompes à chaleur. Foratek International Inc. Rapport no,400, février, 57 p.
- SASMAN,R.T. 1972, Thermal pollution of ground water by artificial recharge. Water and Sewage Works, Dec. pp.52-55.
- SAUTY,J.P, ET J.Y.AUSSEUR, 1985, Présentation d'un progiciel pour l'évaluation automatisée des projets de stockage de chaleur dans le sol. ENERSTOCK 85, 3^e Conférence internationale sur le stockage de l'énergie pour le chauffage et le refroidissement des batiments. Toronto, Canada, pp.499-503.
- SIMARD,G. ET R.DES ROSIERS, 1979, Qualité des eaux souterraines du Québec. Ministère de l'Environnement du Québec, Service Des Eaux Souterraines. Document numéro H-G 13, Québec, 161 p.
- SMITH,A. 1980, Ground water geothermal effluent disposal methods. Ground Water Heat Pump Journal. Fall, Vol.1, No.3, pp.14-17.
- SORENSEN,S.N., J.REFFSTRUP ET B.QVALE, 1985, The development of Danish legislative guidelines and design rules for utilisation of groundwater in heat pumps. Hydrogeology in the service of man, Memoires of the 18th

congress of the International Association of hydrogeologists, Cambridge,
pp.23-34.

STUMM,W. et J.J.MORGAN, 1981, Aquatic chemistry. 2nd ed. John Wiley and sons,
New-York, U.S.A. 780 p.

SVENSSON,T. ET COLLABORATEURS, 1991, Environmental consequences of new
energy technology. Swedish council for building research, Stockholm, Sweden,
197 p.

VERMEULEN,P.E.J. 1990, Environmental aspects of heat pumps - Session V -. IEA Heat
Pump Centre Newsletter, vol.8, no.2, June, pp.18-19.

VOSS,C.I. 1984, A finite-element simulation method for saturated-unsaturated, fluid
density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-
reactive single species solute transport. USGS, Washington D.C. 299 p.

ANNEXE A LEXIQUE

Circuit fermé: Échangeur de chaleur continu, étanche, enterré, dans lequel un fluide caloporteur circule vers une thermopompe.

Circuit ouvert: Circuit conçu pour prélever et rediverser des eaux souterraines dans le but d'en extraire ou de rejeter de la chaleur au moyen d'une thermopompe.

Fluide caloporteur: Liquide constitué d'agents modificateurs d'eau pour en abaisser le point de congélation. Ce liquide est utilisé dans les systèmes à circuit fermé pour transporter la chaleur du sol vers la pompe à chaleur.

gpm: Gallon par minute. Un gpm égale 6.309×10^{-2} litre par seconde.

Mode consommation: Système en circuit ouvert qui ne retourne pas l'eau souterraine dans l'aquifère exploité.

Mode non-consommation: Système en circuit ouvert qui retourne l'eau souterraine dans l'aquifère exploité.

Tonne: Unité de mesure de la puissance d'une thermopompe. Elle équivaut à 3,5 kW ou 12 000 Btuh.

ANNEXE B
QUESTIONNAIRE UTILISÉ POUR L'ENQUETE TÉLÉPHONIQUE

NOM DU DISTRIBUTEUR/INSTALLATEUR:

PERSONNE RESSOURCE:

ADRESSE:

NOMBRE TOTAL D'INSTALLATIONS DE THERMOPOMPE

NBR EN CIRCUIT FERMÉ:

NBR EN CIRCUIT OUVERT:

CIRCUIT FERMÉ:

MODELE ET PUISSANCE (RÉSIDENTIEL, COMMERCIAL, INDUSTRIEL):

% D'INSTALLATION DANS CHAQUE RÉGION:

MONTRÉAL:

LAURENTIDES:

RIVE-SUD:

TROIS-RIVIERES

QUÉBEC:

ESTRIE:

GASPÉSIE:

COTE-NORD:

RÉFRIGÉRANT UTILISÉ:
QUANTITÉ DE RÉFRIGÉRANT:
ENTRETIEN DE CE GENRE DE SYSTEME:

CIRCUIT OUVERT:

MODELE ET PUISSANCE (RÉSIDENTIEL,COMMERCIAL,INDUSTRIEL):

% D'INSTALLATION DANS CHAQUE RÉGION:

MONTRÉAL:

LAURENTIDES:

RIVE-SUD:

TROIS-RIVIERES

QUÉBEC:

ESTRIE:

GASPÉSIE:

COTE-NORD:

DÉBIT DE POMPAGE PAR TONNE:

CARACTÉRISTIQUE DES AQUIFERES EXPLOITÉS:

ESSAI DE POMPAGE:

TYPE DE DÉPOT:

PROFONDEUR DES PUIITS D'EXPLOITATION:

MODE DE REJET:

DANS LES EAUX DE SURFACE:

DANS UNE FOSSE D'INFILTRATION:

A L'ÉGOUT:

DANS UN DEUXIEME PUIITS:

ÉVALUATION DU MARCHÉ DEPUIS QUELQUES ANNÉES:

ANNEXE C
RÉGLEMENTATION AMÉRICAINE ÉTAT PAR ÉTAT
(Tirée de Miller 1980)

**Summary of Ground Water Heat Pump Use and
Effluent Disposal Regulations by State***

State	Water Use	To Recharge Well	To Surface Water	To Land	To Septic Tank	To Sewer
Alabama	No permit needed to use water for H-P under domestic category	Notification and perhaps a permit needed from Water Improvement Commission	Theoretically covered by NPDES—however this system usually not equipped to consider small domestic use so in most cases could just discharge without a permit	Not a problem if discharge to land owned by H-P user	A loophole in regulations—this type of discharge is allowed—if tank is big enough and far enough from well	Would probably be allowed almost anywhere—although in many areas would be cost-prohibitive
Alaska	No problem to obtain water rights	No mechanism to require a permit or to prevent this type of injection well	1	2	3	4
Arizona	No problem to obtain water use—falls into domestic category—no permit needed	Discharge is prohibited to any well that penetrates water-bearing strata	1	2	3	4
Arkansas	No permit needed for water use of this type	Apparently no program exists to control recharge wells of this type	1	2	3	4
California	32 counties out of 58 total require permits for all wells—no real problems though	Waste disposal under control of Water Quality Control Board, which does not regulate H-P return wells at this time	1	2	3	4
Colorado	No permit needed for a well that has a yield less than 15 gpm	Permit required to recharge cooling water back to the ground—should not be a big problem to obtain for this use	1	2	3	4
Connecticut	No permit needed—falls into private domestic well category	A renewable five year permit would be required from Department of Environmental Protection for any discharge into the "waters of the state"		2	3	4
Delaware	No problem to use water—would be classified as a domestic well—no permit required	Strict rules exist regarding reinjection—however would probably be able to get a permit for a H-P return well	1	2	3	4

Idaho	No permit needed for a domestic use—except in critical ground water area—need a permit for any use over 13,000 gpd	Theoretically required to obtain permit for any type of disposal or injection well but permit mechanism does not exist at present	No problem except in critical ground water areas where recharge back to the aquifers would be required			
Illinois	Domestic use classification—no permit needed	Under control of the state EPA which at present has no mechanism to regulate wells of this type	1	2	3	4
Indiana	Domestic use—no permit needed	Conventional and cooling water recharge wells not regulated—though Stream Control Board has theoretical authority		2	3	4
Iowa	No permit needed for domestic use	No permit needed for discharge of this type	1	2	3	4
Kansas	A water appropriation permit would be needed	A permit would be required but not a problem—mostly for record keeping purposes	1	2	3	4
Kentucky	Private use—no permit required	No permit required	1	2	3	4
Louisiana	No permit required	Might eventually need a permit from Department of Environmental Control but no official policy at present	1	2	3	4
Maine	No permit needed for this type of water use	At the present time no underground injection of any type is allowed in this state	1	2	3	4
Maryland	A permit would be needed for use of this type	A permit would be required for reinjection into ground water	1	2	3	4
Massachusetts	No permit needed for this type of water use	Permit would be needed from Division of Water Pollution Control to discharge heated or cooled water		2	3	4
Michigan	No permit needed for this type of water use	Subject to a permit from the Water Resources Commission	1	2	3	4
Minnesota	No permit required	Reinjection of this type is generally prohibited but could apply for a variance permit	1	2	3	4
Mississippi	No permit required	No permit required	1	2	3	4
Missouri	No permit needed	All underground injection prohibited	1	2	3	4
Montana	Certificate of water right is needed—no serious problem to obtain	Permit would theoretically be needed—but no mechanism is set up to issue them at this time	1	2	3	4
Nebraska	No permit needed	No regulations exist to cover a permit process	1	2	3	4
Nevada	Permit would be required	Regulations exist and a permit would be required for this type of injection	1	2	3	4
New Hampshire	No permit needed	Permit theoretically required but at this time notification would suffice	1	2	3	4

New Jersey	No permit needed	No permit required	1	2	3	4
New Mexico	Permit needed for use of this magnitude	Notification and a simple permit required	1	2	3	4
New York	No permit needed	No permit needed to cover this type of discharge	1	2	3	4
North Carolina	No permit required	Permit needed—at present time this disposal method is under consideration to be prohibited	1	2	3	4
North Dakota	Standard appropriation permit needed	No policy exists to cover this type of discharge	1	2	3	4
Ohio	No permit needed for domestic use	A permit is needed for all types of well injection	1	2	3	4
Oklahoma	No permit needed for domestic use	Discharge into water bearing strata prohibited under law—but Water Resources Board won't enforce it if not necessary	1	2	3	4
Oregon	Less than 15,000 gpd—no permit required	Return water must be re-injected to the same formation	1	2	3	4
Pennsylvania	No permit needed	A simple permit might be required (just notification) but no specific regulations	1	2	3	4
Rhode Island	No permit needed	Recharge wells not required to obtain permit RIPDES may require a simple permit	1	2	3	4
South Carolina	No permit needed	No regulations exist at this time	1	2	3	4
South Dakota	No permit needed	No program to regulate this type of well exists at this time	1	2	3	4
Tennessee	No permit needed for water use under 50,000 gpd	Permit would be required from Department of Health—no special problem to obtain		2	3	4
Texas	No permit needed for water use	Permit granting procedures does not exist for recharge wells—no permit needed	1	2	3	4
Utah	Permit needed for use of any type	No permit program exists for this type of re-injection—no permit needed	1	2	3	4
Vermont	No permit needed	Permit theoretically needed	1	2	3	4
Virginia	No permit needed	Non-injection of wastewater is a policy in the state at present—would be a complicated permitting procedure for H-P return well	1	2	3	4
Washington	Permit needed for use of over 5,000 gpd	Necessary to obtain a discharge permit from the Department of Ecology		2	3	4
West Virginia	No permit needed	No real policy exists requiring permits at this time	1	2	3	4
Wisconsin	No permit needed	No re-injecting allowed in state	1	2	3	4
Wyoming	No permit needed	The method of disposal would have to be indicated on the use permit but otherwise no special requirement for any type of discharge				

*Small scale domestic heat pump utilization only

1, 2, 3 and 4 regulations pertaining to this type of discharge are similar to those in Alabama

ANNEXE D

REGLEMENTATION SUISSE BASES JURIDIQUES

Art. 24^{bis}

¹ Pour assurer l'utilisation rationnelle et la protection des ressources en eau, ainsi que pour lutter contre l'action dommageable de l'eau, la Confédération, compte tenu de l'ensemble de l'économie hydraulique, édicte, par voie législative, des principes répondant à l'intérêt général sur :

- a.* La conservation des eaux et leur aménagement, en particulier pour l'approvisionnement en eau potable, ainsi que l'enrichissement des eaux souterraines;
- b.* L'utilisation des eaux pour la production d'énergie et pour le refroidissement;
- c.* La régularisation des niveaux et des débits d'eaux superficielles et souterraines, les dérivations d'eau hors du cours naturel, les irrigations et les drainages, de même que d'autres interventions dans le cycle de l'eau.

² Aux mêmes fins, la Confédération édicte des dispositions sur :

- a.* La protection des eaux superficielles et souterraines contre la pollution et le maintien de débits minimums convenables;
- b.* La police des endiguements, y compris les corrections de cours d'eau et la sécurité des ouvrages d'accumulation;
- c.* Les interventions qui visent à influencer sur les précipitations atmosphériques;
- d.* La recherche et la mise en valeur de données hydrologiques;
- e.* Le droit de la Confédération de requérir les ressources en eau, nécessaires à ses entreprises de transport et communications, moyennant le paiement des redevances et la compensation équitable des inconvénients.

Loi fédérale sur la protection des eaux contre la pollution

(Loi sur la protection des eaux)

(Du 8 octobre 1971)

Article premier

La présente loi concerne les eaux superficielles et souterraines, naturelles et artificielles, publiques et privées, y compris les sources. Champ
d'application

Art. 2

¹ Le but de la présente loi est de protéger les eaux contre la pollution et de remédier aux pollutions afin que But

- la santé de l'homme et des animaux soit sauvegardée,
- l'approvisionnement en eau potable et d'usage industriel soit assuré par l'utilisation des eaux souterraines et des eaux de source, ainsi que par la préparation d'eaux superficielles,
- les eaux puissent être destinées à l'irrigation ou à l'arrosage des cultures,
- les eaux puissent servir au bain,

- les eaux où vit le poisson soient sauvegardées,
- les constructions ne soient pas dégradées,
- le paysage ne soit pas enlaidi.

² Toute autre altération des propriétés physiques, chimiques et biologiques de l'eau est assimilée à la pollution.

Art. 11

Eaux
intercantonales

¹ Lorsqu'une eau superficielle ou souterraine touche le territoire de plusieurs cantons, chaque canton prendra les mesures qui s'imposent pour la protéger, en tenant compte de l'intérêt des autres cantons.

² La Confédération peut exiger la conclusion de conventions intercantonales prévoyant des mesures communes et la coordination des mesures à prendre. Pour avoir force obligatoire, ces conventions doivent être approuvées par le Conseil fédéral.

³ Les différends sont tranchés par le Tribunal fédéral statuant sur action de droit administratif conformément à l'article 116 de la loi fédérale d'organisation judiciaire du 16 décembre 1943.

Art. 13

Devoir
de diligence

Chacun est tenu de s'employer à empêcher toute pollution des eaux superficielles et souterraines, en y mettant la diligence qu'exigent les circonstances.

Art. 14

Interdictions

¹ Il est interdit d'introduire ou de déposer directement ou indirectement dans les eaux toute matière solide, liquide ou gazeuse qui serait de nature à les polluer. Il est de même interdit de déposer hors des eaux toute matière qui risquerait de les polluer.

² Il est défendu d'éliminer des matières polluantes en les laissant s'infiltrer dans le sous-sol. L'autorité cantonale compétente peut autoriser des exceptions lorsqu'il est exclu qu'une eau superficielle ou souterraine coure le risque d'être polluée.

³ L'article 16 est réservé.

Art. 15

Déversement
d'eaux usées:
nouveaux cas

Les matières liquides ou gazeuses, notamment les eaux usées, qui proviennent de canalisations de localités, d'habitations, de chantiers, d'entreprises industrielles et artisanales, d'exploitations agricoles, de bateaux ou d'ailleurs, ne peuvent être déversées dans les eaux que si elles ont été traitées selon les prescriptions des cantons. Le déversement d'eaux usées doit être autorisé par l'autorité cantonale compétente.

Art. 18

¹ Toutes les eaux usées du périmètre d'un réseau d'égouts doivent être déversées dans les canalisations publiques ou dans les canalisations privées et d'intérêt public. Exceptionnellement, l'autorité cantonale compétente peut prescrire des modes d'élimination et de traitement spéciaux s'il s'agit d'eaux qui ne se prêtent pas à l'épuration dans une station centrale ou s'il n'est pas indiqué, pour des raisons impérieuses, de les y traiter.

Evacuation
et traitement
des eaux usées

² Les exploitants de telles canalisations sont tenus de recevoir les eaux usées et de les conduire jusqu'à la station centrale d'épuration. Celui qui produit des eaux usées exerçant des effets nocifs sur les installations d'évacuation et d'épuration devra leur faire subir un traitement préliminaire avant de les déverser dans les canalisations.

³ Lorsque des constructions et installations existantes ne peuvent, pour des raisons impérieuses, être rattachées au réseau de canalisations, l'autorité cantonale compétente doit prescrire un autre mode d'élimination et de traitement des eaux usées adapté aux circonstances.

Art. 29

¹ Les cantons prennent les mesures nécessaires afin de protéger les nappes d'eaux souterraines exploitables.

Protection
des eaux
souterraines

² Ils subdivisent le territoire cantonal en secteurs de protection des eaux, conformément aux directives fédérales et en tenant compte des risques courus.

³ Pour construire et transformer des installations ainsi que pour exécuter des travaux, notamment des fouilles, dans des secteurs considérés par les cantons comme particulièrement menacés, il faut une autorisation de l'autorité cantonale compétente, qui ordonne dans chaque cas les mesures de protection à prendre ou arrête les interdictions.

Art. 30

¹ Les cantons veillent à ce que les zones de protection nécessaires soient établies autour des captages d'eaux souterraines.

Zones de protection
des eaux
souterraines

² Il incombe aux propriétaires de captages d'eaux souterraines de recueillir les données permettant de délimiter rationnellement les zones de protection, d'acquérir les droits réels nécessaires et de verser éventuellement des indemnités pour les restrictions apportées à l'utilisation de biens-fonds. Pour l'acquisition de droits réels, le gouvernement cantonal peut accorder aux propriétaires du captage le droit d'expropriation selon l'article 9 de la présente loi.

Art. 31

¹ Les cantons délimitent les périmètres qui jouent un rôle important pour la future utilisation et pour le futur enrichissement artificiel des nappes souterraines. Dans ces périmètres, il ne faut pas établir des installations ni exécuter des travaux pouvant polluer les eaux souterraines ou nuire aux futures installations servant à leur utilisation ou à leur enrichissement.

² S'il y a lieu de verser des indemnités, celles-ci pourront être mises à la charge des futurs propriétaires de captages d'eaux souterraines et d'installations d'enrichissement.

Périmètres
de protection
des eaux
souterraines

**Ordonnance
sur la protection des eaux contre les liquides pouvant
les altérer**

(OPEL)

du 28 septembre 1981

Article premier

¹ La présente ordonnance s'applique aux :

- a. Installations servant à l'entreposage de liquides pouvant altérer les eaux, y compris les grands réservoirs contenant des huiles comestibles;
- b. Places de transvasement pour liquides pouvant altérer les eaux;
- c. Installations d'exploitation qui contiennent des liquides pouvant altérer les eaux;
- d. Circuits contenant des agents réfrigérants ou des liquides caloporteurs qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans l'eau ou dans le sol;
- e. Installations mobiles de transport pour les liquides pouvant altérer les eaux;

tous appelés ci-après installations.

Art. 19 Mesures de protection à prendre

Les propriétaires et exploitants d'installations prennent les mesures de protection (art. 20 ss). Celles-ci doivent prévenir les fuites de liquides, les détecter facilement et en assurer leur rétention.

Art. 20 Mesures de protection destinées à prévenir les fuites de liquides

¹ Les mesures de protection seront prises pour toutes les installations afin de prévenir les fuites de liquides :

- a. Par une construction appropriée de l'installation;
- b. Par des éléments de construction et dispositifs;
- c. Par une exploitation adéquate et les travaux d'entretien et de révision qui s'imposent;
- d. Par la protection de l'installation contre une utilisation abusive de tiers non autorisés.

Art. 22 Agents réfrigérants et liquides caloporteurs

¹ Pour les circuits par lesquels on prélève ou rejette de la chaleur dans l'eau ou dans le sol, on utilisera parmi les agents réfrigérants et les liquides caloporteurs livrables dans le commerce, que ceux présentant le plus faible danger pour les eaux.

² Le Conseil fédéral publie une liste de ces fluides.

Art. 23 Installations dans les zones de protection des eaux souterraines

¹ Dans les zones S1 et S2, ne sont admis que des réservoirs non enterrés, contenant des liquides de la classe 2, qui servent exclusivement à la préparation de l'eau, ainsi que les conduites non enterrées et les stations de dépotage y relatives.

² Dans la zone S3, ne sont admises que les installations suivantes:

- a. Installations selon le 1^{er} alinéa;
- b. Récipients dont le volume utile global ne dépasse pas 450 l par ouvrage de protection;
- c. Réservoirs non enterrés d'un volume utile global ne dépassant pas 30 m³ par ouvrage de protection, dans la mesure où ils ne contiennent, pour une durée de deux ans au plus, que de l'huile de chauffage ou du diesel destiné à l'alimentation en énergie de l'immeuble ou de l'exploitation du propriétaire, ainsi que les conduites non enterrées et les stations de dépotage y relatives;
- d. Installations d'exploitation avec des liquides de la classe 1 jusqu'à 450 l et de la classe 2 jusqu'à 2000 l;
- e. Circuits contenant des liquides caloporteurs qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans le sol.

³ Les installations mentionnées aux alinéas 1 et 2 exigent des mesures de protection garantissant la détection facile ou la rétention des fuites de liquides.

⁴ Pour les installations mentionnées au 2^e alinéa, lettres c et d, l'autorité cantonale peut en outre prescrire des exigences plus sévères pour les éléments d'installations ou ordonner des mesures de protection permettant de détecter et de récupérer plus facilement les liquides pouvant altérer les eaux qui se sont infiltrés dans le sous-sol.

⁵ Celui qui entend remplacer des installations existantes par d'autres que celles citées aux alinéas 1 et 2, devra demander à l'autorité cantonale une autorisation exceptionnelle. Elle lui sera accordée si l'installation prévue permet, par rapport à l'état actuel, de réduire de manière importante le danger de pollution des eaux dans la zone de protection des eaux souterraines.

Art. 24 Installations dans les périmètres de protection des eaux souterraines

L'article 23 s'applique aux périmètres de protection des eaux souterraines, en fonction de l'utilisation future prévue pour lesdites eaux.

Art. 35 Eaux superficielles et eaux usées

Les circuits dans les zones A, B et C qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans les eaux superficielles ou dans les eaux usées épurées et:

- a. Contiennent des agents réfrigérants (à l'exception des chlorofluorocarbones), nécessitent des mesures de protection garantissant la détection facile ou la rétention des fuites;
- b. Contiennent des liquides caloporteurs, nécessitent des mesures de protection garantissant la détection facile des fuites.

Art. 36 Eaux souterraines

Les circuits contenant des agents réfrigérants ou des liquides caloporteurs qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans les eaux souterraines nécessitent:

- a. Dans la zone A des mesures de protection qui garantissent la détection facile et la rétention des fuites;
- b. Dans la zone B des mesures de protection qui garantissent la détection facile des fuites.

Art. 37 Autorisation pour la construction, la mise en place ou la transformation

¹ Pour construire, mettre en place ou transformer une installation, le propriétaire ou l'exploitant doit être au bénéfice d'une autorisation délivrée par l'autorité cantonale.

² Les installations d'entreposage dont le volume utile global n'excède pas 450 l n'exigent pas d'autorisation selon le 1^{er} alinéa. Les installations d'exploitation et les circuits contenant des liquides susceptibles d'altérer les eaux, qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans l'eau ou dans le sol, ne nécessitent pas d'autorisation selon le 1^{er} alinéa, dans la mesure où les cantons n'en prescrivent pas.

³ La demande d'autorisation doit contenir les indications suivantes:

- a. L'emplacement;
- b. La zone concernée;
- c. Le genre et l'importance de l'installation;
- d. Le genre, la classe et la quantité des liquides pouvant altérer les eaux contenus dans l'installation;
- e. Le nombre, les dimensions et le type de mise en place des réservoirs;
- f. L'équipement des réservoirs;
- g. Les dispositifs nécessaires à la protection des eaux, y compris les documents relatifs au calcul de la capacité de l'ouvrage de protection;
- h. Le calcul statique de l'ouvrage de protection pour des installations d'entreposage dont le volume utile global est supérieur à 50 m³;
- i. Les autres installations sur le terrain à bâtir;
- k. Le maître de l'ouvrage, la direction des travaux ou le constructeur;
- l. Le fabricant des réservoirs.

⁴ L'autorité cantonale peut exiger des indications complémentaires.

Art. 38 Devoirs du maître de l'ouvrage ou de la direction des travaux

Le maître de l'ouvrage ou la direction des travaux s'assurent, avant le début des travaux, que l'autorisation a été délivrée. Il s'en tient aux dispositions et conditions qui y sont fixées.

Art. 39 Réception

¹ Une installation qui requiert une autorisation selon l'article 37 ne peut être mise en service qu'au moment où l'autorité cantonale a procédé à sa réception.

² Lors de la réception, il y a lieu de contrôler si:

- a. Les conditions et exigences de l'autorisation sont respectées (contrôle visuel);
- b. Les procès-verbaux et rapports du constructeur, du fabricant ou de l'importateur sont à disposition.

³ L'autorité cantonale confirme le résultat de la réception au propriétaire ou exploitant.

⁴ Elle peut confier la réception de l'installation et la confirmation des résultats aux autorités communales. Des organisations professionnelles et des experts privés peuvent être appelés à prêter leur concours.

Art. 40 Exploitation et entretien

L'exploitation et l'entretien ne seront confiés qu'à des personnes maîtrisant les travaux en question et instruits sur les dangers que représentent les liquides contenus dans l'installation.

Art. 41 Registre des installations

¹ Pour assurer l'exécution des prescriptions et son contrôle, les cantons établissent un registre des installations. Les installations pour lesquelles une autorisation n'est pas nécessaire selon l'article 37 ne doivent pas figurer dans le registre.

² Le registre contient les indications mentionnées à l'article 37, 3^e alinéa, ainsi que:

- a. Le nom et l'adresse du propriétaire ou exploitant;
- b. Les demandes et autorisations;
- c. Les procès-verbaux d'essai;
- d. Les attestations de réception;
- e. Les rapports de contrôle et de revision.

³ Le registre est tenu à jour.

Art. 44

¹ Toutes les installations doivent être revisées périodiquement. Le propriétaire ou exploitant confie ce travail à du personnel qualifié.

² Les installations d'entreposage, à l'exception de celles contenant des gaz liquéfiés, ne peuvent être revisées que par des entreprises en possession de l'autorisation fédérale mentionnée à l'article 26, 1^{er} alinéa.

³ Les récipients ne sont pas soumis à l'obligation de revision.