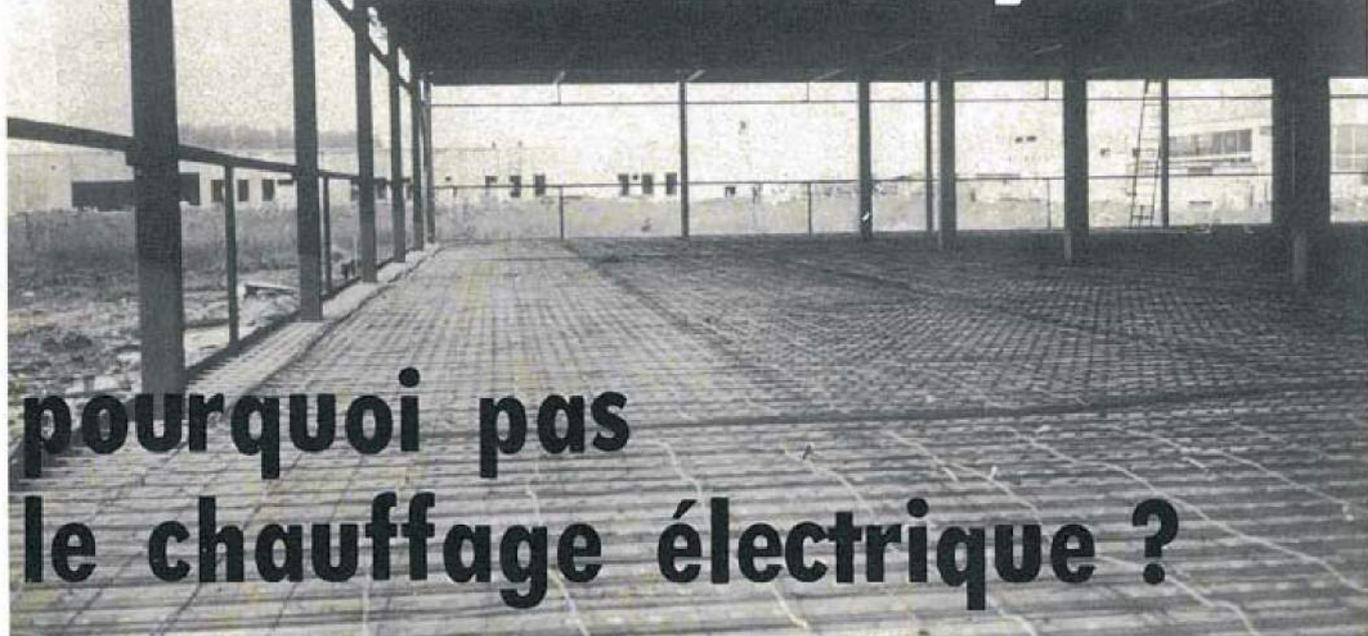


LOCAUX INDUSTRIELS



Pose d'un réseau de résistances avant coulage de la dalle du plancher chauffant. (Cliche EDF).

Si le chauffage électrique dans les locaux à usage d'habitation et de bureaux est aujourd'hui largement utilisé, il commence seulement à faire son apparition dans le domaine des locaux industriels. Du fait des différents avantages qu'il procure tant au point de vue de l'installation que de l'exploitation, il est appelé à se développer dans ce nouveau secteur du marché, d'autant que l'EDF vient de lancer une opération destinée à aider les industriels intéressés par cette forme de chauffage (*).

Chauffage sur mesure

Avant d'entrer dans les détails d'une installation de chauffage électrique appliquée aux locaux industriels, il nous semble opportun de souligner que ce type de réalisation nécessite impérativement une étude préalable ce qui est d'ailleurs valable pour les installations traditionnelles. Cette étude fait alors intervenir une somme de facteurs d'importance diverse.

En effet, suivant l'importance du bâtiment à chauffer, son degré d'isolation, son affectation, le type de machines abritées — celles-ci pouvant elles-mêmes émettre des calories — la densité et le degré d'activité de la main-d'œuvre, le nombre de portes donnant sur l'extérieur avec leur fréquence d'ouverture, l'installation sera conçue différemment.

De même, suivant la nature des fabri-

cations, certaines industries nécessitent peu ou pas de renouvellement d'air (industries « propres » n'émettant pas de poussières ou ne produisant pas de dégagement de produits de combustion, par exemple); d'autres, au contraire, doivent faire appel à de grands volumes d'air neuf.

Quoi qu'il en soit, il est important de relever que chauffer un atelier est généralement plus facile que chauffer un local à usage d'habitation, les exigences en matière d'isolation étant plus strictes, de beaucoup, pour ce dernier.

En effet, l'atelier doit simplement posséder une isolation en toiture, ce qui est en général réalisé quel que soit le mode de chauffage, pour éviter la chaleur excessive en été ($K \approx 1 \text{ W/m}^2/\text{C}$). De même, les murs seront isolés si le coefficient de transmission thermique K est supérieur à $2,5 \text{ W/m}^2/\text{C}$; les portes souvent ouvertes seront équipées de sas à l'aide de portes souples à lamelles ou à panneaux (fig. 1).

Pour les bureaux, le problème est ramené sensiblement à chauffer un logement: vitrages isolants, plafond isolant, etc. Enfin, il faut encore relever que les données que nous venons de citer sont évidemment différentes lorsqu'il s'agit d'un bâtiment à construire ou d'un bâtiment déjà existant.

Principe du chauffage

En ce qui concerne les locaux neufs, le système généralement retenu est mixte: chauffage de base par le sol et chauffage

de complément en direct par aérothermes ou convecteurs. Dans le cas où la température désirée est limitée autour de 15 C et où la constance de cette température n'est pas recherchée, il est intéressant d'utiliser un chauffage par le sol exclusivement (fig. 2).

Le chauffage de base par le sol est réalisé à partir d'un sol traditionnel sur terre-plein de 10 à 15 cm , avec feuille d'étanchéité (polyane), dans lequel un réseau de câbles résistants fixé à un treillis soudé, a été noyé dans les dalles au moment du coulage, ces dernières jouant alors le rôle d'accumulateurs de chaleur; un complément d'isolation est réalisé au pourtour du sol à l'aide de panneaux de polystyrène d'environ 80 cm de haut sur 4 cm d'épaisseur.

Deux types de câbles résistants sont actuellement utilisés pour ce mode de chauffage: l'un, le câble à isolant minéral est constitué par une âme chauffante noyée dans un isolant minéral (magnésie) protégé par une gaine de cuivre et une gaine de plastique; l'autre, se présente sous forme de barre en aluminium, gainée de plastique.

Le câble à isolant minéral est alimenté en 220 ou 380 V , alors que la barre d'aluminium l'est sous 48 V par un transformateur sec à enroulement de fil d'aluminium; quoi qu'il en soit, chaque élément a une puissance de l'ordre de 6 à 7 kW .

La puissance installée en direct correspond en fait au complément entre les apports calorifiques internes (machines) et les apports du chauffage par le sol. En effet, si les machines en présence



amènent par exemple + 6 C dans le local et le chauffage de base + 12 C, la température effective sera de 18 C. Lors de l'inoccupation des locaux, les samedis et dimanches, un complément de chauffage doit alors être envisagé par des aérothermes ou des convecteurs pour la remise en température du lundi.

Sur le plan technique, ce mode de chauffage représente la solution idéale aux problèmes de constance et d'homogénéité de température, car, d'une façon générale, les ateliers présentent une inertie calorifique importante et de plus, le sol agit 50 % par rayonnement et 50 % par convection.

Au point de vue du fonctionnement, le réseau de résistances est mis automatiquement sous tension, non seulement en fonction de la température régnant à l'intérieur du local, mais aussi en fonction de diverses périodes de la journée (heures creuses) pour profiter de la tarification la plus avantageuse.

Le câble atteint alors une température maximale de 35 C ; la température de surface au sol, qui ne dépasse pas alors 25 à 27 C, reste en-dessous des valeurs limites pour le confort des occupants.

Pendant les périodes les plus froides, la dalle n'est mise sous tension que vingt heures par jour, en dehors des heures de pointe.

La question se pose pour les locaux anciens. Le problème est souvent ramené au précédent lorsqu'il est possible de couler une dalle en béton sur le sol primaire. S'il n'en est pas ainsi, il faut alors faire appel à des radiateurs à accumulation.

Dans les locaux fortement ventilés, la technique classique consiste à récupérer les calories sur l'air vicié et à les rapporter sur l'air neuf à l'aide d'échangeurs de chaleur ; ce système permettant de minimiser les consommations d'énergie primaire.

Pourquoi le chauffage électrique ?

Le chauffage électrique présente un certain nombre d'avantages par rapport aux solutions traditionnelles depuis l'installation jusqu'à l'exploitation.

1. - **Simplicité d'installation** : L'énergie électrique étant toujours présente au sein d'une usine, il est logique de l'employer aussi pour le chauffage. En effet, une telle installation ne nécessite pas ou peu de gros travaux et surtout un investissement souvent inférieur à celui d'autres modes de chauffage pour des performances équivalentes ; de plus, l'absence de chaufferie entraîne une économie de place et d'argent. Mentionnons également que la fiabilité du matériel électrique est telle que la fréquence de renouvellement est extrêmement faible ; il est donc aisé de calculer la durée et le taux d'amortissement d'une installation, afin qu'elle s'intègre au mieux dans la politique financière de l'entreprise.

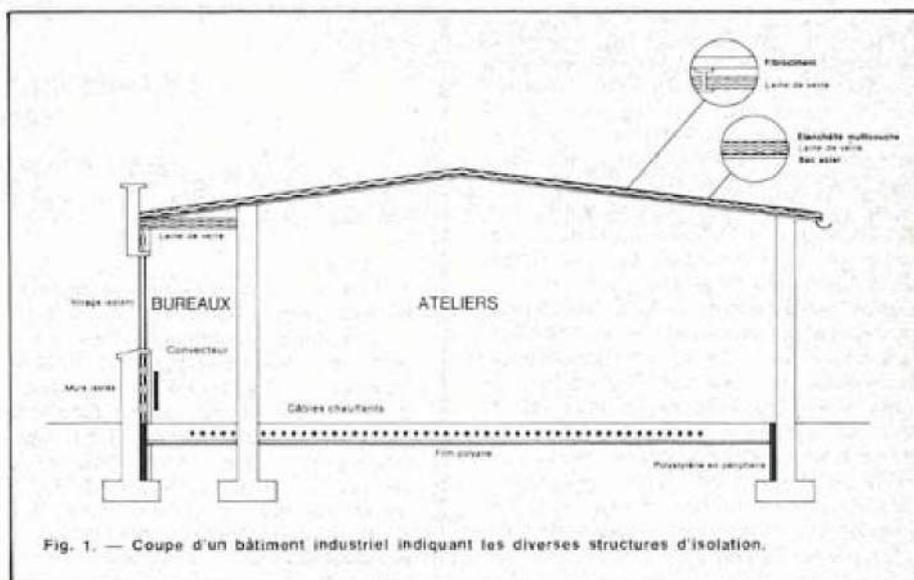


Fig. 1. — Coupe d'un bâtiment industriel indiquant les diverses structures d'isolation.

2. - **Facteur de confort et de sécurité** : Si économie et confort sont généralement contradictoires, il n'en est pas de même pour le chauffage électrique. En effet, ce mode de chauffage se prête aux asservissements les plus divers (supprimant

toute intervention nouvelle) en fonction de l'activité qui règne dans les locaux, du temps d'occupation de ces locaux, des calories dégagées par les machines en présence, des variations de températures extérieures, etc. De ce fait, la tempéra-

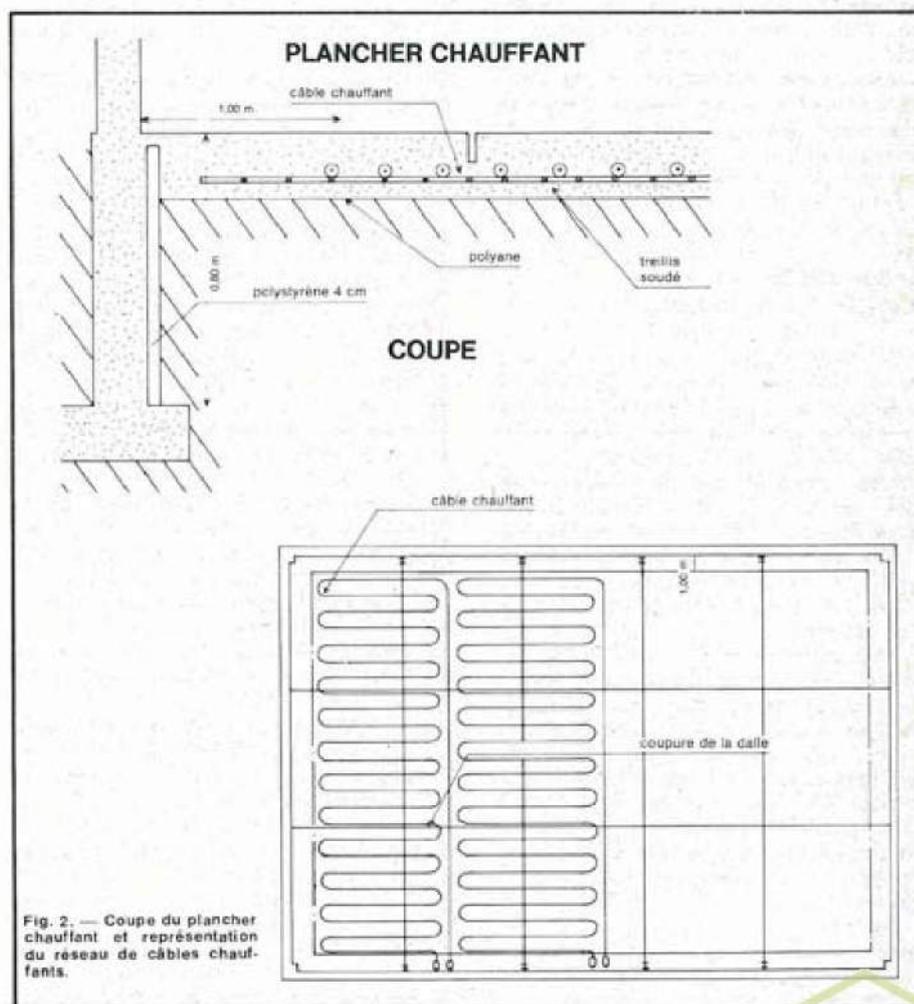


Fig. 2. — Coupe du plancher chauffant et représentation du réseau de câbles chauffants.

ture est constamment homogène avec utilisation minimale d'énergie ; il a d'ailleurs été montré que le confort obtenu entraîne des gains de rendement, une amélioration de la rentabilité et même une réduction sensible de l'absentéisme. De même, un réglage indépendant permet des températures variables dans les locaux d'activités différentes. En outre, l'absence de fumées, poussières ou salissures se révèle particulièrement précieuse pour certaines industries utilisant des techniques de production très élaborées là où les conditions de fabrication imposent de très faibles mouvements d'air. Du fait de l'absence de combustion, le chauffage électrique présente une sécurité quasi-absolue et ne nécessite aucune surveillance. Cette sécurité se manifeste également au niveau des nuisances, puisqu'une telle installation fonctionne sans aucun dégagement de produits nocifs, donc sans risque de pollution atmosphérique.

3. - **Exploitation économique** : La multiplication des sources d'énergie dans une usine crée des problèmes économiques au niveau du ravitaillement, de la sécurité, etc. Le fait de n'utiliser qu'une seule énergie — l'électricité — réduit considérablement les tâches de gestion administrative (un seul contrat de fourniture, un seul suivi de facturation, relations avec un seul fournisseur). Par ailleurs, alors que dans le cas de solutions traditionnelles, l'industriel doit faire face à de nombreux problèmes d'entretien — nettoyage de chaudières, ramonage des cheminées, détartrage des canalisations, etc. — la solution électrique se traduit pratiquement par la disparition de toutes ces servitudes.

Action d'EDF dans le milieu industriel

Le milieu industriel étant fort peu pénétré par l'énergie électrique appliquée au chauffage de ce type de locaux, Electricité de France a décidé d'entreprendre une action pour percer sur ce marché.

C'est pourquoi, ses services commerciaux se sont mis à la disposition des industriels pour les aider à résoudre les problèmes qui se posent à eux dans le cadre de l'aménagement d'ouvrages nouveaux ou de modifications d'installations existantes.

Pour cette opération « Chauffage électrique des locaux industriels » comme dans les autres domaines, EDF a mis en place un réseau d'ingénieurs chargés localement des relations avec la clientèle industrielle, lesquels sont aptes à conseiller tout industriel et ses divers partenaires et à guider leur choix en fonction de l'ensemble des critères techniques et économiques intervenant dans les solutions étudiées.

En outre, ces ingénieurs sont aidés dans leur tâche par des équipes de spécialistes capables de les assister pour les problèmes les plus complexes.

UN INDUSTRIEL et UN ARCHITECTE SATISFAITS

grâce au chauffage électrique

Bien qu'il n'ait pas encore pénétré en force dans les milieux industriels, le chauffage électrique a néanmoins déjà fait des conquêtes. Et à titre d'exemple nous reprendrons ici quelques extraits d'une conférence prononcée lors du colloque « Chauffage électrique et mieux être », qui avait eu lieu les 29 et 30 novembre 1973. Rappelons que ce colloque avait été organisé par le Comité Français d'Electrothermie.

Lors de cette intervention, il avait été question de la construction d'une usine pour le compte de la société Hydroperfect International (fabricant de composants hydrostatiques pour pompes et moteurs hydrauliques).

A l'origine, il était prévu que le mode de chauffage serait du type « fuel air pulsé » ; mais, au cours de la construction, les Etablissements Morel, appuyés par l'EDF, proposèrent une solution de chauffage tout-électrique.

Les arguments présentés triomphèrent des premières réserves de l'architecte, M. Titeux. En effet, l'expérience du chauffage électrique n'avait alors guère dépassé le domaine de l'habitat (nous sommes en mars 1972) et les problèmes semblaient très différents (volumes nettement plus considérables, différence de nature des enveloppes, la solution « bardage » ayant été retenue dans le cas de l'usine). L'étude très poussée qui fut remise reposait sur les principes suivants :

— Un réseau de résistances électriques noyées dans les dalles de béton armé assurait une température de base de 10 à 12 °C ;

— Une batterie de résistances placée dans le circuit d'air neuf, avec thermostat d'ambiance, complétait jusqu'à 20 °C la température des locaux ;

— Un échangeur thermique « Economique » transférait les calories à l'air neuf aspiré, de façon à éviter les fuites de calories dues au rejet de l'air vicié.

L'étude était complétée par un bilan prévisionnel d'exploitation, par une proposition du coût de l'installation et du renforcement de l'isolation.

L'ensemble soutenait la comparaison avec les modes de chauffage classique et présentait en outre l'avantage de s'adapter parfaitement aux impératifs spécifiques de l'usine (constance de la température, absence de

pollution, entretien réduit, automatisation).

A ces avantages qui séduisaient M. Laumont, Directeur Général de Hydroperfect, l'architecte, M. Titeux, en ajoutaient d'autres :

- Source unique d'énergie ;
- Gain d'espace par suppression de la chaufferie et des ventilations de toute nature ;
- Economie du coût de construction ;
- Rapidité et simplicité d'exécution.

Les dernières réticences disparaissant, le chauffage électrique fut adopté et la solution préconisée fut retenue. Il restait toutefois un problème essentiel à résoudre : celui de l'isolation.

Rappelons en effet que l'usine était déjà en construction.

Le bardage préalablement choisi et composé d'une enveloppe métallique avec interposition de mousse de polyuréthane de 4 cm d'épaisseur répondait aux exigences du chauffagiste. Mais il a fallu renforcer l'isolation de la couverture et protéger le sous-sol semi-enterré par des panneaux de polystyrène. Par ailleurs, il était nécessaire d'éviter les ponts thermiques importants (ce qui fut fait en désolidarisant les dalles de béton et les façades), de doubler les portes métalliques ainsi que les parties translucides et enfin il a fallu créer des sas aux entrées du bâtiment.

Cet ensemble de précautions représentait un investissement raisonnable, de l'ordre de 6 % du coût total de la construction seule, y compris la surpuissance du transformateur qui, de 250 kVA, avait été portée à 650 kVA (avec 20 % de réserve).

Le chauffage électrique adopté dans son principe, quelques difficultés particulières se manifestèrent à la réalisation. Et M. Titeux de faire remarquer : « Dans le domaine pratique, des mises au point et des recommandations réitérées ont été nécessaires sur le chantier. Il m'a fallu constater que, dans cette sorte de réalisation, l'électricien a un rôle essentiel qui n'est pas toujours compris par les autres corps de métier, habitués à le considérer comme secondaire et qu'il devient l'interlocuteur prépondérant de l'architecte ».

Les électriciens étant gens modestes, nous tairons les compliments que leur décernent MM. Laumont et Titeux.



LA POMPE A CHALEUR

un moyen efficace de réaliser d'importantes économies d'énergie dans le domaine du chauffage

A quelque chose, malheur est bon... La crise de l'énergie aura permis à toutes sortes de techniques nouvelles de sortir des cartons où les avait maintenues la longue stagnation des prix pétroliers. L'une de ces techniques est la pompe à chaleur qui extrait la chaleur d'une source froide et la restitue, à température plus élevée, à l'intérieur du local. Chauffer des habitations (immeubles et pavillons), chauffer des serres pour l'agriculture, récupérer les rejets thermiques des centrales électriques et les valoriser... l'emploi de la pompe à chaleur est, de tous les procédés de chauffage, le plus économique.

C'est Lord Kelvin qui, le premier, décrit en 1842 l'utilisation de pompes à chaleur comme moyen de chauffage. Mais il fallut attendre 1927 pour que soit érigée, en Ecosse, la première installation utilisant cette technique.

Avant la guerre, les premières installations de pompes à chaleur n'assuraient que le chauffage ; mais depuis quelques années, de nombreuses réalisations comportant la production de chaud et de froid ont été effectuées, soit pour la climatisation (siège de l'ORTF à Paris, immeubles de bureaux comme le Palais des Congrès de Strasbourg, tout récemment le théâtre Daunou à Paris), soit pour des utilisations industrielles (traitement du bois, du lait, etc.).

Compresseurs, échangeurs, détendeurs ou... le réfrigérateur chauffant

Une pompe à chaleur est une machine qui permet, grâce à un apport de travail, de prélever des calories à une source froide pour les restituer à une température supérieure au milieu à chauffer, le travail étant lui-même converti en chaleur. C'est en fait une simple application du principe de Carnot.

En effet, on sait que l'on peut faire fonctionner, entre deux sources à tempé-

rature différente, deux types de machines :

— L'un emprunte de la chaleur à une source chaude et en restitue une partie à une source froide en produisant un travail mécanique. C'est le cas des moteurs thermiques comme les moteurs Diesel ou les machines à vapeur.

— L'autre type de machine consomme un travail mécanique W pour emprunter une quantité de chaleur Q_F à une source froide et fournir Q_C calories à une source chaude. C'est une pompe à chaleur dont le diagramme $p = f(V)$ tourne dans le sens inverse du cycle de Carnot habituel (fig. 1).

D'après le premier principe de la thermodynamique, on a :

$$Q_F + W = Q_C$$

D'après le second principe, pour une machine réversible, on a :

$$\frac{Q_C}{T_C} = \frac{Q_F}{T_F}$$

avec T_C et T_F , températures des sources chaude et froide.

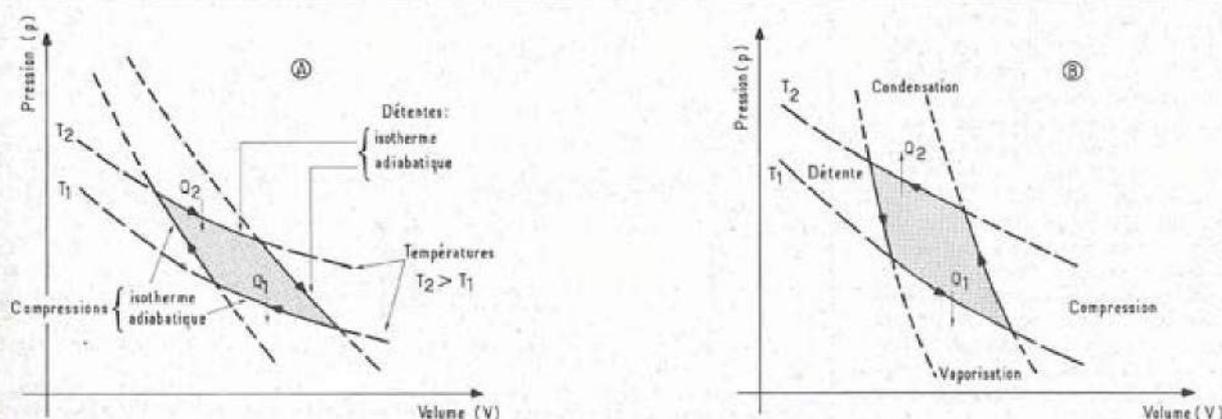


Fig. 1. — Cycles de Carnot pour une machine thermique (A) et une pompe à chaleur (B). Dans le premier cas, la surface en gris correspond à un travail mécanique fourni par la machine qui exploite la différence de température entre une source froide et une source chaude. Dans le diagramme de la pompe à chaleur, la surface en gris correspond à une dépense de travail. De plus, le diagramme se décrit dans le sens contraire du précédent. Au cours de la phase de vaporisation, la chaleur Q_1 est enlevée à la source froide (dans le diagramme A, c'est le fluide qui cède une quantité de chaleur Q_1 à la source froide) ; au cours de la phase de condensation, une quantité de chaleur Q_2 est cédée à la source chaude.

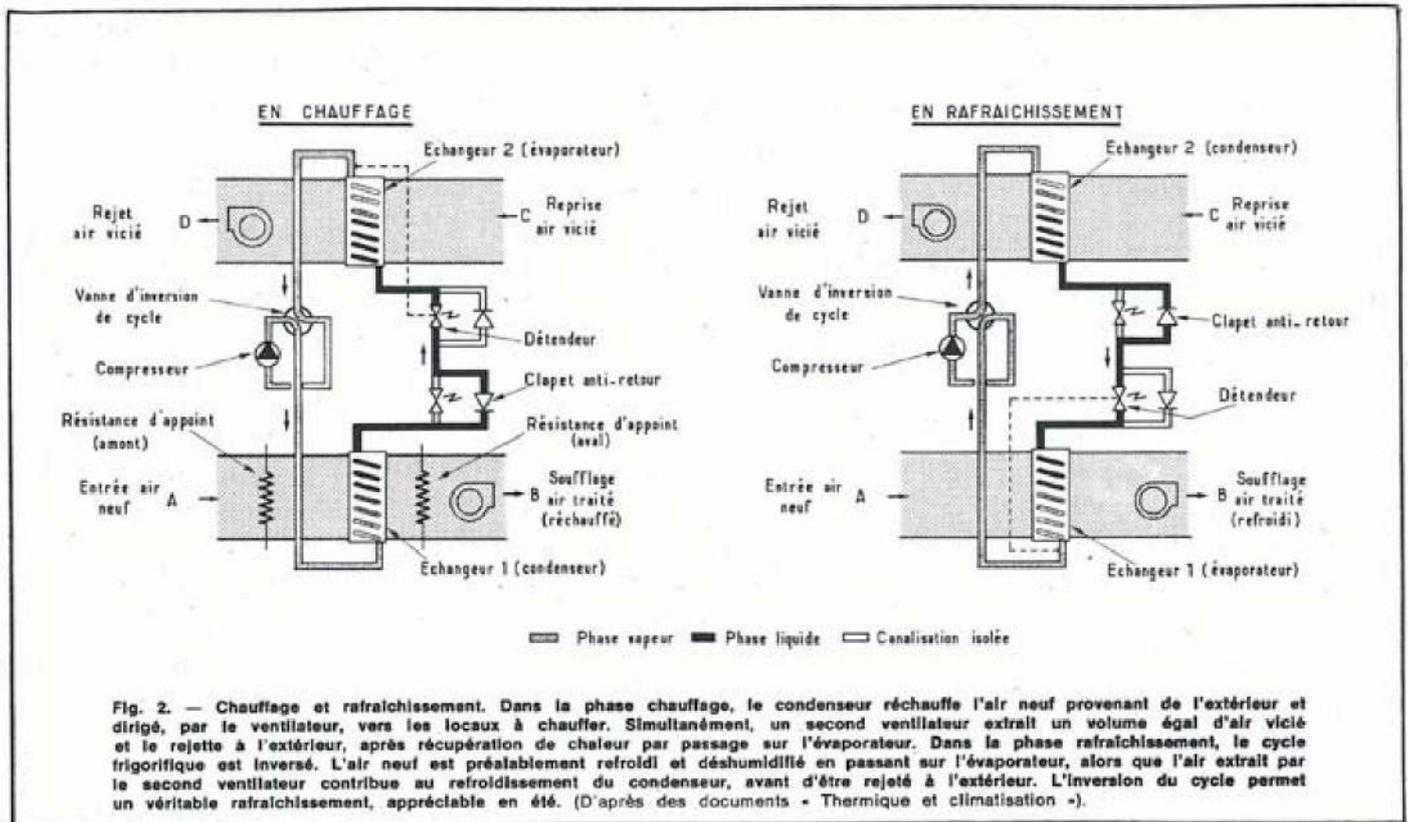


Fig. 2. — Chauffage et rafraîchissement. Dans la phase chauffage, le condenseur réchauffe l'air neuf provenant de l'extérieur et dirigé, par le ventilateur, vers les locaux à chauffer. Simultanément, un second ventilateur extrait un volume égal d'air vicié et le rejette à l'extérieur, après récupération de chaleur par passage sur l'évaporateur. Dans la phase rafraîchissement, le cycle frigorifique est inversé. L'air neuf est préalablement refroidi et déshumidifié en passant sur l'évaporateur, alors que l'air extrait par le second ventilateur contribue au refroidissement du condenseur, avant d'être rejeté à l'extérieur. L'inversion du cycle permet un véritable rafraîchissement, appréciable en été. (D'après des documents « Thermique et climatisation »).

On en déduit deux coefficients de performance, suivant que l'on utilise des frigorifiques ou des calories :

$$C_C = \frac{Q_C}{W} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

$$C_F = \frac{Q_F}{W} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Pour des machines fonctionnant au voisinage de la température ambiante, et pour un écart de température de 40 °C, ces coefficients théoriques sont voisins de 7. En réalité, du fait des irréversibilités et des pertes, on doit escompter des valeurs de 3 à 4 seulement. Ainsi, 1 kW.h absorbé par la machine, qui fournirait 860 kcal en chauffage direct par effet Joule, peut donc en fournir 2580 environ en employant une pompe à chaleur.

La pompe à chaleur se compose essentiellement d'un circuit comprenant un compresseur, des échangeurs (un évaporateur et un condenseur) et un dispositif de détente dans lesquels circule un fluide, généralement du fréon, qui assure les échanges thermiques par changement d'état au voisinage de la température ambiante. C'est en quelque sorte le groupe frigorifique à compression équipant les réfrigérateurs domestiques, lesquels dégagent de la chaleur à l'extérieur de l'armoire (fig. 2).

Le compresseur élève la pression, donc la température du fréon ; celui-ci se liquéfie dans le condenseur en cédant des calories. Ensuite, un détendeur abaisse la pression du liquide, ce qui se traduit par une diminution de la température. Le fréon

liquéfié se vaporise enfin dans un évaporateur avant de retourner au compresseur. Le principe de fonctionnement est analogue à celui des réfrigérateurs do-

mestiques qui prélèvent des calories dans l'armoire par l'intermédiaire de l'évaporateur et les restituent grâce au condenseur, situé à l'extérieur de l'armoire, avec

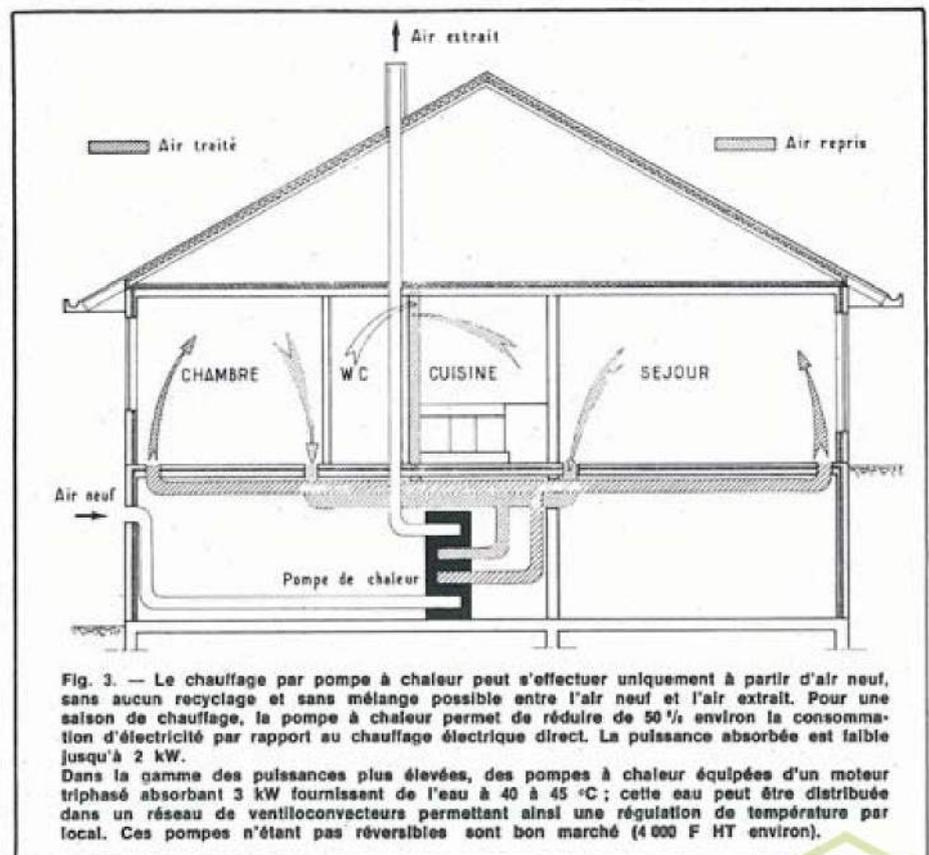


Fig. 3. — Le chauffage par pompe à chaleur peut s'effectuer uniquement à partir d'air neuf, sans aucun recyclage et sans mélange possible entre l'air neuf et l'air extrait. Pour une saison de chauffage, la pompe à chaleur permet de réduire de 50 % environ la consommation d'électricité par rapport au chauffage électrique direct. La puissance absorbée est faible jusqu'à 2 kW. Dans la gamme des puissances plus élevées, des pompes à chaleur équipées d'un moteur triphasé absorbant 3 kW fournissent de l'eau à 40 à 45 °C ; cette eau peut être distribuée dans un réseau de ventiloconvecteurs permettant ainsi une régulation de température par local. Ces pompes n'étant pas réversibles sont bon marché (4 000 F HT environ).

une température supérieure à l'ambiante. De même, les climatiseurs abaissent l'air intérieur d'un appartement en échauffant l'air extérieur.

Actuellement, toutes les installations en service posent, comme postulat, que la pompe à chaleur doit être utilisée pour la climatisation intégrale : chauffage en hiver, refroidissement en été. Cette double fonction des installations les rendent complexes, du fait de l'inversion du cycle, et non-optimisées, un bon évaporateur n'étant pas forcément un bon condenseur.

La pompe à chaleur est-elle vraiment économique ?

En dépit des réserves précédentes, le transfert de chaleur est extrêmement économique en énergie puisqu'il faut, dans la plupart des cas, trois ou quatre fois moins de kWh pour transférer de la chaleur que pour la produire dans une résistance électrique.

Pour évaluer l'intérêt économique des pompes à chaleur dans l'habitat, il faut prendre en considération les dépenses d'investissement ainsi que les charges d'exploitation.

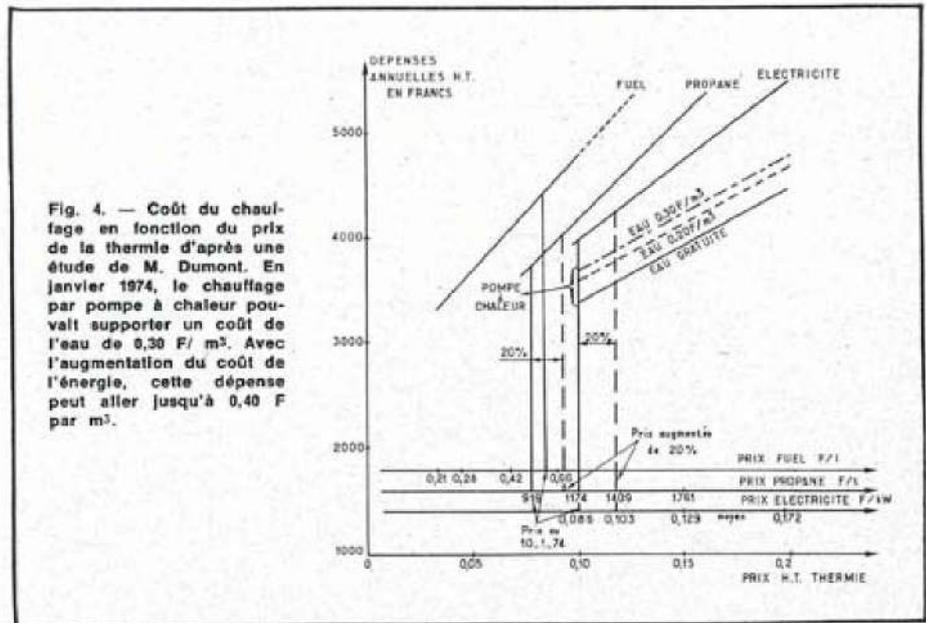
M. Dumont, au service des transferts thermiques du CEA, a comparé les dépenses de chauffage pour une maison individuelle de 104 m²; quatre types de chauffage ont été pris en considération :

- Chauffage central au fuel domestique (usages domestiques à l'électricité);
- Chauffage central au propane (usages domestiques à l'électricité);
- Chauffage tout électrique;
- Chauffage par pompe à chaleur.

Pour cette comparaison, la température intérieure du pavillon est maintenue à 20 °C par une circulation d'eau chaude alors que la température extérieure minimale peut être de - 10 °C.

Il s'avère que le chauffage par pompes à chaleur est compétitif avec les autres modes de chauffage, à condition que le coût de l'eau industrielle n'excède pas 0,40 F/m³ au lieu d'utilisation (fig. 4). Dans ces conditions, le chauffage de l'habitat par pompes à chaleur se révèle non seulement rentable, mais il correspond à une économie d'énergie primaire puisque la puissance électrique consommée est au plus égale au tiers de la puissance thermique installée, l'efficacité du système étant supérieure, ou égale, à trois. De nombreuses autres études ont été réalisées afin d'analyser la rentabilité du chauffage par pompe à chaleur, dans des immeubles d'habitation ou de bureaux, ainsi que dans des hôpitaux, hôtels et autres bâtiments publics.

Ainsi, la pompe à chaleur a été choisie pour la climatisation du Théâtre Daunou : la climatisation d'un théâtre (455 personnes) pose des problèmes, en raison de la forte occupation (donc de l'important volume d'air frais), des dégagements calorifiques provenant de l'éclairage de la



salle, des projecteurs et des occupations, enfin de la grande hauteur des locaux, qui favorise une stratification de l'air et un échauffement important en partie haute. La solution qui a été proposée est différente des procédés courants : l'air est soufflé sous les sièges des spectateurs à basse vitesse, puis repris, en partie haute de la salle, sans aucun recyclage. Par ce principe, les balcons sont à la même température que l'orchestre et la mise en régime de la salle est rapide.

De plus, une partie de la reprise effectuée en zone haute de la scène permet de faire profiter les acteurs de la climatisation du théâtre, ce qu'ils apprécient particulièrement, étant eux-mêmes soumis au rayonnement des projecteurs et de la rampe.

La production calorifique est obtenue essentiellement à partir de trois pompes à chaleur ; ces machines permettent une récupération de la chaleur contenue dans l'air rejeté, qui est à 35 °C environ, été comme hiver. En été, par inversion de cycle, elles permettent une production frigorifique suffisante pour maintenir le théâtre à 24 °C.

Un système anti-pollution

D'une manière générale, l'utilisation de l'eau comme source de calories (cours d'eau, nappe phréatique, lac, mer, eau de rejet des centrales électriques) permet, à très bas coût, de relever le niveau thermique des calories disponibles sur les lieux mêmes de leur utilisation.

Le chauffage par pompe à chaleur utilisant les basses calories des eaux de rejet permettrait de contribuer à la lutte contre la pollution atmosphérique. En effet, le chauffage par combustion est responsable de 60 % de la pollution atmosphérique des villes.

Dans un autre domaine, un groupe de travail récemment constitué étudie la récupération d'énergie à partir des rejets thermiques des centrales nucléaires (voir notre numéro de juin, page 188). Ces rejets pourraient constituer une ressource considérable puisque le rendement d'une centrale nucléaire n'est que de 30 à 35 % et que l'on évacue, au condenseur, une puissance environ double de la puissance prise par les turbines. Ainsi,

COMPARAISON DES COÛTS DES DIVERS MODES DE CHAUFFAGE D'UN PAVILLON

Dépenses annuelles (en francs)	Chauffage fuel	Chauffage propane	Chauffage électrique	Chauffage pompe à chaleur (coefficient d'efficacité : 3)
Investissement	1462,5	1111,5	994,5	1368,9
Isolation	323,1	417,6	508,0	508,0
Vitrage isolant	0	0	241,0	241,0
Approvisionnement	726,8	1138,8	915,1	305
Entretien	250	100	0	0
Abonnement électrique	124,8	124,8	726	165,8
Fonctionnement appareils électro-ménagers	437,4	437,4	274,8	476,2
Eau chaude	264,8	429	336	336
Total	3588,6	3759,1	3997,4	3400,9

Les coûts indiqués sont établis hors taxes et l'amortissement du matériel est calculé sur vingt ans à un taux d'intérêt de 10 %.

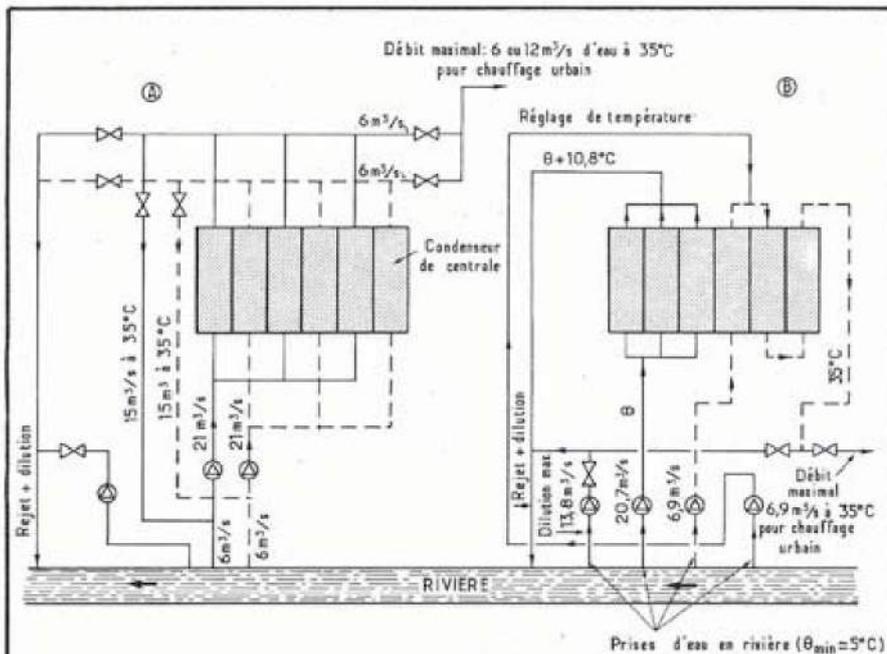


Fig. 5. — Maintien d'une température minimale de 35 °C en aval d'un condenseur par recirculation (A) ou d'un condenseur multipression (B) d'une centrale de 325 MWe pour chauffage urbain. On obtient des débits importants (6 m³/s) à des températures pouvant être maintenues à 35 °C, voire 45 °C. Dans le premier cas, ce système est coûteux, la perte de puissance étant de 14 MWe si l'eau est réchauffée à 35 °C et 38 MWe si elle l'est à 45 °C. Dans le second cas, le condenseur cloisonné, reçoit six échappements différents des turbines. Quatre éléments côté eau sont parcourus en série par 7 m³/s d'eau entrant à 5 °C et sortant à 35 ou 45 °C. La perte de puissance est de 5,4 MWe pour de l'eau produite à 35 °C.

avec un rendement moyen de 32 %, les nouvelles centrales devront éliminer 1 900 MW thermiques pour une tranche produisant 900 MW électriques.

Les coefficients de performance sont bien entendu directement liés au rendement thermodynamique η de la centrale. En effet, on se souvient que celui-ci est le rapport du travail W fourni aux turbi-

nes par l'énergie Q perdue dans l'eau primaire entre la sortie et le retour au réacteur.

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{W}{Q_c + W}$$

où Q_c est essentiellement constitué par la chaleur perdue par le circuit primaire dans le condenseur.

DES ECHANGES ET DES FLUIDES

Les pompes à chaleur sont caractérisées par la nature du fluide de transfert et le type d'échange.

Pour le fluide de transfert, deux seulement sont utilisés : l'ammoniac pour les grosses puissances et le fréon.

Pour le type d'échange, on peut utiliser les échanges air/air, air/eau, eau/air et eau/eau : la source chaude peut être l'air ambiant ou l'eau ; il en est de même de la source froide.

L'échange air/air présente l'avantage d'une source chaude gratuite (l'air ambiant). La distribution de chaleur se fait par un réseau de soufflage d'air chaud. La température de l'air, en sortie de condenseur, peut atteindre 50 °C. Son utilisation,

dans les stations de montagne, paraît difficile : en effet, le taux de compression du fluide de travail est fixe et le relèvement thermique est alors insuffisant.

L'échange air/eau est possible mais requiert des surfaces d'échange importantes.

L'échange eau/air présente l'avantage de ne pas être affecté par des conditions externes. Ce procédé nécessite l'utilisation d'eau en quantités suffisantes et à une température de quelques degrés.

Enfin, l'échange eau/eau a donné lieu à des matériels standardisés. Ce type d'appareil a une efficacité quasi constante et souvent élevée. De plus, il est parfaitement adaptable aux immeubles de bureaux.

On a donc :

$$Q_c = W \frac{1 - \eta}{\eta}$$

ce qui nous permet de dresser le tableau suivant :

η	0,28	0,30	0,32	0,34	0,35
Q_c / W	2,55	2,33	2,12	1,94	1,85

L'énergie disponible étant à basse température, pour être utilisable, le niveau thermique devrait être relevé : des pompes à chaleur peuvent donc être utilisées. Leurs évaporateurs seraient refroidis par l'eau froide ou tiède de la centrale.

Une température élevée serait favorable car les coefficients de performance des pompes sont alors meilleurs ; mais le rendement de la centrale en serait pénalisé. Cependant, il est possible d'élever la température de l'eau en centrale, à l'aval des condenseurs, à une valeur constante, soit en recyclant l'eau, soit au moyen d'un condenseur multipression.

On peut aussi envisager de ne réchauffer que le seul débit utilisé pour les pompes à chaleur, grâce à un échange vapeur-eau alimenté par soutirage de vapeur sur turbine. Ce dispositif conduit à un montant d'investissement et d'exploitation plus réduit que dans les deux solutions précédentes.

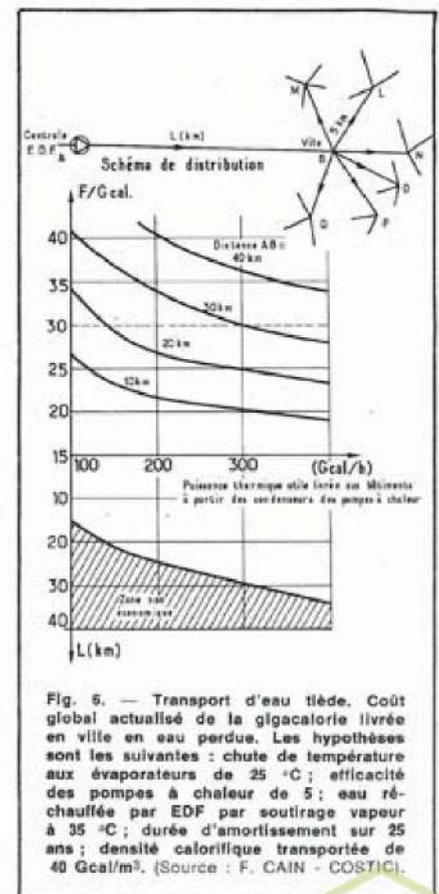


Fig. 6. — Transport d'eau tiède. Coût global actualisé de la gigacalorie livrée en ville en eau perdue. Les hypothèses sont les suivantes : chute de température aux évaporateurs de 25 °C ; efficacité des pompes à chaleur de 5 ; eau réchauffée par EDF par soutirage vapeur à 35 °C ; durée d'amortissement sur 25 ans ; densité calorifique transportée de 40 Gcal/m³. (Source : F. CAIN - COSTIC).

Disposant ainsi d'une eau tiède (35 °C), il faut normalement remonter la température des pompes à chaleur. Suivant ce niveau de température, on peut envisager :

- L'alimentation de radiateurs et de sanitaires à 75 °C ;
- L'utilisation de radiateurs de grande surface à 60 °C ;
- Le chauffage par rayonnement, ventiloconvecteurs ou air pulsé à 50 °C ;
- Le chauffage de base par rayonnement à 40 °C.

Des emplois agricoles également

Parmi les applications de la pompe à chaleur, une des plus prometteuses est le chauffage de serres pour l'agriculture.

Le chauffage représentait, en juillet 1973, 37 % environ des coûts de production. Sur les 1 200 ha de serres qui existaient en France, en 1970, environ les 2/3 étaient chauffées et le mode de chauffage le plus utilisé était la chaudière au fuel. Pour diminuer le coût du chauffage, il est intéressant, lorsqu'on dispose d'eau comme source de calories, de remplacer la chaudière au fuel par une pompe à chaleur entraînée par moteur électrique ou par moteur Diesel.

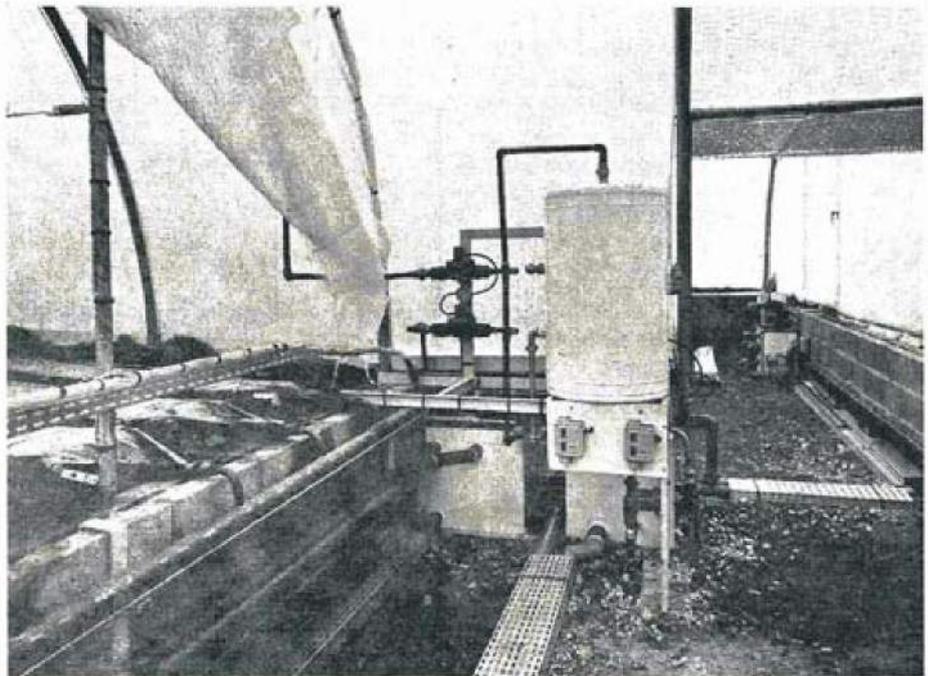
L'EAU, SOURCE DE CALORIES

Les nappes phréatiques constituent de gigantesques collecteurs solaires, associés à un stockage de chaleur. Leur température, en France, est sensiblement constante, et pratiquement voisine de la température moyenne annuelle au niveau du sol (entre 10 et 15 °C). Le prélèvement d'eau dans une nappe peut être compensé par sa ré-injection en aval.

L'eau des rivières est difficilement exploitable, sauf en présence d'importants rejets thermiques : en effet, à cause de l'évaporation, la rivière se met très rapidement en équilibre avec l'atmosphère.

L'eau de lac, par contre, peut être intéressante : il est possible de prélever l'eau à une profondeur suffisante pour atteindre son maximum de densité à 4 °C. Toutefois, l'efficacité est moindre que dans le cas des nappes phréatiques qui sont plus chaudes.

Enfin, l'utilisation de l'eau de mer comme source de calories peut s'envisager dans les zones côtières, mais il faut pomper l'eau à une profondeur suffisamment grande, afin d'avoir une température relativement stable (4 °C en mer du Nord, 11 °C en Méditerranée).



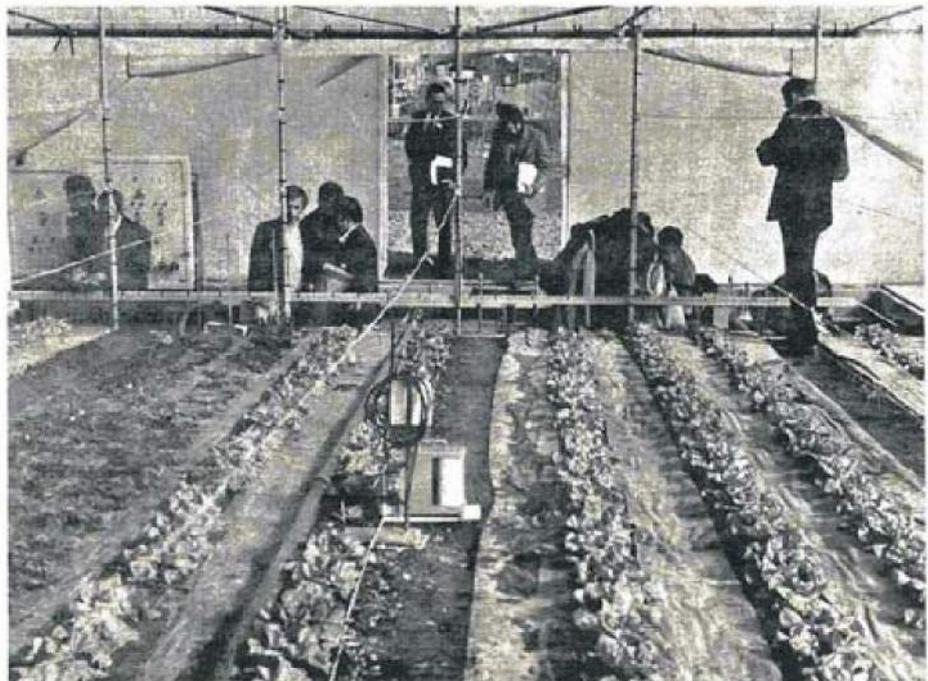
Chauffage de serres par pompe à chaleur. On l'aperçoit au fond, à droite. (Cliché CENG).

Si l'on compare le chauffage au fuel d'une serre de 2 500 m², avec le chauffage par pompe à chaleur, entraînée par moteur Diesel, on obtient une consommation annuelle de 63,8 t de fuel pour le chauffage au fuel, et de 25,2 t de fuel pour le chauffage par pompe à chaleur, soit une économie de 38,6 t/an de fuel.

L'investissement est plus élevé, mais l'abaissement très net de la consommation fait que l'on aboutit, à partir d'un certain niveau de prix, à une économie d'autant plus substantielle que le prix du fuel est élevé.

Actuellement, la compétitivité est atteinte avec un coût de fuel de 417 F/tonne. Les dernières hausses sur le fuel domestique ont fait passer le prix du litre : plus de 0,52 F soit 604 F/tonne. Le chauffage classique par combustion n'est plus rentable pour la plupart des cultures en serre.

Afin de montrer l'intérêt du procédé, deux serres de démonstration (une serre sèche et une serre humide) ont été réalisées au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble. Les cultures expérimentales concernent en particulier les laitues, les



Culture de laitues en serre sèche. L'eau chaude circule en film mince fermé à même le sol, en bandes parallèles. (Cliché CENG).

fraisiers, les philodendrons ainsi que des boutures de pommiers, pêchers et autres cultures nouvelles dont l'introduction complètera la gamme des fruits vendus sur le marché français.

Le chauffage est réalisé à partir de deux pompes à chaleur montées en parallèle, dont la source de calories est, pour commencer, l'eau de la nappe phréatique. Ultérieurement, l'eau de rejet du réacteur Siloé sera exploitée. La puissance absorbée est égale à 6,7 kW et l'efficacité théorique est 3,83.

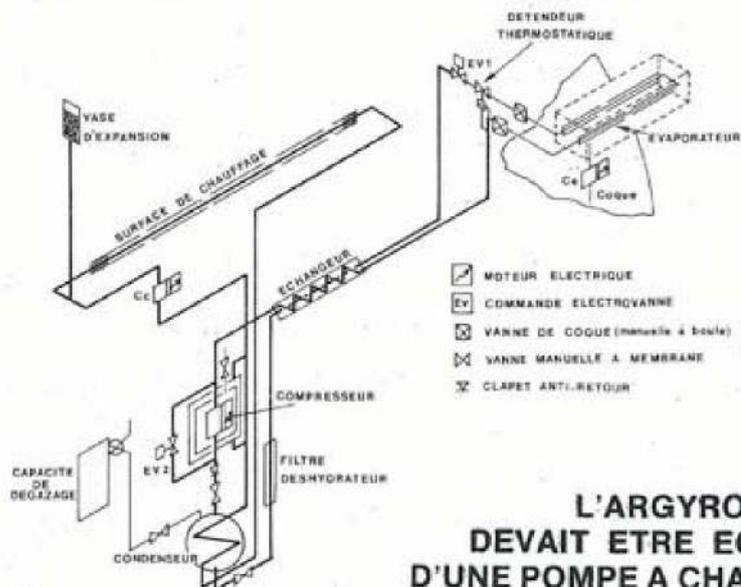
Le chauffage des serres s'effectue par circulation de l'eau à l'intérieur de gaines fermées disposées sur le sol pour les serres dites « sèches » et dans des gaines ouvertes pour les serres dites « humides ». Avec une température de -11°C , la température intérieure a été maintenue à $+9^{\circ}\text{C}$ avec une eau circulant à 33°C .

La promotion de telles serres est en cours et des licences ont été concédées. Une serre de $2\,500\text{ m}^2$, installée près de Nîmes, est équipée d'un tel matériel et d'autres serres de même importance pourraient être très bientôt pourvues de semblables pompes à chaleur puisque leur commercialisation est d'ores et déjà assurée en France.

Marc FERRETTI

BIBLIOGRAPHIE

- *Chauffage de l'Argyronète par pompe à chaleur*, par C. Chevrier, A. Gouzy, P. Lavigne et R. Martin. — BIST, n° 164 (novembre 1971).
- *Chauffage de serres par pompe à chaleur*, par M. Dumont. — Note CEA-CENG/TT n° 452 (septembre 1973).
- *Comparaison des coûts de divers modes de chauffage d'un pavillon*, par M. Dumont. — Note CEA-CENG/TT n° 451 (octobre 1973).
- *Pompe à chaleur à inverseur de flux frigorifique — Système J. Bruguière*, par M. J. Bruguière et M. A. Dussert. — Colloque « Chauffage électrique et mieux-être » (novembre 1973).
- *Quelques réalisations tout-électrique*, par M. Catherineau, R. Fourel, R. Guérin, M. Villaume. — Colloque « Chauffage électrique et mieux-être » (novembre 1973).
- *Chauffage de serres par pompes à chaleur*, par A. Fourcy, M. Dumont, M. De Cachard, A. Gouzy, A. Freychet. — Note CEA-CENG/TT n° 457 (février 1974).
- *Le chauffage électronucléaire*, par F. Cain. — Promoclima (mai 1974).
- *La pompe à chaleur et ses applications*, par M. De Cachard. — Exposé fait au Congrès ANROC à Bordeaux (mai 1974).



L'ARGYRONÈTE DEVAIT ÊTRE ÉQUIPÉ D'UNE POMPE À CHALEUR

L'Argyronète était ce projet de sous-marin-maison-sous-la-mer, étudié voici quelques années, avant d'être abandonné.

Dans le projet initial de l'Argyronète, une partie importante de l'énergie stockée était destinée au chauffage du submersible, et particulièrement au chauffage de la maison-sous-la-mer, dans laquelle on ne trouve pratiquement pas de dissipation d'appareils divers, et, où l'on a une température élevée en milieu très conducteur (hélium essentiellement). Il est apparu alors, que l'énergie stockée étant sous forme noble, et une source froide (la mer) facile à exploiter environnant le submersible, on se trouvait dans les conditions idéales d'utilisation de pompes à chaleur. Celles-ci devaient diminuer la masse affectée au chauffage d'un facteur situé entre 3 et 4. L'étude de l'installation de pompes à chaleur fut confiée au CEA.

L'installation de chauffage de l'Argyronète comprenait deux installations distinctes, l'une pour le sous-marin, l'autre pour la maison-sous-la-mer, comportant chacune une pompe à chaleur, et un système de répartition de chaleur dans l'habitable concerné, grâce à une circulation d'eau dans des convecteurs.

Le groupe de pompes à chaleur était constitué par un circuit de fréon 22, comportant un évaporateur plongé dans la mer et parcouru par une circulation d'eau provoquée par un circulateur immergé; un échangeur permettant à la vapeur de se réchauffer avant d'atteindre le compresseur en refroidissant le liquide avant sa détente; un compresseur étanche; un clapet anti-retour évitant, lors des arrêts de

la pompe à chaleur, un écoulement du fréon de la haute vers la basse pression à travers le compresseur; un condenseur parcouru par la plus grande partie de la circulation d'eau de chauffage.

Dans l'évaporateur, le fréon bout à pression constante et prend ainsi la chaleur q à la circulation d'eau de mer qui l'entoure.

Le compresseur absorbe l'énergie électrique W et donne à l'eau de chauffage la chaleur Q' . La vapeur de fréon est comprimée à une pression fixée par la tension de vapeur dans le condenseur.

Dans le condenseur, où la vapeur se surchauffe avant de se condenser, celle-ci donne à l'eau de réchauffage la chaleur Q'' .

Une vanne thermostatique permet au fréon liquide de se détendre isenthalpiquement jusqu'à la pression de l'évaporateur. L'efficacité de la pompe est :

$$E = \frac{Q' + Q''}{W} = 1 + \frac{q}{W}$$

Les calculs d'avant-projet, vérifiés par l'expérience sur prototype, ont permis de définir une pompe à chaleur qui, fournissant sa puissance à un débit de $1,4\text{ m}^3/\text{h}$ d'eau à 50°C , ne voit pas son évaporateur prendre en glace lorsqu'il est parcouru par un débit de $2,2\text{ m}^3/\text{h}$ d'eau de mer à 0°C ; de plus son efficacité brute instantanée est comprise entre 3 et 4,5 et sa puissance thermique est située entre 3 et 4 kW pour des températures de mer comprises entre 0 et 15°C .

Les études entreprises actuellement par le CEA, sur le chauffage de serres par pompe à chaleur, constituent la première retombée industrielle du projet Argyronète.