

Mise en valeur de l'énergie géothermique en Suisse: aspects technico-économiques

Autor(en): **Roux, Dominique / Noël, Michel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **108 (1982)**

Heft 9

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74655>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mise en valeur de l'énergie géothermique en Suisse

Aspects technico-économiques

par Dominique Roux et Michel Noël, Genève

Aujourd'hui de grands espoirs sont fondés sur les énergies dites nouvelles pour remplacer l'utilisation du mazout et pour réduire notre dépendance énergétique vis-à-vis de l'étranger. Parmi ces nouvelles sources d'énergie, l'énergie géothermique est un agent qui s'applique particulièrement au chauffage de grands ensembles de bâtiments.

En parallèle avec les recherches et études géotechniques liées à la connaissance du sous-sol et du potentiel géothermique contenu dans des nappes aquifères profondes en Suisse, il est important de connaître les éléments techniques et économiques relatifs à l'utilisation de cet agent énergétique: analyse du fonctionnement des équipements et mise en évidence du niveau de rentabilité d'une opération dans les conditions suisses.

Pour répondre à ces objectifs, une étude technico-économique a été réalisée. Cet article présente un résumé de la méthodologie utilisée, de la description des éléments de l'étude, du programme de calcul développé et rapporte les principaux résultats et conclusions.

1. Cadre de l'étude

1.1 Objectifs

Si l'on considère tous les paramètres et éléments variables pouvant entrer en jeu, il devient nécessaire de disposer d'un modèle simulant le fonctionnement d'une opération géothermique à l'aide d'un programme de calcul sur ordinateur.

Un tel programme a donc été développé dans le but de répondre à certains objectifs fondamentaux tels que:

- 1) Comparer la rentabilité d'une opération de géothermie avec une solution traditionnelle utilisant le mazout pour le chauffage de la même agglomération.
- 2) Permettre l'application à une opération géothermique devant fonctionner dans des conditions techniques et économiques retenues par l'utilisateur du programme. Ainsi il pourra choisir à sa guise les paramètres et données qui lui semblent le mieux s'adapter au cas qu'il désire étudier.
- 3) Rendre possible une étude de sensibilité pour un cas particulier à étudier. En faisant varier un certain nombre de paramètres, on peut déterminer la rentabilité de l'opération.
- 4) Développer des conditions minimales pour la valorisation de l'énergie géothermique.

1.2 Applications générales de l'étude

L'étude s'applique aux conditions économiques et techniques prévalant en Suisse à fin 1980. Il est admis que la source d'eau géothermique présente une

température comprise entre 30 °C et 70 °C et que le gradient géothermique se situe entre 25 °C et 35 °C par kilomètre. La température à quelques mètres en dessous du niveau du sol correspond à la température moyenne annuelle sur le plateau, soit +10 °C. La composition chimique de l'eau est telle qu'il est nécessaire de la réinjecter dans le sous-sol. Il faut alors un forage en doublet (la solution avec un seul forage peut être aussi simulée si nécessaire).

Les utilisateurs sont des agglomérations de 500 à 11 200 «habitants équivalents», situées sur le Plateau suisse (besoins de chaleur de différents types d'utilisateurs équivalant au chauffage de logement uniquement).

Cette étude a été réalisée dans le cadre des activités de la Commission fédérale pour la mise en valeur de l'énergie géothermique et le stockage souterrain de chaleur et financée par l'Office fédéral de l'énergie.

2. Méthodologie de l'étude

2.1 Principe

Vu le grand nombre de paramètres possibles à prendre en compte, une étude de base fixe la majorité des paramètres. Seuls les paramètres suivants peuvent varier:

- 12 types d'agglomération;
- 3 cas d'isolation thermique correspondant à des constructions existantes, rénovées ou neuves;
- 5 niveaux de température de l'eau géothermique (30, 40, 50, 60 et 70 °C);
- pompes à chaleur en option.

Une étude de sensibilité fait alors suite à l'étude de base pour laquelle on retient les cas paraissant les plus intéressants.

Selon la figure 1, le système étudié comporte les éléments suivants:

- les puits géothermiques, doublet extraction-réinjection;
- un réseau de transport situé entre les puits et la centrale de chauffe;
- un échangeur de chaleur pour transmettre la chaleur vers l'utilisateur;
- une chaudière d'appoint, nécessaire si le niveau de température du puits d'extraction est plus bas que celui de l'utilisateur ou si le débit de l'eau géothermique est insuffisant pour faire face aux besoins de chaleur pendant les jours les plus froids de l'année;

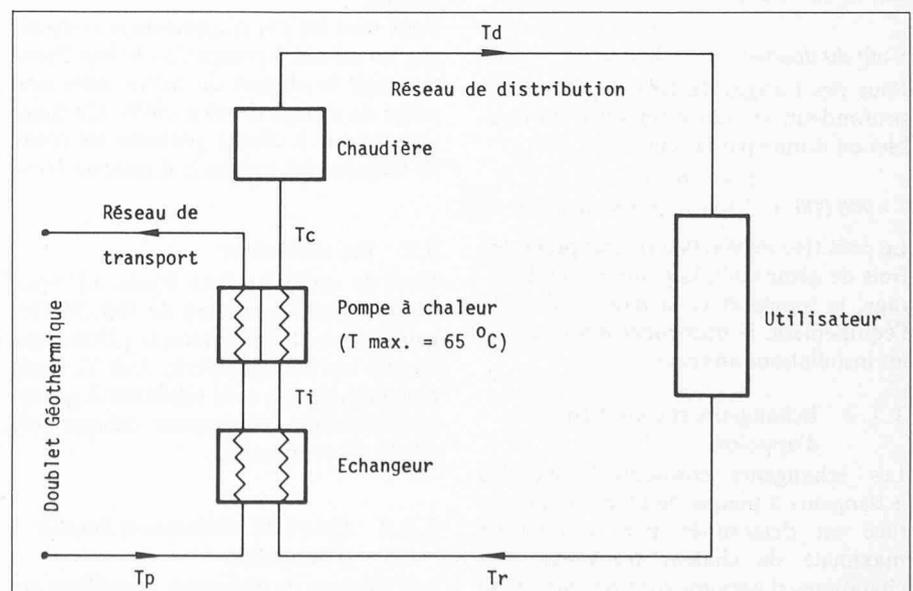


Fig. 1. — Schéma des éléments du système avec indication des températures. T_p = température fluide en tête de puits; T_d = température départ chauffage; T_r = température retour chauffage; T_i = température intermédiaire entre échangeur et pompe à chaleur; T_c = température à la sortie de la pompe à chaleur ($\leq T_{max}$).

- une pompe à chaleur (en option) pour participer avec la chaudière à l'apport de chaleur nécessaire, ou alors remplacer la chaudière d'appoint dans certains cas;
- les réseaux de distribution du fluide caloporteur;
- l'utilisateur; ses besoins en chaleur dépendent de son importance, de l'isolation de ses bâtiments et du climat dans lequel il se trouve.

2.2 Procédure

Les relations mathématiques liant les différents paramètres et données entrant en ligne de compte sont établies pour ensuite être utilisées dans le programme numérique qui calcule pour chaque cas les énergies consommées annuellement, l'apport géothermique, les investissements, les dépenses annuelles et le coût spécifique de la chaleur utilisée. Chaque cas considéré d'utilisation de la géothermie est comparé au cas correspondant sans géothermie, afin d'estimer la rentabilité de l'opération géothermique.

3. Description des éléments de l'étude

3.1 Production de chaleur

3.1.1 Doublet géothermique

Le gradient géothermique a été fixé à 30 °C/km, ce qui représente la moyenne pour le Plateau suisse, le débit étant de 120 m³/h par doublet. Pour des agglomérations jusqu'à 7000 habitants, l'étude admet un seul doublet. A partir de 7000 habitants, il y a lieu de considérer 2 doublets.

Pour l'extraction du fluide, une hauteur manométrique de 100 m a été fixée, alors que pour la réinjection, la hauteur manométrique correspondante de 200 m est retenue.

Coût du doublet

Pour des forages de 1000 à 2000 m de profondeur, le coût estimatif d'un doublet est donné par la relation:

$$\text{Coût (fr.)} = 900\,000 + 2\,500 \times \text{profondeur (m)}$$

Le coût fixe de 900 000 fr. comprend les frais de génie civil, la plate-forme de forage, le transport et la mobilisation de l'équipement, le traitement des boues et les installations annexes.

3.1.2 Echangeurs et chaudière d'appoint

Les échangeurs considérés sont des échangeurs à plaque de titane. Leur surface est déterminée par la quantité maximale de chaleur transmise. Les chaudières d'appoint sont des unités de 1 à 10 MW, selon la taille de l'agglomération. Elles fonctionnent au fuel léger et leur rendement thermique a été fixé à 75%, moyenne admise sur toute l'année.

Les échangeurs de chaleur, les chaudières d'appoint et les pompes à chaleur (option) sont regroupés dans une centrale de chauffe.

3.1.3 Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur considérées dans cette étude fournissent 0,5 MW thermique ou plus. Dans cette gamme de puissance, les pompes à chaleur les plus appropriées sont équipées de compresseur à vis. Si l'on utilise un mélange frigorigène de type R-12, elles peuvent fonctionner jusqu'à une température de 65 °C à la sortie condenseur (frigorigène). Le coefficient de performance réel d'une pompe à chaleur est égal au coefficient théorique multiplié par un facteur de correction α inférieur à l'unité. Ce facteur tient compte des pertes dues à l'irréversibilité du cycle thermodynamique ainsi que des pertes dues au compresseur.

$$\text{COP} = \alpha \frac{T_c}{T_c - T_v} = \alpha \text{COP}_{th}$$

où T_v = Température de condensation du fluide

T_c = Température d'évaporation du fluide

Ce coefficient α varie relativement peu, quelles que soient les températures T_c et T_v considérées. Diverses considérations à partir d'exemples d'application ont amené à choisir une valeur $\alpha = 0,66$ lorsque les pompes à chaleur fonctionnent à pleine charge.

Quand elles fonctionnent à charge partielle, le COP diminue avec la charge. En général, il est donc préférable d'utiliser plusieurs pompes permettant une plus grande flexibilité pour couvrir la plage des besoins de chauffage au cours de l'année et éviter ainsi en partie de faire fonctionner les pompes à faible charge.

Pour tous les cas d'application considérés, on admet 3 pompes à chaleur fonctionnant la plupart du temps dans une plage de charge de 60 à 100%. Ce fonctionnement à charge partielle au cours de l'année réduit alors α d'environ 10%.

3.2 Les utilisateurs

Dans le cadre de cette étude, 12 types d'agglomération variant de 500 (160 logements) à 11 200 habitants (3200 logements) ont été considérés. Ces 12 types d'agglomération sont basés sur 3 genres de bâtiments comprenant chaque fois 20, 40, 60 et 80 unités.

3.2.1 Genre de bâtiments et densité d'habitation

Les 3 genres de bâtiments considérés représentent des constructions typiques, telles qu'on les rencontre en Suisse, avec des appartements d'une surface d'environ 100 à 120 m² chacun.

WE-8

Petit immeuble de 8 appartements, de 3 étages sur rez-de-chaussée avec 2 appartements par étage. Un total de 25 habitants en moyenne occupent cet immeuble.

Volume: 2300 m³; surface exposée de l'enveloppe: 950 m²; densité d'habitation: 150 habitants/hectare.

WE-20

Immeuble de 5 étages, de 4 appartements par étage. En moyenne, 70 habitants occupent chaque immeuble de ce genre.

Volume: 7600 m³; surface exposée de l'enveloppe: 2090 m²; densité d'habitation: 200 habitants/hectare.

WE-40

Immeuble de 10 étages, de 4 appartements par étage, avec en moyenne 140 habitants.

Volume: 13 775 m³; surface exposée de l'enveloppe: 3400 m²; densité d'habitation: 250 habitants/hectare.

3.2.2 Disposition des agglomérations

Afin d'estimer la longueur et le coût du réseau de distribution de chauffage, les immeubles sont distribués de façon géométrique en rangées et en lignes avec des espaces selon des critères répondant aux tendances actuelles d'urbanisme. Cette disposition géométrique, simulant la réalité, permet aussi d'établir une relation entre les coûts des réseaux de distribution à l'intérieur de deux agglomérations du même type, mais de densité différente:

$$\frac{\text{Coût du réseau (1)}}{\text{Coût du réseau (2)}} \cong \sqrt{\frac{\text{densité (2)}}{\text{densité (1)}}}$$

3.3 Besoins calorifiques

3.3.1 Besoins de chauffage annuels

La consommation annuelle d'énergie thermique dans le bâtiment se calcule selon la norme SIA 180/3, édition 1980.

La consommation énergétique annuelle pour le chauffage correspond à la somme des termes E_1 et E_2 de la norme:

$$E_{12} = f \cdot C \cdot \left(\bar{k} \cdot F + 0,2 V \frac{H}{0,75} \right)$$

Le programme de calcul traite le facteur de conversion énergétique f pour chacun des systèmes d'appoint en tenant compte des rendements appropriés. La valeur de C dépend des conditions climatiques. Dans le cadre de l'étude, les conditions climatiques retenues sont celles du Plateau suisse (Berne).

Le terme \bar{k} dépend de l'isolation du bâtiment. Trois cas sont considérés, en prenant comme exemple un bâtiment dont la surface des murs extérieurs représente 70% de la surface totale exposée, et celle du toit 30%, les fenêtres et portes étant elles-mêmes le 25% des murs extérieurs.

- 1) Bâtiments existants (A)
 $\bar{k} = 1,70 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
 Cette valeur est obtenue avec une isolation thermique moyenne.
- 2) Bâtiments rénovés (R)
 $\bar{k} = 1,10 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
 Il s'agit de bâtiments rénovés pour en améliorer l'isolation thermique: meilleure isolation du toit et installation de fenêtres à double vitrage.
- 3) Bâtiments neufs (N)
 $\bar{k} = 0,75 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
 Bâtiments à construire avec isolation thermique très soignée, correspondant aux recommandations de la norme SIA 180/1, édition 1980.

Les valeurs de F et V sont données sous 4.2.1.

Enfin, H est le taux moyen de renouvellement de l'air des locaux. Si l'on retient en général une valeur de $0,75 \text{ h}^{-1}$ pour répondre aux normes d'hygiène, H varie toutefois en fonction de \bar{k} , ce qui explique le terme $H/0,75$ dans la formule de E_{12} .

3.3.2 Niveaux de température de chauffage

Les niveaux de température maximum aller et retour de chauffage, au niveau de l'utilisateur, retenus pour l'étude sont donnés ci-après. Ils sont réduits dans des proportions convenables, de façon à s'adapter le mieux possible aux conditions de chauffage géothermique à basse température.

- 1) Bâtiments existants (A)
 $75/50 \text{ } ^\circ\text{C max.}$
 Les températures caractéristiques de ce genre de bâtiment sont habituellement $90/70 \text{ } ^\circ\text{C}$. Elles sont ramenées pour l'étude à $75/50 \text{ } ^\circ\text{C}$, car l'expérience prouve que, dans la majeure partie des cas, les corps de chauffe sont surdimensionnés.
- 2) Bâtiments rénovés (R)
 $60/40 \text{ } ^\circ\text{C max.}$
 Dans le cadre de la rénovation, avec amélioration de l'isolation thermique, il est admis que les corps de chauffe sont aussi changés.
- 3) Bâtiments neufs (N)
 $50/35 \text{ } ^\circ\text{C max.}$
 Un chauffage par sol à faible température est retenu, car il s'adapte particulièrement à la géothermie.

3.3.3 Puissance installée pour le chauffage

La puissance de chauffage installée correspond aux besoins de chaleur au moment où la température extérieure est la plus basse; elle est égale à:

$$P_{12} = E_{12} \cdot \Delta T_{\text{max}} / f \cdot C$$

où ΔT_{max} est la différence de température maximum entre la température à

l'intérieur du bâtiment ($20 \text{ } ^\circ\text{C}$) et la température extérieure ($-11 \text{ } ^\circ\text{C}$).

3.3.4 Système de production d'eau chaude sanitaire

Le diagramme de charge des besoins en eau chaude sanitaire est très différent de celui des besoins en chauffage. En effet, les besoins en eau chaude sont réguliers sur toute l'année, avec des pointes pendant la journée allant jusqu'à 8 fois la moyenne sur l'année dans le cas d'un immeuble, et 6 fois dans le cas d'une agglomération, alors que les températures de chauffage aller et retour dans le circuit de température varient avec la température extérieure. La production d'eau chaude sanitaire peut être réalisée de plusieurs façons. Le mode retenu est une production d'eau chaude dans chaque immeuble en agissant sur la température de départ. L'eau est réchauffée par un système échangeur-ballon mais, si nécessaire, on maintient la température de départ du réseau à une valeur suffisante pour pouvoir préparer l'eau chaude sans appoint d'énergie au niveau de l'immeuble.

3.3.5 Energie consommée et puissance installée

Les besoins de chauffage annuels et la puissance installée pour les cas de base sont calculés pour les douze types d'agglomérations et trois cas d'isolation thermique. A titre d'exemple, les valeurs pour des agglomérations composées de bâtiments à 20 appartements sont données dans le tableau 1. Ces valeurs comprennent aussi les besoins en eau chaude sanitaire. Pour ces derniers, la norme SIA 180/3 admet une consommation journalière de 50 litres d'eau à $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ par personne. Toutefois, dans le cas de la géothermie, il semble judicieux d'abaisser le niveau de température de consommation à $45 \text{ } ^\circ\text{C}$, pour mieux tirer profit du bas niveau de température de l'eau d'origine géothermique. La consommation journalière est alors augmentée à 70 litres par habitant. La consommation d'énergie est de 1075 kWh/an, soit une puissance instantanée moyenne de $0,123 \text{ kW}$ par habitant. On remarque au tableau 1 que si, pour des bâtiments mal isolés, l'eau chaude sanitaire correspond à 20% des besoins totaux

TABLEAU 1: Besoins en chaleur annuels et puissance installée

Agglomérations composées de bâtiments WE-20					
Type de bâtiment		Nombre de bâtiments			
		20 (1400 hab.)	40 (2800 hab.)	60 (4200 hab.)	80 (5600 hab.)
Ancien $\bar{k} = 1,7$ $H = 1,2$	E_{12} (MWh)	$5,985 \cdot 10^3$	Valeurs égales à 2 fois celles de 20 bâtiments	Valeurs égales à 3 fois celles de 20 bâtiments	Valeurs égales à 4 fois celles de 20 bâtiments
	E_3 (MWh)	$1,505 \cdot 10^3$			
	E (MWh)	$7,490 \cdot 10^3$			
	P_{12} (MW)	3,711			
	P_3 (MW)	0,172			
	P (MW)	3,883			
Rénové $\bar{k} = 1,1$ $H = 0,75$	E_{12} (MWh)	$3,819 \cdot 10^3$	Valeurs égales à 2 fois celles de 20 bâtiments	Valeurs égales à 3 fois celles de 20 bâtiments	Valeurs égales à 4 fois celles de 20 bâtiments
	E_3 (MWh)	$1,505 \cdot 10^3$			
	E (MWh)	$5,324 \cdot 10^3$			
	P_{12} (MW)	2,368			
	P_3 (MW)	0,172			
	P (MW)	2,540			
Nouveau $\bar{k} = 0,75$ $H = 0,75$	E_{12} (MWh)	$3,087 \cdot 10^3$	Valeurs égales à 2 fois celles de 20 bâtiments	Valeurs égales à 3 fois celles de 20 bâtiments	Valeurs égales à 4 fois celles de 20 bâtiments
	E_3 (MWh)	$1,505 \cdot 10^3$			
	E (MWh)	$4,592 \cdot 10^3$			
	P_{12} (MW)	1,914			
	P_3 (MW)	0,172			
	P (MW)	2,086			

taux annuels en énergie, les valeurs correspondantes pour des bâtiments bien isolés se situent à environ 33%.

3.4 Transport et réseau de distribution de chaleur

3.4.1 Type et dimensionnement de réseaux

A l'intérieur de l'agglomération, il y a 3 types de réseaux bouclés à 2 conduites:

- réseau principal reliant la centrale à la périphérie de l'agglomération;
- réseau secondaire alimentant des groupes de bâtiments;
- réseau tertiaire reliant les bâtiments individuellement.

Les longueurs et diamètres des conduites sont calculés selon:

- la disposition des bâtiments (disposition géométrique pour l'étude de base);
- les besoins maximums en chaleur à fournir;
- les débits;
- les vitesses de déplacements du fluide caloporteur en gardant les pertes de charges dans des limites acceptables.

Compte tenu des températures relativement basses dans les réseaux de distribution, l'étude a été faite en choisissant des conduites téléthermiques sans compensateur ni caniveau. Cette technique récente permet une installation moins onéreuse que celle d'une installation traditionnelle à caniveaux, nécessaire dans le cas où le caloporteur dans le réseau de distribution est à une température de 130 °C. Les conduites consistent en un tuyau porteur en acier, entouré d'une isolation monobloc en mousse rigide de polyuréthane d'environ 50 mm, enrobée elle-même par un tuyau protecteur en polyéthylène à haute densité ($\lambda = 0,016 \text{ W/m}^\circ\text{C}$).

3.4.2 Déperdition de chaleur dans le réseau de distribution

Les pertes de chaleur (chauffage et eau chaude sanitaire) sont calculées par le programme, selon des relations physiques connues, sur la base des longueurs, diamètres, isolation des conduites et de l'écart moyen de températures entre le liquide caloporteur et le sol dans lequel passent les conduites. Les résultats indiquent que, pour des agglomérations avec bâtiments de type WE-40 (à forte densité d'habitation), les déperditions du réseau sont de l'ordre de 5% alors que celles avec des bâtiments WE-8 (à plus faible densité d'habitation) se situent autour de 12%.

3.5 Facteurs économiques

3.5.1 Approche de base

Parmi les différentes méthodes à disposition pour des calculs économiques sur des périodes de longue durée, la méthode en francs constants est retenue (conditions économiques figées). Cette méthode a l'avantage de simplifier le problème difficilement prévisible de l'inflation (à titre d'exemple: pendant les 15 dernières années, l'inflation en Suisse a fluctué de 11% par an en 1974 à 1% environ en 1976). Selon cette méthode, le taux d'intérêt à considérer pour les calculs de coûts annuels est celui des taux réels diminués du taux d'inflation. Le taux d'intérêt utilisé est fixé à 4% par an. Les coûts des énergies d'appoint, mazout et électricité, sont alors des coûts actuels:

— coût de l'huile de chauffage, valeur moyenne mensuelle de juillet 1979 à juin 1980, pour des livraisons en grandes quantités: 630 fr./tonne;

— coût de l'électricité, haut/bas tarifs, moyenne suisse: 0,09 fr./kWh.

- coût de l'huile de chauffage, valeur moyenne mensuelle de juillet 1979 à juin 1980, pour des livraisons en grandes quantités: 630 fr./tonne;
- coût de l'électricité, haut/bas tarifs, moyenne suisse: 0,09 fr./kWh.

3.5.2 Investissements et frais

L'investissement total est la somme des coûts des équipements représentés à la figure 1 et du génie civil (bâtiments des équipements).

Les frais annuels sont constitués par:

- l'annuité sur le capital (amortissement à annuité constante);
- les frais d'exploitation et d'entretien.

Les frais variables représentent:

- le coût de l'huile pour la chaudière d'appoint;
- le coût de l'électricité pour les pompes d'extraction et de réinjection, pour les pompes à chaleur et pour les brûleurs des chaudières.

La durée d'amortissement et les frais annuels pour l'exploitation et l'entretien des installations, exprimés en pourcentage de ces investissements, qui ont été retenus pour l'étude sont présentés dans le tableau 2.

4. Description du programme de calcul et présentation des résultats

Le programme de calcul est élaboré sur la base des éléments de l'étude décrits précédemment. Pour chaque cas de calcul, on procède comme suit:

- simulation de bilan thermique pour toute la saison de chauffage;
- détermination de la profondeur des forages et dimensionnement de tous les équipements (échangeurs, chaudière et pompes à chaleur);
- intégration de toutes les consommations et bilan sur toute l'année;
- calcul des coûts d'investissement et frais annuels fixes et variables;
- calcul du coût spécifique moyen de l'énergie utilisée durant toute l'année.

4.1 Température de départ et de retour du système de chauffage

Les bâtiments sont chauffés pour des températures extérieures inférieures à 12 °C (moyenne journalière) et les températures de départ et de retour sont maximales pour une température extérieure de -11 °C (pour Berne). Pour les températures intermédiaires et en considérant seul le chauffage, les températures départ et retour varient proportionnellement. Néanmoins, dans le but d'assurer une production d'eau chaude

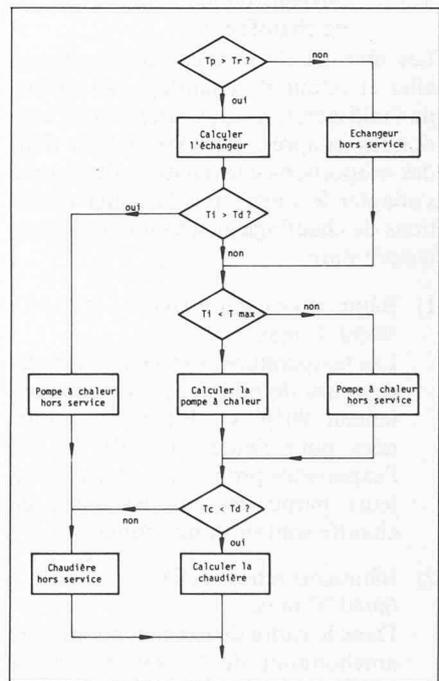


Fig. 2. — Organigramme du branchement des calculs.

TABLEAU 2: Durée d'amortissement frais fixes d'exploitation et d'entretien

Installation	Durée d'amortissement	Frais annuels d'exploitation et entretien (% des investissements)
Doublet géothermique	30 ans	2,0%
Echangeur de chaleur (1)	15 ans	2,0%
Chaudière d'appoint et citerne (2)	15 ans	3,5%
Pompe à chaleur (3)	15 ans	3,5%
Réseau transport et distribution	30 ans	2,0%
Génie civil: soit le bâtiment et fondation de la centrale de chauffe, comprenant les équipements (1), (2) et (3)	40 ans	2,0%

centralisée sans devoir recourir à un appoint dans chaque immeuble, on a préféré limiter la température de départ à 48 °C minimum.

4.2 Test de branchement

Pour chaque cas calculé et pour chaque température extérieure, le programme doit calculer quels sont les équipements en service et quelle est la puissance fournie par chacun. L'apport se fait de façon préférentielle par l'échangeur puis par la pompe à chaleur, pour autant que ces équipements soient à même de fonctionner aux conditions fixées par les niveaux de température. L'organigramme du branchement des calculs est représenté à la figure 2.

4.3 Présentation des résultats

Les résultats de chaque cas de calcul sont présentés sur deux pages. En se référant à l'exemple du calcul donné en figure 3, celui-ci traite le cas de 40 immeubles anciens de 20 appartements chacun, avec chauffage avec pompe à chaleur et eau géothermique à 50 °C. Pour chaque écart de degré centigrade, le programme calcule la charge et les puissances fournies par l'échangeur

géothermique, les pompes à chaleur et la chaudière d'appoint.

Au-dessus de 12 °C, la charge représente les besoins d'eau chaude sanitaire ainsi que les pertes du réseau en dehors de la période de chauffage. A chaque niveau de température correspond un nombre d'heures de fonctionnement. L'intégration de la charge et de ses apports est alors présentée sous la forme de résultats en énergies annuelles, l'énergie totale étant égale à la somme des énergies à l'échangeur, de la pompe à chaleur et de la chaudière d'appoint.

En bas de la page des résultats, les coûts des investissements, des dépenses annuelles et trois résultats importants sont donnés: économie d'huile de chauffage par substitution, économie d'énergie et coût spécifique de la chaleur utile.

L'économie d'énergie correspond à l'apport de l'échangeur géothermique plus celui des pompes à chaleur desquels il faut soustraire la consommation électrique des pompes à chaleur et des pompes des puits.

Le coût spécifique de la chaleur utile est égal aux dépenses annuelles totales divisées par l'énergie annuelle utile (énergie totale moins les pertes du réseau de distribution de chaleur).

5. Résultats

5.1 Etude de base

Une illustration des résultats est présentée sous forme résumée dans le tableau 3. Y sont donnés le coût spécifique de la chaleur en ct/kWh et l'économie d'énergie en %.

Dans ce tableau, les cases hachurées correspondent aux cas où le coût de la chaleur spécifique de la chaleur est au moins 15% meilleur marché que celui de la solution de référence correspondante. Ce critère de rentabilité est introduit étant donné le risque financier d'une opération de géothermie.

5.1.1 Agglomérations avec bâtiments de type WE-8 (500 à 2000 habitants)

La majeure partie des cas ne sont pas rentables, à cause de la faible consommation de chaleur. L'économie d'huile de chauffage n'est pas assez importante pour compenser l'investissement relatif au forage des puits.

C'est seulement dans les cas de 60 à 80 bâtiments (1500-2000 habitants) que l'on obtient quelques cas rentables, en particulier pour des niveaux de température géothermique élevés.

SOCIETE GENERALE POUR L'INDUSTRIE 23-Feb-81
 =====
 COUT DU CHAUFFAGE GEOTHERMIQUE

 CALCUL NUMERO 18 CAS : 40 X 20 / A P 50

 D O N N E E S D E B A S E

 DOUBLET GEOTHERMIQUE
 NOMBRE DE DOUBLET 1
 PROFONDEUR DES PUIITS 1333.33 METRES
 GRADIENT GEOTHERMIQUE 30 DEG.C./KM
 DEBIT GEOTHERMIQUE 120 M.CU./H
 TEMPERATURE DU FLUIDE 50 DEG.C.
 HAUT. MAND. DES POMPES 300 METRES

 UTILISATEURS
 CLIMAT DE REFERENCE BERNE
 NOMBRE D'IMMEUBLES 40
 NB. D'APPART. PAR IMMEUBLE 20
 NOMBRE TOTAL D' APPARTEMENTS 800
 NOMBRE TOTAL D'HABITANTS 2800

 TYPE DE BATIMENT ANCIEN
 COEFFICIENT DE DEPERDITION 1.7 W/M**2/C
 TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR 1.2
 TYPE DE CHAUFFAGE PAR RADIATEUR
 TEMPERATURE MAX DE CHAUFFAGE 75 / 50

 PUISSANCE CHAUFFAGE MAX. 7421.39 KW
 PUISSANCE MOY. EAU SANITAIRE 343.997 KW
 PERTES MOY. DU RESEAU 96 KW
 PUISSANCE INSTALLEE 7861.39 KW

 TEMP. MAX RESEAU A LA CENTR. 75.2/49.8

 FACTEURS ECONOMIQUES
 TAUX D'INTERET 4 %
 DUREE D'AMORTISATION PUIITS 30 ANS
 ECHANGEURS 15 ANS
 CHAUDIERES 15 ANS
 POMPES A CHALEUR 15 ANS
 RESEAU 30 ANS
 GENIE CIVIL 40 ANS
 PRIX DU FUEL 630 S.FRS/T
 PRIX MOYEN DE L'ELECTRICITE .09 S.FRS/KWH

 SOLUTION AVEC POMPE A CHALEUR

RESULTATS DU CALCUL NO 18

 T. EXT CHARGE P.ECHANG. P.POMPE CH P.CHAUDIERE

 DEG.C. KW KW KW KW

 -11 7861.39 0 2283.45 5577.94
 -10 7422 0 3027.91 4594.09
 -9 7382.6 0 3769.95 3612.64
 -8 7143.19 0 4509.37 2633.83
 -7 6903.8 0 5245.89 1657.91
 -6 6664.39 0 5979.21 685.184
 -5 6424.99 0 6424.99 0
 -4 6185.59 0 6185.59 0
 -3 5946.19 13.0033 5933.19 0
 -2 5706.8 323.069 5383.73 0
 -1 5467.4 631.369 4836.03 0
 0 5227.99 937.831 4290.16 0
 1 4988.6 1242.21 3746.39 0
 2 4749.2 1544.22 3204.98 0
 3 4509.8 1843.5 2666.3 0
 4 4270.4 2139.63 2130.77 0
 5 4031 2251.62 1779.38 0
 6 3791.6 2147.96 1643.64 0
 7 3552.2 2043.94 1508.25 0
 8 3312.8 1939.5 1373.29 0
 9 3073.4 1834.56 1238.84 0
 10 2834 1728.98 1105.01 0
 11 2594.6 1622.64 971.962 0
 12 2355.2 1515.3 839.892 0
 >12 439.997 439.997 0 0

 ENERGIE ANNUELLE TOTALE 15825.1 MWH
 ENERGIE ANNUELLE A L'ECHANGEUR 6085.27 MWH
 ENERGIE ANNUELLE DE LA POMPE A CHALEUR 9171.18 MWH
 CONSUMATION ANNUELLE DU COMPRESSEUR 1845.69 MWH
 C.O P. MOYEN 4.97
 ENERGIE ANNUELLE DE LA CHAUDIERE 568.614 MWH
 FONCTIONNEMENT DU PUIT 8760 H/AN

 SURFACE DES ECHANGEURS 175.09 M**2
 PUISSANCE DES POMPES A CHALEUR 6424.99 KW
 PUISSANCE DES CHAUDIERES 5577.94 KW

 COUT DES PUIITS (AVEC POMPES) 4.23333 MIO.S.FRS
 COUT DES CONDUITES GEOTH. .51 MIO.S.FRS
 COUT DES ECHANGEURS .134559 MIO.S.FRS
 COUT DES POMPES A CHALEUR 1.98687 MIO.S.FRS
 COUT DES CHAUDIERES 1.44659 MIO.S.FRS
 COUT DU RESEAU 1.3 MIO.S.FRS
 COUT DU GENIE CIVIL 1.22492 MIO.S.FRS
 COUT D'INVESTISSEMENT TOTAL 10.8363 MIO.S.FRS

 DEPENSES ANNUELLES FIXES 1000.5 M.S.FRS/AN
 DEPENSES ANNUELLES DE FUEL 41.0766 M.S.FRS/AN
 DEPENSES ANNUELLES D'ELECTRICITE 273.721 M.S.FRS/AN
 DEPENSES ANNUELLES TOTALES 1315.3 M.S.FRS/AN

 SUBSTITUTION DE MAZOUT 1749 TONNES/AN
 ECONOMIE D'ENERGIE 77.2 %
 COUT SPEC. CHALEUR UTILE 8.78 CTS/KWH
 =====

Fig. 3. — Présentation des résultats d'un cas de calcul.

TABLEAU 3: Coût spécifique de la chaleur (ct/kWh) et économie d'énergie (%)

Bâtiments type WE-20 A				
Température géothermique avec ou sans pompe à chaleur	Nombre de bâtiments			
	20 (1400 hab.)	40 (2800 hab.)	60 (4200 hab.)	80 (5600 hab.)
Référence	10,48 0,0%	10,48 0,0%	10,44 0,0%	10,45 0,0%
40	15,04 -0,5%	12,64 -0,2%	11,87 -0,2%	11,52 -0,1%
50	12,41 48,1%	10,76 31,4%	10,57 21,7%	10,53 16,5%
60	11,35 73,4%	8,55 66,0%	8,49 52,6%	8,82 41,7%
70	10,37 83,3%	7,14 82,9%	6,74 74,3%	7,04 64,0%
30 P	11,19 60,4%	8,93 65,4%	8,35 64,9%	8,20 63,4%
40 P	12,34 62,1%	9,20 68,2%	8,34 74,3%	8,08 67,4%
50 P	12,02 74,6%	8,78 77,2%	7,92 76,1%	7,64 74,4%
60 P	11,54 79,8%	8,08 84,4%	7,22 83,4%	6,97 81,3%
70 P	10,74 83,3%	7,56 87,7%	6,66 88,0%	6,37 88,7%

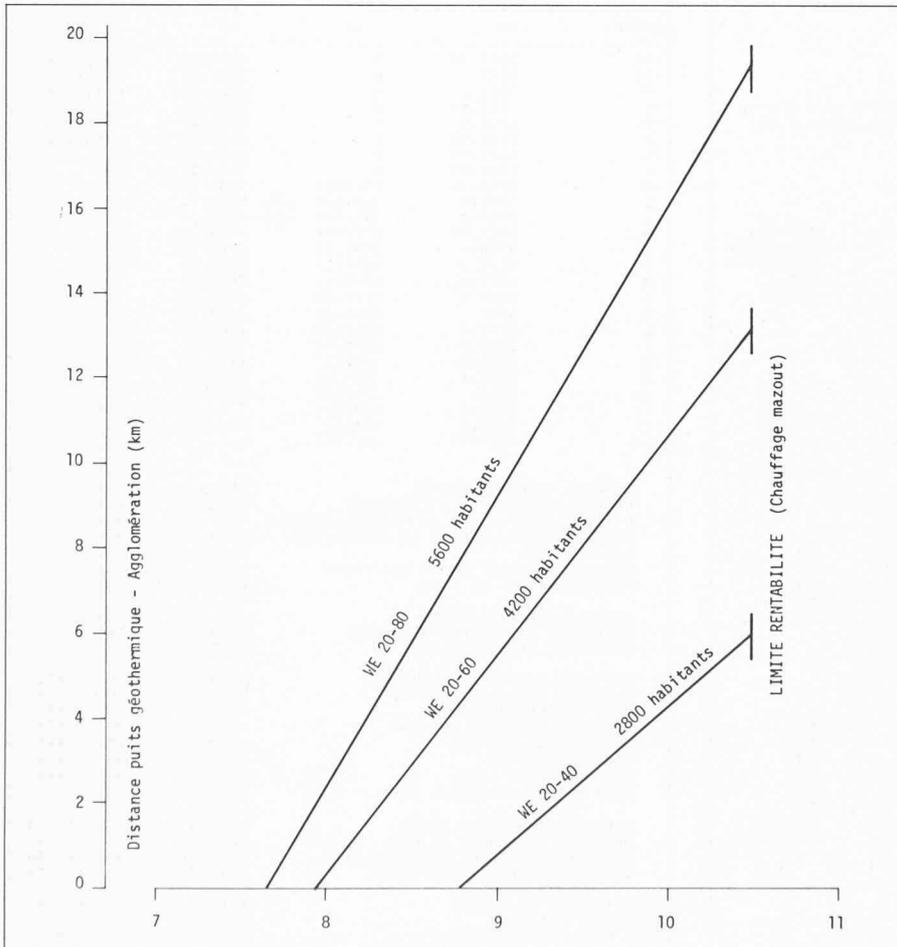


Fig. 4. — Coût spécifique de la chaleur utile en fonction de la distance du puits à l'agglomération (type WE-20-A). Chauffage avec pompe à chaleur; eau géothermique à 50 °C.

5.1.2 Agglomérations avec bâtiments de type WE-20 (1400 à 5600 habitants)

En se référant au tableau 3, on observe comme précédemment que le seuil se situe de façon générale autour de 2000 habitants. La rentabilité s'améliore avec le nombre d'habitants car l'énergie géothermique est mieux utilisée. Toutefois, dans le cas de grosse consommation d'énergie (80 bâtiments), le débit du puits d'extraction de 120 m³/h devient insuffisant. Cela se remarque pour le cas correspondant à une température de 60 °C, sans pompe à chaleur, par une baisse sensible sur le pourcentage d'économie d'énergie.

Pour 40 bâtiments (2800 habitants) et plus, tous les cas sont rentables à partir de température de 60 °C, sans pompe à chaleur, et à partir de 30 ou 50 °C, avec utilisation de pompes à chaleur selon la taille de l'agglomération. A température géothermique égale, les cas avec pompes à chaleur sont toujours plus intéressants que ceux sans pompe à chaleur. Pour des agglomérations se situant au-delà de 3000 habitants, l'utilisation de la géothermie est plus intéressante pour les bâtiments rénovés et neufs que pour les existants car les niveaux de température sont plus bas et l'on tire mieux profit de la géothermie.

5.1.3 Agglomérations avec bâtiments de type WE-40 (2800 à 11 200 habitants)

Les observations faites pour les agglomérations avec bâtiments de type WE-20 sont aussi confirmées. Pour 20 bâtiments (2800 habitants) et plus, les solutions sont généralement rentables à partir de températures de 50 °C sans pompe à chaleur et à partir de 30 °C dans les cas d'utilisation de pompes à chaleur. Au-delà de 40 bâtiments (5600 habitants), l'effet de la taille de l'agglomération ne se fait plus sentir.

5.2 Etude de sensibilité

L'étude de base fixant la majorité des paramètres selon des critères justifiés au chapitre 3, il est alors important de faire varier un certain nombre de paramètres pour déterminer leur influence sur le coût spécifique de la chaleur.

5.2.1 Effet de la distance des puits géothermiques à l'agglomération

L'étude de base est faite en admettant que la centrale de chauffe est à proximité immédiate de l'agglomération. Une distance de 500 m entre le puits d'extraction et la centrale de chauffe et de 1000 m entre celle-ci et le puits de réinjection sont retenues.

Dans certains cas, il faut envisager que les puits soient beaucoup plus éloignés de l'agglomération. L'investissement augmente de 560 000 fr. par kilomètre de distance supplémentaire. Un exem-

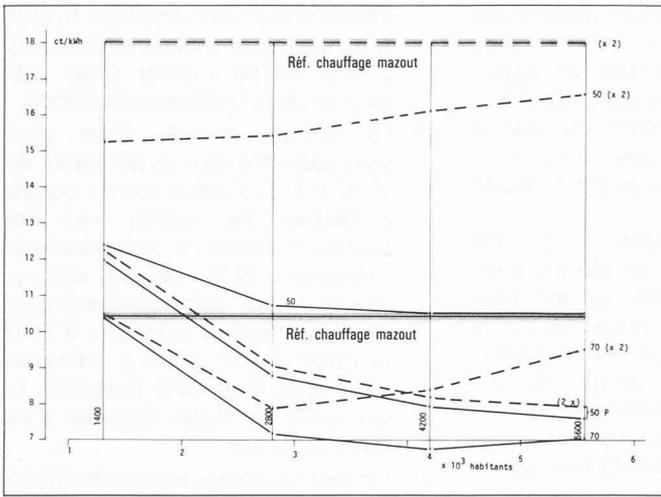


Fig. 5. — Coût spécifique de la chaleur pour une agglomération du type WE-20-A. Prix de l'huile de chauffage multiplié par 2.

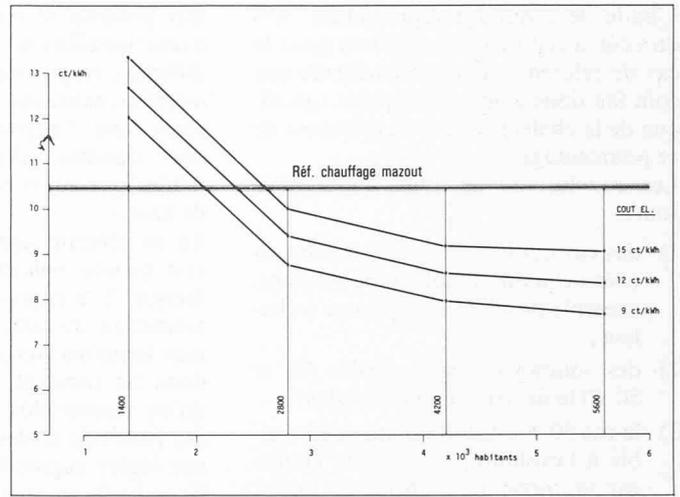


Fig. 6. — Coût spécifique de la chaleur pour une agglomération du type WE-20-A en fonction du prix de l'électricité. Chauffage avec pompe à chaleur; eau géothermique à 50 °C.

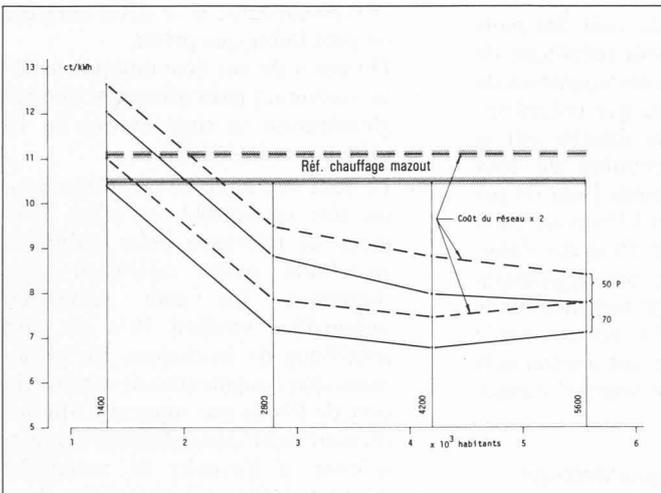


Fig. 7. — Coût spécifique de la chaleur pour une agglomération du type WE-20-A. Coût du réseau multiplié par 2.

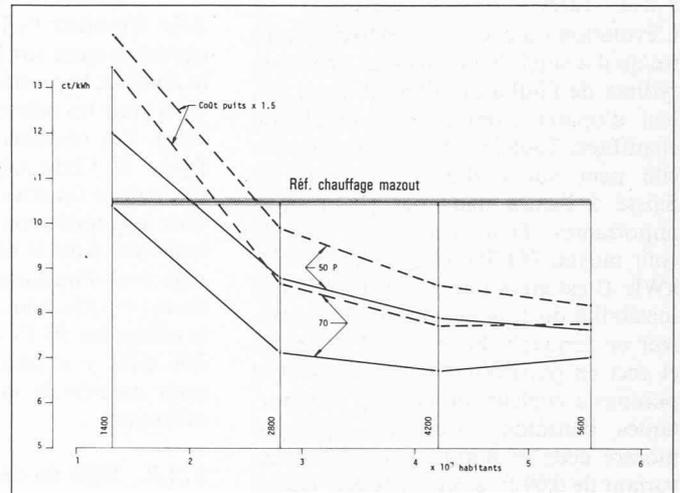


Fig. 8. — Coût spécifique de la chaleur pour une agglomération du type WE-20-A. Coût du puits multiplié par 1,5.

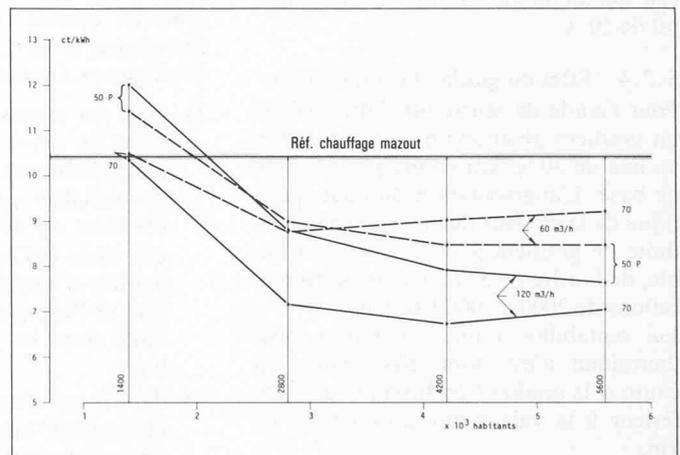
ple d'agglomération de type WE-20 (bâtimens existants), avec une température géothermique de 50 °C et chauffage d'appoint avec pompe à chaleur, est illustré par la figure 4. Cet exemple montre que la distance puits-agglomération peut être de plusieurs kilomètres sans trop pénaliser une opération géothermique. On y remarque aussi que l'effet de taille est sensible.

Ces résultats sont à considérer dans le cas de pose des conduites dans un terrain relativement plat. Il n'est pas tenu compte du coût supplémentaire pour la traversée d'obstacles comme une route importante ou un cours d'eau.

5.2.2 Effet du coût du mazout

L'étude de base est faite en francs constants (conditions économiques figées) avec un prix de l'huile de chauffage de 630 fr./tonne. Or si l'on compare l'augmentation du coût de la vie à celle de l'huile pendant la période de 1968 à 1980 on remarque que le coût de la vie a augmenté en moyenne de 4,5% par an alors que pour l'huile on a enregistré 11,5%. Opérer en francs constants n'est donc pas favorable à la géothermie.

Fig. 9. — Coût spécifique de la chaleur pour une agglomération du type WE-20-A. Débit du puits: 60 m³/h (étude de base: 120 m³/h).



L'étude de sensibilité est faite partant du principe que cette tendance continuera à se développer à un rythme plus ou moins régulier mais de façon moins prononcée pendant les 30 ans de l'amortissement d'une opération géothermique. Le choix retenu pour l'étude de sensibilité est un doublement du coût de l'huile, soit une augmentation relative de 4,3%/an par rapport au coût de la vie. Il va sans dire que la

rentabilité d'opérations géothermiques s'améliore.

Cette considération est illustrée à la figure 5 où l'on a représenté le coût de la chaleur spécifique pour des agglomérations avec des bâtiments anciens de type WE-20 (1400 à 5600 habitants). Trois cas de températures géothermiques sont reportés sur cette figure: 50, 70 °C et 50 °C avec pompe à chaleur (annotation 50 P).

L'huile de chauffage représentant 74% du coût spécifique de la chaleur pour le cas de référence, le doublement de son coût fait donc augmenter le coût spécifique de la chaleur du cas de référence de ce pourcentage.

Les conclusions les plus importantes sont:

- 1) des cas qui ne sont pas rentables au coût actuel de l'huile le deviennent: exemple de 50 °C sans pompe à chaleur;
- 2) des solutions déjà rentables (70 et 50 P) le deviennent encore plus;
- 3) le cas 50 P est pratiquement insensible à l'évolution du coût de l'huile, car la consommation de cet agent énergétique est très faible: 3,6% du total de l'énergie consommée.

5.2.3 Effet du coût de l'électricité

L'évolution du coût de l'électricité montre qu'il a suivi de façon assez précise le rythme de l'inflation, donc il n'y a pas lieu d'opérer comme pour l'huile de chauffage. Toutefois, le coût de l'électricité peut varier d'une commune de Suisse à l'autre dans des proportions importantes. Dans l'étude de base le coût moyen HT/BT est fixé à 0,09 fr./kWh. Il est alors important d'étudier la sensibilité du coût spécifique de la chaleur en fonction du coût de l'électricité et ceci en particulier pour les cas avec pompes à chaleur qui en sont d'importantes consommatrices. La figure 6 montre cette évolution pour des coûts variant de 0,09 fr. à 0,15 fr./kWh. Le cas étudié dans cette figure traite d'agglomérations de bâtiments existants chauffés à l'aide de pompes à chaleur et une eau géothermique dont la température est de 50 °C.

5.2.4 Effet du gradient géothermique

Pour l'étude de sensibilité, l'on a choisi un gradient géothermique de 25 °C/km au lieu de 30 °C/km retenu pour l'étude de base. L'augmentation du coût spécifique de la chaleur due à cette valeur réduite de gradient géothermique est faible, de l'ordre de 5% pour des agglomérations de 2000 à 5000 habitants. La rentabilité d'une opération géothermique n'est donc pas remise en cause si le gradient géothermique est inférieur à la valeur moyenne de 30 °C/km.

5.2.5 Effet du coût du réseau de distribution de chaleur

Toujours pour le même exemple que précédemment, il a été admis que le coût du réseau était le double de celui retenu pour l'étude de base. Cette situation est illustrée à la figure 7. Comme prévu, toutes les courbes sont déplacées vers le haut dans ce cas, y compris le cas de référence de chauffage à l'huile. Cette augmentation d'un facteur 2 du coût du réseau de distribution de cha-

leur pourrait se rencontrer dans le cas d'une installation dans des conditions difficiles, en particulier dans une agglomération existante. Une autre hypothèse serait que l'augmentation est due à des densités d'agglomération plus faibles que celles retenues pour l'étude de base.

En se référant également à 3.2.3, on voit qu'une réduction de densité d'un facteur 2 n'engendrerait qu'une augmentation du coût du réseau de $\sqrt{2}$. Il faut toutefois noter que ces considérations ne tiennent pas compte du fait qu'un réseau plus étendu engendrerait des pertes de chaleur plus grandes, d'où une légère augmentation du coût spécifique de la chaleur dans tous les cas (y compris le cas de référence).

5.2.6 Effet du coût des puits géothermiques

Afin d'évaluer l'effet du coût des puits géothermiques sur le coût spécifique de la chaleur, le premier a été augmenté de 50% pour les mêmes cas que précédemment. Les résultats sont illustrés par la figure 8. Cette augmentation du coût des puits a un effet sensible pour de petites agglomérations (+15% pour 1400 habitants dans le cas 50 P) et elle s'atténue avec l'importance des agglomérations (+6,5% pour 5600 habitants dans le même cas 50 P). ceci s'explique par le fait qu'il y a plus de consommateurs pour amortir la même somme supplémentaire.

5.2.7 Effet du débit géothermique

Pour l'étude de base, le débit du puits d'extraction a été fixé à 120 m³/h. L'influence du débit est alors étudiée en retenant une valeur de 60 m³/h, toujours pour les mêmes cas d'opérations géothermiques et les résultats sont présentés à la figure 9. On constate que:

- 1) pour un ensemble de 20 bâtiments chauffés avec pompe à chaleur (1400 habitants), le coût spécifique de la chaleur est légèrement plus faible avec un débit réduit à 60 m³/h car, dans ces cas de faible consommation d'énergie, le débit est suffisant et l'énergie de pompage est réduite dans les proportions des débits;
- 2) dans le cas d'agglomérations importantes (5600 habitants), le coût spécifique de la chaleur augmente, car on n'a plus assez d'énergie géothermique à disposition.

bitants et plus sont rentables: le coût spécifique de la chaleur est inférieur à celui obtenu à partir d'une centrale de chauffe utilisant du mazout.

- 2) La température de l'eau géothermique doit être au minimum de 50 °C si l'on n'utilise pas de pompe à chaleur. Par contre, avec des pompes à chaleur, le seuil minimum s'abaisse à 30 °C. On peut alors se limiter à des puits géothermiques d'une profondeur inférieure à 1000 m (pour autant qu'on y rencontre une nappe d'un débit suffisant), ce qui réduit le risque financier d'un échec de forage.
- 3) Un autre avantage important d'utiliser une pompe à chaleur est que le coût spécifique de la chaleur est moins sensible au débit du puits d'extraction. D'où l'intérêt d'éviter une déconvenue si le débit constaté est plus faible que prévu. Du point de vue économique, le débit minimum pour alimenter une agglomération se situe autour de 10 m³/h par mille habitants.
- 4) Le coût de l'huile de chauffage joue un rôle primordial, car c'est l'élément de référence pour définir la rentabilité d'une opération géothermique. Ce coût représente aujourd'hui environ 70% du coût spécifique de la chaleur. En présumant que l'augmentation relative du prix de l'huile par rapport à l'indice du coût de la vie continuera à se manifester à l'avenir, la rentabilité d'une opération géothermique dont l'exploitation est amortie en 30 ans ne fera que s'améliorer.
- 5) La distance entre les puits géothermiques et l'agglomération n'est pas prépondérante. Pour une agglomération d'une certaine importance, une distance de quelques kilomètres est acceptable. Cette constatation permet une certaine latitude quant au choix de l'emplacement des forages par rapport à celui des centres de consommation de chaleur.

Ces conclusions mettent en évidence l'intérêt économique de la géothermie pour la Suisse. Elles devraient encourager l'essor de cette nouvelle source d'énergie qui, dans certains cas d'application de sources géothermales telles qu'à Lavey-les-Bains (VD) et Zurzach (AG), a déjà démontré l'intérêt de l'utilisation de cet agent énergétique.

6. Conclusions

L'étude paramétrique présentée ici permet de tirer les conclusions suivantes:

- 1) Pour les paramètres fixés dans l'étude de base, on observe qu'en ligne générale, toutes les opérations géothermiques concernant 2000 ha-

Adresse des auteurs:
 Dominique Roux
 et Michel Noël
 Société générale pour l'industrie (SGI)
 Ingénieurs-conseils
 Avenue Louis-Casaï 71
 1216 Genève-Cointrin