

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Auteur collectif - Revue
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1949-2003
Collation	167 vol.
Nombre de volumes	167
Cote	INDNAT
Sujet(s)	Industrie
Note	Numérisation effectuée grâce au prêt de la collection complète accordé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (S.E.I.N.)
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039224155
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT
LISTE DES VOLUMES	
	1949, n° 1 (janv.-mars)
	1949, n° 2 (avril-juin)
	1949, n° 3 (juil.-sept.)
	1949, n° 4 (oct.-déc.)
	1949, n° 4 bis
	1950, n° 1 (janv.-mars)
	1950, n° 2 (avril-juin)
	1950, n° 3 (juil.-sept.)
	1950, n° 4 bis
	1951, n° 1 (janv.-mars)
	1951, n° 2 (avril-juin)
	1951, n° 3 (juil.-sept.)
	1951, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° 1 (janv.-mars)
	1952, n° 2 (avril-juin)
	1952, n° 3 (juil.-sept.)
	1952, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° spécial
	1953, n° 1 (janv.-mars)
	1953, n° 2 (avril-juin)
	1953, n° 3 (juil.-sept.)
	1953, n° 4 (oct.-déc.)
	1953, n° spécial
	1954, n° 1 (janv.-mars)
	1954, n° 2 (avril-juin)
	1954, n° 3 (juil.-sept.)
	1954, n° 4 (oct.-déc.)
	1955, n° 1 (janv.-mars)

	1955, n° 2 (avril-juin)
	1955, n° 3 (juil.-sept.)
	1955, n° 4 (oct.-déc.)
	1956, n° 1 (janv.-mars)
	1956, n° 2 (avril-juin)
	1956, n° 3 (juil.-sept.)
	1956, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° 2 (avril-juin)
	1957, n° 3 (juil.-sept.)
	1957, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° spécial (1956-1957)
	1958, n° 1 (janv.-mars)
	1958, n° 2 (avril-juin)
	1958 n° 3 (juil.-sept.)
	1958, n° 4 (oct.-déc.)
	1959, n° 1 (janv.-mars)
	1959, n° 2 (avril-juin)
	1959 n° 3 (juil.-sept.)
	1959, n° 4 (oct.-déc.)
	1960, n° 1 (janv.-mars)
	1960, n° 2 (avril-juin)
	1960, n° 3 (juil.-sept.)
	1960, n° 4 (oct.-déc.)
	1961, n° 1 (janv.-mars)
	1961, n° 2 (avril-juin)
	1961, n° 3 (juil.-sept.)
	1961, n° 4 (oct.-déc.)
	1962, n° 1 (janv.-mars)
	1962, n° 2 (avril-juin)
	1962, n° 3 (juil.-sept.)
	1962, n° 4 (oct.-déc.)
	1963, n° 1 (janv.-mars)
	1963, n° 2 (avril-juin)
	1963, n° 3 (juil.-sept.)
	1963, n° 4 (oct.-déc.)
	1964, n° 1 (janv.-mars)
	1964, n° 2 (avril-juin)
	1964, n° 3 (juil.-sept.)
	1964, n° 4 (oct.-déc.)
	1965, n° 1 (janv.-mars)
	1965, n° 2 (avril-juin)
	1965, n° 3 (juil.-sept.)
	1965, n° 4 (oct.-déc.)
	1966, n° 1 (janv.-mars)
	1966, n° 2 (avril-juin)
	1966, n° 3 (juil.-sept.)
	1966, n° 4 (oct.-déc.)
	1967, n° 1 (janv.-mars)
	1967, n° 2 (avril-juin)
	1967, n° 3 (juil.-sept.)

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
	1980, n° 1
	1982, n° spécial

	1983, n° 1
	1983, n° 3-4
	1983, n° 3-4
	1984, n° 1 (1er semestre)
	1984, n° 2
	1985, n° 1
	1985, n° 2
	1986, n° 1
	1986, n° 2
	1987, n° 1
	1987, n° 2
	1988, n° 1
	1988, n° 2
	1989
	1990
	1991
	1992
	1993, n° 1 (1er semestre)
	1993, n° 2 (2eme semestre)
	1994, n° 1 (1er semestre)
	1994, n° 2 (2eme semestre)
	1995, n° 1 (1er semestre)
	1995, n° 2 (2eme semestre)
	1996, n° 1 (1er semestre)
	1997, n° 1 (1er semestre)
	1997, n°2 (2e semestre) + 1998, n°1 (1er semestre)
	1998, n° 4 (4e trimestre)
	1999, n° 2 (2e trimestre)
	1999, n° 3 (3e trimestre)
	1999, n° 4 (4e trimestre)
	2000, n° 1 (1er trimestre)
	2000, n° 2 (2e trimestre)
	2000, n° 3 (3e trimestre)
	2000, n° 4 (4e trimestre)
	2001, n° 1 (1er trimestre)
	2001, n° 2-3 (2e et 3e trimestres)
	2001, n°4 (4e trimestre) et 2002, n°1 (1er trimestre)
	2002, n° 2 (décembre)
	2003 (décembre)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	1979, n° 2
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1979

Collation	1 vol. (50 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	60
Cote	INDNAT (127)
Sujet(s)	Industrie
Thématique(s)	Généralités scientifiques et vulgarisation
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	03/09/2025
Date de génération du PDF	08/09/2025
Recherche plein texte	Non disponible
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.127

Note d'introduction à [l'Industrie nationale \(1947-2003\)](#)

[L'Industrie nationale](#) prend, de 1947 à 2003, la suite du [Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publié de 1802 à 1943 et que l'on trouve également numérisé sur le CNUM. Cette notice est destinée à donner un éclairage sur sa création et son évolution ; pour la présentation générale de la Société d'encouragement, on se reporterà à la [notice publiée en 2012 : « Pour en savoir plus »](#)

[Une publication indispensable pour une société savante](#)

La Société, aux lendemains du conflit, fait paraître dans un premier temps, en 1948, des [Comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publication trimestrielle de petit format résumant ses activités durant l'année sociale 1947-1948. À partir du premier trimestre 1949, elle lance une publication plus complète sous le titre de [L'Industrie nationale. Mémoires et comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#).

Cette publication est différente de l'ancien [Bulletin](#) par son format, sa disposition et sa périodicité, trimestrielle là où ce dernier était publié en cahiers mensuels (sauf dans ses dernières années). Elle est surtout moins diversifiée, se limitant à des textes de conférences et à des rapports plus ou moins développés sur les remises de récompenses de la Société.

[Une publication qui reflète les ambitions comme les aléas de la Société d'encouragement](#)

À partir de sa création et jusqu'au début des années 1980, [L'Industrie nationale](#) ambitionne d'être une revue de référence abondant, dans une sélection des conférences qu'elle organise — entre 8 et 10 publiées annuellement —, des thèmes extrêmement divers, allant de la mécanique à la biologie et aux questions commerciales, en passant par la chimie, les différents domaines de la physique ou l'agriculture, mettant l'accent sur de grandes avancées ou de grandes réalisations. Elle bénéficie d'ailleurs entre 1954 et 1966 d'une subvention du CNRS qui témoigne de son importance.

À partir du début des années 1980, pour diverses raisons associées, problèmes financiers, perte de son rayonnement, fin des conférences, remise en question du modèle industriel sur lequel se fondait l'activité de la Société, [L'Industrie nationale](#) devient un organe de communication interne, rendant compte des réunions, publient les rapports sur les récompenses ainsi que quelques articles à caractère rétrospectif ou historique.

La publication disparaît logiquement en 2003 pour être remplacée par un site Internet de même nom, complété par la suite par une lettre d'information.

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

Daniel Blouin, Gérard Emtoz, [« 220 ans de la Société d'encouragement »](#), Histoire et Innovation, le carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement, en ligne le 25 octobre 2023.

Gérard EMTOZ, [« Les parcours des présidents de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale des années 1920 à nos jours. Deuxième partie : de la Libération à nos jours »](#), Histoire et Innovation, carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, en ligne le 26 octobre 2024.

S. E. I. N.
Bibliothèque

ISSN : 0019-9133

L'INDUSTRIE NATIONALE

*Comptes rendus et Conférences
de la Société d'Encouragement
pour l'Industrie Nationale*

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*



Revue trimestrielle
1979 - N° 2



N° 2 — 1979

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Données expérimentales sur le chauffage solaire actif des habitations. Généralités sur le chauffage solaire passif.

par F.-A. MISSENARD, p. 3

- Aménagement hydro-électrique de la chute Arc-Isère.

par Georges BALVAY, p. 2

ACTIVITES DE LA SOCIETE D'ENCOURAGEMENT POUR
L'INDUSTRIE NATIONALE.

- Cérémonie de Remise des Prix et Médailles.

- Réunion du Conseil d'Administration et de l'Assemblée Générale.

Publication sous la direction de M. le Pr Jean BURÉ

Président de la Société

Les textes paraissant dans *L'Industrie Nationale* n'engagent pas la responsabilité
de la Société d'Encouragement quant aux opinions exprimées par leurs auteurs.

Abonnement annuel : 60 F

le n° : 25,00 F

C.C.P. Paris, n° 618-48

*"Données expérimentales sur le chauffage et l'éclairage
actif des habitations. Généralités sur les résultats obtenus
et leur rapport avec les résultats théoriques."*

Correspondant au rapport

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

I. — VARIATIONS DES RÉSULTATS

Introduction et comparaison des résultats

Discriminatio[n] de la situation

II. — CHAUFFAGE DES HABITATIONS

Les recommandations des auteurs

Recherches empiriques

III. — ÉCLAIRAGE DES HABITATIONS

A. — Chauffage des habitations

B. — Installation solaire pour l'éclairage domestique

IV. — CONCLUSION

ANNEXE

Conseil national
National de l'énergie

“Données expérimentales sur le chauffage solaire actif des habitations - Généralités sur le chauffage solaire passif” (*)

par F. A. MISSENARD,

Correspondant de l'Académie des Sciences

PREAMBULE : ACUITE DU PROBLEME DE L'ENERGIE.

I. — LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF DES HABITATIONS ET LES DONNEES EXPERIMENTALES DU CENTRE HELIOTHERMIQUE DE SAINT-QUENTIN.

II. — VARIATIONS DES ECONOMIES EN FONCTION DU CLIMAT.

Insolation et comparaison des énergies mises en jeu.

Détermination de la puissance optimale de l'installation solaire.

III. — CHAUFFAGE SOLAIRE PASSIF.

Les inconvénients des fenêtres-capteurs.

Recherches américaines et comparaisons expérimentales.

IV. — CONSIDERATIONS ECONOMIQUES.

A. — Chauffage des locaux seul.

B. — Installation solaire servant à la fois au chauffage des locaux et à celui de l'eau sanitaire.

V. — CONCLUSION.

ANNEXE.

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 22 février 1979.

PREAMBULE
ACUITE DU PROBLEME
DE L'ENERGIE

Je ne m'attarderai pas sur le problème angoissant de l'énergie et j'écourterai ce que je disais, il y a un an, dans une conférence analogue.

Entre les deux guerres mondiales, les démocraties occidentales, séduites par le mirage des ressources énergétiques des pays sous-développés, et surtout du Moyen-Orient, avaient conçu une civilisation mécanique basée sur le pétrole.

Les vieilles énergies fossiles, comme le charbon, avaient été progressivement supplantées, voire dédaignées. La circulation automobile proliférait et, d'une façon générale, le gaspillage apparaissait comme un devoir social dans les sociétés dites « de consommation »...

Avec une belle insouciance, la situation s'aggravait d'année en année, les besoins énergétiques doublant approximativement tous les dix ans.

Il a fallu la crise de 1973, provoquée par les exigences des pays producteurs de pétrole, pour alerter, d'abord les gouvernements, puis l'opinion publique. Les populations, informées, se rendirent enfin compte que les réserves étaient limitées, non seulement pour l'énergie, mais également pour les matières premières, certains métaux non ferreux, en particulier le plomb, risquant d'être introuvables d'ici quelques décennies.

Malheureusement, la plupart de ces populations s'empressèrent de l'oublier, aussi bien en Amérique qu'en Europe, ce qui fait le désespoir du président Carter...

Cette crise prévisible fut aggravée par un ralentissement très marqué dans l'effort d'exploration. Les pays producteurs de pétrole ne trouvent nullement le besoin d'accélérer la prospection puisqu'ils vivent de plus en plus largement en augmentant leurs prix. Quant aux compagnies pétrolières des pays industrialisés, elles ont été échaudées par les nationalisations successives...

Très inquiets de l'avenir, les pays industriels multiplient les rencontres entre spécialistes tout en incitant leurs ressortissants à économiser l'énergie, généralement sans grand succès.

La réunion du « Comité mondial de l'Energie », en septembre 1977, à Istanbul, fut placée sous le signe de l'objectivité, mais toute la conférence a été dominée par une inquiétude que les experts ne cherchent plus à masquer. Pour certains même, cette inquiétude fait place à la certitude d'une prochaine catastrophe.

Trois cas possibles ont été examinés en fonction des possibilités probables de la production pétrolière :

Dans la *première hypothèse*, la plus favorable, tout est mis en œuvre pour trouver des énergies pétrolières disponibles. En limitant la croissance économique annuelle à 5 % en moyenne, la demande sera probablement couverte jusqu'en 1995. A partir de l'an 2000, la crise deviendra extrêmement grave.

Deuxième hypothèse : les pays producteurs augmentent leurs disponibilités de 50 %. Dans les mêmes conditions de croissance économique, la demande peut être satisfaite jusqu'en 1989.

Troisième hypothèse : les pays producteurs se limitent à leur production actuelle et la crise apparaît, dans toute sa gravité, à partir de 1983, c'est-à-dire après-demain.

Sans doute, est-il d'autres ressources que le pétrole ?

Outre l'uranium sur lequel je reviendrai, le gaz et le charbon existent encore en grandes quantités dans le sous-sol de certaines régions.

Mais le transport du gaz vers l'Europe occidentale, en quantité suffisante, exigeait la construction de plus d'un millier de méthanières de grande capacité et d'une centaine d'usines de liquéfaction.

Le transport du charbon pose des problèmes plus graves encore, puisque les réserves se trouvent surtout aux Etats-Unis, en Chine et en Union Soviétique. Il faudrait, pour assurer le ravitaillement des nations occidentales, construire des

organes de transport trois fois plus coûteux que la mise en exploitation des mines. Autre difficulté inquiétante : trouvera-t-on encore des hommes pour exercer le métier de mineur, un des plus rebutants et des plus pénibles ?

Ajoutons enfin que les usagers boudent le charbon après avoir connu les facilités d'emploi des huiles lourdes.

Reste l'uranium. Dans son inconscience, une grande partie de la population s'insurge contre le nucléaire tout en ne faisant aucune économie sérieuse d'énergie. Le président Carter avouait, dans une récente intervention télévisée, qu'il désespérait de convaincre les Américains aussi longtemps qu'il n'y aura pas de longues queues devant les stations d'essence. Les manifestations contre les centrales nucléaires ralentissent considérablement leur construction, plus encore à l'étranger qu'en France.

Et de plus, quelles sont nos ressources en uranium ? Compte tenu de la défaillance du pétrole, il nous en faudrait d'ici l'an 2000, trois millions de tonnes. Or, nous n'en connaissons que deux millions de disponibles, chiffre pouvant d'ailleurs être modifié par une prospection intensive. *Disons que c'est tout de même sur l'uranium que reposent nos espoirs.*

De bons esprits se demandent si cette campagne contre les centrales nucléaires n'est pas essentiellement politique. Les sociétés occidentales, privées d'énergie seraient condamnées à plus ou moins brève échéance...

Probablement, existe-t-il des réserves de pétrole dans des régions insuffisamment explorées. Sans parler des mers, il est possible que les pays du nord de l'Asie renferment de grandes réserves d'énergie. C'est ce qu'a insinué le délégué soviétique à la conférence d'Istanbul, ce qui soulèverait alors de graves problèmes politiques.

Quoi qu'il en soit, pour pallier cette crise de l'énergie, il faudrait faire un immense effort dans la recherche des possibilités d'économies d'énergies, tout en mettant en œuvre des sources nouvelles comme le soleil et l'énergie géothermique. Le drame est que la plupart des pays avouent n'avoir pas suffisamment de chercheurs de qualité pour s'attaquer simultanément à tous ces problèmes...

Peut-être faut-il différencier deux sortes d'énergies : celles que j'appellerai fongibles, et celles qui se détruisent à l'usage comme les énergies fossiles, et celles qui se renouvellent, donc en principe inépuisables, comme l'énergie solaire sous ses formes diverses, y compris hydraulique et particulièrement l'énergie marémotrice dont l'éminent et regretté Albert Caquot était l'apôtre malheureusement trop peu écouté.

De nombreuses nations, en particulier les Etats-Unis et la France, font de réels efforts pour utiliser l'énergie solaire.

Mon éminent confrère, M. Charles Guillaud, vous a exposé, en décembre 1976, les applications possibles de l'énergie solaire. Personnellement, je me limiterai au chauffage des habitations, et plus particulièrement des pavillons.

I. — LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF DES HABITATIONS ET LES DONNEES EXPERIMENTALES DU CENTRE HELIOTHERMIQUE DE SAINT-QUENTIN (1).

Une maison solaire ne diffère des constructions traditionnelles que par la présence, sur le toit ou les façades orientées vers le sud, d'appareils dénommés capteurs ou insolateurs, destinés au captage de l'énergie solaire. C'est pourquoi le toit doit présenter une assez grande superficie et son versant sud doit être incliné

(1) Pour mieux analyser ces techniques, le chauffage solaire des habitations a été séparé, dans ces expériences, du chauffage solaire de l'eau sanitaire. Les conclusions relatives au seul chauffage solaire des locaux seraient probablement modifiées si la même installation servait, *en même temps*, à la préparation de l'eau chaude sanitaire à 50 ou 60 °C.

6 DONNEES EXPERIMENTALES SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF

sur l'horizontale de 10° de plus que la latitude.

Pour le reste, la maison est semblable à une habitation traditionnelle.

Le système traditionnel du chauffage solaire actif à eau chaude (fig. 1) (issu du chauffage solaire de l'eau chaude sa-

nitaire, ce dernier pratiqué avec succès dans de nombreux pays méditerranéens depuis plusieurs lustres), consiste à chauffer de l'eau ou de l'air dans des isolateurs (1) et à répartir, à l'aide d'une pompe PC, ce fluide chaud dans des appareils de chauffage des locaux SC, généralement des radiateurs ou des tubes noyés dans le béton.

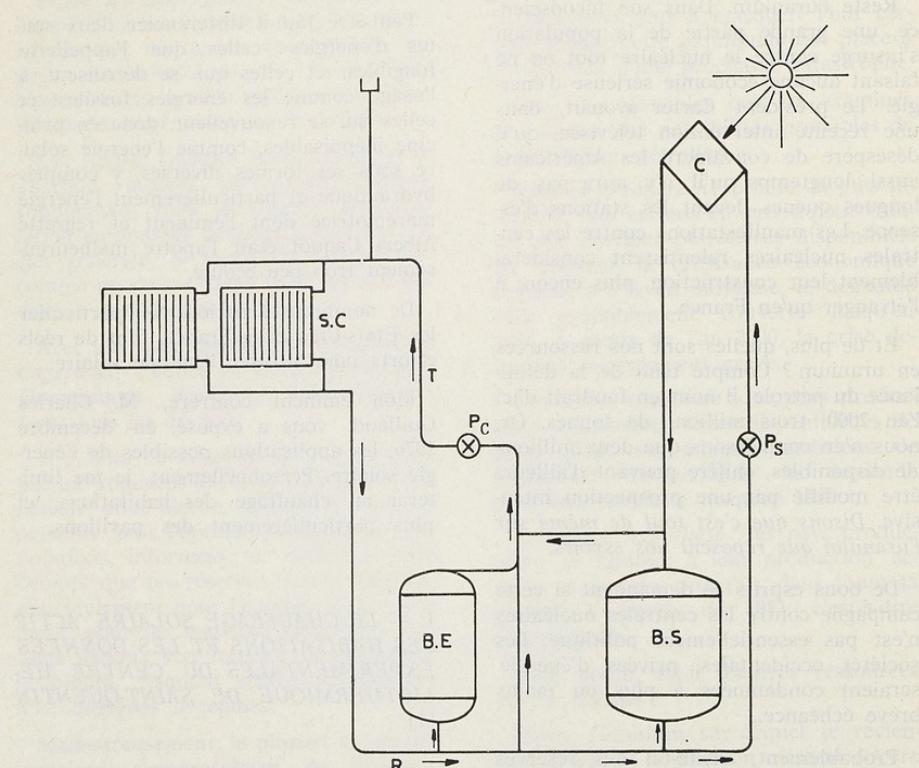


Fig. 1. — Schéma simplifié de l'installation de chauffage solaire à eau chaude

S.C., surfaces de chauffe ;
B.S., ballon accumulateur solaire ;
B.E., ballon accumulateur électrique ;
C, capteurs ;
Ps, circulateur solaire ; P_c, circulateur chauffage.

(1) Ces isolateurs, dénommés également capteurs, ont été souvent décrits dans les revues techniques, et à nouveau par M. Guillaud dans sa conférence. Je rappellerai simplement qu'ils sont constitués par un ou deux vitrages derrière lesquels est disposée une surface absorbante, généralement noire, refroidie par le fluide à chauffer, air ou eau (fig. 2).

Il convient d'obtenir le maximum de transparence des verres (ou plastiques) au rayonnement visible, le maximum d'absorption par la plaque et le minimum de pertes pour que le maximum d'énergie absorbée soit transmis à l'eau.

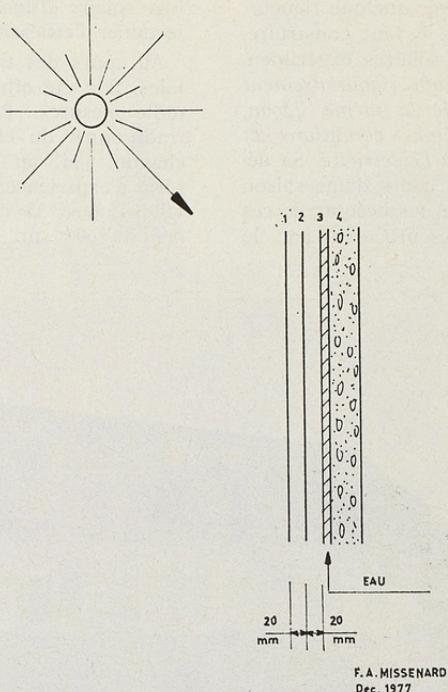


Fig. 2. — Principe de l'insulateur
 1, 2, surfaces transparentes (verre ou plastique) ;
 3, surface absorbante noire ou sélective ;
 4, calorifuge.

Lorsque la quantité de chaleur fournie par le soleil est supérieure aux besoins immédiats du local, cet excédent de chaleur est mis en réserve sous forme d'eau plus ou moins chaude, dans un ballon BS, pour être utilisé pendant les heures non ensoleillées, en particulier nocturnes.

C'est le système classique généralement utilisé en Amérique.

Comme l'énergie solaire ne suffit généralement pas pour chauffer le local, tout au moins dans les mois les plus froids, cette installation solaire est associée à un chauffage d'appoint fonctionnant en liaison ou indépendamment du chauffage solaire (ballon BE).

Les résultats d'économie annoncés par divers expérimentateurs ayant réalisé des

maisons solaires sont, généralement, systématiquement faussés parce qu'ils comparent la consommation de ce chauffage d'appoint au cours d'une saison, à celle calculée sur les bases habituelles, c'est-à-dire avec les coefficients de déperditions des matériaux. Or, ces derniers tiennent nécessairement compte des conditions météorologiques les plus défavorables : vent exceptionnellement fort, humidité des matériaux, etc. Ils sont trop élevés pour l'ensemble de la saison et le calcul conduit ainsi à des besoins énergétiques de 20 à 25 % supérieurs à la réalité.

Si bien que les économies basées sur ces calculs sont grossièrement inexac-

8 DONNEES EXPERIMENTALES SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF

Pour déterminer, avec quelque rigueur, les économies réelles, il faut construire, à côté des pavillons solaires expérimentés, un pavillon *témoin rigoureusement identique, disposé de la même façon, occupé dans les mêmes conditions et chauffé uniquement à l'électricité.* Sa dépense énergétique au cours d'une saison donne la valeur réelle des besoins de ces pavillons. L'économie procurée par le

chauffage solaire différents dont je voulais déterminer l'efficacité.

Au cours des trois saisons expérimentales, il a été effectué plus de quarante mille mesures. Pour tester le système traditionnel du chauffage solaire à eau chaude, j'ai, au cours d'une première série d'expériences, équipé un de ces pavillons avec 35 m² d'insulateurs, inclinés de 60° sur l'horizontale, encastrés

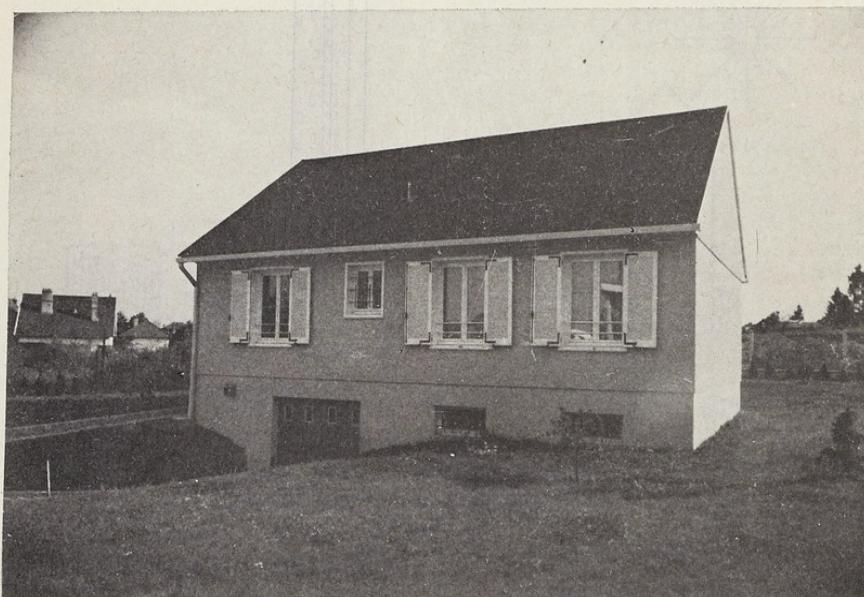


Fig. 3. — Maison témoin identique aux maisons solaires, à part la toiture.

chauffage solaire d'un pavillon peut, dans ces conditions, s'établir avec quelque rigueur par la différence entre la consommation du chauffage du pavillon témoin et celle du chauffage d'appoint du pavillon solaire.

C'est pourquoi j'ai fait construire à Saint-Quentin, quatre pavillons identiques du type F. 5, comportant cinq pièces au rez-de-chaussée. L'un sert de témoin (fig. 3), les trois autres (fig. 4 et 4 bis), comportent des systèmes de chauffage

dans le toit pour limiter leurs déperditions par le vent, un ballon d'accumulation de 3 000 litres placé en sous-sol, le tout conjugué avec un chauffage classique d'appoint par radiateurs à eau chaude fonctionnant, par les plus grands froids, entre 75 °C à l'entrée et 28 °C à la sortie, soit en moyenne à 51 ou 52 °C. J'ai ainsi obtenu, au cours de la saison 1975-1976, une économie réelle de 33 à 35 % qui, avec le calcul abusif des consommations théoriques, apparaîtrait de l'ordre de 46 à 48 %..., valeur grossièrement erronée !

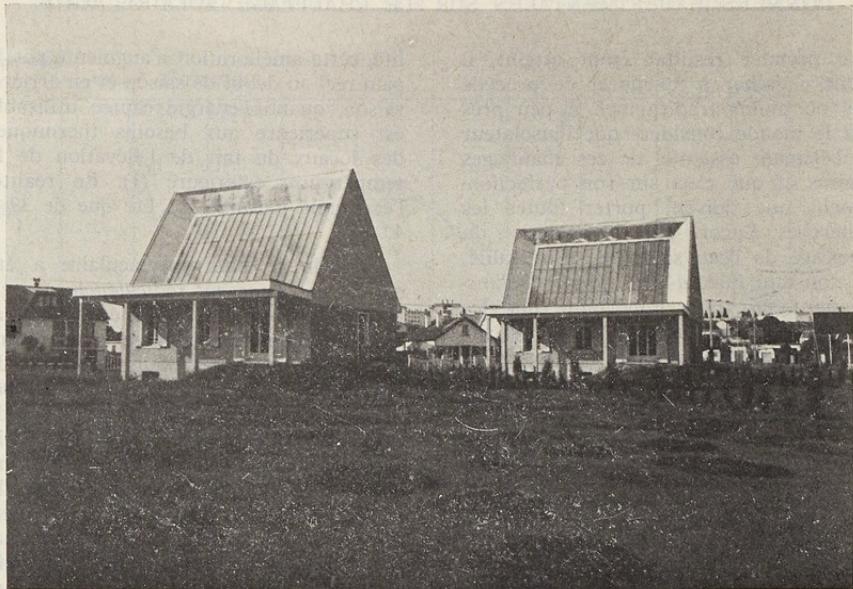


Fig. 4. — Maisons expérimentales (à gauche, chauffage solaire à eau chaude ; à droite, chauffage solaire à air chaud).

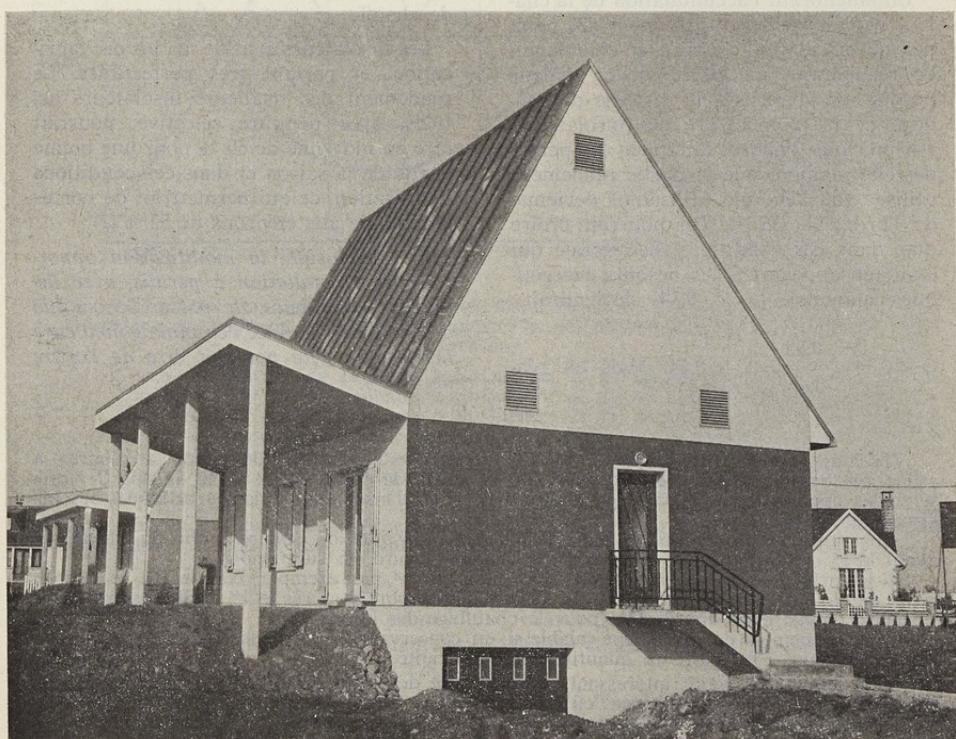


Fig. 4 bis. — Pavillon solaire.

10 DONNEES EXPERIMENTALES SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF

Ce premier résultat étant atteint, il fallait chercher à améliorer ce procédé plus ou moins traditionnel. A peu près tout le monde considère que l'insulateur est l'élément essentiel de ces chauffages solaires et que c'est sur son perfectionnement que doivent porter toutes les recherches. Encore une extrapolation du chauffage de l'eau sanitaire ! En réalité, j'ai constaté que la conception de l'installation était plus importante que les performances des insulateurs, et c'est sur ce point que j'ai porté mes efforts.

L'analyse du fonctionnement de l'installation m'a tout d'abord montré que, dans celle décrite ci-dessus, seulement 66 % de l'énergie réellement captée était réellement utilisée pour le chauffage des locaux, les pertes du ballon accumulateur en absorbant 20 %, le système de sondage de la température des insulateurs par ondes horaires 9 % et la distribution 5 %.

En améliorant l'accumulation de la chaleur par un meilleur ajustement des pompes de circulation (solaire et chauffage), en récupérant une partie de la chaleur perdue, en changeant le système de sondage de la température des insulateurs, j'ai pu, tout d'abord, diminuer ces pertes de telle manière que la partie réellement utilisée (de l'énergie utilisable) devienne de l'ordre de 85 %. On pourrait croire que, dans ces conditions, l'économie qui était (en appelant C les besoins énergétiques annuels), $C \times 0,34$, deviendrait :

$$C \times 0,34 \times \frac{0,85}{0,66} = C \times 0,44. \text{ Mais en réa-}$$

lité, cette amélioration n'augmente pas le gain réel au début de saison et en arrière-saison, quand l'énergie captée utilisable est supérieure aux besoins thermiques des locaux du fait de l'élévation de la température extérieure (1). En réalité, l'économie mesurée n'a été que de 39 à 40 %.

Le gain le plus spectaculaire a été obtenu en changeant radicalement le système de chauffage du local, et en remplaçant les radiateurs à haute température (51 °C en moyenne pour la saison de chauffe) par un chauffage à basse température fonctionnant, pour les plus grands froids, entre 30 °C à l'entrée et 21 °C à la sortie (soit en moyenne 25,5 °C). Le rendement moyen des insulateurs dont la température était ainsi abaissée est passé de 33 % à 48 % (soit 45 % d'augmentation), ce qui n'a toutefois porté l'économie qu'à 49 % seulement (soit 24 % d'augmentation) pour toute la saison, parce que l'énergie captée est encore plus surabondante au début et à la fin de la saison de chauffe.

Les insulateurs sont de ma propre fabrication, et partant très perfectibles. Le rendement des meilleurs insulateurs actuels, avec peinture sélective, pourrait être en moyenne de 60 % pour une bonne partie de la saison et dans ces conditions d'utilisation, ce qui permettrait de porter l'économie aux environs de 52 % (2).

En conclusion, la modification opportune de l'installation a permis, avec les mêmes insulateurs, de porter l'économie de 33 % à 49 %. Avec l'emploi de meilleurs insulateurs, elle pourrait être de l'ordre de 52 %.

(1) Pour le bien comprendre, il faut comparer les variations des apports solaires à celles des besoins thermiques, au cours de la saison de chauffe (fig. 5). La courbe C représente les apports solaires dans les locaux avec 35 m² d'insulateurs et la courbe DQ les besoins énergétiques des locaux.

Ainsi jusqu'au 15 octobre et après le 1^{er} avril, l'installation solaire suffit au chauffage. Avant le 15 octobre et après le 1^{er} avril, la chaleur solaire est surabondante.

Si la surface des insulateurs passe de 35 m² à 50 m² par exemple (courbe B), ce supplément de surface n'apporte rien d'utile avant le 15 octobre et après le 1^{er} avril, le supplément d'énergie captée étant inutilisable pour le chauffage des locaux.

Ce raisonnement est également valable si, en conservant 35 m² d'insulateurs on augmente leur rendement, c'est-à-dire la quantité d'énergie captée.

(2) A noter qu'il serait intéressant de construire des insulateurs à deux verres dont l'un, amovible, serait retiré aux périodes où le rayonnement solaire est intense. Il est vrai qu'à ce moment, si l'installation est importante, la chaleur captée risque d'être surabondante.

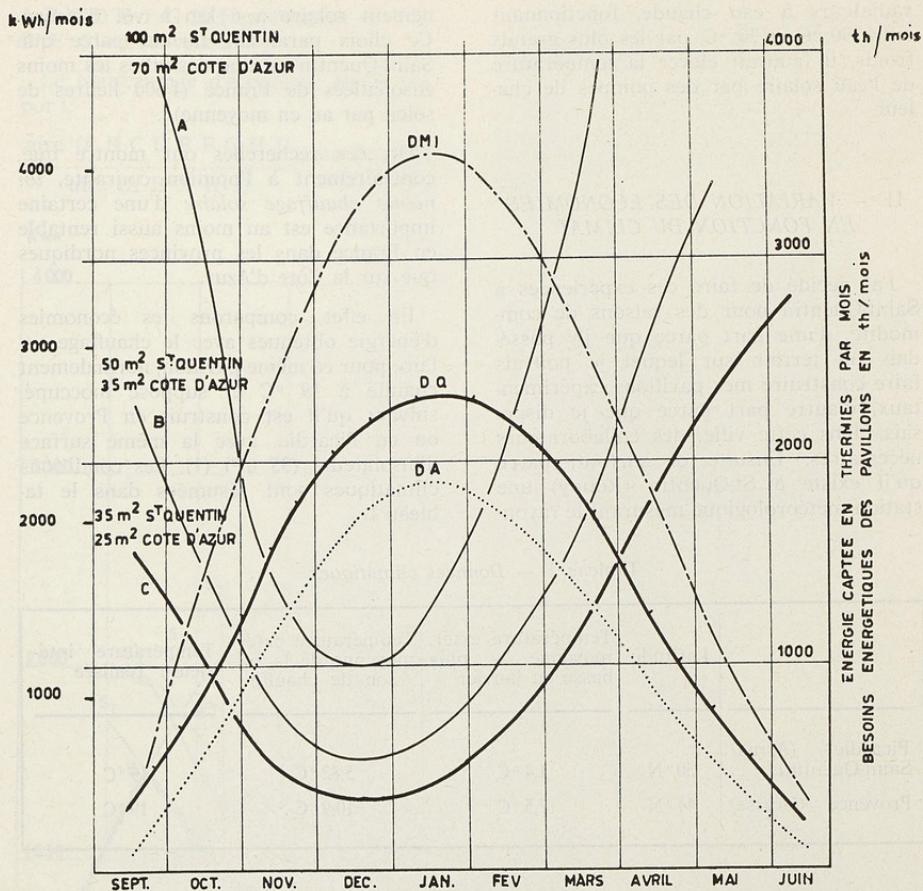


Fig. 5. — Variations mensuelles de l'énergie captée, à Paris et sur la Côte d'Azur, en fonction de la surface des capteurs, et variations mensuelles des besoins énergétiques, des différents pavillons.

Courbe A : 100 m² de capteurs à St-Quentin, 70 m² de capteurs sur la Côte d'Azur.

Courbe B : 50 m² de capteurs à St-Quentin, 35 m² de capteurs sur la Côte d'Azur.

Courbe C : 35 m² de capteurs à St-Quentin, 25 m² de capteurs sur la Côte d'Azur.

Courbe DQ : déperditions mensuelles du pavillon M.C.I. à St-Quentin.

Courbe DA : déperditions mensuelles du même pavillon M.C.I. sur la Côte d'Azur.

Courbe DMI : déperditions mensuelles d'un pavillon genre M.C.I., mal isolé, à St-Quentin.

Pour chacun des cas, l'économie est représentée par l'aire comprise entre la courbe de l'énergie captée, la courbe des besoins énergétiques et l'axe des abscisses.

En bref, je crois ainsi avoir prouvé expérimentalement que, contrairement à l'opinion générale, la conception de l'installation est plus importante que les performances des isolateurs.

REMARQUE : Les considérations précédentes concernent des pavillons neufs.

Dans les immeubles existants, comportant des chauffages traditionnels par

radiateurs à eau chaude, fonctionnant entre 90 °C et 70 °C, par les plus grands froids, il faudrait éléver la température de l'eau solaire par des pompes de chaleur.

II. — VARIATION DES ECONOMIES EN FONCTION DU CLIMAT

J'ai décidé de faire ces expériences à Saint-Quentin pour des raisons de commodité, d'une part parce que j'y possédais un terrain sur lequel je pouvais faire construire mes pavillons expérimentaux, d'autre part parce que je disposais, dans cette ville, des collaborateurs nécessaires. Ensuite et surtout, parce qu'il existe à St-Quentin (Roupy) une station météorologique mesurant le rayon-

nement solaire à 6 km à vol d'oiseau. Ce choix paraissait farfelu parce que Saint-Quentin est une des villes les moins ensoleillées de France (1 600 heures de soleil par an en moyenne)...

Or, ces recherches ont montré que, contrairement à l'opinion courante, un même chauffage solaire d'une certaine importance est au moins aussi rentable en France dans les provinces nordiques que sur la Côte d'Azur.

En effet, comparons les économies d'énergie obtenues avec le chauffage solaire pour ce même pavillon, normalement chauffé à 19 °C et supposé inoccupé, suivant qu'il est construit en Provence ou en Picardie, avec la même surface d'insulateurs (35 m²) (1). Les conditions climatiques sont résumées dans le tableau I.

Tableau I. — Données climatiques

	Latitude	Température extérieure moyenne la plus basse en janvier	Température extérieure moyenne de la saison de chauffe	Température intérieure réalisée
Picardie (Arras/Saint-Quentin) ...	50 °N	1,4 °C	5,82 °C	19 °C
Provence (Grasse)	44 °N	7,5 °C	10,9 °C	19 °C

Le pavillon est chauffé par rayonnement du plancher ou du plafond. Puisqu'il s'agit par hypothèse d'un même pavillon, l'installation de chauffage d'appoint aura la même puissance dans les deux cas, mais elle fonctionnera à une température d'eau plus basse dans le Midi que dans le Nord de la France.

Les besoins d'énergie pour la saison de chauffe sont de 17 500 kWh pour la région la plus froide de la Picardie et de 10 900 kWh pour la Côte d'Azur (Grasse) (calculés sur des données expérimentales avec une imprécision de 5 %).

Insolation et comparaison des énergies mises en jeu :

La même installation comportant 35 m² d'insulateurs captera, en Picardie, les énergies représentées par la courbe S I (fig. 6), et, en Provence, celles représentées par la courbe S II (fig. 6). Les besoins énergétiques de ces pavillons, pour une saison de chauffe, sont représentés sur cette figure par la courbe I pour la Picardie (17 500 kWh) et par la courbe II pour la Côte d'Azur (10 900 kWh pour Grasse). L'économie réalisée est égale aux aires

(1) Pour tirer le maximum d'énergie du rayonnement solaire, ces insulateurs seront inclinés de 60° sur l'horizontale en Picardie et de 54° seulement en Provence.

A B C D E F G H I en Picardie et A' B'
D' E' G' en Provence.

Le pourcentage d'économie est le rapport :

$$\frac{\text{aire (A B C D E F G H I)}}{\text{aire (A B X H I)}} \quad \begin{array}{l} \text{en Picardie,} \\ \text{soit 55 \%}, \end{array}$$

aire (A' B' D' E' G') en Provence, soit
aire (A' B' X' E' G') 85 %.

Donc, en valeur absolue, 35 m² d'insulateurs donnent une économie de : 17 500 × 0,55, environ 9 600 kWh en Picardie ;

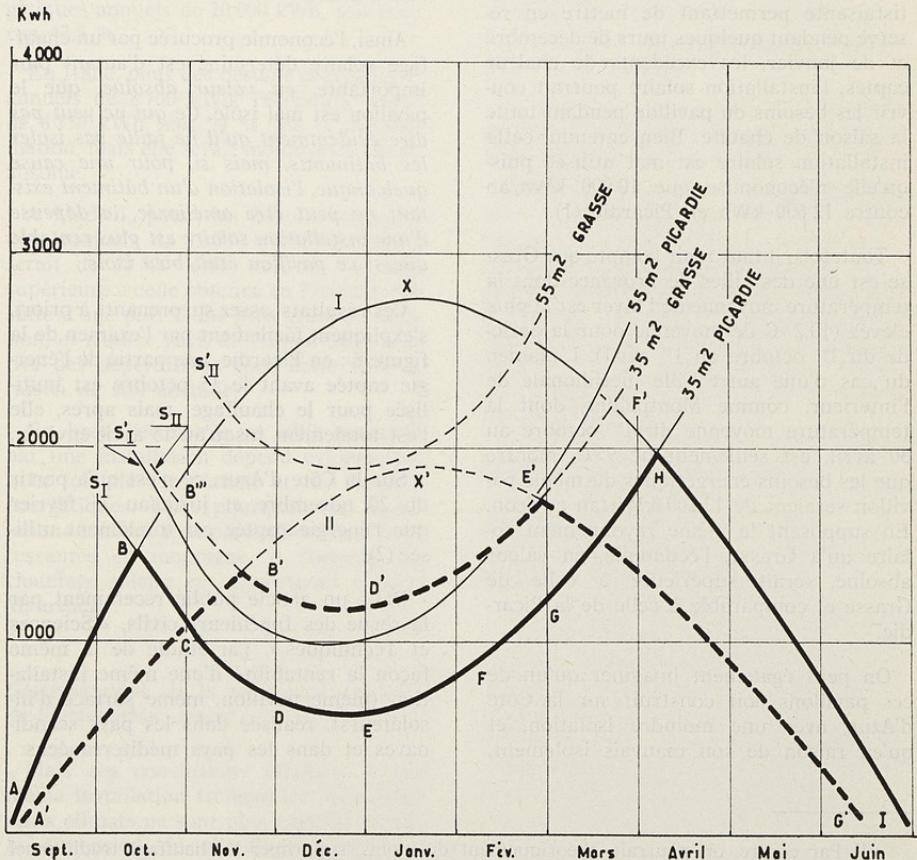


Fig. 6. — Besoins énergétiques des pavillons d'expérience occupés, et apports solaires au cours d'une saison de chauffe, en Picardie et sur la Côte d'Azur.

Courbe I' — Besoins énergétiques du pavillon M.C.I., occupé, en Picardie.

Courbe II' — Besoins énergétiques du même pavillon, occupé, à Grasse.

Apports énergétiques au cours d'une saison de chauffe par les isolateurs :

Courbe S I : 35 m² d'isolateurs en Picardie.

Courbe S'I : 55 m² d'isolateurs en Picardie.

Courbe S II : 35 m² d'isolateurs sur la Côte d'Azur.

Courbe S'II : 55 m² d'isolateurs sur la Côte d'Azur.

En abscisses, les mois de la saison de chauffe.

En ordonnées, les quantités d'énergie en kWh/mois.

(Les surfaces correspondant aux économies sont délimitées par un trait fort).

14 DONNEES EXPERIMENTALES SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF

$10\ 900 \times 0,85$, environ 9 300 kWh à Grasse (soit 4 % de moins qu'en Picardie).

Avec 55 m² d'insulateurs, un graphique analogue donne :

— en Picardie, 72 % d'économie, soit $17\ 500 \times 0,72$, environ 12 600 kWh.

— à Grasse, avec une accumulation satisfaisante permettant de mettre en réserve pendant quelques jours de décembre et de janvier, les excédents de chaleur captés, l'installation solaire pourrait couvrir les besoins du pavillon pendant toute la saison de chauffe. Bien entendu, cette installation solaire est mal utilisée puisqu'elle n'économise que 10 900 kWh/an contre 12 600 kWh en Picardie (1).

Toutefois, il faut tenir compte que Grasse est une des villes de Provence dont la température moyenne de l'hiver est la plus élevée (10,2 °C de moyenne pour la période du 1^{er} octobre au 1^{er} avril). L'examen du cas d'une autre ville méridionale de l'intérieur, comme Montpellier, dont la température moyenne du 1^{er} octobre au 30 avril, est seulement de 9 °C, montre que les besoins énergétiques du même pavillon seraient de 12 200 kWh/an environ. En supposant le même rayonnement solaire qu'à Grasse, l'économie, en valeur absolue, serait supérieure à celle de Grasse et comparable à celle de la Picardie.

On peut également imaginer qu'un de ces pavillons soit construit sur la Côte d'Azur, avec une moindre isolation, et qu'en raison de son mauvais isolement,

ses déperditions soient les mêmes que celles d'un bâtiment bien isolé, construit en Picardie, c'est-à-dire de 17 500 kWh/an. Pour ce pavillon, l'économie serait représentée par l'aire (fig. 6) A B'' B' D' E' F' I, soit environ 10 500 kWh, évidemment beaucoup plus importante que pour le pavillon bien isolé, soit à Montpellier, soit à Grasse.

Ainsi, l'économie procurée par un chauffage solaire déterminé est d'autant plus importante, *en valeur absolue*, que le pavillon est mal isolé. *Ce qui ne veut pas dire évidemment qu'il ne faille pas isoler les bâtiments, mais si, pour une cause quelconque, l'isolation d'un bâtiment existant ne peut être améliorée, la dépense d'une installation solaire est plus rentable que si ce pavillon était bien isolé.*

Ces résultats, assez surprenants à priori, s'expliquent facilement par l'examen de la figure 6 : en Picardie, une partie de l'énergie captée avant le 15 octobre est inutilisée pour le chauffage, mais après, elle l'est totalement jusqu'au 15 avril environ.

Sur la Côte d'Azur, ce n'est qu'à partir du 20 novembre et jusqu'au 25 février que l'énergie captée est totalement utilisée (2).

Dans un article publié récemment par la revue des Ingénieurs civils, « Sciences et Techniques », j'ai étudié de la même façon la rentabilité d'une même installation (même pavillon, même surface d'insulateurs), réalisée dans les pays scandinaves et dans les pays méditerranéens.

(1) Par contre, on pourrait, théoriquement du moins, supprimer le chauffage traditionnel d'appoint, si la réserve solaire était suffisante pour couvrir les jours, voire les semaines sans soleil.

C'est une étude à faire et une expérience à tenter, en fonction des statistiques d'ensoleillement de décembre et janvier. Peut-être, pourrait-on, par mesure de prudence, prévoir un chauffage électrique mobile, permettant de maintenir 19 °C dans les pièces principales, en se tenant sur l'inertie du bâtiment. C'est-à-dire que la température d'une pièce serait portée à 21 ou 22 °C, le radiateur électrique sur roulettes serait transporté dans une autre pièce, et cela successivement.

(2) La chaleur solaire non utilisée pour ce chauffage, en arrière-saison, et en été, pourrait servir à chauffer l'eau sanitaire du pavillon lui-même, ainsi que celle de pavillons voisins n'ayant pas d'installation solaire. Mais il ne s'agit plus, à proprement parler, de chauffage des locaux, mais du chauffage de l'eau sanitaire, technique différente et rentable. Cette solution sort du sujet de cette étude, consacrée au seul chauffage des locaux.

En Suède, l'économie annuelle serait de 9 000 kWh pour des besoins énergétiques de 22 100 kWh, soit de 41 %, compte non tenu des journées pendant lesquelles la neige et le gel obscurcissent les isolateurs.

Au Danemark, l'économie annuelle serait de 9 500 kWh pour des besoins énergétiques annuels de 20 000 kWh, soit environ 47,5 %.

En Italie, pour des besoins énergétiques annuels de 8 700 kWh, l'économie serait de 8 150 kWh, soit 94 % de la consommation, mais elle serait moindre en valeur absolue.

A Madrid, pour des besoins énergétiques annuels de 12 000 kWh, l'économie serait de 10 500 kWh, soit 87 %, donc supérieure à celle obtenue en Picardie, par suite d'une part d'une plus grande insolation, et d'autre part, de l'importance relative des déperditions dans cette ville en raison de son altitude.

En bref, l'économie en kWh procurée par une installation dépend évidemment à la fois de l'insolation et des besoins énergétiques. C'est pourquoi ces installations solaires sont particulièrement intéressantes en montagne. A l'opposé, un chauffage solaire ne rapporterait rien en Mauritanie.

Détermination de la puissance optimale de l'installation solaire :

Mais ces conclusions relatives à une même installation transportée sous différents climats ne sont plus valables quand la dimension du chauffage solaire est optimale pour un climat donné.

En effet, il est, dans chaque cas, une dimension *financièrement* optimale pour l'installation solaire en fonction de son prix et des économies procurées. Cette dimension peut se déterminer par le graphique suivant :

(1) Estimations en date de mars 1978.

La durée de l'installation étant fixée en fonction de la fiabilité du matériel, on totalise les charges d'amortissement, d'entretien et de consommation au cours d'une année moyenne de cette période :

a) l'amortissement étant fonction de la dimension de l'installation, les frais d'entretien seront admis proportionnels par exemple à la surface des isolateurs ;

b) les frais de consommation dépendent de l'économie.

Le minimum de la courbe totalisant ces dépenses correspond à la dimension optimale pour l'installation solaire.

A titre d'exemple, cette étude sera faite sur un pavillon du type précédent, situé à Grasse et supposé occupé, puisque c'est le cas le plus intéressant (besoins énergétiques annuels 8 100 kWh). Nous commencerons par admettre que le matériel durera vingt ans. Les coûts des installations et de leur entretien annuel seront les suivants (1), en fonction de la surface des isolateurs :

— 18 m² d'isolateurs, prix d'achat 27 500 F, entretien annuel 200 F ;

— 35 m² d'isolateurs, prix d'achat 35 000 F, entretien annuel 300 F ;

— 50 m² d'isolateurs, prix d'achat 42 000 F, entretien annuel 350 F.

Les charges financières annuelles dues à l'installation seront calculées en admettant un intérêt de 5 % par an de ce capital et un amortissement en vingt ans du matériel. Si bien que ces charges financières annuelles totales sont égales au dixième du coût de l'installation, augmentées des frais d'entretien soit pour :

— 18 m² d'isolateurs : 2 750 F + 200 F
= 2 950 F ;

— 35 m² d'isolateurs : 3 500 F + 300 F
= 3 800 F ;

— 50 m² d'isolateurs : 4 200 F + 350 F
= 4 550 F,

représentées par la courbe CH de la figure 7, en fonction de la surface des isolateurs.

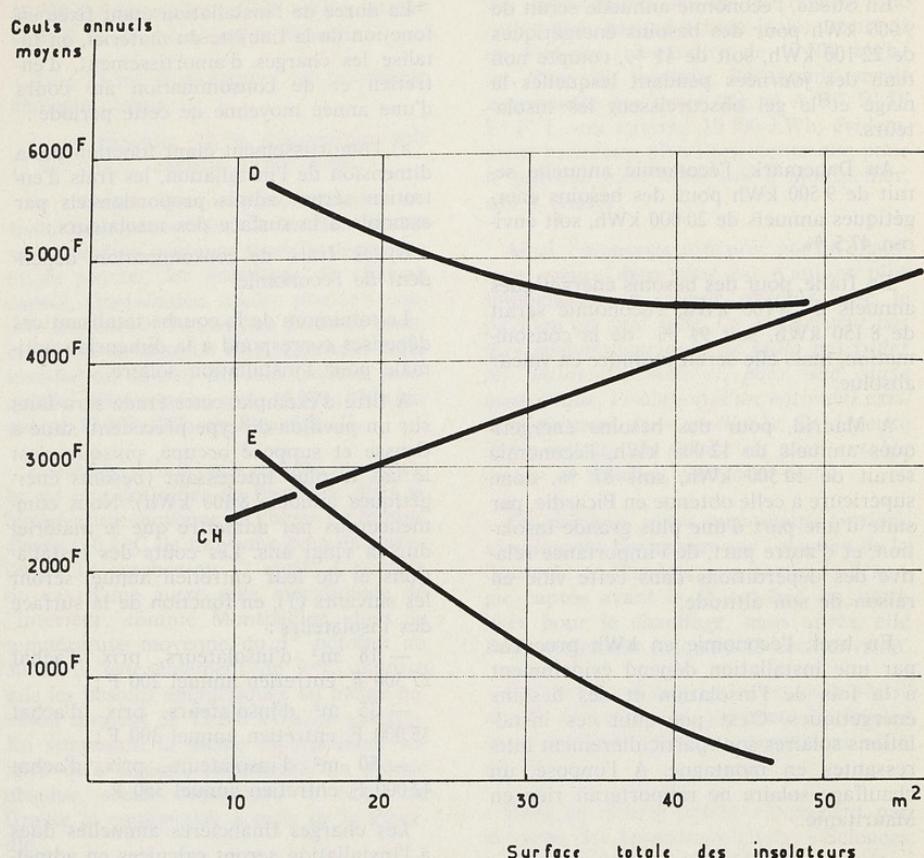


Fig. 7. — Détermination de la dimension optimale de l'installation solaire d'un pavillon occupé, à Grasse.

Courbe CH. — Charges financières annuelles en fonction du prix de l'installation amortie sur vingt ans, et des frais d'entretien.

Courbe E. — Dépense énergétique, compte tenu de l'économie procurée par l'installation solaire.

Courbe D. — Total de ces dépenses, autrement dit, coût annuel moyen sur vingt ans.

La dimension optimale de l'installation (c'est-à-dire la surface des isolateurs) correspond au minimum de cette courbe D, soit, dans ce cas, au voisinage de 45 m².

Si l'on suppose qu'en raison de la dépréciation de la monnaie et des exigences des pays fournisseurs, le prix du fuel double un peu moins vite que tous les

cinq ans, il sera, pour une année moyenne, pendant une durée de vingt ans, d'environ 0,55 F la thermie.

En l'absence d'énergie solaire, la dépense en combustible serait donc pour le pavillon occupé :

$$\frac{8100 \times 0,86}{0,75} \times 0,55 = 5100 \text{ F environ.}$$

III. — CHAUFFAGE SOLAIRE PASSIF

Ces conclusions étant relativement pessimistes, j'ai repris le problème en cherchant comment on peut le résoudre en se

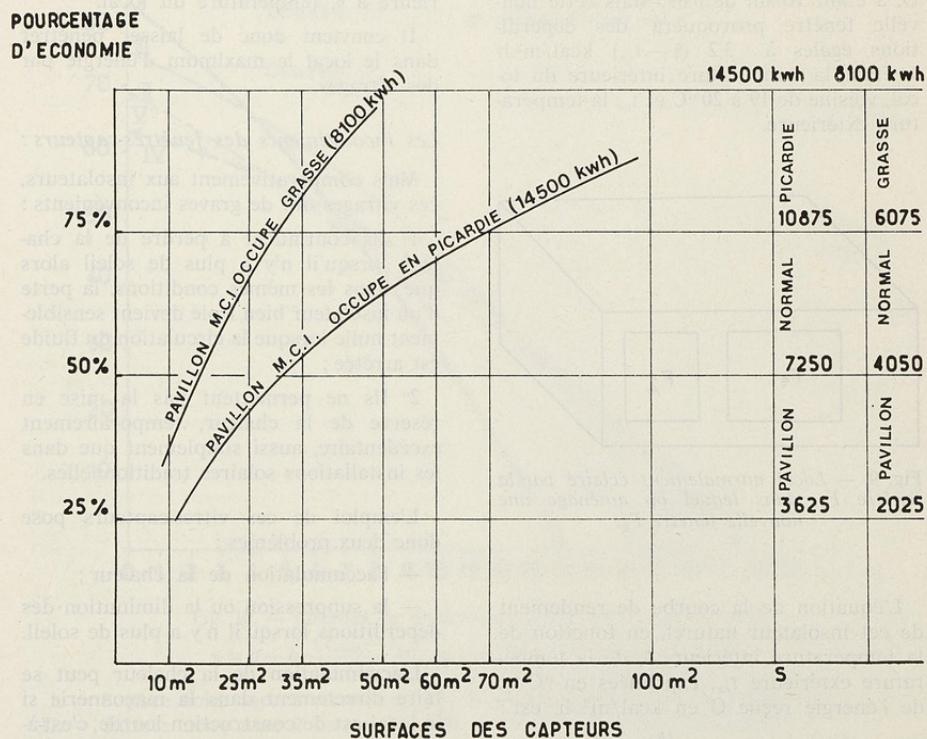


Fig. 8. — Variation du pourcentage d'économie annuelle et de sa valeur en kWh, en fonction de la surface des capteurs et de l'emplacement d'un même pavillon occupé.

Compte tenu des économies résultant de la figure 8, la dépense annuelle moyenne sera représentée par la courbe E de la figure 7, et la dépense totale annuelle moyenne, par la courbe D, totalisant les ordonnées des courbes CH et E. Son minimum, d'ailleurs assez mal marqué, est voisin de 45 m², procurant une économie de l'ordre de 93 %.

libérant de la dépense la plus importante, à savoir les isolateurs.

En y réfléchissant, il apparaît que le capteur le plus efficace et le plus économique, en l'état actuel de la technique, est la simple fenêtre à double verre, laissant passer de l'ordre de 69 % de l'énergie incidente et utilisant en somme le banal « effet de serre ».

Considérons en effet une pièce dont la façade sud est éclairée par une fenêtre F_1 (fig.9). Si on aménage une deuxième fenêtre F_2 , à vitre double, recevant du soleil l'énergie $Q \text{ kcal/m}^2.\text{h}$ (1), par mètre carré et par heure, la quantité entrant dans le local dont les parois ne sont pas réfléchissantes, sera, par mètre carré, à Q , a étant voisin de 0,69. Mais cette nouvelle fenêtre provoquera des déperditions égales à : $3,2 (\theta - t_{ex}) \text{ kcal/m}^2.\text{h}$ θ , étant la température intérieure du local, voisine de 19 à 20 °C et t_{ex} la température extérieure.

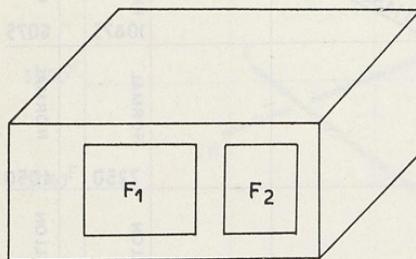


Fig. 9. — Local normalement éclairé par la fenêtre F_1 , dans lequel on aménage une nouvelle fenêtre F_2 .

L'équation de la courbe de rendement de cet isolateur naturel, en fonction de la température intérieure θ , de la température extérieure t_{ex} , exprimées en °C et de l'énergie reçue Q en $\text{kcal/m}^2.\text{h}$, est :

$$\eta = 0,69 - b \frac{(\theta - t_{ex})}{Q}$$

(b , variant de 2,4 à 3,2 $\text{kcal/m}^2.\text{h} \text{ } ^\circ\text{C}$, suivant la valeur de $(\theta - t_{ex})$, représentée par la courbe en pointillé V de la figure 10).

L'équation d'un bon isolateur avec une surface sélective (courbe IV de la figure 10) :

$$\eta = 0,64 - b' \frac{(T_{capt} - t_{ex})}{Q}$$

(1) Rappelons que 1 kcal = 1,16 Wh.

(T_{capt} , température moyenne de l'insulateur et b' compris entre 1,3 et 3,2), montre qu'en pratique, la quantité de chaleur captée par la vitre double sera toujours supérieure à celle recueillie par l'insulateur avec peinture sélective, puisque T_{capt} , température d'alimentation des surfaces de chauffe, doit toujours être supérieure à θ , température du local.

Il convient donc de laisser pénétrer dans le local le maximum d'énergie par des vitrages.

Les inconvénients des fenêtres-capteurs :

Mais comparativement aux isolateurs, ces vitrages ont de graves inconvénients :

1° Ils continuent à perdre de la chaleur lorsqu'il n'y a plus de soleil alors que, dans les mêmes conditions, la perte d'un isolateur bien isolé devient sensiblement nulle lorsque la circulation du fluide est arrêtée ;

2° Ils ne permettent pas la mise en réserve de la chaleur, temporairement excédentaire, aussi simplement que dans les installations solaires traditionnelles.

L'emploi de ces vitres-capteurs pose donc deux problèmes :

— l'accumulation de la chaleur ;

— la suppression ou la diminution des déperditions lorsqu'il n'y a plus de soleil.

L'accumulation de la chaleur peut se faire directement dans la maçonnerie si le local est de construction lourde, c'est-à-dire si les parois et les cloisons intérieures sont épaisses et de grande chaleur spécifique. Cette accumulation peut également être obtenue de façon plus efficace en remplaçant les cloisons intérieures en maçonnerie du pavillon décrit plus haut par des cloisons en tôle peintes de couleur sombre, remplies d'eau et dont la contenance dépend du lieu d'implantation du local (fig. 11).

En tolérant par rapport à la température normale de 19 °C une élévation de température de quelques degrés, le jour,

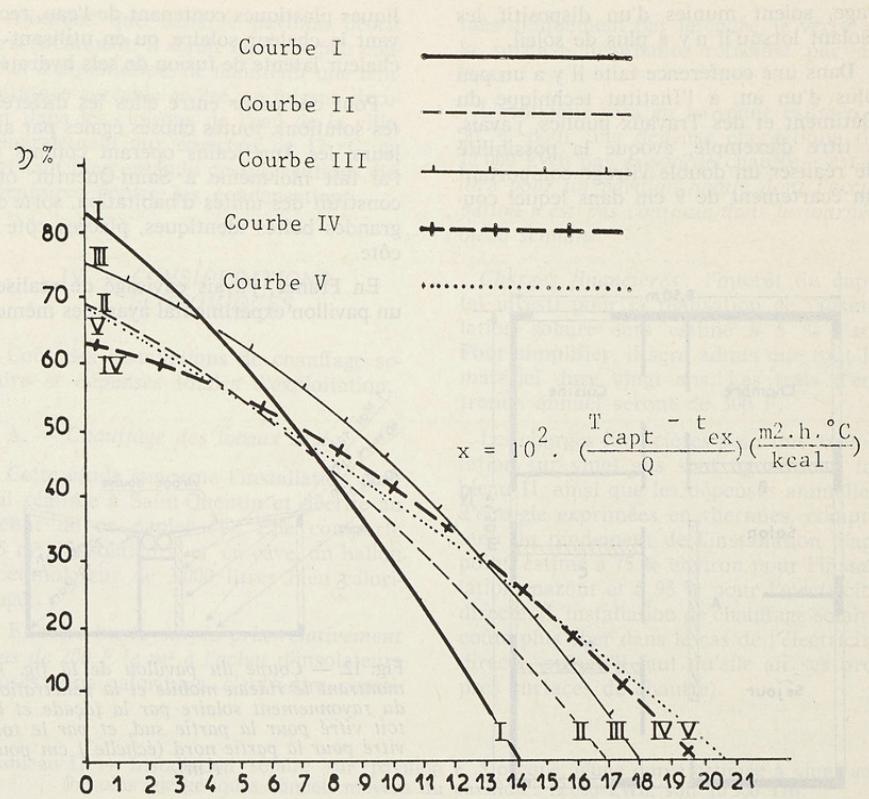


Fig. 10. — Courbes de rendement de capteurs expérimentés.

$$\eta = a - b \frac{(T_{capt} - t_{ex})}{Q} \quad (a \text{ constant}, b \text{ variable avec } x).$$

- I. — Surface noire avec 1 verre. $a = 0,82$; b compris entre 5 et 6 (moyenne 5,5).
- II. — Surface noire avec 2 verres. $a = 0,69$; b compris entre 2 et 4 (moyenne 3).
- III. — Surface sélective avec 1 verre, $a = 0,75$; b compris entre 2,5 et 4,2 (moyenne 3,35).
- IV. — Surface sélective avec 2 verres, $a = 0,64$; b compris entre 1,3 et 3,2 (moyenne 2,25).
- V. — Vitre double sans capteur.
Transmittance des vitres : 0,86.
Coefficient d'absorption de la peinture noire : 0,95.
Coefficient d'absorption de la surface sélective : 0,87.
Coefficient d'émission de la peinture noire : 0,90.
Coefficient d'émission de la surface sélective : 0,18.

et une baisse de quelques degrés la nuit, ce bâtiment peut emmagasiner, de jour, l'excédent de chaleur nécessaire pour couvrir les pertes nocturnes et même celles d'un lendemain peu ensoleillé.

Recherches américaines et comparaisons expérimentales :

Pour diminuer les déperditions, il faut que les vitres, non indispensables à l'éclai-

20 DONNEES EXPERIMENTALES SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF

rage, soient munies d'un dispositif les isolant lorsqu'il n'y a plus de soleil.

Dans une conférence faite il y a un peu plus d'un an, à l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux publics, j'avais, à titre d'exemple, évoqué la possibilité de réaliser un double vitrage comportant un écartement de 9 cm dans lequel cou-

lisses plastiques contenant de l'eau, recevant la chaleur solaire, ou en utilisant la chaleur latente de fusion de sels hydratés.

Pour comparer entre elles les différentes solutions, toutes choses égales par ailleurs, les Américains opérant comme je l'ai fait moi-même à Saint-Quentin, ont construit des unités d'habitation, sorte de grandes boîtes identiques, placées côte à côte.

En France, j'avais envisagé de réaliser un pavillon expérimental ayant les mêmes

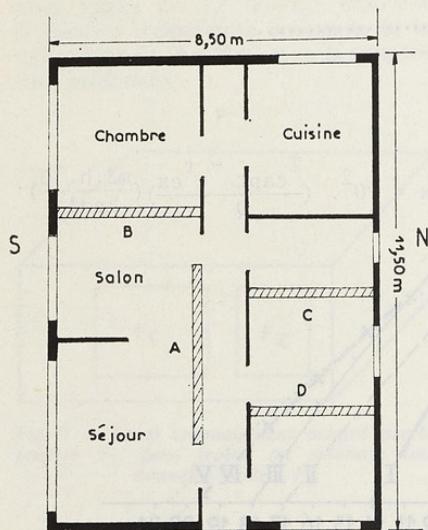


Fig. 11. — Plan du pavillon ainsi aménagé, montrant les vitrages sur la façade sud et les façades est et ouest, ainsi que les cloisons A, B, C, D, remplies d'eau pour emmagasiner la chaleur solaire non immédiatement utilisée (échelle 1 cm pour 1 m).

lissois un rideau isolant. Je me suis aperçu entre temps que les Américains avaient poussé très loin ces études avec des moyens dont je ne dispose pas. En particulier, ils ont étudié des systèmes de vitrage à base de billes de polystyrène mobiles ou des rideaux intérieurs étanches aux mouvements d'air, réalisant la même isolation pour les fenêtres ainsi obstruées que celle des murs. En somme, le problème est simple. La solution dépend de l'ingéniosité des constructeurs.

Ils ont également imaginé l'accumulation de chaleur dans des cylindres métal-

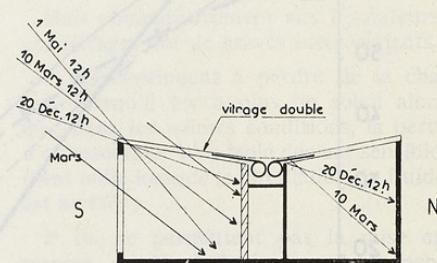


Fig. 12. — Coupe du pavillon de la fig. 11 montrant le rideau mobile et la pénétration du rayonnement solaire par la façade et le toit vitré pour la partie sud, et par le toit vitré pour la partie nord (échelle 1 cm pour 1 m).

pièces d'habitation que ceux décrits précédemment, mais comportant 20 m² de vitrage en façade sud, 5 m² sur chacune des façades est et ouest, 64 m² sur le toit, ce qui donne la figure 12, les cloisons A, B, C, D (fig. 11) étant en tôle et remplies d'eau pour accumuler la chaleur.

L'analyse de cette maquette en utilisant les résultats expérimentaux obtenus précédemment permet de calculer que l'économie prévisible serait de l'ordre de 60 %, avec des rideaux isolants, scrupuleusement fermés quand il n'y a pas de soleil, en particulier la nuit.

Cette disposition coûte moins cher qu'un chauffage solaire actif et s'amortit beaucoup plus vite. En bref, ce chauffage passif semble plus intéressant que le chauffage actif.

Ajoutons que dans le pavillon décrit précédemment, il serait facile et peu coûteux d'exploitation, de maintenir une température agréable en été, en faisant circuler dans les cloisons de l'eau de la ville, généralement aux environs de 17 °C, en prenant bien entendu des précautions élémentaires contre les condensations.

IV. — CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

Coût des installations de chauffage solaire et dépenses totales d'exploitation.

A. — Chauffage des locaux seul :

Cette étude concerne l'installation d'essai réalisée à Saint-Quentin et décrite au début de ce papier (1). Elle comporte 35 m² d'insulateurs et en cave, un ballon accumulateur de 3 000 litres bien calorifugé.

Elle est basée sur le prix relativement bas de 200 F le m² à l'achat d'insulateurs posés sans calorifuge, c'est-à-dire constitué

tués uniquement par le cadre, le verre et la surface absorbante refroidie par de l'eau.

L'économie sera en moyenne estimée à 50 % pour une dépense énergétique de 12 000 kWh par saison de chauffe, c'est-à-dire pour un pavillon habité dont l'occupation n'est pas continue dans la journée ou la semaine.

Charges financières : l'intérêt du capital investi pour la réalisation de l'installation solaire sera estimé à 5 % l'an. Pour simplifier, il sera admis que tout le matériel dure vingt ans. Les frais d'entretien annuel seront de 300 F.

Les charges financières pour une exploitation sur vingt ans sont figurées au tableau II, ainsi que les dépenses annuelles d'énergie exprimées en thermies, compte tenu du rendement de l'installation d'appoint, estimé à 75 % environ pour l'installation mazout et à 95 % pour l'électricité directe. (L'installation de chauffage solaire coûte plus cher dans le cas de l'électricité directe, puisqu'il faut qu'elle ait ses propres surfaces de chauffe).

Tableau II. — Installation solaire sur pavillon F. 5 occupé, d'une durée estimée à vingt ans (besoins énergétiques annuels moyens du pavillon : 12 000 kWh, soit 10 300 Th).

	Charges financières			Econo- mie d'énergie en %	Dépense annuelle d'énergie en ther- mies, compte tenu du rendement de l'installation d'ap- point	Dépense annuelle totale moyenne sur vingt ans d'exploitation
	Intérêt capit.	Amortis- sement	Entre- tien			
Avec chge d'appoint au mazout	1 750 F	1 750 F	300 F	50 %	6 900 Th	3 800 (F 1978) + 6 900 thermies mazout
Avec chge d'appoint électricité directe	2 080 F	2 080 F	300 F	50 %	5 400 Th	4 460 (F 1978) + 5 400 thermies électriques

(1) Et non pas le pavillon supposé placé dans la ville la plus froide de Picardie. J'ai préféré procéder à cette étude économique sur des installations effectivement réalisées et expérimentées.

22 DONNEES EXPERIMENTALES SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE ACTIF

En fonction des différentes hypothèses sur la variation du coût de l'énergie, le prix de la thermie mazout et de la thermie

électrique directe figurent au tableau III, en fonction du prix de la thermie 1978.

Tableau III. — Coût approximatif moyen arrondi de la thermie, sur vingt ans, en fonction du prix 1978, avec diverses hypothèses de variation du prix de l'énergie.

	Constant	Doublement tous les 10 ans	Doublement tous les 7,5 ans	Doublement tous les 5 ans
Mazout	Th = 0,12 F (1978)	2,25 Th	3 Th	5,5 Th
Electricité ...	Th = 0,26 F (1978)			

L'économie réalisée correspond à la moitié des besoins énergétiques. Soit sur une période de vingt ans :

Avec le mazout : $6\ 900 \text{ Th} \times C$, C étant le coefficient de variation du coût moyen annuel du mazout sur cette période. Pour que l'installation soit remboursée en vingt ans, il faut donc que : $6\ 900 \times 0,12 \times C \times 20 = 3\ 800 \times 20$, d'où $C = \frac{76\ 000}{16\ 560} = 4,59$, ce qui correspond à un doublement du prix du mazout tous les six ans environ.

Pour l'électricité directe, le calcul s'établit de la même façon : $89\ 200 = 5\ 400 \times 0,26 \times C' \times 20 = 28\ 080 C'$, d'où $C' = \frac{89\ 200}{28\ 080} = 3,18$, ce qui correspond à un doublement du prix de l'énergie électrique tous les sept ans environ.

B. — Installation solaire servant à la fois au chauffage des locaux et à celui de l'eau sanitaire

Le supplément de prix concerne uniquement le ballon échangeur de 200 litres placé à l'intérieur du ballon solaire, et servant au chauffage et au stockage de l'eau chaude sanitaire. Son coût est de : 3 400 F, d'une durée estimée à quinze ans.

L'économie sur les frais de chauffage de l'eau sanitaire sera de 100 % pendant

les mois de juin, juillet, août, septembre, et en moyenne de 50 % pendant les mois d'octobre, avril et mai, soit en admettant le même puisage journalier, elle sera de :

$$\frac{4 + (0,5 \times 3)}{12} = 46 \% \text{ pour l'année.}$$

Admettons que les occupants utilisent 100 litres d'eau chaude par jour à 60 °C, ce qui exige une dépense énergétique moyenne de $100 (60 - 15) = 4\ 500 \text{ kcal/jour}$, soit 5,5 kWh, pour tenir compte des pertes. Avec le chauffage par l'électricité directe, la dépense journalière serait environ de 1,30 F et l'économie annuelle de $1,30 \times 0,46 \times 365$, environ 218 F.

Avec l'électricité des heures creuses, l'économie serait seulement de 131 F par an.

Le bilan de l'adjonction du chauffage de l'eau sanitaire à celui des locaux s'établit ainsi :

charges annuelles :	
intérêt (5 % l'an)	170 F
amortissement	230 F
	400 F

Cette adjonction du chauffage solaire de l'eau sanitaire sur l'installation de chauffage des locaux s'amortit donc en deux ans avec l'électricité directe et en trois ans avec l'électricité par accumulation.

CONCLUSION

« Regarder le soleil en face sans se laisser éblouir ... »

« Soleil, sujet obscurci par tant d'écrits nébuleux ... »

Et maintenant, il faut conclure.

I. — J'ai souligné l'intérêt du chauffage passif, dont le coût, pour une même économie d'énergie, est inférieur au chauffage actif.

Lorsque j'ai déclaré, à l'Académie des Sciences, que le meilleur isolateur était la fenêtre double, j'ai fait sourire, et même l'un de mes confrères m'a déclaré que j'enfonçais des fenêtres ouvertes... Encore fallait-il le prouver !

De fait, en France, il a été fait peu de recherches sur le chauffage solaire passif, probablement parce qu'il relève plus de l'architecte que de l'ingénieur. Toutefois, si la conception architecturale est capitale, il faut que des dispositifs efficaces suppriment les déperditions de ces capteurs-fenêtres, lorsque l'énergie solaire ne les compense pas.

Aussi, me féliciterai-je que de jeunes ingénieurs, devenus architectes comme Alain Enard, s'intéressent à ces questions.

Sans doute, nos conceptions esthétiques devront-elles évoluer, car il est probable qu'une maison solaire ne ressemblera pas plus à une habitation traditionnelle, qu'une automobile de course actuelle ne ressemble à un fiacre équipé d'un moteur.

Il est probable que la sagesse consiste à combiner le chauffage solaire passif et le chauffage solaire actif ; c'est-à-dire à laisser pénétrer largement le soleil et à utiliser parallèlement des isolateurs pour les locaux situés à l'ombre. Fort heureusement, la technique actuelle de la régulation permet de combiner facilement ces deux systèmes.

II. — La suite de mes considérations sera probablement en contradiction avec la croyance populaire, et surtout avec les articles superficiels et dithyrambiques

dont nous inondent les revues. Une fois de plus, je répéterai, comme le disait Jean Rostand, que « la différence entre un homme de science et un profane est que le profane croit savoir et que l'homme de science sait qu'il croit », et j'ajouterais temporairement ...

Donc mes conclusions seront à revoir au fur et à mesure qu'évolueront la technique, le prix des matériels et surtout le coût des énergies traditionnelles.

1^o En l'état actuel du marché, le chauffage solaire actif des habitations ne s'amortit pas par les économies d'énergie dans un délai inférieur à quinze ans, même en escomptant une hausse rapide des énergies fossiles. D'ailleurs, si on en croit les électriciens optimistes, le prix du kWh atomique augmentera beaucoup moins vite.

Mais je parle de la technique que j'ai étudiée et expérimentée. Peut-être d'autres dispositions sont-elles plus avantageuses, quoique je pense avoir amélioré les conceptions habituelles, et en particulier américaines.

De toute façon, il faut réaliser des chauffages à basse température, ce qui permet d'utiliser des isolateurs simples.

Toutefois, il n'en est pas de même pour le chauffage solaire de l'eau sanitaire dont les installations s'amortissent en trois ou quatre ans, parce qu'on utilise l'énergie solaire toute l'année.

D'ailleurs, la calorie-solaire coûte beaucoup moins cher que la calorie-mazout à condition de pouvoir l'utiliser toute l'année telle qu'elle sort des isolateurs, quitte à la porter, pour son utilisation industrielle, à la température voulue par un chauffage à appoint (voir annexe).

2^o Une même installation de chauffage solaire actif n'est pas nécessairement d'autant plus rentable que le pays est plus ensoleillé. Une partie de l'énergie captée est en effet perdue pour le chauffage au début et à la fin de la saison de chauffe, pertes d'autant plus importantes que l'installation est plus puissante. C'est pourquoi ces installations sont particulièrement intéressantes dans les régions ensoleillées et froides, en montagne par exemple, surtout

compte tenu des difficultés d'approvisionnement en énergies fossiles.

Dans le cas général, il faut choisir la solution optimale compte tenu des besoins thermiques des locaux et de l'insolation. Dans ces conditions, l'installation solaire est légèrement plus payante dans le Midi que dans le Nord de la France.

3^e C'est évidemment un devoir national de chercher à réduire nos achats d'énergies à l'étranger. Aussi, faut-il que tout le monde se préoccupe de promouvoir l'utilisation de l'énergie solaire.

Mais le physicien que je suis n'a pas le droit de se mêler de questions économiques. Il ne peut que rendre compte de ses résultats expérimentaux en insistant sur le fait que les procédés utilisés sont toujours perfectibles.

Aussi, le développement du chauffage solaire des habitations dépend-il actuellement plus du gouvernement que des constructeurs. Les pouvoirs publics peuvent en effet organiser la fabrication en série, à bas prix, d'isolateurs simples et de pompes à chaleur. De plus, ils peuvent accorder des dégrèvements financiers palliant, dans une certaine mesure, la longueur de la durée d'amortissement des installations.

4^e Enfin, la recherche la plus urgente qu'il faut le plus encourager est celle de l'accumulation de la chaleur.

Le drame des chauffages solaires actuels est d'exiger un chauffage traditionnel en plus de l'installation solaire, puisque le soleil peut se cacher pendant plusieurs jours, sinon plusieurs semaines. Une accumulation efficace permettrait de réduire la puissance habituelle de ce chauffage traditionnel et si l'énergie d'été peut être emmagasinée pendant six mois, l'installation solaire suffira probablement à elle seule au chauffage hivernal des locaux (1).

**

(1) Le pavillon F. 5 expérimenté serait, dans ce cas, parfaitement équipé pour se passer d'énergie étrangère toute l'année, tant pour son chauffage que son eau chaude sanitaire. Les besoins annuels sont de l'ordre de 14 000 thermies et les 35 m² d'isolateurs en captent de l'ordre de 16 000 par an dans la région parisienne.

ANNEXE

COUT DE LA THERMIE SOLAIRE INDUSTRIELLE

Pour en terminer avec ces considérations économiques, il est intéressant de comparer le coût de la thermie utile, suivant qu'elle est produite par une chaudière à mazout, ou une batterie d'isolateurs.

Dans ce cas, l'installation mazout comporte simplement la chaudière, le brûleur, sa cuve, ainsi que le circulateur et une dizaine de mètres de tubes avec les vannes de raccordement (suivant les cas, il faudra y ajouter ou non le prix d'une cheminée).

L'installation solaire comportera une batterie d'isolateurs, un circulateur, une dizaine de mètres de tubes de raccordement et des vannes d'isolation (pas de réservoir puisque les calories solaires sont supposées utilisées au fur et à mesure de leur production).

Etant donné que cette production est surtout industrielle du fait que les calories solaires sont à une température variable, parfois assez basse et ne peuvent être utilisées qu'avec un appoint énergétique, nous admettrons une batterie solaire de 400 m² d'isolateurs.

Pour arriver au même ordre de grandeur de production annuelle, en fonctionnant jour et nuit, la chaudière aura une puissance nominative de 28 500 kcal, et avec un bon rendement, elle produira 24 000 kcal/h.

Pour déterminer les charges annuelles, on admettra que l'amortissement de l'installation solaire se fait en vingt ans. Celui de la chaudière et du brûleur en dix ans et le reste de l'installation en vingt ans. Les frais d'entretien seront de 400 F pour l'installation solaire et de 600 F pour l'installation mazout.

Le prix de la thermie utile s'établit donc de la façon suivante :

*Installation solaire : coût 220 000 F,
charges annuelles :*

— intérêt du capital	5 %	
l'an, soit		11 000 F
— amortissement, 1/20 ^e par an, soit		11 000 F
— entretien		400 F
— consommation électrique du circulateur		300 F
soit		22 700 F

Le rayonnement annuel total reçu dans la région parisienne, sur des isolateurs orientés vers le sud et inclinés de 60° sur l'horizontale, est environ de 395 000 J/cm².an, soit 933,3 thermies. Avec un rendement de 50 % (1), les 400 m² d'isolateurs produiront: $933,3 \times 400 \times 0,5 = 186\,660$ thermies utiles par an.

Si bien que la thermie coûtera :

$$\frac{22\,700 \text{ F}}{186\,660} = 0,122 \text{ F environ.}$$

Installation mazout (raccordée sur une cheminée existante).

Chaudière de 28 500 kcal, produisant, compte tenu du rendement, 24 000 kcal/h, soit par an $24 \times 8760 = 210\,240$ thermies.

Coût de l'installation : 16 500 F
charges annuelles :

— intérêt du capital	825 F
— amortissement :	
• chaudière, brûleur, circulateur, etc, en dix ans	1 200 F
• cuve à mazout, amor- tissement en vingt ans	325 F
— consommation électri- que du circulateur ..	300 F
— entretien	400 F
	3 050 F

— prix de l'énergie :

210 240 × 0,11 23 126 F

soit au total 26 176 F

Prix de la thermie :

$$\frac{26\,176 \text{ F}}{210\,240} = 0,124 \text{ F.}$$

Si bien qu'à l'époque actuelle, la thermie solaire ne coûte que 98 % du prix de la calorie mazout, soit environ le même prix compte tenu de l'approximation de ces calculs ;

Si l'on suppose que le prix du mazout double tous les dix ans, ce qui est certainement optimiste, le prix de revient de la thermie sera, dans dix ans :

$$\frac{3\,050 + (23\,126 \times 2)}{210\,240} = 0,234 \text{ F.}$$

La thermie solaire coûterait donc de l'ordre de 52 % de celle de la thermie mazout, à la dixième année, et 28 % à la vingtième année.

Toutefois, ces résultats très favorables au solaire, supposent que les services utilisateurs peuvent accepter, d'une façon continue en toute saison, de l'eau à une température variable, voire relative-
ment basse pour les mois peu ensoleillés. De plus, cette source de chaleur n'est utilisable que pendant la journée et, partant, ne peut être que l'appoint d'une installation susceptible de porter la température de l'eau à sa valeur dési-
rée.

Si la chaudière mazout ne fonctionnait que le jour, elle devrait être plus puissante, ce qui ne modifierait pas beaucoup les rapports précédents, puisque le prix de la thermie mazout dépend surtout du coût du fuel.

En somme, au taux actuel et sur vingt ans, la thermie solaire coûtera pour cet usage, de l'ordre de la moitié de la thermie mazout, à condition, répétons-le, qu'on puisse utiliser la chaleur solaire telle qu'elle se présente, et même à très basse température.

(1) Ce rendement pourrait être plus faible si l'eau solaire était en moyenne à une température supérieure à 35 °C.

Aménagement hydro-électrique () de la chute Arc-Isère*

par M. Georges BALVAY,
Ingénieur E.D.F.,
Chef de l'Aménagement.

PREAMBULE

Présenter l'aménagement hydro-électrique de la chute Arc-Isère c'est, d'abord, présenter une vallée alpine française que l'Arc, principal affluent de l'Isère, a façonnée au cours des âges : la Maurienne dont le nom viendrait du mau-riau (mauvais ruisseau, en vieux patois) que la rivière est restée dans la tradition orale populaire.

Lieu de passage historique entre la France et l'Italie, la Maurienne est l'une des plus importantes artères de la Savoie, un département dont les liens avec l'hydroélectricité ont été et sont encore très forts puisque la production d'électricité d'origine hydraulique assure, de nos jours, 20 % des ressources fiscales des collectivités locales.

A cette attirance pour la houille blanche savoyarde, la Maurienne se devait de participer, en offrant, aux ingénieurs à la recherche d'énergie sauvage, ses 125 km de développement entre la frontière italienne et le sillon alpin où l'Arc fait sa

jonction avec l'Isère et ses 2 000 km² de bassin versant sur lequel s'écoule une lame d'eau moyenne de 1,00 m/an.

Et c'est ainsi que sept chutes sur l'Arc et deux sur ses affluents ont été construites entre 1870 et la première guerre mondiale, dont certaines capables d'une production annuelle de 50 millions de kWh, ce qui était remarquable pour l'époque (fig. 1).

Les pionniers qui ont dû, pour arriver à leurs fins, surmonter non seulement de nombreuses difficultés techniques mais aussi des oppositions et des méfiances de la part des populations locales, étaient des industriels électro-chimistes et électrométallurgistes dont les usines utilisaient sur place une énergie que l'on ne savait pas encore transporter sur des distances importantes (fig. 2).

La loi de 1919 sur les concessions hydroénergétiques, en créant notamment la Déclaration d'Utilité Publique, relança les initiatives et quatre nouvelles chutes virent le jour, entre les deux guerres, dont

(*) Conférence prononcée à l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 1^{er} mars 1979.

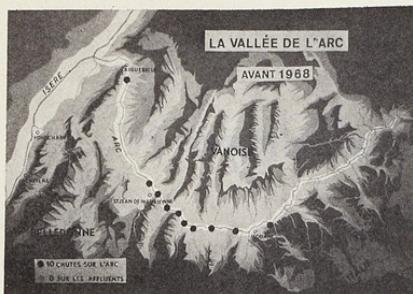


Fig. 1



Fig. 2

la très haute chute de Bissorte, sur un affluent de l'Arc, une des premières accumulations saisonnières (40 millions de m³) à alimenter, sous 1 150 m de chute, une usine de pointe (76 MW.).

Puis vinrent, à l'issue du deuxième conflit mondial, la loi de nationalisation et la création d'Electricité de France, un événement qui, aidé par les progrès accomplis en matière de transport d'énergie électrique à longue distance et d'interconnexion du réseau français, devait permettre l'équipement rationnel de vallées comme la Maurienne.

* * *

**NAISSANCE
DU PROJET ARC-ISERE**

La première tâche d'E.D.F. fut de mener à son terme l'équipement, différé par la guerre, du complexe « barrages de Plan

d'Amont/Plan d'Aval et usine d'Aussois » qui, sous 860 m de hauteur de chute, avait été conçu, à la fois, pour la production d'électricité et pour l'alimentation des turbines entraînant directement les installations de la soufflerie de l'O.N.E.R.A., près de Modane (voir fig. 4).

Puis l'Etablissement s'intéressa à la mise au point du projet d'aménagement d'ensemble de la vallée : des études précédentes avaient envisagé de détourner l'Arc de son cours naturel et de le restituer directement, soit à l'Isère, en un point proche du point de restitution d'Arc-Isère, soit à l'un de ses affluents, dans une vallée secondaire de l'Oisans où va s'édifier prochainement le barrage de Grand Maison.

Mais ces études, si elles donnaient naissance à des schémas hydrauliques audacieux, présentaient l'inconvénient de ne pas permettre le fractionnement des travaux, donc des risques techniques, et posaient de sérieux problèmes de financement au regard de la masse de capitaux à mobiliser.

De plus, le détournement de l'Arc immédiatement à l'aval de la partie du bassin versant soumise à l'influence glaciaire et à la lame d'eau annuelle la plus forte, ne laissait, pour les bassins intermédiaire et inférieur, qu'un débit moyen réduit qui ne justifiait plus l'équipement de la rivière à l'amont de St-Jean-de-Maurienne et encore moins le projet Arc-Isère.

Or, c'est précisément entre Modane et St-Jean que sept des dix chutes mises en service de 1897 à 1942 se trouvaient implantées : sous-équipées, vétustes, dotées d'un grand nombre de groupes (jusqu'à 17) de caractéristiques très diverses, ces chutes étaient appelées à disparaître, malgré le renouvellement des machines et de très faibles coefficients d'indisponibilité (fig. 3).

Par ailleurs, E.D.F. avait engagé, dès les premières années de la Nationalisation, l'aménagement de la chute Isère-Arc, dont les ouvrages détournent, depuis près de vingt ans, l'Isère de son cours naturel, dans l'autre grande vallée savoyarde, là Tarentaise, pour la restituer à l'Arc, en Maurienne : parmi ces ouvrages, le projet

comprenait un souterrain de 12 km de longueur dont le creusement, effectué à partir des deux extrémités se déroulait avec succès, à travers des terrains géologiquement très comparables aux terrains à traverser par la grande galerie d'Arc-Isère.

Ce précédent devait faire pencher la balance en faveur d'un aménagement de la vallée de l'Arc par paliers successifs, qui utiliserait :

1) d'une part, toute la dénivellation de 1 500 m environ existant entre le haut bassin des sources de l'Arc et St-Jean-de-Maurienne, à l'exception de deux tronçons à l'amont de Modane et à l'aval de St-Michel-de-Maurienne, que la faible pente de l'Arc, les caractéristiques d'ordre géologique et la proximité de l'une et l'autre des agglomérations, rendaient difficilement équipables, sinon à un coût prohibitif ;

2) d'autre part, la dénivellation de 300 m environ offerte par la possibilité existante de relier directement le cours inférieur de l'Arc et le cours moyen de l'Isère en abandonnant les projets d'équipement le long de l'Arc, notamment entre St-Jean-de-Maurienne et la restitution d'Isère-Arc. Au-delà, plus à l'aval, les études n'étaient pas engagées et auraient probablement mon-

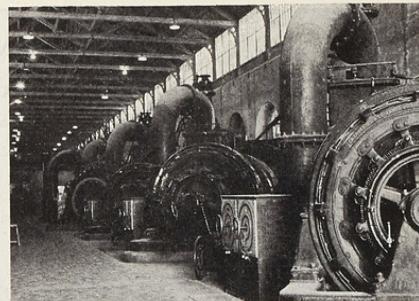


Fig. 3

tré que, malgré le renfort des débits de l'Isère, la rentabilité des chutes successives envisageables n'était pas assurée, du fait de la faible pente des deux rivières (fig. 4).

De plus, cette liaison directe présentait l'avantage de pouvoir créer, au débouché de la galerie d'amenée des eaux de l'Arc, une retenue susceptible de concentrer les apports et de fonctionner en éclusée pendant les heures les plus chargées de la semaine.

**

EVOLUTION DU PROJET

Le choix ainsi fait pour un tel équipement d'ensemble de la vallée était concré-

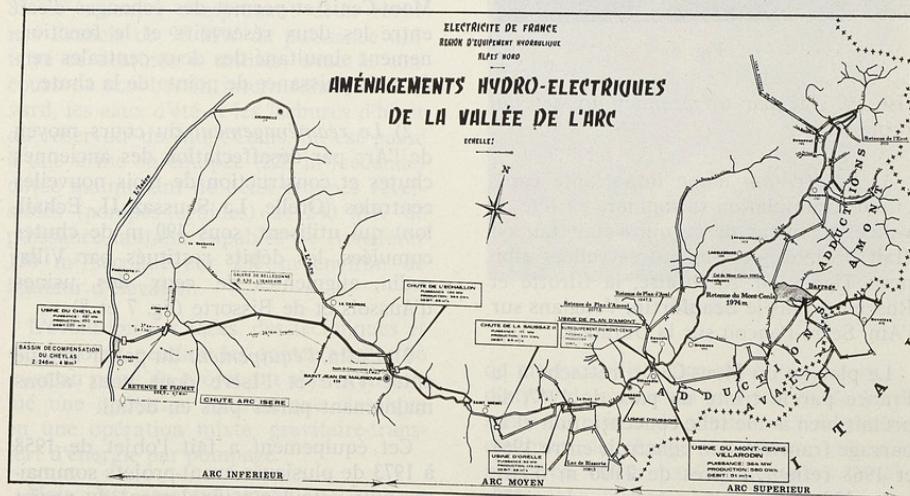


Fig. 4

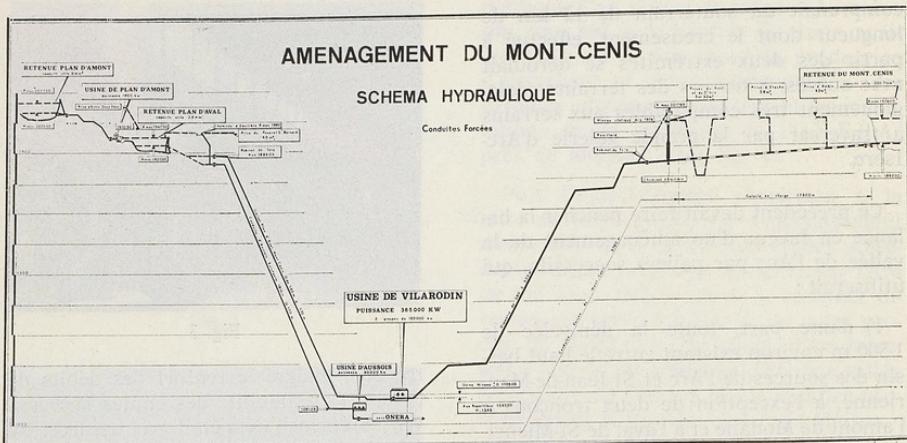


Fig. 5

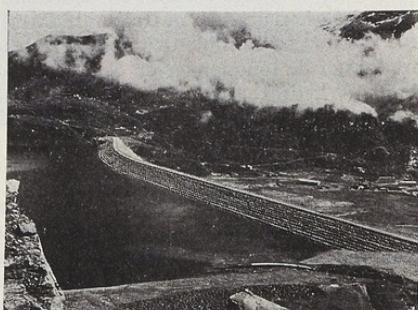


Fig. 6

tisé en 1952 par un premier dossier qui proposait :

1) *La création d'une importante capacité d'accumulation saisonnière en tête de vallée, à l'instar de ce qui s'était fait ou était projeté pour les autres vallées alpines : Tignes en Tarentaise, la Girotte et Roselend dans le Beaufortin, Vouglans sur l'Ain, Serre-Ponçon sur la Durance.*

Le plateau du Mont-Cenis, rattaché à la France par le traité de paix de 1947, se prêtait bien à une telle concentration et le barrage franco-italien construit entre 1963 et 1968 retient, à près de 2 000 m d'altitude, 320 millions de m³ d'eau, dont 270 millions à disposition de la France, turbi-

nés par l'usine de Villarodin-Mont-Cenis, à l'amont de Modane, sous 800 m environ de hauteur de chute et 360 MW de puissance installée (fig. 5 et 6).

L'aménagement de cette première chute a été complété par le raccordement de l'usine de Villarodin à la retenue de Plan d'Aval (voir ci-dessus) et la construction d'une deuxième usine de 120 MW de puissance installée : le complexe ainsi réalisé concourt au remplissage de la retenue du Mont-Cenis et permet des échanges d'eau entre les deux réservoirs et le fonctionnement simultané des deux centrales renforce la puissance de pointe de la chute.

2) *Le réaménagement du cours moyen de l'Arc par désaffection des anciennes chutes et construction de trois nouvelles centrales (Orelle, La Saussaz II, Echallion) qui utilisent, sous 490 m de chutes cumulées, les débits restitués par Villarodin, augmentés de ceux des usines d'Aussois et de Bissorte (fig. 7 et 8).*

3) *Enfin, l'équipement du palier unique entre l'Arc et l'Isère dont nous allons maintenant parler plus en détail.*

Cet équipement a fait l'objet de 1958 à 1973 de plusieurs avant-projets sommaires puis détaillés et finalement du projet d'exécution de 1974 (fig. 9).

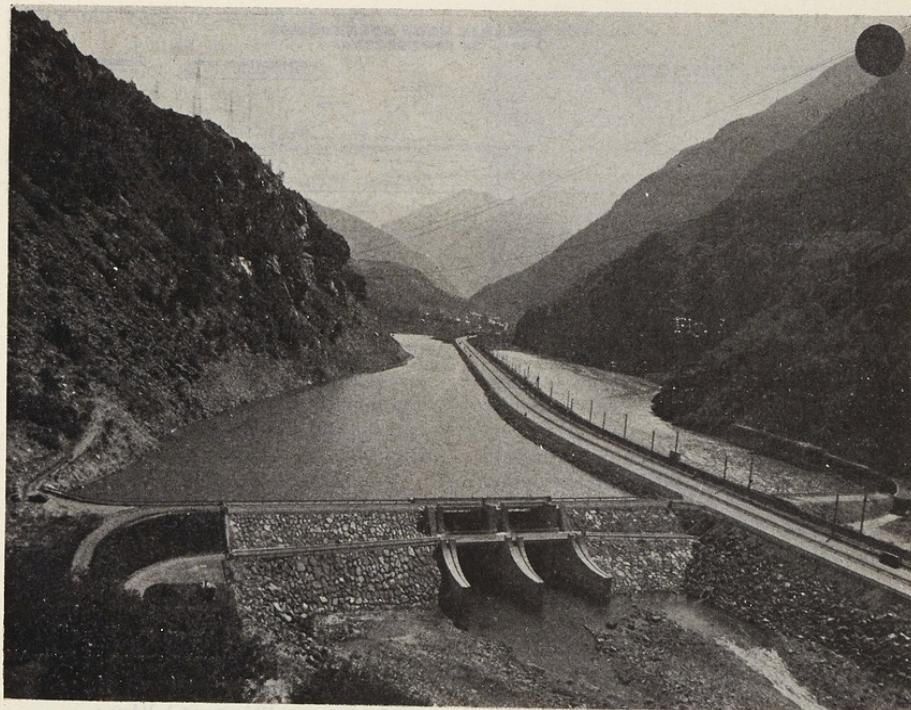


Fig. 7

D'une usine d'abord équipée pour 85 m³/seconde, comprenant deux turbines Francis de 98 MW de puissance unitaire et destinée à utiliser, avec le concours de son bassin intermédiaire d'Allevard, les eaux d'été et les lâches d'hiver du réservoir du Mont-Cenis, on est passé à une usine suréquipée (220 m³/seconde) dotée maintenant de deux groupes réversibles (pompes-turbines) de 240 MW de puissance unitaire capables de transférer 170 m³/seconde sur 250 m environ de hauteur d'élévation.

L'évolution des idées, des techniques et des besoins, pendant les quinze années de mise au point du projet ont ainsi transformé une opération hydraulique classique en une opération mixte, gravitaire-transfert d'énergie par pompage.

Mais c'est essentiellement en 1968 que le tournant a été pris, lorsque les notions



Fig. 8

de productibilité concentrée sur les mois d'hiver, de puissance garantie et de puissance de pointe disponible aux moments critiques de charge du réseau, ont été mises en valeur par les nouvelles conditions économiques du marché de l'énergie.

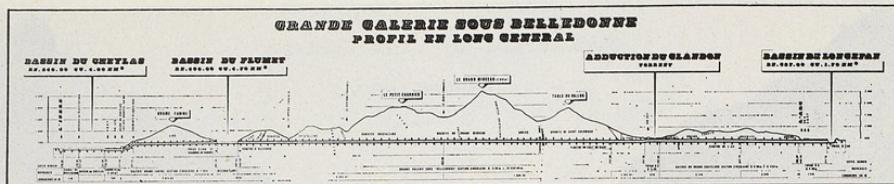


Fig. 9

Ce tournant a eu comme conséquences principales sur le projet :

- la création d'un bassin inférieur de capacité suffisante pour, à la fois, amortir, avant restitution à l'Isère, les débits portés de 85 à 220 m³/seconde et concentrer les volumes d'eau à remonter en heures creuses dans le bassin intermédiaire.
- le renforcement de la capacité d'accumulation de ce dernier bassin, initialement conçu pour des éclusées hebdomadaires, afin d'assurer le stockage des volumes d'eau remontés ;
- la création d'une retenue artificielle, en tête de la dérivation de l'Arc, permettant de démoduler le débit maximum restitué par la chute d'Echaillon (90 m³/s) et de ramener ainsi la débitance de la galerie d'aménée à une valeur compatible avec le coût d'ouvrages souterrains importants (63 m³/s moyen) ;
- le surdimensionnement des ouvrages d'aménée à l'usine, à l'aval du bassin intermédiaire, pour adapter l'armement de la chute aux nouveaux critères de production de l'électricité d'origine hydraulique et répondre, si besoin était dans l'avenir, à l'évolution de ces critères ;
- l'enfoncement de l'usine en vue du fonctionnement des turbines en pompes.

**

PRESENTATION DE LA CHUTE

La chute Arc-Isère, raccordée directement à la troisième et dernière chute du réaménagement du cours moyen de l'Arc,

se compose essentiellement, de l'amont vers l'aval :

- 1) de la petite retenue de tête de Longepas (1,7 millions de m³) créée par la construction de digues au-dessus du terrain naturel de 300 000 m³ de volume total (fig. 10) ;
- 2) d'une première conduite circulaire enterrée en béton armé, de 1 200 m de longueur et 4,50 m de diamètre intérieur, qui permet de passer de la rive droite à la rive gauche de l'Arc (fig. 11) ;
- 3) d'un premier souterrain de 6 400 m de longueur et 5,80 m de diamètre intérieur : la galerie du Grand Chatelard, implantée parallèlement à l'Arc ;
- 4) d'une deuxième conduite enterrée, identique à la première, de 700 m environ de longueur qui franchit ainsi la vallée du Glandon et reçoit au passage, les eaux de cet affluent de l'Arc, captées par une prise en rivière, quelques centaines de mètres plus en amont, dans la limite de 8 m³/seconde (fig. 12) ;
- 5) de la grande galerie de Belledonne (19 km de longueur, 5,30 m de diamètre intérieur) ;
- 6) du bassin intermédiaire d'Allevard (4,7 millions de m³) créé par la construction d'une digue de 500 000 m³ de volume, dans la vallée du Flumet, sous-affluent de l'Isère (fig. 13) ;
- 7) d'un troisième souterrain de 3 800 m de longueur et 7,50 m de diamètre intérieur : la galerie de Bramefarine ;
- 8) d'une cheminée d'équilibre souterraine, non déversante, de 92 m de hauteur et 16 m de diamètre intérieur ;

9) d'une conduite forcée souterraine, blindée, de 5,60 m de diamètre intérieur placée dans un puits incliné à 90 % de pente de 470 m de longueur ;

10) d'une usine constituée par deux puits parallèles reliés entre eux à divers niveaux, de 66 m de profondeur et 19,50 m de diamètre intérieur, creusés dans le rocher en place et au fond desquels sont disposées les deux pompes-turbines ;

11) d'un canal de fuite enterré en béton armé de 50 m² de section intérieure et 720 m de longueur ;

12) du bassin inférieur, de 4 millions de m³ de capacité, obtenue à la fois par creusement dans les alluvions de la plaine de l'Isère et par la construction de digues au-dessus du terrain naturel ;

13) enfin, d'un chenal de restitution à l'Isère (fig. 14).

OUVRAGES CARACTERISTIQUES DE LA CHUTE EXECUTION DES TRAVAUX

Nous ne présentons, ci-après, que les ouvrages qui offrent un intérêt particulier tant au plan de la conception que des difficultés rencontrées pour les exécuter.

On peut, ainsi, distinguer :

- les ouvrages souterrains et, parmi eux, les galeries à faible ou à forte pente et les puits ;
- le barrage et la retenue du Flumet ;
- l'ouvrage de fuite de l'usine ;
- les groupes réversibles (pompes-turbines).

**

1) LES OUVRAGES SOUTERRAINS.

1.1. *Les galeries à faible pente :*

Les 29 kilomètres de galerie de la chute ont été creusés, sensiblement, pour moitié de façon traditionnelle, avec usage de



Fig. 10



Fig. 11

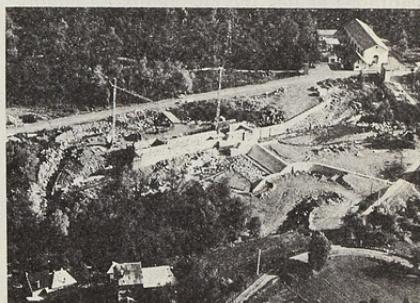


Fig. 12



Fig. 13



Fig. 14

l'explosif et pour moitié au moyen d'une machine foreuse (tunnelier).

Ce partage est le résultat de la consultation des Entreprises auxquelles il avait été laissé le choix de la méthode de creusement, en partant de l'étude géologique fournie par E.D.F. et de deux devis quantitatifs, ajustés pour tenir compte des avantages et des inconvénients de chaque procédé et ne pas pénaliser l'un ou l'autre.

La galerie du Grand Chatelard et le tronçon amont de la grande galerie sous Belledonne avaient à traverser, en grande partie, des terrains cristallins (gneiss, granite) dont les paramètres de résistance à la compression, d'anisotropie, de dureté, d'abrasivité et de forabilité n'étaient pas favorables, à priori, à la mise en œuvre d'un tunnelier.

De plus, les effets de fretteage et de décompression de la roche introduits par

la forte couverture pouvaient handicaper celui-ci.

Les Entreprises se sont donc tout naturellement orientées vers la méthode traditionnelle (fig. 15).

Par contre, pour le tronçon aval de la galerie de Belledonne, la présence des schistes cristallins, sur la plus grande partie du tronçon, autorisait le creusement au tunnelier, d'autant que l'Entreprise adjudicataire disposait de la machine Wirth qui venait d'exécuter, avec succès, sur 4 500 m de longueur et en partie à travers les gneiss, la galerie d'aménée de la chute de l'Echaillon (fig. 16).

De même, pour forer la galerie de Bramafarine dans les marnes schisteuses et les calcaires marneux, le tunnelier constituait une solution valable, compte tenu du grand diamètre de l'ouvrage et bien que sa longueur fut un peu faible au regard de l'amortissement du matériel engagé.

LA GRANDE GALERIE DE BELLEDONNE

La grande inconnue résidait dans le creusement de la grande galerie de Belledonne, deuxième souterrain alpin exécuté à partir des deux extrémités, sans point d'intervention intermédiaire, après le tunnel ferroviaire du Simplon (19,700 km) foré au début du siècle.

La longueur des attaques (10 et 8 km) posait déjà naturellement des problèmes ardu斯 d'organisation et d'intendance pour l'évacuation des déblais, l'alimentation en énergie des engins, l'approvisionnement des matériaux, la ventilation.

Mais il y avait aussi à tenir compte, en plus, des phénomènes de décompression du rocher et de la forte élévation de température sous une couverture atteignant 2 000 m au cœur du massif de Belledonne.

En fait, la décompression enregistrée essentiellement sur le tronçon amont de la galerie a été du même ordre que celle rencontrée précédemment lors du creusement de la galerie d'Isère-Arc ou du tunnel

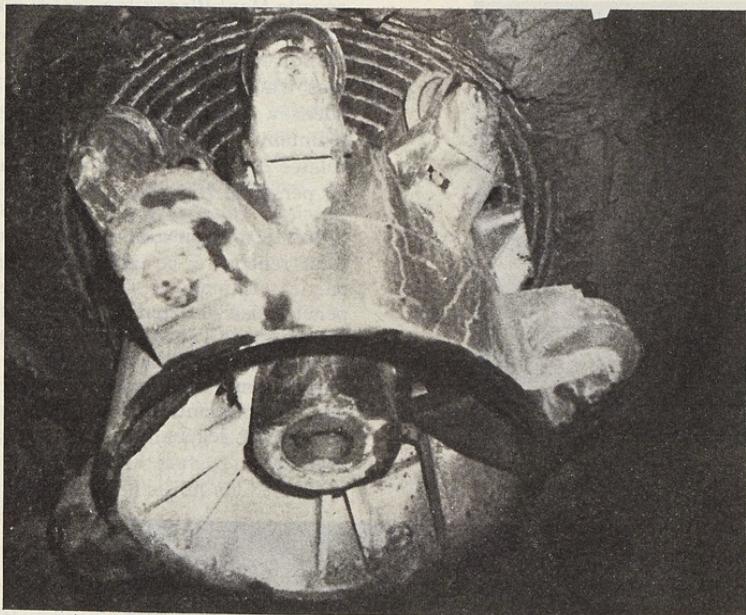


Fig. 15

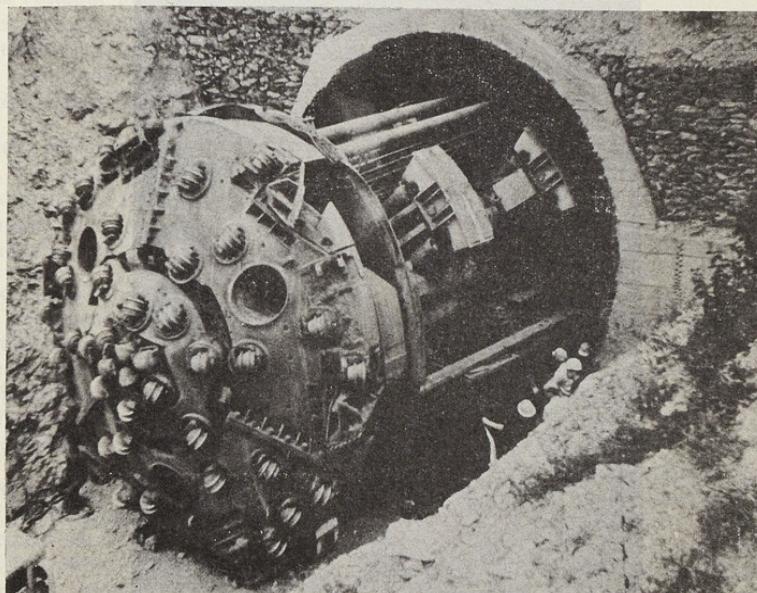


Fig. 16



Fig. 17

sous le Mont-Blanc : la mise en place systématique, soit immédiatement après le tir, soit quelques heures plus tard, de boulons d'ancrage de 2 à 3 mètres de longueur, a permis, en frettant les parois, de maintenir en place les écailles de roche éclatée et de prévenir ainsi tout accident de personne (fig. 17).

Sur le tronçon aval, le tunnelier a surtout rencontré ce phénomène dans la partie terminale de l'attaque, lorsqu'il a pénétré dans les terrains cristallins, à la rencontre de l'autre attaque : la machine ne permettant pas la mise en place de boulons, la tenue des parois et la protection du personnel ont été assurées par la pose de cintres légers et de treillis soudés (fig. 18).

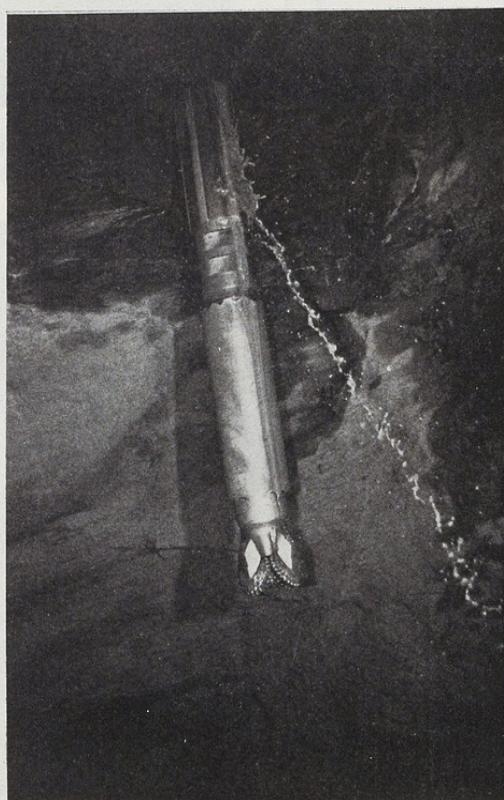


Fig. 18

Quant à la température, elle s'est révélée inférieure aux prévisions (35° à l'intérieur de la roche, contre 42° annoncés) : mais l'atmosphère pratiquement saturée d'humidité du tronçon amont et les calories dégagées par le tunnelier à l'aval, ont imposé la mise en œuvre d'une réfrigération permanente, par climatiseurs de 500 000 et 250 000 frigories/heure déplacés périodiquement ou avançant en même temps que la machine.

Quatre ans et demi ont été nécessaires pour réaliser ce souterrain de 18,200 km de jour à jour et de 6,00 m de diamètre environ : les difficultés n'ont pas manqué, notamment au passage des accidents géologiques que laissait prévoir l'étude faite à partir de l'extérieur, faute d'une galerie de reconnaissance qui aurait été beaucoup trop onéreuse.

Si les abondantes venues d'eau (jusqu'à 500 litres/seconde), la décompression et le franchissement de tronçons très fracturés souvent aggravé par la présence de la mylonite — cette roche cristalline finement broyée et sans cohésion — ont été le lot de l'attaque amont, le tunnelier, de son côté, tout en bénéficiant d'un terrain remarquablement sec, s'est heurté, lui aussi, à des problèmes de traversée d'accidents géologiques (fig. 19).

Les deux premiers ont demandé le creusement, à l'explosif, d'une galerie de secours contournant la machine pour venir, par l'amont, dégager la tête de forage bloquée par le terrain éboulé.

Les accidents suivants ont pu être franchis en appliquant le principe de la méthode traditionnelle de protection par enfilage de rails, appuyés à l'arrière sur un soutènement par cintres lourds et enfouis suffisamment loin dans le rocher en avant de la tête de forage (fig. 20 et 21).

Ce progrès a été rendu possible par des forages de reconnaissance exécutés systématiquement sur le côté de la machine et dont l'interprétation des paramètres d'avancement permettait de localiser les passages de mauvais terrain à venir.

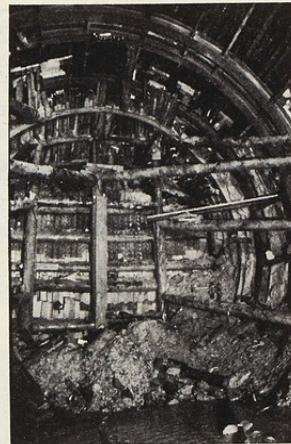


Fig. 19

EXPLOSIF ET MACHINE FOREUSE

Quels enseignements peut-on tirer de la comparaison des deux méthodes de creusement ?

Pour l'attaque amont, le meilleur avancement réalisé a été de 15,50 m/journée de 24 heures, l'avancement moyen hors accidents géologiques étant de 8,70 m/jour et l'avancement calculé sur 7 000 m de galerie, toutes difficultés comprises (accidents, boulonnage des parois, venues d'eau, etc.) de 7 m/jour.

Pour l'attaque aval, on trouve 36,60 m/journée de 24 heures pour le meilleur avancement, 15,50 m/jour pour l'avancement moyen hors accidents géologiques et 9,60 m/jour pour l'avancement, toutes difficultés incluses, calculé sur 9 600 m de galerie.

Dans l'exécution de la galerie de Bramafarine, le tunnelier Robbins, en 8,10 m de diamètre de dérochement a réalisé un avancement moyen, toutes difficultés comprises, de 9,20 m/journée de 24 heures, avec un avancement record de 21,35 m/jour (fig. 22 et 23).

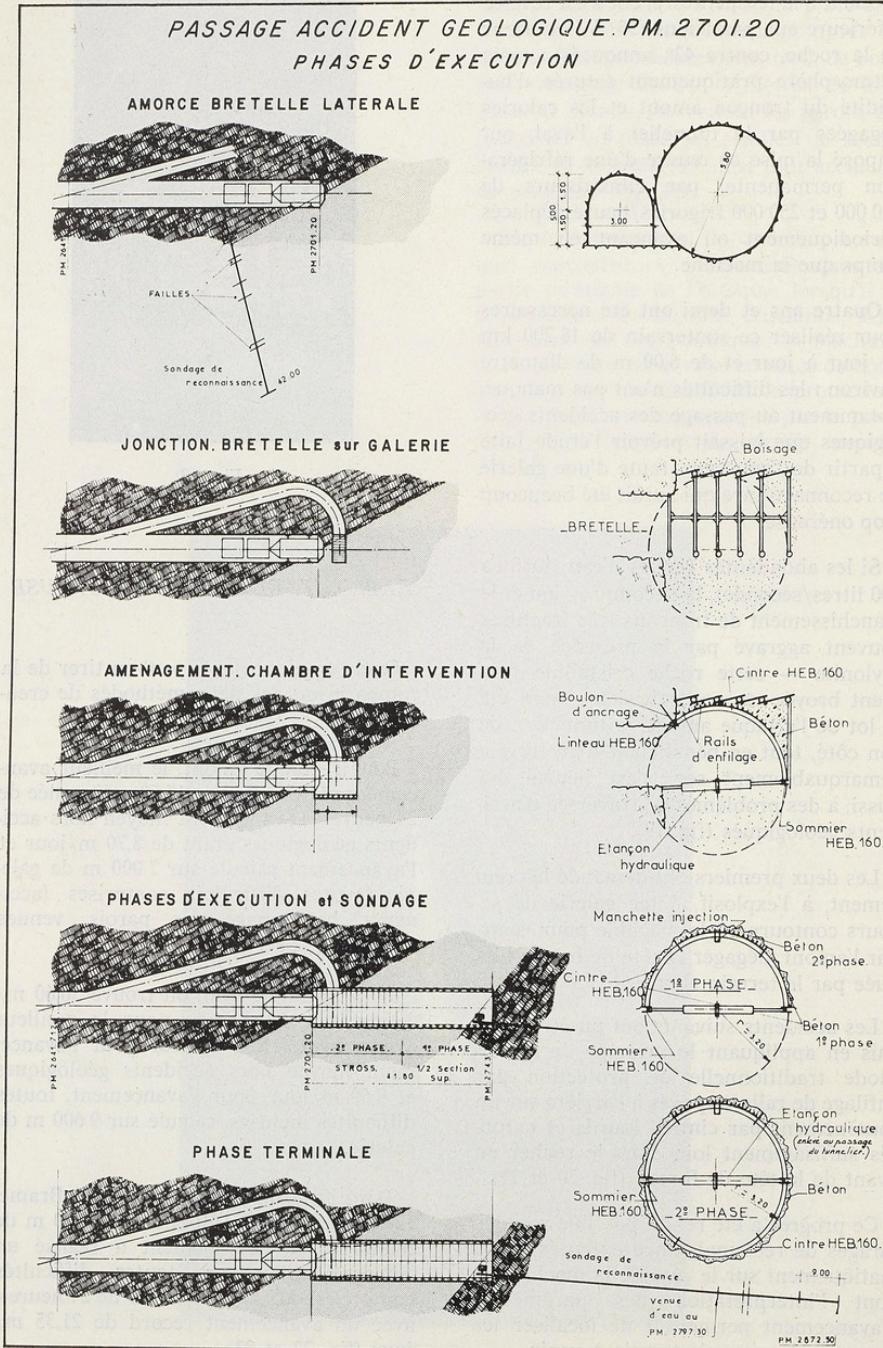


Fig. 20

Le creusement d'une section de plus de 50 m², dans un terrain plutôt médiocre et même très mauvais sur le 1/5^e de la longueur de la galerie, n'aurait pas été mené à bien, par la méthode traditionnelle, sans le soutènement probablement continu, qu'aurait exigé la protection du personnel.

Le tunnelier, en supprimant les ébranlements du rocher, a permis de limiter ce soutènement de protection à la clef de voûte, par épingleage d'un métal déployé, au moyen de boulons mis en place au fur et à mesure du déplacement de la machine.

Par ailleurs, l'absence d'explosions constituait une sécurité supplémentaire face au risque de rencontre du grisou dont les traces avaient été repérées dans la galerie de reconnaissance.

D'un modèle antigrisouteux le tunnelier était muni d'une centrale de détection coupant automatiquement les circuits électriques en cas d'alerte et, de plus, des forages de reconnaissance étaient exécutés en avant de la machine à la recherche à la fois du grisou, des venues d'eau et du mauvais terrain.

En fait aucune poche de ce gaz inflammable n'a été rencontrée par la galerie.

1.2. Les puits ou galeries à forte pente :

Les ouvrages aval de la chute comprenaient :

- le puits vertical de la cheminée d'équilibre,
- le puits ou la galerie inclinée de la conduite forcée,
- les puits ou galeries inclinées des rameaux haute et basse pression (fig. 24).

Le creusement des avant-trous nécessaires au dérochement de tels ouvrages se faisait habituellement, à l'explosif, en remontant à partir d'une galerie inférieure : la méthode avait l'inconvénient d'être lente (15 à 20 cm/heure), de mettre en cause la sécurité des ouvriers, notamment en terrain de qualité médiocre et de poser de difficiles problèmes de ventilation du front de taille.

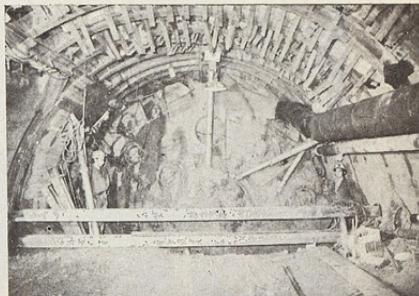


Fig. 21

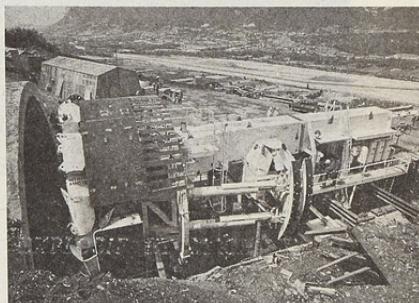


Fig. 22

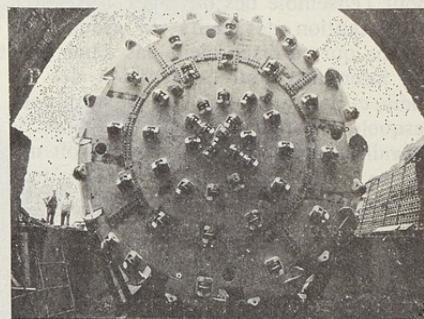


Fig. 23

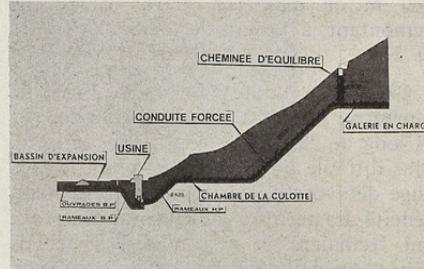


Fig. 24

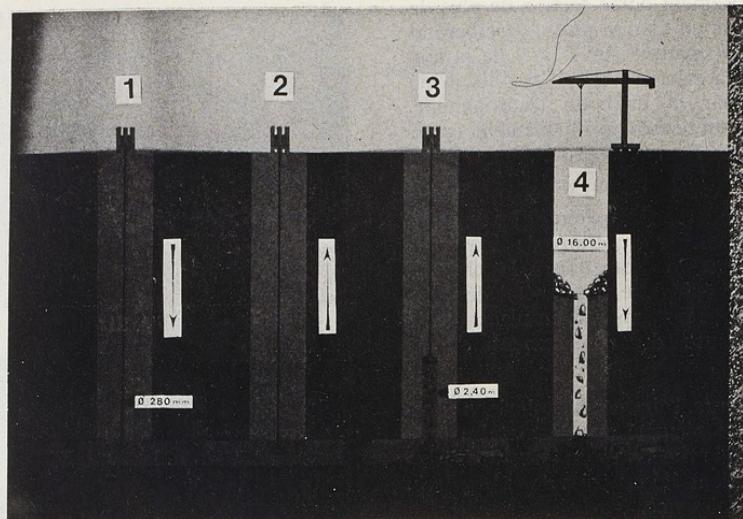


Fig. 25

Le procédé « Raisse-Drill » de la Société américaine Robbins, introduit en France en 1969, a été mis en œuvre à Arc-Isère pour l'ensemble des ouvrages à exécuter, à l'exception des puits de groupes de l'usine qui ne disposaient pas d'une galerie inférieure pour l'évacuation des déblais, et des rameaux haute pression pour lesquels l'aménagement de chambres de travail en tête, en terrain de surcroît médiocre, aurait été beaucoup trop coûteux eu égard à leur faible longueur (fig. 25).

L'avant-trou du puits vertical de la cheminée d'équilibre a été réalisé, en une semaine, par forage au tricône classique, sur 82 m de hauteur dans des marnes et des calcaires schisteux, d'un trou-pilote de 280 m de diamètre, alésé ensuite, en remontant, à 1,80 m de diamètre (fig. 26 et 27).

Celui de la conduite forcée, de 2,40 m de diamètre, incliné à 90 % sur l'horizontale et long de 280 m environ a été beaucoup plus difficile à exécuter : en effet, le pendage défavorable de la roche, son hétérogénéité, les pertes d'eau en cours de forage qui freinaient la remontée des déblais dans l'espace annulaire, toutes ces conditions ont conduit l'Entreprise chargée des

travaux à trois échecs successifs, avant de réussir à faire déboucher le trou pilote dans la galerie inférieure.

Plus de trois mois ont été nécessaires pour cet avant-trou, dont un mois et demi consacré aux levés et recherches pour essayer de localiser, par différentes méthodes, le tracé du trou et son extrémité dont l'écart avec le point fixé par la tolérance d'exécution du puits incliné avait atteint jusqu'à 20 mètres.

L'expérience ainsi acquise permet de dire que la méthode est très valable, notamment pour les puits verticaux ou les puits inclinés de longueur modérée, surtout en terrain médiocre comme l'était celui d'Arc-Isère, où de plus la rencontre de grisou n'était pas à exclure.

Le creusement de l'avant-trou de la conduite forcée aurait demandé au moins autant de temps avec la méthode traditionnelle qui présente, par ailleurs, l'inconvénient de laisser des parois irrégulières et rugueuses freinant la chute des déblais, dans la phase des abattages pour mise à section définitive du puits ou de la galerie inclinée.



Fig. 26

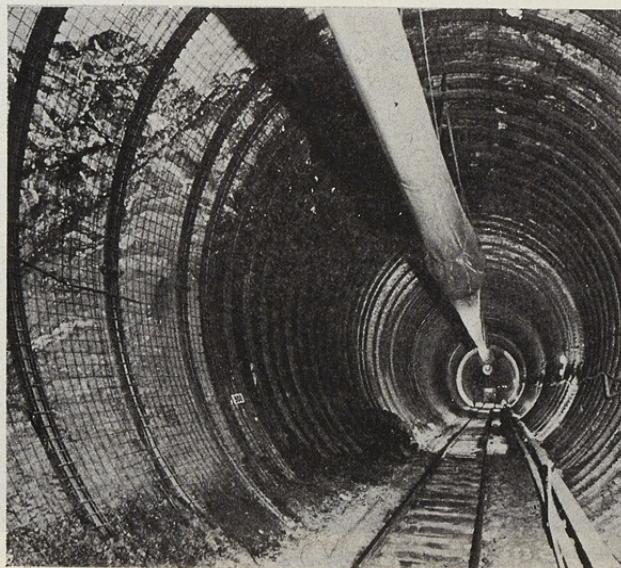


Fig. 27

2) LE BARRAGE ET LA RETENUE DU FLUMET.

Le schéma hydraulique choisi pour la chute Arc-Isère, avait fixé, pour des raisons topographiques, la retenue du Flumet, à l'emplacement d'un marais, à l'amont de la station thermale d'Allevard.

Le terrain naturel en place ne se prêtait guère, à priori, à la création d'une accumulation de près de 5 millions de mètres cubes d'eau derrière une digue de 18 m de hauteur, mais le site était imposé (fig. 28 a et b).

Aussi l'engagement des travaux fut-il précédé, dès 1956, de nombreuses reconnaissances et études des sols remplissant la dépression qui sépare les massifs de Bramefarine et de Belledonne.

Elles firent apparaître que le barrage était à fonder sur des dépôts lacustres composés de sables fins, limons, tourbes et argiles recouvrant les sédiments fluvioglaciaires accumulés au-dessus du substratum rocheux, le tout sur plus de 100 m d'épaisseur.

Les ouvrages furent donc dessinés pour répondre au souci primordial de stabilité, compte tenu :

— d'une part, des conditions d'exploitation de la retenue :

- marnage fréquent et important (jusqu'à 8 m),

- vidanges et remplissages rapides (de 1 à 1,50 m/heure) ;

— d'autre part, des caractéristiques mécaniques de cette fondation compres-

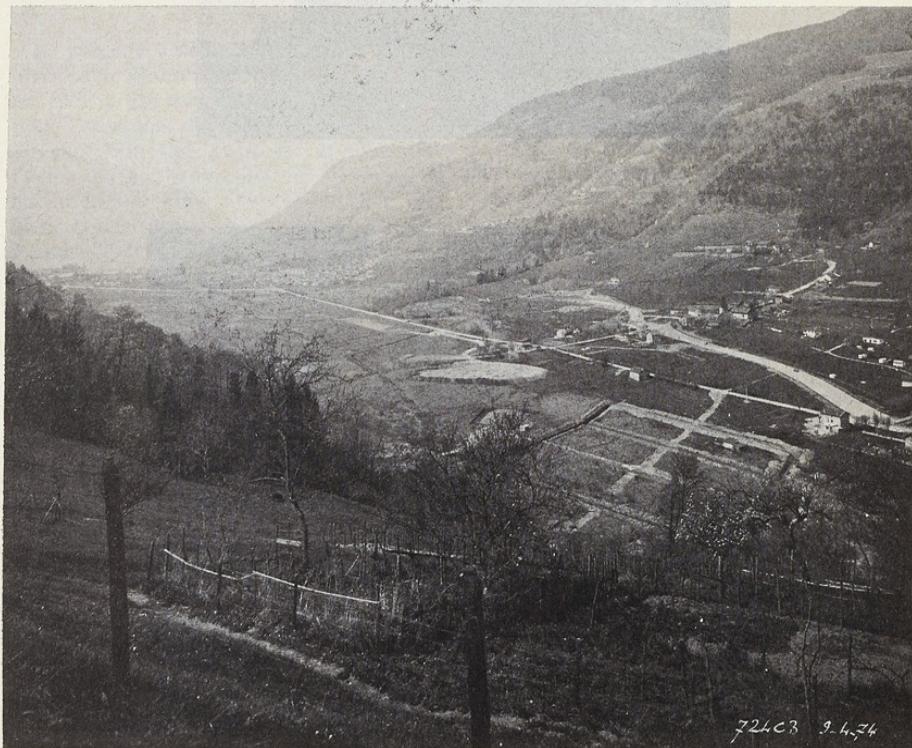


Fig. 28 a

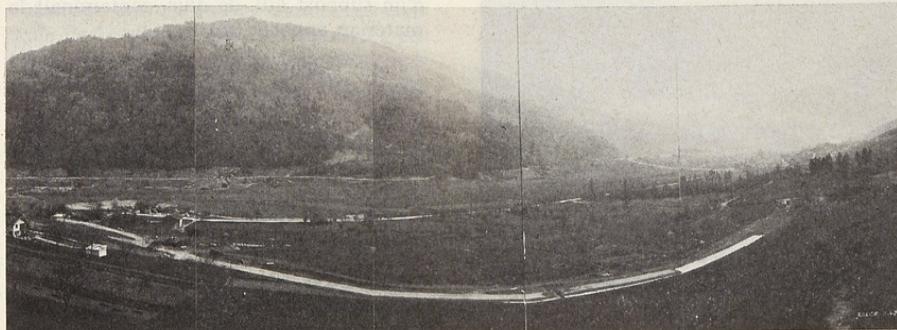


Fig. 28 b

sible et de l'existence d'un système complexe de nappes souterraines et de pressions artésiennes dont il n'était pas facile de déterminer l'évolution dans les conditions de fonctionnement ci-dessus.

Par ailleurs, les matériaux devant constituer le corps du barrage étaient à trouver sur le site pour éviter les transports coûteux : le marais a donc été creusé pour extraire ces matériaux, augmenter la capacité naturelle de la retenue de 700 000 m³ et, du même coup, remodeler les berges de manière à ce que la retenue offre le même aspect quel que soit le niveau du plan d'eau.

Le barrage présente un profil très compact, de 140 m de largeur à la base pour 18 m de hauteur maximale au-dessus de la fondation : l'organe d'étanchéité est formé par un noyau central argileux posé directement sur le sol naturel après décapage (fig. 29).

La stabilité de ce noyau est assurée par les recharges amont et aval construites, soit avec les déblais extraits de la galerie de Belledonne par le tunnelier (recharge amont), soit avec des matériaux stériles prélevés sur le site.

Des dépôts de ces mêmes matériaux, inutilisables ailleurs, contribuent encore, par leur poids propre, à la stabilité du barrage en chargeant le sol de part et d'autre de l'ouvrage pour empêcher tout

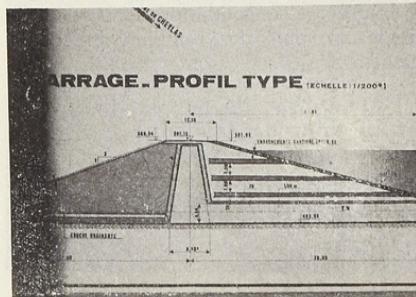


Fig. 29

soulèvement, notamment, à l'amont, lors des vidanges rapides.

Sur la plus grande partie du pourtour de la retenue les berges ont été retaillées, comme indiqué plus haut, pour obtenir l'argile nécessaire au noyau du barrage et remodeler le bassin, puis rechargées avec les déblais de la galerie de Belledonne pour stabiliser les talus suivant le principe de la recharge amont du barrage (fig. 30).

LA CONSTRUCTION DU BARRAGE

Les travaux ont été engagés au printemps de 1975. La résistance au cisaillement de la fondation du barrage étant insuffisante pour permettre la construction rapide de l'ouvrage, la mise en place des remblais s'est déroulée suivant un

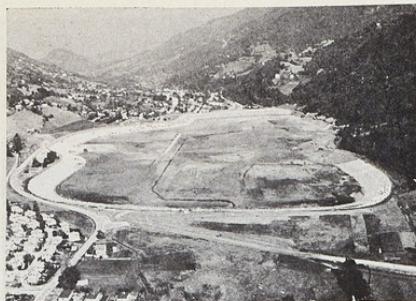


Fig. 30

programme découpé en phases successives de chargement et d'attente, de façon à assurer la consolidation, d'abord de la fondation, puis des remblais précédemment exécutés.

Pratiquement, du fait du climat local et des difficultés rencontrées en cours d'exécution, cinq phases de chargement ont été nécessaires pour atteindre la cote du couronnement et les temps de consolidation prévus ont ainsi été largement respectés.

Ces difficultés se sont présentées dès le départ, lors de la mise en place de l'argile du noyau au contact d'un terrain naturel dont la teneur en eau résiduelle trop élevée, malgré l'assainissement général du marais et le drainage systématique de la fondation, interdisait l'exécution par couches minces du fait du défaut de réaction

d'un support qui, de plus, contaminait le matériau apporté (fig. 31).

Cette teneur en eau gênante se retrouvait dans l'argile, elle-même, extraite des berges de la retenue et de nombreuses manipulations ont été nécessaires pour la ramener, par traitement de dépôts constitués par beau temps et protégés des intempéries, à une valeur compatible avec la mise en place dans les règles de l'art.

Les autres matériaux, provenant également, en grande partie du site, ont dû être, de même, améliorés pour atténuer leur hétérogénéité.

C'est dire l'importance prise, au cours des travaux, par les contrôles systématiques de qualité et les précautions dont s'est entourée l'exécution d'un tel ouvrage qui a pu, cependant, être mené à bien, sans allongement trop sensible des délais, malgré les mauvaises conditions atmosphériques des campagnes 1975, 1976 (fin d'année) et 1977.

Le comportement du barrage, au cours de sa construction, peut être considéré comme satisfaisant : certes, des tassements verticaux plus importants que ceux donnés par le calcul ont été enregistrés (ils pourront atteindre 2 m en certains points à l'achèvement de la consolidation), mais les déplacements horizontaux ont, par contre, été peu significatifs.

La mise en eau de la retenue a commencé en octobre 1978 : les ouvrages sont

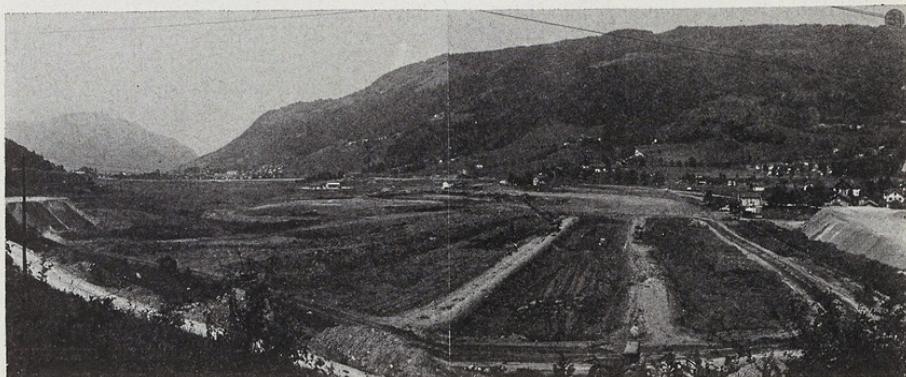


Fig. 31

dotés des moyens indispensables au contrôle de l'évolution des tassements et déformations et de la piézométrie ainsi qu'à la détection des fuites éventuelles et de tout mouvement anormal qui pourrait être la conséquence de la fatigue des matériaux, sous l'effet répété des vidanges rapides notamment.

3) L'OUVRAGE DE FUITE DE L'USINE.

Les choix faits pour l'implantation, d'une part, des puits de l'usine dans le rocher en place, en limite du remplissage alluvionnaire de la plaine de l'Isère, d'autre part, du bassin de démodulation et de stockage le long de la rivière, à l'écart des terrains agricoles, industriels ou urbani-sés, ont imposé un ouvrage de fuite long d'environ 700 m, qui franchit un chemin départemental, la voie ferrée Grenoble-Montmélian et l'oléoduc Méditerranée-Rhône.

La solution conduite enterrée en charge, enfoncee dans la nappe phréatique à 17 m au-dessous du sol, présentait l'avantage, par rapport au canal à ciel ouvert, de rendre l'ouvrage, en exploitation, indépendant de cette nappe, de le mettre à l'abri d'une occupation du lit majeur de l'Isère par une crue exceptionnelle de la rivière et de réduire enfin l'emprise du bassin, en portant sa retenue maximale à une cote supérieure à celle des voies S.N.C.F. (fig. 32).

L'appel d'offres avait été établi sur la base d'une exécution de l'ouvrage, en place, après rabattement de la nappe, par pompage, à l'abri d'un rideau de palplanches planté de chaque côté de la fouille.

Les entreprises consultées proposèrent des variantes dont une solution par éléments de conduite préfabriqués et mis en place par flottaison et échouage en fond d'une fouille ouverte dans la nappe, sans rabattement de celle-ci.

L'intérêt qu'il y avait à assurer le fonctionnement normal des puits prélevant dans la nappe à des fins industrielles ou domestiques, à éviter tout tassement du sol sous les fondations des bâtiments in-

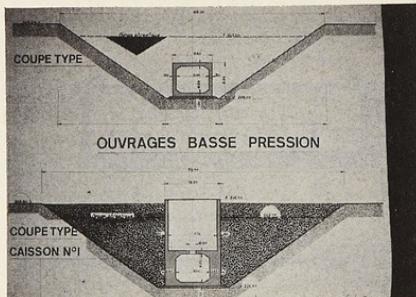


Fig. 32

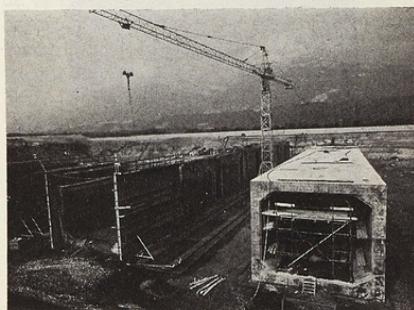


Fig. 33

dustriels ou des habitations voisines de l'ouvrage et à perturber le moins possible les cultures, nombreuses alentour, fit retenir cette solution.

Construits à l'abri d'une enceinte étanche implantée dans le bassin inférieur, à l'emplacement de l'ouvrage de prise et de rejet, les éléments en béton armé convenablement lestés ont été amenés, par flottaison à l'aplomb de leur emplacement définitif (fig. 33).

Leur assise, en plafond de la fouille ouverte dans la nappe par des dragues su-cessives, étant préalablement réglée par des hommes-grenouilles, les caissons étaient alors échoués par modification de leur lest jusqu'à reposer, d'abord, à frottement doux afin de permettre leur assemblage et la compression d'un joint d'étanchéité, puis définitivement, après alignement sur l'axe théorique de l'ouvrage de fuite (fig. 34).

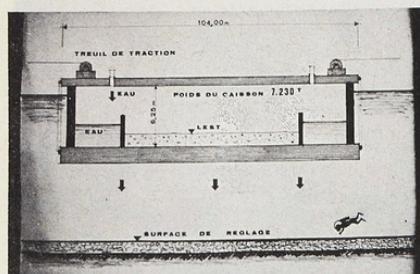


Fig. 34

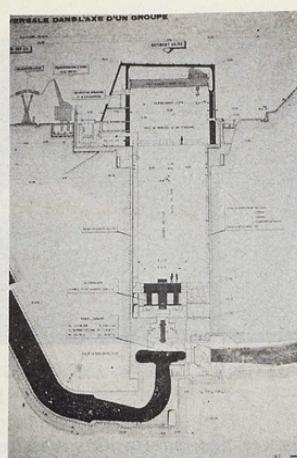


Fig. 35

Les travaux ont été menés à bien par l'entreprise adjudicataire qui maîtrisait parfaitement la méthode qu'elle avait proposée, malgré les difficultés rencontrées du fait de la mise en suspension, en eau morte, des éléments fins par les dragues suceuses et de la formation d'une importante couche de vase, par redéposition de ces éléments, après arrêt du dragage.

LES POMPES-TURBINES (groupes réversibles).

Les problèmes que pose le transfert d'énergie par pompage sont étudiés depuis de nombreuses années et ont donné naissance à divers modèles dont les plus répandus sont, de nos jours, les pompes-

turbines ou groupes réversibles, c'est-à-dire pouvant tourner en inversant le sens de rotation.

Les turbines Kaplan et les groupes-bulles ont été, en fait, les premiers groupes réversibles mais leur domaine d'application était limité à 20 m de hauteur de chute maximale.

Au-delà et jusqu'à 500 m les turbines Francis classiques, adaptées au fonctionnement en pompe, constituent actuellement les pompes-turbines dites mono-étage à distributeur réglable (fig. 35).

C'est à cette catégorie de machines qu'appartiennent les deux groupes de l'usine du Cheylas.

La bâche spirale, l'avant-distributeur et le distributeur réglable, sont conformes aux caractéristiques des turbines Francis : seule, la roue, plus plate, d'un diamètre plus grand, munie d'aubes moins nombreuses mais plus longues et profilées avec soin a été modifiée en vue du fonctionnement en pompe.

L'enfoncement anti-cavitation de la roue (ici, 39 m au-dessous du niveau aval constitué par la cote minimale du bassin inférieur en exploitation) a déterminé la profondeur des puits de l'usine.

Les groupes réversibles du Cheylas tournent à 300 tours/minute dans les deux sens et les débits d'équipement sont de 114 m³/seconde, par groupe, en turbinage et 80 m³/seconde en pompage.

Le démarrage en pompe s'effectue à roue dénoyée par injection d'air comprimé, ce qui permet de réduire le couple nécessaire et l'appel de courant sur le réseau.

Les pompes-turbines représentent des compromis, les roues travaillant alternativement en pompe et en turbine n'atteignent, en effet, pas les mêmes rendements à vitesse égale selon le sens de rotation : le rendement pompe est prioritaire au détriment du rendement turbine (3 à 4 points de moins pour les groupes du Cheylas) et il est optimal pour une ouverture du distributeur égale à 7 ou 8/10^e de l'ouverture totale.

L'avenir des pompes-turbines est lié au développement des équipements de haute chute qui sont intéressants par la réduction de capacité et de superficie des réservoirs qu'ils permettent.

Les groupes réversibles fonctionnant sous de telles chutes sont du type multi-étages sans possibilité de réglage de la puissance de l'usine, sinon au coup par coup, par quantités égales à la puissance d'un groupe (actuellement 150 à 200 MW), inconvenients heureusement assez bien supporté par le réseau français, grâce à son interconnexion.

La conception de ces machines, déterminées par la vitesse de rotation compatible avec la capacité des alternateurs-moteurs à évacuer les calories développées dans leur rotor, par les possibilités d'enfoncement des groupes sur le site et par l'importance du couple de démarrage en pompe à roue noyée (jusqu'à 70 % du couple nominal), est certainement appelée à évoluer.

Dans un premier temps, les constructeurs se penchent sur la mise au point de pompes-turbines à deux étages et deux distributeurs réglables qui équiperont, un jour, les chutes comprises entre 500 et 1 000 m.

En attendant ces progrès, l'importance accrue du critère « puissance » des installations de production d'électricité d'origine, a conduit Electricité de France à projeter, pour le suréquipement de la chute de Bissorte, en Maurienne, des groupes réversibles à cinq étages, du type de ceux qui fonctionnent déjà, sous 900 m de chute, à l'usine de la Coche-Ste-Hélène en Tarentaise et de ceux qui seront installés à Grand-Maison, dans l'Oisans.

INFLUENCE SUR L'ENVIRONNEMENT

La création d'une chute hydroélectrique comme Arc-Isère qui détourne de son cours naturel une rivière importante, crée des plans d'eau et creuse des souterrains à proximité d'agglomérations ou

d'installations industrielles ou autres, a des conséquences certaines sur l'environnement des communes concernées, dont une douzaine d'entre elles, se sont groupées en une association et ont introduit un recours en Conseil d'Etat contre le décret d'utilité publique de 1976.

Ces conséquences se sont faites ou se feront sentir à différents stades de l'exécution du projet :

— *au cours des études préalables, d'abord* : ainsi, la présence des sources thermales d'Allevard, à proximité du tracé de la galerie sous Belledonne a imposé le creusement d'une galerie de reconnaissance longue de 1 100 m qui a drainé effectivement une partie des eaux circulant dans le massif sans influencer, toutefois, le débit des sources.

Un traitement de terrain par injections au droit de ces venues d'eau a été réalisé avant réalisages de la galerie par le tunnelier et un revêtement complet en béton sera exécuté sur les 1 100 m concernés, sur lequel viendra prendre appui un traitement complémentaire destiné à rejeter à l'intérieur du massif les venues d'eau qui subsistent actuellement.

— *au cours des travaux, ensuite* : ainsi ont été asséchées par le creusement de la galerie sous Belledonne la quasi-totalité des sources d'eau potable alimentant la commune de St-Etienne-de-Cuines et, à un degré moindre, la galerie de Bramafarine a tari des sources privées appartenant à des propriétaires d'Allevard et de St-Pierre-d'Allevard.

Des travaux importants ont dû être entrepris pour rechercher et capter de nouvelles sources, renforcer et refaire une partie du réseau d'adduction communal dans le cas de St-Etienne-de-Cuines où le débit restitué, à peu près équivalent à celui dont disposait la commune avant le creusement, n'est cependant plus que le tiers environ du débit potentiel économiquement utilisable que renfermait le massif.

— *à la mise en service des ouvrages, enfin* : apparaîtront alors, à plus ou moins

court terme, les influences réelles du projet sur :

- *l'hydrologie des bassins de l'Arc et de l'Isère*, le débit laissé dans l'Arc variant, en étage d'hiver, de $4,5 \text{ m}^3/\text{seconde}$, à St-Jean-de-Maurienne, à $9 \text{ m}^3/\text{seconde}$ au niveau de la restitution de la chute Isère-Arc, environ 25 km plus à l'aval.

Au-delà, le débit de l'Arc retrouvé bénéficiera de la régularisation apportée par le réservoir de tête de Tignes à travers la chaîne d'usines de la Tarentaise.

L'Isère étant elle-même régularisée par le réservoir de Roselend, à partir de la restitution de l'usine de La Bathie, on peut avancer que l'influence de la dérivation de l'Arc sur le bassin de cette rivière sera peu sensible à l'aval de son confluent avec l'Arc ;

- *les eaux de surface et les eaux souterraines* : en Maurienne, les utilisations de l'Arc à caractère agricole et piscicole étant faibles, celles à caractère énergétique n'intéressant que deux usines, dont une, propriété d'E.D.F., et celles à caractère industriel étant inexistantes, les conséquences de la réduction de débit de la rivière devraient être pratiquement nulles sur les 25 km concernés.

Au plan de la nappe phréatique dans laquelle les pompages pour utilisations industrielles sont limités (usine Pduk de La Chambre essentiellement), les craintes sont très modérées, le lit de l'Arc, généralement colmaté et étanche, étant perché au-dessus des nappes de ses affluents et des nappes de versant.

Au niveau de l'usine du Cheylas, la modulation à travers le bassin inférieur des débits restitués, avant rejet à l'Isère, ne créera pas de perturbation à l'aval ; seule la nappe phréatique pourra être influencée dans un sens ou dans l'autre, par les variations du plan d'eau dans le bassin ;

- *les débits solides et la stabilité du lit de l'Arc* : le charriage de la rivière et l'érosion du lit seront évidemment réduits et cet état de fait pourrait freiner, à long terme, l'écoulement d'une forte crue.

De même, les dépôts accumulés par les laves torrentielles des affluents de l'Arc à leur confluent, seront facilités par la réduction de débit, bien que ces accumulations se produisent essentiellement au cours des orages d'été, alors que les hautes eaux de printemps du bassin versant non capté par la chute de l'Echaillon auront contribué, quelque peu, au nettoyage du lit de l'Arc.

Néanmoins, des problèmes se poseront et un dispositif de surveillance de la rivière par photos aériennes et levés terrestres est en place depuis quelques années déjà et sera reconduit, évidemment, bien après la mise en service de la chute ;

- *la pollution*, par les effluents domestiques notamment, lesquels devraient cesser rapidement si le programme de construction de stations d'épuration et d'usines de broyage ou de compactage des ordures ménagères, qu'E.D.F. finance partiellement, ne subit pas trop de retards.

Les effluents industriels, pour leur part, sont limités aux usines Pduk et à une fabrique de pâte à papier et devraient être absorbés par le débit résiduel, sauf peut-être en étage d'hiver ;

- *enfin, les micro-climats*, susceptibles d'être modifiés par la présence des trois retenues.

Si le bassin de Longefan ne devrait pas apporter de perturbation en Maurienne, vallée sèche et ventée, celui du Flumet au regard de la formation de brouillards et celui du Cheylas vis-à-vis des cultures pourraient être générateurs de perturbations.

L'influence sur l'arboriculture, notamment, est à considérer : bénéfique, d'un côté, la masse d'eau du bassin inférieur freinant les baisses de température par son refroidissement nocturne plus lent, elle serait néfaste si se confirmait la tendance à une plus grande fréquence des chutes de grêle et des maladies cryptogamiques (tavelure) de l'arbre fruitier.

Naturellement, toutes les mesures de précaution ont été prises et tous les dispositifs nécessaires à l'enregistrement et à

l'analyse des conséquences éventuelles de la mise en service de la chute sont en place.

Ils permettront d'évaluer à leur juste valeur les préjudices subis par les intérêts particuliers des communes concernées, de les situer par rapport à l'intérêt général et probablement de démontrer que les craintes du Libre Blanc de l'Association des Maires de Maurienne n'étaient pas fondées.

PLACE DE LA CHUTE DANS LA PRODUCTION D'ORIGINE HYDRAULIQUE

La consommation nationale d'électricité pour l'année 1978 s'est élevée à 221 TWh (milliards de kilowatt-heures), dont 68 environ (soit 31,5 %) ont été fournis par les usines hydrauliques françaises.

Cette part de production est appelée, au cours des prochaines années, à diminuer et les prévisions actuelles la situent, en 1985, à un peu moins de 20 %.

C'est évidemment l'énergie d'origine nucléaire qui, se substituant à la houille blanche ainsi qu'à l'énergie d'origine thermique classique (fuel, charbon, gaz et divers), verra sa part atteindre, à cette date, un peu plus de la moitié de la production totale.

Mais en perdant progressivement son importance relative, l'énergie hydraulique gagnera en noblesse pour devenir une énergie de qualité capable d'intervenir à tout moment sur le réseau de transport afin de faire face à la demande de la consommation.

Les ouvrages de production hydroélectrique sont donc maintenant orientés vers ce type d'énergie et conçus pour transférer, dans le temps, l'énergie, dite de base, fournie par les centrales thermiques classiques et nucléaires aux heures de consommation réduite afin d'en faire une énergie, dite de pointe, disponible aux heures où le réseau est le plus sollicité.

Les stations de transfert d'énergie par pompage de l'eau, d'un bassin inférieur

vers un bassin supérieur, sont encore peu nombreuses, puisque l'énergie consommée en 1978 en France pour assurer ce transfert a été inférieure à 1 TWh (un milliard de kilowatt-heures), soit 3 % (trois pour mille) de la consommation totale.

Elles peuvent être pures, c'est-à-dire ne fonctionner qu'avec l'eau accumulée alternativement dans l'un ou l'autre des bassins (c'est le cas de Revin, dans les Ardennes) ou mixtes, le réservoir supérieur recevant, à la fois, les eaux amenées par une adduction gravitaire ou un bassin versant et celles remontées du réservoir inférieur (c'est le cas d'Arc-Isère).

La centrale du Cheylas produira annuellement 600 GWh (millions de kilowatt-heures) dont 230 fournis à partir des volumes d'eau remontés, par pompage, moyennant une consommation de 115 GWh en heures creuses.

La puissance installée, susceptible d'être mise à disposition du réseau en deux minutes et demie (les groupes étant préalablement préparés), est de 440 MW (mégawatts). Cette puissance de pointe est garantie pendant plus de 1 000 heures par an.

La chute Arc-Isère portera l'ensemble de la chaîne Arc à un niveau de productivité de 3 300 GWh (plus de 3 milliards de kWh) dont 40 % productibles en hiver, et la puissance de pointe à 1 250 MW (mégawatts) soit la puissance d'une des tranches nucléaires les plus récentes.

L'aménagement rationnel de la Maurienne aura ainsi permis de multiplier par deux la production des usines en service en 1960, en la concentrant, de plus, sur les mois d'hiver, durant lesquels l'usine fonctionnera pendant les 10 heures les plus chargées de la journée.

CONCLUSION

Certes, la puissance de la chute Arc-Isère peut paraître très modeste en regard de la puissance totale appelée par le réseau qui a atteint, le matin du 19 décembre 1978, le « mardi noir » d'E.D.F., 38 500 MW (mégawatts) et le 4 janvier

dernier, lorsqu'il a fallu recourir à des délestages localisés, 40 000 MW.

Certes, l'hydraulique est aléatoire, quelquefois capricieuse, comme en 1978 où le coefficient de productibilité est passé de 1,41 en juillet à 0,36 en novembre, valeur la plus faible enregistrée depuis la création d'E.D.F.

Certes, enfin, la situation d'Arc-Isère dans le Sud-Est d'où il est actuellement quelquefois difficile d'évacuer l'énergie produite en raison de la surcharge des lignes de transport existantes, peut faire penser que les dépenses d'investissement engagées auraient pu l'être au bénéfice d'une autre installation de production d'énergie, plus proche des gros centres de consommation ou des régions de l'hexagone à l'écart. Mais il faut aussi comprendre

que le capital investi dans la réalisation du réservoir du Mont-Cenis, en tête de vallée, était à valoriser au maximum et qu'en conséquence Arc-Isère avait sa place dans le parc hydraulique dont la puissance maximale possible était, au début de l'année 1978, de 18 600 MW soit 36 % environ de la puissance totale de l'équipement électrique français.

Il reste à espérer que la mise en service des ouvrages, échelonnée du printemps 1979 au printemps 1980, apportera à la Maurienne que l'on va séparer de la rivière qui l'a façonnée, aussi peu de perturbation que le permettra l'utilité publique d'un ouvrage destiné à produire cette électricité, sans laquelle « est-il possible de vivre autrement que d'expédients ?... » (citation).

*ACTIVITÉS DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE*

INFORMATIONS

La Cérémonie de REMISE DES PRIX ET MEDAILLES, au titre 1978, aura lieu le samedi 13 octobre 1979, dans l'Hôtel de la Société, 4, place Saint-Germain-des-Prés, 75006 Paris :

— à 14 h, pour les Médailles attribuées au titre SOCIAL.

— à 16 h 30, pour les distinctions ayant fait l'objet d'un rapport de l'un des Membres des divers Comités.

La réunion du CONSEIL d'ADMINISTRATION et de l'ASSEMBLEE GENERALE est fixée au jeudi 25 octobre à 16 h, au Siège de la Société.

MÉMORIALISONS

— à 10 h 30 pour les réunions dans
les locaux d'assemblée de l'Institut
pour les réunions Comité
de la Direction du COMITE NATIONAL
TRAVAIL et ASSOCIATION GÉNÉRALE
LH de la place de la République à Paris
au siège de la police.

La Direction des REMISES DES RÉS.
ET MÉDAILLES, le 11 mai 1941, dans les
locaux de l'Assemblée Générale
de la Société à laquelle sont dédiés
plus 12000 francs :
— à l'Institut des Médecines et Pharmacie
de la SOCIÉTÉ

Le Président de la Société, Directeur de la publication : J. BURÉ, D.P. n° 1080

Imprimerie Tardy-Quercy (S.A.) Cahors. — 90161. — Dépôt légal : III-1979
Commission paritaire n° 57497

Le Muséum de la Société D'histoire de la Révolution : T. HIST. DR. N° 1090
Institut des Lang-Groix (2A) Capotz — 30191 — Dépt. Isère : III-144
Communication à l'usage n. 27401

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

Fondée en 1801

Reconnue d'Utilité Publique en 1824

4, place St-Germain-des-Prés, 75006 PARIS

Tél. : 548-55-61 - C.C.P. 618-48 Paris



HISTORIQUE

La « SOCIETE D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE » fondée en l'AN X de LA REPUBLIQUE (1801) par NAPOLEON-BONAPARTE, Premier Consul et CHAPTAL, Ministre de l'Intérieur et premier Président de la Société, assistés de Berthollet - Brongniart - Delessert - Fourcroy - Grégoire - Laplace - Monge - Montgolfier - Parmentier... et de nombreux autres savants, ingénieurs, et hommes d'Etat,

RECONNUE D'UTILITE PUBLIQUE EN 1824,

a poursuivi son action pendant tout le XIX^e siècle, sous la présidence de Thénard - J.-B. Dumas - Becquerel et de leurs successeurs. On la voit encourager tour à tour Jacquard - Pasteur - Charles Tellier - Beau de Rochas.

Ferdinand de Lesseps - Sainte-Claire-Deville - Gramme - d'Arsonval furent titulaires de sa Grande Médaille.

BUT

LA SOCIETE S'EST PREOCCUPEE PARTICULIEREMENT, CES DERNIERES ANNEES, DE DONNER AUX MILIEUX INDUSTRIELS DES INFORMATIONS EXACTES LEUR PERMETTANT DE SUIVRE LES DERNIERS DEVELOPPEMENTS DE L'ACTIVITE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.

ACTIVITÉS

ELLE DECERNE DES PRIX ET MEDAILLES aux auteurs des inventions les plus remarquables et des progrès les plus utiles ainsi qu'aux ouvriers et contremaîtres qui se sont distingués par leur conduite et leur travail. Elle organise des CONFERENCES d'actualité scientifique, technique et économique.

Elle publie une REVUE TRIMESTRIELLE : « L'INDUSTRIE NATIONALE ».

RECRUTEMENT

La Société recrute, en fait, ses Membres (Sociétés ou Individus) parmi ses anciens Conférenciers ou Lauréats. Ils ne sont soumis à aucune obligation particulière en dehors du paiement d'une cotisation annuelle de QUARANTE FRANCS pour les Personnes ou de CENT CINQUANTE FRANCS pour les Sociétés.

