

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 70 (1979)

**Heft:** 10

**Artikel:** Utilisation des pompes à chaleur pour la valorisation des eaux chaudes géothermiques

**Autor:** Aureille, R.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-905379>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Utilisation des pompes à chaleur pour la valorisation des eaux chaudes géothermiques

Par R. Aureille

Bereits 1969 wurde in Frankreich die erste Versuchsanlage einer geothermischen Heizung errichtet, die warmes Wasser aus tiefliegenden Wasservorkommen ausnützt. Diese Anlage in Melun bei Paris besteht aus einem Paar von gegeneinander versetzten Bohrlöchern, wovon eines für die Förderung des warmen Wassers und das andere für die Rückinjektion nach der Abkühlung in einem an das Heizungsnetz angeschlossenen Wärmeaustauscher dient.

Nach dem Jom-Kippur-Krieg wurden grosse Aufwendungen zur Förderung der Entwicklung dieser Art von geothermischen Heizungen beschlossen. Zahlreiche Untersuchungen wurden angestellt, und verschiedene weitere Anlagen sind gebaut worden.

## 1. Ressources et utilisateurs

L'énergie géothermique en France métropolitaine est constituée par des nappes profondes d'eau chaude dont les températures sont comprises entre 45 et 120 °C. Ces nappes sont bien répertoriées et leur exploitation se trouve largement facilitée par les connaissances qui ont été acquises à l'occasion des sondages de prospection pétrolière.

La carte de la fig. 1 montre quelles sont les principales zones géographiques qui possèdent des ressources géothermiques.

La région parisienne est la mieux connue de toutes ces zones. La nappe du Dogger constitue une ressource très importante dont la partie centrale qui est située à environ 1800 m de profondeur, contient de l'eau à 70 °C et s'étend sur une surface de plus de 7000 km<sup>2</sup>. L'épaisseur des calcaires perméables qui contiennent l'eau est de l'ordre de 100 m. Cette eau est salée (de 5 à 30 grammes par litre), elle renferme principalement de l'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) ainsi que plus rarement des indices d'huile ou de gaz.

Le bassin Aquitain recelle de nombreuses formations aquifères profondes d'importance très variable qui peuvent constituer des réservoirs géothermiques exploitables. La température des nappes est au moins égale à 50 °C pour une profondeur de 1300 m. On distingue deux zones principales: l'ensemble Nord Aquitain et l'ensemble de l'Aquitaine Centrale. On notera que Bordeaux est situé juste en bordure des périmètres intéressés et que seule est bien connue à cet endroit une nappe d'eau à 40 °C située à 900 m de profondeur.

L'Alsace est la région de France métropolitaine où l'on a déterminé les plus hautes températures d'eau géothermique, jusqu'à 180 °C. Cependant la structure géologique profonde de l'Alsace est complexe, les terrains sont fracturés et présentent des décrochements verticaux importants. De ce fait, la profondeur locale d'une formation géologique donnée, et par conséquent la température, ne peuvent être déterminées avec précision. Les différents réservoirs seraient pourtant susceptibles de fournir des températures le plus souvent supérieures à 100 °C, mais avec des débits qu'il est très difficile d'estimer.

La Limagne et le couloir Rhodanien-Provence sont encore mal connus, la Limagne semble cependant capable de fournir de l'eau géothermique à température élevée.

L'utilisation de ces nappes d'eau chaude pour le chauffage des locaux semble se présenter favorablement, surtout lorsque de grandes zones urbaines où à urbaniser sont situées au dessus de nappes géothermiques exploitables. Ceci est notamment le cas pour la nappe du Dogger dans la région parisienne, où les premières réalisations ont déjà vu le jour: à Melun (3000 loge-

Dès 1969, une première expérience de chauffage géothermique a été réalisée en France, pour utiliser l'eau chaude des nappes aquifères profondes. Cette installation réalisée à Melun, près de Paris, est constituée par un doublet de forages déviés, l'un servant à l'extraction de l'eau chaude, l'autre à la réinjection après refroidissement dans un échangeur raccordé au réseau de chauffage.

Après la guerre du Kippour, un grand effort a été consenti pour favoriser le développement de ce type de chauffage géothermique. De nombreuses études ont été effectuées et plusieurs réalisations nouvelles ont vu le jour.

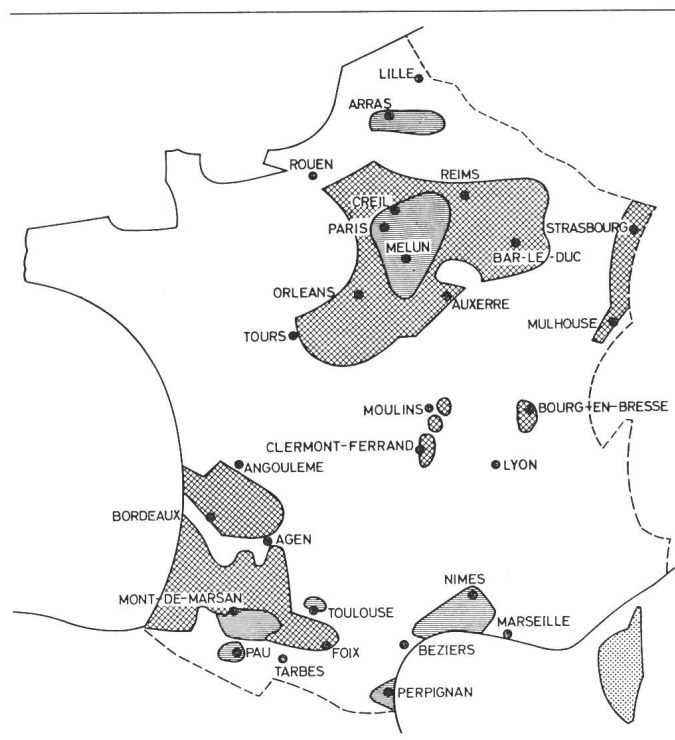


Fig. 1 Ressources géothermiques en France

### ■ Ressources prouvées

Ces ressources sont constituées par les aquifères pour lesquels sont disponibles l'ensemble des données suivantes:

- caractéristiques du réservoir (lithologie, profondeur, épaisseur, porosité, perméabilité).
- caractéristiques physiques et chimiques du fluide

### ■ Ressources probables

Ces ressources sont constituées par des aquifères pour lesquels les données disponibles sont insuffisantes bien qu'il soit possible de faire des hypothèses plausibles sur la valeur des paramètres. Il subsiste néanmoins un risque d'échec

### ■ Ressources possibles

Cette catégorie regroupe les ressources situées dans des zones où il existe probablement des formations pouvant constituer des réservoirs dont la localisation précise est difficile et les caractéristiques mal connues

ments), à Villeneuve-la-Garenne (1800 logements) et à Creil (4000 logements). On remarque que ces réalisations concernent toutes un nombre de logements important, car il s'agit là d'une caractéristique du chauffage géothermique. En effet, chaque forage produit en permanence environ 100 m<sup>3</sup>/h d'eau à 70 °C

qui, comme nous le verrons plus loin, doit être utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire et pour fournir la fraction de base des besoins de chauffage, de façon à obtenir une durée d'utilisation aussi grande que possible, ce qui n'est réalisable que si l'on dispose d'un nombre de logements suffisant. Il faut noter en outre, que le chauffage géothermique peut être adapté à un ensemble de logements existants ou de logements à construire. Cependant, lorsque l'on envisagera de chauffer des logements neufs, il conviendra de tenir compte de l'étalement de la construction dans le temps et de veiller particulièrement à ce que dès le départ, l'on dispose d'un nombre de logements suffisant.

## 2. Aspects techniques et économiques

Le coût d'un doublet de forages est de l'ordre de 7 millions de Francs. Cet investissement très lourd doit être consenti dès le début des opérations car il est nécessaire de connaître le plus tôt possible la température de l'eau géothermique et le débit des forages, afin de dimensionner le reste de l'installation. Une fois cet investissement consenti, la chaleur géothermique est disponible en permanence et ne coûte plus que le prix du pompage. Cependant, il sera le plus souvent nécessaire de consentir encore d'autres investissements, soit au niveau des appareils de chauffage dans les logements (systèmes spéciaux à basse température), soit en faisant appel à des pompes à chaleur pour refroidir davantage l'eau géothermique avant de la réinjecter dans la nappe et pour améliorer ainsi la rentabilité de l'opération. Le chauffage géothermique nécessite donc des investissements relativement lourds, qu'il faut consentir dès le départ, avant toute exploitation. Cette caractéristique est un handicap évident, spécialement dans le cas de logements neufs dont la construction s'étale dans le temps, et pour lesquels les charges dues aux intérêts intercalaires peuvent devenir excessives.

Sur le plan technique, les systèmes de chauffage géothermiques comportent un *échangeur de chaleur* entre les deux forages du doublet géothermique, cet échangeur étant situé dans une *chaufferie centrale* équipée ou non de pompes à chaleur et qui assure la fourniture de chaleur au réseau de chauffage de l'ensemble des logements. Comme le montre la fig. 2, on voit que l'eau de retour du réseau de chauffage joue un rôle fondamental. Par exemple, lorsque cette eau de retour est

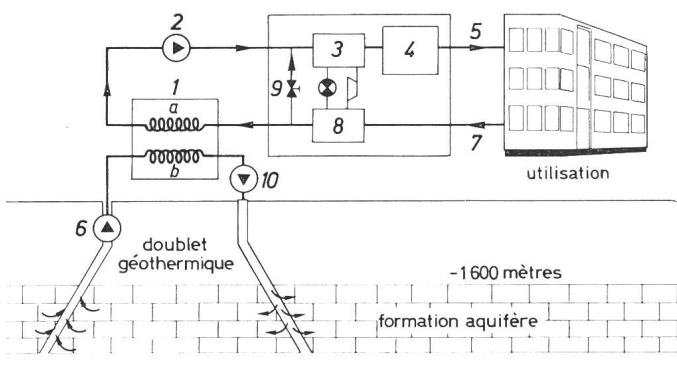


Fig. 2 Installation de chauffage géothermique avec pompe à chaleur

- |                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| 1 échangeur            | 5 réseau de chauffage         |
| a) secondaire          | 6 pompe d'extraction immergée |
| b) primaire            | 7 eau de retour               |
| 2 pompe de circulation | 8 pompe à chaleur             |
| 3 pompe à chaleur      | 9 bipasse                     |
| 4 chaudière d'appoint  | 10 pompe d'injection          |

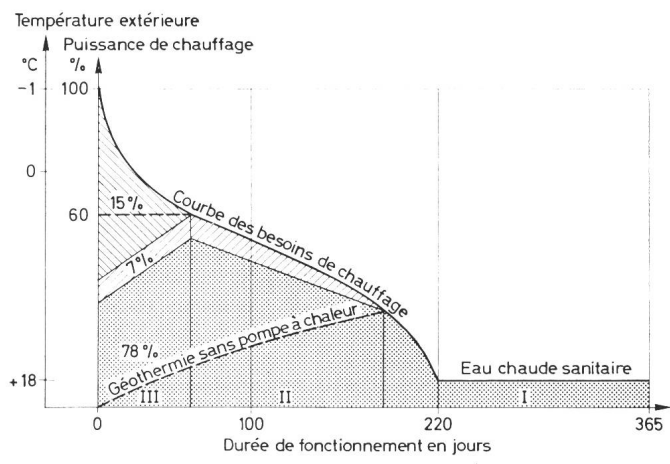


Fig. 3 Courbe de charge d'une installation de chauffage

- Energie complémentaire
- Energie électrique utilisée par la pompe à chaleur et qui se trouve sous forme de chaleur au condenseur
- Energie géothermique fournie par l'échangeur

relativement froide – soit que l'on utilise des appareils de chauffage à basse température dans les logements, soit que les besoins de chauffage soient faibles, en mi-saison – elle peut pénétrer directement dans l'échangeur et prélever une quantité de chaleur importante à l'eau géothermique qui se trouve donc correctement refroidie avant d'être réinjectée dans la nappe. Par contre, lorsque l'eau de retour est à une température élevée – notamment lorsque la pleine puissance de chauffage est nécessaire –, si on l'envoie directement à l'échangeur, elle ne pourra plus refroidir correctement l'eau géothermique et on ne récupérera qu'une quantité de chaleur très faible, voire nulle. Dans ce cas, on aura intérêt à faire appel à la pompe à chaleur où, en traversant l'évaporateur, l'eau de retour du circuit de chauffage sera refroidie jusqu'à la température requise pour prélever la quantité de chaleur géothermique nécessaire.

La fig. 3 montre un exemple de chauffage où l'on voit que l'électricité permet, grâce à la pompe à chaleur, de prélever environ deux fois plus d'énergie sur le même doublet de forages. On remarque aussi que la pompe à chaleur n'est dimensionnée que pour 60% de la puissance maximale de chauffage, ce qui permet néanmoins de fournir 78% de l'énergie annuelle par la géothermie, moyennant une dépense d'énergie électrique de 7%, et avec un appoint de chauffage de 15% utilisé principalement lorsque la puissance de chauffage devient maximale. Cette disposition présente de nombreux avantages:

- l'investissement de la pompe (ou des pompes) à chaleur est réduit de 40% ou plus.
- la durée d'utilisation de la pompe à chaleur (durée de fonctionnement équivalente à pleine puissance) est augmentée.
- la puissance électrique souscrite est réduite, ainsi que la prime fixe.

En outre, la présence d'une source de chaleur d'appoint constitue un secours utilisable en cas d'incident et qui, lorsqu'il s'agit d'un appoint non électrique, permet de bénéficier d'avantages tarifaires appréciables si l'on arrête le fonctionnement des pompes à chaleur pendant les heures de pointe électrique: réduction de la prime fixe, facturation excluant les heures de pointe ...

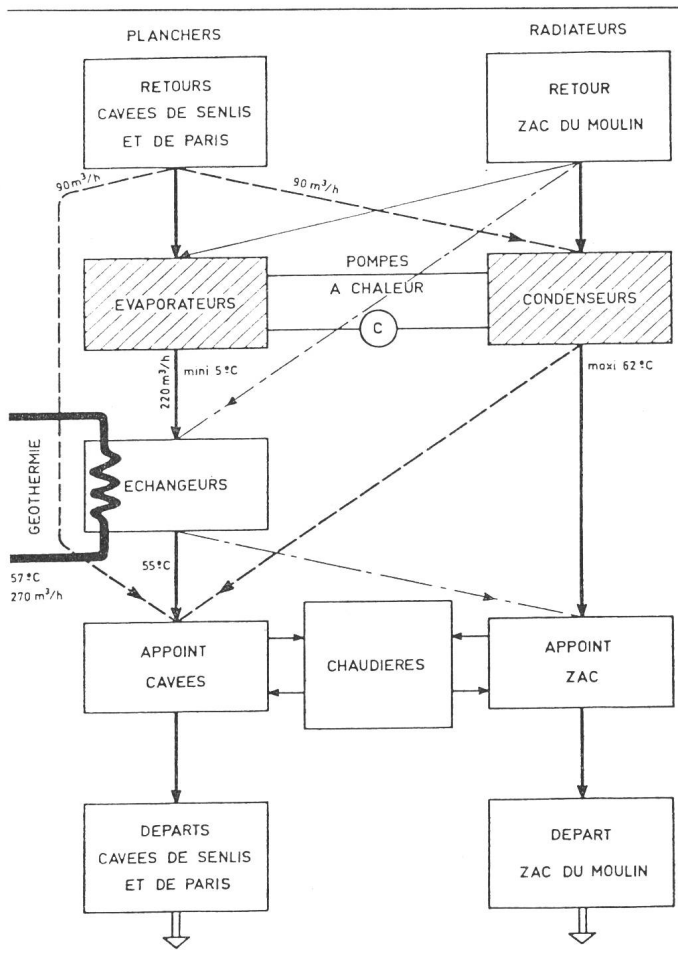


Fig. 4 Schéma de principe de la chaufferie de Creil

### 3. L'opération de Creil

L'emploi de pompes à chaleur liées à la géothermie a été mis en application pour la première fois à Creil en 1976. La chaufferie géothermique est la transformation d'une chaufferie ancienne au charbon qui desservait 2000 logements H.L.M. chauffés par des planchers chauffants (Cavées de Senlis et de Paris).

Un groupe de 2000 logements neufs actuellement en construction (ZAC du Moulin) chauffés par des radiateurs a également été raccordé à cette chaufferie.

La présence de ces deux ensembles d'immeubles possédant des réseaux de chauffage à des niveaux thermiques différents, mais à des températures de retour assez élevées, obligea le concepteur à trouver le schéma d'installation permettant d'exploiter au mieux la géothermie. Pour cela il a été fait appel à trois pompes à chaleur d'une puissance électrique globale de 2112 kW qui, en admettant de faire passer l'eau du circuit «planchers chauffants» dans les évaporateurs et l'eau du circuit «radiateurs» dans les condenseurs, effectuent (comme le montre la fig. 4), un transfert de calories du circuit basse température vers le circuit moyenne température. Il devient alors possible d'utiliser dans l'échangeur l'eau refroidie du circuit basse température afin d'épuiser plus complètement la chaleur contenue dans l'eau géothermale.

Au cours de l'année et en fonction de la température extérieure, plusieurs branchements possibles permettent d'adapter au mieux la récupération des calories provenant des différentes

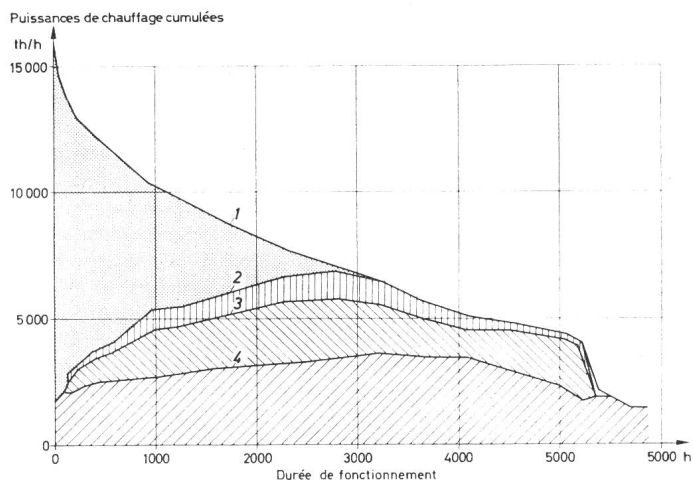


Fig. 5 Bilan énergétique

- 1 fournitures totales
- 2 cumul échangeurs + électricité (Pompe à chaleur PAC)
- 3 échangeurs (avec PAC)
- 4 échangeurs (hypothèse sans PAC)

Année 1976-77 Courbe de charge de l'installation

En chaufferie: Chaudières: 29,2%  
Electricité PAC: 7,8%  
Géothermie: 63,0%

En énergie primaire: Chaudières: 32,5%  
Electricité: 25,0%  
Géothermie: 42,5%

T.E.P. économisées: 2760

T.E.P. économisées par les Pompes à Chaleur: 586

(soit 25% de plus par rapport à la géothermie simple échange)

sources. En particulier par grand froid, 90 m<sup>3</sup>/h d'eau provenant du circuit basse température sont envoyés dans les condenseurs après mélange avec l'eau de retour du circuit moyenne température, ce qui permet l'amélioration du coefficient de performance, et garantit le bon fonctionnement des pompes à chaleur, car la température à la sortie du condenseur ne doit pas dépasser 60 à 62 °C (limitation due au cycle à fréon).

En mi-saison lorsque qu'apparaît une nécessité de régulation sur le circuit à basse température, les 90 m<sup>3</sup>/h sont orientés vers le bypass disposé sur le départ du réseau à basse température.

Pour les températures extérieures élevées, lorsque les pompes à chaleur sont arrêtées et que la puissance des échangeurs devient trop importante, le débit du bypass est augmenté progressivement et s'adapte aux besoins.

La puissance thermique à transférer d'un réseau à l'autre étant élevée, il a été jugé préférable d'utiliser plusieurs pompes à chaleur de puissance réduite (892, 745 et 475 kW) disposées en série. Cette disposition permet d'obtenir un coefficient de performance global supérieur à celui que l'on aurait obtenu avec une pompe à chaleur unique. En effet, les écarts de température entre le condenseur et l'évaporateur étant plus faibles, le coefficient de performance de chaque machine est plus élevé. De plus on évite ainsi le fonctionnement à trop faible charge, puisqu'il est possible d'arrêter suivant les besoins 1 ou 2 machines, celles qui restent en marche fonctionnant toujours au voisinage de leur puissances nominales.

#### 4. Résultats des mesures

La direction des études et recherches d'Electricité de France a entrepris d'effectuer des mesures sur place, à Creil, en vue de préciser quels sont les bilans énergétiques et économiques d'une installation de chauffage géothermique avec pompes à chaleur dans les conditions réelles d'exploitation.

Les résultats obtenus pendant la première année de chauffage (hiver 1976/77), qui était aussi l'année du démarrage de l'installation, ont montré que les caractéristiques réelles des besoins de chauffage des logements et du gisement géothermique étaient assez différentes des valeurs prises en compte pour le dimensionnement des matériels et avaient une influence sensible sur le fonctionnement des pompes à chaleur.

En particulier les températures de retour ont été plus élevées que celles initialement prévues - 3 à 4 °C pour le réseau des planchers chauffants mais plus de 10 °C pour le réseau des radiateurs - ce qui perturbe le fonctionnement des pompes à chaleur et fait atteindre plus rapidement la température maximale admissible au condenseur. D'autre part les logements neufs n'étant pas tous achevés, leurs besoins thermiques et par conséquent le débit du réseau de la ZAC du Moulin ont été beaucoup plus faibles que prévu. L'ensemble de l'installation et notamment les pompes à chaleur resteront donc très largement surdimensionnées pendant toute cette phase transitoire.

Malgré cela, les mesures effectuées montrent que ces machines qui fonctionnent dans des conditions mal adaptées, ont cependant permis d'obtenir des coefficients de performance (C.O.P.) élevés (tableau I).

#### 5. Bilan énergétique de l'année 1976/77

En prenant pour les calculs les caractéristiques relevées pendant l'hiver 1976/77, qui rappelons-le ne correspondent pas au fonctionnement définitif, nous avons effectué un bilan énergétique comme si l'installation avait fonctionné sans incident pendant toute la saison de chauffage, avec un débit géothermique de 160 m<sup>3</sup>/h, on trouve alors que les besoins annuels en calories sont assurés comme suit (voir fig. 5):

Appoint	29,2 %
Electricité PAC	7,8 %
Forages	63 %

En ramenant toutes les consommations en énergie primaire, exprimées en TEP, on obtient les résultats décrits par le tableau II.

On voit sur ce tableau que la géothermie avec pompes à chaleur permet d'économiser 2760 TEP par rapport à la solu-

tion traditionnelle, et que les pompes à chaleur permettent d'économiser annuellement 586 TEP supplémentaires par rapport à la géothermie simple échange.

#### 6. Coût de fonctionnement des pompes à chaleur

A titre de comparaison, le tableau III donne le coût de la Gcal à la sortie de la chaudière ou fournie par les condenseurs des pompes à chaleur en fonction de leur coefficient de performance. Les calculs sont faits avec les hypothèses suivantes:

- un coût du kWh TTC y compris prime fixe, sur les bases d'une puissance souscrite en chaufferie de 1700 kW hors pointe et de 370 kW pendant les pointes. D'une consommation de 5200000 kWh (hypothèse hiver 1976/77).

- un coût de la Gcal TTC en sortie chaudière, avec un rendement de 80 % (sans amortissement ni entretien).

Sur ce tableau on peut voir qu'en ce qui concerne les coûts d'exploitation (part énergie uniquement) les pompes à chaleur sont compétitives, en heures pleines d'hiver, par rapport au fuel domestique dès que le coefficient de performance dépasse 2,5. Pour un coefficient de performance moyen de 4, les pompes à chaleur apportent, dans le cas de Creil, un bénéfice moyen de 17,65 F par gigacalorie.

Tableau I

	PAC 892 kW	PAC 475 kW
Coefficient de performance aux bornes du moteur	3,9	4,5
Quantité de chaleur cédée au condenseur	3000 thermies/h	1700 thermies/h
Puissance électrique	900 kW	440 kW

Tableau II

	Géothermie		Solution traditionnelle
	Solution avec pompes à chaleur	Solution avec échangeurs seuls	
Fuel (y compris rendement de chaudière)	1982 TEP	3525 TEP	6012 TEP
Electricité (y compris rendement de conversion fuel et perte en ligne)	1531 TEP	574 TEP	261 TEP
Géothermie	2597 TEP	1741 TEP	0
Economie de combustibles fossiles	2760 TEP	2175 TEP	0

Tableau III

C.O.P.	Coût de la Gcal en sortie condenseur (en F)					Coût de la Gcal en sortie chaudière (en F)		
	Prix moyen	H.P. <sup>1)</sup> hiver	H.C. <sup>2)</sup> hiver	H.P. été	H.C. été	F.O.D.	Fuel lourd	Prix moyen Creil
2	98,69	137	65	92,3	62,7	108	66	67
2,5	78,96	109,6	52	73,84	50,16	-	-	-
3	65,80	91,34	43,34	61,53	41,8	-	-	-
3,5	56,40	78,29	37,15	52,74	35,82	-	-	-
4	49,35	68,50	32,51	46,15	31,35	-	-	-
4,5	43,86	60,89	28,89	41,02	27,86	-	-	-
5	39,48	54,80	26	36,92	25,08	-	-	-
5,5	35,89	49,82	23,64	33,56	22,80	-	-	-
6	32,90	45,67	21,67	30,76	20,90	108	66	67

<sup>1)</sup> heures pleines    <sup>2)</sup> heures creuses

## 7. Conclusions

Le chauffage géothermique s'applique aux logements existants ou aux logements neufs à construire. L'emploi des pompes à chaleur permet à l'électricité de mieux rentabiliser le lourd investissement des forages et de prélever davantage de chaleur à la géothermie. Toutefois ce système de chauffage n'est envisageable que lorsqu'il s'applique à un nombre de logements suffisant, regroupés autour d'une chaufferie centrale et immédiatement disponibles.

# Essais d'utilisation des rejets thermiques des centrales électriques en France

Par P. Aussourd, R. Aureille et A. Muller-Feuga

*Die Electricité de France unternimmt Anstrengungen, die Abwärme in Form von warmem Wasser aus ihren Wärmekraftwerken auszuwerten. Damit soll einerseits hochwertige Energie bei der Heizung eingespart, andererseits das warme Wasser für neue Anwendungen in der Landwirtschaft und für die Fischzucht zur Steigerung der Produktivität eingesetzt werden.*

## 1. Conceptions étudiées

### 1.1 Agriculture

Trois procédés de chauffage des cultures sont évalués des points de vue thermique, agronomique et économique sur le site expérimental associé à la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux:

- le chauffage des serres par convecteurs,
- le chauffage des serres par ruissellement d'eau tiède sur la toiture,
- le chauffage des sols par circulation d'eau tiède dans des tuyaux enterrés.

En 1977, les convecteurs expérimentés ont permis de fournir 90 % de l'énergie de chauffage considérée comme normalement nécessaire pour une culture de tomates sous serre. De nouveaux convecteurs, moins onéreux et plus compatibles avec les contraintes d'exploitation, sont testés en 1978. Ils utilisent une eau de réfrigération en circuit fermé.

Le chauffage des serres par ruissellement s'est révélé une excellente formule même avec de l'eau de réfrigération en circuit ouvert.

Le chauffage du sol encore en cours d'évaluation paraît intéressant pour induire une précocité des cultures maraîchères de plein champ.

### 1.2 Aquaculture

Les essais d'élevage des animaux aquatiques d'intérêt commercial dans les eaux réchauffées par les centrales ont porté depuis 1975 sur deux activités bien distinctes:

- l'alevinage,
- le grossissement jusqu'à la taille commerciale.

Bien que les essais réalisés à Saint-Laurent-des-Eaux (Fig. 1) aient permis de produire 200 000 alevins de brochet en 1976 et 1977, cette activité s'est révélée peu adaptée à une utilisation des rejets thermiques en raison des faibles débits consommés

## Bibliographie

- [1] Publication E.d.F.: Le chauffage géothermique avec pompe à chaleur.
- [2] Résultats préliminaires concernant le fonctionnement de l'installation de chauffage géothermique de Creil.

## Adresse de l'auteur

R. Aureille, Chef de la Division «Techniques des énergies nouvelles» à la Direction des Etudes et Recherches, Electricité de France, 6, quai Watier, B.P. 24, F-78400 Chatou.

*Electricité de France tente de promouvoir l'utilisation de l'eau tiède produite par ses centrales. Cette utilisation est conçue comme un moyen de diminuer le recours aux énergies nobles dans les installations qui en font usage pour le chauffage, ainsi que d'améliorer la rentabilité économique de certaines opérations agricoles ou piscicoles jusqu'à ce jour non consommatrices d'énergie thermique.*

et de la grande stabilité des caractéristiques de l'eau qu'elle requiert. Il est apparu plus opportun de faire porter l'effort vers l'élevage intensif des espèces les plus chères jusqu'à la taille commerciale.

Des essais en ce sens ont déjà été réalisés à la centrale de Martignes-Ponteau pour le bar, la daurade et la crevette, à la centrale de Bordeaux-Ambes pour l'esturgeon et les carpes.

Une pisciculture industrielle d'anguille est en cours d'installation à Saint-Laurent-des-Eaux. Confiée à un professionnel, elle devrait permettre de définir les conditions de rentabilité économique de ce mode d'utilisation.

### 1.3 Chauffage des logements

Une étude a été effectuée dans le domaine du chauffage des logements en vue d'examiner la possibilité d'utiliser les eaux de rejet de la centrale nucléaire du Bugey pour chauffer des logements situés à l'Est de la ville de Lyon. Une partie de l'eau de refroidissement du condenseur était transportée à basse température et des pompes à chaleur placées près des



Fig. 1 Vue d'ensemble du site expérimental de Saint-Laurent-des-Eaux