Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 71 (1945)
Heft: 1

Artikel: La pompe thermique et ses applications pour le chauffage
Autor: Marples, D.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-54077

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.08.2025

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

71e année — 6 janvier 1945 — N° 1

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 13.50 francs
Etranger : 16 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 11 francs
Etranger : 13.50 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. Epitaux, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. Calame, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg :* MM. L. Hertling, architecte ; P. Joye, professeur ; *Vaud :* MM. F. Chenaux, ingénieur ; E. Elskes, ingénieur ; E. Jost, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte ; *Genève :* MM. L. Archinard, ingénieur ; E. Martin, architecte ; E. Odier, architecte ; *Neuchâtel :* MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye, ingénieur ; A. Méan, ingénieur ; *Valais :* M. J. Dubuis, ingénieur ; A. de Kalbermatten, architecte.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur, Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Publicité :
TARIF DES ANNONCES
Le millimètre (larg. 47 mm.) 20 cts.
Tarif spécial pour fractions de pages.
En plus 20 % de majoration de guerre.
Rabais pour annonces répétées.
ANNONCES-SUISSES S. A.
5, Rue Centrale,
LAUSANNE
& Succursales.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. Stucky, ingénieur, président ; M. Bridel ; G. Epitaux, architecte.

SOMMAIRE : *La pompe thermique et ses applications pour le chauffage*, par M. D. Marples, ingénieur. — *Les concours de la captivité.* — *L'esthétique architecturale contemporaine*, par Henry Poitier. — Divers : *Un grand pas vers la réalisation de l'accumulation de la Basse-Gruyère.* — Carnet des concours. — Service de placement. — Documentation.

La pompe thermique et ses applications pour le chauffage

par M. D. MARPLES, ingénieur [1].

Nous voulons tout d'abord rappeler les principes de fonctionnement d'une pompe thermique, et examiner ensuite à quelles applications elle peut convenir.

Une pompe thermique est une machine qui emprunte de la chaleur à une basse température, qu'elle cède ensuite à une température plus élevée. Nous pouvons donc dire par analogie qu'elle pompe de la chaleur d'un niveau de température inférieur à un niveau supérieur, d'où sa désignation pompe thermique. Ce pompage de la chaleur exige un travail mécanique, qui pour une puissance de chauffe donnée, croît lorsque le palier des températures à surmonter devient plus grand.

Une pompe thermique peut donc servir indifféremment au chauffage ou au refroidissement. Dans le premier cas, qui nous intéresse surtout ce soir, c'est la chaleur cédée à une température élevée qui est utilisée pour le chauffage, tandis que la chaleur à basse température est empruntée le plus souvent à l'ambiance. Avec une machine frigorifique par contre, la chaleur à basse température est empruntée du milieu qu'il s'agit de refroidir et la chaleur à une température plus élevée est cédée à l'ambiance.

Je m'en vais vous montrer à l'aide de quelques exemples très simples comment fonctionne une pompe thermique. Puisque nous sommes à Genève, il est naturel d'envisager l'eau du Rhône comme source de chaleur (fig. 1). Supposons qu'elle a une température de 5° C, et que nous voulons fournir de la chaleur à un réseau de chauffage marchant à des températures de 50 à 60° C.

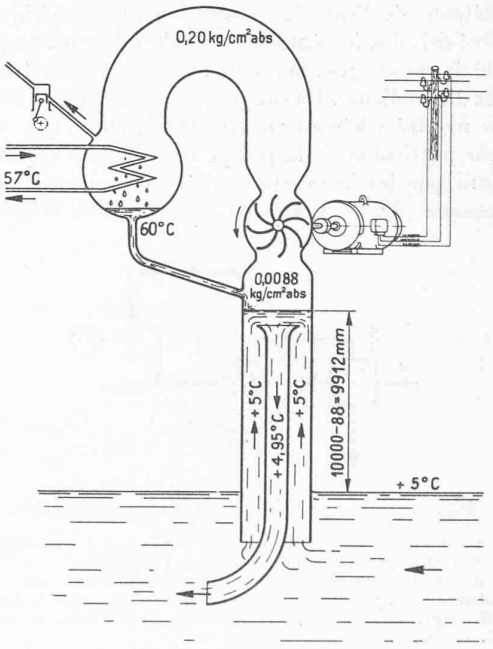

Fig. 1. — Schéma d'une installation simplifiée de pompe thermique utilisant directement la chaleur du Rhône.

Pour soustraire de la chaleur de l'eau du Rhône, provoquons son ébullition. Pour cela, il faudra abaisser sa pression ; l'eau à 5° C bout sous une pression de 0,0088 ata, 592 kcal étant nécessaires pour évaporer un kilo d'eau. Comme montré à la figure 1, nous pouvons obtenir cette pression à l'aide d'une colonne barométrique de 9912 mm de hauteur, la pres-

[1] Texte d'une conférence faite devant la section genevoise de la *Société suisse des Ingénieurs et des Architectes*, à Genève, le 2 novembre 1944.

sion atmosphérique étant supposée égale à 10 000 mm de colonne d'eau.

L'eau à 5° C va bouillir au sommet de la colonne, la chaleur nécessaire étant fournie par l'eau restant à l'état liquide. Cette dernière va se refroidir, et deviendra plus pesante, de sorte qu'un thermo-syphon suffit pour assurer le renouvellement continu de l'eau, et, par là, le maintien de sa température à 5° C environ.

La vapeur dégagée par l'eau en ébullition est aspirée au fur et à mesure qu'elle se forme par un compresseur entraîné par un moteur qui la comprime à une pression de 0,20 ata par exemple. A cette pression, l'eau se liquéfie à une température de 60° C. Il suffit donc de prévoir une surface ayant une température légèrement inférieure à 60° C, pour provoquer la condensation. Cette eau, en se condensant, va céder sa chaleur latente de liquéfaction aux parois de la surface refroidissante, la quantité de chaleur transmise étant égale à celle empruntée au Rhône, plus l'équivalent thermique de l'énergie absorbée par le compresseur. Si nous faisons circuler de l'eau d'un système de chauffage ayant une température inférieure à 60° C de l'autre côté de cette surface, elle absorbera cette chaleur, ce qui provoquera son réchauffement.

Une installation semblable à celle que je viens de décrire, bien qu'en apparence très simple, présente certains inconvénients, empêchant sa réalisation pratique. Le défaut le plus grave est dû au vide très élevé nécessaire pour provoquer l'ébullition. Le volume spécifique de la vapeur dégagée est aussi démesurément grand, 1 kg de vapeur occupant 147 m³. Il en résulte des tuyauteries et un compresseur de très fortes dimensions, dont le prix est excessif.

La détente de l'eau de la pression atmosphérique à un vide élevé entraîne le dégagement de l'air dissous. La pression partielle de cet air gêne le fonctionnement, et son évacuation est assez dispendieuse. Un compresseur auxiliaire pour évacuer l'air est montré schématiquement sur le cliché (fig. 1).

Un cas particulier de la pompe thermique à vapeur d'eau est fourni par les installations d'évaporation avec thermo-compresseurs (fig. 2). Les inconvénients dûs à la basse tem-

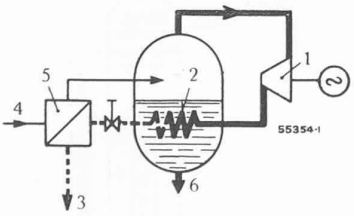

Fig. 2. — Evaporation par thermo-compression.

1 = Compresseur de vapeur
2 = Elément de chauffe
3 = Eau condensée
4 = Solution à concentrer
5 = Réchauffeur
6 = Solution concentrée

La différence de température entre le point d'ébullition et la température de chauffe et par suite la puissance électrique sont réduites en augmentant la surface de chauffe.

pérature n'existent plus, puisque c'est la vapeur dégagée par la solution en ébullition qui sert comme source de chaleur. Suivant les produits traités, l'ébullition s'effectue à des températures se trouvant entre 45 et 120° C environ, c'est-à-dire la vapeur aspirée par le thermo-compresseur se trouve sous des pressions approximativement entre 0,1 et 1,25 ata.

La vapeur d'eau dégagée par une solution à concentrer en ébullition dans l'évaporateur 2 est aspirée par le compresseur 1, et refoulée de l'autre côté des tubes de l'évaporateur. La pression de refoulement du compresseur est choisie de

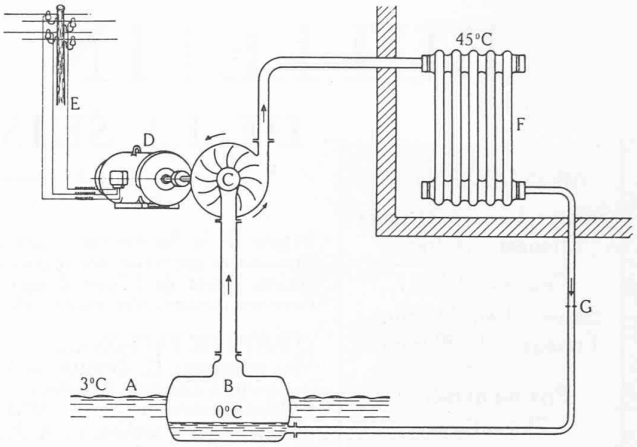

Fig. 3. — Schéma simplifié d'une pompe thermique à agent auxiliaire.

A = Source de chaleur (rivière). — *B* = Evaporateur. — *C* = Turbo-compresseur. — *D* = Moteur électrique. — *E* = Réseau électrique. — *F* = Corps de chauffe et condenseur. — *G* = Organe d'étranglement.

façon que la température de liquéfaction de la vapeur suffise pour maintenir l'ébullition. Il faut aussi que l'équivalent thermique du travail absorbé par le compresseur suffise pour couvrir les pertes de chaleur dues au rayonnement, chaleur emportée par l'eau condensée, etc. Pour diminuer cette dernière l'on prévoit souvent un échangeur de chaleur 4 pour réchauffer la solution brute à l'aide de l'eau condensée quittant l'évaporateur. Les thermo-compresseurs assurent une marche très économique des installations de ce genre, car ils permettent de récupérer la chaleur latente de vaporisation. Ils constituent une des applications les plus intéressantes de la pompe thermique, les premières installations ayant été réalisées dans la deuxième moitié du siècle passé par l'ingénieur Picard. Mentionnons à ce propos l'installation d'évaporation des Salines de Bex qui marche toujours.

Revenons maintenant aux pompes thermiques pour le chauffage proprement dit. Pour éviter les inconvénients de l'eau lorsque la source de chaleur a une température relativement basse, l'on a recours à un agent auxiliaire (fig. 3) ayant des propriétés physiques convenant au compresseur. Le plus connu de ces agents est l'amoniaque, mais les dérivés halogénés des hydrocarbures, grâce à leurs avantages, se répandent de plus en plus. Nous pouvons mentionner le chlorure de méthylène (CH_2Cl_2) et le fréon 11 ($CFCl_3$) et le fréon 12 (CF_2Cl_2). Le manque de temps m'empêche malheureusement d'entrer davantage dans des détails concernant ces agents.

Nous avons dans le récipient *B*, dénommé évaporateur, un liquide auxiliaire en ébullition, par exemple du fréon 11. Le compresseur aspire la vapeur dégagée au fur et à mesure qu'elle se forme, et maintient ainsi la pression à 0,4 ata environ, correspondant à une température d'ébullition de 0° C. L'eau du Rhône entourant l'évaporateur se trouve à une température plus élevée, à savoir 3° C, et fournit la chaleur nécessaire pour maintenir le fréon 11 en ébullition.

Le compresseur comprime la vapeur à une pression telle qu'elle se liquéfie dans un échangeur de chaleur *F*, dénommé condenseur, et cède sa chaleur au corps de chauffe. Le liquide qui se forme retourne ensuite à l'évaporateur, sa pression étant réduite par une chicane.

Ce diagramme entropique (fig. 4) vous montre le fonctionnement d'une pompe thermique utilisant du fréon 11

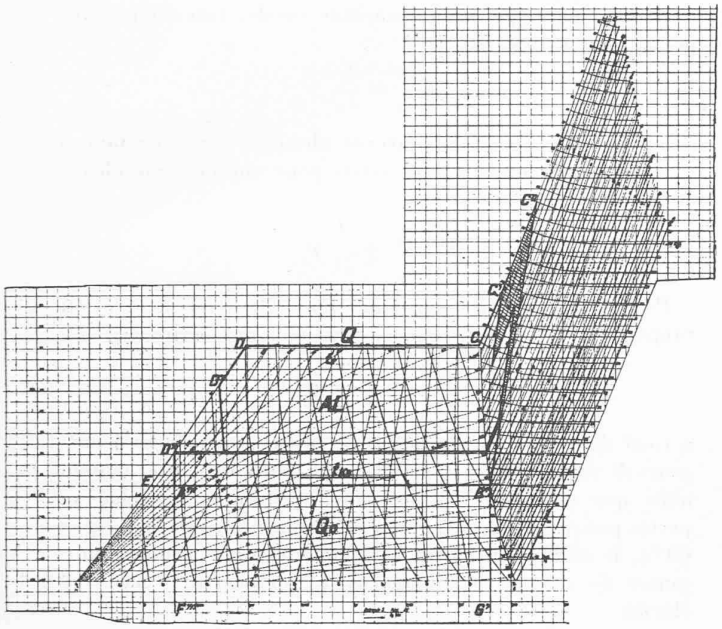

Fig. 4. — Diagramme entropique pour le fréon 11 montrant le fonctionnement d'une pompe thermique.

Température d'évaporation	5° C
Température de la source de chaleur	8,98° C
Température de liquéfaction	71,4° C
Température d'arrivée de l'eau de chauffage	45,2° C
Température de départ de l'eau de chauffage	69,5° C

$B'\ C''$ = Compression sans refroidissement intermédiaire
$B'\ C'$ = Compression avec refroidissement intermédiaire
$C\ D$ = Liquéfaction
DD' = Sous-refroidissement
D'' = Etat après prise de vapeur intermédiaire.

comme agent auxiliaire. L'évaporation se fait le long de la ligne $E\ B'$ à une température de + 5° C, la pression correspondante étant de 0,5 ata. La source de chaleur, représentée par 1200 m³/h d'eau de rivière à 8,98° C, est refroidie par l'évaporation du fréon 11 à 8,26° C.

La température de liquéfaction est de 71,4° C, ce qui permet de chauffer 52 m³/h d'eau de 45,2 à 69,5° C. La pression de liquéfaction est de 4,5 ata.

Le compresseur de la pompe thermique doit donc comprimer de la vapeur de fréon 11 de 0,5 à 4,0 ata. La ligne $B'\ C''$ montre une compression sans refroidissement intermédiaire. Cependant, un meilleur rendement peut être réalisé en refroidissant les gaz au fur et à mesure qu'ils sont comprimés. Par exemple, pour ne pas perdre de la chaleur, nous pouvons prévoir un réfrigérant intermédiaire alimenté par l'eau à 45,2° C revenant du réseau de chauffage. Nous obtenons ainsi la ligne de compression $B' - C'$, et une diminution de la puissance absorbée par le compresseur de l'ordre de 6 %.

La liquéfaction du fréon s'effectue le long de la ligne $C - D$, le point D correspondant à la liquéfaction complète. Il s'agit maintenant d'étrangler le liquide et de réduire sa pression et température à celle de l'évaporateur. Cette détente se fera le long d'une ligne de chaleur totale constante qui peut partir du point D par exemple. L'abaissement de la température de 71,4 à 5° C provoquera la réévaporation d'une partie du liquide, de sorte que, une fois la détente accomplie, nous aurons environ 70 % à l'état liquide et 30 % à l'état de vapeur. Or, cette vapeur ne nous est pas utile pour enlever la chaleur de la source de chaleur, et l'on cherche à réduire son pourcentage par différents artifices. Un moyen très simple consiste à sous-refroidir le liquide de D à D' à l'aide de l'eau à 45,2° C revenant du réseau de chauffage. De cette façon, nous abaissons la température du liquide avant la détente de 71,4 à 52,5° C et par là, le pourcentage de vapeur dégagé de 30 à 23 %.

Un autre artifice consiste à fractionner la détente, et à retourner la vapeur dégagée à des étages intermédiaires du compresseur, afin de diminuer le travail de recompression de la vapeur libérée lors de la détente. Pour l'étage intermédiaire envisagé (point D'') environ 15 ³/₄ % du liquide s'est transformé en vapeur, qui est renvoyée dans un étage intermédiaire du compresseur. Là, elle est comprimée de 0,95 à 4,5 ata, tandis que s'il n'y avait pas une prise de vapeur intermédiaire, elle aurait dû être comprimée de 0,5 à 4,5 ata. De cette façon, nous pouvons par des moyens relativement simples réduire encore le travail de compression de plusieurs pourcents. Le liquide restant est ensuite détendu de D' à la pression régnant dans l'évaporateur. La quantité de fréon 11 détendue restant liquide est ainsi portée à 93 % environ de la quantité passant à travers le deuxième étage de détente.

La figure 5 vous montre schématiquement la réalisation d'une pompe thermique conformément aux principes que nous venons de décrire.

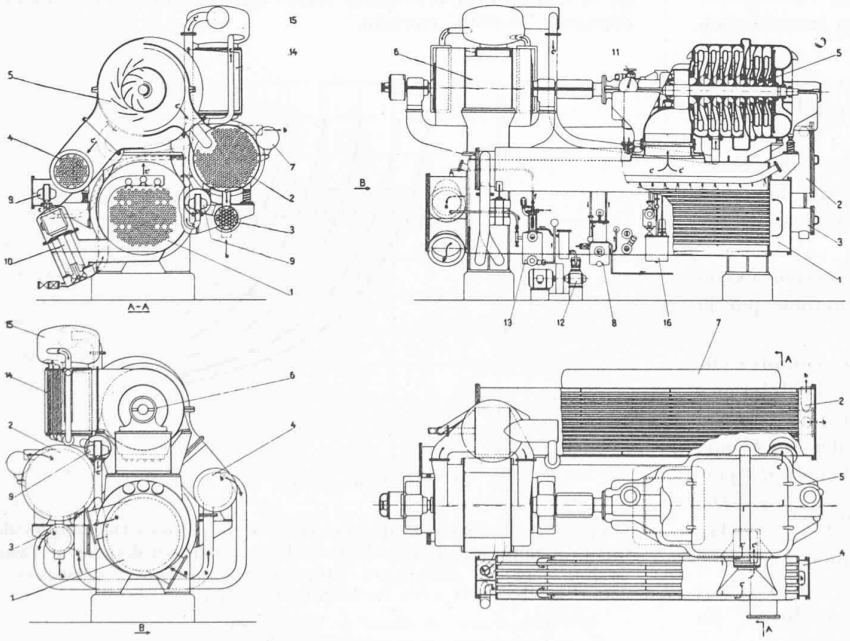

Fig. 5. — Coupes d'un thermobloc Brown Boveri.

1 = Evaporateur. — 2 = Condenseur. — 3 = Sous-refroidisseur. — 4 = Réfrigérant intermédiaire. — 5 = Compresseur centrifuge. — 6 = Moteur d'entraînement. — 7 = Collecteur d'air. — 8 = Séparateur d'eau et d'air. — 9 = Soupape à flotteur. — 10 = Pompe de ruissellement. — 11 = Commande du clapet d'étranglement du compresseur. — 12 = Pompe à vide. — 13 = Récipient et réfrigérant reliés à 12. — 14 = Réfrigérant par circuit fermé de l'air de ventilation du moteur d'entraînement. — 15 = Récupérateur. — 16 = Récipient et pompe d'huile de la boîte étanche. — a = Eau froide. — b = Eau chaude. — c = Agent auxiliaire (liquide). — c' = Agent auxiliaire (gazeux).

1 représente l'évaporateur à travers les tubes duquel circule l'eau qui cède sa chaleur à l'agent auxiliaire en ébullition. Les vapeurs sont aspirées par le turbo-compresseur 5, entraîné par un moteur électrique 6. Après avoir été partiellement comprimée, la vapeur entre dans le réfrigérant intermédiaire 4, où elle est refroidie par l'eau revenant du réseau de chauffage, à laquelle elle cède la plus grande partie de sa chaleur de surchauffe. Puis la compression s'achève dans les trois étages restants du compresseur.

La vapeur comprimée pénètre maintennat dans le condenseur 2, où elle cède sa chaleur à l'eau de chauffage parcourant un faisceau tubulaire et se liquéfie. Le liquide s'écoule par la pesanteur dans le sous-refroidisseur 3, où il est refroidi par l'eau revenant du réseau de chauffage. Une première soupape à flotteur 9 (à droite de la coupe A—A) détend le liquide à une pression intermédiaire, et les vapeurs dégagées par suite du refroidissement du liquide sont aspirées dans un étage intermédiaire du compresseur.

L'air de ventilation du moteur, qui emporte sous forme de chaleur à une température de 40° C environ les pertes du moteur, parcourt un circuit fermé dans lequel il est refroidi dans le réfrigérant 14 par l'agent se trouvant à la pression intermédiaire. Les pertes du moteur sont donc converties en chaleur utile sous des conditions aussi favorables que possible.

Le liquide restant traverse une deuxième soupape à flotteur 9 (à gauche de la coupe A—A), qui le détend à la pression de l'évaporateur.

Nous avons ainsi complété le circuit de l'agent. Toutefois, il y a encore une ou deux particularités constructives que je m'en vais vous signaler.

Tout d'abord, à cause des pressions relativement basses de l'agent, l'évaporateur n'est pas rempli de liquide. Une pompe auxiliaire 10 assure au moyen de tubes perforés à la partie supérieure de l'évaporateur le ruissellement de l'agent liquide sur les tubes de celui-ci. De cette façon, l'on obtient des conditions extrêmement favorables pour la transmission de chaleur.

Une partie du système se trouvant sous un vide, il convient d'éliminer l'air avant d'introduire l'agent. Pour cela, il a été prévu une petite pompe à vide, 12.

Le plus grand soin a été voué à l'obtention d'une étanchéité parfaite. Les joints qui n'ont plus besoin d'être démontés sont soudés et la boîte étanche du turbo-compresseur est scellée hermétiquement avec de l'huile.

Vous relèverez que nous avons une construction extrêmement compacte, qui a été dénommée thermobloc par la société Brown Boveri.

Nous avons vu que le travail absorbé par le compresseur devient proportionnellement plus élevé lorsque la différence de température devant être produite devient plus grande. Un critère très utile des conditions sous lesquelles fonctionne une pompe thermique est donné par le coefficient de performance, qui est égal, par définition, au rapport $\epsilon = \frac{Q}{AL}$, Q désignant la puissance de chauffe de la pompe thermique et AL l'équivalent thermique de la puissance absorbée par le compresseur. Il y a évidemment intérêt d'obtenir un coefficient de performance aussi élevé que possible.

L'équivalent thermique du travail absorbé par le compresseur est égal à la différence entre la puissance de chauffe Q et la quantité de chaleur Q_o cédée par la source de chaleur. Nous pouvons donc écrire

$$\epsilon = \frac{Q}{Q - Q_o}$$

D'autre part, pour une machine idéale, travaillant sans perte, nous avons

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{T}{T_o}$$

T et T_o étant les températures absolues correspondant à Q et Q_o. Nous pouvons donc écrire pour une machine idéale, sans perte :

$$\epsilon_{th} = \frac{T}{T - T_o}$$

Pour une machine quelconque ayant un rendement η par rapport à une machine idéale, nous pouvons écrire :

$$\epsilon = \eta \frac{T}{T - T}$$

η tient donc compte des pertes à travers les surfaces échangeurs de chaleur, des imperfections du compresseur et moteur ainsi que de l'agent utilisé pour transmettre la chaleur, pertes par rayonnement, etc. Pratiquement, μ est égal à 50 à 60 %, le chiffre supérieur s'appliquant à des grandes puissances de chauffe et différences de températures pas trop élevées.

Ce diagramme (fig. 6) vous montre les variations du coefficient de performance effectif d'une pompe thermique de forte capacité rapportée à la puissance absorbée aux bornes du moteur, et à la température de départ de l'eau chaude.

Dans certains cas, l'on dispose pour la source de chaleur de l'eau ayant une température relativement élevée. Toutefois, une pareille source de chaleur n'est intéressante qu'à condition d'être disponible en quantité suffisante (figures 7-10).

Nous pouvons maintenant énoncer quelles conditions doivent être remplies pour qu'il vaille la peine d'installer une pompe thermique :

1. La différence entre température de chauffage et celle de la source doit être aussi faible que possible et ne saurait dépasser 70-80° C environ.

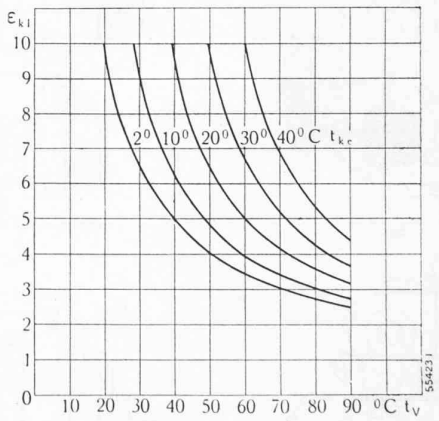

Fig. 6. — Coefficients de performance de pompes thermiques de forte capacité pour le chauffage de l'eau lorsqu'on dispose de l'eau de l'ambiance à différentes températures (pompes thermiques à agent auxiliaire et avec turbo-compresseur).

t_v = Température de départ de l'eau chaude.
t_{ke} = Température de la source de chaleur.
ϵ_{kl} = Coefficient de performance de la pompe thermique rapporté aux bornes du moteur d'entraînement (pour explications voir texte, rendement global η = 60 %).

Le diagramme permet de déterminer le coefficient de performance ϵ_{kl} pour une température de départ donnée et pour différentes températures t_{ke} de la source de chaleur. Pour d'autres rendements globaux, il y a lieu d'apporter une correction correspondante.

Un coefficient de performance de 6,0 par exemple veut dire qu'à une dépense d'énergie de 1 kWh correspond une quantité de chaleur de 5160 kcal, c'est-à-dire 6 fois les 860 kcal qui sont obtenus par chauffage direct.

Autrement dit, le coefficient de performance doit être aussi élevé que possible, et ne saurait descendre beaucoup au-dessous de 3.

2. La puissance de chauffe doit être suffisante pour justifier les dépenses pour œuvres d'art, telles que fouilles, canalisations, prise d'eau, etc., dont le prix ne saurait être comprimé au-dessous d'un certain minimum.

Ce minimum dépend aussi de la construction envisagée pour le compresseur de la pompe thermique, les turbocompresseurs par exemple conviennent à des débits relativement élevés, et entrent par conséquent en considération pour des puissances de chauffe dépassant 200 000 à 250 000 kcal/h environ.

3. La pompe thermique doit se trouver à proximité de la source et des consommateurs de chaleur. Des conduites trop longues deviennent rapidement trop coûteuses et compromettent la rentabilité de toute l'installation.

4. La pompe thermique ayant un prix d'achat relativement élevé et par contre des dépenses d'exploitation favorables, il convient de lui assurer un degré d'utilisation suffisant. Le cas idéal serait évidemment d'avoir un chauffage constant et ininterrompu pendant toute l'année.

5. L'énergie pour entraîner la pompe thermique doit être à un prix abordable.

Pour le chauffage d'immeubles, par exemple, il faut que la période moyenne de chauffage par hiver atteigne au minimum 180 à 200 jours. En outre, pour conditions climatériques suisses, la pompe thermique sera dimensionnée suivant les conditions locales pour une charge de base de 30 à 42 % environ de la puissance de chauffe installée, et une température normale de chauffe d'environ 60° C. De cette façon, la pompe thermique fournit environ 90 % de la consommation totale de chaleur par hiver, les 10 % correspondant aux pointes lors des grands froids étant couverts par un chauffage direct. Mentionnons à ce propos que la même pompe thermique peut être utilisée pour chauffer en hiver et refroidir en été, ce qui peut être intéressant pour le conditionnement d'air des locaux dont la température doit être maintenue constante.

La pompe thermique convient donc à toute application exigeant de fortes quantités de chaleur et des différences de température modérées. Nous pouvons donc envisager le chauffage d'immeubles, de piscines, de certains procédés de fabrication tels que l'industrie textile, tanneries, brasseries, etc. Un autre champ d'application très intéressant, est fourni, comme je l'ai dit tout à l'heure, par les installations d'évaporation avec thermo-compresseurs. Aussi voulons-nous passer maintenant des généralités aux applications et réalisations.

Une application intéressante de la pompe thermique à Genève serait le chauffage d'immeubles. Nous avons en effet toute une série d'immeubles se trouvant à proximité du Rhône, qui constitue une source de chaleur pratiquement

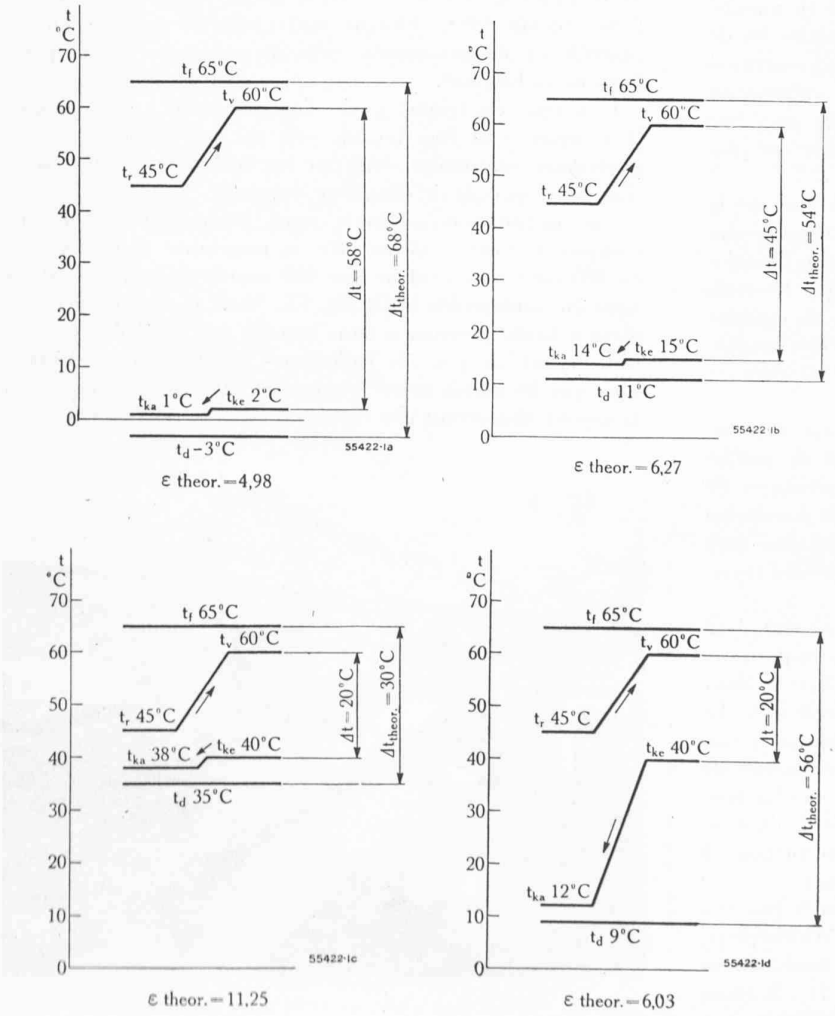

Fig. 7-10. — Diagrammes montrant l'influence des conditions de la source de chaleur sur une pompe thermique produisant de l'eau chaude à 60° C.

Fig. 7 et 8.

De l'eau de rivière ayant une température de 2° C en hiver (fig. 7) et 15° C en été (fig. 8) est utilisée comme source de chaleur. Comme elle est disponible en grande quantité, il est possible de prévoir un faible refroidissement (t_{ke}—t_{ka}) de l'eau traversant l'évaporateur, ce qui influence favorablement le coefficient de performance ε.

Fig. 9 et 10.

Comme source de chaleur l'on dispose d'eau tiède souillée à 40° C en abondance (fig. 9) et en quantité limitée (fig. 10). Malgré la température élevée de la source de chaleur, un coefficient de performance élevé n'est obtenu qu'à condition de disposer d'eau souillée en quantité suffisante (fig. 9) ; autrement, la chute de température dans l'évaporateur peut devenir tellement grande (fig. 10) que le coefficient de performance n'est pas plus élevé que lorsqu'on utilise de l'eau de rivière à 15° C (fig. 8) comme source de chaleur.

Il est donc, entre autres, essentiel de disposer d'une source de chaleur abondante afin d'obtenir un coefficient de performance élevé.

t_v = Température de départ de l'eau chaude (60° C pour les quatre cas) à la sortie du condenseur.
t_r = Température de retour de l'eau chaude à l'entrée du condenseur.
t_{ke} et t_{ka} = Températures de la source de chaleur à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur.
Δt = Différence entre température de départ de l'eau chaude et température d'arrivée de la source de chaleur.
t_f = Température de liquéfaction de l'agent dans le condenseur.
t_d = Température d'évaporation de l'agent dans l'évaporateur.
Δt théor = Différence de température $t_f - t_d$.

Coefficient de performance

$$\epsilon_{\text{théor}} = \frac{(273 + t_f)}{(273 + t_f) - (273 + t_d)} = \frac{(273 + t_f)}{\Delta t \text{ théor}}$$

inépuisable, qui pourraient être groupés de façon à réaliser des systèmes de chauffage centralisés de capacité suffisante pour justifier l'aménagement d'une pompe thermique. Des études détaillées ont démontré que le prix équivalent du combustible pendant une période d'amortissement de 20 ans serait d'environ 110 à 116 fr. la tonne. Ce prix a été établi sur des bases plutôt défavorables pour la pompe thermique, car il tient compte non seulement du prix d'achat de la pompe thermique, mais de tous les frais accessoires, tels que l'aménagement de la salle des machines, conduites de distribution, etc. Une fois l'installation complètement amortie, le prix équivalent du combustible tombe à environ 70 fr. la tonne. Ce dernier chiffre se rapproche sensiblement du prix du combustible d'avant-guerre, et ne sera vraisemblablement plus atteint.

Il n'est, par contre, pas possible de prédire l'évolution du prix du combustible pendant la période d'amortissement. Cependant, avec les prix actuels, en tenant compte d'un certain apport de combustibles de remplacement, l'installation pourrait être amortie très rapidement, par exemple en 5 ou 6 ans. Rappelons cependant que lors de la dernière guerre, le prix maximum n'a été atteint qu'en 1920.

En plus de la rentabilité, il faut considérer les autres avantages évidents, mais moins faciles à exprimer en francs. Par exemple, le rendement du personnel travaillant dans des locaux mal chauffés baisse très sensiblement. La facilité avec laquelle la pompe thermique peut être mise en marche et arrêtée permet de mettre le chauffage en marche ou de l'arrêter dès que le besoin se fait sentir. Le chauffage centralisé permet de réduire les dépenses du personnel préposé au chauffage. Les services de la voirie ne doivent plus emporter de cendres. L'absence de cendres et de fumée assure une plus grande propreté, etc.

Finalement le remplacement du combustible par de la chaleur tirée des cours d'eau et de l'énergie électrique assure de nombreux avantages au point de vue de l'économie nationale. A ce propos, il convient de mentionner que les frais d'aménagement d'une installation de pompes thermiques peuvent soutenir une comparaison avec les frais de transformation des tronçons récemment électrifiés par les chemins de fer fédéraux.

Lorsqu'il s'agit d'installations nouvelles, il est évidemment avantageux au point de vue du coefficient de performance de réduire autant que possible les températures de départ de l'eau chaude en augmentant la surface d'émission des corps de chauffe. Toutefois, l'on ne saurait aller trop loin dans cette direction sous peine de renchérir démesurément le prix de l'installation.

Il existe plusieurs installations de chauffage centralisé en Suisse exploitées avec du combustible. La plus importante est celle de l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zurich, dont la puissance de chauffe installée atteint 36 Mio kcal/h. Le réseau dessert 17 immeubles de l'Ecole Polytechnique Fédérale, 35 bâtiments de l'Hôpital cantonal, 3 immeubles de l'administration cantonale et 91 immeubles privés. La consommation de chaleur en 1938 atteignit 36 milliards de kcal, 5,9 millions de kWh ayant été produits par des turbines à contre-pression précédant le système de chauffage.

Cette installation a été complétée l'hiver dernier par une centrale de pompes thermiques située à la Walcheplatz, presque vis-à-vis de la gare principale, aux bords de la Limmat qui sert comme source de chaleur (fig. 11). A cause du manque de place il a fallu envisager une installation souterraine. Elle comprend trois unités, dont deux de Brown

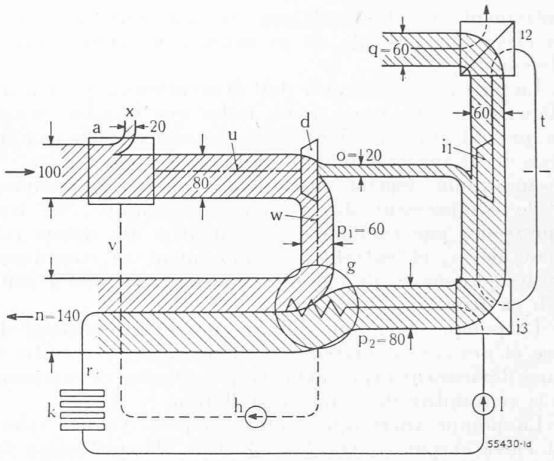

Fig. 13. — Diagramme d'écoulement de chaleur d'une installation comportant une turbine à contrepression *d* avec condenseur de chauffage *g*, la turbine fournissant l'énergie mécanique nécessaire pour entraîner le compresseur d'une pompe thermique i_1 avec évaporateur i_2 et condenseur i_3.

Boveri avec turbo-compresseurs et une de Sulzer frères avec machine à pistons, ayant chacune une puissance de chauffe nominale d'environ 1,5 Mio kcal/h lorsque la température de la Limmat atteint 2° C et la température de départ de l'eau chaude 68° C. Chaque unité possède son tableau de contrôle et de commande ainsi qu'un groupe pompe pour l'eau de la Limmat.

L'énergie électrique pour l'entraînement des pompes thermiques peut être fournie soit par les centrales hydro-électriques cantonales, soit par les turbines à contre-pression de la centrale de chauffage existante.

Une installation combinée avec pompes thermiques et turbines à contre-pression offre la possibilité d'obtenir plus de 100 unités de chaleur par 100 unités de pouvoir calorifique du combustible brûlé (fig. 13). Nous avons ici une chaudière à haute pression *a* dans laquelle est brûlé du combustible ayant un pouvoir calorifique de 100 unités. Admettons que 20 unités soient perdues et 80 soient transmises à la vapeur alimentant une turbine à contre-pression *d*. L'équi-

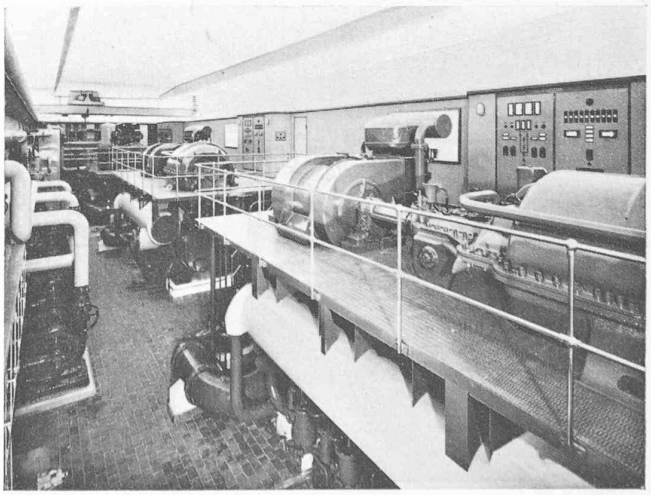

Fig. 15. — Vue de l'intérieur de la salle des machines de la centrale complémentaire de pompes thermiques desservant le réseau de chauffage à distance de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich.

valent mécanique de 20 unités est transformé en énergie mécanique par la turbine et les 60 unités restantes sont transmises dans le condenseur *g* à l'eau d'un réseau de chauffage *k*.

Les 20 unités transformées en énergie mécanique peuvent être utilisées pour entraîner une pompe thermique. Supposons que celle-ci ait un coefficient de performance de 4,00 rapporté aux bornes du moteur, c'est-à-dire avec les 20 unités dont nous disposons, nous pouvons obtenir une puissance de chauffe de $20 \times 4{,}00 = 80$ unités, 60 unités étant soutirées de la source de chaleur.

En fin de compte, nous disposons donc pour le chauffage de 60 unités du condenseur et 80 de la pompe thermique, soit au total 140 unités.

Ce même effet aurait pu être obtenu en brûlant 175 unités dans une chaudière chauffant directement, les pertes dans la chaudière étant de nouveau de 20 %.

Voici une vue (fig. 15) de l'intérieur de la centrale. Les turbo-compresseurs sont entraînés directement par des moteurs synchrones bipolaires, dont l'air de refroidissement parcourt un circuit fermé. La chaleur contenue dans cet air est récupérée et utilisée pour le chauffage.

Notons en passant que l'absence de trépidation due à l'emploi exclusif de machines rotatives assure des fondations extrêmement simples et bon marché, le thermo-bloc reposant sur deux petits socles en béton posés directement sur le plancher. Le fréon 11 est utilisé comme agent auxiliaire, la pression maximum dans le condenseur atteignant 4,65 atm eff. environ.

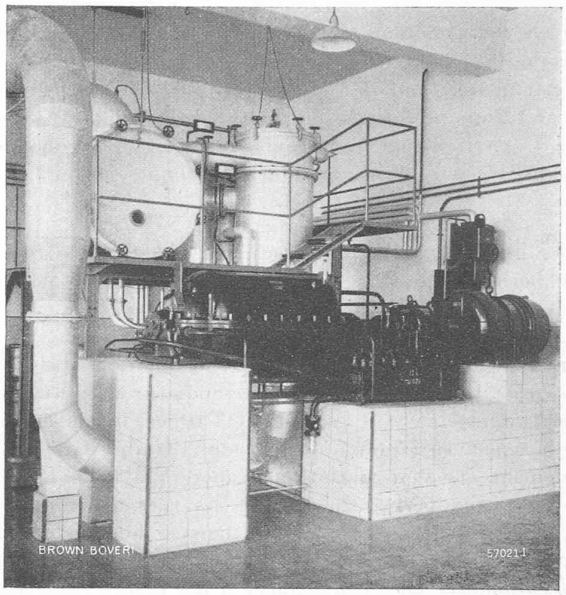

Fig. 17. — Installation pour concentrer le lait par thermo-compression, de la Fabrique de Caséine, à Lucens.

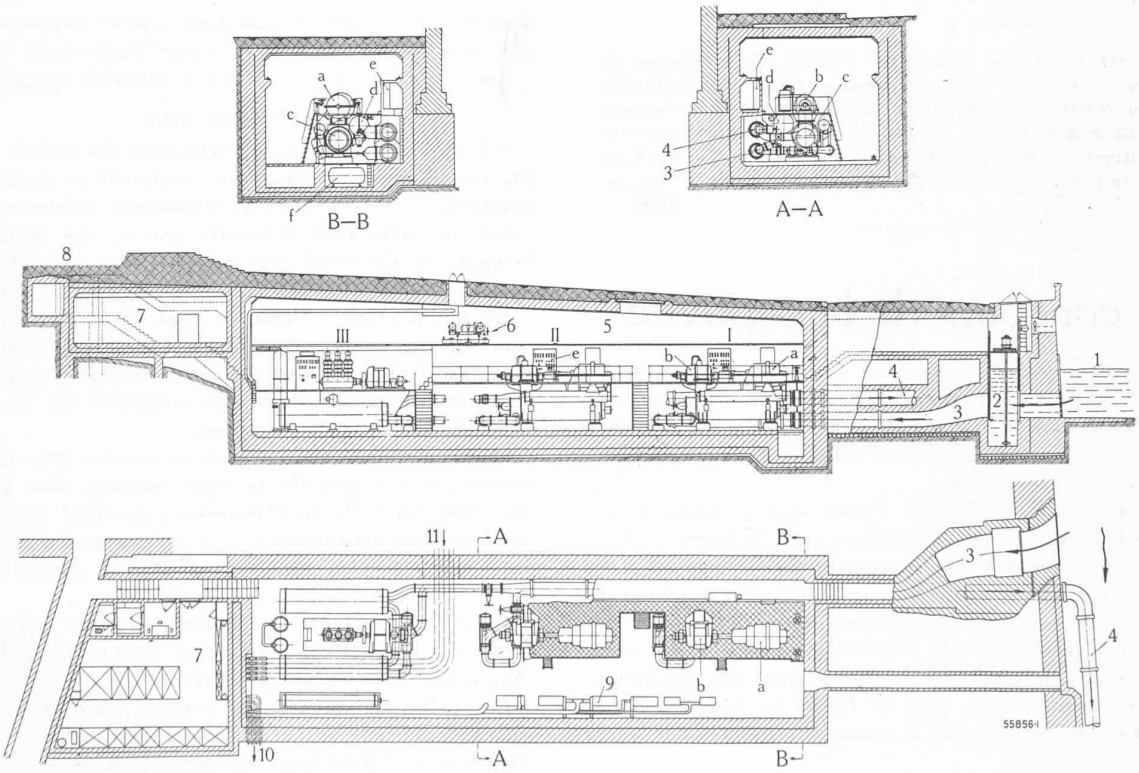

Fig. 11. — Centrale souterraine de pompes thermiques de l'installation de chauffage à distance de l'Ecole polytechnique fédérale à Zurich.

I, II = Thermoblocs Brown Boveri. III = Troisième pompe thermique avec compresseur à pistons.

1 = Rivière Limmat (source de chaleur).
2 = Prise d'eau.
3 = Conduite d'amenée d'eau.
4 = Conduite de départ d'eau.
5 = Salle des machines avec pompes thermiques I, II et III.
a = Turbo-compresseur.
b = Moteur d'entraînement.
c = Evaporateur.
d = Condenseur.
e = Tableau de manœuvre.
f = Récipient pour l'agent auxiliaire.
6 = Pont roulant.
7 = Cabine à haute tension,
8 = Entrée.
9 = Pompes de circulation pour l'eau chaude.
10 = Départ de l'eau chaude.
11 = Retour de l'eau chaude.

L'appareillage électrique vaudrait aussi la peine d'être décrit, car il a été prévu sans huile, c'est-à-dire les disjoncteurs, commutateurs de démarrage des moteurs synchrones, transformateurs, etc., sont tous dans l'air. La mise en marche et l'arrêt des moteurs synchrones se fait automatiquement à l'aide de 2 boutons-poussoirs pour chaque machine.

Cette installation a été prévue pour 4000 heures de marche par an et une production de chaleur de 20 milliards de kcal, dont $^2/_2$ environ sont fournies par la Limmat. L'économie de combustible se chiffre à environ 4000 tonnes par an.

* * *

Les installations de Steckborn, Soie Artificielle S. A., à Steckborn, et des Papeteries de Landquart ont déjà fait l'objet d'une publication dans ce périodique [1].

La concentration de denrées alimentaires liquides a pris dernièrement un grand essor. Ces installations travaillent sous vide, afin d'obtenir des températures suffisamment basses pour ne pas affecter le goût, l'arome, la couleur, ainsi que la teneur en vitamines des produits traités. Grâce à leur rendement élevé permettant d'évaporer 13 à 20 kg d'eau par kWh aux bornes du moteur, les thermo-compresseurs (fig. 2) se sont très vite répandus dans ce domaine, les soufflantes centrifuges se prêtant particulièrement bien à cette application, car elles conviennent à des débits relativement élevés et n'ont point d'organe lubrifié sur le chemin de la vapeur. Elles doivent cependant être munies de boîtes étanches spéciales, scellées avec de la vapeur ou de l'eau, suivant les conditions sur place, afin d'empêcher des rentrées d'air dans le système.

* * *

Le conférencier a fait passer sur l'écran, en conclusion de son exposé, toute une série de photographies d'installations récentes en Suisse, servant à concentrer des produits laitiers, jus de fruits non fermentés, produits à base de levure, produits pharmaceutiques, etc. Nous devons nous borner à reproduire ici une photographie de l'installation de la fabrique de caséine à Lucens (fig. 17). (Red.)

Les concours de la captivité

Ces concours, destinés à stimuler l'activité intellectuelle et à relever le courage des prisonniers, ont été organisés dans de nombreuses disciplines. Ils étaient chaque fois ouverts à toutes les catégories de prisonniers, sans distinction de nationalité, de religion ou de formation.

Les organisateurs en étaient l'Aide aux prisonniers de guerre des Unions chrétiennes de jeunes gens, le Bureau international d'éducation et le Fonds européen de secours aux étudiants. Ils ont fourni eux-mêmes aux concurrents, dans la mesure de leurs moyens et des circonstances, le matériel et la documentation nécessaires à la préparation et à la présentation de leurs travaux. Au total avec la participation des universités et de diverses associations, plus de 11.000 fr. suisses purent être répartis entre les lauréats, à raison de trois prix par catégorie.

Concours d'architecture et d'urbanisme.

L'organisation de ces deux concours avait été confiée au Groupe professionnel des architectes S. I. A. pour les relations internationales.

Les sujets choisis avaient été, pour l'architecture : La recherche du meilleur type d'habitation familiale pour les régions dévastées par la guerre, *et pour l'urbanisme :* La recherche du meilleur plan pour un petit centre rural.

Nous rappelons à nos lecteurs qu'une reproduction des travaux primés à ces concours a paru dans la revue Habitation *(nos 5-6, 1944).*

Concours de génie civil.

Ce concours, dont l'organisation fut également confiée au Groupe des architectes S. I. A. pour les relations internationales, avait pour objet d'étudier : L'influence de nouveaux modes et matériaux de construction et en particulier du béton armé sur l'esthétique, la valeur et l'effet artistique des constructions civiles.

Cinq projets seulement ont été présentés, dont un travail en francais, deux en polonais et deux en anglais. On a pu se rendre compte que malgré l'absence de documentation qui a dû nuire considérablement à la préparation de ces ouvrages, des thèses fort intéressantes et abordant la question posée sous un aspect très vaste, ont été présentées.

Nous donnons ici de larges extraits de l'ouvrage distingué par le jury, classé en 1er rang, et dû, sous le pseudonyme « Henry du Perron », à M. Henry Pottier.

L'esthétique architecturale contemporaine.

par Henry POTTIER

L'auteur, dans sa préface, remercie ses collaborateurs, comme lui officiers en captivité, dont l'un a dessiné les illustrations, dont l'autre a copié le texte tandis qu'un troisième exécutait une remarquable reliure avec le cuir d'une vieille botte.

Voici par quelles pages l'auteur introduit son propos :

Introduction.

S'il est déjà quelque peu téméraire de vouloir porter un jugement sur l'esthétique des constructions civiles contemporaines, c'est-à-dire sur l'architecture naissante de notre siècle, il serait plus téméraire encore, me semble-t-il, de formuler ce jugement sans examiner, au préalable, les éléments, les conditions qui ont présidé à sa formation.

En architecture, comme en tout autre domaine, rien ne commence ni ne finit absolument. Un style ne naît pas brusquement. Nous assistons à des transformations plutôt qu'à des commencements. L'art de construire est un perpétuel devenir, une création continue.

Dans l'histoire de l'architecture, comme dans toute autre histoire, il y a peu de brusque rupture, mais plutôt une évolution naturelle de l'Humanité, un effort constant, avec des temps de ralentissement, de pause et d'accélération, en vue de réaliser une ambition d'art que chaque génération s'attache à élargir.

Il existe sans doute une Beauté éternelle qui survit à la décadence des styles. Mais cette Beauté est éclairée, par chaque ère, sous un angle différent.

Les créations de l'esprit humain, comme celles de la nature, obéissent à la loi d'évolution, selon laquelle les formes se modifient insensiblement dans des sens conditionnés, à chaque stade, par les circonstances du moment, pour atteindre un certain degré de développement ou de perfection, au delà duquel des conditions nouvelles de l'existence, des connaissances ou des préoccupations humaines orientent dans une direction différente l'effort ininterrompu des transformations successives. Pendant des périodes relativement déterminées, les formes de cette évolution artistique gardent une parenté évidente.

[1] Pour de plus amples renseignements sur ces deux installations, nous renvoyons les lecteurs à l'étude « Le chauffage industriel à l'aide de la pompe thermique », par Paul Dusseiller, *Bulletin Technique de la Suisse romande* des 18 avril et 2 mai 1942.