

111E
Rencontre annuelle de la Société Française des
Thermiciens : aspects thermiques des problèmes énergé-
tiques actuels. Grenoble, 24-25 mai 1976

CEA

CEA-CONF--3638

700546

STOCKAGES SOUTERRAINS DE CHALEUR

J. Despois (*) et F. Nougardè (**)

(*) Commissariat à l'Energie Atomique

(**) Entreprise de Recherche et Activité pétrolière

1. INTERET DES STOCKAGES DE CHALEUR

1.1. Evolution prévisible du marché du chauffage

Comme tous les marchés, le marché de la chaleur comprend deux termes : une demande, à quoi répond une offre. En des temps d'énergie abondante et bon marché, on a pris l'habitude de voir l'offre s'adapter à chaque instant à la demande. Ceci impliquait que les installations de production et éventuellement de transport fussent dimensionnées au niveau de la demande maximum ; elles ne travaillaient le plus souvent qu'à une faible partie de leur capacité : une installation fonctionnant en permanence (8 760 heures par an) ne fournit annuellement, dans la région Parisienne, qu'une quantité de chaleur correspondant à environ 2 500 heures à pleine puissance. Dans ces conditions, l'amortissement des investissements était difficile et l'on recherchait les moyens de production de chaleur faisant appel à des investissements limités sans trop se préoccuper du coût des combustibles. Le transport de chaleur, pesant toujours lourd en investissements, était réduit (petits réseaux) ou inexistant (chauffage individuel). L'énergie était facilement stockée sous forme de combustibles. Le besoin de stockages de chaleur n'existait pas. C'est encore la situation actuelle, mais une adaptation devient nécessaire. En effet, l'augmentation du coût des combustibles et les contraintes créées par la dépendance énergétique conduisent à envisager d'autres solutions pour le chauffage, aboutissant à une augmentation de la part relative des amortissements dans le prix de revient (chaufferies nucléaires), donc à une recherche de l'utilisation maximale des moyens de production, ou encore à l'utilisation de sources de chaleur difficilement modulables suivant la demande pour des raisons économiques (prélèvement sur des centrales électriques) ou techniques (énergie solaire). Dans

tous les cas, il apparaît un décalage dans le temps entre l'offre et la demande. Il doit donc y avoir place pour le stockage de la chaleur, qui constitue de ce fait un besoin nouveau.

1.2. Analyse de la demande

La demande de chaleur est très variable. Aux évidentes variations saisonnières, plus ou moins marquées suivant le climat et la structure de la clientèle, se superposent des variations quotidiennes (ensoleillement, baisse nocturne du chauffage), hebdomadaires (fermeture des bureaux, déplacements de populations en fin de semaine, eau chaude sanitaire du dimanche) et surtout aléatoires (caprices météorologiques). Pour un réseau donné, on a souvent l'habitude de caractériser la demande par une courbe dite "monotone de chauffage" (figure 1), donnant le rapport du débit de chaleur instantané au débit de chaleur maximum (Q/Q_{MAX}) en fonction du nombre annuel d'heures (H) pendant lequel ce rapport est dépassé. Cette représentation se prête bien aux modélisations mathématiques, mais, ne tenant pas compte de la date des demandes de chaleur, elle peut parfois

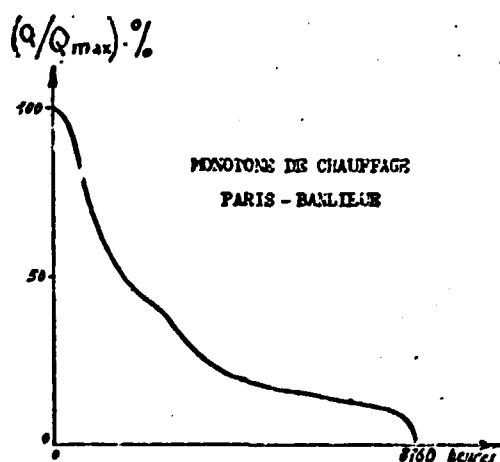


FIGURE 1

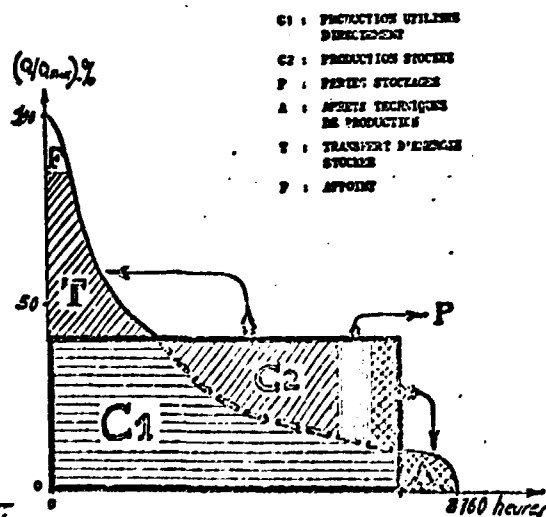


FIGURE 2

présenter quelques inconvénients, dans l'étude économique des stockages.

1.3. Offre constante et stockage

Dans le cas, par exemple, d'une centrale nucléaire purement calo-gène (1), on recherchera, aux arrêts techniques près, à travailler constamment au maximum de production. Grâce à un stockage (figure 2), le surplus correspondant aux heures de faible consommation, produit au coût des seules dépenses proportionnelles, peut être consommé au moment des fortes

demandes. A puissance de centrale égale, l'économie de chauffage d'appoint est proportionnelle à l'aire T. On peut montrer, en outre, que le stockage permet d'envisager une puissance de centrale supérieure à celle que l'on aurait envisagée en l'absence de stockage, en raison de la meilleure utilisation des installations, et parfois même, d'envisager la suppression totale de l'appoint. Il en résulte un nouveau gain.

1.4. Offre variable, non ajustée à la demande

Ce cas correspondrait, par exemple, à des prélèvements de vapeur sur des centrales électriques, faits pendant les heures creuses électriques d'été et -accessoirement- d'hiver. Il pourrait aussi s'agir de chaleur provenant de centrales solaires ou de récupération de chaleur perdue lors de processus industriels discontinus. Dans tous ces cas, le déphasage entre offre et demande doit être pris en compte et la "monotone" ne donne plus qu'une approche du problème, sommaire et systématiquement pessimiste : chaque cas concret doit faire l'objet d'une étude statistique.

2. CHOIX DU MODE DE STOCKAGE

Le stockage permet de bénéficier de chaleur à bon marché, car produite à un moment où l'offre est élevée et la demande faible. Toutefois, rares seront les cas où l'on pourra accepter, pour le poste "stockage" une incidence sur le coût de la thermie livrée bien supérieure à 1 centime. Ceci exclut l'emploi de caloporteurs coûteux pour ce type de stockage, d'où le choix de produits naturels non remaniés (sol, eau). Pour la même raison, on ne peut pas envisager la construction de réservoirs : un lac chaud, à température limitée à 90 °C, pour un retour à 50 °C, ce qui est optimiste, devrait, pour être acceptable être construit pour des coûts inférieurs à 5 francs ou 10 francs par mètre cube stockable, suivant le mode d'exploitation. Ceci est utopique. On est ainsi conduit à utiliser un milieu naturel, pour lequel le coût de construction est nul et seul demeure le coût d'accès.

Les couches poreuses et perméables permettant la circulation de l'eau sous pression comme fluide de transfert sont bien adaptées. Les premières études économiques tendent à montrer qu'au-delà d'un certain seuil, les coûts sont compatibles avec les objectifs économiques.

Le choix de cette solution permet d'atteindre des températures assez élevées (200 °C), qui peuvent s'avérer très favorables pour les transports à longue distance. Enfin, cette solution respecte l'environnement : installations de surface réduites au minimum, absence de pol-

lution de quelque nature que ce soit.

3. PRINCIPE DE L'UTILISATION DES COUCHES PORÉUSES ET PERMEABLES POUR LE STOCKAGE DE LA CHALEUR

3.1. Stockage de la chaleur

Considérons une nappe aquifère captive, c'est-à-dire recouverte d'une couche imperméable et remplie d'eau sous pression. Tout prélèvement d'eau dans une telle couche se fait d'abord par décompression de l'eau et des terrains. Le transfert d'eau à longue distance n'intervient que pour rétablir lentement l'équilibre des pressions. Le même phénomène se produit en sens inverse en cas d'injection d'eau. Toute l'eau contenue dans le terrain ne participe d'ailleurs pas au mouvement et l'on doit distinguer l'eau libre intergranulaire de l'eau de rétention intimement liée à la roche (eau adsorbée, eau de constitution). Si l'on prélève de l'eau dans une nappe captive, si l'on chauffe cette eau et si on la réinjecte par un autre forage, l'eau circulante va échauffer la roche et l'eau liée et l'ensemble se mettra en équilibre de température. On stocke ainsi de la chaleur dans l'ensemble eau + terrain. Soit q^* la chaleur stockée par unité de volume :

$$q^* = q(\text{terrain}) + q(\text{H}_2\text{O}, \theta, P)$$

Avec : $q(\text{H}_2\text{O}, \theta, P) = m \cdot \rho(\text{H}_2\text{O}, \theta, P) \cdot c(\text{H}_2\text{O}, \theta, P)$

$$q(\text{terrain}) = \left[1 - (m + m') \right] \cdot \rho(\text{matrice}, \theta, P) \cdot c(\text{matrice}) \\ + m' \cdot \rho(\overline{\text{H}_2\text{O}}, \theta) \cdot c(\overline{\text{H}_2\text{O}}, \theta)$$

où : $q(\text{terrain})$: quantité de chaleur stockée, par unité de volume, dans la matrice rocheuse et l'eau liée ;

$q(\text{H}_2\text{O}, \theta, P)$: quantité de chaleur stockée, par unité de volume, dans l'eau libre ;

m : porosité efficace ;

m' : capacité de rétention spécifique ($m + m' = \text{porosité totale}$) ;

ρ : masse volumique du corps considéré, à la température θ et, éventuellement, à la pression P ;

c : chaleur spécifique du corps considéré à la température θ et, éventuellement, à la pression P ;

Le symbole $\overline{\text{H}_2\text{O}}$ représente l'eau liée dont les propriétés diffèrent de celles de l'eau libre.

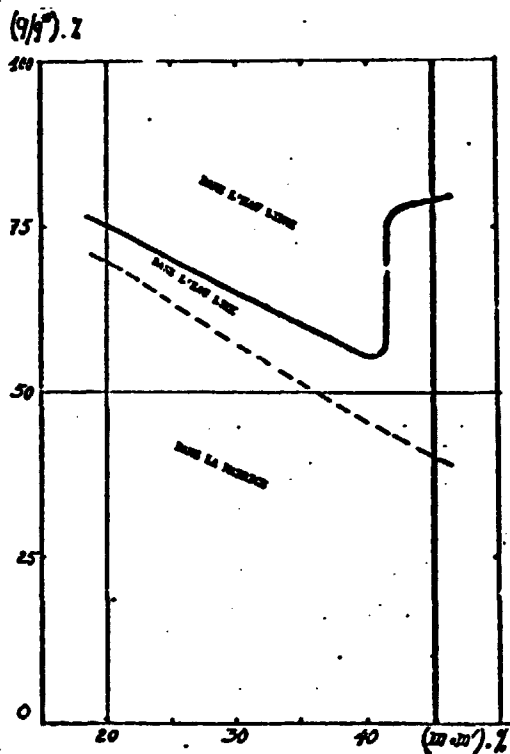


FIGURE 3

La figure 3 donne (2), en fonction de la porosité totale du milieu, la proportion de chaleur stockée, à l'équilibre de température, pour des températures assez faibles et un terrain de caractéristiques physiques moyennes, la proportion de chaleur stockée dans la roche elle-même, dans l'eau de rétention qui lui est liée et dans l'eau circulante, en fonction de la porosité totale. On constate que l'eau circulante ne participe que pour 25 à 40 % au stockage de la chaleur. On pourrait s'attendre à ce que la température d'équilibre soit beaucoup plus faible que la température d'injection. Deux phénomènes antagonistes vont en

réalité intervenir pour fixer en chaque point la température :

1) L'eau circulante balaye la matrice rocheuse, l'ensemble formant un échangeur dont le fonctionnement rappelle celui des récupérateurs de hauts-fourneaux (système dit "cowper") : près du forage d'injection, la température sera pratiquement égale à la température d'injection, puis, à une certaine distance la température décroîtra pour atteindre la température initiale. Cette zone de décroissance est d'autant plus étroite que la vitesse de percolation et le temps de transfert de la chaleur de l'eau à la matrice rocheuse sont faibles. Or, pour les débits les plus forts, la vitesse réelle moyenne est au maximum, à 100 mètres de l'injection, de l'ordre de $0,1 \text{ mm.s}^{-1}$, tandis que, pour une granulométrie de 2 mm, déjà grosse, le temps de transfert (temps au bout duquel l'écart de température entre le centre du grain et le milieu environnant est tombé à 4 % de sa valeur initiale) ne dépasse pas 0,5 s (3). La zone de décroissance, due au temps de transfert, a donc une épaisseur tout à fait négligeable. On peut montrer que, même en présence de galets de 20 cm de diamètre, la perturbation due au temps de transfert demeurerait négligeable, sauf au voisinage immédiat des puits d'injection. Il en irait tout autrement si l'on

considérerait un terrain compact présentant une perméabilité de fractures. La vitesse réelle moyenne de l'eau serait beaucoup plus forte et les temps de transfert beaucoup plus longs. Le procédé n'est donc applicable qu'aux terrains -d'ailleurs très courants, présentant une perméabilité et une porosité matricielles (sables, grés ou graviers). Le transfert peut alors être considéré comme instantané et -à ce stade du raisonnement- on peut admettre qu'il existe une frontière franche entre zone chauffée et zone froide.

2) Mais il faut maintenant tenir compte des pertes de chaleur que l'on peut distinguer : - par leur nature (conduction ou convection naturelle) ; - par leur localisation (aux épontes ou à la limite du stockage).

Ces dernières pertes, notamment, conduisent à faire réapparaître, à la frontière du stockage, la zone de transition que le simple raisonnement à partir des temps de transfert pouvaient faire considérer comme négligeable. L'extension de cette zone de transition est une fonction croissante de la conductibilité globale apparente du milieu poreux et du temps. Les principes de calcul de cette zone de transition sont exposés au paragraphe 4.

3.2. Déstockage de la chaleur

Quand on veut récupérer la chaleur stockée, il suffit d'inverser le sens de circulation des fluides. On remarque que ce sont les mêmes forages qui restent chauds ou froids, au stockage, comme au déstockage. Au début, la température de récupération est voisine de la température d'injection. Puis, l'arrivée de la zone de transition entraîne une baisse de la température. L'exploitation du stockage est terminée quand la température atteint une valeur de consigne. Il reste alors de la chaleur non récupérable, parce qu'à température trop basse et l'on peut définir un rendement du stockage qui est évidemment une fonction de la durée de stockage, mais aussi de la température minimum de récupération que l'on s'est fixé. On peut donc augmenter le rendement du stockage en diminuant cette valeur, remarque importante si l'on tient compte du fait que les pertes maximales interviennent en fin de saison de chauffe, où l'on peut se contenter de températures plus basses.

4. CALCUL D'UN STOCKAGE

4.1. Calcul complet

On écrit (4)

1) - La conservation de l'énergie, toute chaleur provenant soit

de la conduction, soit de la convection ;

2) - La conservation de la quantité de mouvement ; on peut légitimement négliger la transformation de mouvement en chaleur du fait des frottements ; en régime permanent, on peut appliquer simplement la loi de DARCY, qui fournit une excellente approximation, ainsi qu'on l'indique ici pour simplifier, mais un calcul complet doit prendre en compte les effets des variations de pression sur le fluide et sur le terrain ;

3) - La conservation de la matière

Ceci donne les équations suivantes :

$$1) \quad \nabla[\lambda^* \nabla \theta] - \nabla[\rho(f) \cdot c(f) \cdot \theta \cdot \vec{V}] = \frac{\partial}{\partial t} (\rho^* c^* \theta)$$

$$2) \quad \nabla P - \rho(f) \vec{g} + \frac{\mu}{K} \vec{V} = 0 \quad (\text{régime permanent})$$

$$3) \quad \nabla[\rho(f) \cdot \vec{V}] + m \frac{\partial \rho(f)}{\partial t} = 0$$

Avec : λ^* : conductivité thermique de l'ensemble du milieu poreux ;

θ : température, supposée à l'équilibre ;

$\rho(f)$: masse volumique du fluide ;

$c(f)$: capacité calorifique du fluide ;

\vec{V} : vecteur "vitesse de percolation" ;

ρ^* : masse volumique du milieu poreux ;

c^* : capacité calorifique du milieu poreux ;

P : pression ;

\vec{g} : vecteur "accélération de la pesanteur" ;

μ : viscosité dynamique du fluide ;

K : perméabilité intrinsèque du milieu ;

m : porosité efficace ;

∇ : opérateur "nabla" (divergence d'un vecteur ou gradient d'un scalaire).

De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour la résolution de ces équations, à l'occasion des études de géothermie. Tous prennent en compte tout ou partie des hypothèses simplificatrices suivantes :

1) On néglige les variations de masse volumique du fluide $\rho(f)$, sauf quant à leur influence sur les actions de pesanteur ("fluide de BOUSSINESQ"). Dans ces conditions, la conservation des masses implique une conservation des volumes et l'équation (3) se réduit à $\nabla \cdot \vec{V} = 0$.

De même l'équation (2), par multiplication par l'opérateur ∇ , se réduit à $\Delta P = 0$, Δ représentant l'opérateur laplacien.

2) On suppose que λ^* , $c(f)$, ρ^* , c^* , K et même parfois μ sont indépendants de la température. On peut ainsi faire apparaître dans

l'équation (1) une expression en $\lambda^* \Delta \theta$, d'usage commode.

Ces modifications -quoique parfois dangereuses- peuvent être justifiées pour de faibles variations de température, telles qu'on les rencontre généralement en géothermie. Elles ne le sont absolument pas pour des stockages de chaleur.

On sait que λ^* est fonction de la température (5-6-7). Pour les valeurs usuelles de λ^* , cette fonction est décroissante, ce qui est favorable au stockage. ρ^* , mais surtout c^* et $c(f)$ et -bien entendu $\rho(f)$ et μ - ont des variations importantes en fonction de la température. Enfin, plusieurs auteurs ont signalé récemment que K (8-9) varie également en fonction de la température. Dans certains milieux, K est réduit de moitié quand la température passe de 20 à 200 °C, tandis que μ décroît dans un facteur 5.

On ne peut donc pas tenir pour négligeable la variation du rapport $\frac{\mu}{K}$, de l'ordre de 1/2 à 1/2,5. Ceci entraîne une augmentation importante des possibilités de débit des puits chauds, et réduit leur nombre par rapport aux puits froids.

La prise en compte de toutes ces variations -dont certaines, mal connues, font actuellement l'objet d'études de laboratoire- complique énormément la modélisation. Il a pourtant été possible, par élimination de \vec{V} , de se ramener à deux équations aux dérivées partielles, en P et θ , solubles par la méthode des éléments finis, et permettant la réalisation d'un modèle mathématique tridimensionnel complet, pouvant d'ailleurs également tenir compte des phénomènes transitoires.

Ce modèle, mis au point par le centre de calcul d'ELF-ERAP, après plusieurs années de travail, est maintenant opérationnel, mais n'a pas encore effectivement été utilisé pour représenter un stockage. Ceci résulte de deux causes :

- Les lois de variation des paramètres doivent être précisées ;
- Ce modèle complet est évidemment très lourd et, même avec les ordinateurs les plus puissants, nécessite de très longues occupations de l'unité centrale ; il n'est donc utilisable que pour la vérification définitive et le dimensionnement exact d'un stockage déterminé, avant sa construction.

4.2. Calcul approché

Il convient auparavant de pouvoir faire une détermination approchée des conditions de fonctionnement du stockage. Dans la pratique, deux dispositions peuvent être retenues :

- disposition en lignes ("forages chauds" au centre, avec une ligne de "forages froids" de part et d'autre) ;

- disposition radiale (groupe de "forages chauds" au centre, avec les "forages froids" placés en cercle, vers l'extérieur).

Cette seconde disposition est apparue comme préférable dans la plupart des cas. On peut alors, sauf au voisinage immédiat des forages, assimiler l'ensemble des "forages chauds" à un gros forage unique équivalent et l'ensemble des "forages froids" à une tranchée drainante. On suppose que le stockage peut facilement être maintenu en place : les dérivées, toujours très faibles, pouvant être facilement compensées par l'introduction d'une dissymétrie dans les débits d'injection et de récupération. Dans ces conditions, le problème hydraulique est dissocié du problème thermique. Les pertes par conduction peuvent être évaluées directement par un modèle simplifié.

4.3. Premiers résultats

Bien que ce modèle soit en cours d'élaboration, on peut déjà annoncer quelques résultats provisoires. Un stockage de 500 millions de thermies, avec un débit maximum, d'injection ou de récupération, de 200 kth.h^{-1} , pour une différence de température moyenne de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (entre aller et retour du réseau, dans un terrain de perméabilité assez bonne, avec une porosité de 30 %, et une épaisseur utile de 40 m, nécessiterait 3 puits chauds, 6 puits froids, 6 petits puits de contrôle ou d'observation. Son rayon serait de 270 mètres environ. Pour 600 mètres de profondeur, son coût est estimé à 30 millions de francs. Son rendement n'est pas encore connu avec précision, mais on espère atteindre -après un an ou deux de mise en route- 70 à 80 % de récupération de la chaleur stockée.

5. PROBLEMES PRATIQUES

On ne fera qu'évoquer ici les trois principaux problèmes.

5.1. Mise en route du stockage

Dans ce qui précède, on a implicitement admis un balancement entre une source "froide" et une source "chaude" situées toutes deux dans la couche de stockage, mais indépendantes l'une de l'autre. Dans la réalité, dès le premier déstockage, on renverra, dans la couche, une eau qui ne sera pas froide, mais à une température voisine de la température de retour du réseau. Le basculement se fera donc ensuite entre une source "chaude" et une source "tiède". On a évidemment intérêt à ce que la source "tiède" entoure la source "chaude". Les pertes de cette dernière sont ainsi

récupérées dans la première, les seules pertes subsistant étant les pertes aux épontes (partiellement récupérables) et les pertes de la source "tiède" vers le milieu à la température initiale. Il suffit, pour cela, d'envoyer, par les forages chauds centraux, une certaine quantité d'eau tiède, avant la mise en exploitation du stockage. Cet investissement initial peu coûteux évite l'existence d'une zone froide interposée entre les deux sources, et permet une bonification du stockage par vieillissement artificiel prématuré, de nature à limiter les pertes.

5.2. Isolément des circuits (10)

Il est prévu d'intercaler des échangeurs entre le réseau de chauffage et les circuits de stockage, pour 3 raisons :

- 1) Protection de la nappe aquifère (lutte contre la pollution) ;
- 2) Protection du réseau de chauffage (lutte contre la corrosion, l'entartrage) ;
- 3) Indépendance des pressions entre les deux circuits (l'injection et la récupération à des débits donnés supposent des pressions bien déterminées).

5.3. Régulation des circuits de stockage (10)

La pression à l'injection -et au soutirage- doit être fixée comme il vient d'être dit. Mais, de plus, pour un fonctionnement à température

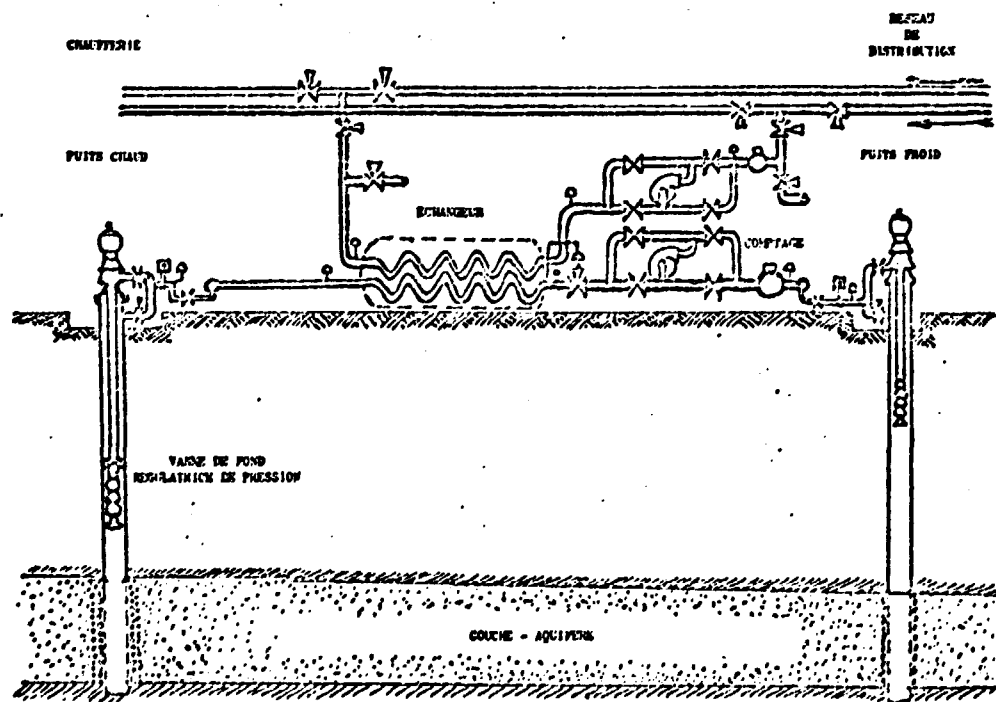


FIGURE 4

supérieure à 100 °C, il faut qu'en tout point du circuit parcouru par l'eau chaude, la pression soit supérieure à la tension de vapeur d'eau, à la température du point considéré, afin d'assurer un écoulement strictement monophasique, faute de quoi il s'instaurerait un régime pulsatoire irrégulier avec éjection diphasique, très préjudiciable à la tenue de la couche et la pérennité du matériel.

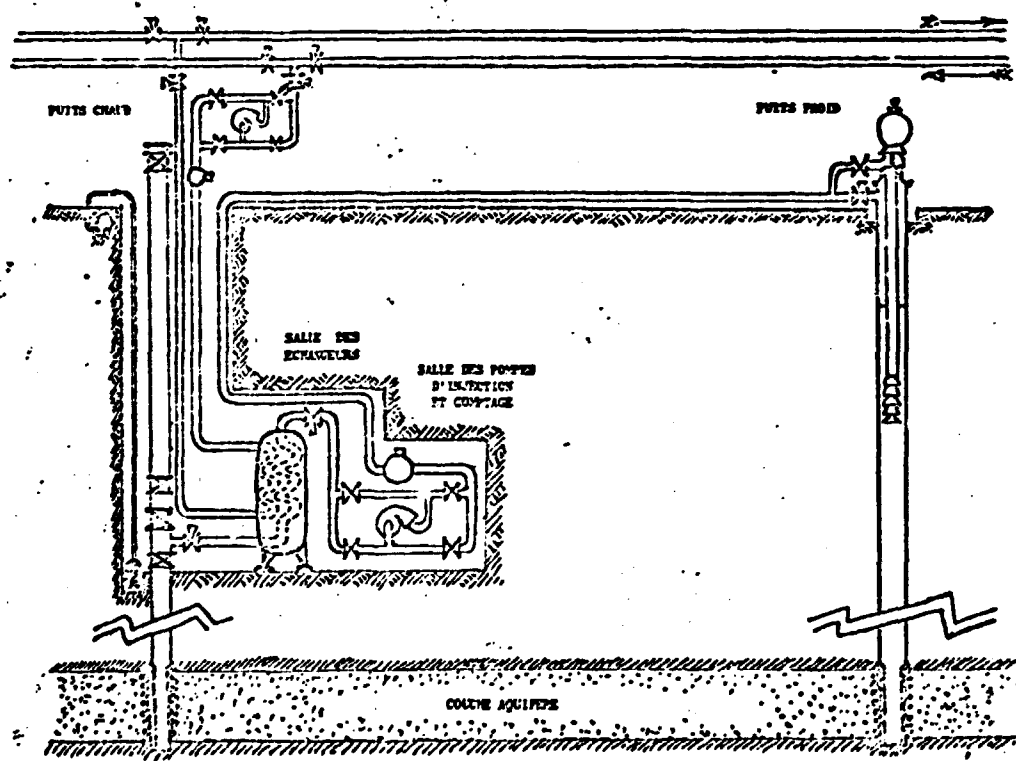


FIGURE 5

Cette contrainte ne doit pas empêcher qu'au niveau des crépines des puits, la pression demeure égale à la pression dynamique de la nappe pour le débit considéré. Ceci suppose l'interposition, à une profondeur convenable, de pompes et d'obturateurs (figure 4). Pour les grands stockages, on peut se libérer de cette contrainte, en installant l'échangeur au fond d'un puits visitable, à une cote convenable (figure 5), voire en envisageant une installation totalement souterraine (figure 6).

6. AVENIR DES STOCKAGES SOUTERRAINS

L'avenir dépend de l'évolution du marché de la chaleur, mais aussi de la faisabilité technico-économique d'un tel dispositif. Or, quelles que soient les études théoriques, celle-ci ne sera établie qu'après la réalisation d'une opération pilote.

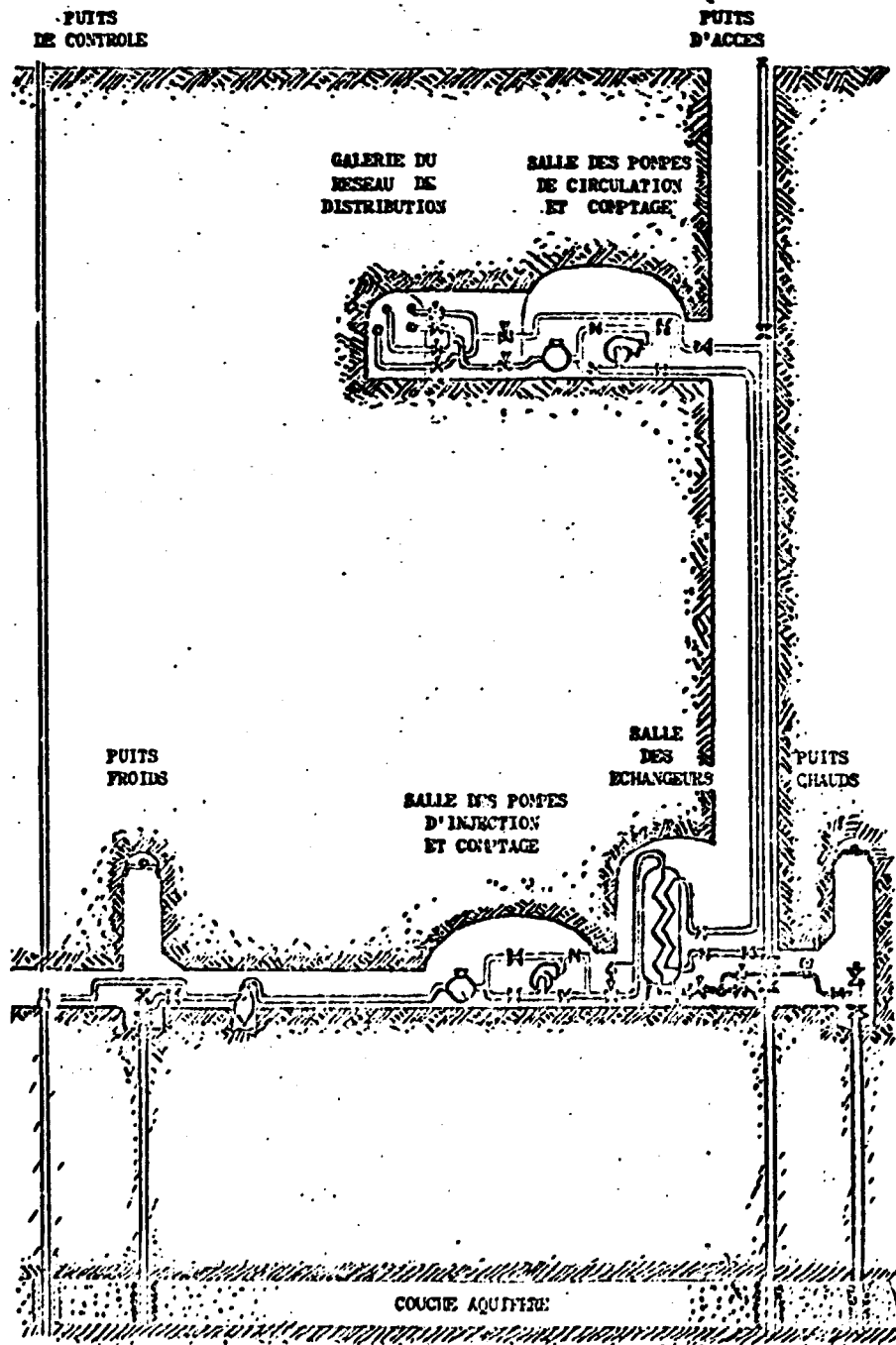


FIGURE 6

On peut cerner les caractéristiques d'une telle opération, grâce à des considérations de dimensions.

En s'en tenant à des stockages strictement homothétiques, dans la mesure où les pertes ne varient pas trop quand on passe d'un stockage à l'autre (évolutions voisines des températures intérieures), on peut admettre, pour un temps de stockage donné, que les pertes sont proportionnelles à la surface limite, donc à L^2 (L ayant la dimension d'une longueur). La quantité stockée Q est proportionnelle à L^3 . Les pertes relatives sont donc proportionnelles à L^{-1} , donc à $Q^{-1/3}$. Il en résulte que, pour un pilote 100 fois plus petit qu'un stockage industriel, pour lequel on attend des pertes de l'ordre de 25 %, on perdrait toute la chaleur contenue. Encore que l'hypothèse de base ne soit plus valable (baisse de température importante dans le stockage le plus petit), ce qui conduit à une large surestimation du phénomène, il n'en reste pas moins évident que l'on ne peut tirer aucune conclusion sérieuse d'un tel pilote. Il faudrait alors essayer de rattraper cet effet de taille, en jouant sur le temps de stockage ou sur la température. Malheureusement, tous les phénomènes qui interviennent dans un stockage ne se comportent pas de la même manière, en fonction des temps, certains étant réversibles, d'autres se traduisant par des fonctions constamment croissantes du temps. L'extrapolation des résultats d'un petit stockage de courte durée à un grand stockage de longue durée supposerait donc qu'on admette les mêmes hypothèses que celles qui ont présidé à l'établissement du modèle mathématique, rendant illusoire la vérification de ce dernier et inutile l'expérimentation envisagée. Quant à la température, son effet est assez faible. Les pertes sont sensiblement proportionnelles à la différence de température $\Delta \theta$; à volume de stockage égal, la quantité de chaleur stockée est également proportionnelle à $\Delta \theta$. Les pertes relatives sont donc alors indépendantes de la température. Mais à quantité de chaleur identique, le volume de stockage est inversement proportionnel à $\Delta \theta$. Ceci implique que les pertes sont sensiblement proportionnelles à $(\Delta \theta)^{1/3}$. Elles ne varient donc que de 35 % environ de leur valeur initiale quand $\Delta \theta$ passe de 40 °C à 100 °C.

Il en résulte que l'opération-pilote devra obligatoirement être de grande dimension et de longue durée (plusieurs mois). Par contre, on pourra, si cela simplifie l'opération, se contenter de températures relativement modestes, à condition toutefois qu'elles dépassent 100 °C, afin de vérifier les conditions techniques de fonctionnement des dispositifs

de contrôle de pression. Une telle opération sera donc coûteuse.

C'est la raison pour laquelle, bien que les dispositifs techniques soient suffisamment au point pour qu'ils aient fait l'objet, de la part des Groupes CEA et ELF-ERAP, du dépôt d'une demande de Brevet d'Invention (10), il a été jugé préférable, avec l'appui de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique, de poursuivre les études théoriques afin de cerner le problème au mieux, avant d'entreprendre des travaux importants sur un site expérimental.

Remarque sur les unités employées

Dans ce texte, 1 thermie = 4,184 MJ ; 1 kth.h⁻¹ = 1,162 MW.

Bibliographie sommaire

1. P. CHARRCPPIN, J. DESPOIS, J.C. FAUCONNIER, F. NOUGAREDE, "Stockage de chaleur souterrain". A.I.E.A. (Vienne, 1976), Note au Groupe Consultatif sur l'utilisation de la chaleur provenant des réacteurs nucléaires pour le chauffage urbain.
2. G. CASTANY, in "Traité pratique des eaux souterraines". Dunod, Paris, 1967.
3. H. S. CARSLAW et J. C. JAEGER, in "Conduction of Heat in Solids". Clarendon Press, Oxford, 1959.
4. M. COMBARNOUS, "Convection naturelle et convection mixte en milieux poreux". (Thèse Sc. Phys. Paris, 1970). Technip, Paris, 1971.
5. H. ZIERFUSS et G. VAN DER VLIET, "Laboratory measurements of heat conductivity of sedimentary rocks". B.A.A.P.G. (octobre 1956), 40, 2475-2488.
6. A. SUGAWARA et Y. YOSHIKAWA, "An investigation on the thermal conductivity of porous materials and its application to porous rock". J. Appl. Phys. (octobre 1962), 33, 469-480.
7. H. ZIERFUSS, "Heat conductivity of some carbonate rocks and clayey sandstones". B.A.A.P.G. (février 1969), 53, 251-260.
8. Yu. A. AFINOGENOV, "How the liquid permeability of rocks is affected by pressure and temperature". SNIIGGIMS (1969), 6, 34-42 (Traduction anglaise : Consultants Bureau, 227 West 17th St., N.Y. 10011).
9. R.M. WEINBRANDT, H. J. RAMEY Jr., F. J. CASSE, "The effect of temperature on relative and absolute permeability of sandstones". Soc. Pet. Eng. J. (octobre 1975), 15, 76-84.
10. Demande de Brevet. FRANCE. 75-34 641.