

Stock de chaleur en terre pour les systèmes solaires: résultats expérimentaux

Autor(en): **Chuard, Pierre / Chuard, Dominique / Mercier, Christophe**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

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

Heft 15-16

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74669>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Stock de chaleur en terre pour les systèmes solaires

Résultats expérimentaux

par Pierre Chuard, Dominique Chuard, Christophe Mercier et Jean-Christophe Hadorn, Lausanne

On sait que l'un des problèmes inhérents à l'utilisation de l'énergie solaire réside dans le fait que l'on en a le moins alors que l'on en a le plus besoin. C'est pourquoi les chercheurs se préoccupent de proposer des solutions propres à son stockage sur de longues périodes, à l'échelle des saisons, en quantité suffisante pour couvrir les besoins de bâtiments entiers. L'article qui suit présente les résultats d'une expérimentation sur près de deux ans d'un stock en terre.

1. Objectifs de l'essai

De manière à étudier le comportement dynamique d'un stock de chaleur en terre, dans lequel des processus de diffusion thermique sont dominants, un stockage expérimental a été réalisé en 1979 à Marly, près de Fribourg.

Quatre objectifs principaux étaient recherchés dans cet essai :

— Intérêt de la configuration proposée

Deux types de systèmes sont possibles pour constituer un échangeur de chaleur en sous-sol. On peut disposer, par battage ou forage suivant la nature du terrain, des tubes verticaux ou placer, après excavation, une série de serpents de tuyaux en couches horizontales.

On peut, de plus, isoler ou ne pas isoler l'accumulateur constitué, suivant la qualité thermique attendue du stock et suivant le système d'utilisation du stock (avec ou sans pompe à chaleur).

La disposition de l'isolant, s'il existe, doit en outre être choisie.

— Contrôle du comportement des matériaux enterrés

Peu d'expériences ont été faites sur des isolants, tubes et feuilles plastiques enterrés, soumis à des variations importantes de température. L'accent a été mis sur des matériaux bon marché.

— Estimation de l'intérêt d'un confinement hydraulique (feuille plastique) et détection de l'éventuelle thermo-migration de l'eau

Dans certaines conditions, encore mal connues, un milieu poreux non saturé peut être le siège de mouvements d'eau libre, sous forme de vapeur d'eau, mouvements dus à des gradients de température. Cette thermo-migration d'eau a été mise en évidence surtout dans les sables homogènes. Elle peut être jugée néfaste dans la mesure où l'eau libre des zones les plus chaudes aura tendance à migrer vers les zones les plus froides (périphérie du stock), asséchant ainsi progressivement la zone de l'échangeur de chaleur. La conductibilité thermique apparente

Pour le stockage saisonnier de chaleur d'origine solaire, à l'échelle d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments, les stocks de chaleur en terre semblent les plus prometteurs du double point de vue énergétique et économique.

Un prototype de stock en terre de 350 m³ est mesuré depuis mai 1979 et les principaux résultats obtenus sont décrits dans cet article.

du sol peut alors diminuer et, par conséquent, la qualité de l'échange tube-terre également.

Au contraire, elle peut être jugée bénéfique dans la mesure où la zone périphérique du stock s'assèche également et crée une enveloppe aux qualités isolantes améliorées.

Il est actuellement très difficile de prédire, dans tous les cas, s'il y aura ou non thermo-migration d'eau et quels seraient ses effets éventuels sur le comportement thermique du stock.

— Base de validation pour des modèles de calcul

Aucun résultat sur de tels prototypes n'ayant encore été publié, la validation des modèles de calcul simplifiés était impossible du fait de la méconnaissance théorique des phénomènes thermo-hydrauliques dans un sol non saturé (il n'existe donc pas de modèles complexes pouvant servir de référence).

Le premier objectif ne peut être valablement atteint que si l'on dispose d'un modèle validé permettant d'étudier différentes configurations de systèmes.

La thermo-migration de l'eau étant très fortement dépendante de la nature du terrain, les conclusions tirées à partir d'un prototype ne peuvent être que partielles.

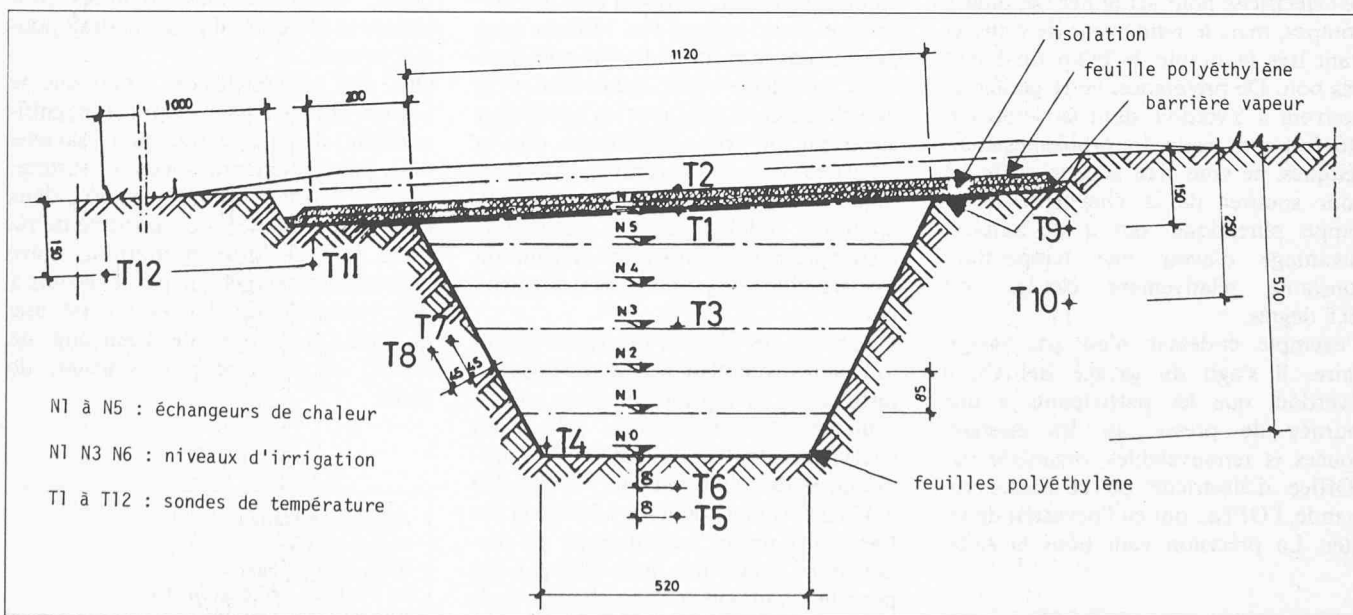


Fig. 1. — Coupe verticale du stock et position des sondes de température.



Fig. 2. — Vue générale du stock excavé. Pose des feuilles polyéthylène.

2. Description du prototype

Afin d'obtenir des résultats significatifs pour des tailles plus importantes, un volume de stock de 350 m³ environ a été choisi pour le prototype. Le stock a été creusé dans un gravier sableux argileux contenant des blocs, jusqu'à une profondeur maximum de 5,70 m. La largeur de l'excavation à la base est de 5,20 m et au sommet de 11,20 m (fig. 1). Trois couches d'une feuille polyéthylène de 0,2 mm ont été posées sur le fond et les bords de la fouille de manière à garder la zone centrale d'échange aussi humide que possible, afin de maintenir élevées les propriétés thermiques du sol et la qualité du contact tube-terre (fig. 2).

Un échangeur de chaleur d'une longueur totale de 900 m a été posé, lors du remblayage de l'excavation, en 5 couches distantes de 0,85 m. Chaque couche est formée de deux serpentins imbriqués de tuyaux en butylène (diamètre: 17 mm/13 mm).

La distance moyenne entre tuyaux est de l'ordre de 50 cm. On a donc disposé 1 m de tuyau pour environ 0,425 m³ de sol.

De plus trois niveaux de tuyaux perforés permettent d'irriguer le stock pour éviter un éventuel dessèchement.

Au sommet du stock, 30 cm d'isolation constituée par du polystyrène expansé de récupération ont été placés et séparés du stock par une barrière de vapeur en aluminium.

L'isolation thermique est protégée de l'eau d'infiltration par une feuille de polyéthylène et débordé de 2 m sur les côtés du stock. L'isolation a été disposée en 2 couches croisées de 15 cm chacune, puis recouverte de 70 cm de remblai et terre végétale.

Il n'y a pas de nappe phréatique proche de la surface dans la zone d'essai.

Douze sondes de températures (thermistors), disposées dans la zone d'échange, la zone périphérique et en zone non perturbée, ont été mises en place (fig. 1) dans des tubes plastiques pour permettre leur remplacement.

Notons que ce dispositif peut influencer quelque peu les mesures (conduction dans les tubes).

Le coût total du prototype était d'environ 17 500 francs suisses en 1979, soit un coût spécifique d'environ 50 fr./m³, comprenant l'excavation et le remblayage, les feuilles plastiques, les serpentins, l'isolation, la barrière de vapeur et le circuit externe de connection au système de charge.

3. Système de charge du stock

Une configuration équivalente à environ 40 m² de capteurs solaires double vitrage a été installée, soit une chaudière électrique de 24 kW de puissance maximum, pilotée par 3,2 m² de capteurs dis-

posés plein sud et inclinés à 45° sur l'horizontale.

Le système a été opérationnel de juillet 1979 à avril 1981, date à laquelle la foudre a détruit toutes les sondes enterrées. Durant cette période de deux ans environ, le stock a été chargé suivant les apports solaires. Aucun prélèvement de chaleur du stock n'a été effectué.

Depuis octobre 1981, de nouvelles sondes (thermistances) ont été placées, permettant d'étudier également le comportement local autour des tubes, et une installation permettant la décharge du stock a été mise en place pour l'hiver 1981-1982.

4. Conditions générales de l'essai

Les résultats présentés dans cet article concernent la première période d'essai, soit de juillet 1979 à avril 1981. Les températures dans le stock ainsi que l'énergie injectée (fig. 3) sont relevées journalièrement.

Pendant les 21 mois d'essai, 29,5 MWh ont été « acceptés » par le stock (11,6 MWh pour la première demi-période et 12,5 MWh pour la deuxième).

Durant les deux premiers mois d'essai, 105 m³ d'eau ont été injectés dans le stock par les trois niveaux d'irrigation.

Le niveau libre de l'eau dans le stock chutait rapidement après chaque injection indiquant la mauvaise imperméabilité des feuilles polyéthylènes posées à recouvrement (non soudées).

L'irrigation fut ensuite arrêtée de manière à rendre possible l'éventuelle thermo-migration d'eau.

5. Evolution des températures

La fig. 4 montre la variation de la température de l'air et du sol à 1,50 m de profondeur en zone non perturbée (point 12) sur toute la période de mesure (21 mois). Le déphasage entre les deux courbes est d'environ 20 jours et l'amortissement d'amplitude de l'ordre de 0,6.

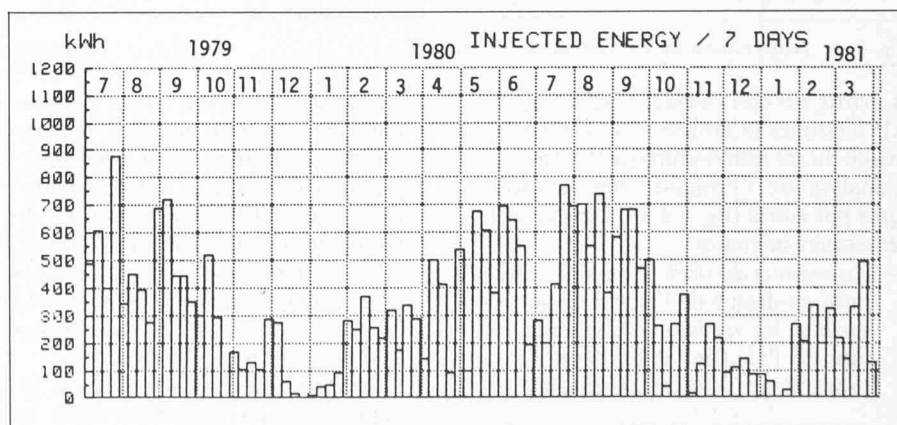


Fig. 3. — Energie injectée par semaine.

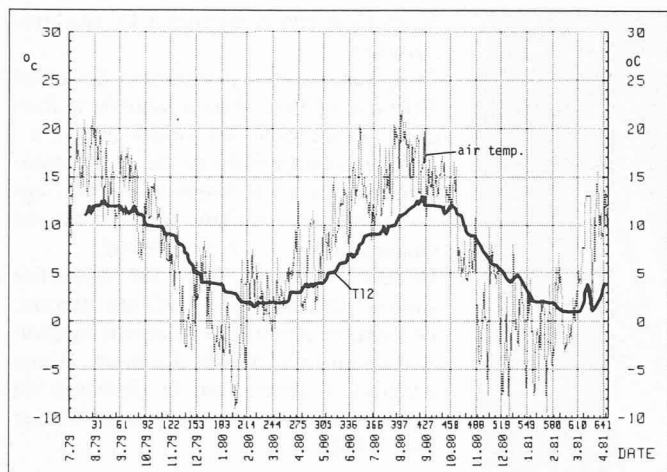


Fig. 4. — Température de l'air et température du sol non perturbé (-1,50 m).

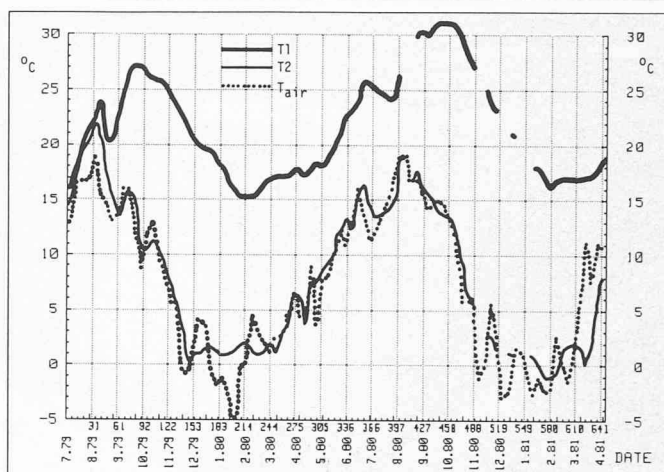


Fig. 5. — Températures au sommet du stock (T1, T2) et température de l'air (moyennes par semaine).

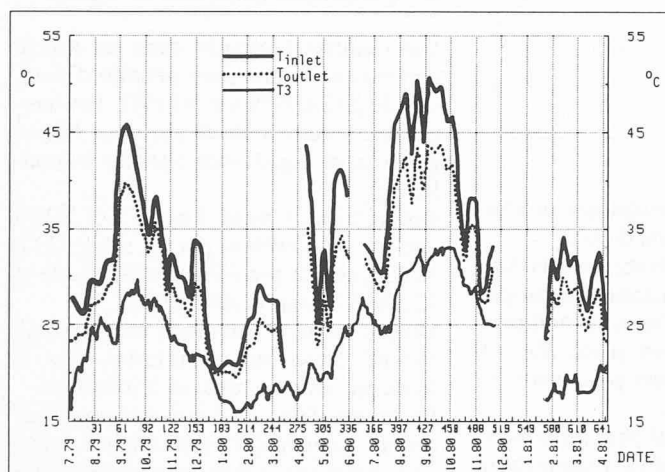


Fig. 6. — Températures d'entrée et de sortie du fluide et température au centre du stock (T3).

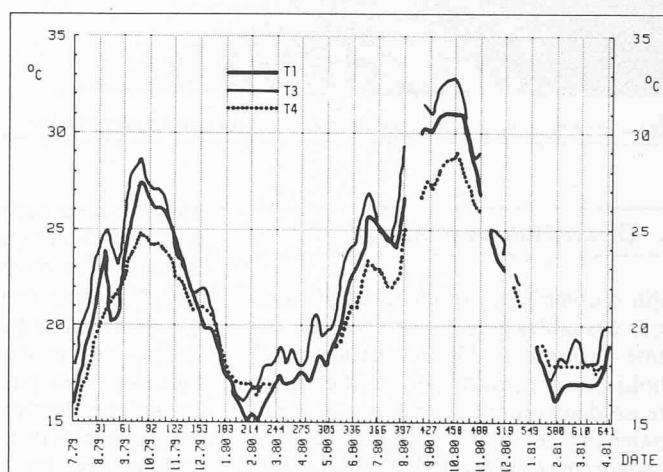


Fig. 7. — Températures dans le stock (T1, T3, T4).

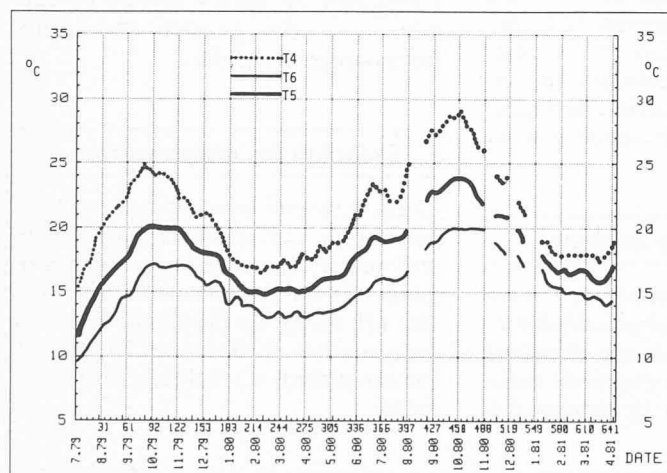


Fig. 8. — Températures au fond du stock (T4, T6, T5).

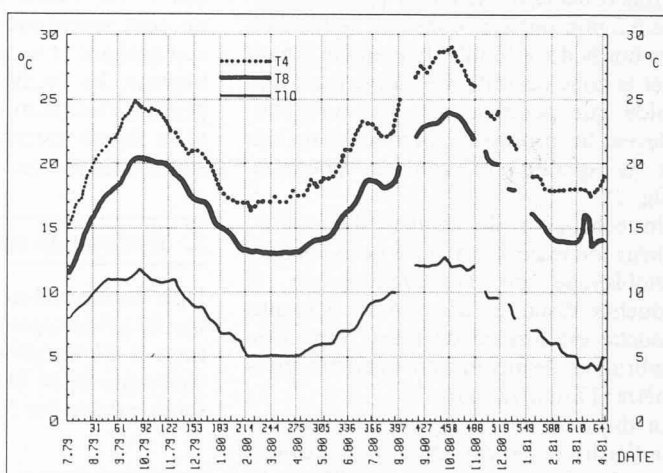


Fig. 9. — Températures sur les côtés du stock (T4, T8, T10).

A partir de ces valeurs, il est possible [1]¹ d'estimer la diffusivité moyenne annuelle du sol non perturbé à $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. L'analyse de l'évolution des températures par zones (fig. 5 à 10) conduit aux remarques suivantes:

— **Au sommet du stock:** Le point 2 situé juste au-dessus de l'isolation suit assez bien les variations de la température de l'air (fig. 5) en dépit de sa profondeur (0,70 cm). Ceci est prin-

cipalement dû au fait que la zone supérieure du sol ne bénéficie plus de l'inertie thermique de la zone sous-jacente (isolation). L'isolation maintient une différence moyenne de température entre ces deux faces de 10°C . La température sous l'isolation (point 1) chute nettement à la fin d'août 1979 sous l'effet de l'injection de l'eau froide d'irrigation.

La partie supérieure du stock a atteint 27°C en septembre 1979 et 31°C en septembre 1981, alors que la température maximum d'entrée

du fluide dans les serpentins était de 45°C et 50°C aux mêmes dates (fig. 6). L'écart maximum de température de fluide entre entrée et sortie du stock est de 10°C et l'écart moyen est de l'ordre de 3°C , soit une moyenne d'environ:

$$0,01^\circ\text{C par m de tuyau}$$

— Dans la zone d'échange (excavation), le milieu (point 3) est la zone la plus chaude (fig. 7). Il atteint $28,5^\circ\text{C}$ la première année et 33°C la deuxième. Les températures dans

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

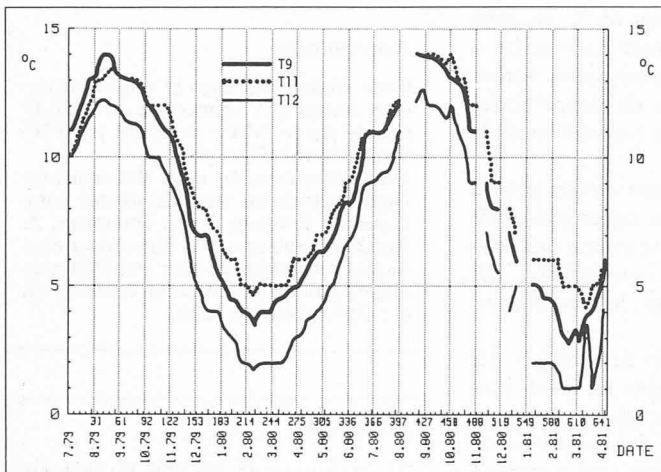


Fig. 10. — Températures à la périphérie du stock (T9, T11, T12).

cette zone (points 1, 3 et 4) sont assez homogènes (écart maximum de 4 °C entre milieu et bas du stock) indiquant qu'il n'y a pas de stratification importante des températures dans le stock (les niveaux de serpents sont connectés en parallèle). Même avec une charge hivernale, la température dans le stock tombe à 15 °C en février, dénotant d'importantes pertes de chaleur.

Il y a une légère augmentation de la température moyenne du stock entre la première et la deuxième année, mais on ne peut conclure que le stock s'échauffe au cours des cycles, l'énergie injectée n'étant pas identique pour les 2 années d'essai, ni les températures moyennes d'entrée du fluide.

- Au bas du stock, on observe un gradient moyen de températures assez constant dans le temps (5 °C pour 1,20 m, fig. 8), indiquant que la feuille polyéthylène n'a pas une importante influence thermique (thermo-migration).
- Sur les côtés du stock (fig. 9 et 10), la verticale située au droit du bord de l'isolant (points 9, 10, 11) n'est pas très influencée par le stock après 2 ans mais la bande de 1 m autour de la zone excavée (point 8) l'est, participant ainsi au stock (les mesures du point 7 ne sont pas représentées du fait d'une dérive de la sonde).
- A la périphérie du stock (fig. 10, points 9 et 11), le comportement du système apparaît relativement symétrique.

6. Comportement général

En dépit de températures d'injection relativement élevées (50 °C), la température dans le stock ne dépasse pas 30 °C. On assiste, au cours des deux premières années, à une lente expansion d'une « bulle » tiède plutôt qu'au développement d'une zone centrale chaude. Une telle configuration de système dans un

terrain de la nature de celui de Marly ne pourra pas être exploitée pour du chauffage de locaux (même à basse température) sans pompe à chaleur.

De ce point de vue, une baisse de conductibilité thermique du sol due à une thermo-migration serait favorable car elle permettrait de mieux confiner thermiquement le stock.

Les propriétés thermiques de l'isolation et du sol de Marly apparaissent ainsi défavorables, dans la configuration d'essai pour une utilisation en direct.

La puissance acceptée par le stock de Marly lors des périodes de charge a été de 11 W par m de tuyau en moyenne annuelle. La puissance maximum en moyenne journalière a été de l'ordre de 25 W par m de tuyau, pour une température d'entrée de 43,7 °C (sortie à 35,7) et une température moyenne du stock de 20 °C, soit environ 1,25 W par m de tuyau et par degré d'écart entre température moyenne du fluide caloporteur dans le stock et température du stock lui-même.

7. Comportement des matériaux enterrés

En septembre 1981, une tranchée de 2 m de profondeur a été pratiquée sur le bord du stock. L'examen des matériaux en place conduisent aux remarques suivantes :

- les feuilles polyéthylène, l'isolation et la barrière de vapeur se sont bien comportées. Aucun dommage apparent n'a été constaté, excepté pour une très mince feuille plastique devant protéger la barrière de vapeur en aluminium. Sous le poids des terres, l'isolant a été quelque peu écrasé au joint entre blocs (fig. 11);
- une concentration d'humidité a été trouvée juste sous la barrière de vapeur: le sol y était presque saturé;
- il n'y avait pas, au toucher, de différence de teneur en eau entre les sols situés de part et d'autre des feuilles polyéthylène sur le côté du stock;

— aucun dommage aux tuyaux n'a été constaté. Il n'y avait apparemment pas de différence de teneur en eau entre le sol en contact avec les tuyaux et le sol situé entre deux tuyaux. Le contact tube-terre apparaissait très bon.

Pour la gamme de températures atteintes dans le stock, il ne semble donc pas y avoir eu de migration horizontale d'eau détectable à Marly, ni dessèchement de la zone autour des tubes ou autour du stock.

8. Propriétés des sols et modèles de simulation

Il n'existe pas actuellement de méthode simple permettant de déterminer rapidement les propriétés thermiques des sols sur la base d'un nombre de caractéristiques géotechniques limitées. Une telle méthode est en cours d'élaboration dans le cadre des travaux suisses sur le stockage saisonnier de chaleur au sein de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Les propriétés thermiques des sols composant le stock de Marly ont donc été dérivées d'un modèle de simulation développé à l'IENER² de l'EPFL [2].

En moyenne, la conductibilité thermique du sol a été trouvée égale à 2 W/mK et la capacité calorifique à 500 Wh/m³K, soit une diffusivité moyenne de 1,1 10⁻⁶ m²/s, en bon accord avec la valeur donnée précédemment et les valeurs courantes de la littérature pour une teneur en eau de l'ordre de 30-40%. La vérification de ces valeurs sur échantillons, grâce à une méthode simple, est en cours.

En ce qui concerne la modélisation mathématique du système, les modèles sim-

² Institut d'économie et d'aménagements énergétiques.

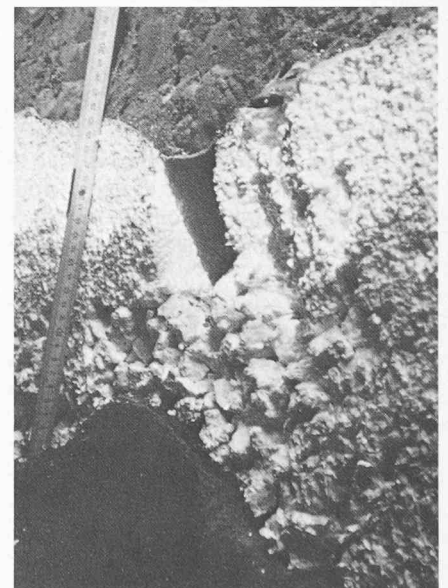


Fig. 11. — Ecrasement local des bords de blocs d'isolation.

plifiés de simulation peuvent décrire relativement bien le comportement global d'un stock en terre (pertes thermiques aux épontes) moyennant certaines hypothèses [1]. Par contre l'approche du phénomène local (interaction tube-terre), régissant les puissances maximales de charge ou de soutirage, nécessite des modèles plus détaillés qui sont actuellement étudiés dans le cadre des travaux précités de l'AIE. Un tel modèle et ses implications sera décrit lors d'un prochain article [2].

9. Conclusions

Le stock expérimental de Marly a permis d'une part de qualifier la tenue des matériaux utilisés après deux ans d'essai en conditions réelles et d'autre part de fournir une base de validation pour des modèles simples ou complexes.

Deux séries de tests sont en cours, l'une concerne la décharge du stock après une charge continue de 12 kW pendant deux mois et demi par la chaudière élec-

trique (le stock a atteint 65 °C en zone centrale) et l'autre sera consacrée à l'étude du comportement local autour des tubes (des sondes de températures ont été placées lors de l'ouverture de la tranchée).

Le recours à des modèles vérifiés pourra dès lors permettre une optimisation de la géométrie du système et une quantification de la qualité exergetique des stocks en terre dans les conditions suisses.

Il sera ainsi possible de préciser les meilleures configurations de stock possibles dans un système et une structure de coût donnés et de décider de la nécessité ou non d'utiliser une pompe à chaleur pour l'exploitation du stock.

Adresse des auteurs:

Pierre Chuard, Dominique Chuard,
Christophe Mercier et Jean-Christophe
Hadorn
Sorane SA
Rationalisation énergétique
Rte du Châtelard 52, 1018 Lausanne

Remerciements

Cette étude entre dans le cadre des travaux suisses de l'Annexe VII de l'AIE financés par le NEFF et dirigés par l'Office fédéral de l'énergie.

Nous adressons, de plus, des remerciements particuliers au Bureau des autoroutes de Fribourg et aux entreprises A. Antiglio, Batitherm SA, Entreprises électriques fribourgeoises pour leur aide technique et financière dans la construction et l'exploitation du stock.

Bibliographie

- [1] P. CHUARD, D. CHUARD, C. MERCIER, J.-C. HADORN: *Experimental results of an earth storage system of 350 m³*. International Energy Conference, October 19-21 1981, Seattle (Washington), USA.
- [2] J.-C. HADORN, B. SAUGY. *Calcul et optimisation des stocks en terre*. Vers une nouvelle génération de programmes par éléments finis. A paraître.

Actualité

Vif intérêt pour le REG

Rapport d'activité 1981 de la Fondation des Registres suisses des ingénieurs, architectes et techniciens (REG)

En sus de leurs activités statutaires, le conseil de fondation et le comité directeur des Registres se sont principalement penchés, l'an dernier, sur la révision des statuts et règlements qui s'imposait dans l'optique de la reconnaissance des Registres par la Confédération. En septembre 1981, l'OFIANT a consulté les Registres sur le projet de convention à passer entre le Département fédéral de l'économie publique et la Fondation. Les Registres se sont prononcés favorablement et ont donné leur accord en principe quant aux exigences qui y étaient contenues. Une ordonnance sera édictée dès que les règlements d'examen auront été homologués par les autorités fédérales et que la voie de recours aura été réglée à nouveau. Les préparatifs sont en cours et devraient aboutir dans le courant de l'année.

Le comité directeur, soucieux de la situation financière de la fondation, proposa en outre au conseil de fondation d'appliquer aux finances d'inscription une majoration due depuis longtemps. L'approbation a été sollicitée par lettre circulaire. Le nouveau trésorier et successeur de M. A. Neiniger a été choisi au sein du comité directeur en la personne de M. Marcel Lüthy, ingénieur à Berne.

Au cours de 12 séances, les commissions d'admission ont examiné 53 demandes

de se présenter aux examens des Registres. 35 candidats ont été acceptés, 3 refusés et 15 ajournés. Au 13 décembre 1981, 39 demandes étaient en suspens. 145 professionnels ont été admis sur la base d'examen passés avec succès dans des écoles reconnues et le temps d'activité pratique requis par le règlement. Sous la présidence de M. H. Dellsperger, juriste, la commission des recours a traité 4 recours. Le conseil de fondation, suivant en cela les propositions de la commission, les a déboutés. Dans un autre cas, le temps probatoire a été abrégé.

En dépit de l'opposition manifestée par l'UTS, l'intérêt que suscite l'inscription aux Registres reste vif et croîtra sans doute encore lorsqu'ils auront obtenu la reconnaissance fédérale.

Contrôle de qualité des ciments produits en Suisse

Rapport du LFEM sur les principales variétés produites en Suisse en 1981

Dans le cadre du contrôle de qualité des ciments défini par l'article 4.4 de la norme SIA 215 (1978) « Liants minéraux », 356 échantillons au total ont été soumis au LFEM pour essais pendant l'année 1981. Il s'agit de 300 échantillons de CP/CPS 5, 49 échantillons de CPHR et 7 échantillons de CPHS. En tenant compte de la quantité de ciment livré en 1980, la fréquence d'essai s'élève à:

CP/CPS 5: 1 échantillon pour 13 000 t (norme: 1 échantillon pour 15 000 t)
CPHR: 1 échantillon pour 5550 t (norme: 1 échantillon pour 10 000 t)
CPHS: 1 échantillon pour 2200 t (norme: 1 échantillon pour 2000 t)

(clé de répartition: selon tableau de prélèvement d'échantillons du 13 novembre 1978).

352 échantillons ont présenté des valeurs de qualité conformes aux normes. Seuls 4 échantillons ne correspondaient pas en tous points aux exigences de la norme SIA 215 (1978):

- 3 échantillons de CPHR accusaient une résistance trop basse à 28 jours;
- 1 échantillon de CP avait une teneur en SO₃ trop élevée.

Norvège: production d'énergie électrique en hausse

La production d'énergie électrique en Norvège a augmenté de 10,5% de 1980 à 1981. La production totale d'énergie en 1981 a été de 92,7 milliards de kWh, indique l'Office central de statistique.

La consommation indigène d'énergie s'est élevée de 4,3%, soit 77,5 milliards de kWh. L'importation d'énergie est tombée de 5% alors que les exportations se sont élevées de 2,5%, soit 7,1 milliards de kWh, une augmentation de 186% de 1980 à 1981.

La consommation des industries utilisant beaucoup d'énergie est tombée de 1,8%. Les industries de transformation du bois, qui ont eu une année favorable, ont consommé 3,3% d'énergie de plus.

En 1982, la production et la consommation d'énergie ont continué à monter. En mars, 9 milliards de kWh ont été produits, soit une augmentation de 0,7% par rapport aux chiffres correspondants de l'an dernier. Au cours du premier trimestre de cette année, la production a augmenté de 5,6%, la consommation de 1,6%.