Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses

Band: 108 (1982)

Heft: 24

Artikel: Calcul et optimalisation des stocks en terre: vers une nouvelle génération de programmes par éléments finis?

Autor: Hadorn, Jean-Christophe / Saugy, Bernard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74690

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.08.2025

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

Calcul et optimalisation des stocks en terre

Vers une nouvelle génération de programmes par éléments finis?

par Jean-Christophe Hadorn et Bernard Saugy, Lausanne

Cet article fait suite à la présentation des résultats des mesures obtenus sur le stock en terre expérimental de Marly par MM. Chuard et al. [1][1]. Un modèle de calcul par éléments finis a été développé pour l'étude et l'optimalisation des stocks de chaleur en terre. Sa conception spécifique en fait un outil simple d'utilisation, dont la validité a été vérifiée grâce au prototype de Marly, et qui contraste avec l'idée commune de la lourdeur des programmes par éléments finis.

A l'aide de ce modèle, une étude d'optimalisation de la répartition de l'isolation dans un stock en terre donné a été effectuée et une synthèse des résultats est présentée.

1. Stockage souterrain: tendances actuelles

Pour les systèmes solaires actifs, trois types de stockage saisonnier de chaleur sont envisageables dans les conditions suisses:

— le stockage en cuve à eau enterrée ou non;
— le stockage en terre ou en rocher;
— le stockage en aquifère proche de la surface ou profond.

Dans notre région et à l'échelon d'une famille, le volume nécessaire pour stocker le surplus d'énergie solaire capté en été, pour l'utiliser en hiver, est de l'ordre de grandeur du volume chauffé. Il est donc très intéressant de pouvoir recourir à des systèmes souterrains pour un stockage saisonnier, de manière à minimiser les emprises en surface, ceci d'autant plus que les sols ont, en général, des propriétés thermiques acceptables pour cet usage.

Les deux premiers systèmes de stockage trouvent actuellement leur limite économique et de faisabilité à l'échelon d'une villa, d'un quartier ou d'un groupe de villas, alors que le recours à des aquifères peut apporter une solution au problème du stockage intersaisonnier de la chaleur solaire, pour des tailles de systèmes moyennes à très importantes (100 à 10 000 personnes).

Depuis une dizaine d'années, de nombreux travaux de recherche et quelques expériences en vraie grandeur ont été consacrés au stockage souterrain de chaleur, principalement en Suède [2], en France [3], aux Etats-Unis [4] et en Suisse [5].

Dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), huit pays européens, dont la Suisse, les USA et le Canada ont entrepris de mettre sur pied des installations solaires comprenant un système de stockage souterrain de chaleur.

2. Outils de calcul

Le stockage saisonnier de chaleur au moyen de grandes cuves à eau a été étudié aux niveaux théorique et expérimental principalement en Suède et en Allemagne. Des systèmes similaires (bassin excavé rempli d'eau) ont également été étudiés dans ces pays, ainsi qu'au Danemark et aux USA. Les outils de calcul sont, dans ce domaine, relativement bien développés, sauf en ce qui concerne les transferts thermiques par convection naturelle, pour lesquels il n'existe pratiquement pas de modèle simple et fiable pour les grandes cuves [6].

Le stockage en aquifère est étudié depuis plus de dix ans, notamment en France par le BRGM et l'école des Mines de Paris, aux Etats-Unis par le Lawrence Berkeley Laboratory et en Suisse par le Groupe d'Etude du comportement thermique des nappes souterraines comprenant le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, l'Institut d'économie et aménagements énergétiques et le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL. Une installation-pilote (projet SPEOS) est d'ailleurs en cours d'expérimentation à Lausanne [7].

L'étude de ce type de stockage bénéficie des recherches fondamentales dans le domaine du comportement hydraulique et thermique des nappes souterraines. Les modèles de calcul développés par la plupart des équipes de recherche sont des modèles bi- ou tridimensionnels, résolvant les équations de transfert hydraulique en milieu poreux saturé (loi de Darcy) et de bilan thermique (loi de Fourier et convection forcée). Les versions standards de ces modèles sont d'une taille importante et relativement difficile à manier, principalement du fait de leur généralité [6].

En ce qui concerne les stocks en terre ou en rocher, les outils de calcul se sont développés plus récemment. L'apport de base a été l'analyse des collecteurs enterrés pour constituer une source de chaleur pour des pompes à chaleur. Les principaux pays intéressés à ce type de stock sont les Etats-Unis, la Suède, l'Autriche, la Hollande et la Suisse. Une analyse des méthodes existantes en 1981 peut être trouvée dans la référence [8].

Dans cet article nous nous proposons de montrer qu'il est possible de tenir compte de la particularité des stocks en terre équipés de serpentins horizontaux par des méthodes numériques classiques, et ainsi de développer un modèle complet pouvant servir de base à la validation et l'exploration du domaine de validité de modèles simples.

3. Processus thermiques fondamentaux

Dans l'analyse du comportement de stocks en terre équipés de serpentins horizontaux ou de tubes verticaux, deux phénomènes principaux doivent être pris en compte:

— *le phénomène local* d'échange de chaleur entre les tubes et le sol, qui détermine les puissances maximales qu'il est possible d'injecter en été ou de soutirer en hiver;
— *le phénomène global* des pertes entre le stock et le terrain avoisinant puis l'air et les épontes, qui détermine le niveau moyen de température du stock et donc ce que l'on pourrait appeler la qualité exergétique du stock. La température moyenne des stocks considérés ici varie entre 0 °C (sans phénomène de congélation) et 60-90 °C au maximum.

Ce deux phénomènes se distinguent physiquement de deux manières pour un stock saisonnier. D'une part leur constante de temps est nettement différente et d'autre part les paramètres thermiques du sol déterminant leur qualité n'interviennent pas de la même manière.

a) *Cas de la constante de temps:* Si l'on assimile le phénomène local à un choc thermique, sa constante de temps sera de l'ordre de x^2/a, où x est une longueur caractéristique, par exemple la demi-distance entre tubes, et a la diffusivité du milieu stockeur, c'est-à-dire le rapport entre la conductibilité thermique et la capacité calorifique du sol. Pour une distance entre tubes de l'ordre de 0,5 m (soit 1 m de tube pour 0,25 m^3 de sol), la constante de temps du phénomène local est d'environ 4 jours pour un sol faiblement diffusif (sable sec) et d'environ 1 jour pour un sol à diffusivité plus élevée (limon saturé, voir tableau 1).

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

TABLEAU 1: *Caractéristiques thermiques* moyennes *de quelques sols et d'une roche, adapté de [9].*

Type de sol ou roche	Conductibilité thermique λ [W/m K]	Capacité calorifique ρC volumique [MJ/m³ K]	Diffusivité $\alpha = \lambda/\rho C$ 10^{-6} [m²/s]	Coefficient de contact $\sqrt{\lambda \rho C}$ [W·s^1/2/m² K]
Granite	3,2	2,3	1,4	2710
Sable saturé	1,9	3,1	0,6	2430
Sable sec	0,3	1,2	0,2	600
Limon saturé	2,3	3,5	0,7	2840
Limon sec	0,3	0,9	0,3	520
Argile saturée	1,3	3,6	0,4	2160
Argile sèche	0,3	0,8	0,4	490
Moraine	2,4	2,8	0,9	2590

Remarque: pour les sols, la relation entre teneur en eau et conductibilité thermique n'est pas linéaire.

De plus, pour un temps de l'ordre de $0{,}2\ x^2/a$, soit le cinquième du précédent, le processus thermique de diffusion change de caractère en passant d'un état «nettement» transitoire à un état «pseudo» permanent où le flux de chaleur s'écoule de manière constante en tout point autour du tube [11]. Ainsi la constante de temps typique du phénomène local est de l'ordre de 20 à 5 heures. En d'autres termes, on peut dire qu'en des temps de l'ordre de grandeur de l'heure, le réchauffement du sol, durant la phase de stockage, aura à peine commencé et qu'en des temps de l'ordre de plusieurs jours, un équilibre thermique local est atteint.

Quant au phénomène global de pertes du stock, on peut grossièrement l'assimiler au refroidissement d'un corps chaud dans une enceinte froide. Dans ce cas, la constante de temps du processus global est environ de $\frac{\rho C \cdot V}{\alpha \cdot S}$ où ρC est la capacité calorifique volumique du corps, V son volume, S sa surface et α un coefficient de transfert thermique qualifiant l'échange entre les deux corps.

Pour des tailles de stock raisonnables (500 à 10 000 m³), le facteur de forme V/S est de 1 à 2 m, disons 1,5 m pour fixer les idées. Pour un stock complètement isolé par 30 cm de polystyrène expansé, α vaut environ 0,17 W/m² K et pour un stock dépourvu d'isolant, on peut assimiler le sol environnant à une épaisseur équivalente d'isolant (en négligeant ici son effet capacitif). Pour un stock situé à une profondeur moyenne de 4 m, on obtient ainsi un coefficient α de 0,5 W/m² K pour un sol courant ($\lambda = 2$ W/m K).

Dans ces deux cas (stock bien isolé et stock non isolé) la constante de temps typique du phénomène global est ainsi respectivement de 260 j et 90 j pour un sol courant ($\rho C = 2{,}5\ 10^6$ J/m³ K).

Pour imprécis que soient ces calculs d'ordre de grandeur, ils montrent néanmoins que, pour des stocks profonds ou assez bien isolés et équipés de tubes relativement peu espacés, les phénomènes locaux et globaux ont des constantes de temps bien différentes et peuvent dans les calculs être dissociés de manière appropriée. Par contre, pour des stocks peu profonds et mal ou non isolés, les deux phénomènes peuvent avoir une interaction d'autant plus étroite que les tubes sont éloignés et le procédé de dissociation n'est plus valable.

b) *Cas des paramètres thermiques:* En faisant (comme nous l'avons implicitement fait précédemment) l'hypothèse que la loi de Fourier est applicable aux processus fondamentaux du comportement d'un stock en terre, les deux paramètres physiques caractéristiques sont, comme nous l'avons déjà mentionné, λ la conductibilité thermique et ρC la capacité calorifique volumique. Mais ils n'interviennent pas de la même manière dans le phénomène local et dans le comportement global. En effet, la puissance échangée entre le fluide circulant dans les tubes enterrés et le sol est, en l'absence de vide d'air (contact tube-sol parfait), proportionnelle au facteur $\sqrt{\lambda \cdot \rho C}$, appelé généralement coefficient de contact [10], alors que les pertes de chaleur globales sont plutôt proportionnelles à la diffusivité moyenne du sol $\lambda/$

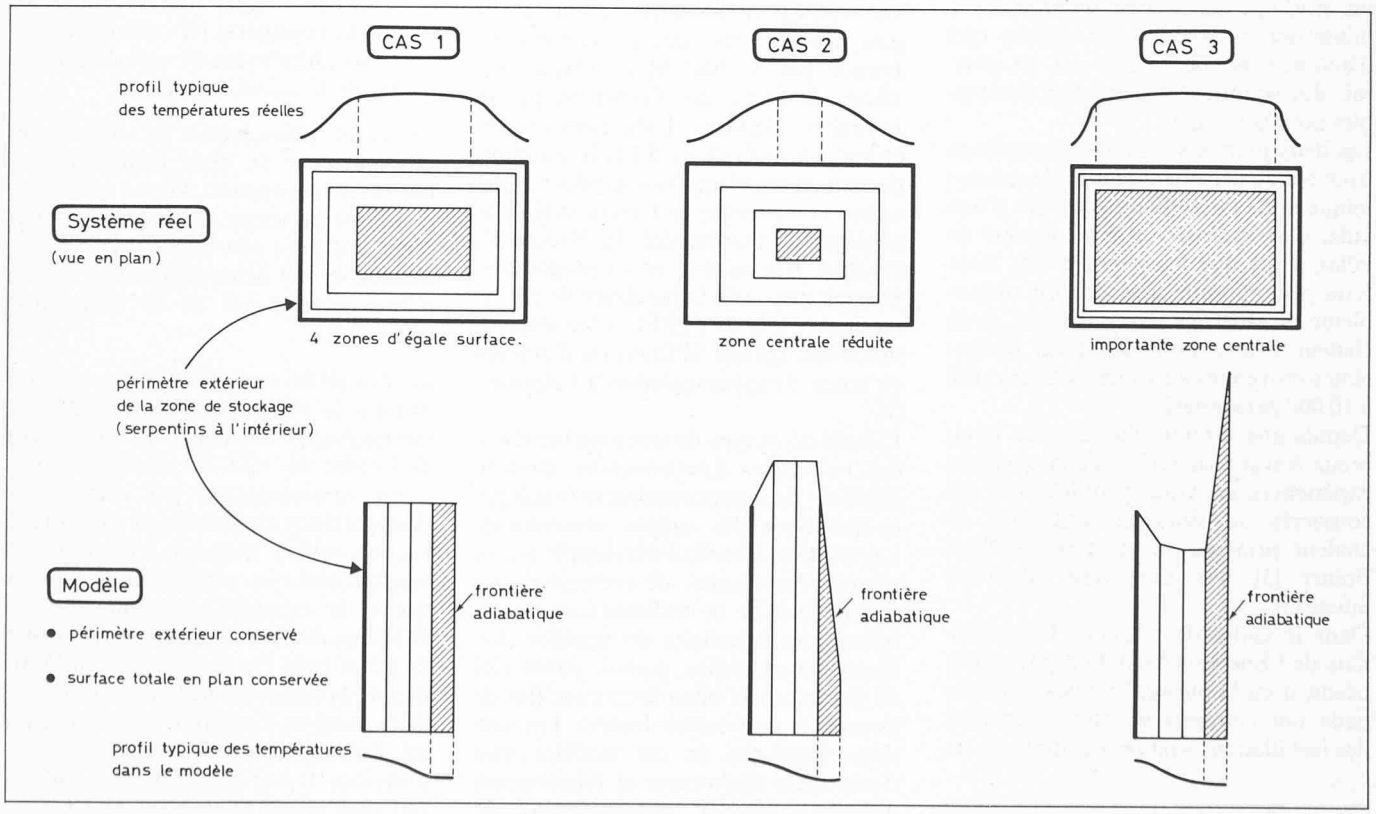

Fig. 1. — Schéma de trois cas de répartition de température dans la zone de stockage et de leur modèle possible.

ρC. Un bon matériau de stockage saisonnier de chaleur devra donc posséder un coefficient de contact aussi élevé que possible et une diffusivité aussi basse que possible. Le tableau 1 montre ainsi que si l'échange local peut être qualifié de bon dans des sols à forte teneur en eau (proche de la saturation), les pertes de chaleur du stock risquent d'être importantes. Par contre, les sols «secs» permettront de réduire les pertes mais nécessiteront des surfaces d'échange 4 à 5 fois plus importantes pour injecter ou soutirer la même qualité de chaleur, dans les mêmes conditions de température.

4. Lois phénoménologiques

La zone non saturée, constituant le milieu stockeur, est le siège de transferts de masse et de chaleur complexes et encore mal connus au niveau fondamental. La loi de Fourier classique constitue, à l'heure actuelle, un modèle de base acceptable, au moins dans la gamme de températures du stock allant de 0 °C à 60 °C environ, pour laquelle il semble ne pas y avoir de non-linéarités de comportement pour la plupart des sols. Les éventuelles thermo-migrations d'eau au sein du milieu poreux sont donc très délicates à modéliser explicitement, faute de loi physique vérifiée. Leur influence sur les paramètres thermiques (λ et ρC) du sol peut toutefois être importante dans certains cas encore mal définis (sols sableux notamment).

Soulignons toutefois que, à l'instar de la perméabilité hydraulique de Darcy, des essais en cours [13] montrent qu'il est possible de définir une conductibilité thermique «en grand» conduisant à des paramètres mesurables en laboratoire ou même in situ (sondes à choc thermique) mais spécifiques d'un échantillon et d'une situation donnés.

5. Particularités du calcul des stocks en terre — Modèle proposé

Du fait de la grande différence d'échelle spatiale entre le système local (les tubes formant l'échangeur dans le stock) et le système global (le stock lui-même, son isolation éventuelle et sa périphérie), les méthodes numériques classiques ne peuvent s'appliquer directement à partir de la géométrie réelle du stock, le nombre de points de discrétisation devenant prohibitif.

Une solution à ce problème, qui permette de conserver la notion d'interaction entre le phénomène local et le phénomène global — puisque, nous l'avons montré, une dissociation des processus n'est pas valable dans tous les cas —, est de recourir à une «transformation topologique» du système réel pour obtenir un modèle géométrique plus simple.

La transformation que nous proposons est basée sur les quatre principes suivants:

1. On tient pour négligeable, quelle que soit la configuration en plan des serpentins, les transferts thermiques parallèles aux tuyaux. Cette hypothèse est justifiée du fait des faibles différences de températures de fluide observées entre entrée et sortie du stock (maximum 5 à 10 °C, 1 à 3 °C en moyenne par 1000 m de tubes [1]).
2. On suppose que le comportement thermique du stock est symétrique autour de l'axe vertical central (il ne peut donc être question d'écoulement de nappes au travers du stock).
3. On conserve, au mieux, les surfaces d'échange (tubes-sol, stock-environnement...) et les volumes de sol sollicités.
4. On regroupe toutes les zones contiguës, à l'intérieur du stock, d'égale température ou soumises à de très faibles gradients de température.

Les principes 1 et 2 permettent de «dérouler» les serpentins et de ne modéliser que les transferts thermiques radiaux entre tube et sol.

Le principe 3 impose pour un modèle bidimensionnel une intégration selon une épaisseur variable.

Le principe 4 trouve sa justification dans le fait qu'il est observé, dans les stocks en terre, une zone centrale à très faible grandient thermique, et trois zones périphériques suffisent alors pour représenter un profil typique de températures à allure parabolique (fig. 1).

La zone périphérique du stock est représentée, dans un modèle bidimensionnel, par une épaisseur variable égale au périmètre à l'abscisse correspondante (mesurée à partir du centre du stock), conservant ainsi les surfaces d'échange et les volumes de sol (fig. 2).

Enfin, pour tenir compte de l'influence réciproque dans un plan horizontal des tuyaux, il convient de représenter dans le modèle un niveau de serpentins par un nombre limité, mais supérieur à un, de tuyaux. Ce nombre a été fixé à quatre, permettant ainsi une bonne définition de l'allure parabolique de la distribution de température dans un plan horizontal (fig. 1).

La figure 3 schématise l'ensemble de la transformation topologique proposée par une configuration courante de stock en terre équipé de serpentins. On notera que, du fait de la transformation, le diamètre des tuyaux dans le modèle doit être modifié pour conserver la surface totale d'échange.

6. Programme de calcul spécifique

Sur la base de la transformation proposée, nous avons développé un modèle bidimensionnel par éléments finis appelé SPIPE, capable de simuler simultanément le comportement local et global de stocks en terre munis de serpentins horizontaux [8].

SPIPE a été conçu pour résoudre, avec une taille mémoire réduite (70 000 B mots) compte tenu de la complexité du problème traité, l'équation de la chaleur en milieu continu par la méthode des éléments finis, soumis à des conditions aux limites et initiales spécifiques des stocks en terre. La rapidité relative du calcul (1,6 sec. CP par itération sur CDC 7600) est obtenue en traitant une géométrie semi-rigide et en limitant les entrées-sorties; l'utilisateur n'a le choix que des dimensions des mailles rectangulaires élémentaires du domaine discrétisé, qui comporte obligatoirement 77 éléments de base. La réduction de la taille mémoire est obtenue en traitant les éléments comportant un tuyau, par sous-systèmes (condensation statique) permettant ainsi de limiter considéra-

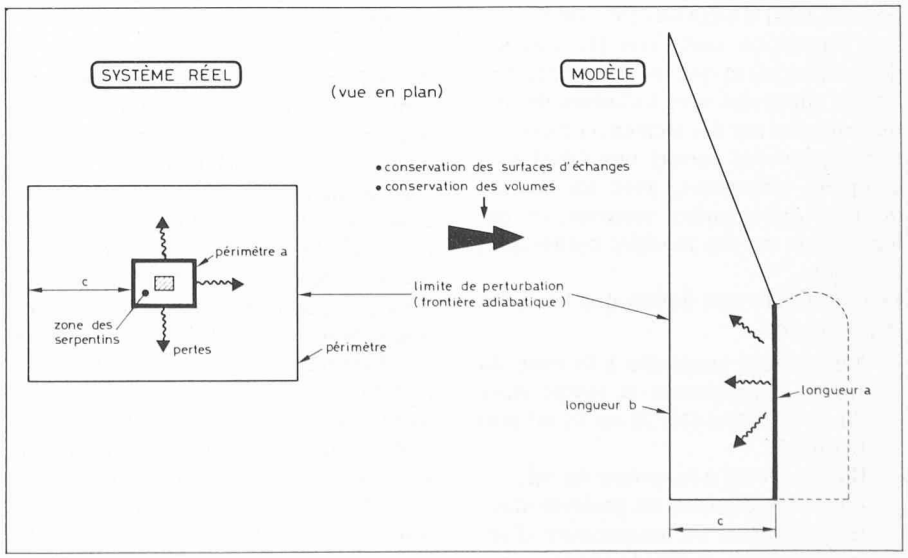

Fig. 2. — Schéma de la transformation pour la zone périphérique du stock.

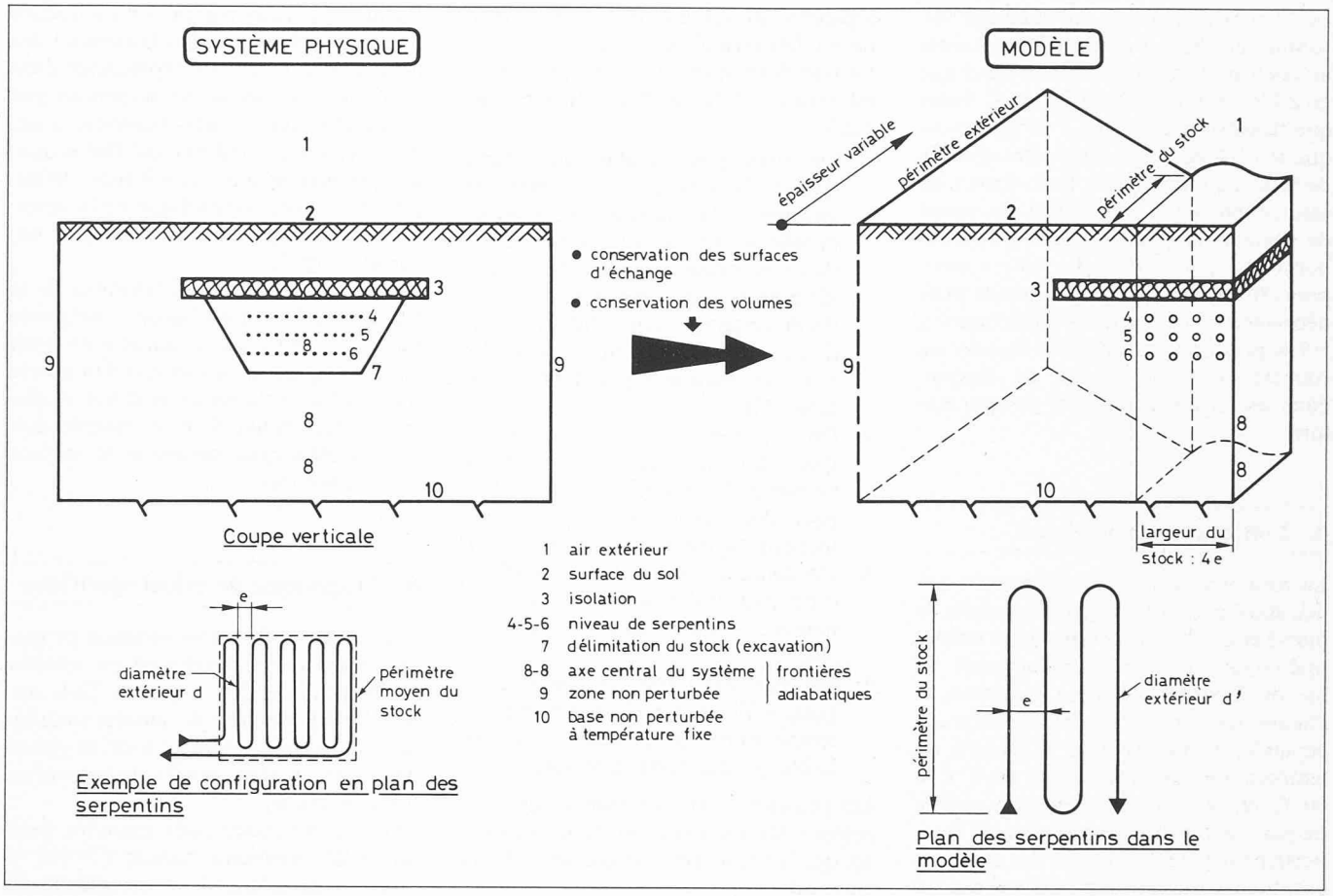

Fig. 3. — Système réel typique de stock en terre et modèle proposé.

blement la largeur de bande des matrices assemblées. De plus tous les éléments comportant un tuyau (dans la version standard 20 au maximum, soit 5 niveaux de 4 tuyaux représentatifs) sont de taille et de caractéristiques thermiques identiques, ce qui permet de ne considérer qu'une matrice élémentaire de conductibilité et de capacité pour les sous-systèmes comportant un tuyau.

La résolution des matrices assemblées utilise la méthode de Gauss pour des matrices symétriques à structure en bande.

La spécificité du programme SPIPE réside principalement dans le fait que le nombre total d'éléments finis de base et leur répartition sont fixes (11 couches de 7 éléments) et que les conditions aux limites autorisées sont localisées de manière interne sur des éléments précis.

Cette spécificité permet une simulation complète interactive, avec un jeu de données extrêmement restreint, ce qui n'est pas le cas des modèles numériques classiques.

Les conditions aux limites que l'on peut imposer sont:

— température constante à la base du réseau, représentant la température du sol profond (10, 20 ou 30 m) non perturbé;
— flux convectif à la surface du sol;
— puissance dissipée ou prélevée dans les serpentins ou température d'entrée au stock du fluide (dans ce cas on définit un coefficient de transfert eau-tube-sol, qui peut permettre d'étudier l'influence d'un éventuel vide d'air entre tuyau et sol, dû à un décollement de ce dernier). L'isolation peut être disposée de manière quelconque.

L'ensemble de la démarche qui a conduit au développement de ce programme, un mode d'emploi détaillé, des exemples d'utilisation et le listage complet du programme Fortran IV sont donnés dans la référence [8].

7. Simulation du stock en terre de Marly

A l'aide de ce programme, nous avons simulé le comportement du stock en terre de 350 m^3 de Marly, présenté précédemment par MM. Chuard et al. [1].

Ceci avait principalement pour but de tester la transformation topologique proposée. Du fait du pas de temps d'acquisition des mesures à Marly (1 jour), il n'est pas possible de tester le calcul du phénomène local. Ceci sera effectué prochainement suite à des mesures ponctuelles détaillées pendant 1 ou 2 jours à Marly. Par contre le phénomène global qui est le plus concerné par la transformation topologique du modèle peut être étudié en imposant la température moyenne de l'air extérieur et les puissances moyennes d'injection ou de soutirage durant les pas de temps considérés (dans notre cas nous avons choisi un pas de temps de 15 jours).

Etant donné que les caractéristiques thermiques du sol de Marly n'étaient pas connues [1], elles ont constitué les principaux paramètres de calage du modèle.

La figure 4 représente la comparaison synoptique des résultats du calcul par le programme SPIPE et les mesures en ce qui concerne l'évolution sur un an de la température dans le stock et à sa périphérie [1]. On remarque que les courbes calculées sont en très bon accord avec les mesures et, sauf pour les points 9 et 10 où la correspondance spatiale entre modèle et réalité n'est qu'approchée, le point 6 où le découpage grossier du réseau d'éléments finis influence grandement le résultat et pour le point 12 qui se trouve en zone non perturbée par le stock à 1,50 m de profondeur, où une influence de l'air extérieur sur la mesure apparaît prépondérante par suite de la technique de mesures utilisée [1].

Notons encore que le champ de températures initiales n'était pas connu à Marly (les mesures ont commencé après quelques jours d'essai) et que de ce fait nos avons dû admettre une température moyenne dans tout le domaine de 7,5 °C.

Afin d'obtenir cette relativement bonne concordance entre mesures et simulation, les caractéristiques thermiques moyennes des sols et de l'isolation ont été fixées ainsi:

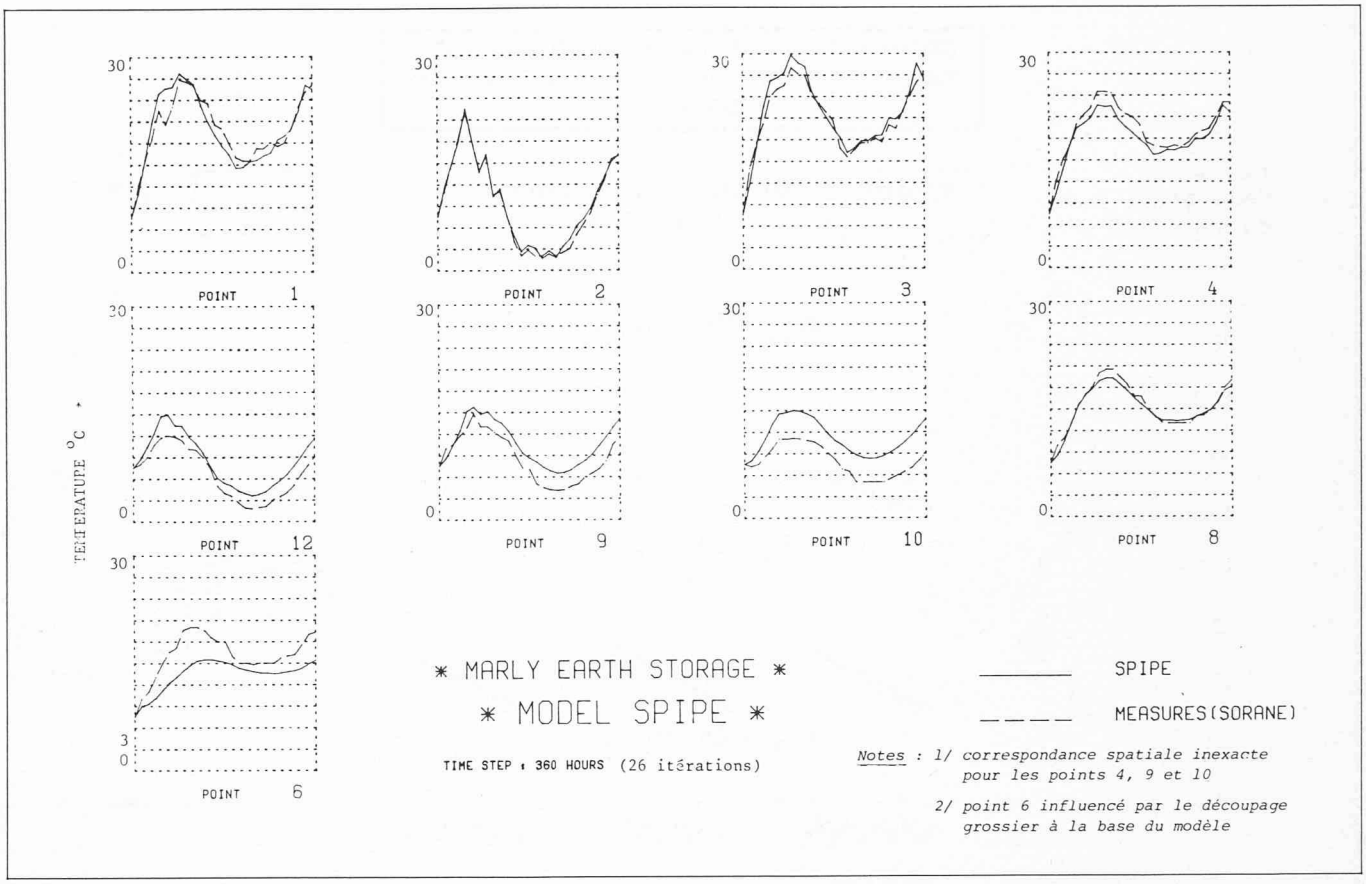

Fig. 4. — Comparaison synoptique des résultats de SPIPE avec les mesures pour le prototype de Marly.

$\lambda = 2{,}1$ W/m K $\rho C \simeq 1{,}8$ MJ/m^3 K pour les sols (en moyenne)

$\lambda = 0{,}08$ W/m K et $\rho C = 0{,}1$ MJ/m^3 K pour l'isolation.

Les caractéristiques des sols semblent en bon accord avec les valeurs que l'on peut attribuer au sol de Marly à partir des abaques de Kersten, pour une teneur en eau de l'ordre de 20% (mesurée à Marly après ces simulations). Pour un limon de même poids spécifique apparent sec, on trouverait un effet 1,9 W/m K et pour un sable environ 2,5 W/m K. Seule une mesure de ces caractéristiques pour le sol réel de Marly (gravier sableux argileux avec pierres) pourrait confirmer ou infirmer ce résultat.

Quant à l'isolant, il faut remarquer que la valeur λ trouvée par calage est pratiquement le double de la valeur λ généralement admise pour le polystyrène expansé. Trois raisons nous persuadent que ceci est néanmoins la valeur de l'isolant in situ: premièrement le polystyrène utilisé à Marly est reconstitué à partir de déchets, deuxièmement les joints entre blocs [1] constituent des «ponts de froid» et enfin l'isolant était très humide lorsqu'une tranchée, pratiquée dans le stock récemment, l'a mis à jour [1].

Ceci montre qu'il convient d'être prudent sur les caractéristiques attendues d'un tel isolant enterré, ainsi que sur les valeurs «en grand» des conductibilités thermiques des sols.

Le modèle SPIPE a été utilisé pour prédire les températures du stock de Marly après 45 jours d'une charge continue de 12 kW. La température prédite au centre du stock était de 59,8 °C alors que la température mesurée a été de 60 °C. Le calage des paramètres semble donc être correct puisque testé sur *deux expériences indépendantes.*

Par contre le modèle et sa transformation ne seraient pleinement validés que lorsque *deux stocks indépendants* auront été simulés et que les caractéristiques thermiques des sols auront pu être déterminées soit in situ, soit sur échantillons.

8. Optimalisation de la répartition de l'isolant pour un stock donné

A l'aide du modèle développé, une recherche de la répartition optimale de l'isolant a été effectuée pour un stock donné de 3500 m^3. Les puissances injectées dans le stock et soutirées du stock, déduites d'un modèle de simulation d'une chaîne énergétique solaire développé par Sorane SA et incorporant un modèle simple de calcul du stock en terre, ont été considérées comme données du problème, de même que la température de l'air extérieur.

Les températures dans le stock évoluent typiquement entre 50-60 °C en fin de charge (septembre) à 5-10 °C en fin de décharge car une pompe à chaleur est utilisée.

Le problème de la répartition optimale a donc été posé comme suit: étant donné une géométrie de stock et des puissances injectées et soutirées que l'on admet constantes quelle que soit la répartition d'isolant (hypothèse simplificatrice), comment répartir un volume donné d'isolant pour minimiser les pertes thermiques du stock?

En évitant de devoir choisir une définition arbitraire pour un «rendement de stockage», nous avons représenté la température moyenne de décharge du stock comme variable principale (fig. 5) en fonction de différentes répartitions d'isolation (450 m^3 dans tous les cas).

Bien que la relation dynamique entre le stock et la chaîne énergétique ait été simplifiée, on peut faire les remarques générales suivantes:

— il ne faut pas exagérer le débordement latéral de l'isolant si on ne prévoit pas d'isoler le fond et les côtés du stock (cas 1));

— il est préférable d'effectuer un recouvrement latéral du stock plutôt qu'un débordement latéral (cas 2) par rapport à 1));

— si on prévoit d'isoler le dessus et les côtés du stock en tout ou partie, le meilleur rapport entre épaisseur d'isolant dessus et épaisseur d'isolant sur le côté est 2 (cas 2), 3) et 4));

— isoler tout autour du stock est dans tous les cas la meilleure solution;

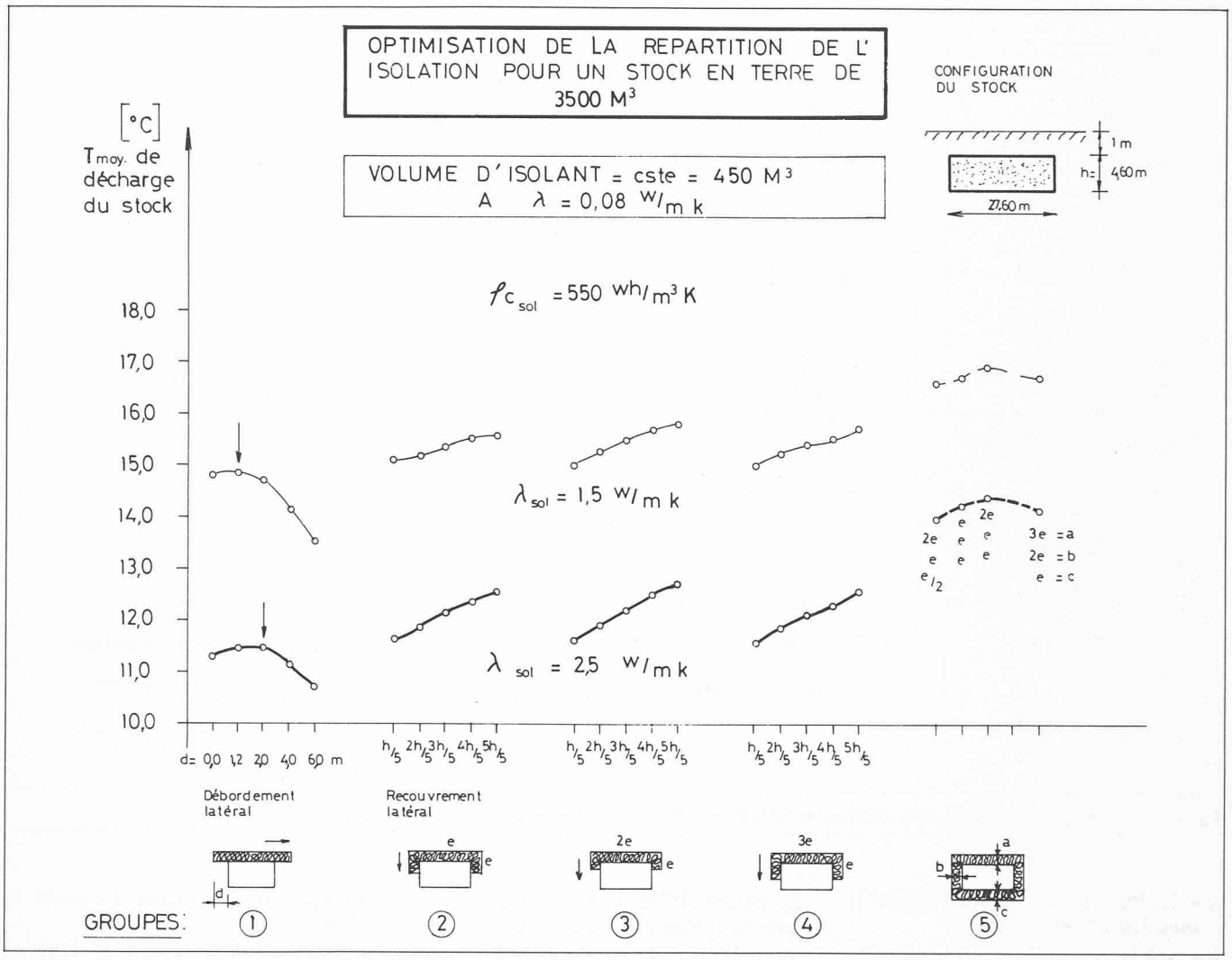

Fig. 5. — Optimalisation de la répartition de l'isolation pour un stock en terre de 3500 m³.

— la répartition la plus favorable consiste à disposer l'isolant en double couche sur le dessus, et en couche simple sur les côtés et sur le fond (cas 5)).

Ce dernier résultat est d'ailleurs confirmé par la très remarquable étude de J. Claesson et B. Eftring [12] dans laquelle ces auteurs étudient la distribution optimale d'isolation de locaux en contact avec le sol, minimisant les flux de chaleur en régime permanent.

Soulignons enfin que nous avons effectué une optimalisation à *volume d'isolant* donné, alors que si les propriétés mécaniques demandées aux isolants diffèrent suivant leur localisation, une optimalisation à *coût d'isolation* donné devra être pratiquée.

9. Conclusions

Nous avons montré qu'il est possible de simuler l'interaction des phénomènes locaux et globaux caractérisant les stocks saisonniers de chaleur en terre, en proposant une transformation géométrique du système réel.

Le modèle par éléments finis développé est très simple d'utilisation du fait de sa spécificité.

Références

[1] Chuard, P., Chuard, D., Mercier, C., Hadorn, J. C. *Stock de chaleur en terre pour les systèmes solaires, résultats expérimentaux.* Ingénieurs et architectes suisses, N° 15-16/1982.

[2] Dalenbäck, J. O., Gabrielsson, E., Ludvigsson, B. *Three Swedish group solar heating plants with seasonal storage.* Swedish Council for Building Research, Document D5: 1981.

[3] Iris, P. *Experimental Study of Heat Storage in Aquifer.* Procedings of an international TNO-Symposium edited by C. Den Ouden, Amsterdam, 5-6 nov. 1980. Martinus Nijhoff Publishers.

[4] Tsang, C. F. *Theoretical studies in long-term thermal energy storage in Aquifers.* (ibid.)

[5] Saugy, B., Hadorn, J. C., Bloch, G. *Large-scale underground heat storage.* IEA Conference on New Energy Conservation Technologies, Berlin, 6 avril 1981.

[6] Chuard, P., Hadorn, J. C. *IEA Task VII.* Selection of heat storage models, sept. 1982, Rapport interne IEA (distribution 1983).

[7] Hadorn, J. C., Saugy, B. *Simulation d'un stockage souterrain de chaleur en milieu poreux saturé.* 7e Symposium international de l'AIRH. Comité des milieux poreux , Toulouse, 26-28 août 1980.

[8] Hadorn, J. C., Saugy, B. *Stockage souterrain de chaleur en terre humide.* Développement d'un modèle de calcul et comparaison avec des mesures in situ. IENER, EPFL, Sorane SA, Rapport N706.102. Lausanne, 2 juillet 1981.

[9] Mathey, B. *Le stockage souterrain de l'énergie solaire. Première partie: le stockage à basse température.* Journal de la Société suisse pour l'énergie solaire (SSES), mars 2/1980.

[10] Blaude, P. *Use of the ground as a cold source for heat pump. Development of a calculation model.* Nordic Symposium on Earth Heat Pump Systems. Göteborg, Sweden, 15-16 octobre 1979.

[11] Claesson, J., Dunand, A., Vachaud, G. *Mathematical analysis of heat extraction from the ground by horizontal pipes for linear systems.* French-Swedish Conference on Solar Energy Systems and Seasonal Energy Storage, Stockholm, 22-24 octobre 1980.

[12] Claesson, J., Eftring, B. *Optimal distribution of thermal insulation and ground heat losses.* Swedish Council for Building Research, Document D33: 1980.

[13] Stauber, P. *Flux de masse et flux de chaleur dans un sable sous l'influence d'un gradient de température.* In: Rapports scientifiques et techniques sur le comportement des nappes souterraines, N° IX. CHYN, IENER, LMS, Lausanne-Neuchâtel, nov. 1981.

De tels modèles pourraient s'avérer à l'avenir très intéressants, dans la mesure où ils permettent de déterminer rapidement les paramètres de modèle numérique ou analytique très simple (calcul de résistances capacitives équivalentes ou de facteurs de réponses du stock à des sollicitations unitaires, par exemple), pour des cas types donnés.
Ils ouvrent également la voie vers des modèles complexes disponibles sur des ordinateurs de bureau.

Remerciements
Cette étude, effectuée entre février et avril 1981 à l'IENER, entre dans le cadre de la tâche VII (Installations centralisées de chauffage solaire avec stockage saisonnier) de l'Agence Internationale de l'Energie. La participation suisse et les travaux de cette tâche sont financés par le NEFF, sous la direction de l'OFEN, que nous tenons à remercier particulièrement. Nous remercions également M. B. Rebora, de l'IENER, pour les conseils lors de l'élaboration du programme.

Adresse des auteurs:
Jean-Christophe Hadorn, ingénieur civil EPFL-SIA
Sorane SA
52, rte du Châtelard
1018 Lausanne

Bernard Saugy, Dr. ès sciences, adjoint scientifique
Institut d'économie et aménagements énergétiques (IENER)
EPFL Ecublens
1015 Lausanne

Où en sont les travaux de révision des règlements concernant les honoraires SIA?

Rapport d'activité automne 1982

par Hans-Rudolf A. Suter, Bâle

1. Révision générale des règlements concernant les honoraires

Les projets des nouveaux règlements d'honoraires ont été soumis à l'opinion des différents milieux intéressés au cours de la période comprise entre octobre 1981 et mars 1982. Les nouveaux règlements proposés n'ont pas manqué de soulever un grand intérêt. Plus de 400 prises de position nous ont en effet été soumises.
L'opinion générale qui se dégage de la procédure d'enquête peut être qualifiée de représentative, tant selon le critère matériel que selon le critère formel.
Mandants et mandataires se sont prononcés en nombre sensiblement égal et avec la même pondération sur l'ensemble des règlements soumis à leur appréciation.
Le principe de l'élaboration de règlements nouveaux a été accepté. Le travail effectué dans le cadre d'une révision générale et coordonnée de tous les nouveaux règlements par les Commissions de révision est apprécié. La procédure choisie se confirme être une voie possible.
Quelques aspects essentiels se dégagent de l'analyse des objections:

1. *Questions juridiques*

La rédaction entièrement nouvelle des dispositions générales, et plus particulièrement les termes de ces dispositions ainsi que leur étendue, fait l'objet d'approbations, mais aussi de critiques de la part des intéressés.

2. *Questions tarifaires*

Montant des honoraires. Les courbes des honoraires, établies par calcul rétroactif, sont en principe jugées représentatives. Par contre, la question s'est posée de savoir s'il ne pouvait résulter des cumuls d'honoraires dus à l'action conjointe des nouveaux descriptifs des prestations d'une part, et des nouveaux tableaux des degrés de difficulté d'autre part. La délimitation entre prestations de base et prestations additionnelles soulève également des questions. Par ailleurs, l'ampleur des interventions de spécialistes mandatés et, en corollaire, leur impact sur le montant total des honoraires, fait l'objet de controverses.
En outre, la compensation du renchérissement et la méthode de l'adaptation annuelle des tarifs constituent un point important de contestation.
La nouvelle grille des honoraires d'après le temps employé est approuvée.

3. *Problèmes de coordination*

La coordination entre les différents règlements d'honoraires doit encore être renforcée.
L'emploi de définitions claires pour tous les descriptifs de prestations est souhaité. Ainsi, par exemple, pour:
— les fonctions attribuées au bureau directeur;
— les coûts de la construction déterminants pour les honoraires;
— ou encore pour les frais annexes.

4. *Améliorations rédactionnelles*

La version en langue allemande et surtout la version en langue française ont fait l'objet d'un grand nombre de propositions tendant à améliorer leur qualité rédactionnelle. Dans toute la mesure du possible, il sera tenu compte de ces suggestions au moment de la nouvelle rédaction.

Seul le règlement des honoraires des aménagistes n° 110 devra subir un remaniement complet, sa structure même étant remise en question.
L'étude des objections est assurée sans relâche depuis le printemps 1982 par la Commission de révision. L'adaptation des règlements 102, 103 et 108 nécessite une procédure parfaitement coordonnée, basée sur une délégation de tâches spécifiques et sur des réunions fréquentes au cours desquelles se concertent tous les présidents des commissions de révision. Parallèlement aux personnes déléguées aux tâches spécifiques et aux commissions de révision, des commissions de rédaction ont été désignées — tant pour la version en langue allemande que pour la version en langue française — en vue de préparer un texte prêt à la diffusion.
Le but de la SIA est de concevoir des règlements d'honoraires qui soient effectivement appliqués dans la pratique.
Dans cette optique, il s'agit de trouver un consensus favorable auprès des différents milieux dont l'importance est prépondérante — et dont l'opinion fut sollicitée à l'occasion de la procédure d'enquête relative aux projets de règlements — en vue de dégager un accord acceptable pour tous les intéressés.
Dès le printemps 1982, il est apparu que, compte tenu de l'ampleur prise par la procédure d'enquête, la mise en vigueur des nouveaux règlements, initialement envisagée pour le 1er janvier 1983, devrait être repoussée à une date ultérieure. En effet, même si nous attendons avec une certaine impatience la diffusion des nouveaux règlements concernant les honoraires, cela ne saurait nous conduire à abréger l'étude des suggestions reçues, la qualité de l'ensemble de la révision étant primordiale.
Les commissions de révision font, avec diligence, un travail en profondeur qui devrait voir son aboutissement dans la mise au point des projets définitifs amendés en décembre 1982.
Au cours d'une nouvelle étape, les projets amendés de règlements d'honoraires seront communiqués après aménagement à l'ensemble des partenaires ayant exprimé une première objection, en vue de recueillir leur nouvelle prise de position. Les objections qui seraient mainte-